

ISSN 2224-1159

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 2 (51) 30 июня 2016 г.



ВОЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

ВЕСТНИК ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

№ 2 (51) 30 июня 2016 г.

**Военный научно-
теоретический журнал**

Издается с 2003 года

Адрес редакции:

220057, г. Минск-57, учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», главный корпус, комн. № 264 А.
Тел./факс: 287-45-15.

Издатель:

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/224 от 19.03.2014.

№ 2/81 от 19.03.2014.

Набор и верстка:

Демидова А. К.

Дизайн обложки:

Мацкевич А. Н.

Печать:

ЛП № 02330/76

от 27.03.2014 г.

Подписано в печать 14.06.16 г.

Формат 60×84/8. Бумага писчая.

Гарнитура «Таймс». Печать ризография. Усл. печ. л. 14,65.

Тираж 100 экз. Зак. 228.

Отпечатано в типографии учреждения образования

«Военная академия Республики Беларусь».

220057, Минск-57.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Лапука О. Г., *главный редактор*, доктор технических наук, профессор;

Малкин В. А., *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор;

Гришкевич М. М., *секретарь*, кандидат военных наук, доцент;

Белько В. М., кандидат технических наук, доцент;

Вашкевич В. Р., кандидат технических наук, доцент;

Гринюк В. И., кандидат военных наук, профессор;

Калитин С. Б., кандидат технических наук, доцент;

Колодяжный В. В., доктор военных наук, профессор;

Ксенофонтов В. А., кандидат философских наук, доцент;

Куренев В. А., доктор технических наук, профессор;

Лебедкин А. В., доктор военных наук, профессор;

Осипов Г. А. кандидат военных наук, доцент;

Павлович В. С., доктор физико-математических наук, профессор;

Седышев С. Ю., кандидат технических наук, доцент;

Чубрик В. Г., кандидат военных наук, доцент.

СОДЕРЖАНИЕ

Основы военной науки и военного строительства

Анеметов А. А., Бандык А. П., Василевский В. Б. Обоснование способа поиска диверсионно-разведывательных групп противника и незаконных вооруженных формирований.....	3
Курмашов А. Н. Тенденции развития тактики подразделений внутренних войск при оказании содействия ОВД в обеспечении общественного порядка.....	14
Мещеряков С. А. Оценка командиром механизмов образования толпы и бесконтактный способ действий сил правопорядка по пресечению массовых беспорядков.....	20
Пестов Д. А., Избаш М. Ю. Обоснование способов применения беспилотных авиационных комплексов в составе разведывательно-огневой системы	30
Шлакунов В. В. Методика оценки эффективности огневого поражения противника системами высокоточного оружия с использованием математической модели обобщенного потребителя.....	37

Системный анализ и информационные технологии в военном деле

Гусинский А. В. Обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения при определении параметров сигналов и характеристик цепей в диапазоне сверхвысоких частот.....	49
Егоров Ю. Н., Гладейчук В. В. Оценка устойчивости численного решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова – Боголюбова.....	55
Жук А. А., Булойчик В. М. Оптимизация распределения ресурсов посредством рекуррентной нейронной сети.....	62
Шарамет А. В., Трофименков А. Л., Морозов Д. В. Математическая модель орбитального движения навигационного космического аппарата.....	71

Общетеоретические вопросы разработки и совершенствования вооружения и военной техники

Бойкачев П. В., Дубовик И. А. Обзор и анализ классических и модифицированных функций, аппроксимирующих частотные характеристики радиоэлектронных цепей.....	78
Бусел М. О., Калинин А. А., Романович А. Г. Синтез конформной антенной решетки с произвольным расположением излучателей.....	87
Быков Р. В. Особенности определения параметров движения объекта с непрерывным акустическим сигналом.....	95
Лапука О. Г., Рахоцкий Д. А., Ростов А. А. Анализ технических характеристик радиолокационных станций обзора земной поверхности как объектов радиоэлектронного подавления.....	102

Разработка, модернизация и эксплуатация вооружения и военной техники

Ларкин А. В., Комяк А. В., Пинчук К. И., Мацкевич А. Н. Оптимизация процесса обеспечения температурного режима радиоэлектронной аппаратуры при проведении отбраковочных испытаний.....	113
--	-----

Проблемы военной педагогики, воинского обучения и воспитания

Коклевский А. В. Обобщенная учебная задача как средство формирования и диагностики социально-профессиональной компетентности будущих офицеров.....	118
--	-----

ОСНОВЫ ВОЕННОЙ НАУКИ И ВОЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 355.1

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОИСКА ДИВЕРСИОННО-РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ ГРУПП ПРОТИВНИКА И НЕЗАКОННЫХ ВООРУЖЕННЫХ ФОРМИРОВАНИЙ

А. А. Анеметов; А. П. Бандык, кандидат военных наук, доцент;
В. Б. Василевский, кандидат военных наук, доцент*

В статье предлагается обоснование способа поиска диверсионно-разведывательных групп противника и незаконных вооруженных формирований войсковыми группами применительно к одной из возможных поисковых ситуаций – поиск в заданном районе обнаружения.

In article the technique Substantiations of a way of search of diversion-prospecting groups of the opponent and the illegal armed formations Army groups with reference to one of possible search situations – search in detection preset area.

Основными особенностями вооруженных конфликтов современности стали очаговый характер боевых действий, отсутствие сплошной линии фронта как рубежа противостояния сторон, постоянного непосредственного соприкосновения войск, «размытые» границы между фронтом и тылом, наличие ежедневной и ежечасной скрытой и открытой борьбы, действия в обстановке, когда «повсюду фронт».

В современных условиях в армиях ведущих зарубежных государств в ходе военных действий важное значение уделяется применению воздушных десантов (ВД) и диверсионно-разведывательных формирований (ДРФ), а также иррегулярных формирований, которые играют главную роль в достижении успеха в операциях. Следовательно, при подготовке и в ходе агрессии в целях дестабилизации обстановки, затруднения проведения мобилизационных мероприятий и оперативного развертывания войск, изоляции поля боя, затруднения осуществления маневра, нарушения управления войсками и оружием, работы тыла и другое противник будет осуществлять широкомасштабные диверсионно-разведывательные, террористические и другие подрывные акции в полосе ответственности оперативных объединений (соединений).

Опыт боевых действий в Афганистане (1979–1989), на Северном Кавказе, в Персидском заливе и Сирии показывает, что незаконные вооруженные формирования (НВФ) преподносили немало «сюрпризов» войскам, которые во многих случаях оказывались недостаточно подготовленными для ведения борьбы с ними [1]. И сегодня борьба с диверсионно-разведывательными силами (ДРС) противника и НВФ в ходе подготовки и ведения боевых действий представляет собой сложную задачу, при этом одним из сложнейших этапов борьбы с ними является их обнаружение, поиск и уничтожение.

Исследованием установлено, что выбор способа ведения боевых действий по поиску и уничтожению ДРС противника и НВФ следует осуществлять исходя из складывающейся поисковой ситуации в соответствии с наиболее целесообразным способом ведения поиска. Под поисковой ситуацией понимают обстановку и условия проведения поиска, которые характеризуются наличием и объемом информации о составе, местоположении, направлении и скорости движения объекта поиска, на их основании определяются размеры района поиска и задачи войскам [2]. При этом поисковая ситуация может характеризоваться выбором способа осмотра местности, траектории движения и построения боевого порядка сил и средств, привлекаемых к поиску.

Анализ опыта борьбы с ДРС противника и НВФ [1, 3] показал, что способ осмотра местности в ходе поиска может быть сплошным, выборочным, закономерным и случайным.

Так, при сплошном осмотре обследуется вся местность района, в котором, по имеющимся данным, укрывается противник. При выборочном осмотре обследуются отдельные участки местности, отдельные направления, часть населенного пункта, отдельные здания и сооружения, где наиболее вероятно нахождение противника, или последовательно по участкам весь район. Закономерный осмотр, как правило, основывается на однослойном или строго упорядоченном обследовании местности, обеспечивающем достоверный просмотр всей площади района поиска с одноразовым попаданием каждой точки района в зону обнаружения [2]. Кроме того, при закономерном осмотре поисковые усилия равномерно распределяются во всем районе поиска по участкам с циклическим повторением их осмотра через разные промежутки времени. Случайный осмотр – это обследование местности, при котором траектория движения подразделения, ведущего поиск, носит случайный (хаотический) характер. В процессе поиска с одинаковой вероятностью могут обследоваться просмотренные и несмотренные участки района [2].

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что каждому типу поисковой ситуации могут быть присущи несколько способов ведения поиска. Рассмотрим их возможные варианты.

Поиск обычно ведется в неблокированном или блокированном районе, чему соответствуют условия, характеризующие два основных типа поисковых ситуаций: поиск в заданном районе и поиск в районе обнаружения. Поскольку для описания указанных типов поисковых ситуаций потребуется изложение большого количества материала, в рамках данной статьи рассмотрим лишь особенности ведения поиска войсковыми группами в заданном районе.

Поиск в заданном районе, как правило, осуществляется в целях обнаружения любых типов объектов: точечных (площадных), стационарных (малоподвижных, подвижных).

Для поиска *точечного стационарного объекта* (например, тайник) или *точечного малоподвижного объекта* (например, небольшое по численности боевое формирование ДРС противника и НВФ в укрытии) могут назначаться поисковые подразделения, действующие цепью, или разведывательно-поисковые группы, ведущие поиск дозорами. Поисковые подразделения обычно выполняют задачу в составе группы поиска. Разведывательно-поисковые группы (РПГр) ведут поиск самостоятельно. Различают четыре основных варианта ведения поиска в заданном районе для обнаружения точечного (стационарного или малоподвижного) объекта: сплошной, односторонний, закономерный (однослойный) поиск цепью в неблокированном районе; сплошной, параллельный, закономерный (упорядоченный) поиск дозорами в неблокированном районе; сплошной, двусторонний, закономерный (однослойный) поиск цепью в неблокированном районе; сплошной, встречный, закономерный (упорядоченный) поиск дозорами в неблокированном районе.

Поиск *площадного стационарного объекта* (например, базовый лагерь НВФ) или *площадного малоподвижного объекта* (например, район сосредоточения ДРС противника или НВФ) обычно ведется РПГр в составе подразделения. В рассматриваемом случае РПГр ведет разведку назначенного района для обнаружения противника и наведения главных сил, действующих войсковыми группами (окружения, атакующей и др.). Существует четыре основных варианта ведения поиска в заданном районе для обнаружения площадного (стационарного или малоподвижного) объекта.

Поиск *подвижного объекта* (например, небольшого по численности боевого формирования ДРС противника и НВФ), как правило, осуществляется в блокированном районе в составе войсковых групп блокирования и поиска. Блокирующие подразделения ведут наблюдение за противником на рубеже блокирования, поисковые – осматривают местность, действуя цепью.

Вместе с тем в условиях ограниченного времени и недостаточного количества сил и средств, характеризующих этот тип поисковой ситуации, они могут оказаться малоэффективными. Так, в рассматриваемой ситуации велика вероятность того, что обнаруженный противник окончательно уклонится от преследования и выйдет из района

поиска. Поэтому блокирование района поиска зачастую придется выполнять в короткие сроки выходом основной части имеющихся в наличии подразделений на предполагаемые направления движения противника впереди него с последующим развертыванием на выгодном рубеже.

Таким образом, выбор наилучшего способа ведения поиска и уничтожения ДРС противника и НВФ изначально целесообразно осуществлять путем логических умозаключений, а затем уточнять с помощью соответствующих математических расчетов.

Анализ имеющихся и используемых в штабах методик для проведения данных математических расчетов показывает, что они применимы лишь для оценки ведения поиска, осуществляемого разведывательными подразделениями, и не позволяют провести математическое обоснование выбора наилучшего способа ведения поиска ДРС противника и НВФ войсковыми группами. Кроме того, необходима разработка методик оценки эффективности поиска, ведущегося войсковыми группами для обнаружения подвижного объекта (небольшого по численности боевого формирования ДРС противника и НВФ) применительно к двум основным типам поисковых ситуаций: поиск в назначенном районе и поиск в районе обнаружения.

В основу этих методик целесообразно положить подход, заключающийся в определении и оценке показателей, характеризующих размеры района поиска и особенности применения войсковых групп (характер осмотра местности, траектории движения и построение их боевого порядка). Алгоритм решения задачи по определению количества воинских формирований, требуемых для выполнения задачи в заданном районе, и оценки эффективности поиска по различным вариантам применения войсковых групп представлен на рисунке 1. Он включает четыре основных блока.



Рисунок 1. – Алгоритм решения задачи по определению количества воинских формирований, требуемых для выполнения задачи в заданном районе, и оценки эффективности поиска по различным вариантам применения войсковых групп

При формировании исходных данных для проведения расчетов по каждому варианту необходимо воспользоваться данными, представленными в таблицах 1–3.

Таблица 1. – Обозначение, размерность и значение исходных данных, используемых при определении основных показателей поиска, ведущегося войсковыми группами в заданном районе

Исходные данные	Обозначение	Размерность	Значение
Площадь района поиска (общая)	$S_{\text{п}}$	км ²	Определяется по карте
Протяженность рубежа блокирования (общая)	$L_{\text{бл}}$	км	Определяется по карте
Ширина полосы поиска (общая)	$L_{\text{п}}$	км	Определяется по карте
Глубина поиска (общая)	$G_{\text{п}}$	км	Определяется по карте
Продолжительность поиска за первые сутки	$T_{\text{п}}$	ч	Определяется по формулам: $T_{\text{п}} = t_{\text{зах}} - t_{\text{гот}}$ или $T_{\text{п}} = t_{\text{зах}} - t_{\text{восх}}$, где $t_{\text{зах}}$ – время захода солнца, ч; $t_{\text{восх}}$ – время восхода солнца, ч; $t_{\text{гот}}$ – время готовности, ч
Количество военнослужащих в подразделении i -го типа, привлекаемых к выполнению задачи	$n_{\text{вс подр}}$	чел.	Определяется по таблице 2
Количество военнослужащих в одном войсковом наряде	$n_{\text{вс}}^{\text{вн1}}$	чел.	2–3 чел.
Расстояние между военнослужащими при блокировании	$d_{\text{Нбл}}$	км	На закрытой местности – около 25 м; на открытой местности – около 50 м
Расстояние между военнослужащими при поиске цепью	$d_{\text{Нп}}$	км	На укороченных интервалах – около 8 м; на интервалах прямой видимости – около 40 м
Скорость поиска цепью	$v_{\text{н}}$	км/ч	На закрытой местности – 1–1,5 км/ч; на открытой местности – 2–4 км/ч
Средняя дальность обнаружения	$D_{\text{об}}$	км	На закрытой местности – около 40 м; на открытой местности – около 170 м

Таблица 2. – Количество военнослужащих, которое может быть выделено подразделением для выполнения задач по поиску и уничтожению ДРС противника и НВФ

Принадлежность подразделения	Наименование подразделения и количество военнослужащих в нем, чел.	Количество военнослужащих, привлекаемых к выполнению задачи, чел.
Подразделения территориальных войск (ТВ)	Взвод ТВ – 25, из них: КВ – 1; водитель – 3	21
	Рота ТВ – 80, из них: управление – 5; КВ – 3; водитель – 9	63 (из них резерв – 7)
Подразделения внутренних войск	Взвод милиции – 19, из них КВ – 1	18
	Рота милиции – 60, из них: управление – 3; КВ – 3	54 (из них резерв – 9)
	Взвод СпН – 22, из них КВ – 1	21
	Рота СпН – 69, из них: управление – 3; КВ – 3	63 (из них резерв – 7)
Мобильные подразделения (на БМД/БТР)	Мобильный взвод – 21, из них: КВ – 1; экипаж – 6	14
	Мобильная рота – 70/69, из них: управление – 7/6; КВ – 3; экипаж – 18	42 (из них резерв – 5)

Таблица 3. – Обозначение, размерность и значение искомых показателей поиска, ведущегося войсковыми группами в заданном районе

Исходные данные	Обозначение	Размерность	Значение
Количество подразделений для выполнения поставленной задачи	N	ед.	Определяется по формулам (1) и (2)
Количество подразделений для решения частной задачи блокирования	$N_{\text{подр}_{\text{бл}}}$	ед.	Определяется по алгоритму (рисунок 1)
Протяженность участка блокирования для подразделения i -го типа	$L_{\text{бл}_{\text{подр}_i}}$	км	Определяется по выражениям (8)–(10)
Количество подразделений для решения частной задачи поиска	$N_{\text{подр}_\Pi}$	ед.	Определяется по алгоритму (рисунок 1)
Ширина полосы поиска для подразделения i -го типа	$L_{\Pi_{\text{подр}_i}}$	км	Определяется по формуле (12)
Количество подразделений в резерве	$N_{\text{подр}_{\text{рез}}}$	ед.	Определяется по формуле (13)
МОЖ времени обнаружения объекта поиска за первые сутки	$T_{\text{об}}$	ч	Определяется по выражениям (14)–(16)
Производительность поиска для подразделения i -го типа	$u_{\text{подр}_i}$	км ² /ч	Определяется по формуле (18)

Критерием эффективности поиска принимается минимальное значение математического ожидания (МОЖ) времени обнаружения объекта поиска за сутки.

Рассмотрим математический аппарат для проведения расчетов определения МОЖ времени обнаружения объекта поиска за сутки.

1. Определение количества подразделений, требуемых для выполнения поставленной задачи (в дальнейшем – за расчетное воинское формирование принято подразделение ротного состава, не имеющее подразделений обеспечения).

Количество подразделений, требуемых для выполнения поставленной задачи, целесообразно рассчитывать исходя из условий блокирования по формулам:

для поиска в заблокированном районе:

$$N = N_{\text{подр}_{\text{бл}}} + N_{\text{подр}_\Pi} + N_{\text{подр}_{\text{рез}}}, \quad (1)$$

для поиска в неблокированном районе:

$$N = N_{\text{подр}_{\text{бл}}} + N_{\text{подр}_{\text{рез}}}. \quad (2)$$

Количество подразделений, требуемых для решения частной задачи блокирования, можно определить по алгоритму, представленному на рисунке 2.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом, искомая величина должна удовлетворять следующему условию:

$$L_{\text{бл}} \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{подр}_{\text{бл}}}} N_{\text{подр}_{\text{бл}_i}} L_{\text{бл}_{\text{подр}_i}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{подр}_{\text{бл}_i}}$ – количество подразделений i -го типа, ед.;

i – тип подразделения, осуществляющего блокирование.

Протяженность участка блокирования характеризует возможности подразделения i -го типа по блокированию и обуславливается значением величины эффективной ширины полосы обследования.

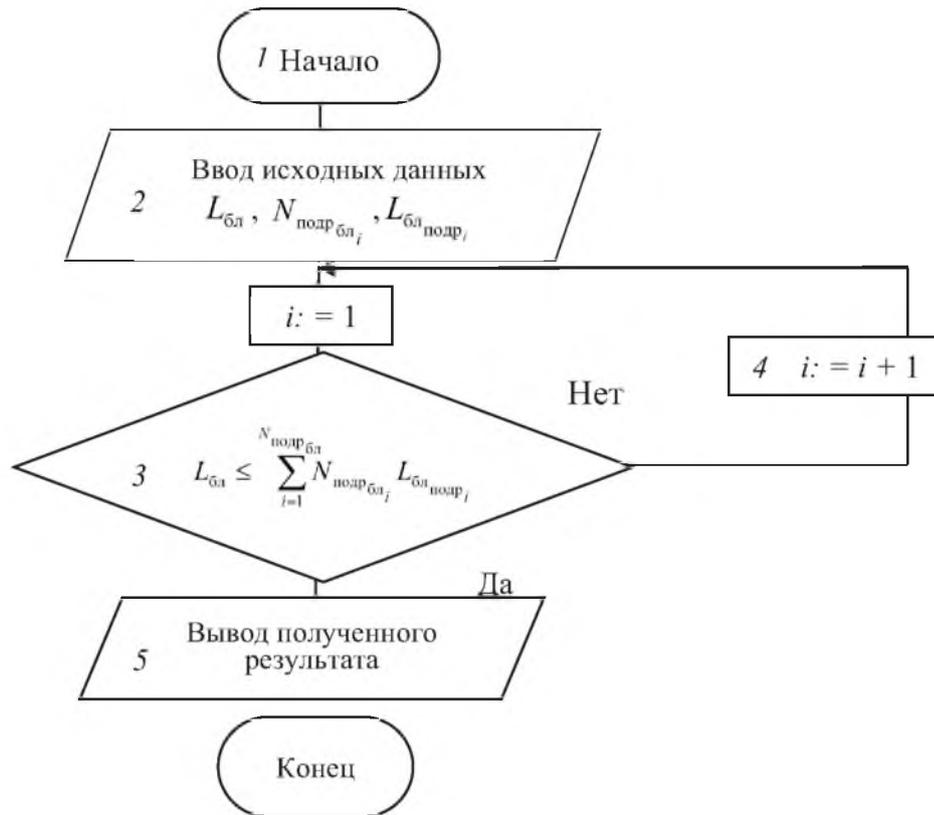


Рисунок 2. – Алгоритм расчета количества подразделений, требуемых для решения частной задачи блокирования

Поэтому для определения протяженности участка блокирования для подразделения i -го типа целесообразно воспользоваться формулой:

$$Ш_{п.о} = d_n (N_n - 1) + 2D_{об}, \quad (4)$$

где $Ш_{п.о}$ – эффективная ширина полосы обследования, км;

d_n – интервал между наблюдателями, км;

N_n – количество наблюдателей, выделяемых для выполнения задачи, ед;

$D_{об}$ – средняя ожидаемая дальность обнаружения, км.

Формула (4) верна для наиболее общего случая и, следовательно, нуждается в преобразовании применительно к конкретным условиям блокирования.

С учетом местности и наиболее типичных вариантов построения боевого порядка подразделений, осуществляющих блокирование, примем:

для подразделений, осуществляющих блокирование военнослужащими:

$$N_n = n_{вс_{подр}}, \quad (5)$$

подразделений, осуществляющих блокирование войсковыми нарядами на открытой или закрытой местности:

$$d_n = 2D_{об}, \quad (6)$$

для подразделений, осуществляющих блокирование войсковыми нарядами на труднопроходимой (лесисто-болотистой или болотистой) местности:

$$N_n = \frac{n_{вс_{подр}}}{n_{вс}}, \quad (7)$$

Тогда протяженность участка блокирования для подразделения i -го типа может быть определена по формулам:

для подразделений, осуществляющих блокирование военнослужащими:

$$L_{\text{бл.подр}_i} = d_{\text{н.бл}} (n_{\text{вс.подр}} - 1) + 2D_{\text{об}}, \quad (8)$$

для подразделений, осуществляющих блокирование войсковыми нарядами на открытой или закрытой местности:

$$L_{\text{бл.подр}_i} = 2 D_{\text{об}} n_{\text{вн.подр}} = \frac{2D_{\text{об}} n_{\text{вс.подр}}}{n_{\text{вс}}^{\text{вн}_1}}, \quad (9)$$

для подразделений, осуществляющих блокирование войсковыми нарядами на труднопроходимой (лесисто-болотистой или болотистой) местности:

$$L_{\text{бл.подр}_i} = \frac{n_{\text{вс.подр}}}{\text{Пл}_d} = \frac{n_{\text{вс.подр}}}{\text{Пл}_d n_{\text{вс}}^{\text{вн}_1}}, \quad (10)$$

где Пл_d – плотность лесных дорог (просек, троп) на 1 км рубежа блокирования, ед./км.

Расчетные значения протяженности участка блокирования для подразделений ВС, других войск и воинских формирований представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Расчетные значения протяженности участка блокирования для подразделений Вооруженных Сил, других войск и воинских формирований

Наименование подразделения i -го типа и количество в/с в нем, чел.	Количество в/с, привлекаемых к выполнению задачи, чел.	Значения $L_{\text{бл.подр}_i}$ при блокировании, км			
		военнослужащими		войсковыми нарядами	
		на закрытой местности	на открытой местности	на закрытой местности	на открытой местности
Подразделения территориальных войск					
Взвод – 25, из них: КВ – 1; водитель – 3	21	До 0,6	До 1,2	Около 0,7	Около 3
Рота – 80, из них: управление – 5; КВ – 3; водитель – 9; резерв – 7	56	До 1,5	До 3	Около 1,8	Около 8
Подразделения внутренних войск					
Взвод – 19, из них КВ – 1	18	До 0,5	До 1	Около 0,6	Около 2,6
Рота – 60, из них: управление – 3; КВ – 3; резерв – 9	45	До 1,2	До 2,4	Около 1,5	Около 6,5
Подразделения СпН ВВ МВД					
Взвод СпН – 22, из них КВ – 1	21	До 0,6	До 1,2	Около 0,7	Около 3
Рота СпН – 69, из них: управление – 3; КВ – 3; резерв – 7	56	До 1,5	До 3	Около 1,8	Около 8
Мобильные подразделения (на БМП/БТР)					
Взвод – 21, из них: КВ – 1; экипаж – 6	14	До 0,4	До 0,9	Около 0,5	Около 2
Рота – 70/69, из них: управление – 7/6; КВ – 3; экипаж – 18; (резерв – 5)	37	До 1	До 2	Около 1,2	Около 5,5

Примечания:

1. Значения ($L_{\text{бл. подр}_i}$) рассчитаны для мобильных подразделений – без учета экипажей боевых машин; подразделений ТВ – без учета водителей; взводов – без учета командиров взводов; рот – без в/сл управления, с учетом выделения в резерв штатного отделения.
2. В столбцах 5, 6 указано усредненное значение $L_{\text{бл. подр}_i}$ при $n = 2-3$ чел.

Определение количества подразделений, требуемых для решения частной задачи поиска. Количество подразделений, требуемых для решения частной задачи поиска, целесообразно определять по алгоритму, представленному на рисунке 3.

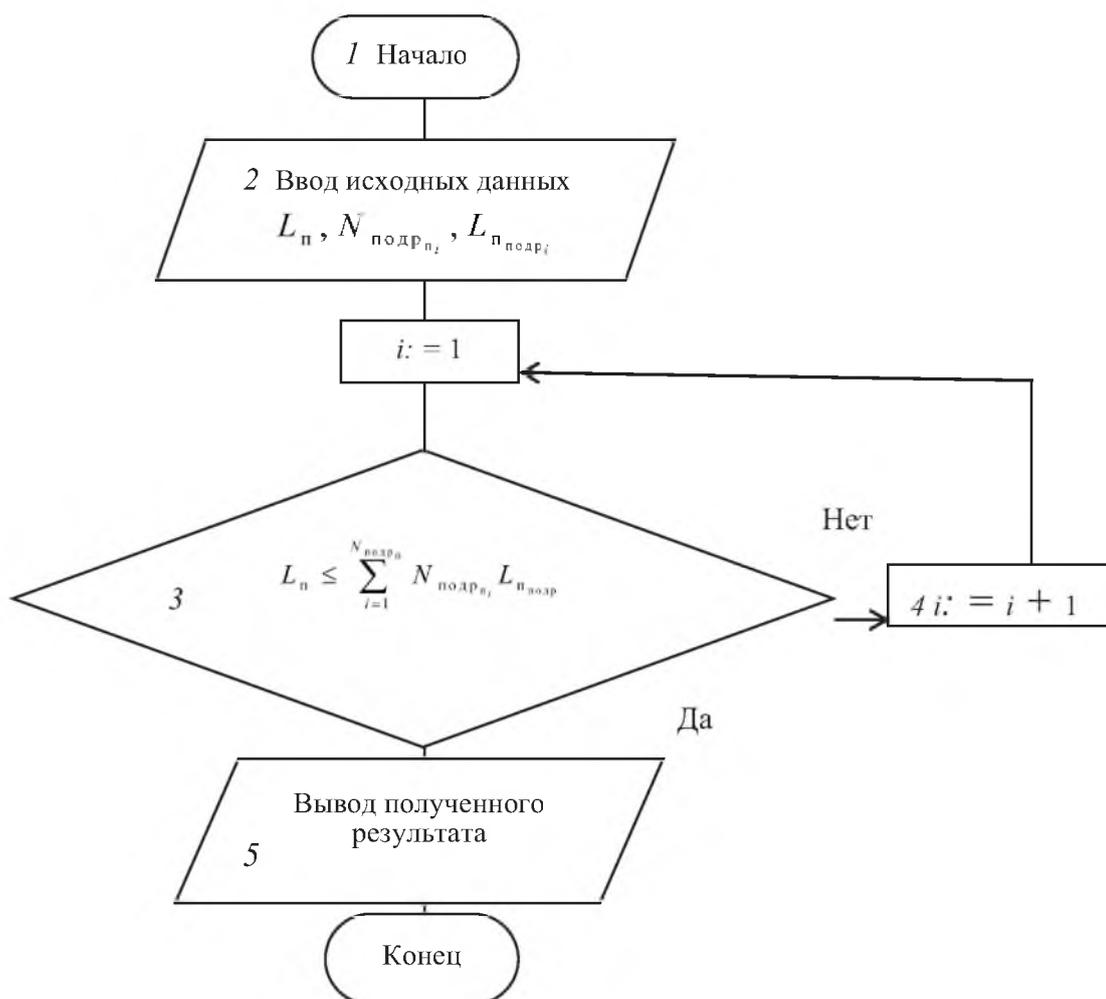


Рисунок 3. – Алгоритм расчета количества подразделений, необходимых для решения частной задачи поиска цепью

В соответствии с предлагаемым алгоритмом искомая величина должна удовлетворять следующему условию:

$$L_{\text{н}} \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{подр}_n}} N_{\text{подр}_n_i} L_{\text{бл. подр}_i}, \quad (11)$$

где $N_{\text{подр}_n_i}$ – количество подразделений i -го типа.

Ширина полосы поиска характеризует возможности подразделения i -го типа по поиску цепью и обуславливается значением величины эффективной ширины полосы обследования. Для определения значения ширины полосы поиска для подразделения i -го

типа также целесообразно воспользоваться формулой (4). Тогда ширина полосы поиска для подразделения i -го типа, ведущего поиск цепью, может быть определена по формуле

$$L_{\text{п.подр}_i} = d_{\text{н.п.}} (n_{\text{вс.подр}} - 1) + 2D_{\text{об}}. \quad (12)$$

Расчетные значения ширины полосы поиска для подразделений ВС, других войск и воинских формирований при поиске цепью представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Расчетные значения ширины полосы поиска для подразделений Вооруженных Сил, других войск и воинских формирований при поиске цепью

Наименование подразделения i -го типа и количество военнослужащих в нем, чел.	Количество в/с, привлекаемых к выполнению задачи, чел.	Значения $L_{\text{п.подр}_i}$ на интервалах, км			
		укороченных		прямой видимости	
		на закрытой местности	на открытой местности	на закрытой местности	на открытой местности
Подразделения территориальных войск					
Взвод – 25, из них: КВ – 1; водитель – 3	21	До 0,25	До 0,5	До 0,9	До 1,2
Рота – 80, из них: управление – 5; КВ – 3; водитель – 9; резерв – 7	56	До 0,5	До 0,8	До 2,3	До 2,5
Подразделения милиции, ВВ МВД					
Взвод – 19, КВ – 1	18	До 0,2	До 0,5	До 0,75	До 1
Рота – 60, из них: управление – 3; КВ – 3; резерв – 9	45	До 0,4	До 0,7	До 1,8	До 2,1
Подразделения СпН ВВ МВД					
Взвод СпН – 22, из них КВ – 1	21	До 0,25	До 0,5	До 0,9	До 1,2
Рота СпН – 69, из них: управление – 3; КВ – 3; резерв – 7	56	До 0,5	До 0,8	До 2,3	До 2,5
Подразделения мобильных соединений (на БТР/БМП)					
Взвод – 21, из них: КВ – 1; экипаж – 6	14	До 0,2	До 0,45	До 0,6	До 0,9
Рота – 70/69, из них: управление – 7/6; КВ – 3; экипаж – 18; резерв – 5	37	До 0,4	До 0,6	До 1,5	До 1,8

Примечание. Значения ($L_{\text{п.подр}_i}$) рассчитаны: для мобильных подразделений – без учета экипажей боевых машин; подразделений ТВ – без учета водителей; взводов – без учета командиров взводов; рот – без в/с управления, с учетом выделения в резерв штатного отделения.

При осуществлении поиска в заданном районе целесообразно иметь резервы: командира (начальника), ответственного за его проведение; начальников групп блокирования и поиска; командиров батальонов.

Количество подразделений в резерве может быть рассчитано по формуле:

$$N_{\text{подр.рез}} = N_{\text{рез.н.с}} + N_{\text{рез.г.б}} + N_{\text{рез.г.л}} + N_{\text{рез.к.б}}, \quad (13)$$

где $N_{\text{рез.н.с}}$ – количество подразделений в резерве начальника поисковых сил, ед.;

$N_{\text{рез.г.б}}$ – количество подразделений в резерве начальника группы блокирования, ед.;

$N_{рез.г.п}$ – количество подразделений в резерве начальника группы поиска, ед.;

$N_{рез.к.б}$ – количество подразделений в резерве командиров батальонов, ед.

2. Определение МОЖ времени обнаружения ДРС противника и НВФ группой поиска.

В рассматриваемой поисковой ситуации МОЖ времени обнаружения объекта целесообразно определять по формулам:

для одностороннего поиска:

$$T_{об} = \frac{\Gamma_{п}}{v_{п}}, \quad (14)$$

для двустороннего поиска:

$$T_{об} = \frac{\Gamma_{п}}{2v_{п}}; \quad (15)$$

в случае если условие, описанное математическим выражением (11), не выполняется:

$$T_{об} = \frac{S_{п}}{\sum_{i=1}^{N_{подр}} u_{подр_i}}, \quad (16)$$

где $u_{подр_i}$ – производительность поиска подразделения i -го типа.

Для определения производительности поиска подразделения i -го типа целесообразно воспользоваться формулой (3):

$$u = Ш_{по} v_{н}, \quad (17)$$

где u – производительность поиска, км²/ч.

Тогда:

$$u_{подр_i} = L_{п_{подр_i}} v_{н}. \quad (18)$$

Расчетные значения производительности поиска для подразделений ВС, других войск и воинских формирований при поиске цепью представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Расчетные значения производительности поиска для подразделений Вооруженных Сил, других войск и воинских формирований при поиске цепью

Наименование подразделения i -го типа	Значения $u_{подр_i}$ на интервалах, км ² /ч			
	укороченных		прямой видимости	
	на закрытой местности	на открытой местности	на закрытой местности	на открытой местности
Подразделения территориальных войск				
Взвод ТВ	Около 0,3	Около 1,5	Около 1,1	Около 3,6
Рота ТВ	Около 0,6	Около 2,4	Около 2,9	Около 7,5
Подразделения внутренних войск, милиции ВВ МВД				
Взвод ВВ	Около 0,25	Около 1,5	Около 0,94	Около 3
Рота ВВ	Около 0,5	Около 2,1	Около 2,25	Около 6,3
Подразделения СпНВВ МВД				
Взвод СпНВВ	Около 0,3	Около 1,5	Около 1,1	Около 3,6
Рота СпНВВ	Около 0,6	Около 2,4	Около 2,9	Около 7,5
Подразделения мобильных соединений (на БТР/БМД)				
мобв	Около 0,3	Около 1,35	Около 0,84	Около 2,7
мобр	Около 0,5	Около 1,8	Около 1,9	Около 5,4

Примечание. В таблице приведены средние значения $u_{\text{подр}}$ при скорости поиска на закрытой местности – 1–1,5 км/ч; на открытой местности – 2–4 км/ч.

3. Уточнение основных показателей поисковых действий.

Условие, при котором необходимо проводить уточнение основных показателей поисковых действий, определяется математическим выражением

$$T_{\text{об}} > T_{\text{п}}. \quad (19)$$

Основными показателями поисковых действий, требующих уточнения, являются: площадь и границы района поиска (необследованного); протяженность рубежа блокирования и глубина поиска на последующие сутки; количество подразделений, необходимое для блокирования необследованного района; математическое ожидание времени обнаружения объекта.

Площадь и границы района поиска (необследованного), протяженность рубежа блокирования и глубина поиска на последующие сутки действий определяются по карте.

Математическое ожидание времени обнаружения объекта рассчитывается по формулам (14)–(16) и (18).

Таким образом, предлагаемое обоснование способа поиска диверсионно-разведывательных групп противника и незаконных вооруженных формирований войсковыми группами позволяет оценить эффективность поиска войсковыми группами применительно к одной из возможных поисковых ситуаций – поиск в заданном районе обнаружения.

В основу оценки эффективности поиска войсковыми группами в заданном районе был положен подход, заключающийся в определении и оценке показателей, характеризующих размеры района поиска и особенности применения войсковых групп (характер осмотра местности, траектории движения и построение их боевого порядка).

В основу оценки способов ведения поиска положено математическое ожидание времени обнаружения объекта по каждому варианту применения войсковых групп, а также вероятности обнаружения объекта поиска. При этом в начале производятся расчеты в целях определения количества воинских формирований, требуемых для выполнения задачи в заданном районе, и оценки эффективности поиска по различным вариантам применения войсковых групп. Количество возможных вариантов применения войсковых групп определяет количество вариантов расчетов. В ходе анализа полученных результатов выбирается наиболее целесообразный вариант применения войсковых групп.

В дальнейшем производятся расчеты в целях определения границ района поиска и оценки эффективности поиска имеющимся в наличии количеством подразделений. При результате, не удовлетворяющем заданному критерию, расчет позволяет определить количество подразделений, требуемых для обнаружения объекта поиска с заданной вероятностью.

Список литературы

1. Анеметов, А. А. Взгляды военных специалистов на ведение операций в современных условиях / А. А. Анеметов, В. Б. Василевский, В. А. Воронище // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 3. – С. 4–10.
2. Абчук, В. А. Поиск объектов / В. А. Абчук, В. Г. Суздаль. – М.: Сов. радио, 1977. – 366 с.
3. Информационные, специальные, воздушно-десантные и аэромобильные операции армий ведущих зарубежных государств: информ.-аналит. сб. / А. Н. Сидорин [и др.]. – М.: Воениздат, 2011. – 344 с.

* Сведения об авторах:

Анеметов Акмырат Аганьязович,
Бандык Александр Петрович,
Василевский Валерий Борисович,
УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 14.03.2016 г.

УДК 355.4

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТАКТИКИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЙСК ПРИ ОКАЗАНИИ СОДЕЙСТВИЯ ОВД В ОБЕСПЕЧЕНИИ ОБЩЕСТВЕННОГО ПОРЯДКА

А. Н. Курмашов, кандидат военных наук, доцент*

В статье проводится установление факторов и условий, их анализ по влиянию на выполнение задачи подразделениями внутренних войск при оказании содействия ОВД в обеспечении общественного порядка и общественной безопасности. На основе анализа установлены возможные тенденции изменений в подготовке, применении сил и средств при выполнении этой задачи и вероятное направление дальнейшего развития тактики.

In this paper we establish the factors and conditions, their analysis on the effect of the task units of the internal troops in assisting the police Department in ensuring public order and public safety. On the basis of analysis online possible tendenzialmente in the preparation, application of force and sredstva this task and the likely direction of further development of tactics.

Внутренние войска Министерства внутренних дел Республики Беларусь – это государственная военная организация, предназначенная для защиты жизни, здоровья, прав, свобод и законных интересов граждан, общества и государства, конституционного строя, безопасности и суверенитета Республики Беларусь от преступных и иных противоправных посягательств [1]. Как видно из приведенного определения, любое изменение в законных интересах гражданина, общества и государства влечет за собой необходимость соответствия в адекватных действиях внутренних войск по защите этих интересов. Такой подход подтверждается и практикой. Например, в составе силовых ведомств Республики Казахстан и Российской Федерации появились новые структуры – подразделения Национальной гвардии с новыми функциональными обязанностями. На основе анализа динамики развития структур правопорядка в странах-соседах и в государствах дальнего зарубежья, в МВД Республики Беларусь и внутренних войсках, как составной его части, постоянно предпринимаются шаги в опережающем развитии сил правопорядка. Подтверждение тому – вносимые в соответствии с требованиями времени изменения и дополнения в основной закон, регламентирующий деятельность внутренних войск [1].

Концептуальное определение командованием перспектив развития внутренних войск ставит одной из задач исследований поиск возможных направлений по изменению тактики действий отдельных видов войсковых нарядов, подразделений при выполнении ими задач боевой службы и выработке в дальнейшем обоснованных предложений по оптимизации их организационно-штатной структуры. Гипотезой решения данной задачи рассматривается выявление факторов и условий, влияющих на порядок выполнения задач боевой службы на современном этапе, как основы тенденций, обуславливающих изменения в тактике. Поскольку в рамках статьи не представляется возможным осуществить рассмотрение факторов и условий для всех видов боевой службы по всем задачам, возлагаемым на внутренние войска, остановимся на одной из них – оказание содействия органам внутренних дел в охране общественного порядка в обеспечении общественной безопасности.

«Побеждают не числом, а умением», – говорил А. В. Суворов. Вместе с тем, рассматривая численность своих войск как исходные данные, можно отметить, что в определенных условиях численность все же является фактором, который влияет на тактику [2]. Так можно сказать относительно численности подразделения, привлекаемого к выполнению определенной задачи в полном составе, поскольку речь идет о слаженности действий всего коллектива и, следовательно, о подготовке личного состава к действиям в составе подразделения. А когда от подразделения выделяется войсковой наряд некоторой

численности, то вести речь о том, что количество военнослужащих в подразделении повлияет на тактику действий войскового наряда нельзя, и в этом случае уже необходимо рассматривать тактику действий отдельного вида войскового наряда.

Вместе с тем следует отметить, что численность как следствие определяет структуру подразделения или войскового наряда, и в нашем случае рассматривается как организация подразделения по удобству управления им и является уже следствием принятой тактики выполнения определенных задач [3]. Логика организации управления войсковым нарядом или подразделением выдвигает предложения по построению подразделения, в котором начальники войсковых нарядов при выполнении задач боевой службы и в повседневных условиях по своему служебному статусу являются выше, чем их подчиненные по службе.

Таким образом, следует иметь в виду, что если появится новая задача, возможно, придется пересмотреть организационно-штатную структуру подразделения, ввести в практику новые тактические приемы – вновь придется обратить внимание на структуру, и при этом следует понимать, что это последствия изменения тактики.

Обратный вариант, когда изменение структуры подразделения повлияет на тактику, тоже возможен, но в этом случае это скорее будет надуманный подход, нежели обоснованный. В результате жесткое следование принципу назначения караулов и войсковых нарядов в составе своих отделений, взводов, своевременная корректировка их структуры при переходе к новым задачам позволит в полной мере использовать слаженность подразделений, достигнутую в повседневной деятельности.

Как свидетельствует исторический опыт, изменение задач, возлагаемых на внутренние войска, безусловно, требует тактических подходов к их выполнению, а также переосмысления порядка выполнения задач схожих. К примеру, повышение роли территориальной обороны и выполнения задач при ее организации подразделениями внутренних войск, определило вектор развития отдельных используемых при этом приемов и способов общевойсковой тактики. Применительно к решаемым задачам адаптированы способы засадных действий ведения оборонительного боя. Обращено внимание при этом на привитие необходимых навыков личного состава, скорректирована система его подготовки и обеспечения. Как свидетельствуют проводимые учения, порядок выполнения задач в системе территориальной обороны совершенствуется, что в свою очередь определяет необходимость развития подготовки привлекаемых подразделений в соответствии с предназначением в направлении объектовой обороны. Необходимость развития тактики в этом направлении обусловлена и приемом внутренними войсками АЭС под охрану и участием подразделений в борьбе с терроризмом. Но это уже скорее специальная тактика, тонкости которой обывателю знать не стоит. Достаточно вспомнить, сколько инструкций, рекомендаций по порядку действий сотрудников ОВД и военнослужащих внутренних войск появилось в свет с первыми, обнаруженными в городах взрывными устройствами, не говоря уже о черных датах срабатывания таковых [4, 5]. Появление террористических организаций и расширение их интересов в сторону Европы, на наш взгляд, является достаточным основанием говорить о тенденции развития тактики в направлении противодействия этому злу.

К факторам, непосредственно влияющим на действия подразделений внутренних войск, относится и изменение степени агрессии нарушителей общественного порядка [6]. И если еще несколько лет назад такое поведение относилось в большей мере к условиям, то тенденции таковы, что спокойнее толпа становится не будет, а, следовательно, влечет необходимость целенаправленной подготовки личного состава к действиям, когда есть реальная угроза жизни и здоровью мирных граждан. Подтверждение тому – кризисы последних лет в Киргизии, Египте, Франции, США и в некоторых других государствах, когда групповые нарушения общественного порядка и массовые беспорядки перерастали в вооруженные столкновения и даже в затяжные внутренние вооруженные конфликты. При этом изменялось оснащение нарушителей и участников беспорядков, что как фактор вызывало адекватную реакцию сил правопорядка по использованию специальных средств

и оружия, мало того, оружия не только стрелкового, но и авиации, танков и артиллерии. В результате осуществлен переход от классических специальных операций к контртеррористическим или антитеррористическим операциям.

На тактику действий подразделений внутренних войск в значимой мере влияет и фактор появления и внедрения передовых технологий обнаружения преступлений, нарушений общественного порядка и других противоправных действий, в том числе вблизи охраняемых объектов. Проще говоря, там, где раньше требовался взвод внутренних войск для перекрытия возможных направлений совершения преступлений в районе, сейчас достаточно широко можно внедрять средства видеофиксации, использование которых в совокупности с иными техническими средствами позволяет идентифицировать личность преступника, нарушителя. А дальнейшее применение мобильной информационной базы позволяет установить его место пребывания. При этом, естественно, изменится порядок выполнения задачи военнослужащими, подразделениями и воинскими частями, сотрудниками ОВД.

Исследования результатов внедрения ОВД видеонаблюдения, как обязательного элемента жилых новостроек в новых микрорайонах, свидетельствуют, что только за год эксплуатации такой вариант инновации позволил повысить раскрываемость уголовно наказуемых преступлений и ответственность граждан за свое поведение [7]. Объединение или дублирование системы видеонаблюдения ОВД с подобными системами дежурных частей органов управления внутренних войск будет способствовать повышению оперативности и устойчивости управления в повседневных и в особых условиях. Исследуя эту тенденцию, стоит отметить, что одним из вариантов повышения оперативности автором предлагается апробировать применение военнослужащими внутренних войск, сотрудниками ОВД на патрульно-постовой службе служебных телефонов мобильной связи. Во-первых, на той же системе, о которой вели разговор выше, у дежурного возможно отображение расстановки сил в реальном масштабе времени за счет GPS-трекинга, что способствует повышению оперативности реагирования на нарушения общественного порядка и общественной безопасности, управляемости при этом. Во-вторых, позволит сократить количество проверок и отрыва личного состава от непосредственного несения службы. При этом качество контроля по средствам отслеживания того же GPS-сигнала позволит с большой вероятностью контролировать любые перемещения нарядов. В-третьих, ведение разговоров в служебной сети находится под контролем, что не позволит использовать мобильный телефон для неслужебных переговоров (разговоров).

Анализ современных технических возможностей обнаружения источников мобильного сигнала показывает, что в случае необходимости есть техническая возможность отслеживать пути перемещения их владельца, узнавать фамилию и адрес регистрации. Как следствие, такие новации весьма логично вписываются в тенденции по переходу от тактики задержания участников массовых беспорядков сотрудниками ОВД к принятию последовательных мер профилактики и разъяснения противоправности участия в подобных действиях к лицам, не проявлявшим активности в беспорядках.

Как свидетельствует опыт проведения любых операций и действий, нельзя не обратить внимания на местность. Опыт Афганистана, Чечни, где подразделениям в борьбе с бандформированиями пришлось переучиваться и приспосабливаться к специфике горной местности или недавние события в Донецкой области с особенностями действий в непосредственной близости и в самих населенных пунктах, подчеркивает важность принятия необходимых мер по анализу местности. Как правило, анализ местности проводится на ней самой или с использованием карт, схем, вместе с тем им на смену приходят интерактивные карты, карты с использованием ГИС-технологий и глобального позиционирования, средства видеонаблюдения в реальном масштабе времени. Эти методики оценки местности куда точнее и быстрее, но вместе с тем требуют дополнительных знаний и умений по их использованию в ходе оценки местности. При этом стоит отметить, что ГИС-технологии в большей мере распространены пока лишь на карты, имеющие большие

площади, без детализации отдельных объектов, мест, представляющих интерес при выполнении задач боевой службы войсковыми и милицейскими нарядами, караулами, подразделениями и воинскими частями внутренних войск. Переход от бумажных к электронным картам местности обуславливает необходимость проведения работы по подготовке совместными усилиями специалистов тактиков и картографов с определенными целевыми установками. Еще один фактор в рамках внедрения инновационных технологий – это вариант использования 3D-моделирования при изучении и оценке зданий, учитывая и принимая за основу разрабатываемые модели при архитектурном планировании застройки населенных пунктов. Что может оказаться весьма полезным для развития тактики действий специальных подразделений и саперно-пиротехнических групп соответственно при выполнении задач по проведению контртеррористических операций или операций по освобождению заложников и с получением сигнала о наличии взрывного устройства.

Таким образом, определив наиболее явные факторы, влияющие на необходимость совершенствования тактики подразделений внутренних войск, целесообразно отметить некоторые условия, которые также определяют дополнительные направления подготовки сил правопорядка.

Прежде всего остановимся на том факте, что степень агрессии противоправных элементов требует развития навыков военнослужащих в области решительности и правомерности адекватных действий, противопоставляемых нарушителям. При этом стоит обратить внимание, что в отличие от подразделений вооруженных сил, внутренние войска вполне ясно знают, как говорится, своего противника в лицо. Это граждане, действия которых квалифицируются Уголовным кодексом Республики Беларусь или Кодексом об административных правонарушениях. Соответственно, рамки противодействия привлекаемыми силами таким гражданам применительно к каждому случаю определены положениями законодательства в области обеспечения общественного порядка и безопасности. Учитывая повышение агрессивности нарушителей, логична необходимость и более решительных действий сил правопорядка.

Следовательно, этой решительности необходимо учить. Учить тому, как она должна выражаться в моральном, психологическом, физическом, юридическом аспектах и возможно в каких-то иных.

Правомерность также требует уточнения. Разработка правил применения специальных средств, осуществляемая в настоящее время во внутренних войсках, есть не что иное, как реализация назревшей необходимости. Граждане становятся образованней и в общении с военнослужащими внутренних войск, сотрудниками ОВД, зачастую создают спорные ситуации, обусловленные пробелами в знаниях у последних или коллизиями в законодательстве. Наиболее часто подобные ситуации между водителями и сотрудниками ГАИ обсуждаются в Интернете [8]. То, что уровень образования населения растет, это замечательно, но, как правило, граждане используют в своих аргументах лишь отдельные положения, без взаимосвязи с другими, не оценивая ситуацию в целом. Как свидетельствует практика, к сожалению, отдельные представители сил правопорядка тоже не в состоянии аргументировать свои требования более чем одним-двумя, заученными и достаточными ранее.

В итоге требование времени состоит в объективной необходимости дальнейшего развития правового обеспечения деятельности ОВД и внутренних войск. И как показывают исследования, делать это целесообразно как на уровне ликвидации пробелов в законодательстве, так и в более узком, но столь же важном направлении совершенствования – разъяснении, обучении непосредственно сотрудников и военнослужащих совокупному применению положений нормативных правовых актов при несении боевой службы и выполнении конкретной задачи при этом.

Завершая краткий анализ, можно констатировать, что к числу некоторых факторов и условий, влияющих на тактику действий сотрудников и военнослужащих правоохранительной системы, относятся:

- изменяемый в соответствии с оптимизацией численности состав подразделений и его организационная структура;
- появление новых задач;
- повышение уровня агрессивности и оснащения противоправных элементов;
- изменение требований нормативных правовых актов в сфере обеспечения безопасности граждан;
- рост правовой грамотности населения;
- техническое и технологическое перевооружение сил правопорядка в общей системе обеспечения общественного порядка и общественной безопасности;
- внедрение и распространение передовых технологий в служебную деятельность каждого сотрудника, военнослужащего внутренних войск.

На основе проведенного анализа, следуя предложенной гипотезе, можно сделать выводы о возможных тенденциях в изменении тактики действий подразделений внутренних войск применительно к одной из задач, возлагаемой на них, оказание содействия органам внутренних дел в охране общественного порядка, обеспечении общественной безопасности:

- структурно подразделения целесообразно организовывать по группам, которые применяются впоследствии при выполнении задач боевой службы, что позволит повысить слаженность действий и уровень подготовки;

- в интересах обеспечения объективности складывающейся ситуации и законности действий войсковых нарядов, правовой оценки действий граждан целесообразно внедрение средств видео-аудиофиксации не только во внутривойсковых территориях, но и обеспечение носимыми видеорегистраторами патрульных и других нарядов, задействованных по плану комплексного использования сил и средств в охране общественного порядка, обеспечении общественной безопасности;

- внедрение ГИС-технологий и GPS-технологий в совокупности с видеофиксацией, безусловно, позволит сократить количество должностных лиц, осуществляющих контроль над несением службы нарядами и количество самих нарядов как по составу, так и по численности.

Таким образом, в целом реализация перечисленных тенденций, вероятнее всего, приведет к переходу от тактики патрулирования определенных маршрутов к действиям маневренных патрульных групп непосредственно по фактам правонарушений.

Список литературы

1. О внутренних войсках Министерства внутренних дел Республики Беларусь: Закон Республики Беларусь от 3 июня 1993 г. № 2341-ХІІ: в ред. от 26 мая 2012 г. № 378-З/ Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 16.03.2001 г. – № 2/386.

2. Верховский, А. И. Развитие тактики в мировой войне. Великая забытая война. История России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://books.google.by> – Дата доступа: 20.02.2016.

3. Организация и тактика пехоты. Информация об оружии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://books.google.by>. – Дата доступа: 20.02.2016.

4. 15 погибших, сотни раненых. Со дня теракта в минском метро прошло три года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tut.by>. – Дата доступа: 20.02.2016.

5. Палей, В. В. Особенности организации охраны общественного порядка в условиях осложнения оперативной обстановки и тактические приемы обнаружения и локализации взрывоопасных предметов: метод. рекомендации МВД // В. В. Палей, Е. В. Наркевич. – Минск. – 2008. – 36 с.

6. Курмашов, А.Н. Тенденции массовых нарушений общественного порядка на современном этапе / А. Н. Курмашов // Вестн. воен. академии Респ. Беларусь. – 2012. – №1. – С.135.

7. Более 800 преступлений раскрыто благодаря видеокамерам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: mvd.gov.by. – Дата доступа: 10.02.2016.

8. Какие требования инспектора ГАИ для водителя обязательны? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: news.tut.by/auto/130369.html. – Дата доступа: 10.02.2016.

*Сведения об авторе:

Курмашов Александр Николаевич,
УО «Военная академия Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 04.03.2016 г.

УДК 355.4

ОЦЕНКА КОМАНДИРОМ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ТОЛПЫ И БЕСКОНТАКТНЫЙ СПОСОБ ДЕЙСТВИЙ СИЛ ПРАВОПОРЯДКА ПО ПРЕСЕЧЕНИЮ МАССОВЫХ БЕСПОРЯДКОВ

С. А. Мещеряков*

В статье изложена оценка особенностей и механизмы образования толпы, её социально-психологическая классификация, факторы и стадии развития беспорядков, бесконтактный способ действий сил по пресечению массовых беспорядков.

The article describes the features and mechanisms of the crowd, its social classification of psychological factors and stages of development of mass disorders, non-contact action to curb the power of mass riots.

Массовые беспорядки являются тяжким преступлением. Они дестабилизируют обстановку, подрывают устои общества и государства, нарушают нормальную жизнедеятельность граждан, работу предприятий, учреждений, организаций, являются угрозой политическому строю государства. В связи с этим необходимо обращать особое внимание на подготовку сил правопорядка, которые будут выполнять задачу по пресечению противоправных действий путем проведения специальных мероприятий.

Политическая нестабильность появляется при ослаблении деятельности органов государственной власти и ее неспособности эффективно контролировать определенные районы страны, в том числе проявление нерешительности государственных органов при управлении ситуацией.

В Беларуси, как ни в одном другом государстве в мире, проблема деструктивного элемента не является острой и злободневной. Однако вероятность возникновения этой проблемы нельзя исключать (события в Украине в феврале 2014 года).

В отечественной правоохранительной практике силами правопорядка накоплен достаточный опыт выполнения задач по противодействию массовым беспорядкам и групповым нарушениям общественного порядка.

Одной из задач внутренних войск и правоохранительных органов является обеспечение охраны общественного порядка при массовых и зрелищных мероприятиях. Однако не всегда эти мероприятия проходят так, как хотелось бы их организаторам. На любом мероприятии, где собирается большое количество людей, может произойти неожиданный поворот событий и вся эта толпа превратится в агрессивную или паническую, что наиболее опасно как для тех людей, которые находятся в толпе, так и для контролирующих органов.

Можно ли без силовых мер и применения специальных средств остановить эту стихию, с которой невозможно говорить разумно, – она ничего не слышит и при этом все сметает на своем пути? Кажется, остановить толпу может только сильнейший эмоциональный тормоз или чудо. Но, зная механизмы образования толпы, а также ее психологию, толпой можно управлять и направлять ее разрушающую энергию в нужную сторону. Это достаточно сложно, но это может помочь избежать жертв и тяжелых последствий [12].

Знания теории механизма образования толпы позволяют повысить эффективность сил МВД при проведении специальных мероприятий по пресечению массовых беспорядков и групповых нарушений общественного порядка и своевременно определить момент применения бесконтактного способа воздействия на толпу [10].

Следует учитывать, что помимо общих черт массовых беспорядков и групповых

нарушений, каждое из движений протеста имеет свои особенности и свою классификацию толпы. Как писал немецкий ученый-публицист В. Швებель: «Когда отдельные люди образуют массу, то достоинство каждого из них в отдельности гибнет под ногами толпы» [2].

Прежде всего, командиру необходимо понять, что же такое толпа. Фактически, толпа – это не просто скопление большого количества людей, а материализованная эмоция колоссальной силы [12].

Как и любое другое социальное явление, толпу можно классифицировать по различным основаниям.

Если за основу классификации взять такой признак как *управляемость*, то можно выделить следующие виды толпы:

стихийная толпа формируется и проявляется без какого-либо организующего начала со стороны конкретного физического лица;

ведомая толпа формируется и проявляется под воздействием и влиянием с самого начала или по прохождении определенного периода времени с момента ее формирования конкретного физического лица, являющегося в данной толпе ее лидером;

организованная толпа – эта разновидность рассматривается как толпа и собрание индивидов, которые выступают как организация и представляют организационное ядро толпы.

Если за основу классификации толпы взять *характер поведения* в ней людей, то можно выделить несколько ее *типов и подтипов*:

окаzionaleнная толпа – образуется на основе любопытства к неожиданно возникшему происшествию (дорожная авария, пожар, драка и т. д.);

конвенциональная толпа – образуется на основе интереса к какому-либо заранее объявленному массовому развлечению, зрелищу или по иному социально значимому конкретному поводу и готова лишь временно следовать достаточно изменчивым нормам поведения;

экспрессивная толпа – формируется, как и конвенциональная толпа. В ней совместно выражается общее отношение к какому-либо событию (радость, энтузиазм, возмущение, протест и т. п.);

экстатическая толпа – представляет собой крайнюю форму экспрессивной толпы. Характеризуется состоянием общего экстаза на основе взаимного, ритмически нарастающего «заражения» (массовые религиозные ритуалы, карнавалы, рок-концерты и т. д.);

действующая толпа – формируется как конвенциональная, осуществляет действие относительно конкретного объекта.

Одновременно действующая толпа *включает в себя подвиды*, такие как:

агрессивная толпа – объединена слепой ненавистью к конкретному объекту (какому-либо религиозному или политическому движению). Обычно сопровождается избиениями, погромами, поджогами и т. д. (Её участники обычно совершают погромы, поджоги, избиения граждан.);

паническая толпа – стихийно спасается от реального или воображаемого источника опасности. Опыт показывает, что это самая опасная из всех разновидностей толпы. По количеству непосредственных человеческих жертв массовая паника обычно далеко превосходит агрессивную толпу. Например, печально известный случай гибели людей в давке в подземном переходе в Минске. Тогда, вечером 30 мая 1999 года, более двух тысяч человек (в основном несовершеннолетняя молодежь) возвращались с праздника пива после концерта, который проходил у Дворца спорта. Прячась от внезапного дождя и грозы, поток людей устремился к ближайшей станции метро. Возникла давка, паника, по упавшим людям шли другие, которых несла неуправляемая толпа. По словам очевидцев, все длилось не больше 10 минут. В результате давки погибли 53 человека, причиной смерти большинства из них стала асфиксия. Более 100 человек были травмированы.

Наиболее часто встречается панический тип толпы. Слово «паника» происходит от имени Пана, греческого бога пастухов. Пастухи часто становились свидетелями того, как вследствие самой незначительной причины, особенно ночью, стада овец или коз, полностью выйдя из-под контроля, бросались в воду, в огонь или животные одно за другим прыгали в пропасть [3].

Паника может возникнуть безо всякой внешней опасности и в подавляющем большинстве случаев оказывается несоразмерна ей. С другой стороны, никакая внешняя опасность сама по себе недостаточна для возникновения паники. Даже тогда, когда паника вызывается беспредельно большой опасностью, психологическая природа переживания ужаса принципиально такая же, как и в момент возникновения ее из-за незначительной причины, поскольку, в конце концов, всякая реальная и большая опасность может быть пережита без паники. Так что сильный ужас, связанный с паникой, и в случае реальной опасности и в случае воображаемой, считается вторичным явлением.

Паника – это состояние ужаса, сопровождающееся резким ослаблением волевого самоконтроля;

стяжательская толпа – вступает в неупорядоченный непосредственный конфликт за обладание какими-либо ценностями. Стяжательская толпа состоит из людей, объединенных желанием добыть или вернуть себе некие ценности. Такая толпа разнородна, она может включать мародеров, вкладчиков обанкротившихся банков, погромщиков и т. д.

Ее главная особенность – общее эмоционально-действенное единство на фоне осознаваемого в глубине души конфликта: ведь члены такой толпы борются за обладание ценностями, которых все равно на всех не хватит. Провоцируется чаще всего властями, игнорирующими жизненные интересы граждан или покушающимися на них (взятие штурмом места в транспорте, ажиотажный расхват продуктов в магазинах, разгром продовольственных складов, осаждение учреждений (например, банков), в небольших количествах проявляется в местах крупных катастроф со значительными человеческими жертвами и т. д.);

повстанческая толпа – формируется на основе общего справедливого возмущения действиями властей. Своевременное внесение в нее организующего начала способно возвысить стихийное массовое выступление до сознательного акта политической борьбы.

В этой связи, опираясь на вышеизложенную социально-психологическую классификацию, руководителю специального подразделения при выполнении задач по охране общественного порядка и общественной безопасности необходимо оценивать действия граждан в ходе проведения массовых мероприятий и учитывать общие и специфические особенности массовых мероприятий, которые *зависят от факторов*, таких как:

- существующая система социально-экономических отношений;
- уровень правовых знаний той или иной группы населения;
- внешние условия проведения и уровень организационных мероприятий;
- количество участвующих в массовом мероприятии граждан;
- социально-психологические закономерности формирования групп людей, их образ жизни, режим труда, социальный статус и т. д.;
- неблагоприятные метеорологические условия, местные обычаи, традиции и др.

Чем же характерны массовые беспорядки? Главные отличительные признаки беспорядков – это противозаконность собрания лиц, их скопление в количестве более трех человек, проведение заранее подготовленных акций с распределением деструктивных ролей, применение насилия.

Как правило, непосредственно в толпе формируются группы людей, которые бросают булыжники в сотрудников правопорядка, бьют стекла витрин, грабят магазины, переворачивают и поджигают автомобили, возводят баррикады.

Оценку масштаба массовых беспорядков производит командир спецподразделения, который изучает состояние сторон конфликта (противостояния) в районе выполнения задач с учетом предполагаемого характера действий правонарушителей и анализирует:

- конфигурацию местности;
- настрой местного населения;
- социально-политическую;
- экономическую и криминальную обстановку в районе сбора деструктивного элемента.

Одновременно командир специального подразделения *учитывает фон*, на котором проходят массовые беспорядки:

- оценка поведения участников беспорядков;
- состояние погоды;

особенности времени года, а также другие факторы, влияющие на выполнение специальной задачи.

Исходя из практического опыта командиров специальных подразделений, отвечающих за организацию безопасности при проведении массовых мероприятий, необходимо отметить важность создания для себя мысленной объемной модели будущей ситуации. Моделирование сценария событий дает возможность определить наиболее подходящую для данного случая тактическую расстановку, которая могла бы эффективно способствовать нормализации обстановки и успешному решению специальных задач.

Одновременно необходимо учитывать, что зачастую одни и те же формы и методы могут оказаться эффективными в одних случаях и неприемлемыми в других, что вызывает необходимость:

- осуществлять прогнозирование ситуации на основе текущей информации;

- планировать мероприятия профилактической направленности;

- скрытно осуществлять меры по подготовке сил и средств;

применять целесообразные и соразмерные тактические приемы, способы воздействия на участников массовых акций, в соответствии с нормативными актами;

обеспечивать оперативность и непрерывность управления всеми задействованными силами и средствами;

- массированного комплексного использования сил и средств;

- активного, внезапного их применения;

- возможного маневра силами и средствами.

Кроме того, надлежит учитывать и выделить такое важное социальное явление, как паника, которой могут подвергаться граждане.

Паника возникает, когда толпа чувствует близость опасности, а пути к единственному спасению – бегству заблокированы, и движение по ним остановлено. Тогда для спасения толпа силой прокладывает себе дорогу, давя и сметая впереди идущих.

Существует четыре комплекса факторов (условий, предпосылок) превращения более или менее организованной группы в паническую толпу.

Социальные факторы – напряженность в обществе, вызванная происшедшими или ожидаемыми природными, экономическими, политическими бедствиями. Это могут быть землетрясение, наводнение, эпидемия, реальный или мнимый недостаток продовольствия, резкое изменение валютного курса, государственный переворот, начало или неудачный ход войны и т. д. Иногда напряженность обусловлена памятью о трагедии и (или) предчувствием надвигающейся трагедии, приближение которой ощущается по предварительным признакам.

Физиологические факторы, такие как усталость, голод, длительная бессонница, алкогольное и наркотическое опьянение, снижают уровень индивидуального самоконтроля, что при массовом скоплении людей чревато особенно опасными последствиями.

Так, типичными ошибками при организации митингов, манифестаций и массовых зрелищ становятся затягивание времени мероприятия, а также безразличное отношение организаторов к фактам продажи и употребления участниками спиртных напитков.

В условиях социального напряжения, жары холода и т. д. это повышает вероятность паники, равно как и прочих нежелательных проявлений в толпе.

Общепсихологические факторы – неожиданность, удивление, испуг, вызванные недостатком информации о возможных опасностях и способах противодействия.

Социально-психологические и идеологические факторы: отсутствие ясной и высокозначимой общей цели, эффективных, пользующихся общим доверием лидеров и, соответственно, низкий уровень групповой сплоченности.

Исследователи массовой паники единодушно подчеркивают преимущественное значение именно этого фактора по сравнению с предыдущими. Для возникновения панической дезорганизации в слабосплоченной группе довольно даже смехотворной опасности, которая может быть и вовсе мифической или во всяком случае несопоставимой с той, которая создается самим паническим поведением [4].

Структура и динамика человеческих потребностей таковы, что люди могут, потеряв волю и достоинство, впасть в животное состояние. При этом внешняя оценка их поступков в экстремальной ситуации – героических, преступных или просто нецелесообразных – сильно зависит от того, насколько собственные ценности наблюдателя согласуются с ценностными координатами наблюдаемого поступка.

Механизмы развития паники. Шокирующий стимул, очень сильный или повторяющийся, вызывает испуг сначала у одного или нескольких человек. В толпе минимальный порог возбудимости обычно имеют женщины и дети, а в боевой ситуации – молодые и неопытные, незакаленные в сражениях солдаты. Их испуг проявляется криками – односложными фразами («Пожар!»; «Водяные пушки!») или междометиями, испуганным выражением лиц и суетливыми движениями.

Эти люди становятся источником, от которого страх передается остальным. Происходит взаимная индукция и нагнетание эмоционального напряжения через механизм циркулярной реакции. Далее, если не приняты своевременные меры, масса окончательно деградирует, люди теряют самоконтроль и начинается паническое бегство, которое кажется спасительным, хотя в действительности только усугубляет опасность [4].

Присутствие в толпе женщин и детей (о приоритетном спасении которых при массовой панике уже никто не думает) плохо еще и потому, что звук высокой частоты – женские или детские крики – в стрессовой ситуации оказывает разрушительное влияние на психику. По той же причине, кстати, для противодействия панике, коллективной или индивидуальной, лучше служит низкий мужской голос, чем высокий женский.

Массовые беспорядки условно делятся на *шесть стадий развития*:

распространение провокационных слухов, формирование причин и поводов для возникновения массовых беспорядков;

образование толпы и обработка ее участников подстрекателями, начало массовых беспорядков;

совершение единичных противоправных действий;

дальнейшее численное увеличение толпы;

переход к массовым беспорядкам, кульминация массовых беспорядков;

затухание беспорядков.

В очень редких случаях, когда шокирующий стимул необыкновенно силен, массовая паника может возникнуть сразу, без промежуточных стадий. То есть толпа становится простой суммой на смерть перепуганных индивидов, но здесь уже срабатывает совсем другой механизм. В этих редких случаях, вопреки определениям психологов, паника перестает быть «вторичным» явлением и становится непосредственной, почти механической реакцией на стимул.

И еще одно замечание, чрезвычайно важное в практическом плане. Сразу после шокирующего стимула обычно наступает так называемый психологический момент. Люди становятся неадекватными, теряют самообладание и готовы следовать первой реакции. Иногда она оказывается парадоксальной. Например, по механизму противоположной

реакции, человек может от испуга броситься навстречу опасности, и за ним последуют остальные.

Дело в том, что психологический момент – самый подходящий момент для перелома ситуации, для «рассечения» толпы на более маленькие группы и выявления, и задержания лидеров и зачинщиков.

Специальные подразделения, снаряжаемые для охраны общественного порядка и обеспечения общественной безопасности при проведении массовых мероприятий, предотвращения большого скопления людей, агрессивно настроенных граждан, могут проводить следующие действия: «рассечение» толпы, создание «коридоров», направление потоков людей к более дальним остановкам общественного транспорта и станциям метро.

Чрезвычайно важен учет общепсихологического фактора паники: прежде всего, своевременное информирование людей о возможных опасностях и имеющихся способах противодействия, о применении, в случаях неповиновения правоохранительным органам, физической силы, специальных средств и техники.

Как же воздействовать на механизмы формирования толпы? Воздействие можно оказать только одним способом – став центром такой толпы и направив ее энергию на себя. Этим приемом пользовались во все времена революционеры и неформальные лидеры, мошенники и бродячие артисты. Замкнуть на себя разрозненную толпу очень просто – нужно только привлечь ее внимание. Причем совершенно неважно чем. Читением стихов, криками о помощи или свадебным кортежем. Это воздействие называется *«Броуновское движение»* и представляет собой разрозненное и разбалансированное поле людей, где каждый элемент движется сам по себе и только с известными одному ему целями. Прочувствовать и направить вектор движения толпы здесь практически невозможно, поэтому именно эта толпа хуже всего поддается управлению. С этой толпой мы встречаемся на рынках и площадях, в городских парках или на набережных в теплую летнюю ночь, на вокзалах, да и просто на улице. Хотите почувствовать «Броуновское движение» – посетите городской рынок. Попробуйте слиться с этим полем, а в какой-то момент посмотреть на него как бы сверху, при этом присутствовать в каждом отдельном человеке и во всей толпе в целом, «приручив» эту непокорную толпу, вы никогда не потеряете нить управления процессом и будете спокойны в любой экстремальной обстановке.

Следующее поле людей, так называемая *«Спираль»*, где люди вовлечены в единый поток движения, остановить который зачастую не в силах. Классический пример спирали – движение по эскалатору. Бежали ли вы когда-нибудь вниз по лестнице так, чтобы на шаг впереди вас маячил чей-то затылок, а сзади наступали на пятки такие же спешащие, как вы? Если да, то вам знакома «Спираль». В этом поле интересны биологические естественные реакции людей. Границы индивидуальности мгновенно стираются, всю сущность заполняет единственная цель – двигаться вперед. Остановиться или выскочить практически невозможно – тот, кто сзади, просто собьет тебя с ног. Противодействовать «Спирали», то есть идти против ее движения, не имеет никакого смысла. Способ управлять ею – оказаться «сверху», в физическом плане – в буквальном смысле слова забраться на возвышение – дерево, забор, капот автомашины или хотя бы смотреть поверх голов.

Кстати, энергию «Спирали» очень хорошо используют всевозможные «рекламные зазывалы», рыночные торговцы. С этими явлениями бороться бессмысленно. Главное вовремя отследить угрозу и просто уйти в сторону.

Еще одно людское поле – *«Воронка»*, в нее засасывает каждого, кому не повезет оказаться в ее эпицентре. Ужас этой толпы в том, что остановить ее разрушительное действие практически невозможно.

Хороший пример «Воронки» на бытовом уровне – классическая драка, которую завязывает компания разгулявшихся подростков. Вовлечением в людское поле «Воронку» здесь, как правило, выступает банальный вопрос – просьба закурить или показать дорогу. При этом компания будет окружать свою жертву и, что характерно, двигаться по кругу. Способ вырваться – проявить еще большую агрессию, нанести ощутимый удар лидеру или

в буквальном смысле слова растолкать сомкнувшийся круг. С толпой «Воронкой» мы встречаемся на стадионах, дискотеках, уличных концертах. Классическая «Воронка» – толпа разъяренных футбольных болельщиков. И не случайно в дни футбольных матчей правоохранные органы многократно увеличивают охрану города. Совладать с фанатами сложнее, чем с кем бы то ни было, именно по причине их нелогичности, но огромной силы вовлеченности в идею [5].

С учетом этих особенностей воздействия на механизмы формирования толпы и управления энергией людского поля необходимо применять *тактические способы* действий сил и средств органов правопорядка по пресечению массовых беспорядков и групповых нарушений общественного порядка, которые условно можно разделить на:

- бесконтактные (рассеивание толпы);
- контактные (рассечение, а затем рассредоточение толпы);
- с применением обеих способов.

Наиболее прогрессивный и менее травмоопасный способ – *бесконтактный способ*, который предполагает воздействие сил правопорядка на толпу на расстоянии – посредством использования оружия нелетального действия [6]. Например, кинетическое, химическое (ирританты – группа веществ слезоточивого или раздражающего действия, вызывающие раздражительные реакции при попадании на слизистую оболочку или кожные покровы, и воздействия на дыхательные пути (респираторный эффект)) и электрическое. Применяя такие средства, силы правоохранительных органов постепенно перемещают толпу в заданном направлении, рассредоточивают и рассеивают ее участников.

Кинетическое оружие включает как проникающие, так и не проникающие через кожный покров боеприпасы различных калибров и формы. Поражающий элемент может быть эластичным или пластичным, либо жёстким, разрушающимся при ударе по препятствию. Некоторые образцы кинетического оружия к ударному воздействию поражающего элемента добавляют действие химического вещества (ирританты, одоранта (вещество, используемое в качестве примеси к газу для придания ему специфического запаха, главным образом предупреждающего)) либо маркирующего состава, воздействующего на цель после разрушения оболочки контейнера.

Водометы, также относящиеся к кинетическому оружию нелетального действия, по-прежнему являются эффективным средством воздействия на незаконные массовые скопления людей. В ряде случаев в струю воды могут быть добавлены различные химические смеси.

Самое популярное оружие нелетального действия в США и зарубежной Европе – электрическое. Оно временно лишает человека дееспособности за счет инициирования клинической судороги поверхностных мышц организма. Несмотря на исследования в области передачи электроимпульса по газодисперсным, водяным и воздушным ионизированным каналам, на сегодня практически все применяемое электрическое дистанционное оружие использует технологию передачи импульса по проводам.

Из всего многообразия оружия нелетального действия, применяемого для бесконтактного способа вытеснения людского поля (т. е. рассеивание толпы), специалисты выделяют как перспективные изделия и средства:

- семейство кинетических видов оружия нелетального действия;
- электрошоковые устройства контактного и дистанционного действия;
- семейство светозвуковых спецсредств;
- различное химическое оружие нелетального действия, в том числе ирританты и аэрозольные системы;

лазеры и другие виды оружия нелетального действия волновой природы, в том числе генераторы низкоэнергетического СВЧ-излучения, высокоэнергетического СВЧ-излучения и взрывоманнитные генераторы частоты;

различные системы охраны, ограждения и блокирования территории, в том числе СВЧ-генераторы для остановки транспорта, защиты аэропортов и кораблей в портах, защиты конвоев, а также нейтрализации мин.

При этом дистанционные электрошоковые устройства постепенно вытесняют кинетические виды нелетального оружия. Также развитие получила разработка комбинированных средств нелетального действия, которые, как считается, умножают эффект от применения. К таким комбинированным средствам относятся:

гранаты для ручных гранатометов, обеспечивающие одновременное действие звука, света и резиновых поражающих элементов;

выстрелы для ручного оружия ударно-раздражающего действия (в снаряде содержатся полости с ирритантом, высвобождающимся при ударе о цель);

граната для ручного гранатомета, изготовленная из вспененной резины и содержащая ирританты;

«липкие электрошокеры» – ударно-электрошоковый боеприпас, после удара о цель прикрепляющийся к ней и генерирующий электрический импульс;

добавление в струю воды из водомета ирритантов, что обеспечивает ударно-раздражающее действие;

дистанционно выстреливаемые сети, пропитанные ирритантом или генерирующие электрические импульсы;

ультрафиолетовая краска в ирритантах, которая позволяет оказывать раздражающе-маркирующее действие.

Получило развитие и высокотехнологичное оружие нелетального действия – генераторы направленного электромагнитного и лазерного излучения. Лазерные системы ослепления и дезориентации с эффективной дальностью действия до 0,8 км и продолжительностью бесперебойной работы несколько часов приняты на вооружение полицией США.

В зависимости от мощности излучения их луч может вызвать временное ослепление с последующим полным восстановлением зрения или ограничить зрительную функцию цели без ослепления. Электромагнитное оружие нелетального действия представляет собой излучатели микроволновой энергии, наносящие термический удар по биообъекту.

Исходя из вышесказанного, командирам специальных подразделений необходимо особое внимание уделить подготовке групп по применению специальных средств.

Основная цель применения специальных средств – создать перед людским полем рубеж газовых, водных и других препятствий, и таким способом обеспечить движение групп блокирования и рассредоточения [7].

В зависимости от обстановки командирам специальных подразделений используют различные тактические способы действия. Например, при ликвидации массовых беспорядков и групповых неповиновений, а также пресечении нарушений общественного порядка в населенных пунктах, использование спецсредств позволяет приостановить движение бесчинствующей толпы в каком-либо направлении, не допустить ее проникновения на определенные магистрали, перекрестки, площади, в здания и сооружения. Маневр специальными средствами позволяет отеснить толпу, расчленив ее на части в целях рассредоточения нарушителей общественного порядка и обеспечения изъятия зачинщиков [8].

Одновременно в ходе подготовки к применению спецсредств командирам специальных подразделений необходимо оценить метеорологическую обстановку, возможные действия нарушителей общественного порядка и на основании этого определить порядок расстановки и взаимодействия сил и средств, сроки и рубежи применения спецсредств, предусмотреть и наметить меры безопасности для военнослужащих и окружающего населения. Отсутствие заранее продуманного поэтапного плана может привести к тому, что применение спецсредств не обеспечит успешного выполнения задачи.

Кроме того, командирам специальных подразделений внутренних войск при охране общественного порядка в местах массового скопления людей необходимо помнить, что:

без крайней необходимости не предпринимать никаких мер воздействия на толпу, ни в коем случае не пытаться сжать ее или вытеснить с занимаемого места, не допускать давки, возникновения паники;

блокировать подходы к толпе, не допускать ее пополнения, тянуть время – оно работает против толпы – люди устают и их активность снижается;

устранить эмоции, не отвечать на оскорбления, проявить выдержку (это связано с тем, что для человека в толпе и для толпы в целом характерна импульсивность);

не вступать в разговоры с людьми – ограничиваться ответом: «Мы выполняем приказ» (это связано с тем, что у людей в толпе в силу преобладания эмоций понижается уровень интеллекта и доказывать им что-либо бессмысленно);

четко выполнять приказы руководства;

без необходимости не подпускать к себе людей;

постоянно (через устройства усиления речи) информировать людей о коридорах выхода, об ответственности, о применяемых мерах по устранению причин, по которым собралась толпа;

не препятствовать выходу людей из толпы, но только через указанные коридоры выхода, где должны быть организованы фильтрационные пункты;

следует предложить людям выделить из своей среды группу для ведения переговоров;

для общения с толпой и ведения переговоров использовать специально отобранных (личные качества играют здесь решающую роль) и прошедших обучение старших офицеров;

переговоры следует вести не прерывая, предложить снять дополнительные требования [12].

Тем не менее, самый разумный вывод – не допускать возникновения этого явления. Для этого нужно устранить долговременные условия, создающие чувства социальной неудовлетворенности, недовольства, отчаяния, безысходности. Если происходят какие-либо события, которые могут спровоцировать появление агрессивной толпы или толпа начинает собираться, то необходимо принимать срочные меры информационного, организационного и тактического плана к недопущению концентрации большого количества людей в одном месте. В частности, необходимо хотя бы временно изолировать от людей неформальных лидеров и зачинщиков беспорядков (лучший предлог для этого – участие в переговорах с властями) и задействовать людей, которые могли бы позитивно влиять на толпу.

Кроме того, диктуемая современностью необходимость перехода от прямого противостояния сил правопорядка нарушителям к использованию специальных средств, позволяющих с меньшими людскими потерями добиться восстановления общественного порядка. Данная тенденция обуславливает целесообразность развития специальных средств, кроме того, достоинством бесконтактного способа пресечения массовых беспорядков и групповых нарушений общественного порядка является то, что конечный результат (прекращение массовых беспорядков) достигается с наименьшими потерями гражданского населения и сил правопорядка. Если при контактных способах неминуема рукопашная схватка, что приводит к возрастанию агрессивности толпы, к телесным повреждениям, то неконтактные способы, по сути, бескровны. Разумеется, в конкретных условиях должна использоваться комбинация приемов и способов в зависимости от складывающейся обстановки, характера и масштабов массовых беспорядков. В бесконтактном способе важнейшим условием повышения эффективности данного тактического приема будет являться постоянное совершенствование профессионального мастерства всех военнослужащих и слаженности действий специальных подразделений.

В современных условиях противодействие групповым нарушениям общественного порядка и массовым беспорядкам является сложной и ответственной задачей, в ходе решения которой приоритетное значение должно придаваться мирному разрешению конфликтов без серьезных потерь и угрозы для жизни людей. Поэтому возникает

необходимость приведения вооружения и тактики действий ОВД и подразделений внутренних войск МВД Беларуси к мировым стандартам, исключая неадекватное применение силы.

Увеличение агрессивности правонарушителей, улучшение их технической оснащенности, увеличение числа тяжких преступлений, роста террористических угроз требуют тщательной подготовки к выполнению служебно-боевых задач по охране общественного порядка, применения современной тактики с учетом специфики проведения мероприятий, наращивания оснащенности внутренних войск МВД Беларуси новыми видами специальных средств повышенной эффективности.

Творческое, а в зависимости от сложившейся обстановки иногда и нестандартное применение сил и средств, поможет командирам соединений и воинских частей внутренних войск успешно выполнить поставленные задачи.

Список литературы

1. Абдульманов, А. А. О некоторых вопросах совершенствования уголовно-правовых средств борьбы с массовыми беспорядками / А.А. Абдульманов. – М.: Юрайт, 2000. – 238 с.
2. Арипов, Э. А. Предупреждение массовых беспорядков / Э. А. Арипов // Российский следователь. – М.: Воениздат, 2008. – № 8. – 20 с.
3. Багмет, А. Ответственность индивидуума за преступления, совершенные в толпе / А. Багмет // Законность. – М.: ИТИ Технологии, 2006. – № 11. – С. 42 – 43.
4. Войтоловский, А. Очерки коллективной психологии / А. Войтоловский. – М.: Госиздат, 1925. – 762 с.
5. Государственные преступления: учеб. пособие / под ред. М. И. Якубович и В. А. Владимирова. – М.: Высшая школа, 1961. – 542 с.
6. Демидов, Ю. Н. Массовые беспорядки: уголовно-правовой и криминологический аспекты / Ю. Н. Демидов. – М.: Норма, 2004. – 264 с.
7. Курмашов, А. Н. Анализ конфликтов ближнего и дальнего зарубежья / А. Н. Курмашов // сб. материалов ГУКВВ. – 2012.
8. Беспалов, О. Э. Применение дивизии внутренних войск при чрезвычайных обстоятельствах: дис. ... канд. воен. наук: 08.00.10 / О. Э. Беспалов. – М.: 2001. – 33 с.
9. Конституция Республики Беларусь 1994 года (с изменениями и дополнениями, принятыми на республиканских референдумах 24 ноября 1996 и 17 октября 2004 г.). – Минск: Амалфея, 2005.
10. Об органах внутренних дел Республики Беларусь: Закон Респ. Беларусь от 17.07.2007 № 263-З; ред. Закона Респ. Беларусь от 4.01.2014 г. № 123-З.
11. О внутренних войсках Министерства внутренних дел Республики Беларусь: Закон Респ. Беларусь от 3.06.1993 № 2341-ХП; ред. Закона Респ. Беларусь от 15.07.2015 г. № 294-З.
12. Мухортых, В. А. Толпа. Методы управления толпой / В. А. Мухортых // информац. сб. факультет. внутренних войск УО «Военная академия Республики Беларусь», 2012. – 91 с.

*Сведения об авторе:

Мещеряков Сергей Алексеевич,
УО «Военная Академия Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 20. 10. 2015 г.

УДК 358.1

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В СОСТАВЕ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-ОГНЕВОЙ СИСТЕМЫ

Д. А. Пестов; М. Ю. Избаш, кандидат военных наук*

В статье обоснованы способы применения беспилотных авиационных комплексов в составе разведывательно-огневой системы оперативного объединения на примере тактических БАК малой дальности.

The article gives ground for methods of the use of Unmanned Aircraft Complexes as a part of the reconnaissance and fire system of operative command by the example of tactical short-range UACs.

Известно, что разведывательно-огневая система (РОС) оперативного объединения включает в себя ряд подсистем. Традиционное деление на реализующую, обеспечивающую и управляющую подсистемы в данном случае не совсем корректно. Для достижения целей РОС из обеспечивающей подсистемы необходимо выделить и рассматривать в отдельном блоке разведывательную подсистему.

Не ставя целью определить главенство какой-либо из подсистем, что в принципе не верно, хочется отметить, что разведывательная подсистема привлекает в последнее время наибольшее и пристальное внимание, как наиболее проблемная. Не секрет, что средства разведки, в первую очередь артиллерийской, сегодня в полной степени не отвечают современным требованиям, необходимым для работы в составе РОС [1].

В данной ситуации целесообразным направлением работы могут быть: оснащение артиллерийских воинских формирований современными средствами артиллерийской разведки; применение нештатных групп корректировщиков и ряд других. Но наиболее целесообразным представляется применение всех имеющихся органов разведки комплексно, в том числе и с БАК малой дальности. Проведенные исследования показывают, что использование БАК может увеличить возможности средств артиллерийской разведки в 5 и более раз [4].

Рассмотрим особенности ведения разведки в интересах организации огневого поражения оперативного объединения на примере тактических БАК малой дальности.

БАК малой дальности предназначены для получения телевизионного, тепловизионного, фотографического изображения местности с использованием беспилотного летательного аппарата (БЛА), сбора и обработки параметрической и видовой информации, определения координат наземных объектов в реальном масштабе времени в условиях естественного освещения днем и ночью на глубину до 35 км [3].

Эксплуатация БАК может осуществляться на равнинной, пересеченной и горной местности при условии прямой радиовидимости между БЛА и наземной станцией управления (НСУ) в простых метеоусловиях при нижней кромке облачности на 30 м выше запланированной высоты полета БЛА [3].

Для старта и посадки (парашютным способом) БЛА достаточно открытых неподготовленных площадок небольших размеров.

Тактический радиус действия и погрешность определения координат позволяют применять его для целеуказания и корректирования стрельбы артиллерии оперативных объединений.

Воздушная разведка может вестись с использованием следующих целевых нагрузок, устанавливаемых на БЛА БАК малой дальности:

целевая нагрузка с видеокамерой – позволяет вести разведку в реальном масштабе времени с отображением видеоинформации на экране НСУ. При обнаружении объекта разведки оператор БЛА имеет возможность приблизить или отдалить объект при помощи

трансфокатора видеокамеры (зуммирования) и сделать стоп-кадр с изображением интересующего объекта. Просмотр стоп-кадров возможен в ходе выполнения полета. Основные преимущества данной целевой нагрузки – наличие трансфокатора (зуммирования) и возможность выдачи разведывательных данных (целеуказаний) непосредственно после обнаружения объектов. Основные недостатки – недостаточно высокое качество стоп-кадров видеозаписи и невозможность применения в условиях плохой видимости;

целевая нагрузка с инфракрасной (ИК) видеокамерой – позволяет вести разведку как в светлое, так и в темное время суток. Наиболее целесообразно использовать ИК камеру в холодное время (чем холоднее, тем лучше), а в теплое время года – ранним утром, либо после захода солнца. Данная целевая нагрузка позволяет вести воздушную разведку в реальном масштабе времени. В ходе полета оператор БЛА имеет возможность переключать тип изображения на экране НСУ с видимого на ИК и обратно. ИК камера позволяет просматривать местность как в монохромном, так и в цветном изображении. При обнаружении объекта разведки оператор БЛА делает стоп-кадры с изображением объекта, которые возможно просмотреть в ходе выполнения полета. Основные преимущества данной целевой нагрузки – возможность обнаружения теплоконтрастных объектов практически на любой местности, в том числе замаскированных, и выдачи разведывательных данных (целеуказаний, осуществления корректировки огня) непосредственно после обнаружения объекта. Основным недостатком – зависимость эффективности ведения воздушной разведки от температуры подстилающей поверхности и отсутствие трансфокатора (зуммирования);

целевая нагрузка с фотокамерой – позволяет осуществлять аэрофотосъемку районов с более высоким, по сравнению с другими целевыми нагрузками качеством. Фотографирование осуществляется в ручном или автоматическом режиме, при этом оператор БЛА имеет возможность устанавливать частоту съемки. Отснятый материал возможно использовать только после посадки БЛА. В реальном времени на экран НСУ поступает только информация от курсовой камеры низкого разрешения, позволяющей вести ориентирование в пространстве и пилотирование БЛА. Основные преимущества данной целевой нагрузки – высокое разрешение полученных фотографий и возможность составления фотопланов местности (сшивки нескольких фото в единое изображение). Основные недостатки – отсутствие трансфокатора (зуммирования) и невозможность использования материалов аэрофотосъемки в ходе полета БЛА.

Исходя из главного принципа РОС «обнаружил – поразил», можно предположить, что основной целевой нагрузкой будет считаться использование монохромной и инфракрасной видеокамер.

При ведении воздушной разведки БАК малой дальности с применением видеокамеры на максимальной высоте 600 м (обеспечивающей эффективное ведение воздушной разведки) полоса захвата местности одним БЛА ориентировочно составит:

$$L_3 = 2,2H_p = 2,2 \cdot 600 = 1,32 \text{ км,}$$

где L_3 – ширина полосы захвата местности, H_p – высота разведки.

Вместе с тем, оптимальные возможности по обнаружению объектов различны по высоте (таблица 1) и соответственно меняется полоса разведки.

Таблица 1. – Оптимальные возможности по обнаружению объектов

H_p , м	500	400	300
L_3 , км	1,1	0,9	0,7
	Авиационная техника Ракетная техника Специальная техника		Танки, БМП, САУ, БТР

Из таблицы 1 видно, что при проведении расчетов целесообразно полосу разведки принимать равной 1 км.

Учитывая значительный размах современных боевых действий, необходимо назначать подразделению БАК районы особого внимания, которые, в свою очередь, будут совпадать с зоной разведки и поражения артиллерийского подразделения.

На рисунке 1 представлен вариант ведения разведки района размером 6 на 20 км в 10 км от переднего края. Это позволит вскрыть основные объекты противника в пределах возможности средств поражения ОК (таблица 2).

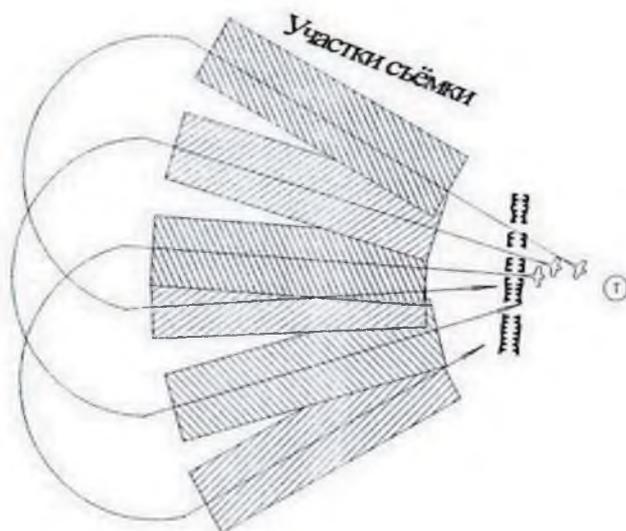


Рисунок 1. – Воздушная разведка районов больших размеров несколькими БЛА

Подразделения БАК малой дальности целесообразно применять двумя способами: одновременный полет всем составом подразделения (эскадрильи) БАК или большей частью сил на воздушную разведку в назначенное время;

полеты одиночных БЛА на воздушную разведку в назначенное время или по вызову.

Одновременный полет может осуществляться с началом боевых действий, когда необходимо в короткие сроки провести разведку районов больших размеров, вскрыть группировку, местоположение (координаты) значительного количества объектов противника (или провести их доразведку), а также в целях контроля результатов массированных ударов, нанесенных РВиА. Разведку районов больших размеров необходимо выполнять полетами нескольких БЛА. Их маршруты должны обеспечить необходимое (порядка 20–30 %) перекрытие между разведываемыми в каждом полете полосами.

Если выполняется телевизионная или инфракрасная разведка, полет двух-трех БЛА может выполняться одновременно или с временными интервалами, определяемыми тактической целесообразностью. Эти интервалы не должны быть большими, чтобы не увеличивать общие сроки выполнения воздушной разведки и представления разведывательных донесений.

Данный способ применения БАК требует заблаговременной подготовки нескольких БЛА, четкой организации работ в проведении подготовки к боевым действиям, особенно по приему разведывательных данных с борта БЛА, и быстрой обработке полученных разведывательных материалов.

Полеты одиночных БЛА являются основным способом боевых действий и применяются для последовательного ведения разведки отдельных малоразмерных объектов, а также при необходимости наблюдения за ними с заданной частотой. В случаях, когда одиночные полеты объединяются единым замыслом, взлет каждого последующего БЛА зависит от результатов разведки, полученных предыдущим БЛА.

Таблица 2. – Основные характеристики объектов поражения

Наименование объектов	Оперативно-тактические нормативы			
	Фронт, км	Глубина, км	Площадь, км ²	Удаление от ПК, км
Средства ядерного нападения				
Батарея 203,2 мм СГ на ОП	0,8–1	0,6–0,8	до 1	4–6
Батарея 155 мм СГ на ОП	0,3–0,5	0,8–1	0,5	2–4
Батарея РСЗО на ОП	0,8–1	0,6–0,8	до 1	4–6
ПУ ОТР (ТР) на СП				20–40
Общевойсковые объекты				
мпб в районе сосредоточения	4	4	16	20–30
тб в районе сосредоточения	3	3	9	20–30
мпр в районе сосредоточения	0,5	0,4	0,2	до 10
тр в районе сосредоточения	0,35	0,3	0,1	до 10
мпр в опорном пункте	1,5	0,8	1,2	до 5
тр в опорном пункте	1	0,6	0,6	до 5
ВОП 1 эшелона	0,4	0,3	0,12	2–3
Пункты и центры управления				
ОКП АК	4–6	7–10	28–60	20–40
ПКП АК	2	2	4	8–20
ОКП дивизии	4–6	4–6	16–36	8–20
ПКП дивизии	1,5	2	3	4–10
ОКП бригады	0,33	0,33	до 0,1	до 10
ПКП бригады	0,2	0,2	0,04	до 5
ППУ ТА	0,2	0,2	0,04	15–30
Средства ПВО				
Взвод ЗРК «Чапарэл»	0,3	0,2	0,06	2–3
Взвод ЗРК «Рапира»	0,4	0,3	0,12	3–5 и более
Взвод ЗРК «Роланд»	0,3	0,3	0,09	3–5

Полет БЛА осуществляется по заранее разработанному полетному заданию, обеспечивающему выход к заданному объекту в обход наиболее опасных средств ПВО. В ходе полета БЛА данное задание может корректироваться оператором БЛА. Полеты одиночных БЛА могут отличаться конфигурацией маршрутов, направлением выхода на объекты разведки и профилем полета. Конфигурация маршрута, направление и величины разворотов БЛА выбираются в зависимости от взаимного расположения объектов ПВО и самих объектов разведки. БЛА может выполнять воздушную разведку на различных отрезках маршрута.

Основными способами (маневрами) обнаружения могут являться:

«прочесывание» (рисунок 2) – способ обнаружения объекта разведки, при котором местность заданного района подвергается сплошному просмотру в ходе выполнения нескольких параллельных заходов. Достоинством этого способа является относительно простое планирование проведения разведки и облегченная обработка ее результатов в совокупности с результатами других БЛА. Также возможна реализация протяженных участков прямолинейного горизонтального полета БЛА, что повышает качество получаемых результатов. Основным недостатком этого способа обнаружения является трудность обеспечения скрытности проведения разведывательных мероприятий, особенно при малой полосе захвата бортовых средств разведки. В условиях активного противодействия средств ПВО противника применение этого способа обнаружения приводит к увеличению вероятности поражения (уничтожения) БЛА-разведчика;

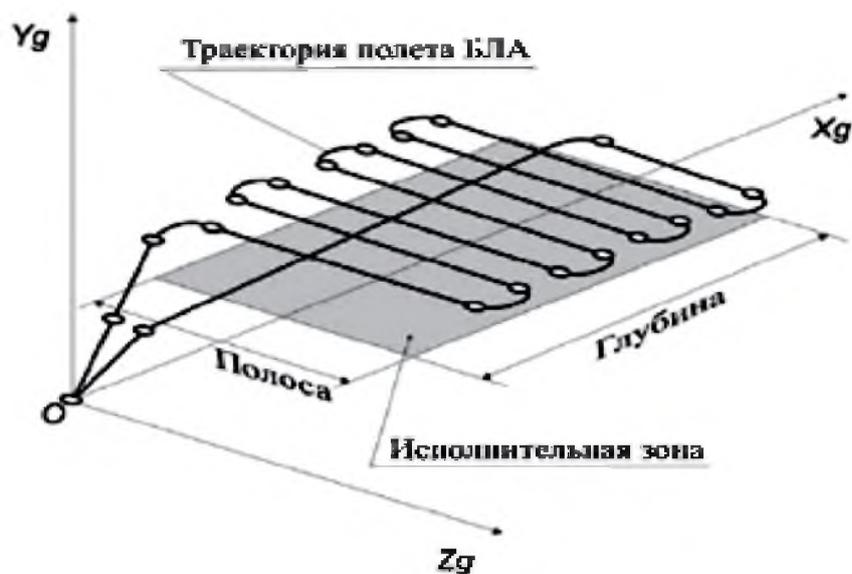


Рисунок 2. – Способ обнаружения «Прочесывание»

способ обнаружения «Сектор» (рисунок 3) – может применяться для поиска подвижных и ограниченно подвижных объектов на территории противника на удалениях, превышающих дальность воздействия, и в случаях, когда предполагаемое место нахождения объекта неизвестно. При этом территория противника разбивается относительно пункта управления БЛА на отдельные секторы, в каждом из которых одиночный БЛА выполняет боевую задачу. Этот способ обнаружения является высокоэффективным в условиях отсутствия сплошной линии соприкосновения войск;

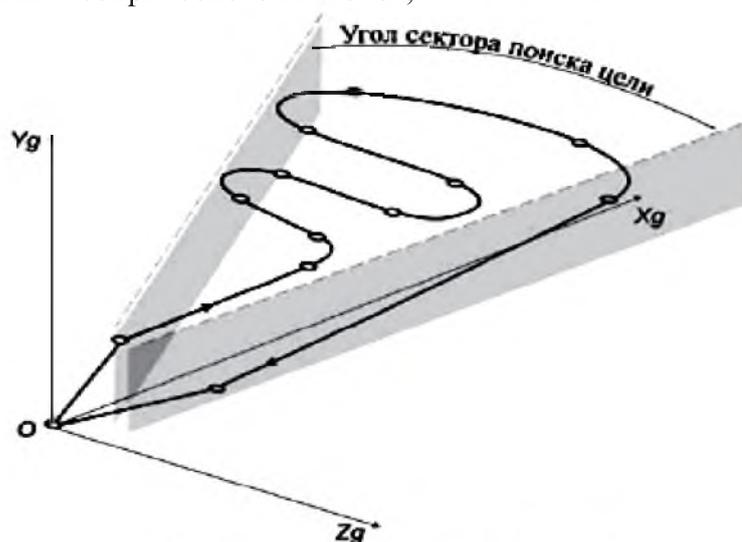


Рисунок 3. – Способ обнаружения «Сектор»

способ обнаружения «Маршрут» (рисунок 4) – может применяться при наличии первичной информации о месте положения одного или группы объектов противника, а также в условиях местности, обеспечивающих их однозначное положение или направление движения.

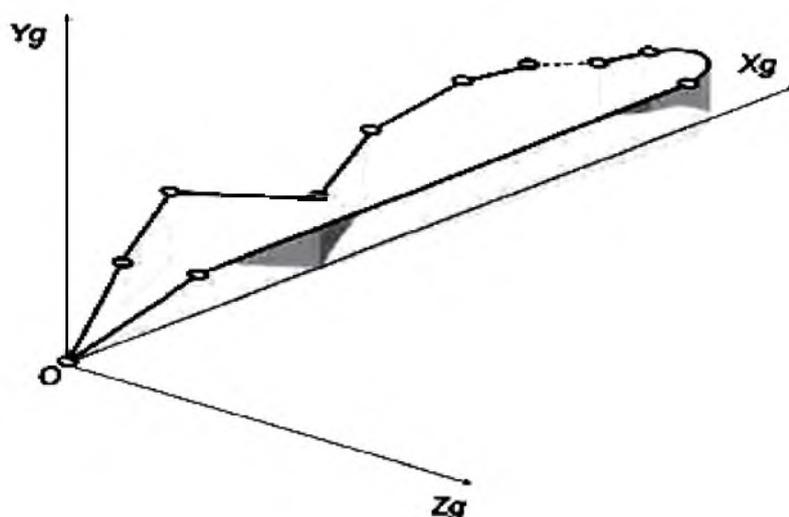


Рисунок 4. – Способ обнаружения «Маршрут»

Применение этого способа обнаружения обеспечивает максимальное использование тактико-технических характеристик БЛА и его оборудования в сочетании с маловысотным скоростным полетом. При реализации такого способа обнаружения объектов весь маршрут БЛА разбивается на отдельные участки, разделяющиеся промежуточными пунктами маршрута, которые имеют конкретные координаты.

При ведении воздушной разведки на большую глубину возможно сочетание различных вышеописанных способов обнаружения объектов (целей) противника. Такой подход характерен для условий локальных вооруженных конфликтов (например, в Ираке), при нарушении организованного противодействия средств ПВО или его отсутствии у противника вообще.

Для решения задач огневого поражения противника целесообразно комплексировать БЛА со средствами поражения войскового формирования.

При разведывательно-огневом комплексировании подразделение БАК может взаимодействовать с одним-двумя артиллерийскими дивизионами для поражения объектов противника в назначенных зонах разведки и поражения.

При этом связь с подразделением БАК целесообразно организовать по двум каналам: «информационному» – с начальником разведки артиллерийской воинской части; «огневому» – с командирами (начальниками штабов) комплексируемых артиллерийских дивизионов.

Сведения о разведанных объектах противника передаются одновременно по обоим каналам связи.

Поступившие по «информационному» каналу сведения обрабатываются и докладываются старшему начальнику для выработки решения на выполнение огневой задачи.

Сведения, поступившие по «огневому» каналу, используются командирами (начальниками штабов) артиллерийских дивизионов для расчета установок для стрельбы.

При этом целесообразно определить командиру артиллерийского дивизиона характер объектов (целей) противника, при обнаружении которых в своей зоне разведки и поражения он имеет право на принятие решения для их поражения самостоятельно с последующим докладом старшему артиллерийскому начальнику о выполнении огневой задачи [2].

Несмотря на очевидные преимущества применения БАК в составе РОС, имеется ряд недостатков, существенно снижающих эффективность применения:

использование тактических БАК малой дальности при наличии осадков в виде дождя и снега нецелесообразно;

низкие возможности видеокамер БПЛА по захвату местности в ходе разведки и необходимость в связи с этим увеличения их количества или частоты вылетов;

подверженность радиоканала управления БПЛА подавлению;

уязвимость БПЛА от средств ПВО и стрелкового оружия.

Однако в перспективе все эти недостатки могут быть устранены как техническими так и тактическими методами.

Таким образом, несмотря на имеющиеся проблемные вопросы, применение БАК является наиболее перспективным направлением дальнейшего развития разведывательной подсистемы РОС РВиА. Во взаимодействии с другими средствами разведки это позволит [5]:

перенести центр тяжести огневого поражения вглубь оперативного построения войск противника;

существенно повысить эффективность огневого поражения противника;

сократить потери своих войск;

придать большую автономность воинским формированиям РВиА и обеспечить рациональное сочетание централизованного и децентрализованного управления огнем поражением противника;

обеспечить выполнение критерия «эффективность – стоимость – реализуемость».

При этом наиболее оптимальным способом обнаружения целей в ходе современных высокоманевренных боевых действий будет способ «Сектор», а с учетом ожидаемого активного противодействия средств ПВО противника на всех этапах полета – выполняемый одновременно 2–3 БЛА.

Список литературы

1. Синявский, В. К. Анализ оперативного применения ракетных войск и артиллерии в вооруженных конфликтах современности. Выводы и перспективы развития рода войск / В. К. Синявский // Наука и воен. безопасность. – 2005. – № 1.

2. Наставление по подготовке и ведению боевых действий ракетных войск и артиллерии в операциях Вооруженных Сил. – Минск: МО РБ, 2010. – 29 с.

3. О принятии на вооружение ВС беспилотных авиационных комплексов. – Минск: МО РБ, 2014.

4. Разработка облика и тактико-технических требований к разведывательно-огневому комплексу на базе беспилотного авиационного комплекса и артиллерийского дивизиона: отчет о НИР «Рокот» / Воен. акад. Респ. Беларусь; рук. темы А. С. Масилевич. – Минск, 2010. – 186 с.

5. Михненко, В. М. Огневое поражение противника ракетными войсками и артиллерией при использовании беспилотного авиационного комплекса / В. М. Михненко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 2.

* Сведения об авторах:

Пестов Дмитрий Анатольевич,

Избаш Михаил Юрьевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 29.03.2016 г.

УДК 355.4

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ
ПРОТИВНИКА СИСТЕМАМИ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО
ПОТРЕБИТЕЛЯ**

В. В. Шлакунов, кандидат военных наук, доцент*

В статье с использованием математической модели обобщенного потребителя рассматривается методика оценки эффективности огневого поражения противника системами высокоточного оружия с учетом реализации свойства целевой избирательности, а также с учетом влияния обеспечивающих реализацию этого свойства средств.

In article with use of mathematical model of the generalised consumer the technique of an estimation of efficiency of fire defeat of the opponent by systems of the high-precision weapon taking into account realisation of property of target selectivity, and also taking into account influence providing realisation of this property of means is considered.

Современный этап развития военного искусства характеризуется резким возрастанием роли огневого поражения противника (ОПП) в достижении целей операции (боя) [1]. С учетом значительных изменений в характере и способах ОПП, обусловленных оснащением Вооруженных Сил (ВС) системами высокоточного оружия (ВТО), проблема увеличения эффективности ОПП системами ВТО приобретает особое значение. Необходимым условием решения данной проблемы является разработка методики оценки эффективности ОПП системами ВТО в целях определения рациональных направлений повышения этой эффективности.

Системы ВТО предназначены для избирательного поражения важных объектов группировки войск противника и элементов его инфраструктуры [1, 2]. В связи с этим в качестве одного из определяющих свойств, характеризующих данное оружие, выступает избирательность, под которой понимается способность системы ВТО наносить удары в наиболее важные (уязвимые) элементы цели для достижения требуемого уровня ущерба.

Проблема обеспечения избирательности особенно важна для ракетных войск и артиллерии (РВиА), большую часть из объектов поражения которых составляют сложные групповые объекты [2]. Такие объекты характеризуются наличием разнотипных элементов, причем для достижения требуемого уровня ущерба необходимо поражение определенных комбинаций элементарных целей (ЭЦ). Требования к избирательности еще более усиливаются из-за ограниченного радиуса поражающего воздействия боевых частей (БЧ) и их элементов, а также непостоянного характера размещения ЭЦ. При этом должны поражаться ЭЦ, определяющие ее функционирование (боеспособность).

Указанные особенности существенно отличают применение систем ВТО от применения обычного оружия. Следовательно, при оценке эффективности применения систем ВТО известные показатели эффективности и модели их расчета не всегда применимы.

Таким образом, проблема разработки методики оценки эффективности ОПП системами ВТО, обеспечивающими учет свойства избирательности систем ВТО, является актуальной как для дальнейшего развития систем ВТО, так и для последующего создания на их основе прецизионных средств поражения. Кроме того, необходимо отметить, что повышение качества применения систем ВТО возможно не только за счет совершенствования способов боевого применения и повышения огневых возможностей систем ВТО, но и за счет внедрения разнородных средств обеспечения их применения.

В данной статье рассматривается методика оценки эффективности ОПП системами ВТО с учетом реализации свойства целевой избирательности, в основу которой положено

моделирование функционирования системы ВТО в операциях с использованием математической модели обобщенного потребителя, а также рассматривается оценка влияния обеспечивающих средств на эффективность применения систем ВТО.

Методология оценки эффективности функционирования сложных систем, в том числе систем ВТО, раскрыта в целом ряде работ [3–5] и включает: 1) анализ целей и задач, решаемых системой; 2) прогнозирование условий применения достижений науки и техники для определения границ возможных значений качественных характеристик и условий на период применения; 3) выбор и формализацию обобщенного показателя эффективности; 4) разработку системы показателей для количественной оценки отдельных свойств, характеризующих эффективность; 5) формирование модели для связи обобщенного показателя с показателями, характеризующими отдельные свойства системы; 6) проверку адекватности модели и ее корректировку; 7) анализ результатов моделирования.

Одним из наиболее ответственных этапов исследования является выбор и обоснование показателя (системы показателей) эффективности. На этом этапе и сосредоточим основное внимание.

Понятие «избирательность» получило распространение сравнительно недавно. Так, в словаре русского языка под редакцией С. И. Ожегова [6] трактовка данного термина дается лишь в последних изданиях. В издании 1984 г. избирательность определяется, как «свойство производить отбор». В словаре В. Даля содержание глагола «избирать» толкуется как «выбирать, отбирать, делать выбор, брать или назначать любое, лучшее или худшее или отвечающее какому-либо назначению» [7].

Применительно к военной области избирательность системы ВТО – свойство, характеризующее способность системы производить выбор условий, способов или параметров воздействия на цель для нанесения объекту максимально возможного (или заданного) ущерба [8].

Избирательное воздействие на объект может заключаться, например, в поражении строго определенной ЭЦ или их комбинации; выборе поражающего фактора, воздействующего на цель (ударная волна, осколочное поле); определении времени воздействия (момент выхода целей из укрытий, преодоление водной преграды и т. п.). Различают такие виды избирательности, как [8]:

целевая избирательность – способность системы осуществлять выбор элементов объекта, поражаемых в конкретном ударе;

временная избирательность – способность системы осуществлять выбор наиболее целесообразного времени нанесения удара;

избирательность воздействия – способность системы осуществлять выбор поражающего фактора, соответствующего конкретной ситуации.

Целевая избирательность – одно из важнейших свойств системы ВТО, в значительной степени определяющее эффективность ее функционирования. Площадь большинства объектов поражения системами ВТО существенно превышает радиусы зон поражения БЧ, при этом часть объектов содержит высокопрочные или хорошо укрытые цели, поражение которых возможно лишь при определенном («прямом») попадании БЧ в цель. Это обуславливает необходимость отказа от концепции поражения заданной площади объекта и перехода к поражению определенных ЭЦ или их комбинаций, нарушающему функционирование объекта на заданное время [8].

Реализация целевой избирательности может быть обеспечена путем формирования концепции поражения объектов группировки и инфраструктуры противника на основе структурно-функциональной модели их функционирования в целях определения комбинаций ЭЦ, вывод которых из строя обеспечивает нанесение объекту требуемого ущерба.

Необходимость обеспечения временной избирательности обусловлена, с одной стороны, ролью и местом систем ВТО в возможных операциях, а с другой – особенностями объектов поражения. Обеспечение временной избирательности при нанесении удара по подвижным объектам и объектам с изменяющимися состояниями в связи с их высокой

мобильностью и быстрой сменой состояний возможно лишь при условии организации системы непрерывного мониторинга объектов поражения. Но даже это не снимает неопределенности, связанной с возможными изменениями состояния объекта за время его поражения. Одним из возможных путей разрешения указанного противоречия является разработка методов прогнозирования состояния объекта поражения по результатам доразведки [8].

Избирательность воздействия обусловлена как особенностями объектов поражения, так и могуществом БЧ. Одним из направлений реализации избирательности воздействия может быть как выбор поражающего фактора, так и учет группового действия БЧ.

Степень реализации свойства избирательности зависит от целого ряда факторов, среди которых можно выделить три основные группы:

совокупность ряда атрибутивных свойств, к числу которых можно отнести: свойства целевого назначения (достигаемость, могущество БЧ, точность), мобильность, надежность, живучесть, эргономичность;

внешние условия функционирования системы ВТО и отдельных его элементов;

способы применения системы ВТО в интересах решения задач операции.

Следовательно, избирательность является комплексным свойством, характеризующим как построение, так и функционирование системы ВТО в целом, а также ее отдельных элементов, что позволяет отнести ее к системным свойствам высокого уровня. В то же время, очевидно, что конечной целью избирательности является достижение требуемого уровня эффективности поражения объектов группировки войск и инфраструктуры противника. С данной точки зрения избирательность должна рассматриваться в качестве одного из свойств, определяющих функциональное назначение системы ВТО.

В связи с этим в качестве обобщенного показателя свойства избирательности систем ВТО может выступать приращение вероятности обеспечения требуемого типа поражения объекта за счет избирательности

$$\Delta w_i = w_i^* - w_i, \quad (1)$$

где w_i^* – обобщенный показатель эффективности выполнения i -й огневой задачи системой ВТО, рассчитанный с учетом обеспечения избирательности;

w_i – показатель эффективности выполнения i -й огневой задачи системой ВТО, рассчитанный без учета обеспечения избирательности.

Избирательность при выполнении системой ВТО конкретной задачи ОПП зависит от целого ряда случайных факторов, что обуславливает вероятностный характер проявления данного свойства. В результате выражение для w_i^* примет вид

$$w_i^* = P_i^* Q_i + (-P_i^*) \bar{w}_i, \quad (2)$$

где Q_i – показатель эффективности выполнения i -й огневой задачи системой ВТО при условии обеспечения избирательности – вероятность обеспечения требуемого типа поражения объекта при условии реализации целевой избирательности;

P_i^* – вероятность реализации избирательности как свойства системы ВТО.

Подставив выражение (2) в (1), получим

$$\Delta w_i = P_i^* Q_i - w_i. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что в качестве обобщенных показателей избирательности системы ВТО при выполнении i -й огневой задачи следует принять P_i^* и Q_i .

В то же время для обеспечения учета влияния избирательности системы ВТО на эффективность его применения в операции в целом система обобщенных показателей должна быть дополнена МОЖ числа огневых задач, решаемых системой ВТО в операции

$M \bar{P}$. Подход к определению числа огневых задач, решаемых системой ВТО в операции, представлен в работе [9].

Таким образом, избирательность системы ВТО должна характеризоваться системой показателей

$$I = Q_i, P_i^*, M n . \quad (4)$$

Система показателей реализации свойства целевой избирательности систем ВТО формируется из двух взаимосвязанных групп. К первой группе относятся показатели, характеризующие избирательность действия системы ВТО в операции, а вторая группа представляет собой множество показателей, характеризующих частные свойства системы ВТО, влияющие на избирательность действия. В свою очередь, взаимодействие двух рассмотренных групп показателей, характеризующих избирательность систем ВТО, определяется в соответствии с методологией системных исследований (рисунок 1) [3–5].

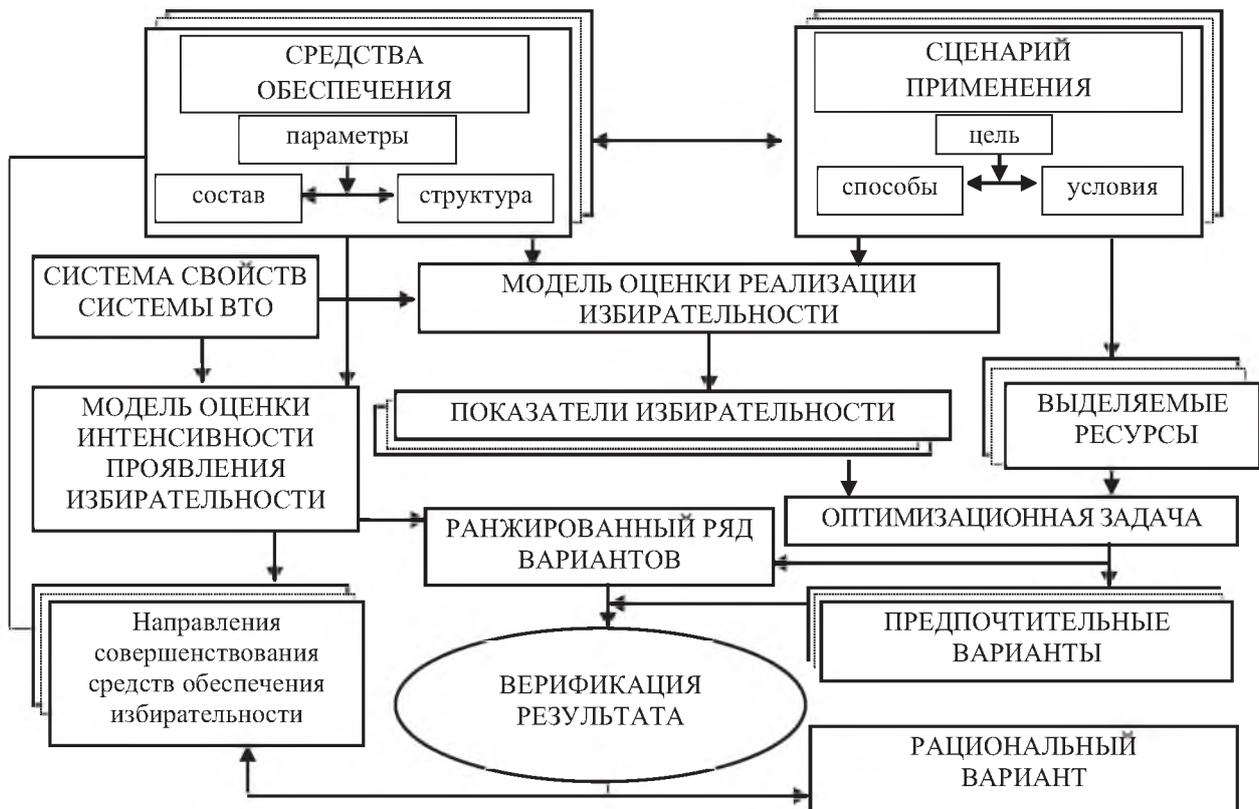


Рисунок 1. – Методология оценки избирательности комплексов ВТО

Обобщенные показатели избирательности, составляющие систему (4), носят вероятностный характер, что обуславливает необходимость применения для их оценки методов теории вероятностей и математической статистики. Ввиду значительной сложности систем ВТО, многообразия условий и способов их боевого применения, а также необходимости учета множества случайных факторов, влияющих на их функционирование, определение показателей (4) целесообразно осуществлять с помощью имитационного моделирования. Это позволит описать функционирование системы ВТО, обладающей определенными средствами реализации избирательности, в условиях заданного оперативно-тактического сценария применения системы.

В соответствии со схемой (см. рисунок 1) основой оценки реализации избирательности является модель, учитывающая, с одной стороны, возможные сценарии применения систем ВТО (цель, способы и условия применения), а с другой – возможные

средства обеспечения избирательности (структура, состав и параметры возможных вариантов средств обеспечения избирательности).

На основе моделирования функционирования системы ВТО в операциях определяются оценки показателей избирательности (4) и формируется множество недоминируемых вариантов реализации средств обеспечения избирательности. Далее выбор предпочтительных вариантов систем ВТО с точки зрения реализации избирательности сводится к решению оптимизационной задачи в условиях ограничений на выделяемые ресурсы.

Верификация полученных результатов и выбор рационального варианта обеспечения избирательности системы ВТО проводится на основе модели оценки интенсивности проявления избирательности. Основой для построения такой модели являются установленные различными методами взаимосвязи между свойствами системы ВТО и средствами обеспечения избирательности. Модель позволяет, с одной стороны, определить основные направления совершенствования средств обеспечения избирательности, а с другой – установить определенное отношение предпочтения на множестве рассматриваемых вариантов. Введенное отношение предпочтения, в свою очередь, является основой для выбора предпочтительного варианта системы ВТО, а также верификации модели оценки реализации избирательности в предполагаемых сценариях боевых действий.

Рассмотрим подход и методику оценки эффективности ОПП системой ВТО с учетом реализации свойства целевой избирательности, а также с учетом имеющей важное значение для практики оценки вклада средств обеспечения избирательности на эффективность применения систем ВТО (методика). Структурно-логическая схема методики представлена на рисунке 2.

Методика включает: блок исходных данных; расчетный блок; блок выходных данных.

В качестве исходных данных в методике используются различные сценарии операции, группировки и боевые возможности как системы ВТО, так и обеспечивающих ее функционирование средств, а также характеристики объектов поражения противника.

Оценка эффективности ОПП системами ВТО с учетом реализации свойства целевой избирательности, а также с учетом влияния обеспечивающих реализацию этого свойства средств осуществляется в такой последовательности:

1. Определяется число огневых задач, решаемых системой ВТО в операции.

Подход к определению числа огневых задач, решаемых системой ВТО в операции, представлен в работе [9].

2. Определяется вероятность выполнения огневой (боевой) задачи по поражению группового объекта системой ВТО.

Для получения указанной оценки может быть использована математическая модель обобщенного потребителя ресурсов средств обеспечения. Основными объектами исследований определим гипотетическую систему ВТО, в которой система управления БЧ включает инерциальную навигационную систему и приемник GPS, а также средства обеспечения избирательности, в качестве которых могут выступать средства разведки (беспилотный авиационный комплекс (БАК)), средства доведения команд, система информационного обеспечения (СИО) и др.

В качестве показателя для количественных оценок эффективности поражения объектов противника примем вероятность успешного завершения процесса наведения БЧ на цель $P_{БЗ}$ при условии безотказной работы технических средств системы ВТО [1, 3].

Для пояснения сути подхода проиллюстрируем простейший случай, когда целевое функционирование системы ВТО можно представить в виде последовательности ряда независимых этапов (разведка, подготовка к нанесению удара, наведение на цель, нанесение удара и т. д.). В этом случае структура показателя, в качестве которого выступает вероятность выполнения боевой задачи системой ВТО $P_{БЗ}$, может быть представлена мультипликативной сверткой

$$P_{БЗ} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (4)$$

где P_i – вероятность успешного завершения i - го этапа.



Рисунок 2. – Структурно-логическая схема методики оценки эффективности огневого поражения противника системами ВТО

Математический аппарат, устанавливающий зависимость эффективности боевого применения системы ВТО от состава и тактико-технических характеристик ударных средств, представляемых в виде обобщенного потребителя, боевые возможности которого зависят от характеристик, формируемых средствами обеспечения систем ВТО с учетом противодействия противника, образует модель взаимодействия обобщенного потребителя со средствами обеспечения системы ВТО.

Выделим следующие этапы целевого функционирования системы ВТО (применения обобщенного потребителя) [3]:

- подготовка пуска;
- наведение на цель (автономное функционирование);
- воздействие на цель;
- оценка результатов применения.

Процесс получения информации о предполагаемой цели может проходить с использованием как БАК, интегрированного в систему ВТО, так и других средств разведки (радиолокационной, радиотехнической, оптико-электронной и др.).

Разведка объектов группировки войск и инфраструктуры противника состоит из двух взаимосвязанных процессов – непосредственно процесс разведки и процессы передачи данных по различным каналам. Разведывательные операции характеризуются процессами обнаружения и идентификации объекта противника различными средствами разведки.

В модели производится учет разведки объектов средствами БАК, оптико-электронными, радиолокационными, радиотехническими и войсковыми средствами разведки.

Процесс наведения на цель заключается в непосредственном выводе БЧ на цель, а для кассетной БЧ – в выводе БЧ в точку ее вскрытия и разведения боевых элементов. Задача наведения на цель может решаться с помощью бортовых средств (в частности, инерциальная навигационная система) и при коррекции текущего местоположения (ТМС) с помощью глобальной навигационной системы космического базирования.

Воздействие на цель заключается в поражении объекта боевыми элементами БЧ.

Этап оценки результатов применения обобщенного потребителя аналогичен этапу разведки. Заметим, что характеристики разведывательных систем и систем передачи данных являются нестационарными, зависящими от множества параметров текущего района боевых действий. Поэтому, хотя оценка результатов применения системы ВТО происходит по той же методике, что и на этапе целераспределения, некоторые параметры имеющихся систем и, как следствие, результаты расчетов могут существенно отличаться от значений на начальном этапе функционирования системы.

Процесс доведения развединформации до соответствующих звеньев управления выделен в отдельную группу, так как к системам доведения команд предъявляются повышенные требования по надежности. Наиболее важной из этих систем является СИО системы ВТО, с помощью которой осуществляется непрерывный контроль состояния средств поражения, находящихся на боевом дежурстве, и доведение до них с высокой надежностью и оперативностью соответствующих команд.

С учетом вышесказанного вероятность выполнения боевой задачи системой ВТО может быть представлена выражением

$$P_{БЗ} = P_{\text{пи}} P_{\text{дк}} P_{\text{н}} P_{\text{ц}} P_{\text{др}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{пи}}$ – вероятность обнаружения объектов противника;

$P_{\text{дк}}$ – вероятность доведения команд и передачи данных;

$P_{\text{н}}$ – вероятность успешного наведения БЧ;

$P_{\text{ц}}$ – вероятность поражения цели;

$P_{\text{др}}$ – вероятность выполнения этапа доразведки (оценка выполнения боевой задачи).

Для оценки избирательности применения системы ВТО вероятность поражения цели рассматривается как вероятность обеспечения требуемого типа поражения объекта при условии реализации целевой избирательности Q_i , а произведение вероятностей обнаружения объектов противника, доведения команд и передачи данных, успешного наведения БЧ и выполнения этапа доразведки – как вероятность реализации избирательности в качестве свойства системы ВТО P_i^* .

Вероятность обнаружения объектов противника может быть записана в виде

$$P_{\text{пи}} = P_{\text{пи}}^{\text{БАК}} P_{\text{пи}}^{\text{ДР}} + (1 - P_{\text{пи}}^{\text{БАК}}) P_{\text{пи}}^{\text{ДР}} + P_{\text{пи}}^{\text{БАК}} (1 - P_{\text{пи}}^{\text{ДР}}), \quad (6)$$

где $P_{\text{пи}}^{\text{БАК}}$ – вероятность получения информации от БАК;

$P_{\text{пи}}^{\text{ДР}}$ – вероятность получения информации от других разведсредств.

Процесс получения информации от БАК включает разведку объектов и передачу данных на пункт обработки разведданных. Поэтому вероятность $P_{\text{ПИ}}^{\text{БАК}}$ определяется выражением

$$P_{\text{ПИ}}^{\text{БАК}} = P_{\text{Р}}^{\text{БАК}} P_{\text{ПД}}^{\text{СИО}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{Р}}^{\text{БАК}}$ – вероятность разведки объекта при использовании БАК;

$P_{\text{ПД}}^{\text{СИО}}$ – вероятность передачи данных по каналам СИО.

Участие других средств разведки и передачи данных на рассматриваемом этапе характеризуется вероятностью

$$P_{\text{ПИ}}^{\text{ДР}} = P_{\text{Р}}^{\text{ДР}} P_{\text{ПД}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{Р}}^{\text{ДР}}$ – вероятность обнаружения и идентификации объектов другими средствами разведки;

$P_{\text{ПД}}$ – вероятность передачи разведданных с помощью других систем связи.

Выражение для вероятности доведения команд имеет вид

$$P_{\text{ДК}} = P_{\text{ДК}}^{\text{СИО}} P_{\text{ДК}}^{\text{ДР}} + (1 - P_{\text{ДК}}^{\text{СИО}}) P_{\text{ДК}}^{\text{ДР}} + P_{\text{ДК}}^{\text{СИО}} (1 - P_{\text{ДК}}^{\text{ДР}}), \quad (9)$$

где $P_{\text{ДК}}^{\text{СИО}}$, $P_{\text{ДК}}^{\text{ДР}}$ – вероятности доведения команд с использованием СИО и других систем соответственно.

Вероятность успешного наведения можно записать в виде

$$P_{\text{Н}} = P_{\text{Н}}^{\text{GPS}} P_{\text{Н}}^{\text{X}} P_{\text{Н}}^{\text{Y}} + (1 - P_{\text{Н}}^{\text{GPS}}) P_{\text{Н}}^{\text{X}} P_{\text{Н}}^{\text{Y}} + P_{\text{Н}}^{\text{GPS}} (1 - P_{\text{Н}}^{\text{X}} P_{\text{Н}}^{\text{Y}}), \quad (10)$$

где $P_{\text{Н}}^{\text{GPS}}$ – вероятность коррекции ТМС с помощью глобальной навигационной системы;

$P_{\text{Н}}^{\text{X}}$, $P_{\text{Н}}^{\text{Y}}$ – вероятности успешного наведения без коррекции ТМС по координатам X , Y соответственно.

Особое значение в модели имеет подход к оценке показателей эффективности поражения целей. В качестве показателей эффективности поражения целей используются различные величины:

вероятность поражения цели;

математическое ожидание ущерба, нанесенного цели;

математическое ожидание числа пораженных целей;

вероятность нанесения цели ущерба, не менее заданного;

вероятность поражения не менее заданного числа объектов и др.

Наиболее употребительными и достаточными для проводимого исследования являются первые четыре из перечисленных показателей.

Вероятность поражения цели используется как показатель эффективности системы ВТО в том случае, если рассматривается ее применение для поражения малоразмерных одиночных целей, это же относится и к ЭЦ из состава группового объекта.

Математическое ожидание ущерба, наносимого цели, применяется в случае поражения сложных групповых объектов, т.е. объектов, включающих некоторую совокупность ЭЦ, рассредоточенных на ограниченном пространстве и связанных между собой функционально-технологическими связями. В качестве показателя для средств поражения, не обладающих свойством избирательности, выступает относительный ущерб в виде отношения среднего числа пораженных ЭЦ к общему их числу или средней площади обобщенной зоны поражения к общей площади групповой цели.

Особенностью применения систем ВТО по групповым объектам является поражение ЭЦ для выбранной критической комбинации. В связи с этим в качестве показателей

эффективности систем ВТО используется величина вероятности поражения группового объекта для выбранной критической комбинации P_{II}^K .

Для оценивания эффективности поражения цели, в том числе при реализации свойства избирательности систем ВТО, необходимо разрабатывать так называемую доктрину поражения, в которой понятие «поражение» конкретизируют вплоть до сугубо формального представления в виде так называемых гипотез поражения. Любая гипотеза поражения представляет собой предположительное суждение о том, что объект поражен на время, не менее заданного, как показано на рисунке 3.

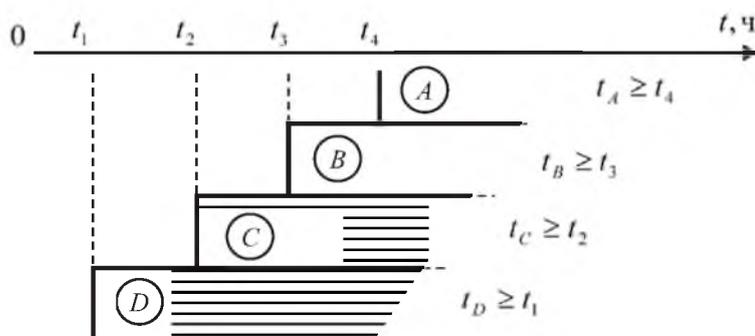


Рисунок 3. – Схематизация гипотез поражения цели по времени потери ими боеспособности

Сложность данной задачи определяется тем, что величина и степень ущерба зависит как от характера и свойств объекта поражения (тип и размеры объекта, его состав, функционально-логическая схема уязвимости, степень защищенности), так и от типа и характеристик применяемого средства поражения. В соответствии с принятыми нормативами по огневому поражению различных объектов группировки войск противника используется вероятность обеспечения требуемого типа поражения объекта, под которым понимается время потери им способности функционировать по прямому назначению. Для войсковых объектов существует четыре типа поражения A, B, C, D ; для объектов инфраструктуры – два типа поражения A, B [1].

Каждый тип характеризует определенную степень поражения объекта, отражающую величину физического ущерба и минимальное время восстановления его боеспособности. Например, для одиночного объекта поражение по типу A означает его уничтожение и невозможность восстановления его боеспособности (работоспособности) за время менее чем семь суток. Поражение по типу B означает вывод из строя объекта на время не менее одних суток, поражение по типу C означает повреждение объекта на время не менее трех часов, а поражение по типу D означает повреждение объекта на время не менее тридцати минут.

При определении типа поражения применительно к реализации свойства избирательности особенно важное значение приобретает разработка функционально-логической схемы уязвимости групповых объектов. В терминах алгебры событий гипотеза поражения по определенному типу записывается так: $A = \sum_i a_i$, где a_i – событие, означающее, что поражение i -й ЭЦ из состава группового объекта приводит к потере групповым объектом в целом боеспособности на ограниченное время.

Остальные гипотезы предполагают частичную потерю объектом боеспособности, но не исключают и безвозвратные потери, поэтому они записываются следующим образом:

$$B = A + \sum_j b_j, C = B + \sum_k c_k, D = C + \sum_l d_l, \quad (11)$$

где b_j, c_k, d_l – события, означающие, что при поражении определенной ЭЦ групповой объект теряет боеспособность на определенное время не менее t_j, t_k, t_l , но при определенных обстоятельствах каждое из указанных времен может превосходить время, соответствующее

событию a_i . При этом $t_l < t_k < t_j$. Если поражение объекта по определенной гипотезе наступает лишь при одновременном поражении ЭЦ, то в выражении (11) они записываются как произведения (например, $B = A + b_1 + b_2 \cdot b_3$, где $b_2 \cdot b_3$ означает одновременное поражение ЭЦ с номерами 2 и 3).

С помощью математического моделирования функционирования объекта поражения осуществляется обоснование выбора множества поражаемых ЭЦ и соответственно определяются гипотезы поражения группового объекта с использованием приведенной зависимости и, следовательно, определяется вероятность поражения группового объекта для выбранной критической комбинации P_{Π}^K .

Для определения вероятности поражения ЭЦ может быть использован метод статистических испытаний [3].

Вероятность поражения цели P_{Π} будет составлять произведение вероятности выбора критических комбинаций P_B^K и вероятности поражения группового объекта для выбранной критической комбинации P_{Π}^K :

$$P_{\Pi} = P_B^K P_{\Pi}^K. \quad (12)$$

Этап доразведки аналогичен этапу подготовки к применению обобщенного потребителя, следовательно, для расчета вероятности $P_{др}$ можно использовать соотношения (6)–(8).

3. Вычисляются значения коэффициентов важности отдельных обеспечивающих систем.

Одним из приложений модели обобщенного потребителя является задача определения важности отдельных обеспечивающих систем. В отличие от подхода, основанного на методе экспертных оценок, применение модели обобщенного потребителя позволяет детально исследовать влияние обеспечивающих систем на эффективность применения системы ВТО, вплоть до отдельного средства (комплекса), с учетом временных рамок и конкретных оперативно-тактических условий сценария.

Обобщенный алгоритм методики взвешивания обеспечивающих систем по важности содержит следующие основные этапы:

1. Временной интервал, характеризующий прогнозируемую длительность операции в рамках j -го сценария, разбивается на ряд последовательных временных подынтервалов, описывающих ключевые эпизоды сценария:

$$\Delta T_{s_j} = \sum_{i=1}^I \Delta t_{ij}, \quad (13)$$

где I – общее количество эпизодов.

Например, в первом приближении операция может быть представлена последовательностью решаемых оперативных задач, которые, в свою очередь, делятся на последовательность форм реализации боевых возможностей системы ВТО (массированный огневой удар (МОУ), систематические огневые действия, групповые ракетные удары, одиночные ракетные удары и др.). При наличии достаточных исходных данных процесс детализации может быть продолжен до циклограммы применения отдельно взятого средства. Например, с точки зрения последовательности достижения целей ОПП в ходе воздушной операции, целесообразной является привязка эпизодов к последовательности МОУ. Каждый эпизод может быть представлен тремя основными элементарными фазами: подготовки, нанесения удара и оценки результатов. Причем фаза оценки результатов предыдущего эпизода является подготовительной фазой для следующего.

2. Для каждой элементарной фазы на основании модели обобщенного потребителя рассчитывается показатель эффективности при условии участия всех обеспечивающих систем:

$$w_i \Delta t_i = f(\Omega, \Theta, H) \Delta W \Delta T = \sum_{i=1}^I f(\Omega, \Theta, H) \Delta t_i, \quad (14)$$

где Ω – множество систем оружия без учета вклада обеспечивающих средств;
 Θ – пространство условий и ограничений театра военных действий;
 H – группировка обеспечивающих средств.

3. Действие 2 повторяется для условия последовательного исключения из группировки одной из обеспечивающих систем

$$w_{im} \Delta t_i, -v_m = f(\Omega, \Theta, [V - v_m]). \quad (15)$$

В результате выполнения (8) и (9) будут получены оценки эффективности выполнения элементарных этапов $w_i \Delta t_i$ при условии полной группировки обеспечивающих систем и для случаев последовательного выключения отдельных m -х обеспечивающих систем $w_{im} \Delta t_i, -v_m$.

4. В рамках элементарного этапа Δt_i для каждой m -й обеспечивающей системы определяется ее абсолютный вклад в эффективность:

$$w_{im} v_l = w_i \Delta t_i - w_{im} \Delta t_i, -v_m. \quad (16)$$

5. Рассчитываются коэффициенты важности отдельных обеспечивающих систем, пропорциональные их вкладу в эффективность элементарного этапа:

$$k_{im} = \frac{\Delta w_{im} v_m}{\sum_{m=1}^M \Delta w_{im} v_m}, \quad (17)$$

где M – общее количество обеспечивающих систем в j -м сценарии.

Множество коэффициентов k_{im} , приведенных для всего интервала, характеризуют динамику изменения важности m -й обеспечивающей системы в рамках j -го сценария, а приоритетность решения задач сохранения боеспособности каждой обеспечивающей системе может быть представлена функцией от времени $k_m = f(t)$.

На основании анализа коэффициентов важности каждой обеспечивающей системы могут быть определены интервалы времени, когда их вклад достигает максимума, что может служить основанием для определения оперативных требований к системам обеспечения целевой избирательности системы ВТО.

Таким образом, разработанная автором методика оценки эффективности ОПП системами ВТО, в основе которой используется математическая модель обобщенного потребителя, обеспечивает учет реализации свойства избирательности системы ВТО и позволяет оценивать эффективность огневого поражения противника системами ВТО, а также степень влияния обеспечивающих реализацию данного свойства средств. В первом случае это необходимо для принятия должностными лицами РВиА решений по боевому применению систем ВТО, обеспечивающих максимальную реализацию их боевых возможностей, а во втором – в интересах принятия решений по направлению первоочередных усилий на развитие тех обеспечивающих средств, чей вклад в эффективность системы ВТО является наибольшим.

Рассмотренные задачи определения эффективности боевого применения системы ВТО с учетом реализации свойства целевой избирательности и оценки вклада обеспечивающих систем в реализацию данного свойства достаточно просто формализуются и могут быть включены в состав специального математического и программного обеспечения систем

поддержки принятия решений в составе создаваемой автоматизированной системы управления РВиА.

Список литературы

1. Бобриков, А. А. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии: воен.-теорет. тр. / А. А. Бобриков. – СПб.: Галерея Принт, 2006. – 424 с.
2. Мурзич, И. К. Боевое применение ракетных войск и артиллерии в современных общевойсковых операциях / И. К. Мурзич, А. В. Лебедкин. – Минск: ВА РБ, 2007. – 72 с.
3. Запорожец, В. И. Боевая эффективность средств поражения и боеприпасов / В. И. Запорожец. – СПб.: БГТУ, 2006. – 159 с.
4. Чудаков, Ю. В. Проблема учета противодействия противника при планировании ракетных ударов и огня артиллерии в ходе операции (боя) и пути ее решения: дис. ... д-ра техн. наук: 20.02.20 / Ю. В. Чудаков. – Л., 1975. – 320 л.
5. Фендриков, Н. М. Методы расчетов боевой эффективности вооружения / Н. М. Фендриков, В. И. Яковлев. – М.: Воениздат, 1971. – 195 с.
6. Ожегов, С. И. Словарь русского языка / С. И. Ожегов. – М.: Рус. яз., 1984. – 684 с.
7. Даль, В. И. Толковый словарь живого великорусского языка / В. И. Даль. – М.; СПб.: Изд-во М. О. Вольфа, 1881. – Т. 2. – 780 с.
8. Зубачев, А. Б. Избирательное воздействие на объекты поражения: направления и средства реализации / А. Б. Зубачев, К. А. Злотников // Воен. мысль. – 2000. – № 6. – С. 15–19.
9. Шлакунов, В. В. Боевые действия артиллерии механизированной группы, действующей в передовой полосе обороны в условиях Северо-Западного операционного направления Республики Беларусь: дис. ... канд. воен. наук: 20.01.04 / В. В. Шлакунов. – СПб., 2008. – 235 л.

*Сведения об авторе:

Шлакунов Виталий Валерьевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 24.04.2016 г.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

УДК 537.86.029

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ КАЛИБРОВКИ И НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПЕЙ В ДИАПАЗОНЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

А. В. Гусинский, кандидат технических наук*

В статье рассматриваются вопросы повышения точности измерительных СВЧ систем путем уменьшения систематических погрешностей, определяемых при калибровке. Предложена обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения для СВЧ устройств, представленных $2n$ -полюсниками.

The article deals with improving the accuracy of microwave measurement systems by reducing systematic errors determined during calibration. A generalized mathematical model calibration processes and direct measurement for microwave devices presented on the base of the $2n$ -port devices.

В радиоэлектронике устройства и системы должны передавать СВЧ сигналы, несущие важную и объемную информацию, поэтому разработчики и производители таких устройств и систем больше всего озабочены передачей СВЧ сигналов от одной точки устройства (и в целом системы) к другой с максимальной эффективностью, т. е. с наименьшими потерями и минимальными искажениями передаваемой информации. Фактически анализ сигналов и параметров цепей является методом точной характеристики СВЧ компонентов и устройств путем измерения их влияния на амплитуды и фазы калиброванных сигналов, обычно в режимах свипирования частоты и мощности.

Целью любой измерительной СВЧ системы является установление параметров исследуемых устройств, подключаемых к измерительным входам системы, с точностью, гарантирующей специфицируемые характеристики этих устройств. В идеальном случае измерительные СВЧ системы должны быть абсолютно точными и полностью обеспечивать достоверные измерения. Если бы было возможно существование идеальной измерительной СВЧ системы, она должна была бы иметь бесконечный динамический диапазон, постоянную частотную характеристику передачи тракта, бесконечные развязки и характеристики направленности и быть без рассогласований импедансов в любой части измерительного СВЧ тракта. Однако даже в самых точных измерительных СВЧ системах существуют некоторые несовершенства, которые могут служить причиной неидеальных результатов измерений. При любых СВЧ измерениях имеются погрешности измерений, связанные с измерительной СВЧ системой, которые способствуют неидеальности получаемых результатов. Отдельные части измерительного СВЧ тракта вносят вариации в амплитуды и фазы измеряемых сигналов, которые искажают фактические параметры и характеристики исследуемого СВЧ устройства. Например, перекрестные связи (просачивание), обусловленные характеристиками развязки каналов измерительной СВЧ системы, могут приводить к погрешностям, близким или равным передаваемому (прошедшему) сигналу испытуемых СВЧ устройств с большими потерями. Аналогично при измерении отражений главное ограничение динамического диапазона определяется направленностью измерительного СВЧ тракта.

Погрешности измерений могут быть обусловлены факторами, которые являются повторяющимися, воспроизводимыми и предсказуемыми во времени, – это систематические погрешности. Такие погрешности, как правило, могут быть уменьшены. В то же время существуют и погрешности другого характера, которые носят случайный характер и не могут быть устранены, – это случайные погрешности. В большинстве сверхвысокочастотных измерений систематические погрешности оказываются наиболее значительными источниками неопределенности измерений. Систематические погрешности можно сгруппировать с учетом причин, их вызывающих. После того, как каждая из этих погрешностей определена и охарактеризована, влияние этих погрешностей может быть эффективно устранено получением соответствующих корректирующих величин (поправок) для характеристик исследуемого устройства. В целях повышения векторной точности неопределенности измерений количественно определяются и выражаются через такие погрешности, как погрешности направленности, согласования генератора СВЧ, согласования нагрузки, развязки (перекрестных частотных зависимостей согласования трактов).

При измерении фактическому значению параметров сигнала (уровню мощности или характеристике цепи), например комплексному коэффициенту отражения или передачи, ставится в соответствие измеренное с некоторой систематической погрешностью значение этого параметра или характеристики, причем связь между фактическим и измеренным значением определяется наличием некоторой математической модели многополюсника погрешностей [1].

В качестве модели погрешностей, используемой в самом общем случае – при измерении параметров и характеристик устройств, представляемых некими произвольными многополюсниками с числом портов n (с числом полюсов соответственно $2n$), с учетом погрешностей, вызываемых возможностями утечек сигнала за счет связей между всеми парами портов, может быть использован многополюсник погрешностей, который в эквивалентной схеме измерения связывает n -портовый объект измерения с n -портовой измерительной системой (рисунок). При этом все систематические погрешности измерительной системы представляются посредством характеристик рассеяния этого $2n$ -портового многополюсника \dot{E}_n .

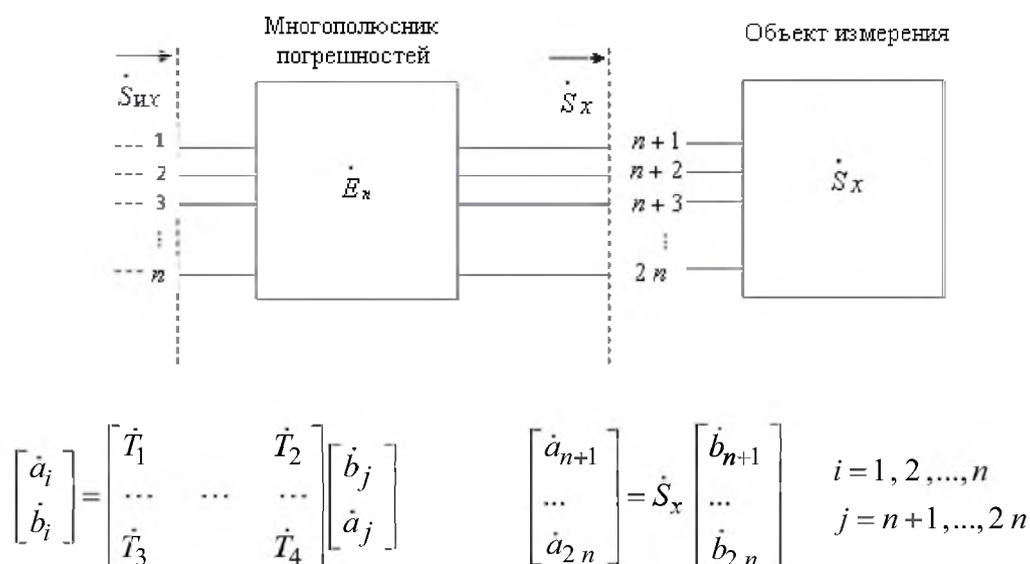


Рисунок. – Модель погрешностей при измерении параметров и характеристик $2n$ -полюсного объекта измерения

Многополюсник погрешностей \dot{E}_n в таком случае содержит n портов (1, 2, ..., n), соединяемых с n -портовой измерительной системой, и n портов ($n + 1$, $n + 2$, ..., $2n$),

подсоединяемых к n портам объекта измерения \dot{S}_x . Первая группа портов представляет собой входы многополюсника погрешностей, на которых определяются измеряемые параметры рассеяния $\dot{S}_{\text{вх}}$ объекта измерения, а вторая группа портов представляет собой выходы, к которым «подключены» фактические параметры рассеяния \dot{S}_x объекта измерения.

Для количественного описания в матричном виде многополюсника погрешностей на каждой частоте необходимо иметь максимум $2n^2$ независимых комплексных параметров. При этом оптимальным представляется вариант установления соответствия между портами $1, 2, \dots, n$ входа и портами $n+1, n+2, \dots, 2n$ выхода, при котором любой из n сигнальных путей между входом i и соответствующим выходным портом $(i+n)$ можно рассматривать как «прямой» путь, в то время как любой другой путь можно считать представляющим сигналы утечки. Тогда из общего числа путей $n(2n-1)$ имеются $2n(n-1)$ путей утечки и n прямых путей и, как следствие этого, из общего числа $2n^2$ независимых комплексных параметров, описывающих многополюсник погрешностей \dot{E}_n , $4n(n-1)$ представляют сигналы утечки и $4n$ параметров описывают прямые пути.

В ситуациях нулевых утечек, когда существуют только прямые пути сигналов, $2n$ -портовая схема многополюсника погрешностей \dot{E}_n может быть расщеплена по горизонтали на n двухпортовых схем, непосредственно связывающих соответствующие входы и выходы. В этом случае матричное представление \dot{E}_n будет содержать $4n$ ненулевых параметров и $4n(n-1)$ нулевых.

Для получения в общем виде уравнения калибровки при $2n$ -портовой модели многополюсника погрешностей используется его волновая матрица передачи \dot{T} порядка $2n \times 2n$, записываемая в клеточном виде, и затем находится связь измеренной матрицы рассеяния $\dot{S}_{\text{вх}}$ объекта измерения с его фактической матрицей рассеяния \dot{S}_x , выражаемой через матрицы-клетки волновой матрицы \dot{T} .

При таком подходе получим

$$\dot{b}_i = \dot{T}_4 \dot{S}_x + \dot{T}_3 \quad \dot{T}_2 \dot{S}_x + \dot{T}_1^{-1} \dot{a}_i. \quad (1)$$

Сравнивая полученное выражение (1) с определением измеряемой матрицы рассеяния порядка $n \times n$ $\dot{S}_{\text{вх}}$ на входе

$$\dot{b}_i = \dot{S}_{\text{вх}} \dot{a}_i, \quad (2)$$

имеем

$$\dot{S}_{\text{вх}} = \dot{T}_4 \dot{S}_x + \dot{T}_3 \quad \dot{T}_2 \dot{S}_x + \dot{T}_1^{-1}. \quad (3)$$

Это уравнение показывает, как четыре квадранта (клетки) $\dot{T}_1, \dots, \dot{T}_4$ волновой матрицы передачи \dot{T} $2n$ -портового многополюсника погрешностей связывают измеренную матрицу рассеяния $\dot{S}_{\text{вх}}$ с фактической матрицей рассеяния \dot{S}_x . Это уравнение и есть в обобщенном виде уравнение калибровки СВЧ устройства, представляемого $2n$ -полюсной эквивалентной схемой.

В случае использования произвольного эталонного устройства l данное уравнение может быть записано как

$$\dot{S}_{kl} = \dot{T}_4 \dot{S}_{\text{э}l} + \dot{T}_3 \quad \dot{T}_2 \dot{S}_{\text{э}l} + \dot{T}_1^{-1}, \quad (4)$$

где $\dot{S}_{\text{э}l}$ – известная по результатам соответствующей аттестации матрица рассеяния калибрующего устройства, $l = 1, 2, \dots, r$.

Можно показать, что любое из r матричных уравнений (4) n -порядка может быть записано как

$$\dot{T}_4 \dot{S}_{3l} + \dot{T}_3 - \dot{S}_{kl} \dot{T}_2 \dot{S}_{3l} - \dot{S}_{kl} \dot{T}_1 = 0. \quad (5)$$

Каждое из этих r уравнений может быть сведено к ряду из n^2 уравнений на входе многополюсника погрешностей, описываемого \dot{T} -матрицей. Так как это матрица порядка $2n$ и она содержит $(2n)^2$ элементов, то решение уравнения (4) требует в общем случае решения четырех систем уравнений для четырех n -портовых эталонных устройств. Если при $n=2$ решение этой задачи для каждого стандарта представляет достаточно хорошо разработанную процедуру, то при n , больших 2, можно столкнуться с весьма сложной задачей.

Решение уравнения (5) в матричной форме возможно выражением квадрантов (клеточных матриц) $\dot{T}_1, \dots, \dot{T}_4$ в виде матричных функций от матриц \dot{S}_{kl} и \dot{S}_{3l} . Однако из-за некоммутативности матричного произведения и появления квадранта \dot{T}_2 в матричном произведении «сэндвичного» вида $\dot{S}_{kl} \dot{T}_2 \dot{S}_{3l}$ решить систему соответствующих скалярных линейных уравнений не удастся. Тем не менее произведение матриц «сэндвичного» типа в (5) можно исключить, применяя преобразование, использующее два матричных оператора, – это кронекеровское произведение $\dot{A} \otimes \dot{B}$ двух матриц \dot{A} и \dot{B} и оператор перемещения $S \dot{A}$ матрицы \dot{A} [1, 2].

Применяя к матрицам \dot{A} и \dot{B} порядка $(n \times n)$ кронекеровское умножение, получают $(n^2 \times n^2)$ -матричное произведение, в то время как \dot{S} -оператор преобразует $n \times n$ -матрицу \dot{A} в n^2 -размерный вектор-столбец $S \dot{A}$ последовательной перестановкой столбцов матрицы \dot{A} в вертикальном порядке. Альтернативно может быть использован и RS -оператор, воздействие которого аналогично воздействию S -оператора на транспонированную матрицу \dot{A}^T , т. е.

$$RS \dot{A} = S \dot{A}^T. \quad (6)$$

Следовательно, $RS \dot{A}$ является вектором-столбцом размерностью n^2 , содержащим последовательно в вертикальном порядке строки матрицы $[\dot{A}]$, повернутые на 90° по часовой стрелке.

Используя указанные выше операторы, можно избавиться от «сэндвичного» вида матричного произведения $[\dot{A}] \cdot [\dot{B}] \cdot [\dot{C}]$ (случай n -портовых калибрационных устройств).

В результате решения уравнения калибровки получим:

$$\begin{aligned} RS \dot{T}_1 &= \dot{A}^{-1} \dot{B} - \dot{C}^{-1} \dot{D}^{-1} \dot{A}^{-1} \dot{E} - \dot{C}^{-1} \dot{F} \quad RS \dot{T}_4 ; \\ RS \dot{T}_2 &= \dot{B}^{-1} \dot{A} - \dot{D}^{-1} \dot{C}^{-1} \dot{B}^{-1} \dot{E} - \dot{D}^{-1} \dot{F} \quad RS \dot{T}_4 ; \\ RS \dot{T}_3 &= \left[\dot{S}_{M1} \otimes \dot{S}_{M1}^T \quad \dot{B}^{-1} \dot{A} - \dot{D}^{-1} \dot{C}^{-1} \quad \dot{B}^{-1} \dot{E} - \dot{D}^{-1} \dot{F} + \right. \\ &\left. + \dot{S}_{M1} \otimes \dot{I} \quad \dot{A}^{-1} \dot{B} - \dot{C}^{-1} \dot{D}^{-1} \quad \dot{A}^{-1} \dot{E} - \dot{C}^{-1} \dot{F} - \dot{I} \otimes \dot{S}_{3l}^T \right] RS \dot{T}_4 ; \\ RS \dot{T}_4 &- \text{произвольный, ненулевой комплексный вектор-столбец порядка } n^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где вспомогательные матрицы $\dot{A}, \dot{B}, \dots, \dot{E}, \dot{F}$ порядка $n^2 \times n^2$ определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{S}_{kl} \otimes \dot{S}_{3l}^T - \dot{S}_{k2} \otimes \dot{S}_{32}^T ; \\ \dot{B} &= \dot{S}_{kl} \otimes l - \dot{S}_{k2} \otimes l ; \\ \dot{C} &= \dot{S}_{kl} \otimes \dot{S}_{3l}^T - \dot{S}_{k3} \otimes \dot{S}_{33}^T ; \\ \dot{D} &= \dot{S}_{kl} \otimes l - \dot{S}_{k3} \otimes l ; \\ \dot{E} &= l \otimes \dot{S}_{3l}^T - l \otimes \dot{S}_{32}^T ; \\ \dot{F} &= l \otimes \dot{S}_{3l}^T - l \otimes \dot{S}_{33}^T .\end{aligned}\tag{8}$$

$$\dot{S}_{kl} = \dot{T}_4 \dot{S}_{3l} + \dot{T}_3 \cdot \dot{T}_2 \dot{S}_{3l} + \dot{T}_1^{-1} = \dot{S}_{3l} + \dot{T}_3 \dot{T}_4^{-1} \dot{T}_2 \dot{T}_4^{-1} \dot{S}_{3l} + \dot{T}_1 \dot{T}_4^{-1}^{-1} ,$$

где l – единичная матрица n -го порядка.

Уравнение восстановления \dot{S}_x исходя из \dot{S}_{ix} можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{S}_x &= \left\{ \dot{T}_4 - \dot{T}_3 \dot{T}_1^{-1} \dot{T}_2^{-1} \dot{S}_{ix} + \dot{T}_2 - \dot{T}_1 \dot{T}_3^{-1} \dot{T}_4^{-1} \right\} \times \\ &\times \left\{ \dot{T}_3 - \dot{T}_4 \dot{T}_2^{-1} \dot{T}_1^{-1} \dot{S}_{ix} + \dot{T}_1 - \dot{T}_2 \dot{T}_4^{-1} \dot{T}_3^{-1} \right\}^{-1} .\end{aligned}\tag{9}$$

Если квадранты $\dot{T}_1, \dots, \dot{T}_4$ матрицы \dot{T} взаимно коммутируют, выражение (9) значительно упрощается:

$$\dot{S}_x = \dot{T}_1 \dot{S}_{ix} - \dot{T}_3^{-1} - \dot{T}_2 \dot{S}_{ix} + \dot{T}_4^{-1} .\tag{10}$$

Приведем непосредственный вывод уравнения восстановления в форме выражения (10).

Уравнение для многополюсника погрешностей в виде клеточных матриц имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{a}_i \\ \dot{b}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{T}_1 & \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 & \dot{T}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{a}_j \\ \dot{b}_j \end{bmatrix} ,$$

где $i=1, 2, \dots, n$; $j=n+1, n+2, \dots, 2n$.

Отсюда

$$\begin{cases} \dot{a}_i = \dot{T}_1 \dot{b}_j + \dot{T}_2 \dot{a}_j ; \\ \dot{b}_i = \dot{T}_3 \dot{b}_j + \dot{T}_4 \dot{a}_j . \end{cases}$$

С учетом связи волн \dot{a}_j и \dot{b}_j , определяемой как $\dot{a}_j = \dot{S}_x \dot{b}_j$, запишем данную систему уравнений в виде

$$\begin{cases} \dot{a}_i = \dot{T}_1 + \dot{T}_2 \dot{S}_x \dot{b}_j ; \\ \dot{b}_i = \dot{T}_3 + \dot{T}_4 \dot{S}_x \dot{b}_j . \end{cases}$$

Учитывая связь волн на входном интерфейсе адаптера ошибок, а именно

$$\dot{b}_i = \dot{S}_{\text{их}} \dot{a}_i,$$

получаем:

$$\dot{S}_{\text{их}} \dot{T}_1 + \dot{T}_2 \dot{S}_x = \dot{T}_3 + \dot{T}_4 \dot{S}_x .$$

Отсюда для $\dot{S}_{\text{их}}$ получаются выражения в виде

$$\dot{S}_x = \dot{T}_4 - \dot{S}_{\text{их}} \dot{T}_2 \quad^{-1} \quad \dot{S}_{\text{их}} \dot{T}_1 - \dot{T}_3$$

или

$$\dot{S}_x = \dot{T}_1 \dot{S}_{\text{их}} - \dot{T}_3 \quad - \dot{T}_2 \dot{S}_{\text{их}} + \dot{T}_4 \quad^{-1} .$$

На основе решения общих уравнений калибровки и восстановления можно получить соответствующие выражения для конкретных значений n .

Список литературы

1. Гусинский, А. В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: моногр.: в 3 ч. / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – Кн. 1: Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей. – Минск: БГУИР, 2008. – 240 с.
2. Шаров, Г. А. Математика радиоэлектроники сверхвысоких частот. Координаты. Векторы. Матрицы. Тензоры / Шаров Г. А., Кострикин А. М., Гусинский А. В. – Минск: Бестпринт, 2014. – 242 с.

*Сведения об авторе:

Гусинский Александр Владимирович,

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Статья поступила в редакцию 11.04.2016 г.

УДК 621.396.67

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОКЛИНГТОНА МЕТОДОМ КРЫЛОВА – БОГОЛЮБОВА

Ю. Н. Егоров; В. В. Гладейчук, кандидат технических наук, доцент*

В статье предложена методика оценки устойчивости численного решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова – Боголюбова для проволочных антенн произвольной геометрии. Методика отличается высокой достоверностью решения и однозначностью используемого критерия.

The technique of an assessment of stability of the numerical decision of the Poklington's integrated equation by Krylov – Bogolyubov's method for wire antennas of arbitrary geometry is proposed in the article. The technique is differs high reliability of the decision and unambiguity of used criterion.

Введение

В современной теории и практике проволочных антенн значительное внимание уделяется разработке универсальных математических алгоритмов, позволяющих проводить строгий электродинамический анализ объектов произвольной геометрии. Обзор существующих методов расчета проволочных антенн [1–3] показывает, что при использовании электрически тонких проволок, когда радиус проводника r_0 значительно меньше длины волны ($r_0 \ll \lambda$), для построения общей математической модели часто используются интегральные уравнения электродинамики в тонкопроволочном приближении.

Достаточно широкое применение, в частности, имеет интегральное уравнение Поклингтона [1]. Один из основных его недостатков – принадлежность к классу уравнений Фредгольма 1-го рода, приводящих к некорректным, по Адамару, задачам [4]. Это проявляется в неустойчивости вычислительного алгоритма и требует проверки достоверности решения.

Для получения устойчивого решения часто применяется метод саморегуляризации, рассматривающий длину отрезка разбиения проволочного излучателя в качестве регуляризирующего параметра [1, 5]. При этом критерием устойчивости обычно является сходимость одной или нескольких величин, описывающих поведение искомого тока при изменении параметра регуляризации. Значения оцениваемых параметров, полученные на интервале сходимости, могут сверяться с иными теоретическими или экспериментальными данными, если таковые известны. В противном случае решение о достоверности полученных результатов принимается только на основании оценки их сходимости.

Основным недостатком метода саморегуляризации, по мнению авторов, является отсутствие однозначного подхода в выборе оцениваемых параметров и определения критерия их сходимости. Отсюда вытекают трудности реализации и применения универсальных математических алгоритмов расчета антенн произвольной геометрии.

Таким образом, в рамках практики использования интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении актуальной становится задача поиска единой методики оценки устойчивости их численного решения, сочетающей однозначность используемого критерия и высокую достоверность.

Численное решение интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова – Боголюбова

Интегральное уравнение Поклингтона для произвольного криволинейного проводника длиной L и радиусом r_0 можно представить в виде [1, 5]:

$$\int_L I(s')K(s, s')ds' = U(s), \quad (1)$$

где $I(s')$ – искомая функция тока, текущего в проводнике;

$K(s, s') = \frac{\partial^2 G(s, s')}{\partial s \partial s'} - k^2 G(s, s') \vec{s}_0 \vec{s}'$ – ядро интегрального уравнения Поклингтона;

$U(s) = i \frac{k}{\rho_0} \vec{E}_\tau(s)$ – функция, определяющая возбуждение проводника;

$\vec{E}_\tau(s)$ – касательная составляющая электрического поля, возбуждающего проводник;

$G(s, s') = G = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}$ – функция Грина свободного пространства;

$r = \sqrt{(\vec{s} - \vec{s}')^2 + r_0^2}$ – расстояние между точками наблюдения и истока;

\vec{s}, \vec{s}' – радиус-векторы точек на оси проводника;

\vec{s}_0, \vec{s}'_0 – единичные векторы, касательные к проводнику антенны;

$\rho_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В общем случае уравнение (1) может быть решено только численными методами. Среди них наиболее часто применяется метод моментов [1], заключающийся в сведении интегрального уравнения к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{n=1}^N I_n K_{mn} = U_m, \quad (2)$$

или в сокращенной матричной форме

$$KI = U, \quad (3)$$

где $K_{mn} = \int_L w_m(s) \int_L K(s, s') f_n(s') ds' ds$ – элементы матрицы обобщенных сопротивлений K ;

$U_m = \int_L w_m(s) U(s) ds$ – элементы столбца обобщенных напряжений U ;

$f_n(s'), w_m(s)$ – базисные и весовые функции соответственно;

I_n – элементы строки искомых коэффициентов разложения тока I ;

$m, n \in [1; N]$.

От выбора базисных и весовых функций для конкретной конструкции антенны зависит область применения и точность решения (1), а также объем вычислительных затрат. Одной из наиболее универсальных по отношению к геометрии излучателя и простых разновидностей метода моментов является метод Крылова – Боголюбова [6, 7], использующий в качестве базисных кусочно-постоянные функции, а в качестве весовых – дельта-функции Дирака. При этом элементы матриц K и U принимают вид:

$$K_{mn} = \int_{\Delta L_n} K(s_m, s') ds', \quad (4)$$

$$U_m = i \frac{k}{\rho_0} E_\tau(s_m), \quad (5)$$

где ΔL – длина сегмента разбиения;

s_m, s_n – координаты центра n -го и m -го сегмента соответственно.

Интеграл в (4) решается численно. Выбор метода интегрирования, сочетающего низкие затраты вычислительных ресурсов при заданной точности, зависит от геометрии

излучающей системы. Для случая произвольной геометрии вариант построения эффективного алгоритма численного интегрирования предложен в [8].

Как отмечалось ранее, устойчивость решения уравнения (1) может достигаться подбором длины сегмента разбиения ΔL , при которой диагональные элементы матрицы K преобладают над остальными. В [8] установлено, что для проволочных структур произвольной геометрии преобладание диагональных элементов обеспечивается при $\Delta L \leq 0,1\lambda$, а рельеф матрицы сохраняет относительную устойчивость при любых $\Delta L > r_0$.

Критерием устойчивости решения обычно является сходимость одной или нескольких величин, описывающих изменение искомого тока при различных значениях регуляризирующего параметра ΔL в сравнении с известными теоретическими или экспериментальными данными. В качестве оцениваемых параметров могут использоваться пиковые значения тока или среднеквадратическое отклонение его значений в фиксированных точках геометрии. Так как истинное распределение тока вдоль проводников антенны обычно неизвестно, то в качестве оцениваемого параметра, характеризующего достоверность численной модели, удобно использовать входное сопротивление

$$Z_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}$ – соответственно напряжение и ток в зазоре возбуждения.

Связь между напряжением $U_{\text{вх}}$ и касательными составляющими электрического поля $E_{\tau}(s_m)$ определяется моделью δ -генератора, позволяющей задать амплитуду и фазу возбуждения одного или нескольких сегментов. Выбор модели возбуждения зависит от конструкции возбуждающей антенны устройства [1] и может в значительной степени влиять на ее входное сопротивление. В простейшем случае $E_{\tau}(s_m)$ задается для одного сегмента и определяется выражением

$$E_{\tau}(s_m) = U_{\text{вх}} / \Delta L_m. \quad (7)$$

В [2] показано, что устойчивость и сходимость решения также может оцениваться по норме матрицы СЛАУ введением специального параметра – числа обусловленности:

$$\mu = \|K\| \cdot \|K^{-1}\|, \quad (8)$$

где $\|K\|$ – норма матрицы обобщенных сопротивлений.

В качестве нормы может использоваться любая, например, m -норма:

$$\|K\| = \max_m \sum_n |K_{mn}|. \quad (9)$$

Ее получают суммированием по модулю всех строк матрицы K и максимальная из полученных сумм объявляется нормой.

Большие значения меры обусловленности соответствуют плохо обусловленным системам. В таких системах малые возмущения исходных данных приводят к значительным вариациям решения. Таким образом, резкий рост меры обусловленности матрицы СЛАУ при увеличении числа расчетных точек свидетельствует о потере алгоритмом устойчивости вследствие некорректности задачи [4].

Анализ устойчивости численного решения интегрального уравнения Поклингтона для линейного симметричного вибратора

В целях определения критериев устойчивости численного решения интегрального уравнения (1) методом Крылова – Боголюбова выполнено решение тестовых задач для линейных симметричных вибраторов из проводников разного радиуса. Данные для сравнительного анализа взяты из [9], где в виде таблиц представлены результаты расчета входного сопротивления вибраторов средней электрической толщины: $l/r_0 = 10 \dots 100$,

$l/\lambda = 0,01 \dots 0,55$ (рисунок 1), а также получены с помощью программы моделирования проволочных антенн MMANA [10].

Тестовые значения входного сопротивления в [9] представлены для различных значений ширины зазора возбуждения вибратора 2Δ ($\Delta/l = 0,01 \dots 0,1$). При этом первичное поле в зазоре задавалось в виде

$$E_z(s) = U_{\text{вх}} / 2\Delta, \quad (10)$$

что полностью соответствует простейшей модели δ -генератора (7).

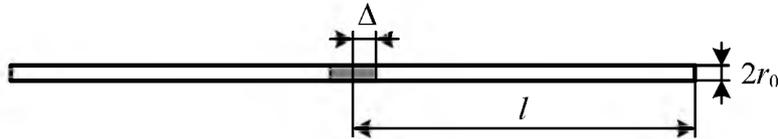


Рисунок 1. – Линейная симметричная вибраторная антенна

В ходе сравнения полученных результатов учитывалось, что при изменении регуляризирующего параметра ΔL изменяется также и ширина зазора возбуждения в (7), что, в свою очередь, приводит к изменению тока и входного сопротивления антенны. Поэтому для максимальной объективности верификации результатов расчета подбор тестовых значений из [9] осуществлялся с учетом максимального соответствия 2Δ и ΔL .

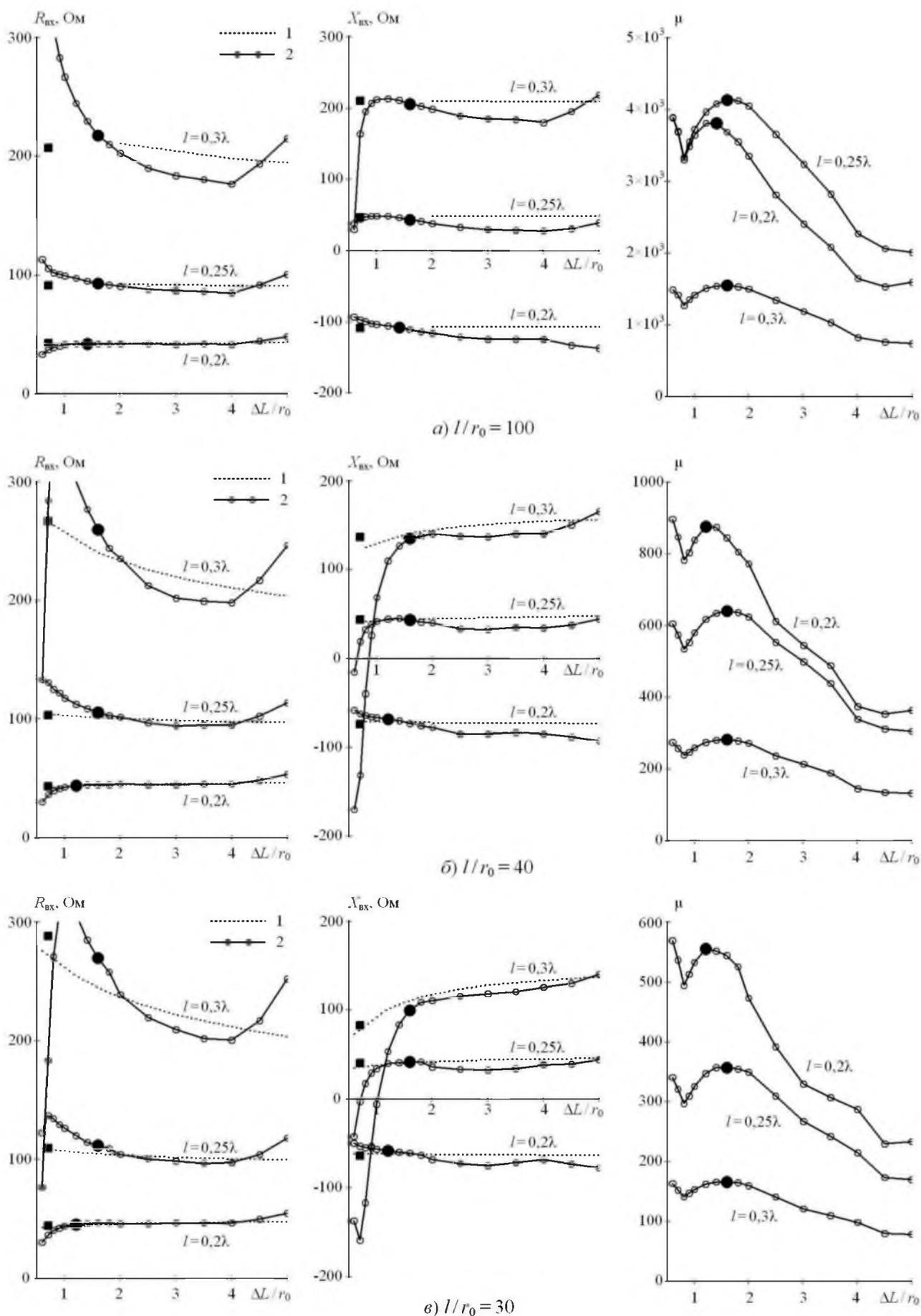
Результаты решения тестовых задач для вибраторов разной толщины (l/r_0) и волновой длины ($2l/\lambda$) представлены на рисунке 2 в виде графиков зависимости их входного сопротивления (6) и числа обусловленности СЛАУ (8) от длины отрезка разбиения.

Анализ этих графиков позволяет сделать ряд выводов:

1. Участок сходимости по входному сопротивлению вибратора занимает диапазон значений параметра регуляризации, составляющий $\Delta L \approx (2 \dots 4)r_0$. Границы указанного диапазона являются примерными и могут изменяться в зависимости от волновой длины вибратора и оцениваемой величины. Так, в случае $2l = 0,3\lambda$ участок сходимости по активной составляющей сопротивления ($R_{\text{вх}}$) выражен хуже, чем по реактивной ($X_{\text{вх}}$). В случае же, когда $2l = 0,2\lambda$, наоборот, сходимость по $R_{\text{вх}}$ значительно лучше, чем по $X_{\text{вх}}$. Отмеченные особенности говорят о неоднозначности выбора оптимального значения ΔL и затрудняют его алгоритмизацию.

2. Согласно проведенным расчетам во всех рассмотренных примерах на участке сходимости сопротивление $X_{\text{вх}}$ оказывается заниженным. Несколько занижено и $R_{\text{вх}}$, что особенно проявляется у вибратора большой волновой длины ($2l = 0,3\lambda$). Таким образом, решение хотя и имеет явные признаки сходимости, но в то же время не является достоверным. Недостоверность решения подтверждается также данными расчетов, полученных с помощью программы MMANA (отмечены на графиках квадратными маркерами ■).

3. В диапазоне значений параметра регуляризации $\Delta L \approx (1 \dots 2)r_0$ отмечается примерно одинаковое экстремальное поведение графиков числа обусловленности СЛАУ. В окрестности локального максимума (отмечен на графиках круглыми маркерами ●) значения μ можно считать относительно стабильными и сходящимися к вершине. При этом решение по входному сопротивлению также имеет признаки сходимости.



1 – тестовые значения из [9], 2 – расчетные значения

Рисунок 2. – Графики сходимости параметров вибраторов

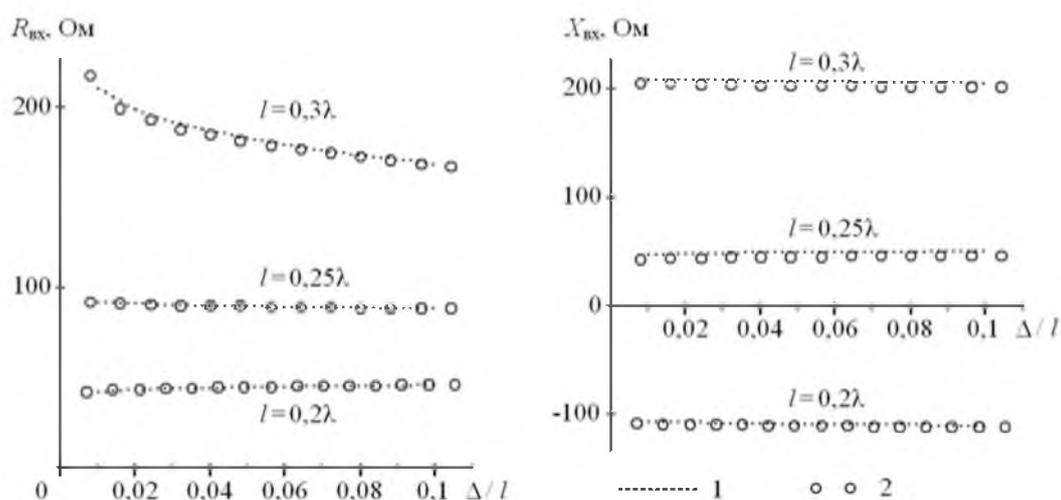
4. Наблюдается хорошее сходство тестовых и расчетных значений входного сопротивления, соответствующих локальному максимуму μ (●) на интервале сходимости. При этом оптимальное значение параметра саморегуляризации ΔL однозначно определяется по максимуму μ , находящемуся в заранее известном диапазоне значений $r_0 < \Delta L < 2r_0$. Высокая достоверность решения также подтверждается результатами расчетов в MMANA (■).

5. Интегральное уравнение Поклингтона в совокупности с методом Крылова – Боголюбова может успешно применяться к решению задач возбуждения вибраторов средней электрической толщины. Однако наиболее близкими к тестовым являются расчетные значения входного сопротивления антенны для тонких вибраторов (см. рисунок 2, а). Это можно объяснить повышением точности аппроксимации искомого тока за счет увеличения числа базисных функций на длине волны, так как оптимальное соотношение $\Delta L/r_0$ во всех случаях примерно одинаково.

Влияние ширины зазора возбуждения 2Δ на входное сопротивление антенны может быть учтено путем задания первичного поля не в одном, как в (7), а в M соседних сегментах, суммарная длина которых соответствует 2Δ :

$$E_{\tau}(s_m) = U_{\text{вх}} / \sum_M \Delta L_m. \quad (11)$$

В качестве примера на рисунке 3 представлены зависимости входного сопротивления вибратора от длины зазора возбуждения для случая $l/r_0 = 100$ и различных волновых размеров. При этом сегментация численной модели на каждой рабочей частоте выполнена по критерию сходимости числа обусловленности СЛАУ. Налицо полное соответствие расчетных и тестовых значений входного сопротивления.



1 – тестовые значения из [9], 2 – расчетные значения

Рисунок 3. – Графики зависимости входного сопротивления вибратора от ширины зазора возбуждения

Заключение

Выполнен сравнительный анализ устойчивости численного решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова – Боголюбова для линейного симметричного вибратора по входному сопротивлению и числу обусловленности СЛАУ. В результате установлено, что в качестве критерия устойчивости целесообразно рассматривать максимум числа обусловленности СЛАУ на заранее известном интервале изменения параметра

саморегуляризации $r_0 < \Delta L < 2r_0$. Преимуществами данной методики являются высокая достоверность решения и однозначность используемого критерия.

В качестве недостатка можно отметить увеличение в 2–3 раза числа сегментов разбиения в сравнении со случаем оценки устойчивости по входному сопротивлению, что требует больших вычислительных ресурсов. Однако малая длина сегмента разбиения позволяет строить более точные модели криволинейных проволочных излучателей, а также использовать более сложные модели возбуждения.

Список литературы

1. Вычислительные методы в электродинамике / пер. с англ.; под ред. Р. Митры. – М. : Мир, 1977. – 485 с.
2. Бузова, М. А. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: учеб. пособие / М. А. Бузова, В. В. Юдин. – М. : Радио и связь, 2005. – 172 с.
3. Milligan, T. A. Modern antenna design. 2nd ed. / T. A. Milligan. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. – 614 p.
4. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 288 с.
5. Демидчик, В. И. Алгоритм расчета токораспределения электрически длинных криволинейных проводников / В. И. Демидчик, Н. В. Калашников, А. В. Рунов // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1983. – Т. 26. – № 3. – С. 82–84.
6. Докуков, И. А. Сравнительная оценка возможностей интегральных уравнений и базисных функций при численном решении задач о токораспределении и входном сопротивлении тонких криволинейных проволочных излучателей / И. А. Докуков // Радиотехника. – 1987. – № 1. – С. 76–77.
7. Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. – Л. : Физматгиз, 1962. – 708 с.
8. Егоров, Ю. Н. Математическая модель проволочных фрактальных антенн произвольной геометрии / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Электроника инфо. – 2015. – № 6 (120). – С. 51–55.
9. Сочилин, А. В. Таблицы входных сопротивлений вибраторных антенн: (справ.) / А. В. Сочилин, С. И. Эминов; ред. Л. Д. Бахрах. – М. : Радиотехника, 2005. – 78 с.
10. Гончаренко, И. В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA / И. В. Гончаренко. – М. : РадиоСофт: журнал «Радио», 2002. – 80 с.

*Сведения об авторах:

Егоров Юрий Николаевич,

Гладейчук Владимир Владимирович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 02.05.2016 г.

УДК 519.876.2

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ПОСРЕДСТВОМ РЕКУРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А. А. Жук; В. М. Булойчик, доктор технических наук, профессор*

Материалы статьи посвящены разработке нейросетевой модели для решения задачи оптимального распределения ресурсов, отличающейся учетом системы линейных ограничений, позволяющей получить вариант решения за полиномиальное время.

Article materials are devoted working out neural network model for the decision of a problem of optimum distribution of the resources, system of the linear restrictions different by the account, allowing to receive a decision variant for polynomialtime.

Формализация задачи оптимального распределения ресурсов при наличии линейной системы ограничений, линейной целевой функции и целочисленных элементов решения представляет собой задачу целочисленного линейного программирования, которая относится к задачам, требующим для решения специальных методов, в частности методов комбинаторной оптимизации [1].

Для решения комбинаторно-оптимизационных задач вообще и задач распределения в частности используются различные точные и приближенные методы [2, 3], причем единственным методом, гарантирующим нахождение оптимального решения, является полный перебор всех возможных вариантов [4]. Однако множество допустимых решений таких задач экспоненциально растет с увеличением размерности входных данных, что делает неприемлемым использование метода полного перебора. Так, при самых простых вариантах распределения, когда число возможных их комбинаций равно 10^{11} , и использовании при этом точных методов решения, даже при современном уровне развития вычислительной техники, нельзя гарантировать получение решения в приемлемое для практики время [2].

Тем не менее во многих областях деятельности, и особенно в военной, часто необходимо оперативно решать задачи рассматриваемого класса. При этом приближенное решение задачи, полученное в приемлемое время, более ценно, чем точное решение, найденное через значительный промежуток времени. Данное обстоятельство и стимулировало бурное развитие различных приближенных методов решения комбинаторно-оптимизационных задач [2], среди которых наибольший интерес (с точки зрения рассматриваемой задачи) представляют нейросетевые и генетические алгоритмы [5]. А поскольку генетические алгоритмы не гарантируют нахождения оптимального решения за полиномиальное время [5], то при решении рассматриваемой задачи был сделан выбор в пользу нейросетевого метода, который обеспечивает получение квазиоптимального решения в реальном времени.

В настоящее время известны и широко применяются ряд нейросетевых моделей для решения задач комбинаторной оптимизации [6, 7].

Наиболее близкой по технической реализации для рассматриваемой задачи является модель, основанная на нейронной сети Хопфилда (рисунок 1).

Все нейроны такой сети связаны друг с другом симметричными связями $w_{ij} = w_{ji}$, распространяющимися с выхода нейрона на входы остальных нейронов сети, причем сигнал с выхода нейрона не может подаваться на его же вход.

Каждая компонента x_i входного вектора X подается на соответствующий i -й нейрон.

При дискретном представлении такой сети изменения состояний нейронов описываются следующим рекуррентным соотношением:

$$y_{t+1}^{(i)} = F\left(\sum_j w_{ij} y_t^{(j)} - \theta_i\right);$$

$$y_t^{(i)} = h_i, \quad i, j = \overline{1, n},$$

где $y_{t+1}^{(i)}$ – значение i -го нейронного элемента;

t – дискретно изменяющееся время;

F – активационная функция нейронов;

θ_i – пороговое значение i -го нейрона;

h_i – входное значение i -го нейронного элемента;

n – количество нейронов в сети.

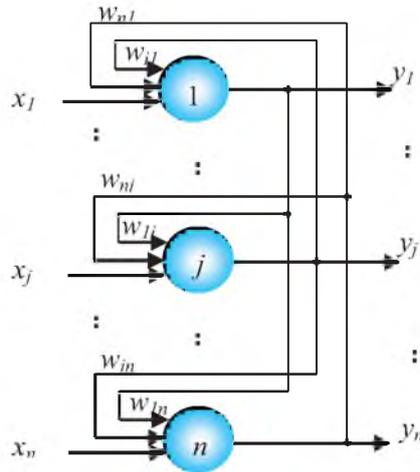


Рисунок 1. – Архитектура нейронной сети Хопфилда

При возбуждении сети (т. е. при подаче хотя бы на один ее i -й вход значения $h_i > 0$) она производит вычисления, следуя по пути, уменьшающему вычислительную энергию. Релаксационный процесс изменения состояний нейронов можно интерпретировать как движение точки в фазовом пространстве в устойчивое положение, определяемое минимумом вычислительной энергии – функции Ляпунова [8]:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} V_i V_j - \sum_{i=1}^n I_i V_i; \quad i \neq j, \quad (1)$$

где V_i – выходной сигнал нейрона i ;

V_j – выходной сигнал нейрона j ;

I_i – входной сигнал нейрона i .

Чтобы обучить такую сеть, необходимо сформировать соответствующий профиль энергетической поверхности (рисунок 2), т. е. выбрать веса таким образом, чтобы при фиксировании каждого входного вектора сеть приходила к энергетическому минимуму.

Важнейшее свойство сети Хопфилда состоит в том, что одна и та же сеть с одними и теми же весами может хранить и воспроизводить несколько различных эталонов (d_j). Каждый эталон является аттрактором, вокруг которого существует область притяжения (впадины).

Такое свойство сети Хопфилда на практике часто используется при решении задач ассоциативного распознавания [9]. В этом случае впадины и долины в сети соответствуют наборам информации, которую хранит сеть. Если процесс возбуждения начинается с приближенной или неполной информации (т. е. сеть возбуждена в области притяжения некоторого i -го локального минимума вычислительной энергии, соответствующего определенной информации), то он следует по пути, который ведет к ближайшей впадине (т. е. к этому i -му локальному минимуму). Траектория движения точки может характеризовать процесс «вспоминания» хранимой сетью информации. Этот же процесс может быть интерпретирован и как процесс поиска локального минимума функции

вычислительной энергии, т. е. как решение задачи поиска наименьшего значения функции, формируемой весовыми коэффициентами сети.

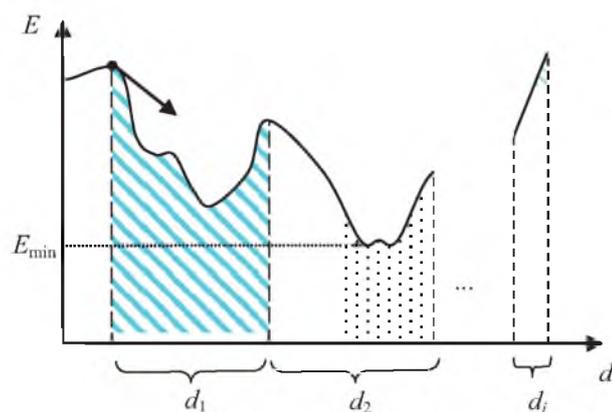


Рисунок 2. – Профиль энергетической поверхности

Обучение нейронной сети Хопфилда основывается на правиле обучения Хебба и реализует следующую последовательность действий [6, 8]:

1. Начальная установка значений выходов (при этом активационные функции имеют вид, представленный на рисунке 3):

$$y_0^{(i)} = h_i, \quad i = 0, 1, \dots, n-1.$$

2. Расчет новых состояний нейронов:

$$s_{t+1}^{(j)} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} y_t^{(i)}, \quad j = 0, 1, \dots, n-1.$$

3. Расчет новых выходных значений нейронов:

$$y_{t+1}^{(j)} = F[s_{t+1}^{(j)}].$$

4. Проверка изменения выходного сигнала: $|y_{t+1}^{(j)} - y_t^{(j)}| \geq 0$.

Если «да» – переход к шагу 2, иначе (если выходной сигнал находится в зоне притяжения определенного аттрактора и не меняется) – конец.

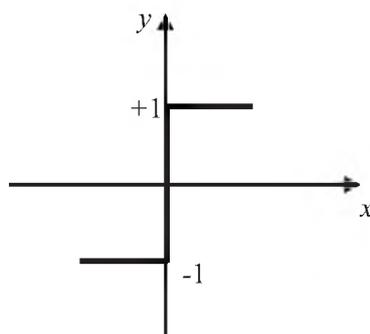


Рисунок 3. – Функция активации сети Хопфилда

При этом выходной вектор представляет собой образец, наилучшим образом сочетающийся с входными данными (т. е. представляет собой координату в пространстве входного сигнала, где целевая функция имеет минимум), например $X = \{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0\}$.

В этом случае функция энергии, минимизация которой соответствует минимизации целевой функции, имеет вид [8]:

$$E = \frac{p}{2} \sum_{ui=1}^N \sum_{ux=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ ux \neq j}}^N V_{ui,ux} V_{ui,j} + \frac{q}{2} \sum_{ux=1}^N \sum_{ui=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ ui \neq j}}^N V_{ui,ux} V_{ui,j} + \frac{d}{2} \sum_{ui=1}^N \sum_{ux=1}^N (V_{ui,ux} - N)^2 + \\ + \frac{s}{2} \sum_{ui=1}^N \sum_{ux=1}^N \sum_{\substack{i=1 \\ ui \neq ux}}^N c_{ux,ui} V_{ui,i} (V_{ui,i-1} - V_{ui,i+1}), \quad (2)$$

где p, q, d, s – положительные настроечные величины;

$c_{ux,ui}$ – константа, предопределяющая аналитический вид целевой функции.

Первая тройная сумма отражает требование, чтобы каждая строка матрицы назначения (решения) содержала не более одной единицы. Вторая тройная сумма – чтобы каждый столбец этой же матрицы содержал не более одной единицы. Третья сумма удовлетворяет требованию ровно N единиц в матрице. Четвертое требование – минимизирует целевую функцию.

Функция (2), представленная в форме (1), достигает минимума при значениях весов связей нейронов, определяемых согласно выражению

$$w_{ij} = -2p\delta_{ij}(1 - \delta_{ij}) - 2q\delta_{ij}(1 - \delta_{ij}) - 2d - 2sc_{ij}(\delta_{ij+1} - \delta_{ij-1}),$$

где $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ – в противном случае.

В таком случае алгоритм обучения Хебба заменяется прямым заданием весов для нейронной сети и функционирование полученной системы приводит к уменьшению целевой функции.

Таким образом, решение задач комбинаторной оптимизации на основе известной нейросетевой модели основано на установлении соответствия между вычислительной энергией сети (функцией Ляпунова) и целевой функцией решаемой задачи. При этом, выразив параметры сети (весовые коэффициенты нейронов) через параметры решаемой задачи, имеется возможность за время релаксационных процессов в сети найти субоптимальное решение.

Недостатком известной нейросетевой модели при ее практической реализации является то, что с ее помощью решаются задачи комбинаторной оптимизации только с учетом ограничений, накладываемых на саму билинейную (квадратичную) целевую функцию с симметричной матрицей.

В то же время на практике часто при решении задач оптимального распределения ресурсов необходимо дополнительно учитывать систему линейных ограничений [1].

В связи с этим требуется разработать нейросетевую модель, позволяющую решать задачи комбинаторной оптимизации с учетом не только ограничений, накладываемых на саму целевую функцию, но и дополнительно накладываемых ограничений в виде линейной системы, что позволит применить её к рассматриваемой задаче.

Обозначим через $w_{ij}, y_i, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$, весовые коэффициенты от нейронов выходного слоя сети к нейронам нулевого слоя, выходные значения нейронов сети.

На каждый i -й нейрон нулевого слоя подаются две компоненты $c_i x_i$ и $a_i x_i$ входного вектора X .

Значение комбинированного ввода i -го нейрона сети определим как

$$\Phi_k^{(i)} = \sum_{i=1}^n w_{ij} y_{k-1}^{(i)} \quad j = \overline{1, m}$$

где k – номер итерации;

n, m – величины, предопределяющие размерность нейронной сети.

Для всех нейронов сети выходного слоя применяется правило вычисления выходного значения, которое передается другим нейронам сети

$$y_k^{(i)} = \frac{1 + \tanh\left(\frac{\Phi_k^{(i)}}{u_0}\right)}{2},$$

где u_0 – положительный коэффициент, принимающий значения в диапазоне $(0 \dots 1]$.

В соответствии с устоявшимися взглядами в вопросах построения и использования рекуррентных нейронных сетей, энергетическую функцию представим в виде суммы двух основных слагаемых:

$$E(V) = E_{\Phi}(V) + E_{\Psi}(V),$$

где первое слагаемое обеспечивает оптимизацию целевой функции, а второе – выполнение заданных ограничений.

Для рассматриваемой задачи целевая функция представляет собой линейную форму от элементов решения $\{x_{ij}\}$, $i = 1, n$ вида

$$U(x) = \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ri} x_{ri}, \quad x \in [0, 1],$$

где c_{ri} – константа, предопределяющая аналитический вид целевой функции;

m, n – константы, предопределяющие размерность задачи.

Система ограничений в зависимости от исходной формы записи рассматриваемой задачи может быть представлена в трех вариантах ограничений задачи линейного программирования (ЗЛП).

Первый случай. Система ограничений имеет вид канонической формы ЗЛП:

$$\sum_{r=1}^m a_{ri} x_i = b_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где a_{ri}, b_i – константы, предопределяющие аналитический вид функций.

Второй случай. Система ограничений имеет вид основной формы ЗЛП:

$$\sum_{r=1}^m a_{ri} x_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Как известно [10], в этом случае система ограничений сводится к каноническому виду добавлением к левой части системы дополнительных переменных $x_{n+i} \geq 0$, а в целевую функцию вводим дополнительные переменные с коэффициентами, равными нулю, $c_{n+i} = 0$. Получаем систему ограничений:

$$\sum_{r=1}^m a_{ri} x_i + x_{n+i} = b_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Третий случай. Система ограничений имеет вид основной формы ЗЛП:

$$\sum_{r=1}^m a_{ri} x_i \geq b_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Переход к каноническому виду осуществляется также путем ввода дополнительных переменных $x_{n+i} \geq 0$:

$$\sum_{r=1}^m a_{ri} x_i - x_{n+i} = b_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

В рассматриваемой задаче при соблюдении любого из ограничений (3), (4), (5) функция энергии, минимизация которой соответствовала бы минимизации целевой функции $U(x)$, примет вид

$$\begin{aligned} E(V) = & \gamma_1 \sum_{ui=1}^m \sum_{ux=1}^n \sum_{j=1}^n (V_{j,ui} - 1)^2 + \gamma_2 \sum_{ui=1}^m \sum_{ux=1}^n \sum_{i=1}^m (V_{ux,i} a_{ux,i} - b_i)^2 + \\ & + \gamma_3 \sum_{ui=1}^m \sum_{ux=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (V_{ui,ux} - m)^2 + \gamma_4 \sum_{ui=1}^m \sum_{ux=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ui,ux} V_{i,j}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – положительные величины, подбираемые опытным путем.

Из анализа четвертого слагаемого энергетической функции следует, что нейроны сети должны иметь синоптические связи (отличные от нуля) со всеми связанными с ними нейронами ($w_{ij} \neq 0$), где i, j – номера нейронов в строках i и столбцах j соответственно.

Первое слагаемое требует не более одной единицы в каждом столбце матрицы, второе слагаемое – наличия обратной связи «сам на себя» в столбцах j и строках i соответственно и удовлетворяет требованию заданной системе ограничений ЗЛП. Третья сумма удовлетворяет требованию ровно t единиц в матрице. Четвертая сумма функции энергии нейронной сети соответствует минимизации целевой функции задачи комбинаторной оптимизации.

Таким образом, для решения поставленной задачи предлагается архитектура нейронной сети, представляющая собой матричную структуру, содержащая нулевой слой нейронов, который не выполняет вычислительной функции, а лишь распределяет выходы сети обратно на входы и выходной слой, каждый нейрон которого вычисляет взвешенную сумму своих входов, выдавая сигнал, который затем с помощью нелинейной функции преобразуется в выходной непрерывный сигнал, изменяющийся от 0 до 1 с возможностью определения последним значений субоптимального решения.

Все нейроны такой сети связаны друг с другом связями, причем сигнал с выхода нейрона может подаваться на его же вход. Предлагаемая рекуррентная нейронная сеть представлена на рисунке 4.

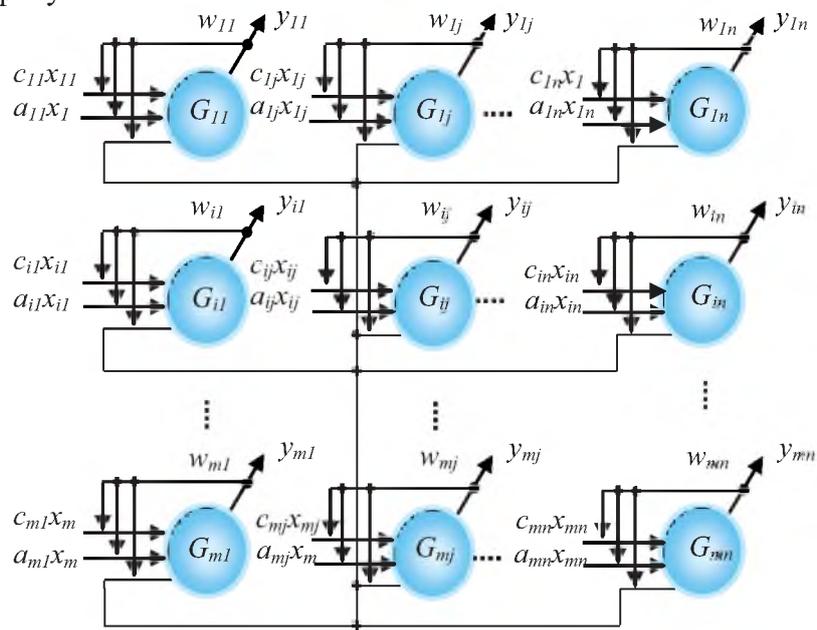


Рисунок 4. – Архитектура синтезированной рекуррентной нейронной сети

Обучение предлагаемой нейронной сети включает следующую последовательность действий:

1. Первоначальные состояния всех нейронов сети проинициализировать значениями коэффициентов c_{ij} целевой функции.
2. Значения синаптических связей всех нейронов сети установить равными значениям случайной величины, распределенной по равномерному закону от 0 до 1.
3. Выполнить модификацию выходных значений передаточной функции V_k для всех нейронов сети в соответствии с выражением

$$V_k = \frac{1 + \tanh\left(\frac{E_k}{u_0}\right)}{2}, \quad (7)$$

где E_k – значение состояния нейрона сети на k -й итерации, определяемое согласно выражению

$$E_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{k-1}^{i,j} + \lambda d E_k^{i,j},$$

где λ – коэффициент, определяющий скорость изменения состояния сети и точность вычислений;

dE_k – значение изменения, состояния нейрона сети на k -й итерации, определяемое согласно выражению

$$dE_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (-E_k^{i,j} + E_1 + E_2 + E_3 + E_4), \quad (8)$$

где E_1, E_2, E_3, E_4 – значения, определяющие требования при минимизации функции энергии сети (6):

$$E_1 = -\gamma_1 \left[\sum_{j=1}^m a_{i,j} V_{k-1}^{i,j} - b_i \right], \quad i = \overline{1, n};$$

$$E_2 = -\gamma_2 \sum_{i=1}^n V_{k-1}^{i,j}, \quad j = \overline{1, m};$$

$$E_3 = -\gamma_3 \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{k-1}^{i,j} - m \right];$$

$$E_4 = -\gamma_4 \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j} V_{k-1}^{i,j} \right].$$

Итерации в сети заканчиваются при достижении ограничений во втором, третьем, четвертом и пятом слагаемом выражения (8). В итерационном процессе (эволюции сети к устойчивому состоянию) «возбужденность» нейронов изменяется в отрезке $[0, 1]$. В стационарном состоянии нейроны принимают значения: $E_k > 0$ – нейрон возбужден, $E_k = 0$ – нейрон не возбужден.

Таким образом, синтезированная рекуррентная нейронная сеть с алгоритмом ее обучения образует нейросетевую модель для задачи комбинаторной оптимизации при линейной системе ограничений. В данной модели, подав входное воздействие и установив на предложенной сети весовые коэффициенты, полученные в соответствии с (7), через некоторое время, сеть придет в устойчивое состояние, которое соответствует локальному минимуму энергии (6), близкому (или равному) глобальному. При этом полученные значения выходов y_N образуют искомый результат целевой функции:

$$U(y) = \sum_{i=1}^N c_i y_i.$$

Проведенные экспериментальные исследования предлагаемой нейросетевой модели для решения задачи рационального распределения огня артиллерии [11] показывают, что разработанная нейросетевая модель обеспечивает достаточно точное для практики решение с погрешностью 4–7 % (рисунок 5).

При этом, в отличие от метода «полного перебора», показатель оперативности решения у предлагаемой нейросетевой модели слабо зависит от размерности пространства возможных решений (рисунки 6 и 7).

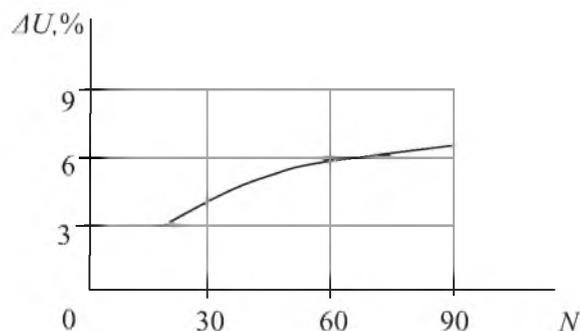


Рисунок 5. – График зависимости ошибки ΔU от сложности задачи

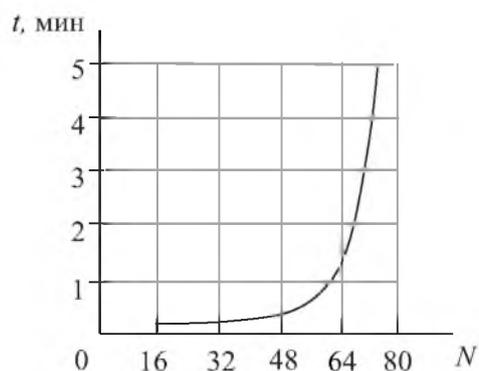


Рисунок 6. – График зависимости времени расчетов от сложности решения задачи методом «полного перебора»

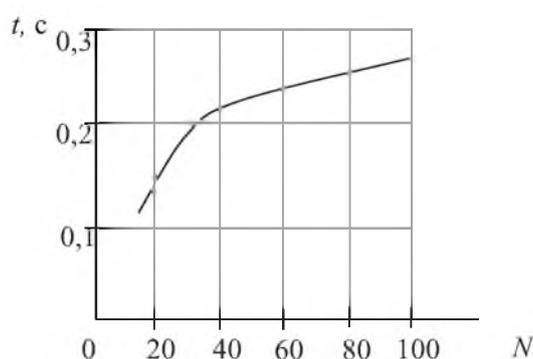


Рисунок 7. – График зависимости времени расчетов от сложности решения задачи на основе предлагаемой нейросетевой модели

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что предлагаемая нейросетевая модель обеспечивает быстрое и достаточно точное решение задач комбинаторной оптимизации при линейной системе ограничений.

Список литературы

1. Хемди, А. Таха. Введение в исследование операций / А. Хемди. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
2. Струченков, В. И. Дискретная оптимизация: модели, методы, алгоритмы решения прикладных задач / В. И. Струченков. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 191 с.
3. Овчинников, В. А. Алгоритмизация комбинаторно-оптимизационных задач при проектировании ЭВМ и систем / В. А. Овчинников. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 288 с.
4. Писарук, Н. Н. Исследование операций / Н. Н. Писарук. – Минск: БГУ, 2013. – 272 с.
5. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 452 с.
6. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
7. Назаров, А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А. В. Назаров, А. И. Лоскутов. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с.
8. Комарцова, Л. Г. Нейрокомпьютеры: учеб. пособие для вузов / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 400 с.
9. Нейрокомпьютеры: от программной к аппаратной реализации / М. А. Аляутдинов [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 152 с.

10. Булойчик, В. М. Военно-прикладные вопросы математического моделирования: основы теории математического моделирования боя и боевых действий / В. М. Булойчик. – Минск: ВА РБ, 2005. – 249 с.

11. Жук, А. А. Математическая модель рационального распределения огня артиллерии / А. А. Жук // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения: тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23–24 апр. 2015 г. – Минск: ВА РБ, 2015. – С. 262.

*Сведения об авторах:

Жук Андрей Александрович,

Булойчик Василий Михайлович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 11.02.2016 г

УДК 621.396.96

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Шарамет, кандидат технических наук; А. Л. Трофименков;
Д. В. Морозов, кандидат технических наук*

В статье рассмотрено решение задачи использования Кеплеровой модели движения для предварительного расчета видимости и определения координат навигационных космических аппаратов с учетом данных альманаха.

The article considers the problem of using Keplerova the motion model for the calculation of the visibility and definition of coordinates of navigation satellites based on almanac data.

Большинство созданных к настоящему времени средств и методов определения местоположения объекта с использованием навигационных космических аппаратов (НКА) достигли достаточно высокого уровня точности как за счет удачных технических решений, так и за счет хорошо продуманной технологии их использования. Следует отметить, что особенностями их использования являются:

широкое распространение угловых методов измерения [5], которым во многих случаях отдается предпочтение перед линейными измерениями, прежде всего, по экономическим соображениям;

необходимость проведения измерений в околоземном пространстве, что существенно осложняет процедуру выполнения измерений и снижает полученный в итоге уровень точности;

необходимость обеспечения прямой видимости;

трудности проведения измерений при движении объекта (в динамике);

трудности организации круглосуточных (всепогодных) измерений и, как следствие, ограниченное их использование.

Дальнейшим направлением современного развития систем определения местоположения объекта [1] является снижение объема обрабатываемой информации при сохранении заданной точности. Сокращение объема необходимых данных может быть осуществлено за счет снижения объема принимаемых и обрабатываемых данных. Ограниченность времени обработки компенсируется предварительно рассчитанной информацией о собственном местоположении. При таком подходе отпадает необходимость в ее извлечении из навигационного сигнала и дальнейшей обработке в навигационном приемнике. Точность вычислений координат при этом достигается за счет того, что в ходе проведения предварительных расчетов отсутствуют внешние препятствия и условия распространения сигнала затрудняют его прохождение от НКА к потребителю. Кроме того, точка приема является абсолютно неподвижной. Подобный сигнал подлежит дополнительной обработке или исключается приемником из обработки. Источником предварительно полученных координат для последующей передачи в навигационный приемник могут служить:

существующие инфраструктуры локальных беспроводных сетей;

интернет-каналы;

использование эффекта Доплера.

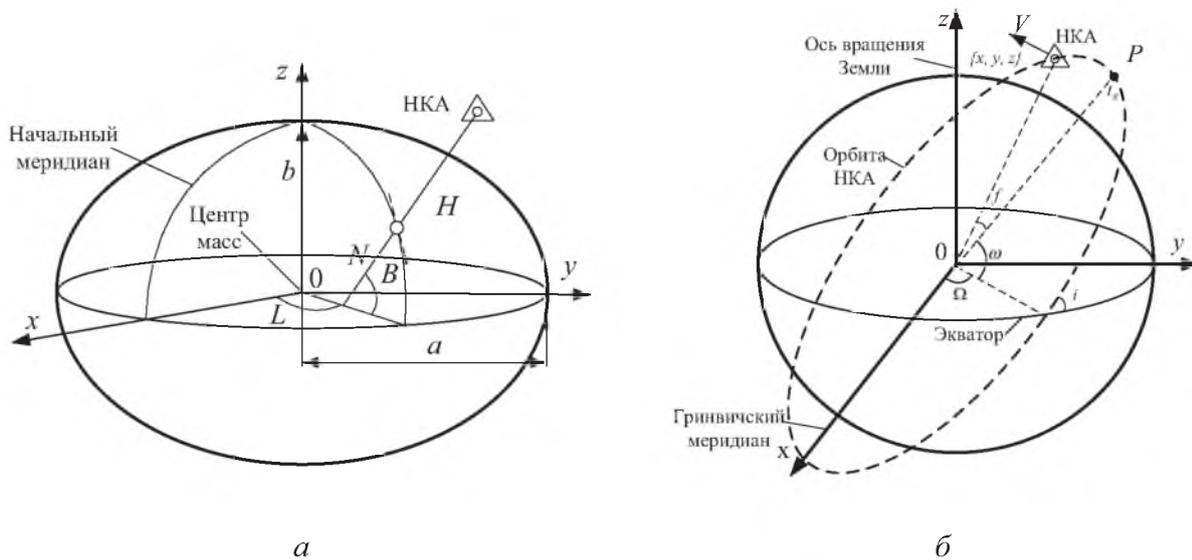
Следует отметить, что при составлении математической модели орбитального движения НКА сделан ряд допущений:

алгоритмы приемника для обнаружения и отслеживания сигналов способны обнаружить требуемое количество спутников для работы этого метода, таким образом, обеспечивая расчеты временного сдвига;

для импорта альманаха НКА используется внешний интерфейс;

исходное значение синхронизатора времени приемника установлено с точностью до 20 с относительно системного времени.

Принципиальное различие между традиционными методами и методами определения местоположения с использованием НКА состоит в том, что в первом случае измерения производятся относительно поверхности геоида (в геодезической системе координат (рисунок 1, *а*)), т. е. в их основе лежат физические принципы измерений. В основе методов определения местоположения с использованием НКА лежит геометрический подход, когда измеряются псевдодальности, являющиеся инвариантными величинами к геоцентрической подвижной системе координат. Данные величины определяются относительно центра масс Земли (рисунок 1, *б*) и не имеют никакой связи с геодезической системой координат. Однако для подавляющего большинства потребителей интерес при решении различных прикладных задач представляет информация о местоположении объекта относительно поверхности Земли (в геодезической системе координат), поэтому одна из принципиально важных проблем, связанных с методами определения местоположения с использованием НКА, – преобразование полученных координат из геоцентрической в геодезическую систему координат.



а – геодезическая система координат; *б* – геоцентрическая система координат

Рисунок 1. – Решение навигационной задачи в различных системах координат:

Параметры эллипсоида Земли определяются выбранной моделью Земли. Следует иметь в виду, что ГЛОНАСС и GPS (Global Position System) используют различные модели: в ГЛОНАСС до недавнего времени применялась российская модель ПЗ-90 (в настоящее время разработана новая версия – ПЗ-90.2). В GPS принята международная модель WGS-84 (World Geodetic System, 1984 г.). Хотелось бы отметить, что, несмотря на существующие параметры связи координатных систем WGS-84 и ПЗ-90, разница в координатах, рассчитанных с помощью указанных моделей, может достигать нескольких метров. При этом ни одна из систем не имеет преимущества перед другой. Выбор системы определяется лучшей точностью вычислений над районом, в котором потребителю чаще всего требуется определить координаты [3].

Все геоцентрические системы связаны с определенными эллипсоидами, названия которых совпадают с названием самой системы. Возможно использование эллипсоидальных координат: геодезической широты (B), геодезической долготы (L) и высоты над эллипсоидом (H) (см. рисунок 1, *а*). Для определения геодезических координат из точки наблюдения проводится нормаль к эллипсоиду, которая совпадает с центром масс Земли только в отдельных случаях. Прямоугольные координаты X , Y , Z вычисляются по геодезическим координатам B , L , H в соответствии с выражениями:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N + H \cos B \cos L, \\ N + H \cos B \sin L, \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B, \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где N – кривизна поверхности в точке местной вертикали, определяется как

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (2)$$

где e – эксцентриситет эллипсоида.

Эксцентриситет, определяющий размеры эллипсоида (далее все параметры представлены в системе координат WGS-84), может быть получен из выражения

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad (3)$$

где $a = 6378137,0$ – большая полуось эллипсоида;

$b = 6356752,314$ – малая полуось эллипсоида.

Движение НКА может быть описано Кеплеровой моделью движения объекта вокруг центра масс Земли в фиксированной плоскости (см. рисунок 1, б). В составе сигнала НКА имеется навигационная информация (альманах). Сообщение альманаха содержит орбитальные параметры и поправки часов спутников, которые позволяют рассчитать шесть элементов Кеплеровых элементов орбиты i , Ω , t_π , a , e , ω и вычислить координаты и скорости НКА на любой момент времени [2].

Следует отметить, что поскольку при определении псевдодалности измеряется время распространения сигнала от фазового центра передающей до фазового центра приемной антенн, то передаваемые каждым НКА эфемериды описывают положение фазового центра передающей антенны. При орбитальном движении НКА его орбитой является движение центра масс, значит, на практике положение фазового центра передающей антенны приводится к центру масс НКА.

По своему назначению элементы орбиты (таблица 1) могут быть условно разделены на три группы. К первой группе относятся элементы, характеризующие размеры и форму орбиты, – это a и e . Элементы второй группы задают ориентировку орбиты в пространстве. К ним относятся: наклонение i , долгота Ω и аргумент перигея ω . Элементы третьей группы задают положение НКА на орбите [1].

Таблица 1. – Значение параметров альманаха GPS для НКА № 01 по состоянию на 849-ю неделю

Параметр	Название	Значение	Описание
ID	ID	01	Порядковый номер НКА
HEALTH	Health	000	Состояние НКА
e	Eccentricity	0,4872322083E-002	Эксцентриситет орбиты
t_{oc}	Time of Applicability (s)	319488,0000	Опорное время привязки
δi	Orbital Inclination (rad)	0,9631026471	Отклонение от номинального угла наклона орбиты
$\dot{\Omega}$	Rate of Right Ascen (r/s)	-0,7840326581E-008	Скорость изменения прямого восхождение
\sqrt{a}	SQRT(A) (m 1/2)	5153,607422	Корень квадратный из большой полуоси орбиты
Ω_0	Right Ascen at Week (rad):	0,9724408301E+000	Долгота узла орбитальной плоскости
ω	Argument of Perigee (rad)	0,494615926	Аргумент перигея
M_0	Mean Anom (rad)	-0,1875022617E+001	Средняя аномалия
a_{f0}	Af0 (s)	0,5722045898E-005	Поправка часов спутника в эпоху
a_{f1}	Af1 (s/s)	0,0000000000E+000	Ход (дрейф) часов
WEEK	week	849	Полный номер недели

Положение НКА устанавливается на момент относительного времени эфемеридной эпохи t :

$$t_k = t - t_{oc}. \quad (4)$$

Параметр t является системным временем GPS с учетом поправки на время передачи сигнала. Кроме того, t_k – разность между временем t и временем эпохи t_{OE} – отсчитывается от начала (конца) межнедельного периода. Данный параметр подлежит корректировке, т. е. если $t_k > 302\,400$ с, необходимо вычесть $604\,800$ с из t_k , если меньше, чем $-302\,400$ с, то прибавить $604\,800$ с к t_k .

После этого уточняется среднее движение [1]:

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (5)$$

где $n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ – среднее движение (средняя угловая скорость движения);

$\mu = 3,986005 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$ – геоцентрическая константа гравитационного поля Земли с учетом атмосферы.

Далее находим значение средней аномалии, которое определяется моментом прохождения перигея t_k :

$$M = M_0 + n t_k. \quad (6)$$

Для определения положения НКА в каждый момент времени необходимо найти связь между истинной аномалией и временем t (см. выражение (4)). Осуществим переход от средней (6) к эксцентрической аномалии E :

$$E = M + e \sin E. \quad (7)$$

Решить данное выражения возможно путем использования метода последовательных приближений. На начальном этапе принимается $E(0) = M$, в последующих приближениях $E(k) = M + e \sin E(k-1)$. Процесс выполняется до тех пор, пока $|E(k) - E(k-1)| < \varepsilon$, где ε – точность решения уравнения Кеплера.

Затем осуществим переход к истинной аномалии НКА v с учетом полученного ранее значения эксцентрической аномалии (7):

$$v = \arctg\left(\frac{\sin v}{\cos v}\right), \quad (8)$$

где $\sin v = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{1 - \cos E}$, $\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}$.

При этом невозмущенный аргумент широты (Φ), истинная аномалия и аргумент перигея (см. таблицу 1) связаны соотношением

$$\Phi = \omega + v, \quad (9)$$

на основании которого вычисляются возмущения в аргументе широты δu , радиус-векторе δr и наклонении δi [4]:

$$\begin{aligned} \delta u &= c_{us} \sin 2\Phi + c_{uc} \cos 2\Phi; \\ \delta r &= c_{rs} \sin 2\Phi + c_{rc} \cos 2\Phi; \\ \delta i &= c_{is} \sin 2\Phi + c_{ic} \cos 2\Phi. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметры c_{us} , c_{rs} , c_{is} являются амплитудными коэффициентами косинусной и синусной гармоник для поправок к аргументу широты, радиусу-вектору и наклонению. С их помощью учитываются возмущения из-за несферической природы Земли, влияния приливов и давления солнечной радиации.

Далее определим невозмущенные параметры движения – аргумент широты (u), радиус (r) и наклонение (i):

$$\begin{aligned} u &= \Phi + \delta u; \\ r &= a(1 - e \cos E) + \delta r; \\ i &= i_0 + \delta i + jt_k. \end{aligned} \quad (11)$$

Орбитальные координаты (положение в орбитальной плоскости) НКА могут быть получены на основании выражений:

$$\begin{aligned} x' &= r \cos u; \\ y' &= r \sin u; \\ z' &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом ось x' направлена в восходящий узел, ось y' – в плоскости орбиты в точку с аргументом широты 90° , ось z' – по нормали к орбите.

Затем определим уточненную долготу восходящего узла орбиты, отсчитываемую от меридиана Гринвича [1]:

$$\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega} - \dot{\Omega}_{\oplus} t_k - \dot{\Omega}_{\oplus} t_{OC}, \quad (13)$$

где $\dot{\Omega}_{\oplus} = 7,2921151467 \cdot 10^{-5}$ – угловая скоростью вращения Земли.

Совокупность параметров орбиты (см. таблицу 1) позволяет рассчитать координаты НКА в любой момент времени в геоцентрической и геодезической системе координат, связанной аналитическими зависимостями. В свою очередь, элементы орбиты рассчитываются по известным в приемнике характеристикам движения НКА по результатам приема альманаха на орбите в определенный момент времени (4). Такой характеристикой могут быть компоненты вектора положения (X , Y , Z) в системе координат WGS-84:

$$\begin{aligned} X &= x' \cos \Omega - y' \cos i \sin \Omega; \\ Y &= x' \sin \Omega + y' \cos i \cos \Omega; \\ Z &= y' \sin i. \end{aligned} \quad (14)$$

При этом в одном навигационном приемнике могут быть обработаны сигналы от всех НКА, которые находятся в области его видимости. Результаты моделирования движения НКА с применением данных альманаха GPS и последующей визуализацией видимости спутников в среде математического моделирования MatLab представлены на рисунке 2.

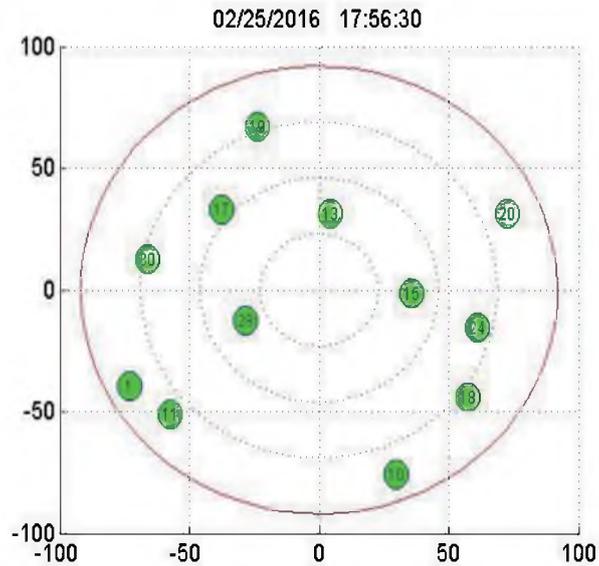


Рисунок 2. – Видимость спутников GPS по результатам моделирования

Для проверки адекватности результатов моделирования в качестве истинного положения спутников была использована программа GPS Test. Основными результатами работы данной программы являются углы видимости спутников (рисунок 3, *a*), а также координаты объекта в месте наблюдения НКА (рисунок 3, *б*), построенные на основании Кеплеровой модели движения.



a – расположение спутников; *б* – результаты наблюдения

Рисунок 3. – Видимость спутников GPS по результатам наблюдения

Таким образом, проведенный анализ результатов моделирования показывает, что Кеплерова математическая модель движения НКА является адекватной реальному движению НКА и состав информации, требуемой для предварительных расчетов, может быть использован для сокращения снижения объема обрабатываемой информации при сохранении заданной точности в приемнике. По результатам работы можно сделать следующие выводы:

в приемнике необходимо обрабатывать только время передачи сигналов из GPS, длительность передачи которых составляет от 6 до 12 с, вместо принятия всего пакета, длительность которого составляет порядка минуты;

в приемнике можно обрабатывать ограниченное количество данных без их декодирования. Это, в свою очередь, позволит приемнику обрабатывать навигационные данные с учетом информации о параметрах принятой модели, аппроксимирующей траекторию движения навигационного космического аппарата в течение времени передачи навигационной информации (30 с);

координаты и составляющие вектора скорости спутников меняются очень быстро, а параметры аппроксимирующей модели меняются достаточно медленно, и их можно считать постоянными на всем интервале аппроксимации.

Список литературы

1. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: моногр. / К. М. Антонович. – М.: Картгеоцентр, 2005. – 334 с.
2. Космическая геодезия / В. Н. Баранов [и др.]. – М.: Недра, 1986. – 407 с.
3. Совместное использование GPS и ГЛОНАСС: оценка точности различных способов установления связи между ПЗ-90 и WGS-84 / В. Ф. Галазин [и др.] // Планирование глобальной радионавигации: сб. тр. II Междунар. конф., Москва, 24–26 июня 1997 г. / НТЦ «Интернавигация». – М., 1997. – С. 299–310.
4. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
5. Калитин, С. Б. Оценивание координат атакующих ракет в бортовой многопозиционной радиолокационной системе на основе псевдодальномерных измерений / С. Б. Калитин, А. В. Шарамет // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 23. – С. 81–87.

*Сведения об авторах:

Шарамет Андрей Владимирович,

Трофименков Александр Леонидович,

Морозов Дмитрий Михайлович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 29.12.2015 г.

ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.372.512

ОБЗОР И АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ, АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

П. В. Бойкачев, кандидат технических наук, доцент; И. А. Дубовик*

Проведен обзор и анализ классических и модифицированных функций, аппроксимирующих частотные характеристики радиоэлектронных цепей. Показаны существенные недостатки известных аппроксимирующих функций, затрудняющие реализацию современных радиоэлектронных систем.

Review and analysis of the classical and modified functions approximating the frequency characteristics of electronic circuits was conducted. The significant disadvantages of the known approximating function hindering the realization of modern electronic systems were demonstrated.

Введение

В современных системах декаметровый радиосвязи для повышения помехозащищенности все чаще используют широкополосные сигналы. Такой подход актуален для радиосвязи с программной перестройкой частоты (ППРЧ), а также частотной адаптацией в режиме автоматического установления связи (АУС). В последнее время большинство цифровых КВ (ВЧ) радиостанций используют программно-реализуемые широкополосные модемы для систем одноканальной и многоканальной радиосвязи [1, 2]. Однако к таким системам предъявляются все более сложные требования, связанные с минимизацией неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и характеристик группового времени запаздывания (ГВЗ) [1].

Согласно современным ГОСТам [1] допустимая неравномерность АЧХ трактов широкополосной селекции группового сигнала (преселектор, постселектор, ФНЧ и т. п.) должна соответствовать уровню не более $\pm 0,5$ дБ. Меньший уровень неравномерности труднодостижим из-за технологических характеристик. ГВЗ, согласно требованиям [1], не должно отличаться более чем на 1,0 мс, а вариация ГВЗ не должна превышать 150 мкс для любого 100 Гц приращения частоты. Таким образом, при приеме и обработке такого рода сигналов приемником, а также при формировании и передаче сигнала передатчиком элементы должны соответствовать вышеизложенным требованиям по неравномерности АЧХ и ГВЗ. В противном случае полезная информация будет утеряна. Следует заметить, что данные требования являются актуальными не только для систем радиосвязи, но и для других широкополосных радиоэлектронных средств.

Требование по избирательности частотной характеристики, наряду с требованием равномерности ГВЗ, накладывает жесткие ограничения на используемый ряд аппроксимирующих функций (АФ), с помощью которых реализуются цепи широкополосной селекции и согласования. В связи с этим определен интерес представляет обзор и анализ классических и модифицированных АФ. Необходимо рассмотреть существующие АФ на предмет обеспечения ими вышеизложенных требований.

1. Аппроксимация частотных характеристик

Суть аппроксимации состоит в нахождении физически реализуемой функции передачи, которая наилучшим образом воспроизводит идеальную характеристику в соответствии с некоторым критерием близости. За идеальную характеристику принимают характеристики идеального фильтра. Идеальный фильтр или согласующая цепь должны быть неискажающими. Это означает, что они не должны вносить искажений в амплитудный и фазовый спектры радиосигнала. Таким требованиям удовлетворяет низкочастотный прототип цепи с АЧХ и частотной зависимостью ГВЗ (рисунок 1, *а*). АЧХ представляет собой константу от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_c$ и нуль для всех частот, больших ω_c [3–7].

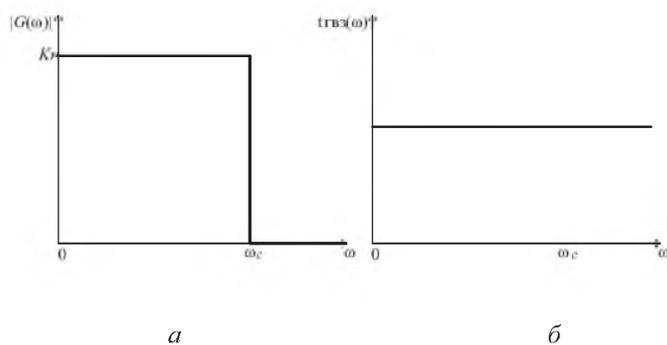


Рисунок 1. – Идеальная прямоугольная низкочастотная характеристика АЧХ (*а*), ГВЗ (*б*)

Характеристика ГВЗ, показанная на рисунке 1, *б*, также представляет собой константу в пределах полосы пропускания. Абсолютное значение константы и поведение характеристики ГВЗ за пределами полосы пропускания не являются принципиальными. В этом проявляется главное различие в подходах к аппроксимации этих двух частотных характеристик.

Синтезировать цепь с идеальными амплитудной и фазовой характеристиками не представляется возможным. Действительно, для получения частотной характеристики, показанной на рисунке 1, *а*, потребуется бесконечное количество элементов. В этом случае характеристика ГВЗ устремится в бесконечность и цепь потеряет всякий смысл. С другой стороны, синтезировать цепь с идеальной линейной характеристикой ГВЗ даже в пределах ограниченной полосы частот возможно только при полном отсутствии реактивных элементов цепи, что также не представляет интереса.

2. Анализ классических аппроксимирующих функций

В ходе анализа подробно рассмотрены классические АФ, которые наиболее часто применяются разработчиками. Математические выражения данных функций представлены в таблице 1.

Цепи, синтезированные с использованием АФ Баттерворта, определяются соотношением, указанным в таблице 1, где $\omega = \frac{\omega}{\omega_c}$ – относительная частота; ω_c – частота среза; n – порядок фильтра, K_n – некоторый постоянный коэффициент, определяющий уровень передачи мощности.

Таблица 1. – Классические аппроксимирующие функции

Аппроксимирующая функция	Математическое выражение
1. Функция Баттерворта	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \omega^{2n}}$
2. Фильтр Чебышева 1-го рода	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega)}$
3. Функция Чебышева 2-го рода	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \frac{1}{\varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{1}{\omega}\right)}}$
4. Функция Кауэра	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega)}$

Все производные функции Баттерворта по частоте от первой до $(n-1)$ включительно в точке $\omega=0$ равны нулю. Поэтому фильтр Баттерворта называют фильтром с максимально плоской (или максимально гладкой) АЧХ.

Частотная характеристика устройства, синтезированного с использованием аппроксимации Баттерворта, имеет равномерную АЧХ в области нулевых частот и повышенную равномерность ГВЗ. Цепи, синтезированные с использованием аппроксимации Баттерворта, обладают низким внеполосным затуханием и имеют малую крутизну АЧХ в переходной области.

Квадрат АЧХ фильтра Чебышева определяется соотношением, показанным в п. 2 таблицы 1, где $T_n^2(\omega)$ – полином Чебышева первого рода n -го порядка; ε – некоторый постоянный коэффициент, задающий амплитуду пульсаций АЧХ.

В отличие от функции Баттерворта, в полосе пропускания функция Чебышева первого рода совершает равноволновые колебания, при этом скорость спада АЧХ фильтра Чебышева первого рода выше, чем фильтра Баттерворта.

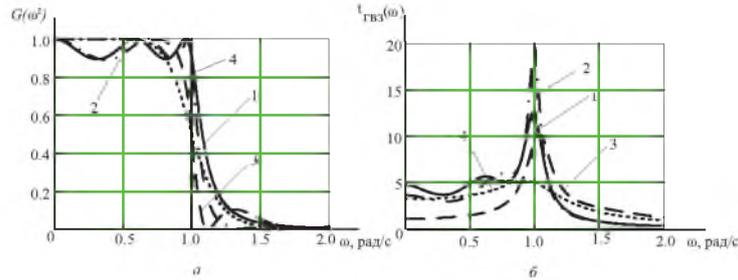
В отличие от фильтров Чебышева первого рода, фильтры Чебышева второго рода обладают гладкой АЧХ в полосе пропускания и обеспечивают заданный уровень подавления в полосе заграждения. Фильтр Чебышева второго рода (инверсный фильтр Чебышева) используется реже, чем фильтр Чебышева первого рода, ввиду менее крутого спада АЧХ. У него отсутствуют пульсации в полосе пропускания, однако присутствуют в полосе подавления. Функция Чебышева второго рода, показанная в п. 3 таблицы 1, кроме полюсов, имеет и нули передачи.

Есть еще один класс АФ, которые носят колебательный характер как в полосе пропускания, так и в полосе подавления. Это эллиптические функции [8, с. 44], или, как их еще называют, функции Кауэра (в отечественной литературе часто их называют функциями Золотарева), их математическое выражение показано в п. 4 таблицы 1. АФ Кауэра представляет собой эллиптическую дробно-рациональную функцию, где $R_n(\omega)$ – рациональная функция, определяемая соотношением

$$R_n(\omega) = \frac{(\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) \dots (\omega^2 - \omega_k^2)}{(\omega^2 \omega_1^2 - 1)(\omega^2 \omega_2^2 - 1) \dots (\omega^2 \omega_k^2 - 1)} \quad (1)$$

Параметры $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$, имеющие значения больше нуля и меньше единицы, выбираются таким образом, что в промежутке $0 \leq \omega \leq \omega_c$ (где $\omega_c \leq 1$) обеспечиваются равноволновые пульсации функции $R_n(\omega)$. Эллиптическая функция в сравнении со всеми

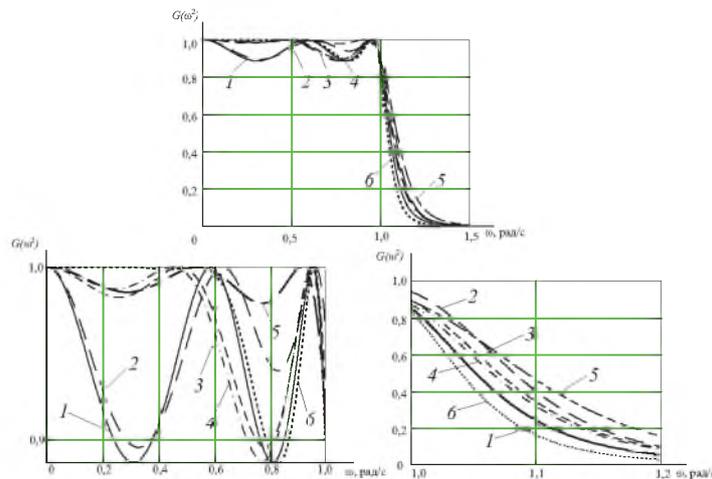
другими типами классических АФ имеет наиболее крутой спад АЧХ в переходной области. Частотная характеристика ГВЗ неравномерна в полосе частот от 0 до ω_c и имеет самый большой разброс своих значений в сравнении со всеми вышеупомянутыми классическими АФ. Использование эллиптической АФ позволяет максимально увеличить крутизну спада в переходной области, однако это приводит к повышению нелинейности ГВЗ. Сравнение частотных характеристик классических АФ приведено на рисунке 2.



1 – Чебышева; 2 – Кауэра; 3 – инверсная Чебышева; 4 – Баттерворта

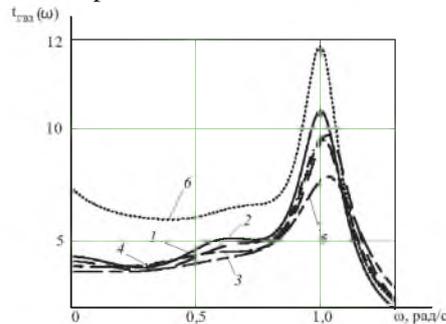
Рисунок 2. – Аппроксимирующие функции (а) и ГВЗ (б)

Приведенные выше АФ получили наиболее широкое применение для синтеза частотно-избирательных и согласующих цепей [4–12, 17]. В свою очередь, при разработке подобного рода цепей применяются и другие ортогональные полиномы, такие как полиномы Лежандра, Эрмита, Лагерра, Бернулли, Гегенбауэра, Паскаля [6]. Для визуального сравнения АФ целесообразно показать их АЧХ и ГВЗ. На рисунке 3 представлены их АЧХ, а на рисунке 4 – ГВЗ.



1 – Гегенбауэра; 2 – Бернулли;
3 – Паскаля; 4 – Эрмита; 5 – Лежандра; 6 – Лагерра

Рисунок 3. – АЧХ цепей, синтезированных с использованием ортогональных полиномов



1 – Гегенбауэра; 2 – Бернулли; 3 – Паскаля; 4 – Эрмита; 5 – Лежандра;
6 – Лагерра

Рисунок 4. – ГВЗ цепей, синтезированных с использованием ортогональных полиномов

Аппроксимирующие функции, приведенные на рисунках 3 и 4, позволяют сделать вывод, что самой высокой равномерностью АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания обладает АФ Лежандра, самым высоким подавлением за полосой пропускания обладает функция Лагерра. Остальные функции обладают средним значением данных характеристик. Цепи, синтезированные с использованием функций Бесселя, имеют высокую линейность ФЧХ из-за низкой избирательности и не находят практического применения в качестве частотно-избирательных цепей.

Следует отметить, что каждая из упомянутых АФ имеет свои достоинства и недостатки. Зачастую при улучшении одного параметра функции требуется существенно ухудшать другие, что обусловлено плохими вариативными возможностями приведенных функций. Для решения этой проблемы в последние годы стали применять модификации АФ.

3. Анализ модификаций аппроксимирующих функций

Существенной особенностью современных модифицированных АФ, в отличие от классических, является добавление или изменение расположения полюсов функций, а также наличие нулей передачи в области частот, примыкающей к полосе пропускания (built-in transmission zeros) [18]. Эти нули передачи используются для модификации чебышевской АФ, представленной в таблице 2. Их внедрение обеспечивает более крутой спад частотной характеристики за пределами полосы фильтрации при сохранении равноволнового характера функции в полосе пропускания [19, 20]. Методика синтеза таких фильтров допускает асимметричное расположение этих нулей, что обеспечивает большую гибкость в формировании частотной характеристики.

Таблица 2. – Методы модификации функции Чебышева

Метод модификации	Математическое выражение
1. Замена частотной переменной в полиномах Чебышева	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \varepsilon^2 T_n^2 \left(\frac{\omega - \frac{1}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \right)}$
2. Замена полинома Чебышева на модифицированный полином	$G(\omega^2) = \frac{K_n}{1 + \varepsilon^2 P(\omega^2)}$
3. Использование нарастающей волновой функции с внедрением нулей передачи на мнимую ось комплексной плоскости на фиксированных частотах	$K(\omega^2) = \frac{k^2}{1 + \varepsilon^2 (-1)^{n-m} \omega^{2(n-m)} T_{Cheb}^2(\omega)}$

Модификация функции передачи Чебышева, показанная в п. 1 таблицы 2, в соответствии с частотным преобразованием значительно увеличивает крутизну спада частотной характеристики при переходе от полосы фильтрации к полосе заграждения, при этом имеет равноволновой характер. Для нуля передачи на частоте ω_0 модификация чебышевской аппроксимации сводится к следующей замене частотной переменной в полиномах Чебышева [20]:

$$x(\omega) = \frac{\omega - \frac{1}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (2)$$

Еще одна модификация АФ Чебышева предложена разработчиками из Ирака [16]. Суть данной модификации сводится к следующему: полином Чебышева заменяют на модифицированный полином:

$$T_n^2(\omega) \rightarrow P(\omega^2); \quad (3)$$

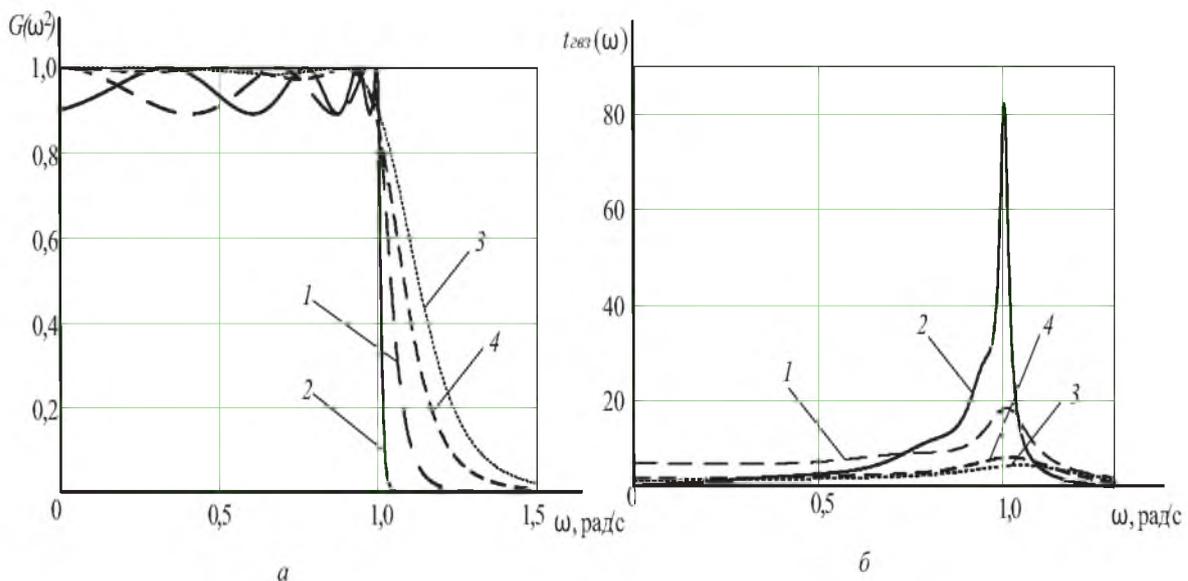
$$P(\omega^2) = \omega^2 \prod_{i=1}^n (\omega^2 - \omega_i^2)^2, \quad (4)$$

где ω_i – полюса полинома Чебышева с более низкой добротностью.

Следует отметить, что функция, показанная в п. 2 таблицы 2, имеет худшую избирательность, чем классическая функция Чебышева, но более линейное ГВЗ.

Отечественные разработчики предложили модифицировать АФ Чебышева нарастающей волновой функцией и внедрением нулей передачи на мнимую ось комплексной плоскости на фиксированных частотах [22]. Данная модификация позволяет повысить линейность ФЧХ в большей части полосы пропускания и в то же время сохранить высокий уровень внеполосного затухания. Математическое выражение для модифицированной АФ согласно [22] показано п. 3 таблицы 2, где $n-m$ – количество введенных нулей, расположенных в начале координат комплексной плоскости.

Целесообразно сравнить между собой АЧХ и ГВЗ функций, представленных в таблице 2. На рисунке 5 представлены АЧХ и ГВЗ цепей, синтезированных с использованием данных модификаций АФ.



1 – согласно [35]; 2 – согласно п. 1 таблицы 2;

3 – согласно п. 2 таблицы 2; 4 – согласно п.1 таблицы 2

Рисунок 5. – АЧХ (а) и ГВЗ (б) цепей, синтезированных с использованием модифицированных АФ

Анализируя зависимости на рисунке 5, можно сделать вывод, что для синтеза частотно-избирательных цепей по критерию максимума избирательности целесообразно использовать АФ согласно п. 1 таблицы 2, а для синтеза по критерию максимума – равномерности ГВЗ АФ согласно методу модификации, показанному в п. 3 таблицы 2.

Следует отметить, что в полной мере применение модификаций АФ не решило проблем, стоящих перед разработчиком [24]. В первую очередь не решен вопрос синтеза АФ по заданному критерию качества реализуемой цепи. Ни одна из модификаций не направлена на решение задач согласования нагрузок. Все известные модификации применяются только к функции Чебышева, которая зачастую не решает некоторые задачи, особенно те, которые связаны с реализацией цепей по критерию максимума линейности ФЧХ.

4. Сравнительная характеристика аппроксимирующих функций

Анализируя графическое представление функций, целесообразно оценить показатели ошибки аппроксимации всех представленных функций (таблица 3).

Таблица 3. – Величина интегральной квадратичной ошибки аппроксимаций и уровень неравномерности ГВЗ

Тип АФ	Величина интегральной квадратичной ошибки аппроксимации на интервале [0; 1]	Величина интегральной квадратичной ошибки аппроксимации на интервале [1; ∞]	Уровень неравномерности ГВЗ
Баттерворта	0,018	0,021	1,736
Чебышева	$4,528 \cdot 10^{-3}$	0,039	6,878
Инверсная Чебышева	0,037	0,04	9,254
Кауэра	$4,662 \cdot 10^{-3}$	0,03	16,041
Модификация АФ Чебышева согласно [18]	$4,5043 \cdot 10^{-3}$	0,025	11,486
Модификация АФ Чебышева согласно п. 1, таблица 2	$4,003 \cdot 10^{-3}$	∞	79,092
Модификация АФ Чебышева согласно п. 2, таблица 2	$2,778 \cdot 10^{-3}$	0,081	2,874
Модификация АФ Чебышева согласно п. 3, таблица 2	$4,513 \cdot 10^{-4}$	0,051	4,236

Анализируя показатели, представленные в таблице 3, можно сделать следующие выводы:

самую малую ошибку аппроксимации в полосе пропускания имеет модифицированная АФ согласно (5), но в свою очередь она имеет самую большую ошибку аппроксимации в полосе заграждения;

при синтезе цепей по критерию максимального подавления в полосе заграждения следует использовать функцию, модифицированную согласно [23], и функцию Лагера. Необходимо отметить, что функция Баттерворта не используется при синтезе цепей по данному критерию, так как она имеет малую ошибку аппроксимации в полосе заграждения за счет высокой ошибки в переходной полосе; самую высокую равномерность ГВЗ в полосе пропускания имеет функция Баттерворта.

Заключение

Обзор и анализ военно-технических проблем показал, что использование известных классических и модифицированных АФ не позволяет обеспечить требования, предъявляемые к входным и выходным трактам в современных широкополосных приемных и передающих системах.

Анализ классических АФ показал, что каждая из них имеет свою степень соответствия тому или иному критерию качества. Зачастую для улучшения одного параметра функции необходимо значительно ухудшать другие, что обусловлено низкими вариативными свойствами функций. Разработчику приходится отказываться от выбранной АФ или увеличивать ее порядок, что приводит к усложнению реализации функции [25].

Для устранения приведенных недостатков в последние годы стали широко применять модификации функций Чебышева, что улучшило некоторые характеристики функций [25], но в полной мере не решило проблем, стоящих перед разработчиком. Все известные модификации применяются только к функции Чебышева, которая зачастую не решает некоторые задачи, особенно те, которые связаны с реализацией цепей по критерию максимума линейности ФЧХ.

Список литературы

1. MIL-STD-188-110C / Interoperability and performance standards data modems, 2012.
2. MIL-STD-188-141C / Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems, 2011.
3. Бакалов, В. П. Основы теории цепей: учеб. для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитруков, Б. Е. Крук. – М.: Радио и связь, 2003. – 592 с.
4. Манаев, Е. И. Основы радиоэлектроники / Е. И. Манаев. – 4-е изд. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 512 с.
5. Тронин, Ю. В. Синтез фильтров: учеб. пособие / Ю. В. Тронин, О. В. Гурский. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 76 с.
6. Paarmann, L. D. Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective filters / L. D. Paarmann. – Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 441 p.
7. Thede, L. Practical Analog and Digital Filter Design / L. Thede. – Artech House, 2004. – 270 p.
8. Хьюлсман, Л. П. Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л. П. Хьюлсман, Ф. Е. Аллен; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 384 с.
9. Кайчень, В. Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей / В. Кайчень. – М.: Связь, 1979. – 86 с.
10. Карни, Ш. Теория цепей. Анализ и синтез / Ш. Карни – М.: Связь, 1973. – 269 с.
11. Антонью, А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование / А. Антонью; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
12. Леонченко, В. П. Расчет полосковых фильтров на встречных стержнях: справ. В. П. Леонченко, А. Л. Фельдштейн, Л. А. Шепелянский. – М.: Связь, 1975. – 312 с.: ил.
13. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ: учеб. пособие / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин; под ред. Д. М. Сазонова. – М.: Высш. шк., 1981. – 295 с.
14. Модель, А. М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах / А. М. Модель. – М.: Связь, 1967. – 352 с.
15. Собенин, Я. А. Расчет полиномиальных фильтров / Я. А. Собенин. – М.: Связьиздат, 1963. – 208 с.
16. Bazuin V. J. Analog and RF Filters Design Manual: A Filter Design Guide by and for WMU Students [Electronic resource] / V. J. Bazuin. – Western Michigan University. – Mode of access: http://homepages.wmich.edu/~bazuinb/FiltersManual_RevD.pdf. – Date of access: 11.11.2012.
17. Kummer, M. Grundlagen der Mikrowellentechnik / M. Kummer. – Berlin: Technik, 1986. – 444 S.

18. Cameron, R. J. Advanced Filter Synthesis / R. J. Cameron // Microwave magazine IEEE. – 2011. – Vol. 12. – P. 42–43.
19. Cameron, R. J. Generation of Transfer and Reflection Polynomials / R. J. Cameron // Microwave magazine IEEE. – 2011. – Vol. 12. – P. 46–47.
20. Software tool for the design of narrow band band – pass filters / A. Garcia Lamperez [et al.]. – Microwave Symposium Digest, 2001. IEEE– MTT–S International. – 2001. – Vol. 3. – P. 2103–2106.
21. Generalized Chebyshev-like Approximation for Low-pass Filter Hisham L. Swady Dept. of Electrical Engineering. University of Basrah Basrah, Ir.
22. Шашок, В. Н. Синтез цепей широкополосного согласования и фильтрации с повышенной равномерностью группового времени запаздывания: дис.... канд. техн. наук: 05.12.04 / В. Н. Шашок. – Минск, 2013. – 142 л.
23. Курочкин, А. Е. Модификация полиномов Чебышева для конструирования передаточных функций активных фильтров // Радиотехника. – 1990. – № 5. – С. 21–23.
24. Шашок, В. Н., Бойкачев П. В. БИХ фильтры с нарастающе-волновой функцией передачи / В. Н. Шашок, П. В. Бойкачев: тез. докл. 48-й науч. Конф. БГУИР. – Минск, 2012. – С.30–31.
25. Разработка класса аппроксимирующих функций передачи цепей фильтрации с малыми вносимыми искажениями сигналов: отчет о НИР / Воен. акад. Респ. Беларусь; рук. темы Г. А. Филиппович. – Минск, 2011. – 89 с.

*Сведения об авторах:

Бойкачев Павел Валерьевич,

Дубовик Илья Андреевич,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 25.03.2016 г.

УДК 621.372.512

СИНТЕЗ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

М. О. Бусел; А. А. Калинин, кандидат технических наук, доцент;
А. Г. Романович, кандидат технических наук*

Предложен новый метод численного синтеза антенных решеток с произвольным расположением излучающих элементов в пространстве на основе специальных базисных функций. Метод обеспечивает учет направленных свойств излучателей и их ориентацию. Приведены результаты численного моделирования сферической антенной решетки.

The new method of antennas arrays numerical synthesis with any location of radiating elements, on the basis of special basic functions is offered. The method provides directed properties and space orientation of radiators. Results of numerical modeling of spherical arrays are represented.

В последнее время для решения целого ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и т. д. все чаще возникает необходимость в размещении излучающих элементов над выпуклыми (конформными) поверхностями. Совмещение излучающего полотна антенны с поверхностью различных объектов, например цилиндров, конусов, сфер и других придает дискретным излучающим системам целый ряд полезных свойств, отсутствующих у линейных и плоских антенн [1, 2].

К настоящему времени разработано и развито достаточно много методов синтеза антенн. Основными из них традиционно являются: метод парциальных диаграмм, собственных функций, метод интеграла Фурье и др. [3–5]. В литературе широко представлено применение данных методов к синтезу в основном линейных и плоских антенн с равномерным распределением излучающих элементов. В то же время вопросы синтеза излучающих систем сложной формы остаются почти незатронутыми.

Одной из задач, решаемых в ходе синтеза антенных решеток с произвольным расположением излучающих элементов, является определение геометрии излучающей области и амплитудно-фазового распределения (АФР) в этой области. Размещение излучателей на поверхности решетки может быть как эквидистантным (равномерным), так и неэквидистантным (неравномерным). В литературе широко представлено применение методов синтеза для равномерного размещения элементов в антенной решетке. В конформных антенных решетках размещение не всегда эквидистантное, следовательно, необходимо проводить синтез для решетки с близким к такому размещению излучателей. В литературе данный вопрос почти не затрагивается.

Рассмотрим случай размещения излучателей на сферической поверхности, которая является поверхностью с двойной кривизной. Сферическая антенная решетка (САР) представляет собой систему излучателей, размещенных на сферической поверхности. Размещение излучателей на поверхности такой антенной решетки – достаточно сложная задача [6]. Как известно, применительно к плоским решеткам [7] гексагональное размещение излучателей является более экономичным по сравнению с размещением в узлах прямоугольной сетки, поскольку в этом случае на каждый элемент приходится примерно на 15 % площади поверхности больше. Очевидно, такое же соотношение следует ожидать и в случае конформных антенн.

Сферическая антенная решетка обеспечивает сканирование лучом неизменных ширины и формы в азимутальной и угломестной плоскостях за счет перемещения излучающей области по поверхности решетки (так называемый коммутационный метод). При этом размеры, форма и количество элементов излучающей области остаются практически неизменными (конформное сканирование). Конструктивные особенности

сферической антенной решетки показаны на рисунке 1. Следует отметить, что САР представляет собой систему из N одинаковых излучателей, размещенных в узлах гексагональной сетки, расположенных на сфере радиуса R . Диаграмма направленности (ДН) элемента решетки (в общем случае это комплексная функция) $F_{1n}(\theta, \varphi)$ совпадает по форме и отличается направлением главного излучения, что позволяет описать ее в виде

$$F_{1n}(\theta, \varphi) = F_1(\theta - \theta_n, \varphi - \varphi_n). \quad (1)$$

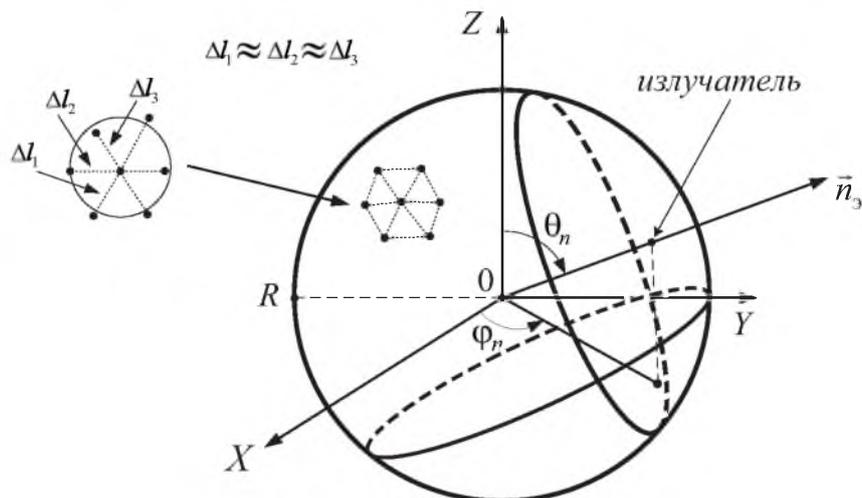


Рисунок 1. – Конструкция сферической антенной решетки

На практике излучающие элементы сферической антенной решетки располагаются над проводящей поверхностью, поэтому при формировании ДН в заданном направлении используется лишь некоторая так называемая активная область решетки (рисунок 2).



Рисунок 2. – Активная область сферической антенной решетки

Под решением задачи синтеза САР понимается расчет такого амплитудно-фазового распределения, которое обеспечит формирование ДН с требуемыми свойствами. При этом принимаются известными геометрические особенности сферической антенной решетки (радиус, ширина активной области, количество излучателей, линейное или угловое расстояние между соседними излучателями, тип излучающего элемента и его направленные свойства).

Запишем выражение для нормированной комплексной ДН сферической антенной решетки в виде

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{A}_n F_{1n}(\theta, \varphi) e^{i O_n(\theta, \varphi)}, \quad (2)$$

где N – число излучателей антенной решетки; \dot{A}_n – комплексная амплитуда возбуждения n -го элемента решетки; $O_n(\theta, \varphi)$ – набег фазы поля n -го излучателя при распространении

волны до точки дальней зоны, для случая сферической системы координат определяется выражением

$$O_n(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta \cos \varphi + y_n \sin \theta \sin \varphi + z_n \cos \theta), \quad (3)$$

где λ – длина волны; x_n, y_n, z_n – декартовы координаты n -го излучателя.

Для случая равномерно возбужденной антенной решетки с учетом ее кривизны амплитудно-фазовое распределение на ее раскрыве определяется по формуле

$$\dot{A}_n = e^{-iO_n(\theta_0, \varphi_0)}, \quad (4)$$

где $O_{0n}(\theta_0, \varphi_0) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_n \sin \theta_0 \sin \varphi_0 + z_n \cos \theta_0)$ – набег фазы поля n -го излучателя в направлении (θ_0, φ_0) .

Амплитудно-фазовое распределение (4) обеспечивает синфазное сложение полей излучающих элементов в заданном направлении (θ_0, φ_0) .

В конформных антенных решетках взаимное влияние между излучающими элементами в сравнении с плоскими и линейными антенными решетками относительно невелико [8]. Эта особенность определяется различным направлением излучения элементов в пространстве, а также расстоянием между излучателями $\Delta l > 0,5\lambda$. Тогда в (2) с небольшими допущениями можно использовать диаграмму направленности элемента антенной решетки, расположенного в свободном пространстве. Для получения более точных результатов необходимо использовать ДН излучателя в составе антенной системы [9].

Представим амплитудно-фазовое распределение на раскрыве сферической антенной решетки в виде разложения в бесконечный ряд Фурье:

$$\dot{A}_n = \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \{ \dot{a}_{l,s} S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] + \dot{b}_{l,s} C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] \}, \quad (5)$$

где $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ – комплексные коэффициенты разложения (в самом общем случае в бесконечный ряд Фурье); $S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \sin[l(\theta_n - \theta_0)] \sin[s(\varphi_n - \varphi_0)]$ и $C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \cos[l(\theta_n - \theta_0)] \cos[s(\varphi_n - \varphi_0)]$ – функции разложения.

Далее по тексту в целях сокращения записи вместо $S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0]$ и $C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0]$ будет использоваться $S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$ и $C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$.

Подставим (5) в (2). Тогда выражение для комплексной нормированной диаграммы направленности сферической антенной решетки можно записать таким образом:

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \{ \dot{a}_{l,s} S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] + \dot{b}_{l,s} C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] \} F_{1n}(\theta, \varphi) e^{iO_n(\theta, \varphi)}, \quad (6)$$

где $L = S$ – конечное число членов ряда Фурье, характеризует точность разложения двух функций.

Введем новое обозначение и представим выражение (6) как

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \{ \dot{a}_{l,s} \dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi) + \dot{b}_{l,s} \dot{Z}_{C_{l,s}}(\theta, \varphi) \}, \quad (7)$$

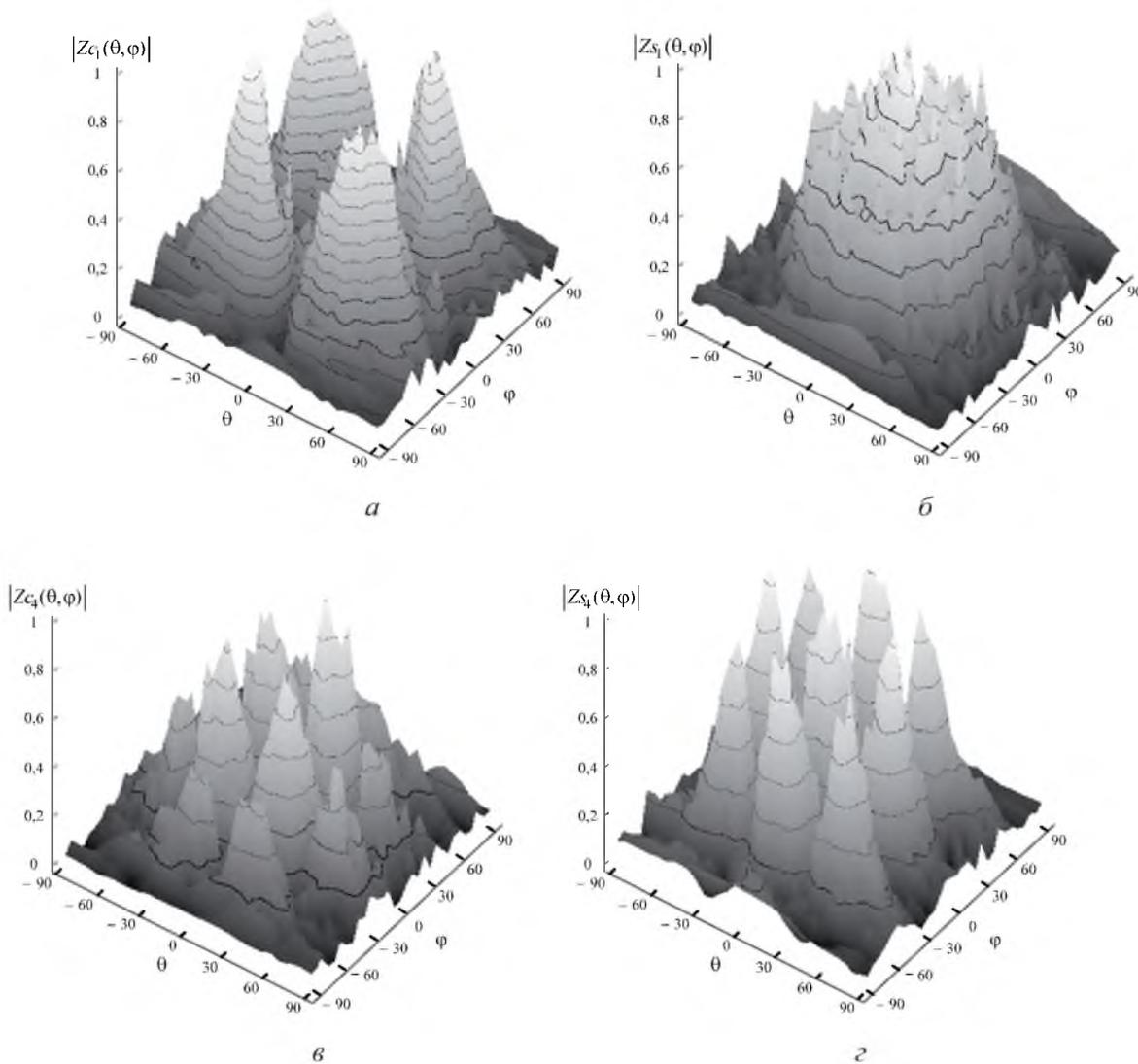
где $\dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi)$, $\dot{Z}_{C_{l,s}}(\theta, \varphi)$ – базисные функции, которые описываются следующими соотношениями [2]:

$$\dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{ F_{1n}(\theta, \varphi) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}; \quad (8)$$

$$\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{ F_{l_n}(\theta, \varphi) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (7), суть предлагаемого метода заключается в представлении заданной ДН в виде разложения в ряд Фурье по системе базисных функций $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$, нахождении коэффициентов $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ с дальнейшей подстановкой их в формулу (5) для расчета комплексных амплитуд возбуждения элемента решетки.

Из соотношений (8) и (9) видно, что функции $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$ содержат в себе информацию как о конструктивных особенностях САР, так и о направленных свойствах ее элементов. В качестве примера на рисунке 3 показан вид нормированных амплитудных значений базисных функций $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$ первого (*а, б*) и четвертого (*в, г*) порядка для случая заданной активной области ($2\varphi_{0,5} = 130^\circ$, $2\theta_{0,5} = 130^\circ$) сферической антенной решетки с параметрами ($R = 9\lambda$, $\Delta l \approx 0,6\lambda$).



а, б – первый порядок; *в, г* – четвертый порядок

Рисунок 3. – Нормированные базисные функции

Коэффициенты разложения $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ находятся с использованием стандартной процедуры [10]:

$$\dot{a}_{l,s} = \frac{2}{\pi^2} \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) \dot{Z}_{s,l,s}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi; \quad (10)$$

$$\dot{b}_{l,s} = \frac{2}{\pi^2} \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) \dot{Z}_{c,l,s}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi, \quad (11)$$

где $\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi)$ – требуемая комплексная диаграмма направленности.

Следует отметить, что $\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi)$ можно получить, задавая требуемые направленные свойства в двух главных плоскостях [2]:

$$\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) = \dot{F}_{\theta\text{мп}}(\theta) \dot{F}_{\varphi\text{мп}}(\varphi), \quad (12)$$

где $\dot{F}_{\theta\text{мп}}(\theta)$ и $\dot{F}_{\varphi\text{мп}}(\varphi)$ – требуемые комплексные диаграммы направленности в соответствующих главных плоскостях.

Найденные значения коэффициентов $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ в дальнейшем используются для расчета комплексных амплитуд возбуждения (4) элементов решетки. Синтезированное амплитудно-фазовое распределение обеспечивает формирование ДН сферической антенной решетки с заданными параметрами.

Выражения (1)–(12) описывают метод численного синтеза амплитудно-фазового распределения конформной антенной решетки заданной конструкции.

В качестве элементов антенных решеток обычно используются слабонаправленные излучатели: вибраторные, щелевые, волноводные антенны, антенны бегущей волны и т. п. Коэффициент направленного действия (КНД) таких излучателей составляет всего несколько единиц. Поэтому при моделировании их можно приближенно описывать в виде элементарных излучателей, например элемента Гюйгенса. Соответственно все многообразие излучающих элементов можно разделить на две группы: вибраторные и апертурные.

Модель излучателя вибраторного типа применяется при отсутствии проводящего конформного экрана. Такие конформные антенные решетки используются в различных пеленгационных системах коротковолнового диапазона волн. Их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

Апертурные излучатели САР по направленным свойствам близки к элементу Гюйгенса, представляемому в виде бесконечно малого участка волнового фронта плоской электромагнитной волны с линейной поляризацией. ДН элемента Гюйгенса имеет близкую к осесимметричной форму, а его КНД равен 3 [7]. Поэтому при моделировании направленных свойств $F_{l_n}(\theta, \varphi)$ излучающего элемента САР его амплитудные ДН в двух главных плоскостях задавались выражениями (рисунок 4):

$$F_{1\varphi}(\varphi) = \left| \frac{1 + \cos\varphi}{2} \right|; \quad (13)$$

$$F_{1\theta}(\theta) = \left| \frac{1 + \cos\theta}{2} \right|, \quad (14)$$

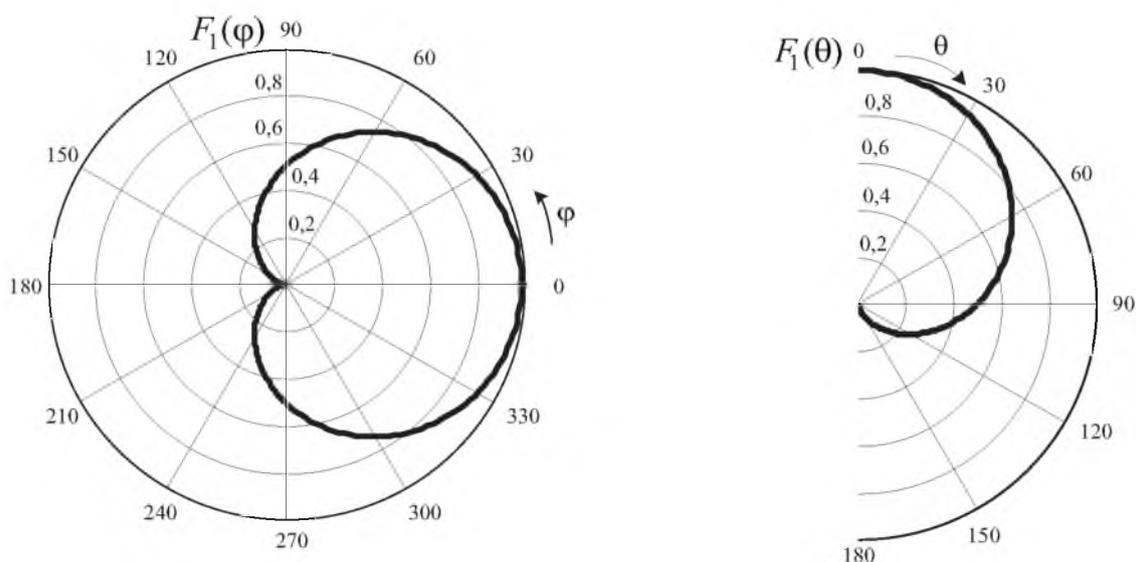


Рисунок 4. – ДН излучателя в главных плоскостях

На практике часто излучающие элементы САР располагаются над проводящей поверхностью. Поэтому при формировании ДН в некотором направлении необходимо исключить излучение в область пространства, экранированную проводящим экраном. С учетом этого при расчетах модель излучателя сферической антенной решетки принимает вид, как показано на рисунке 5.

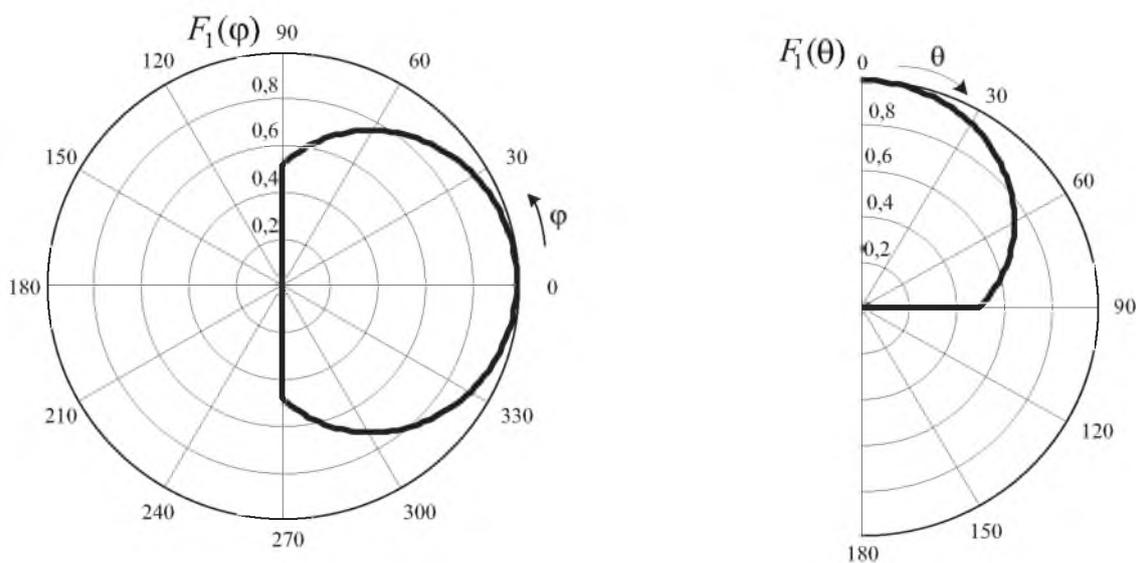
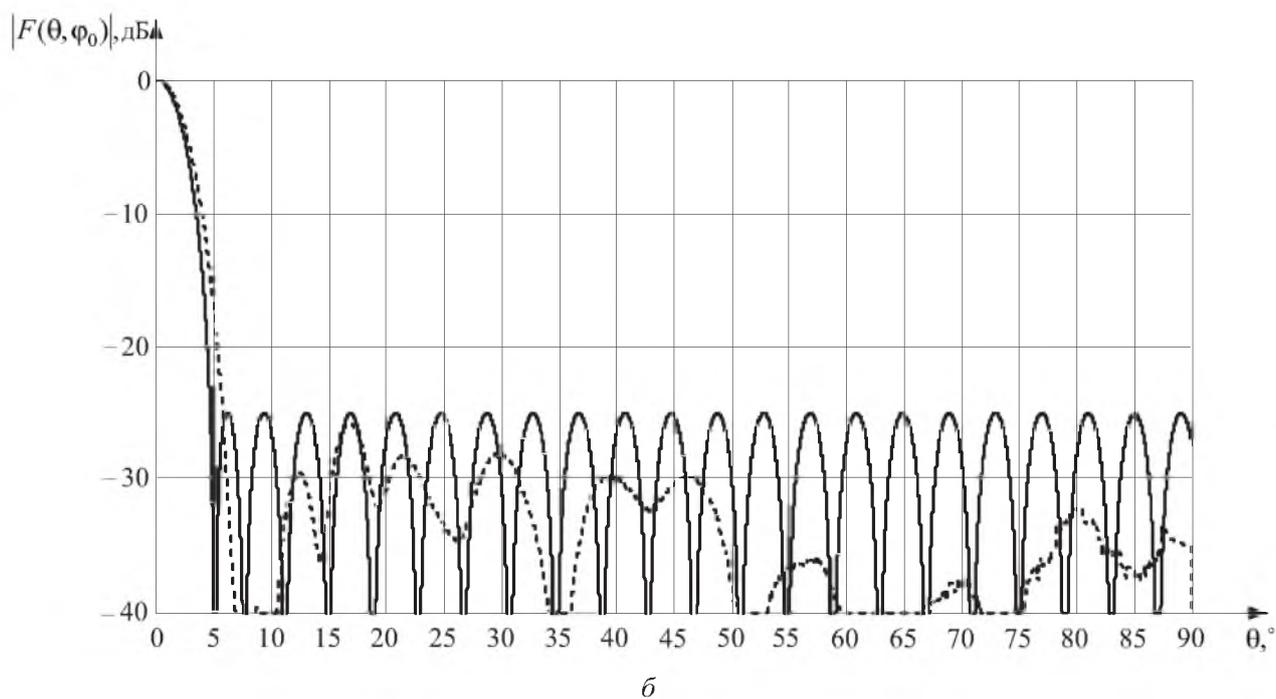
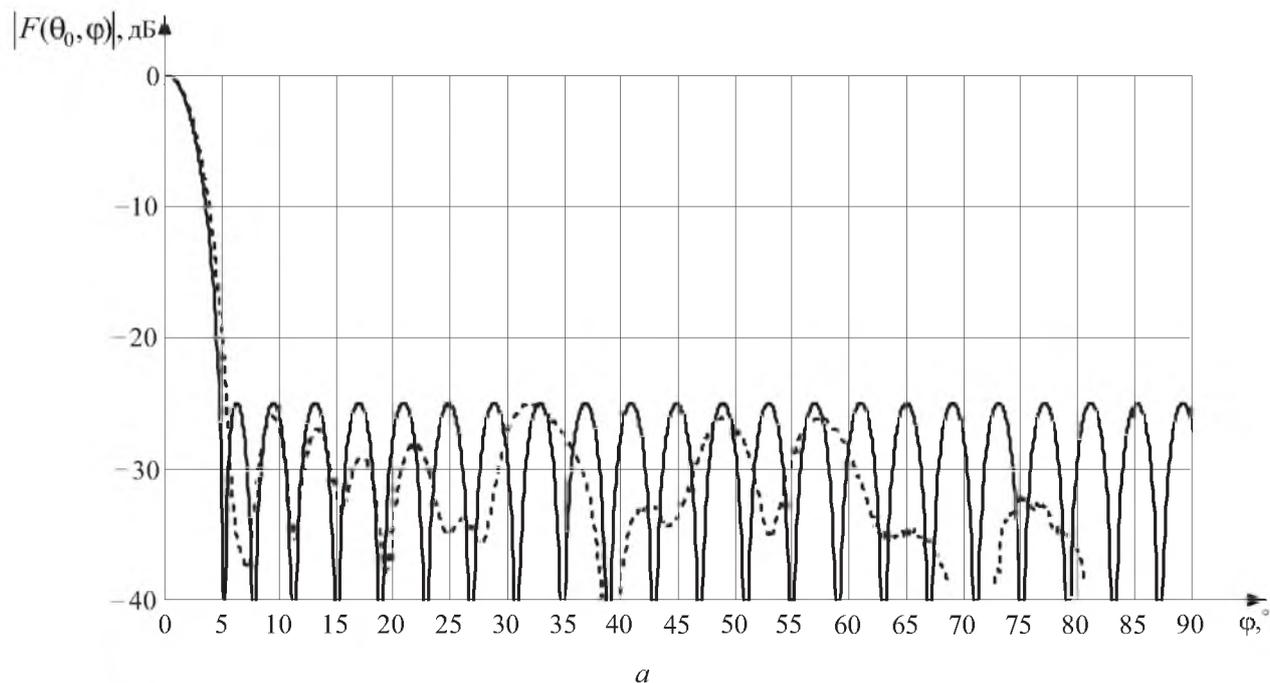


Рисунок 5. – ДН излучателя без обратного излучения в главных плоскостях

Результирующая ДН излучателя описывается выражением

$$F_1(\theta, \varphi) = \left| \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right| \cdot \left| \frac{1 + \cos \theta}{2} \right|. \quad (15)$$

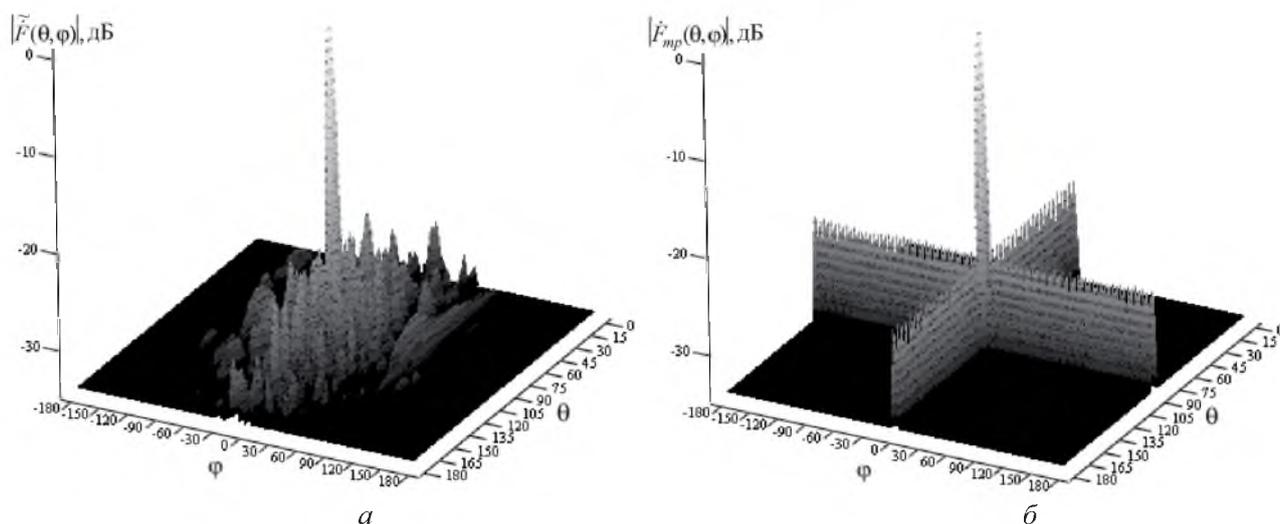
Для проверки работоспособности данного метода синтеза конформной антенной решетки проводилось моделирование активной области сферической антенной решетки с параметрами ($2\varphi_{0,5} = 130^\circ$; $2\theta_{0,5} = 130^\circ$) и размещением излучателей в узлах квазиравносторонней треугольной (произвольной) сетки. В качестве одиночного излучателя использовался элемент с направленными свойствами (15). Результаты моделирования приведены на рисунках 6 и 7.



a – плоскость φ ; *б* – плоскость θ

Рисунок 6. – Нормированные ДН САР с заданными параметрами $F_B = 25$ дБ и $2\varphi_{0,5} = 2\theta_{0,5} = 4^\circ$ (непрерывная линия – заданная, штриховая линия – результат моделирования)

Из рисунка 6 видно, что требования к F_B и $2\varphi_{0,5}$ ($2\theta_{0,5}$) синтезируемой ДН сферической антенной решетки практически полностью выполнены.



а – синтезируемая ДН; *б* – требуемая ДН

Рисунок 7. – Нормированные ДН САР

Таким образом, в работе предложен метод синтеза КАР с произвольным расположением излучателей, который позволяет учитывать направленные свойства элементов антенной решетки и проводить расчет АФР в пределах выбранной активной области. В отличие от известных методов синтеза предложенный метод не имеет ограничений на геометрию излучающего раскрыва. Метод синтеза антенной решетки позволяет учитывать требования к заданной диаграмме направленности как по уровню бокового излучения, так и по ширине главного лепестка диаграммы направленности. Предлагаемый метод может быть использован в активных конформных антенных решетках с цифровым способом формирования ДН.

Список литературы

1. Josefsson, L. Conformal array antenna theory and design / L. Josefsson, P. Persson. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. – 488 p.
2. Калинин, А. А. Метод численного синтеза чебышевских кольцевых антенных решеток / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Докл. БГУИР. – 2010. – № 7 (53). – С. 5–11.
3. Зелкин, Е. Г. Методы синтеза антенн / Е. Г. Зелкин, В. Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
4. Бахрах, Л. Д. Синтез излучающих систем / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий. – М.: Сов. радио, 1974. – 232 с.
5. Минкович, В. М. Теория синтеза антенн / В. М. Минкович, В. П. Яковлев. – М.: Сов. радио, 1969. – 296 с.
6. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
7. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
8. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский [и др.]. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
9. Романович, А. Г. Результаты численных исследований кольцевых антенных решеток, синтезированных с учетом направленных свойств излучателей / А. Г. Романович, А. А. Калинин, М. О. Бусел // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 4 (41). – С. 101–105.
10. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

*Сведения об авторах:

Бусел Михаил Олегович,
УО «Военная академия Республики Беларусь»;
Калинин Александр Александрович,
НПОО (ОКБ ТСП);
Романович Александр Геннадьевич,
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники».
Статья поступила в редакцию 28.03.2016 г.

УДК 534.6

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С НЕПРЕРЫВНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ

Р. В. Быков, кандидат технических наук*

В статье рассматривается метод определения параметров движения акустически активного объекта, основанный на сопоставлении измеряемых в различных точках пространства направлений прихода фронта акустической волны, излучаемой этим объектом. Метод предусматривает возможность исключения влияния скорости движения объекта, которая может быть сопоставима со скоростью распространения акустической волны, на точность определения параметров.

In the article the method of determining parameters of movement acoustically active object based on a comparison of the measured points in space in different directions of arrival of the acoustic wave front emitted by the object. The method provides for the possibility of excluding the influence of the velocity of the object, which may be comparable to the speed of acoustic wave, propagation on the accuracy of determination of the parameters.

Введение

Применение технологий «Стелс», использование малых и предельно-малых высот, постановка активных (пассивных) помех на сегодняшний день приводят к значительному снижению эффективности радиолокационных средств (комплексов) в системе противовоздушной обороны (ПВО) при отражении воздушного противника. Однако в подавляющем большинстве на современных летательных аппаратах установлены двигательные установки, формирующие непрерывные акустические сигналы. Использование шумового эффекта таких акустически активных объектов (ААО) позволяет разрабатывать сравнительно недорогие пассивные акустические комплексы обнаружения и определения координат этих объектов [1]. В свою очередь акустические комплексы, вынесенные на направлении предполагаемого полета летательных аппаратов (установленные вдоль границы), могут дополнить систему ПВО и, соответственно, повысить ее эффективность.

В радиолокации известен триангуляционный пассивный метод определения координат или параметров движения объекта (ПДО), основанный на сопоставлении измеренных значений направлений прихода фронта (НПФ) электромагнитной волны (ЭМВ) в различных точках пространства при известной базе между фазовыми центрами приемных устройств [2, 3]. Использование этого метода предполагает, что разнесенные в пространстве приемники работают в едином масштабе времени, а положение объекта за время распространения ЭМВ от точки излучения до первого и второго приемника не изменилось.

Особенностью использования методов акустической локации является то, что скорость объекта (особенно воздушного) может быть сопоставима со скоростью распространения акустической волны (АВ). Это приводит к тому, что измерительные акустические модули (ИАМ), которые разнесены в пространстве, как показано на рисунке 1, одновременно могут принимать АВ, излучаемую в различных точках пространства, что может приводить к значительным ошибкам определения ПДО. То есть необходимо несколько модернизировать известный в радиолокации триангуляционный метод, чтобы устранить ошибки, обусловленные сопоставимостью скорости распространения АВ со скоростью объекта.

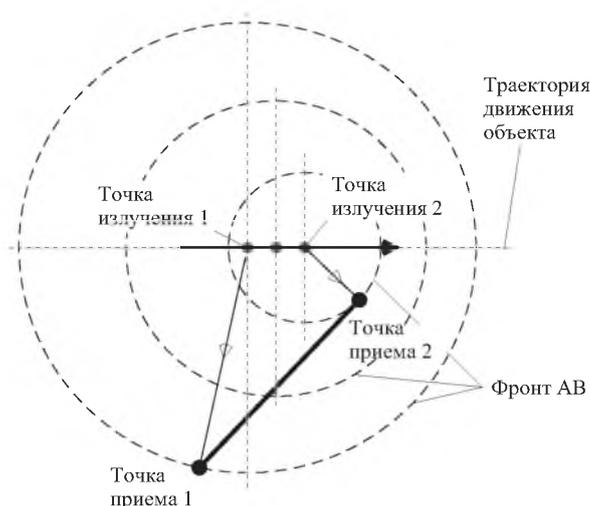


Рисунок 1. – Изменение пространственного положения объекта при приеме АВ в различных точках пространства

Постановка задачи

Полагается, что на местности, как показано на рисунке 2, в выбранной измерительной системе координат (ИСК) $OX_iY_iZ_i$ расположено M ИАМ, которые позволяют в едином масштабе времени измерять НПФ АВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях этой ИСК. При этом на рисунке 2 введены следующие обозначения: T_{m_l} – точка траектории объекта в l -й момент времени ($m = \overline{1, M}$, $l = \overline{1, L}$, где L – общее количество измерений НПФ АВ); r_{ml} – расстояние между m -м ИАМ и объектом в l -й момент времени; h_{ml} – высота объекта относительно m -го ИАМ в l -й момент времени; ε_{ml} и φ_{ml} – НПФ АВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях в l -й момент времени; b_{im} – база между i -м (центром ИСК) и m -м ИАМ; γ_{im} и β_{im} – угол установки m -го ИАМ в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно центра ИСК; p_{ti} и h_{ti} – параметр и относительная высота движения объекта в ИСК; μ и η – направление движения и угол подъема траектории движения ААО.

Объект движется с постоянной скоростью V_o , которая меньше скорости распространения АВ c_a , под углами η и μ в вертикальной и горизонтальной плоскостях ИСК, а также с параметром p_{ti} и высоте h_{ti} . В M ИАМ в l -е моменты времени осуществляется измерение НПФ АВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях ε_{ml} и φ_{ml} ($m = \overline{1, M}$, $l = \overline{1, L}$). В качестве ИАМ могут использоваться ИАМ с тремя и более чувствительными элементами [4]. При этом системы координат самих ИАМ должны быть строго параллельны ИСК. Используя известные базы b_{im} и углы γ_{im} и β_{im} , а также измеренные значения НПФ АВ ε_{ml} и φ_{ml} , необходимо определить: параметр и относительную высоту движения объекта p_{ti} и h_{ti} ; направление движения ААО и угол подъема траектории μ и η ; скорость движения объекта V_o .

Решение задачи

Скорость движения ААО V_o в общем случае (рисунок 2) может быть вычислена по результатам двух измерений НПФ АВ в l -й и f -й ($l \neq f$) моменты времени в m -м ИАМ:

$$V_o = p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{ml} - \operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{mf} \right] \cos^{-1} \eta \Delta t_{lf}^{-1}, \quad (1)$$

где Δt_{lf} – время между l -м и f -м измерениями НПФ АВ.

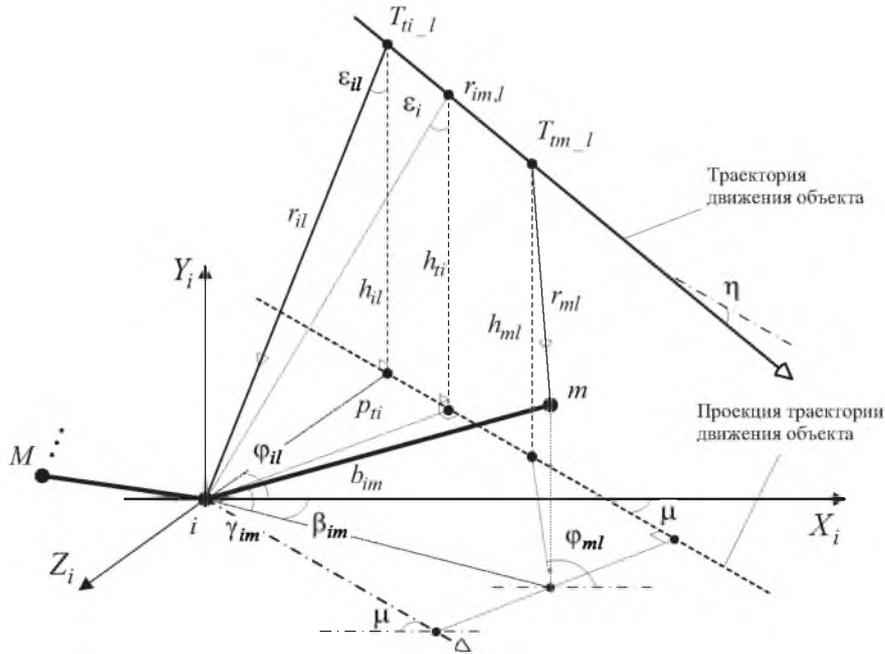


Рисунок 2. – Пояснение к изменению пространственного положения объекта при приеме АВ в различных точках пространства

Как видно из выражения (1), в него включены три неизвестных параметра, поэтому, используя еще одно измерение НПФ АВ в j -й момент времени, можно составить систему выражений

$$V_o = \begin{cases} p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{ml} - \operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{mf} \right] \cos^{-1} \eta \Delta t_{lf}^{-1}; \\ p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{ml} - \operatorname{tg}^{-1} \mu + \varphi_{mj} \right] \cos^{-1} \eta \Delta t_{lj}^{-1}, \end{cases} \quad (2)$$

из которой значение угла μ будет определяться как

$$\operatorname{tg} \mu = - \frac{\Delta t_{lj} \sin \varphi_{mf} - \varphi_{ml} \sin \varphi_{mj} - \Delta t_{lf} \sin \varphi_{mj} - \varphi_{ml} \sin \varphi_{mf}}{\Delta t_{lj} \sin \varphi_{mf} - \varphi_{ml} \cos \varphi_{mj} - \Delta t_{lf} \sin \varphi_{mj} - \varphi_{ml} \cos \varphi_{mf}}. \quad (3)$$

То есть направление движения ААО в горизонтальной плоскости μ относительно центра ИСК можно определить по трем измерениям НПФ АВ в одном ИАМ.

Высота траектории ААО в l -й момент времени относительно центра ИСК может быть вычислена по результатам измерений в m -м ИАМ (рисунок 2) в виде

$$h_{ti} = p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \epsilon_{ml} + \cos \varphi_{ml} + \mu \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{ml} + b_{im} \cos \gamma_{im} \cos \beta_{im} + \mu \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \gamma_{im}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что оно включает два неизвестных параметра – p_{ti} и η . Используя результаты измерений НПФ АВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях в l -й и j -й моменты времени, из (4) можно определить

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{\operatorname{tg}^{-1} \epsilon_{mj} \sin \mu + \varphi_{ml} - \operatorname{tg}^{-1} \epsilon_{ml} \sin \mu + \varphi_{mj}}{\cos \mu + \varphi_{ml} \sin \mu + \varphi_{mj} - \cos \mu + \varphi_{mj} \sin \mu + \varphi_{ml}}. \quad (5)$$

Результаты измерений НПФ АВ в m -м и k -м ИАМ в l -й, f -й или j -й моменты времени и выражение (4) позволяют составить систему выражений

$$h_{ti} = \begin{cases} p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{ml} + \cos \varphi_{ml} + \mu \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{ml} + \\ + b_{im} \cos \gamma_{im} \cos \beta_{im} + \mu \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \gamma_{im} ; \\ p_{ti} - b_{ik} \cos \gamma_{ik} \sin \mu + \beta_{ik} \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{kl} + \cos \varphi_{kl} + \mu \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{kl} + \\ + b_{ik} \cos \gamma_{ik} \cos \beta_{ik} + \mu \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \gamma_{ik} . \end{cases} \quad (6)$$

Из системы выражений (6) можно определить параметр

$$p_{ti} = b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{ml} + \cos \mu + \varphi_{ml} \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{ml} - \\ - b_{im} \cos \gamma_{im} \cos \mu + \beta_{im} \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \gamma_{im} - \\ - b_{ik} \cos \gamma_{ik} \sin \mu + \beta_{ik} \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{kl} + \cos \mu + \varphi_{kl} \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{kl} + \\ + b_{ik} \cos \gamma_{ik} \cos \mu + \beta_{ik} \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \gamma_{ik} \times \\ \times \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{ml} + \cos \mu + \varphi_{ml} \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{ml} - \\ - \left[\operatorname{tg}^{-1} \varepsilon_{kl} + \cos \mu + \varphi_{kl} \operatorname{tg} \eta \right] \sin^{-1} \mu + \varphi_{kl} \Bigg\} . \quad (7)$$

Подставляя полученные значения p_{ti} , μ и η в выражения (1) и (4), можно определить скорость движения ААО V_o и высоту траектории h_{ti} . Для подтверждения возможности определения ПДО ААО проведено математическое моделирование (ММ).

Методика математического моделирования

Моделирование проведено в соответствии с методикой, которая представляет собой последовательность следующих действий:

1. Задаются ПДО в ИСК η , μ , p_{ti} , h_{ti} и V_o , а также скорость распространения АВ c_a .
2. С заданным интервалом $\Delta_L = \Delta t V_o$ задается траектория движения объекта с координатами

$$\begin{cases} x_g = p_{ti} \sin \mu + \Delta_L \operatorname{tg} \eta - G/2 \cos \mu \cos \eta; \\ y_g = h_{ti} \cos^{-1} \eta - \Delta_L \operatorname{tg} \eta - G/2 \sin \eta; \\ z_g = p_{ti} \cos \mu + \Delta_L \operatorname{tg} \eta - G/2 \sin \mu \cos \eta, \end{cases}$$

где Δt – временной интервал (шаг) моделирования; G – общее число дискретных отсчетов моделирования траектории, $g = \overline{1, G}$.

3. Для l (f , j)-го шага моделирования и первого m -го ИАМ с координатами $x_m; y_m; z_m$ вычисляются направления

$$\varepsilon_{ml f, j} = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{x_{o_l f, j}^2 - x_m^2 + z_{o_l f, j}^2 - z_m^2}}{y_{o_l f, j} - y_m} \quad \text{и} \quad \varphi_{ml} = \operatorname{arctg} \frac{z_{o_l f, j} - z_m}{x_{o_l f, j} - x_m} .$$

4. Для второго k -го ИАМ с координатами $x_k; y_k; z_k$ направления $\varepsilon_{kl f, j}$ и $\varphi_{kl f, j}$ для l (f , j)-го момента времени выбираются таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{r_{mk, l f, j}}{V_o} + \frac{r_{ml f, j}}{c_a} = \frac{r_{kl f, j}}{c_a} ,$$

где $r_{ml f,j} = p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \sin^{-1} \mu + \varphi_{ml f,j} \sin^{-1} \varepsilon_{ml f,j}$;
 $r_{mk,l f,j} = b_{im} \cos \gamma_{im} \cos \mu + \beta_{im} - p_{ti} - b_{im} \cos \gamma_{im} \sin \mu + \beta_{im} \times$
 $\times \text{tg}^{-1} \mu + \varphi_{ml f,j} +$
 $+ b_{ik} \cos \gamma_{ik} \cos \mu + \beta_{ik} - p_{ti} - b_{ik} \cos \gamma_{ik} \sin \mu + \beta_{ik} \text{tg}^{-1} \mu + \varphi_{kl f,j} \cos^{-1} \eta$;
 $k \neq m$ и $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, M}$.

5. Значения НПФ АВ для l -го, f -го и j -го моментов времени фиксируются и в соответствии с выражениями (3), (5), (7), (4) и (1) вычисляются ПДО в ИСК $\bar{\eta}$, $\bar{\mu}$, \bar{p}_{ti} , \bar{h}_{ti} и \bar{V}_o .

Основные результаты математического моделирования

Для ММ использованы следующие исходные данные:

скорость $V_o = 200$ м/с ;

направление $\mu = [0^\circ; 360^\circ]$ – изменялось с дискретностью $\Delta_\mu = 1^\circ$;

угол подъема траектории в первом случае $\eta = 0^\circ$, втором – $\eta = 5^\circ$, третьем – $\eta = 15^\circ$;

высота $h_{ti} = 200$ м ;

параметр $p_{ti} = 200$ м ;

центр ИСК с координатами $x_i; y_i; z_i = 0$ м; 0 м; 0 м ;

координаты двух ИАМ ($M = 2$) в ИСК $x_1; y_1; z_1 = 300$ м; 50 м; -300 м
и $x_2; y_2; z_2 = 300$ м; -20 м; 300 м ;

скорость распространения АВ $c_a = 331$ м/с ;

общее время моделирования $G\Delta t = 10$ с с шагом $\Delta t = 5$ мс ;

моменты времени трех измерений $t_1 = 1$ с, $t_2 = 2,5$ с и $t_3 = 3,5$ с, что соответствует 200, 500 и 700-му шагам моделирования.

Основные результаты ММ представлены на рисунках 3–8. Причем на рисунке 3 приведен пример временных изменений значений НПФ АВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях $\varepsilon_{i m,k}$ и $\varphi_{i m,k}$ относительно центра ИСК (m -го, k -го ИМ) при $\eta = 0^\circ$, $\mu = 30^\circ$. На рисунках 4–8, в зависимости от направления движения объекта μ , представлены, соответственно, отклонения в определении:

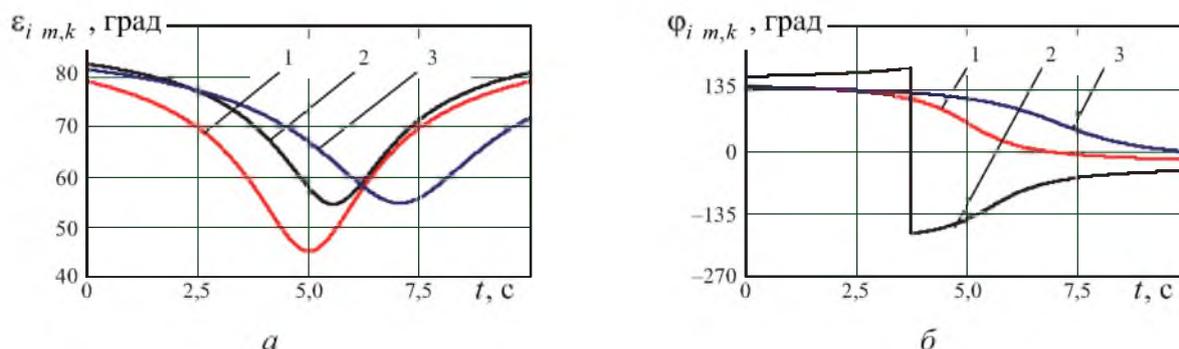
направления движения $\delta_\mu = \mu - \bar{\mu}$, где μ – заданное значение направления, а $\bar{\mu}$ – направление движения, вычисленное в соответствии с выражением (3);

угла подъема траектории $\delta_\eta = \eta - \bar{\eta}$, где η – заданное значение, а $\bar{\eta}$ – значение угла, вычисленное в соответствии с выражением (5);

параметра движения $\delta_p = p_{ti} - \bar{p}_{ti}$, где p_{ti} – заданное значение параметра, а \bar{p}_{ti} – параметр движения, вычисленный в соответствии с выражением (7);

высоты траектории $\delta_h = h_{ti} - \bar{h}_{ti}$, где h_{ti} – заданное значение высоты, а \bar{h}_{ti} – высота движения, вычисленная в соответствии с выражением (4);

скорости движения $\delta_V = V_o - \bar{V}_o$, где V_o – заданное значение скорости, а \bar{V}_o – значение скорости объекта, вычисленное в соответствии с выражением (1).



a – в вертикальной плоскости; b – в горизонтальной плоскости;
 1 – зависимость НПФ АВ от времени относительно центра измерительной СК;
 2 – зависимость НПФ АВ от времени относительно m -го (первого) ИМ;
 3 – зависимость НПФ АВ от времени относительно k -го (второго) ИМ

Рисунок 3. – Зависимости НПФ АВ от времени при $\eta = 0^\circ$ и $\mu = 30^\circ$

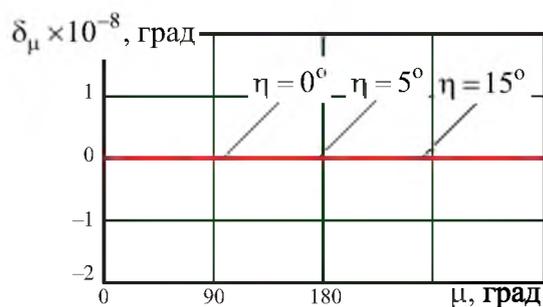


Рисунок 4. – Ошибки в определении направления движения объекта

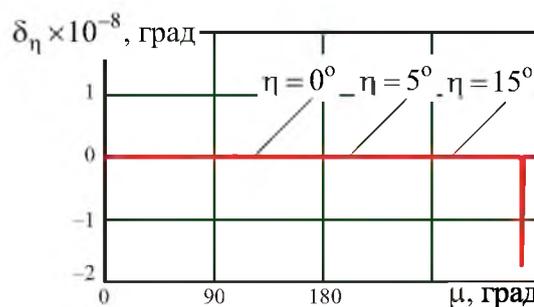


Рисунок 5. – Ошибки в определении подъема траектории относительно горизонтальной плоскости измерительной СК

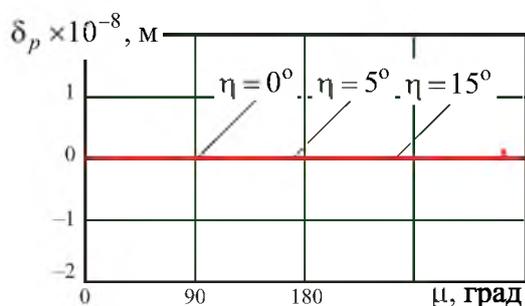


Рисунок 6. – Ошибки в определении параметра движения объекта

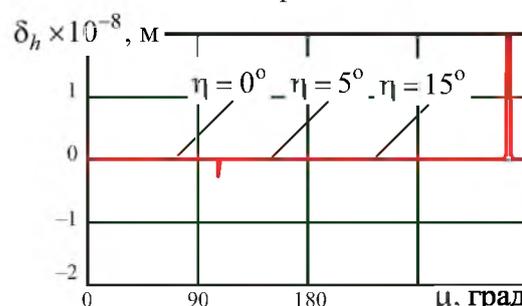


Рисунок 7. – Ошибки в определении высоты движения объекта

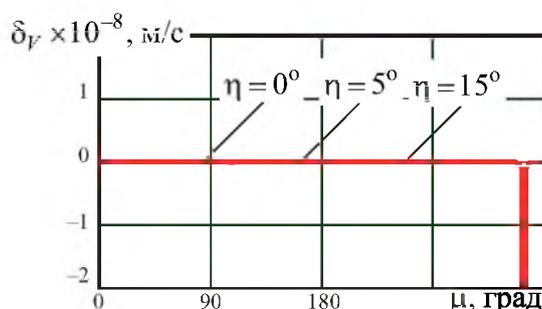


Рисунок 8. – Ошибки в определении скорости движения объекта

Результаты ММ позволяют судить о возможности определения ПДО путем трех измерений НПФ АВ в двух разнесенных в пространстве ИАМ. Незначительные «выбросы»

ошибок определения ПДО (см. рисунки 4–8) обусловлены переходом траектории движения ААО через особые точки, когда комбинации углов НПФ АВ, траектории движения и углов баз, образованных набором ИАМ, формируют значение, близкое к нулю, в знаменателях выражений (3), (5), (7), (4) и (1).

Заключение

При скорости объекта, сопоставимой со скоростью распространения АВ, и синхронном приеме этой волны в разнесенных точках пространства можно утверждать, что АВ была сформирована в различных точках траектории движения объекта. Это не позволяет использовать триангуляционный метод определения координат объекта в чистом виде, как в радиолокации, но в результате несложной доработки аналитических выражений можно определить координаты подвижного акустически активного объекта.

Полученные результаты ММ подтверждают возможность определения параметров движения дозвукового объекта путем сопоставления НПФ АВ в двух разнесенных в пространстве и в произвольном порядке ИАМ при трех измерениях этого направления в одном или обоих ИАМ. Причем определение НПФ АВ в двух ИАМ в последующем позволит осуществлять фильтрацию ПДО. Незначительные «всплески» ошибок определения ПДО (см. рисунки 4–8) обусловлены конечной разрядностью использованных средств моделирования, а также возможным нахождением объекта в такой точке пространства, когда сочетание НПФ АВ, углов установки баз ИАМ в ИСК образует значение, близкое к нулю, в знаменателях аналитических выражений.

Список литературы

1. Быков, Р. В. Использование акустических устройств для обеспечения разведывательной информацией подразделения войсковой ПВО о пролетах низколетящих целей / Р. В. Быков, С. Р. Гейстер // 2-я Воен.-науч. конф. ВВС и войск ПВО, Минск, 2011 / 1034 Центр военных исследований и информатизации. – Минск, 2011. – С. 128.
2. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. – М.: Воениздат, 1983. – Ч.1: Основы радиолокации. – 456 с.
3. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
4. Быков, Р. В. Определение полярных координат объектов в многоэлементной пассивной системе при плоском фронте волны / Р. В. Быков, А. В. Куренёв // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 1 (38). – С. 77–84.

*Сведения об авторе:

Быков Руслан Викторович,

УО «Военная академия Республики Беларусь».

Статья поступила в редакцию 15.03.2016 г.

УДК 621.37

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ОБЗОРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

О. Г. Лапука, доктор технических наук, профессор;
Д. А. Рахоцкий; А. А. Ростов*

Статья посвящена анализу технических характеристик радиолокационных систем обзора земной поверхности с позиции оценки влияния на них активных шумовых помех. Получены аналитические выражения для максимально возможного времени радиолокационного наблюдения и ширины спектра зондирующего сигнала, характеризующие потенциальную помехозащищенность радиолокационных станций (РЛС) в режимах фокусированного и нефокусированного синтезирования при различных углах наблюдения. На важном для практики примере проиллюстрированы количественные характеристики помехозащищенности бортовых РЛС ударных самолетов.

The article is devoted to analysis of technical characteristics of radiolocation systems overview the earth's surface from the point of view of influence on them active noise jamming. Analytical expressions for the maximum possible time of radar observations and spectral width of the probing signal, characterizing the potential noise immunity radar in modes focused and unfocused synthesis aperture at different viewing angles. On practical example illustrates the quantitative characteristics of noise immunity of on-board radar strike aircraft.

Бортовая радиолокационная станция (БРЛС) ударного самолета (УС), функционирующая в режиме обзора земной поверхности – один из главных информационных источников, используемых для решения задач обнаружения, распознавания, селекции и измерения координат наземных целей для их уничтожения. Это обусловлено ее способностью формировать радиолокационное изображение заданного участка поверхности с высоким разрешением на значительных расстояниях, сопоставимых с максимальной дальностью применения средств поражения. В то же время дальность действия оптико-электронных систем, обычно ограниченная визуальной видимостью, существенно зависит от времени года, суток и метеорологических условий. Кроме того, важнейшими достоинствами боевых радиолокационных систем картографирования, по сравнению с оптико-электронными, являются возможность автоматической селекции движущихся целей, а также трудности применения на противоборствующей стороне средств высокодостоверной имитации и маскировки в целях прикрытия мобильных наземных объектов вооружения и военной техники.

Важная особенность РЛС обзора земной поверхности, напрямую влияющая на ее эффективность, – высокая помехозащищенность таких систем (по сравнению с РЛС обзора воздушного пространства (управления войсками) и сопровождения воздушных целей (управления оружием)). Это обусловлено радикальным (на несколько десятичных порядков) увеличением длительности интервала наблюдения, на протяжении которого выполняется когерентное накопление принимаемого сигнала в соответствии с принципами синтезирования антенной апертуры.

Оценка эффективности новых разрабатываемых средств прикрытия наземных объектов ВВТ от бортовых авиационных средств радиолокационной разведки, получаемая с помощью имитационных математических моделей, предполагает использование подхода, при котором не связанные с параметрами средств РЭП характеристики подавляемой РЛС идеализируются. Так, не учитываются различные негативные факторы, связанные с формированием конечного радиолокационного изображения, в том числе игнорируются нестабильность траектории носителя РСА, ограничения динамического диапазона,

неидеальность трактов формирования и обработки сигналов и т. п. Такой подход позволяет получить «гарантированные» результаты оценки эффективности средств РЭП, помеховое воздействие которых основано на фундаментальных принципах извлечения полезной информации из принимаемого сигнала на подавляемой стороне. В связи с этим значительную актуальность приобретает задача оценки потенциально достижимых параметров РСА, характеризующих ее работу в идеальных условиях и, следовательно, обеспечивающих максимальную помехозащищенность.

Значительная сложность решения данной задачи обусловлена многообразием режимов работы РСА (боковой и переднебоковой обзор, фокусируемое и нефокусируемое синтезирование апертуры [2, 9, 6, 5] и параметров ее зондирующих сигналов. Отметим, что понятие помехозащищенности радиоэлектронного средства может быть корректно использовано только при декларировании типа и параметров помех, которые на него воздействуют. Для сравнительной характеристики помехозащищенности различных РЭС или РЭС, функционирующих в различных режимах, требуется обоснование некоторого «универсального» помехового воздействия, актуального для решения задач РЭП каждого из них. В большинстве случаев в качестве такого воздействия рассматривается активная шумовая помеха, характеризующаяся прицельностью по частоте (ее спектр сосредоточен в полосе частот зондирующего сигнала). При этом параметром, характеризующим помехоустойчивость РСА, может служить отношение сигнал-помеха на выходе устройства обработки (в нашем случае – на конечном радиолокационном изображении картографируемого участка поверхности).

Итак, постановка задачи: требуется определить максимально достижимое отношение сигнал-помеха на выходе устройства обработки РСА с потенциально достижимыми характеристиками в различных режимах работы в диапазоне условий боевого применения при воздействии на нее прицельной активной шумовой помехи.

Теория потенциальной помехоустойчивости определяет отношение сигнал-шум по мощности q^2 на выходе устройства когерентного накопления при воздействии белого гауссовского шума как отношение энергии полезного входного сигнала E_c к спектральной плотности мощности N_0 входного шума, независимо от природы его возникновения (внутренний, внешний). Расписав данные параметры с учетом условия спектральной прицельности создаваемых помех, имеем:

$$q^2 = \frac{E_c}{N_0} = \frac{P_c \tau_n}{\frac{P_n}{\Delta f_n}} \approx \frac{P_c \tau_n \Delta f_c}{P_n} = q_{in}^2 \tau_n \Delta f_c, \quad (1)$$

где P_c, P_n – импульсная мощность полезного сигнала и средняя мощность шума на входе устройства когерентной обработки; $\Delta f_c, \Delta f_n$ – ширина спектра полезного сигнала и шума соответственно, в выражении (1) они приняты равными между собой; $q_{in}^2 = P_c/P_n$ – отношение сигнал-шум на входе устройства когерентной обработки; τ_n – длительность интервала когерентного накопления.

Отметим, что величина q_{in}^2 определяется исключительно энергетическими характеристиками, то есть энергопотенциалом РСА PG и станции активных помех $P_j G_j$, дальностью расположения объекта наблюдения $D_{ц}$ и помехопостановщика D_j , а также эффективной площадью отражения (ЭПО) цели $\sigma_{ц}$ и условиями постановки помех (по главному либо боковым лепесткам). К примеру, при реализации режима индивидуального прикрытия, когда аппаратура постановки помех расположена непосредственно на прикрываемом объекте (работа по главному лепестку ДНА РСА), отношение сигнал-шум на входе будет равно

$$q_{in}^2 = \frac{PG\sigma_{ц}}{4\pi^2 D^4} \bigg/ \frac{P_J G_J}{4\pi D^2} = \frac{PG\sigma_{ц}}{4\pi P_J G_J D^2}. \quad (2)$$

Принимая, что данная величина является фиксированной, из выражения (1) следует, что отношение сигнал-помеха на выходе устройства обработки определяется исключительно *длительностью интервала когерентного накопления τ_n и шириной спектра зондирующего сигнала Δf_c* . Для решения поставленной задачи требуется определить максимальные (потенциально достижимые) значения данных характеристик.

Обсуждая величину длительности интервала когерентного накопления, следует учесть, что в РСА используется зондирующий сигнал в виде периодической импульсной последовательности. В этом случае величина τ_n определяется отношением длительности интервала синтезирования и скважности: $\tau_n = T_c / Q$. С учетом предлагаемого подхода к оценке помехозащищенности примем ее минимально возможной, равной 2,5, что соответствует величине потерь в отношении сигнал-шум 4 дБ. Остается найти максимальную продолжительность интервала синтезирования, которая, как следует из дальнейшего изложения, определяется исключительно геометрией взаимного расположения и кинематикой относительного движения носителя РСА и картографируемого участка местности.

Для определения искомой величины при боковом и переднебоковом обзоре рассмотрим кинематику взаимного перемещения фазового центра РСА и точечного объекта наблюдения в горизонтальной плоскости (рисунок 1). Из геометрических соображений следует, что выражение, характеризующее закон изменения текущей дальности во времени, имеет вид

$$D(t) = \sqrt{(x_c - x_{ц})^2 + z_{ц}^2} = \sqrt{D_0^2 \cos^2 \beta_0 - V_n^2 t^2 + D_0^2 \sin^2 \beta_0} = \sqrt{D_0^2 - 2D_0 V_n \cos \beta_0 t + V_n^2 t^2}, \quad (3)$$

где D_0, β_0 – начальные дальность и азимут наблюдаемого объекта относительно РСА в системе координат, связанной с вектором скорости ее носителя, совершающего прямолинейный полет с постоянно скоростью V_n .

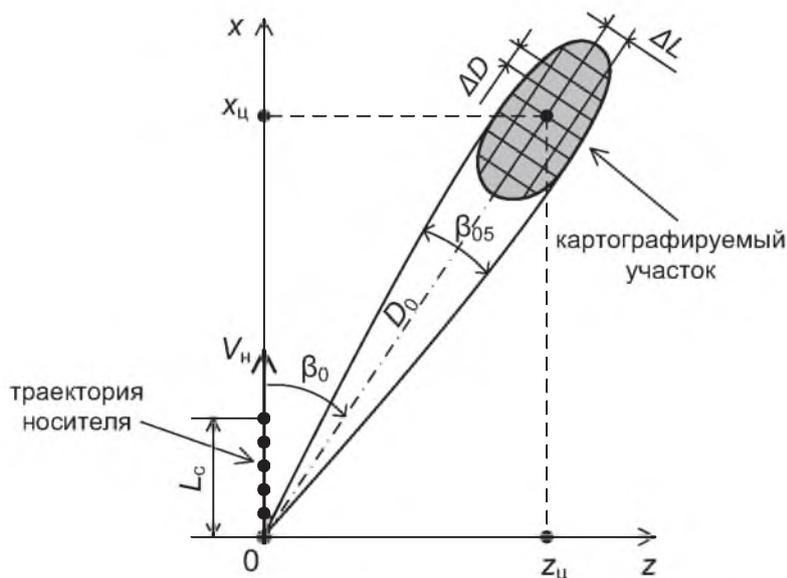


Рисунок 1. – Геометрия расположения носителя РСА и картографируемого участка в процессе синтезирования антенной апертуры

Выражение (3) является существенно нелинейным, для определения максимально возможного времени наблюдения разложим его в ряд Тейлора, ограничившись первыми *пятью* членами разложения (ограничение количества членов ряда будет аргументировано ниже):

$$D(t) \approx D_0 - V_n \cos \beta_0 t + \frac{V_n^2}{2D_0} \sin^2 \beta_0 t^2 + \frac{V_n^3}{2D_0^2} \sin^2 \beta_0 \cos \beta_0 t^3 + \frac{V_n^4}{8D_0^3} \sin^2 \beta_0 (5 \cos^2 \beta_0 - 1) t^4 \quad (4)$$

Величину доплеровского смещения частоты найдем как производную функции текущей дальности (7) по времени. Имеем:

$$V(t) = D'(t) \approx -V_n \cos \beta_0 + \frac{V_n^2}{D_0} \sin^2 \beta_0 t + \frac{3V_n^3}{2D_0^2} \sin^2 \beta_0 \cos \beta_0 t^2 + \frac{V_n^4}{2D_0^3} \sin^2 \beta_0 (5 \cos^2 \beta_0 - 1) t^3. \quad (5)$$

Первое, не зависящее от времени, слагаемое в выражении (5) определяет величину постоянного доплеровского смещения частоты отраженного сигнала. Величина второго (линейного) члена характеризует крутизну ЛЧМ траекторного сигнала. Третье и четвертое слагаемые суммы (5) определяют дополнительный набег частоты за время синтезирования, характеризующий отличие (отклонение) закона частотной модуляции траекторного сигнала от линейного.

Можно показать, что при переднебоковом обзоре ($10^\circ < \beta_0 < 60^\circ$) преобладающее влияние на величину ошибки по частоте вносит третье слагаемое (квадратичный член ряда Тейлора) выражения (5), а при боковом обзоре ($\beta_0 \approx 90^\circ$) – четвертое слагаемое (кубический член). Ошибки, вносимые последующими членами ряда Тейлора, являются гораздо менее существенными.

Максимально возможное время **фокусированного синтезирования апертуры при переднебоковом обзоре** определим с учетом следующего ограничивающего условия: абсолютная величина накопленной за время $T_{\text{ФСА}}$ ошибки по доплеровской частоте Δf , вызванной неучетом квадратичного члена ряда (5), должна соответствовать ширине полосы пропускания доплеровского фильтра, обратно пропорциональной времени синтезирования апертуры. Математическая формализация данного условия характеризуется следующим равенством:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{ФСА}}} = \frac{2}{\lambda} \Delta V = \frac{3V_n^3}{\lambda D_0^2} \sin^2 \beta_0 \cos \beta_0 T_{\text{ФСА}}^2. \quad (6)$$

Выразив отсюда искомую величину потенциального времени фокусированного синтезирования апертуры при переднебоковом обзоре, получим:

$$T_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}} = \frac{1}{V_n} \sqrt[3]{\frac{\lambda D_0^2}{3 \sin \beta_0 \cos \beta_0}}. \quad (7)$$

Принцип расчета максимального времени синтезирования при использовании режима **бокового обзора** аналогичен, за исключением следующих моментов:

1. В связи с тем, что квадратичный член ряда (5) вследствие наличия множителя $\cos \beta_0$ при $\beta_0 \approx 90^\circ$ весьма мал, наибольший «вклад» в ошибку по доплеровской частоте вносит кубический член.

2. Нелинейность кубического члена ряда (5) по отношению к его линейному члену приводит к необходимости использования следующего ограничивающего условия: абсолютная величина накопленной за время $T_{\text{ФСА}}/2$ ошибки по доплеровской частоте Δf , вызванной неучетом кубического члена ряда (5), должна соответствовать *половине* ширины полосы пропускания доплеровского фильтра.

Математическая формализация данного условия, с учетом используемых приближений бокового обзора $\sin^2 \beta_0 \approx 1$, $\cos^2 \beta_0 \approx 0$, характеризуется равенством

$$\frac{\Delta f}{2} = \frac{1}{2T_{\text{ФСА}}} = \frac{2}{\lambda} \Delta V = \frac{V_n^4}{\lambda D_0^3} \left(\frac{T_{\text{ФСА}}}{2} \right)^3. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что искомая величина максимально возможного времени фокусированного синтезирования апертуры при боковом обзоре будет определяться выражением

$$T_{\text{ФСА}}^{\text{БО}} = \frac{\sqrt{2}}{V_{\text{н}}} \sqrt{\lambda D_0^3}. \quad (9)$$

Отметим отличие формул (7) и (9) от выражения для максимального времени синтезирования в режиме обзора в точку, приведенного в [5]. Данное отличие связано с имеющимся недоразумением относительно потенциальной линейной разрешающей способности в азимутальной плоскости, о чем будет сказано далее.

Оставшимся нерассмотренным вариантом обзора земной поверхности является нефокусированное синтезирование антенной апертуры, называемое также *доплеровским обужением луча*. Данный вариант характеризуется учетом при обработке только постоянного члена ряда Тейлора, определяющего обусловленное текущим азимутальным положением наблюдаемого объекта фиксированное доплеровское смещение частоты отраженного сигнала. Максимальную величину ошибки по скорости (частоте) здесь определяет линейный член ряда (5). Ограничивающее условие в данном случае формулируется следующим образом: абсолютная величина накопленной за время $T_{\text{ДОЛ}}$ ошибки по доплеровской частоте Δf , вызванной неучетом линейного члена ряда (5), должна быть равна ширине полосы пропускания доплеровского фильтра, обратно пропорциональной времени наблюдения.

Математическая формализация данного условия характеризуется равенством

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{ДОЛ}}} = \frac{2}{\lambda} \Delta V = \frac{2V_{\text{н}}^2}{\lambda D_0} \sin^2 \beta_0 T_{\text{ДОЛ}}. \quad (10)$$

Выразив искомую величину максимально возможного времени наблюдения при реализации режима доплеровского обужения луча, получим:

$$T_{\text{ДОЛ}} = \frac{1}{V_{\text{н}} \sin \beta_0} \sqrt{\frac{\lambda D_0}{2}}. \quad (11)$$

Комментарий. Заметим, что для всех трех вариантов обзора (см. выражения (7), (9) и (11)) максимальное время наблюдения обратно пропорционально скорости носителя РСА. При этом произведение максимального времени синтезирования и скорости носителя, характеризующее линейный размер синтезируемой апертуры ($L_{\text{с}} = V_{\text{н}} T_{\text{с}}$), является величиной постоянной. Это говорит о том, что потенциальное время синтезирования ограничено только *геометрией* взаимного расположения и кинематикой относительного перемещения РСА и объекта наблюдения и не зависит от физических размеров реальной антенны РСА(!). С учетом информации, представленной в авторитетных источниках [2, 5, 6], данный вывод отнюдь не тривиален.

Иллюстрация зависимости величины максимально допустимого времени картографирования от угла и дальности наблюдения для переднебокового обзора представлена на рисунке 2.

Из представленных графиков следует существенное (приблизительно на десятичный порядок) увеличение максимально допустимого времени наблюдения при переходе от режима ДОЛ к режиму фокусированного синтезирования. Зависимость данной величины от угла наблюдения выражена гораздо менее ярко.

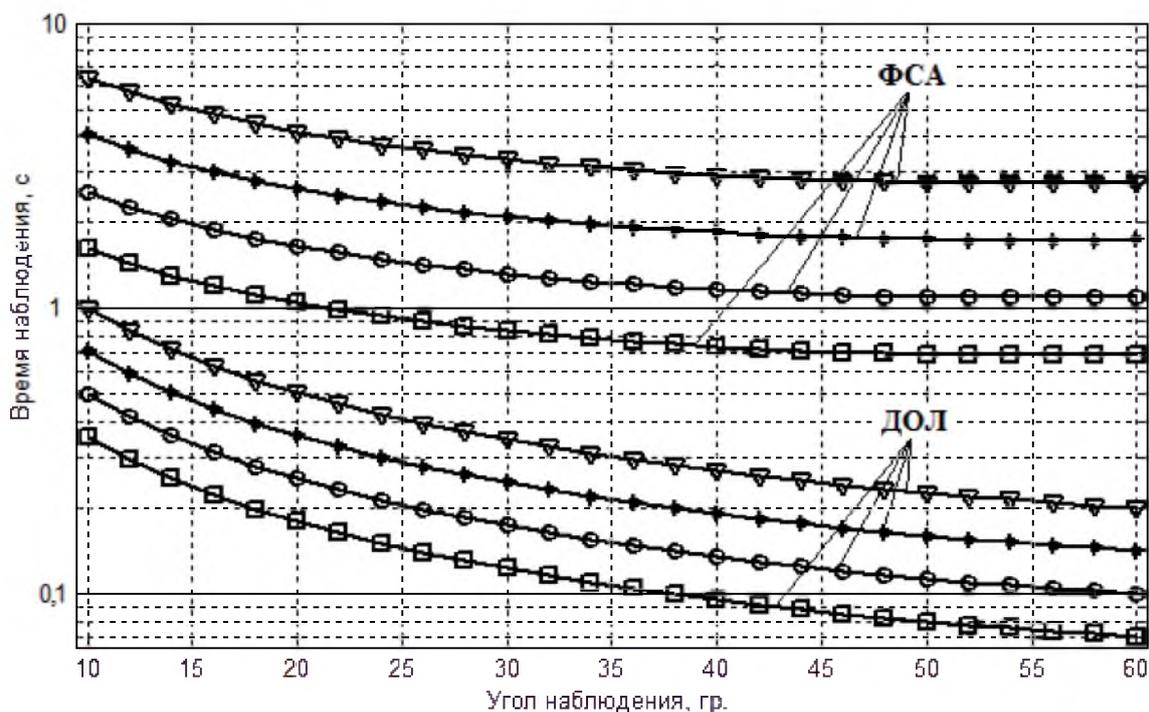


Рисунок 2. – Зависимость максимально возможного времени картографирования от угла наблюдения при переднебоковом обзоре для режимов ДОЛ и ФСА при условиях:

$\lambda = 3$ см; $V_n = 200$ м/с; $D_0 = 10$ км (помечено квадратами); $D_0 = 20$ км (помечено кругами); $D_0 = 40$ км (помечено звездочками); $D_0 = 80$ км (помечено треугольниками)

Характеристика потенциального времени наблюдения в зависимости от дальности участка картографирования при использовании режима бокового обзора ($\beta_0 \approx 90^\circ$) с фокусированием антенной апертуры представлена в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость максимально возможного времени картографирования от дальности объекта наблюдения в режиме бокового обзора

Дальность объекта наблюдения, км	10	20	40	80
Максимально возможное время наблюдения, с	2,9	4,9	8,3	14

Из таблицы следует, что в режиме бокового обзора потенциальная величина времени наблюдения существенно увеличивается (по сравнению с режимом переднебокового обзора).

Представленный выше расчет потенциального времени наблюдения позволяет охарактеризовать потенциальную линейную разрешающую способность в азимутальной плоскости для всех перечисленных выше режимов картографирования. Общий подход к оценке потенциальной разрешающей способности в режиме фокусированного и нефокусированного синтезирования апертуры при боковом и переднебоковом обзоре основан на оценке ширины спектра траекторного сигнала, ограниченной максимально допустимой величиной времени синтезирования.

В режиме ФСА траекторный сигнал характеризуется квадратичной функцией изменения дальности (третий член ряда Тейлора в выражении (4)). Соответствующая ему функция изменения полной фазы принимаемого сигнала будет иметь вид

$$\varphi t = \frac{4\pi\Delta D t}{\lambda} = \frac{2\pi V_n^2 \sin^2 \beta_0 t^2}{\lambda D_0} \quad (12)$$

Мгновенная частота как производная от фазы сигнала описывается выражением

$$\omega t = \varphi' t = \frac{4\pi V_n^2 \sin^2 \beta_0 t}{\lambda D_0} = 2\pi f' t \quad (13)$$

Множитель, стоящий при переменной времени, физически характеризует крутизну ЛЧМ траекторного сигнала:

$$k_f = \frac{f \cdot t}{t} = \frac{2V_n^2 \sin^2 \beta_0}{\lambda D_0}. \quad (14)$$

Из физических соображений следует, что расчет линейной разрешающей способности по азимуту как функции ширины спектра траекторного сигнала, в отличие от «стандартного» случая расчета разрешающей способности РЛС по дальности ($\Delta D = \frac{c}{2\Delta f}$), должен учитывать не скорость света c , а пространственную частоту траекторного сигнала, определяемую скоростью носителя V_n и углом обзора β_0 . С учетом формулы (14) определяемое шириной спектра траекторного сигнала $\Delta f = k_f t_c$ общее выражение для линейной разрешающей способности РСА в азимутальной плоскости за время наблюдения t_c будет иметь вид

$$\Delta L_{\text{ФСА}} = \frac{V_n \sin \beta_0}{k_f t_c} = \frac{\lambda D_0}{2V_n t_c \sin \beta_0} = \frac{\lambda D_0}{2L_c \sin \beta_0}, \quad (15)$$

где $L_c = V_n t_c$ – протяженность траектории полета носителя за время синтезирования.

Отметим, что данное выражение полностью соответствует известному соотношению между размером реальной апертуры антенны и линейной разрешающей способностью в азимутальной плоскости при боковом обзоре [2, 5]: $\Delta L_{\text{ФСА}} = L_A/2$. Действительно, подставив вместо L_c значение $D_0 \beta_{05}$, характеризующее полное «прохождение» наблюдаемого объекта главным лепестком реальной ДНА за время синтезирования, а также с учетом зависимости ширины главного лепестка от размера апертуры и длины волны $\beta_{05} = \lambda/L_A$, при $\beta_0 = 90^\circ$ получим:

$$\Delta L = \frac{\lambda D_0}{2D_0 \beta_{05}} = \frac{\lambda}{2\beta_{05}} = \frac{L_A}{2}, \quad (16)$$

что подтверждает правильность используемого подхода. Однако данная величина не является потенциально достижимой: она может быть улучшена до значения, соответствующего формуле (15), но для этого придется в процессе синтезирования доворачивать антенну в направлении картографируемого участка, реализуя режим обзора «в точку». Только в этом случае носитель РСА пролетит всю дистанцию, для которой нелинейный набег частоты траекторного сигнала не приводит к выходу сигнала за пределы текущего доплеровского фильтра (см. комментарий после формулы (11)). Как следует из (15), величина данной дистанции определяется только длиной волны, дальностью картографируемого участка и углом наблюдения и не зависит от физических размеров апертуры антенны!

Подставив в выражение (15) значения максимально допустимого времени наблюдения (см. формулы (7), (9)), получим соотношения, характеризующие *потенциально достижимую* линейную разрешающую способность РСА в азимутальной плоскости для режимов переднебокового и бокового обзора:

$$\Delta L_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}} = \frac{V_n \sin \beta_0}{k_f T_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\lambda^2 D_0}{\text{tg} \beta_0}}; \quad \Delta L_{\text{ФСА}}^{\text{БО}} = \frac{V_n}{k_f T_{\text{ФСА}}^{\text{БО}}} = \frac{\sqrt[4]{\lambda^3 D_0}}{2\sqrt{2}}. \quad (17)$$

Из данных выражений следует, что потенциальная линейная разрешающая способность РСА при фокусированном синтезировании апертуры определяется исключительно длиной волны, дальностью картографируемого участка и углом наблюдения (для режима переднебокового обзора).

Обсуждая азимутальную разрешающую способность для режима ДОЛ, используем аналогичный подход. Здесь траекторный сигнал наблюдаемого точечного объекта является

простым прямоугольным радиоимпульсом, ширина спектра которого обратно пропорциональна его длительности. С учетом выражения (11), а также упомянутых выше особенностей пересчета ширины спектра траекторного сигнала в линейную разрешающую способность

$$\Delta L_{\text{дол}} = V_n \sin \beta_0 T_{\text{дол}} = \sqrt{\frac{\lambda D_0}{2}}. \quad (18)$$

Как и в предыдущем случае, здесь линейная разрешающая способность по азимуту определяется дальностью картографируемого участка и длиной волны. Однако имеется и парадоксальный результат: в режиме ДОЛ данная величина не зависит от угла наблюдения! Понятно, что при малых углах наблюдения требуемое время картографирования увеличивается (см. рисунок 2), но при этом потенциальная РС остается постоянной.

На рисунке 3 изображены графики зависимости потенциальной линейной РС в азимутальной плоскости от угла наблюдения и дальности для режима переднебокового обзора.

Из графиков следует, что во всем диапазоне дальностей и углов наблюдения в режиме ФСА может быть достигнута линейная разрешающая способность в азимутальной плоскости в 1...5 м.

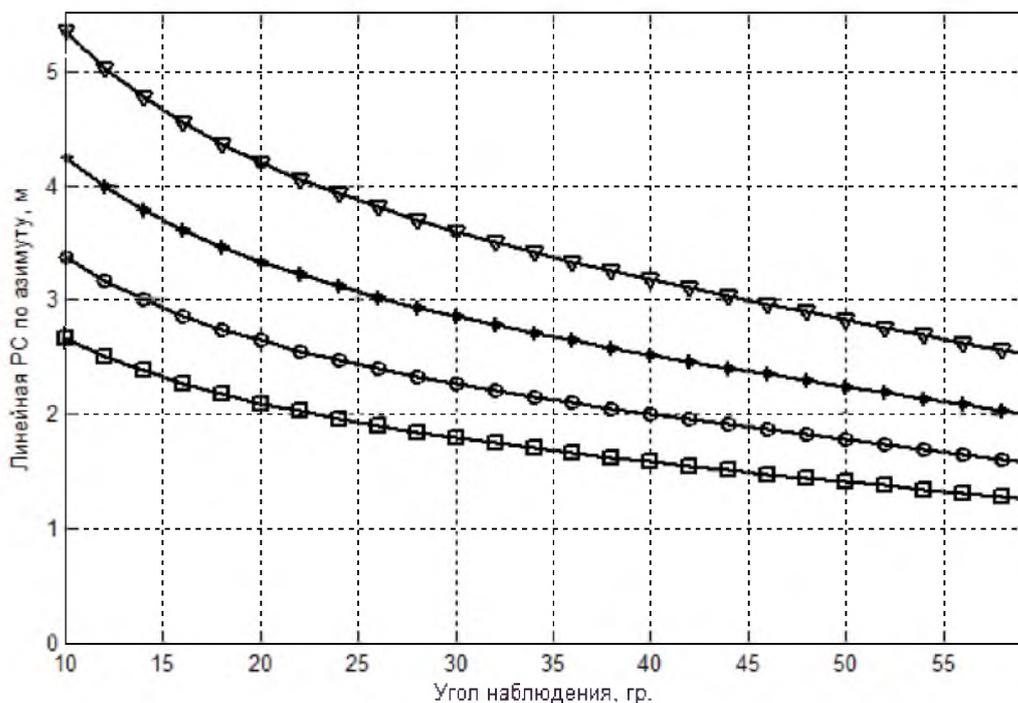


Рисунок 3. – Зависимость потенциально достижимой линейной разрешающей способности РСА по азимуту от угла наблюдения в режиме переднебокового обзора при условиях:

$\lambda = 3$ см; $D_0 = 10$ км (помечено квадратами); $D_0 = 20$ км (помечено кругами); $D_0 = 40$ км (помечено звездочками); $D_0 = 80$ км (помечено треугольниками)

Результаты анализа данной величины для режимов ДОЛ и ФСА при боковом обзоре сведены в таблицу 2.

Как видно из таблицы, для 3-см диапазона длин волн наилучшая (десятки сантиметров) потенциальная линейная разрешающая способность картографирующей РЛС достигается в режиме ФСА при боковом обзоре, наихудшая (десятки метров) – в режиме ДОЛ. Как было показано ранее (см. графики на рисунке 2), промежуточное положение занимает режим ФСА при переднебоковом обзоре, для данного режима потенциальная линейная РС составляет единицы метров.

Таблица 2. – Зависимость потенциально достижимой линейной РС в азимутальной плоскости от дальности объекта наблюдения в режимах ДОЛ (ПБО) и ФСА (БО)

Дальность объекта наблюдения, км		10	20	40	80
Потенциальная линейная РС по азимуту, м	в режиме ДОЛ	12	17	24	35
	в режиме ФСА (БО)	0,25	0,30	0,36	0,43

С учетом полученных результатов, а также рационального условия приближительного равенства разрешающей способности формируемого радиолокационного изображения по двум координатам ($\Delta L \approx \Delta D$) можно обосновать количественные значения максимальной ширины спектра зондирующих импульсов РЛС картографирования для различных режимов:

при переднебоковом обзоре с фокусированным синтезированием апертуры антенны

$$\Delta f_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}} = \frac{c}{2\Delta L_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}}} = c^3 \sqrt{\frac{\text{tg}\beta_0}{3\lambda^2 D_0}}; \quad (19)$$

при боковом обзоре с фокусированным синтезированием апертуры антенны:

$$\Delta f_{\text{ФСА}}^{\text{БО}} = \frac{c}{2\Delta L_{\text{ФСА}}^{\text{БО}}} = c^4 \sqrt{\frac{4}{\lambda^3 D_0}}; \quad (20)$$

при использовании режима доплеровского облучения луча:

$$\Delta f_{\text{ДОЛ}} = \frac{c}{2\Delta L_{\text{ДОЛ}}} = \frac{c}{\sqrt{2\lambda D_0}}. \quad (21)$$

Абсолютные значения максимальной ширины спектра зондирующего сигнала для данных режимов сведены в таблицу 3. Как видно из таблицы, режимы картографирования БРЛС УС характеризуются различной максимальной шириной спектра ЗС. Полученная зависимость позволяет оценить, какая часть АШП попадет в приемник БРЛС УС.

Таблица 3. – Зависимость максимальной ширины спектра зондирующего сигнала от дальности объекта наблюдения в режимах ДОЛ и ФСА для 3-см диапазона длин волн

Дальность объекта наблюдения, км		10	20	40	80
Максимальная ширина спектра зондирующего сигнала, МГц	в режиме ДОЛ	12	8,7	6,1	4,3
	в режиме ФСА (ПБО) для $\beta = 10^\circ \dots 60^\circ$	56...120	45...95	35...76	28...60
	в режиме ФСА (БО)	590	490	420	350

Наконец, используя полученные результаты для потенциально достижимых значений длительности интервала синтезирования и ширины спектра зондирующего сигнала (см. выражения (7), (9), (11), (19...21)), на основе формулы (1) получаем аналитические выражения для отношения сигнал-шум на выходе устройства обработки РЛС обзора земной поверхности:

для режима доплеровского облучения луча:

$$q_{\text{ДОЛ}}^2 = q_{in}^2 \frac{T_{\text{ДОЛ}} \Delta f_{\text{ДОЛ}}}{Q} = q_{in}^2 \frac{c}{2QV_n \sin \beta_0}; \quad (22)$$

для режима фокусированного синтезирования при переднебоковом обзоре:

$$q_{\text{ФСАПБО}}^2 = q_{in}^2 \frac{T_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}} \Delta f_{\text{ФСА}}^{\text{ПБО}}}{Q} = q_{in}^2 \frac{c}{QV_n} \sqrt{\frac{D_0}{9\lambda \sin \beta_0 \cos^2 \beta_0}}; \quad (23)$$

для режима фокусированного синтезирования при боковом обзоре:

$$q_{\text{ФСАБО}}^2 = q_{in}^2 \frac{T_{\text{ФСА}}^{\text{БО}} \Delta f_{\text{ФСА}}^{\text{БО}}}{Q} = q_{in}^2 \frac{2c}{QV_n} \sqrt{\frac{D_0}{\lambda}}. \quad (24)$$

Общей особенностью полученных выражений является обратная зависимость выходного отношения сигнал-шум от скорости носителя. Это понятно: чем меньше скорость, тем больше время синтезирования, что улучшает энергетические отношения.

Интересен полученный результат для режима фокусированного синтезирования при переднебоковом обзоре: отношение сигнал-шум имеет экстремальную зависимость от угла наблюдения. Для нахождения оптимального угла β_0 необходимо продифференцировать выражение (23) по данному аргументу и приравнять результат к нулю:

$$\frac{dq_{\text{ФСАПБО}}^2}{d\beta_0} = k \sin \beta_0 \cos^2 \beta_0^{-\frac{1}{3}} = -\frac{1}{3} k \sin \beta_0 \cos^2 \beta_0^{-\frac{4}{3}} [\cos^3 \beta_0 - 2 \sin^2 \beta_0 \cos \beta_0] = 0, \quad (25)$$

где $k = \frac{q_{in}^2 c}{QV_H} \sqrt[3]{\frac{D_0}{9}}$ – не зависящий от β_0 коэффициент.

Так как «крайние» ситуации ($\beta_0 = 0^\circ; 90^\circ$) нас не интересуют, рассмотрим условие равенства нулю множителя в квадратных скобках. Имеем:

$$\beta_0^{\text{opt}} = \arctan \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 35,3^\circ. \quad (26)$$

Проиллюстрируем полученные результаты на примере решения задачи прикрытия танка Т-90 (вариант модернизации танка Т-72) с эффективной площадью отражения в 3-см диапазоне длин волн $\sigma = 20 \text{ м}^2 \rightarrow 13 \text{ дБм}^2$ [7]. Энергопотенциал станции активных помех примем соответствующим отечественному «мастодонту» – станции типа СПН-30: $P_j G_j = 68 \text{ дБ Вт}$, однако, в отличие от данной станции, обеспечим высокоточную спектральную прицельность создаваемых активных шумовых помех.

Рассмотрим 2 варианта режима прикрытия: индивидуальное (работа по станции помех по ГЛ ДНА РСА) и групповое (работа через ближний БЛ ДНА, то есть с ослаблением помехи на величину $\xi_j = 25 \text{ дБ}$ [8]). В качестве объекта подавления рассмотрим бортовую РЛС AN/APG-68(V9) многофункционального истребителя F-16C в режиме переднебокового обзора и аналогичную по энергопотенциалу РЛС в режиме бокового обзора. Угол наблюдения при переднебоковом обзоре примем равным оптимальному (см. выражение (26)).

Результаты расчета выходного отношения сигнал-шум для различных дальностей радиолокационного наблюдения и режимов картографирования приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Зависимость отношения сигнал-шум от дальности и режима картографирования при боковом и переднебоковом обзоре

Режим прикрытия/картографирования		Выходное отношение сигнал-шум для различных дальностей объекта наблюдения			
		10 км	20 км	40 км	80 км
Индивидуальное	ДОЛ	-15 дБ	-21 дБ	-27 дБ	-33 дБ
	ФСА ПБО	2 дБ	-3 дБ	-8 дБ	-13 дБ
	ФСА БО	16 дБ	12 дБ	7 дБ	3 дБ
Групповое	ДОЛ	10 дБ	4 дБ	-2 дБ	-8 дБ
	ФСА ПБО	27 дБ	22 дБ	17 дБ	12 дБ
	ФСА БО	41 дБ	37 дБ	32 дБ	28 дБ

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. В режиме группового прикрытия даже такая высокопотенциальная САП, как СПН-30, является неэффективной во всех режимах картографирования. Это говорит о крайне низком спектральном КПД прицельных активных шумовых помех как средства прикрытия наземных объектов. Только в режиме ДОЛ при наблюдении объектов на больших дальностях (>40 км) выходное отношение сигнал-шум меньше 0 дБ.

2. Даже при воздействии помех по ГЛ ДНА в режиме фокусируемого синтезирования при боковом обзоре прикрытие неэффективно во всем рассматриваемом диапазоне дальностей. При использовании переднебокового обзора (ДОЛ, ФСА) выходное отношение сигнал-шум всегда меньше 0 дБ, однако при этом говорить о возможности использования станций типа СПН-30 для прикрытия мобильных наземных объектов ВВТ все равно не приходится: данная станция не может использоваться в движении.

Таким образом, охарактеризованы параметры радиолокационных станций обзора земной поверхности как объектов радиоэлектронного подавления. Получены аналитические выражения, определяющие потенциально достижимые характеристики данных систем, а также их помехозащищенность при работе в различных режимах. Все вышеперечисленное характеризует низкую эффективность, а следовательно, нецелесообразность использования станций активных шумовых помех в целях прикрытия объектов ВВТ от средств радиолокационной разведки воздушного базирования.

В заключение отметим, что, по нашему мнению, единственный рациональный путь преодоления данных проблем – внедрение принципиально нового подхода к решению поставленной задачи. Данный подход основан на переходе на использование имитирующих помех, структура которых «согласована» со структурой полезных сигналов. Обоснование способов формирования таких помех и управления их параметрами в целях имитации на подавляемой стороне произвольно заданной двумерной целевой обстановки является актуальным направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. Лапука, О. Г. Энергетические соотношения при согласованной фильтрации дискретного конечномерного сигнала в цифровом приемнике / О. Г. Лапука // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 24. – С. 83–90.
2. Кондратенков, Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов; под ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей: учеб. пособие для вузов / В. Н. Антипов [и др.]; под ред. В. Н. Лепина. – М.: Радиотехника, 2014. – 296 с.
4. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2006. – Т. 1: РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. – 656 с.
5. Справочник по радиолокации: в 2 кн. / под ред. М. И. Сколника; пер с англ.; под общ. ред. В. С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – Кн. 2. – 680 с.
6. Верба, В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
7. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: моногр. / О. И. Сухаревский [и др.]; под ред. О. И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.: ил.
8. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский [и др.]; под ред. Д. И. Воскресенского. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.: ил.
9. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов [и др.]; под ред. В. Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.: ил.

*Сведения об авторах:

Лапука Олег Георгиевич,
Рахоцкий Дмитрий Александрович,
Ростов Алексей Анатольевич,
УО «Военная академия Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 22.03.2016 г.

РАЗРАБОТКА, МОДЕРНИЗАЦИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.396.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОТБРАКОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

А. В. Ларкин; А. В. Комяк, кандидат технических наук, доцент;
К. И. Пинчук; А. Н. Мацкевич, кандидат технических наук, доцент*

В статье рассматриваются проблемы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры, проводится анализ причин возникновения отказов в аппаратуре и предлагаются рекомендации по повышению эффективности отбраковочных испытаний при температурных воздействиях для обеспечения требуемой надежности радиоэлектронной аппаратуры.

The article discusses the problems of ensuring the reliability of radio-electronic equipment, the analysis of causes of failures in the equipment and provides recommendations for improving the effectiveness of screening test at temperature influences to provide the required reliability of radio-electronic equipment.

В настоящее время эффективность систем вооружения в значительной степени зависит от применяемых в них радиоэлектронных средств (РЭС), их тактико-технических характеристик и надежности. Надежность РЭС зависит как от принятых схемотехнических и конструкторских решений, так и от безотказности используемой элементной базы.

Задача обеспечения безотказности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) как одного из основных свойств надежности решается на всех стадиях жизненного цикла аппаратуры.

Большое влияние на безотказность РЭС оказывают условия эксплуатации, и в первую очередь тепловые и механические воздействия. Статистика показывает, что до 50 % отказов связано именно с внешними воздействиями на аппаратуру, недостаточным их учетом при проектировании устройства, экономией средств при испытаниях и т. д. [1].

Повышение технического уровня, качества, безотказности и, как следствие, конкурентоспособности продукции, выпускаемой отечественной промышленностью (в том числе специального назначения), невозможно без перестройки производства и прежде всего без пересмотра традиционных взглядов на технологические способы обеспечения качества продукции вообще и на испытательную деятельность в частности.

Развитие микроэлектроники сопровождается постоянным ростом степени интеграции и функциональной плотности интегральных схем (ИС), что в свою очередь, если не улучшаются конструктивно-технологические основы, приводит к росту числа отказов элементной базы РЭА и, как следствие, снижению надежности аппаратуры. Поэтому проблема обеспечения требуемых показателей безотказности и стойкости РЭА к воздействию внешних факторов (ВФ) в настоящее время обостряется в связи с резким снижением качества комплектующих изделий, что выдвигает на первый план задачу совершенствования входного контроля изделий и методов проведения технологических испытаний РЭА на этапах разработки и производства.

Отечественный и международный опыт свидетельствуют, что основная доля потенциально «слабых» мест в аппаратуре, которые могут привести к отказам в эксплуатации, формируется на ранних стадиях разработки, планирования и освоения производства. Поэтому особое место в достижении безотказности РЭА при воздействии внешних факторов должно отводиться исследовательским и отбраковочным испытаниям,

проводимым на этапах разработки и производства и позволяющим выявить потенциальные дефекты в аппаратуре [2, 3].

В процессе производства РЭА подвергается различным видам испытаний при воздействии ВФ. Эти испытания являются одной из наиболее трудоемких и дорогостоящих процедур программы обеспечения качества и надежности.

Однако, несмотря на проведение большого объема испытаний, возникает значительное количество отказов РЭС в процессе их эксплуатации. Анализ отказов РЭА, производимой в настоящее время на предприятиях Республики Беларусь, позволил выявить 4 основные причины возникновения отказов:

- производственные дефекты;
- выход из строя покупных комплектующих изделий (ПКИ);
- схемно-конструктивные (программные) дефекты;
- нарушение правил эксплуатации.

Распределение отказов РЭА, выявленных на предприятиях Республики Беларусь и возникших при производстве и эксплуатации за период с 2013 по 2015 год приведено в таблице 1.

Таблица 1

Виды отказов	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Производственные	40,9 %	49,0 %	40,5 %
Отказы ПКИ	33,3 %	30,2 %	42,8 %
Схемно-конструктивные (программные)	7,6 %	11,3 %	2,4 %
Эксплуатационные	16,7 %	9,4 %	14,3 %

Из полученных данных можно сделать вывод, что производственные отказы и отказы ПКИ остаются практически неизменными с течением времени и составляют порядка 80 % от общего числа отказов. Сокращение времени и затрат на проведение отбраковочных испытаний при неизменном требовании поддержания на высоком уровне безотказности аппаратуры обуславливает необходимость совершенствования системы обеспечения надежности и стойкости РЭА различного назначения к воздействию внешних факторов путем повышения эффективности проведения отбраковочных испытаний. Изучение методик проведения технологических испытаний, применяемых на промышленных предприятиях, показало, что они не всегда являются оптимальными с точки зрения материальных и временных затрат.

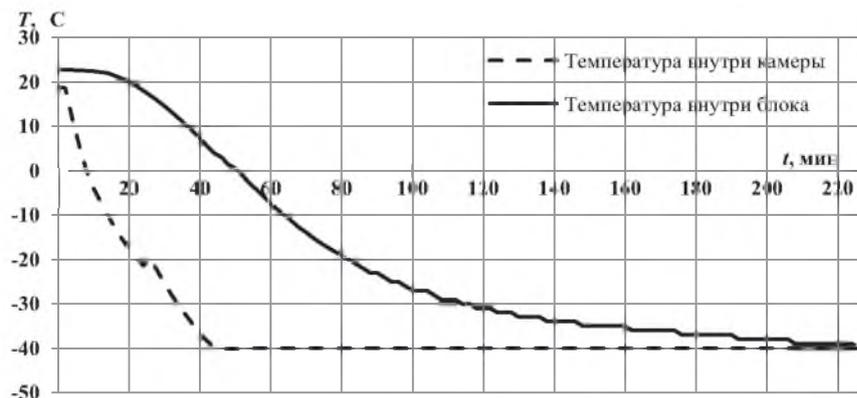
Примером возможного повышения эффективности отбраковочных испытаний РЭС на этапе производства при температурных воздействиях стал эксперимент, проведенный на одном из промышленных предприятий Республики Беларусь.

Целью данного эксперимента был контроль изменения температуры внутри объема герметизированного блока при проведении климатических испытаний на воздействие пониженной температуры, сопоставление полученных данных с изменением температуры внутри климатической камеры, анализ полученных результатов и выработка предложений по повышению эффективности проведения данного вида отбраковочных испытаний. Согласно принятой в соответствии с ГОСТ [4] программой проведения технологических испытаний исследуемого блока, он подвергается воздействию синусоидальной вибрации, термоциклированию, воздействию пониженной и повышенной температур.

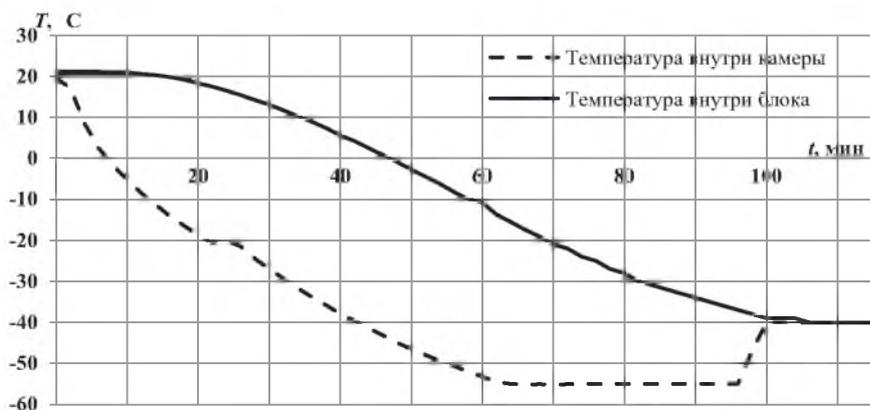
При проведении испытания на воздействие пониженной температуры изделие согласно программе выдерживается три часа в климатической камере при температуре -40°C для гарантированного обеспечения этой температуры внутри всего его объема, после чего изделие включается и должно бесперебойно проработать в течение еще одного часа. Результаты контроля изменения температуры внутри блока и внутри камеры представлены на рисунке 1, а. Температура внутри герметизированного блока достигает необходимого значения только к завершению третьего часа испытаний (отсчет начала проведения

испытания начинается с момента достижения температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ внутри объема климатической камеры).

Для сокращения этого времени и тем самым оптимизации принятой программы испытаний изделия были предложены следующие рекомендации. Температура внутри климатической камеры устанавливается ниже требуемой программой ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ в данном случае), затем контролируется температура внутри объема изделия. При ее достижении $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура внутри камеры устанавливается равной указанной в программе ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), изделие включается и выдерживается в течение еще одного часа. Результаты контроля изменения температуры внутри блока и внутри камеры представлены на рисунке 1, б. Температура внутри герметизированного изделия достигает необходимого значения спустя один час после начала проведения испытания.



а



б

а – при проведении испытания по принятой программе;
б – при проведении испытаний с учетом предложенных рекомендаций

Рисунок 1. – Контроль изменения температуры внутри климатической камеры и внутри объема изделия

Максимальная мощность, потребляемая используемой для проведения испытаний климатической камерой $P_{\max} = 10$ кВт/ч.

Рассчитанная потребленная мощность при проведении испытаний в первом случае $P_1 = 31,5$ кВт, затраченное время $t_1 = 4,75$ ч, во втором случае с учетом увеличенных энергетических затрат для достижения более низкой температуры $P_2 = 21,2$ кВт, $t_2 = 2,65$ ч. При полной загрузке на предприятии производится 4 подобных испытания в день. Учитывая это, получим экономию энергии $\Delta P = 10,3$ кВт и времени $\Delta t = 2,1$ ч за одно испытание. При этом экономия энергии за месяц составит $\Delta P_{\text{мес}} = 906,4$ кВт, времени $\Delta t_{\text{мес}} = 184,8$ ч.

Относительная экономия энергии ΔP^* и времени Δt^* :

$$\Delta P^* \approx 33 \%,$$

$$\Delta t^* \approx 44 \%.$$

Таким образом, проведение испытаний указанного изделия на воздействие пониженной температуры с учетом предложенных рекомендаций позволяет на 33 % сократить энергетические и на 44 % временные затраты.

Далее, для обобщения полученных результатов и получения математической зависимости изменения температуры внутри объема герметизированного блока при различных температурах, задаваемых внутри климатической камеры, была проведена еще серия подобных экспериментов и выполнена аппроксимация полученных результатов (рисунок 2) при помощи программного комплекса OriginPro8 [5].

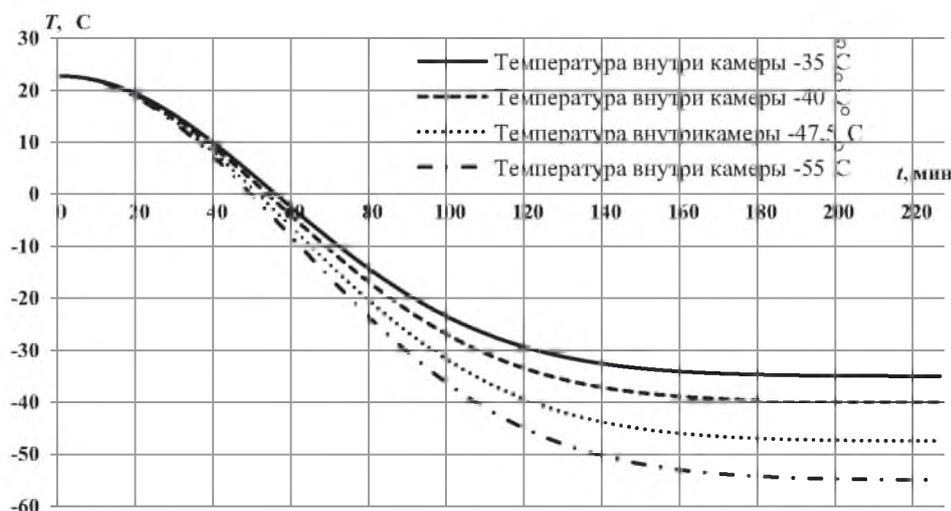


Рисунок 2. – Аппроксимированная зависимость температуры внутри блока от времени при разных температурах внутри камеры

Зависимость температуры внутри герметизированного блока $T_{\text{бл}}$ от времени t при заданных температуре внутри климатической камеры $T_{\text{к}}$ и начальной температуре внутри объема блока $T_{\text{бл}0}$ (возможно принять равной температуре окружающей среды) имеет следующий вид:

$$T_{\text{бл}} = T_{\text{к}} + (T_{\text{бл}0} - T_{\text{к}}) \cdot e^{-\frac{t^2}{K_t}} \quad (1)$$

где K_t – временной коэффициент.

Ошибка аппроксимации результатов экспериментов зависимостью (1) составляет не более $\varepsilon = 0,7 \%$.

Выразив из выражения (1) время t , получим:

$$t = K_t \cdot \sqrt{2 \ln \frac{T_{\text{бл}0} - T_{\text{к}}}{T_{\text{бл}} - T_{\text{к}}}} \quad (2)$$

Значения коэффициента K_t получены экспериментально и зависят от температуры, задаваемой внутри климатической камеры (рисунок 3).

Таким образом, оценив возможность имеющегося испытательного оборудования и задав температуру внутри климатической камеры, можно с помощью выражения (2) определить время, которое необходимо для гарантированного достижения требуемой программой испытаний температуры внутри любого герметизированного блока со схожими массогабаритными и конструктивными характеристиками, и затем выработать рекомендации

по повышению эффективности проведения данного вида отбраковочных испытаний, а также оценить сокращение энергетических и временных затрат.

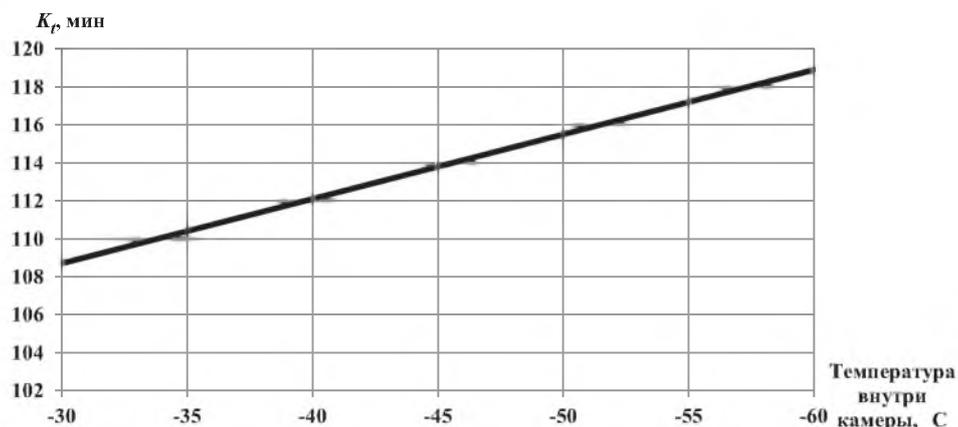


Рисунок 3. – Зависимость коэффициента K_t от температуры, задаваемой внутри климатической камеры

Учитывая значительную эффективность отбраковочных испытаний [6, 7], с точки зрения создания бездефектных РЭС, использование предложенных выше рекомендаций по повышению эффективности отбраковочных испытаний на этапах разработки и производства позволит сократить затраты на их проведение либо увеличить количество испытуемых изделий при неизменных затратах.

Список литературы

1. Токарев, М. Ф. Механические воздействия и защита РЭА / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов. – М., 1993. – 256 с.
2. Доминич, А. П. Состояние и пути совершенствования методологии испытаний РЭС ВВТ на стойкость к воздействию ВФ / А. П. Доминич, В. Н. Писарев // Радиопромышленность. – 1997. – Вып. 1. – С. 22–27.
3. Писарев, В. П. Совершенствование системы испытаний РЭА на надежность и стойкость к воздействию внешних факторов / В. П. Писарев // Радиопромышленность. – 1994. – Вып. 4. – С. 75–82.
4. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования, методы контроля и испытаний. Методы испытаний на соответствие требований по устойчивости к климатическим воздействиям: – ГОСТ В 20.57.306-76. – Введ. 01.01.78. – М.: Гос. ком. стандартов Сов. Министров СССР, 1978. – 47 с.
5. Исакова, О. П. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin: учеб. пособие / О. П. Исакова, Ю. Ю. Тарасевич. – Астрахань, 2007.
6. Fiorentino, E. Planning of production: Reliability Stress-Screening Programs / E. Fiorentino, A. E. Saari // IEEE. – 1999. – № 32. – Р. 247–252.
7. Ларкин, А. В. Планирование отбраковочных испытаний РЭС на этапе производства / А. В. Ларкин, А. В. Комяк, А. Н. Мацкевич // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 2. – С. 123–128.

*Сведения об авторах:

Ларкин Антон Владимирович,
 Комяк Александр Васильевич,
 Пинчук Кирилл Игоревич,
 Мацкевич Артур Николаевич,
 УО «Военная академия Республики Беларусь».
 Статья поступила в редакцию 05.04.2016 г.

ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОЙ ПЕДАГОГИКИ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ

УДК 355. 23

ОБОБЩЕННАЯ УЧЕБНАЯ ЗАДАЧА КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ ОФИЦЕРОВ

А. В. Коклевский, кандидат педагогических наук*

В статье представлена обобщенная учебная задача, выступающая эффективным дидактическим средством формирования и диагностики социально-профессиональной компетентности будущих офицеров. Раскрыты сущность, содержание, порядок конструирования и образовательный потенциал обобщенной учебной задачи.

The article presents a generalized learning task, act as an effective means of formation and didactic diagnosis of social and professional competence of future officers. The essence, content, design and order of the educational potential of a generalized learning task.

В настоящее время конечным результатом подготовки специалистов в учреждениях высшего образования становится сформированная у них социально-профессиональная компетентность (А. И. Жук, О. Л. Жук, А. Л. Андреев, А. А. Вербицкий, А. В. Макаров, Э. Ф. Зеер, Р. Бояцис и др.). Под *социально-профессиональной компетентностью* будущих военных специалистов (С-ПК) понимается сложное личностное качество курсантов-выпускников, обеспечивающее эффективное разрешение профессиональных, социальных, личностных проблем в нестабильных условиях (изменения, кризис, множественность выбора).

В этой связи становится актуальным поиск педагогических форм и средств формирования и диагностики С-ПК. В макете образовательного стандарта высшего образования первой ступени (2013 г.) представлен довольно широкий спектр как традиционных, так и инновационных форм и средств формирования и диагностики компетенций [13]. Зарубежными психологами для диагностики уровней сформированности компетенций/компетентности используются следующие методы: выявление уровня компетентности с помощью опросников [16; 18], интервьюирование и тестирование [5; 19], шкалирование и кластерный анализ [18].

Вместе с тем, на взгляд автора статьи, обозначенные формы и средства не в полной мере способствуют формированию и объективной диагностике С-ПК будущих офицеров. Например, рекомендуемый метод Дельфи требует для оценивания компетенций серьезной психолого-педагогической подготовки экспертов и занимает много времени. В связи с вышеизложенным предметом педагогического поиска становится некоторое универсальное и удобное средство формирования и диагностики компетенций, которым может воспользоваться как преподаватель вуза, так и офицер, проходящий службу в войсках (учреждениях министерства обороны). Для этого обратимся к определению сущности С-ПК. Известный отечественный исследователь в области профессионального образования О. Л. Жук полагает, что С-ПК проявляется в способности выпускника выполнять не только типовые задания, но и решать **задачи высокой степени сложности и неопределенности** (выделено нами – А. К.), а также управлять гибкими, краткосрочными, межотраслевыми проектами [7]. Это актуализирует определение средств формирования и диагностики С-ПК в логике задачного подхода (Г. С. Альтшуллер, Г. А. Балл, О. Л. Жук, В. И. Загвязинский, Е. И. Машбиц, Л. М. Фридман и др.). Сущность задачного подхода

заключается в том, что вся учебно-профессиональная деятельность субъектов педагогического процесса (в первую очередь преподавателей и курсантов) проектируется и реализуется в виде иерархической системы процессов решения ряда разнообразных задач.

Цель статьи – рассмотреть обобщенную учебную задачу как средство формирования и диагностики С-ПК будущих офицеров. Определить ее сущность, содержательное наполнение, порядок проектирования и применения в образовательном процессе вуза.

Рассмотрим сущность и содержание обобщенной учебной задачи. Анализ психолого-педагогической литературы по проблеме задачного подхода к образованию позволяет выделить следующие сущностные характеристики учебной задачи:

1) способ разрешения проблем, способствующий развитию у учащихся творческих способностей и изобретательского мышления (Г. С. Альтшуллер) [1];

2) система, обязательными компонентами которой являются: а) предмет задачи, находящийся в исходном состоянии; б) модель требуемого состояния предмета задачи (Г. А. Балл) [2, с. 31];

3) содержательный элемент профессиональной подготовки студента, носящий междисциплинарный характер, имеющий несколько решений и способствующий формированию у обучающихся универсальных умений и способностей (О. Л. Жук) [7];

4) средство для развития эвристического мышления учащихся (Д. Поля) [15];

5) универсальное средство организации учебной деятельности, основание личностно-ориентированной ситуации (В. В. Сериков) [17].

Как видим, исследователи выделяют довольно широкий спектр сущностных характеристик учебной задачи. Наиболее важными из них являются такие характеристики, как «система», «творчество», «междисциплинарность», «эвристическое мышление», «личностная ориентация». Именно эти характеристики соответствуют логике компетентного подхода к образованию, а следовательно, и обеспечению формирования С-ПК. В этой связи обобщенная учебная задача должна проектироваться на основе системного, междисциплинарного и компетентного подходов, принципов личностно-ориентированного и проблемного обучения.

Известный российский исследователь в области личностно-ориентированного образования В. В. Сериков выделяет три группы учебных задач.

1. Предметно-ориентированные задачи, в которых личностный компонент (методология, рефлексия, поиск смысла) представлен в минимальной форме.

2. Практико-ориентированные задачи – содержат простейшую личностную ориентацию.

3. Личностно-ориентированные задачи, в которых наряду с практическим и когнитивным мышлением обучающийся должен проявить собственный личностный потенциал [17, с. 89].

Анализ учебных программ дисциплин, педагогический опыт автора показывает, что в настоящее время в содержание учебных дисциплин включены в большей степени задачи первой и второй групп. Очевидно, что это не в полной мере соответствует требованиям компетентного подхода к образованию.

Из сказанного следует, что для того, чтобы обеспечить эффективное формирование С-ПК, в вузе необходимо больше включать в содержание военной подготовки будущих офицеров обобщенные учебные задачи третьей группы, которые позволят обучающимся реализовать способность воспринимать связь изучаемой науки с нравственно-культурными проблемами бытия человека, осмысливать вопросы методологии и философии познания, видеть роль творческой созидательной деятельности в построении картины мира.

Традиционные формы и средства педагогической диагностики военной подготовки курсантов (устный и письменный опрос, контрольная работа, зачет, экзамен и др.) не позволяют в полной мере оценить уровень развития и сформированности С-ПК, поскольку с их помощью можно выявить и оценить преимущественно лишь декларативные знания и простые умения.

В работах российских и отечественных педагогов-исследователей, посвященных проблеме формирования и диагностики сформированности компетенций/компетентности, данная проблема решается на основе интегративного подхода (И. А. Зимняя), посредством организации творческих работ (А. В. Хуторской), внедрения в образовательный процесс индивидуальных разноуровневых заданий, самооценки компетенций выпускником (В. Т. Федин), решения студентами обобщенных задач (О. Л. Жук, С. Н. Сиренко). О. Л. Жук [7], В. В. Кульбеда [11], А. М. Новиков [12] и другие исследователи при изучении проблемы формирования и диагностики компетентности специалистов для построения дидактического и диагностического инструментария опираются на *задачный* подход.

Так, И. А. Зимняя полагает, что именно в логике задачного подхода осуществляется предварительное моделирование иерархии позиционно-ролевых задач, включающих решение проблем, направленных на реализацию разного рода компетентностей [9].

А. М. Новиков утверждает, что «все нынешние разговоры о компетентностном подходе в образовании так и останутся красивыми разговорами до тех пор, пока вся учебно-программная документация общеобразовательной и профессиональной школы не будет коренным образом перестроена в логике оптимального сочетания учебных задач трех уровней: операционных, тактических, стратегических» [12, с. 110].

Обобщенные (комплексные) задачи не являются чем-то абсолютно новым в профессиональной подготовке военных специалистов. Так, автор статьи еще в 1991 году на выпускном курсе военного училища во время сдачи государственного экзамена «Боевое применение артиллерийских подразделений» решал следующую комплексную учебную задачу: *в должности командира взвода управления артиллерийской батареи подготовить командирскую машину управления к боевой работе, совершить марш в район командно-наблюдательного пункта, организовать ведение разведки, осуществить ведение разведки и представить результаты к установленному сроку.*

Анализ содержания данной задачи позволяет определить ее выраженный междисциплинарный характер. Так, демонстрация умений в уяснении полученной задачи, оценке обстановки, принятии решения, оформлении боевых документов, постановке задач подчиненным присуща дисциплине «Тактическая подготовка». Умения эксплуатации приборов командирской машины управления приобретались в ходе изучения дисциплин «Военная топография и топогеодезическая подготовка», «Эксплуатация ракетно-артиллерийского вооружения». Умения организовать и вести разведку формировались при изучении дисциплины «Артиллерийская разведка». Все указанные умения относятся к *сложным* умениям (А. А. Вербицкий, А. М. Новиков). Важно отметить, что указанные дисциплины изучались курсантами с 1-го по 4-й курсы военного училища. В этой связи решение задачи позволило актуализировать и продемонстрировать автору знания, умения и навыки, приобретенные не только на выпускном курсе, но и на 1–3-м курсах училища. Аналогичные по форме, но различные по содержанию комплексные задачи решались на местности с помощью аутентичных образцов техники, вооружения и приборов всеми курсантами-выпускниками. При этом контент задач охватывал работу всех должностных лиц артиллерийской батареи. Оценивание действий и продуктов учебно-профессиональной деятельности (боевые документы и др.) курсанта-выпускника осуществлялось членами экзаменационной комиссии с помощью метода экспертных оценок последовательно на каждом этапе решения задачи, что позволило более объективно диагностировать профессиональные умения обучающегося.

Таким образом, указанные задачи, разработанные на основе деятельностного и междисциплинарного подходов, контекстного и проблемного обучения позволяют моделировать учебно-профессиональную деятельность будущего военного специалиста. Основной единицей содержания задачи выступает проблемная ситуация (ситуация, вызывающая у обучающегося интеллектуальное затруднение и побуждающая его к поиску новых способов действий). Основной единицей профессиональной деятельности обучающегося выступает поступок или действие (А. А. Вербицкий).

Вместе с тем налицо и сложности в организации экзамена посредством решения комплексных задач: 1) необходимость ресурсного обеспечения (техника и вооружение, моторесурсы, горючее, преподавательский состав и подразделения обеспечения); 2) продолжительность выполнения задачи курсантом составляет в среднем около 2–3 часов.

Учитывая указанные выше позиции исследователей [1; 2; 7; 9; 10; 11; 12], автором разработаны и внедрены в образовательный процесс обобщенные учебные задачи. В ходе их решения у курсантов формируются обобщенные знания и умения.

В настоящей статье *обобщенные знания* трактуются как глубоко усвоенные, устойчивые, систематизированные знания, позволяющие решать множество задач. Обобщенные умения – умения, определяющие поведение или деятельность личности на эвристическом и/или исследовательском уровнях во множестве ситуаций и задач (социальных, учебных, профессиональных) [7].

Обобщенная учебная задача – это проблемная задача, предполагающая неоднозначность путей ее решения, использование междисциплинарных знаний и опыта научно-исследовательской деятельности, а также сформированность С-ПК.

Обобщенные учебные задачи схожи с педагогическими задачами Н. В. Бордовской и А. А. Реана [4], поскольку в процессе их решения требуется комплекс знаний и практических умений; с обобщенными педагогическими задачами О. Л. Жук, С. Н. Сиренко [7], так как они имеют уровневую структуру, предполагают неоднозначность путей их решения и требуют для выполнения обобщенных знаний и умений; с изобретательскими задачами Г. С. Альтшуллера, М. А. Орлова [1; 14], потому что в процессе их выполнения рождаются новые формы и методы поиска результата.

В отличие от указанных выше задач, обобщенные учебные задачи предполагают конструирование обучающимися новой технологии (создание модели организации, технического устройства и др.). Созданные курсантами в процессе решения задач технологии (модели, продукты) впоследствии могут быть перенесены в сферу их будущей профессиональной деятельности.

Проектирование обобщенных учебных задач основывалось на содержании профессиональной подготовки с учетом междисциплинарных связей, при этом учитывались универсальность технологий (социальных, эксплуатационных и др.), а также сложность и неопределенность ситуации в условиях задач профессионального уровня. Такой подход способствует выработке у обучающихся за счет междисциплинарного характера задач системного и аналитического мышления, умения переносить знания и опыт в незнакомую область деятельности. У курсантов развивается способность к самоопределению, рефлексии, сотрудничеству, а также способность эффективно действовать в экстремальных ситуациях.

Процесс решения обобщенных учебных задач имеет черты, схожие с анализом конкретных ситуаций и процессом решения проблемных задач (анализ условия задачи, определение целей и задач предстоящей деятельности, выдвижение гипотез, конструирование деятельности, проверка гипотезы через осуществление деятельности, рефлексия результатов деятельности). Процесс решения этих задач не противоречит также алгоритму решения изобретательских задач: анализ условия задачи – аналитическая стадия; выдвижение и проверка гипотез через деятельность – оперативная стадия; создание новой технологии (модели), ее оценка – синтетическая стадия [1; 14].

Разработанные автором обобщенные учебные задачи имеют уровневую структуру. Это задачи порогового уровня, при решении которых курсанты используют существующие технологии и демонстрируют минимальный уровень сформированности С-ПК; задачи продвинутого уровня, поиск решения которых побуждает курсантов выходить за рамки существующих технологий; задачи профессионального уровня, для решения которых курсантам необходимо сконструировать свою собственную технологию или модель.

Пороговый уровень подразумевает наличие следующих знаний и умений для решения типовых военно-профессиональных задач:

- 1) основные понятия и категории, место и роль военных и социально-гуманитарных дисциплин в системе военных наук;
- 2) положения современных концепций ведения войны, положения уставов, руководств и наставлений, раскрывающих вопросы подготовки личного состава и вооружения к боевым действиям;
- 3) основы управления воинским подразделением в мирное и военное время, основы всестороннего обеспечения боевых действий;
- 4) назначение, тактико-технические характеристики, порядок эксплуатации техники, вооружения и приборов, состоящих на вооружении подразделений;
- 5) формы и методы (технологии) воспитания военнослужащих;
- 6) формы и методы (технологии) проведения занятий по дисциплинам боевой подготовки;
- 7) порядок использования дисциплинарной практики.

Решение курсантами обобщенных учебных задач на продвинутом уровне способствует формированию у них (на основе сформированных на пороговом уровне) следующих технологических умений: использовать в будущей профессиональной деятельности универсальные технологии (социальные, эксплуатационные, проектные), применяемые в военном деле; адекватно оценивать результаты своей деятельности и деятельности других участников образовательного процесса, применять различные технологии для самообразования и самовоспитания.

Профессиональный уровень обобщенных учебных задач предполагает формирование на основе уже сформированных универсальных знаний и обобщенных умений, обеспечивающих более эффективное решение профессиональных, социальных и личностных задач (преимущественно в незнакомой ситуации):

- 1) самостоятельно конструировать для использования в будущей профессиональной деятельности универсальные технологии (социальные, эксплуатационные, проектные);
- 2) использовать обобщенные знания для решения профессиональных, административных, управленческих, учебно-воспитательных задач;
- 3) реализовывать проекты профессионального самосовершенствования, обеспечивающие готовность к научно-исследовательской, инновационной деятельности в сфере будущей профессии, разработке проектов в различных областях деятельности.

Порядок создания обобщенной учебной задачи представлен на рисунке 1.

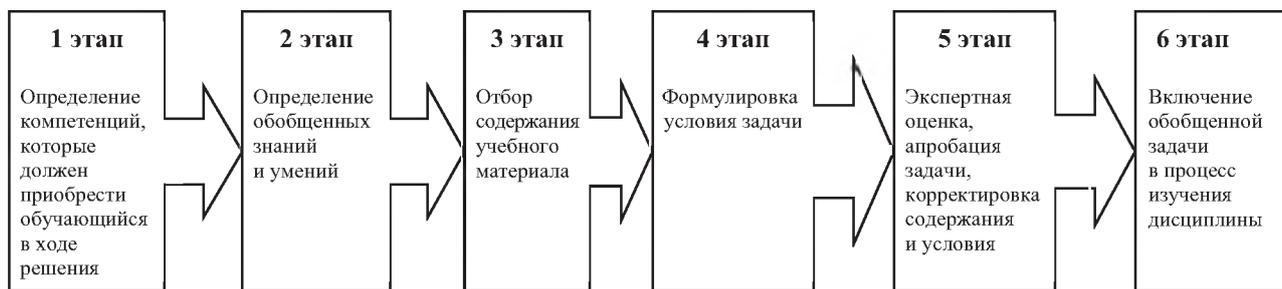


Рисунок 1. – Порядок создания обобщенной учебной задачи

Рассмотрим последовательность создания обобщенной учебной задачи по дисциплинам «Экономическая теория» и «Социология» в составе интегрированного модуля «Экономика».

1 этап. *Формируемые (развиваемые) компетенции:* АК-1. Владеть и применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом. АК-4. Уметь работать самостоятельно. АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем [6].

2 этап. *Универсальные знания*: особенности социально-экономических процессов в Республике Беларусь, основные социальные и экономические цели белорусского общества; тенденции развития современных социальных процессов, специфика функционирования социальных институтов в Республике Беларусь.

Обобщенные умения: анализировать экономические и социальные процессы в Республике Беларусь и за рубежом; использовать экономические и социологические знания для принятия рациональных социально-экономических решений в процессе выполнения будущих социальных и профессиональных ролей; осуществлять поиск и анализ необходимой экономической и социологической информации из различных источников; осуществлять анализ социальной и экономической информации; аргументировать собственную позицию в ходе обсуждения экономических и социальных проблем.

3 этап. *Отбор содержания учебного материала*. Обзор социально-экономической ситуации в Республике Беларусь за 4 квартал 2014 года (<http://www.economy.gov.by>).

4 этап. *Задача 1 (продвинутый уровень)*.

Проблема: зависимость социальной сферы от основных экономических показателей. Необходимо проанализировать текст (представляются материалы с сайта Министерства экономики Республики Беларусь) и ответить на вопросы:

1. Определите: каковы позитивные (негативные) тенденции социально-экономической ситуации в Республике Беларусь?

2. Как влияет состояние социально-экономической ситуации на строительство Вооруженных сил Республики Беларусь?

3. Можно ли использовать методiku оценки социально-экономической ситуации при оценке военно-политической ситуации?

5 этап. Задача представляется на экспертизу преподавателям дисциплин «Экономическая теория» и «Социология». При необходимости уточняется содержательный компонент и формулировка условия. Затем производится апробация задачи на одной из учебных групп.

6 этап. Задача включается в процесс изучения дисциплин.

Важной особенностью обобщенных учебных задач является соответствие их порогового, продвинутого, профессионального уровней уровням освоения деятельности по классификации В. П. Беспалько – ученическому (деятельность по воспроизведению – решение обучающимся типовых задач), исполнительскому, частично экспертному (эвристическая деятельность в нестандартной ситуации, требующая от обучающихся развитых умений рассуждения и мышления) и экспертному (исследовательская деятельность) [3, с. 96–99].

Кроме того, обобщенные учебные задачи соответствуют, по В. И. Загвязинскому, следующим типам задач: алгоритмическому (задачи решаются по алгоритму в виде формулы, правила), трансформированному (применение известных формул в новой ситуации, эвристические шаги играют ведущую роль), задачам творческо-поискового типа (сочетание логического анализа и интуиции – способности непосредственного усмотрения истины без предварительного логико-эвристического рассуждения; задачи связаны как с накопленным опытом и знаниями, так и с врожденными задатками) [8, с. 99].

Итоговую оценку освоения курсантами умений решать обобщенные учебные задачи можно выразить условными баллами: 1–2 балла – курсант способен решать некоторые задачи порогового уровня и не способен решать задачи продвинутого и профессионального уровней; 3–4 балла – способен решать большинство задач порогового уровня, некоторые задачи продвинутого уровня и не способен решать задачи профессионального уровня; 5–6 баллов – способен уверенно решать задачи порогового уровня, большинство задач продвинутого уровня и некоторые задачи профессионального уровня; 7–8 баллов – способен свободно решать задачи порогового и продвинутого уровней и большинство задач

профессионального уровня, 9–10 баллов – способен свободно решать задачи всех трех уровней.

При выставлении баллов за решение обобщенных учебных задач следует руководствоваться следующими критериями: научность – оперирование научными, военными, военно-техническими терминами; технологичность – знание и применение технологий при решении задач, способность к конструированию технологий; опора на опыт – при построении ответа использование не только личного (житейского) опыта, но и опыта, обогащенного научными смыслами; допускается подкрепление ответа примерами из жизни; четкость, аргументированность, полнота ответа. При этом учитывается уровень доказательства эффективности технологического подхода к решению проблемы с опорой на факты из научной, военно-технической, профессиональной литературы, использование дополнительных источников (баз данных, Интернета).

Результаты решения задач могут быть выражены в устной или письменной форме, в создании материального объекта (программного продукта) либо демонстрации технологического процесса. Задача может решаться индивидуально и в составе команды, может использоваться на этапах закрепления знаний, формирования умений, а также для процедуры диагностирования.

Подводя итог сказанному, можно сделать следующие выводы:

1. Имеющиеся в арсенале профессорско-преподавательского состава традиционные формы, методы и средства не позволяют в полной мере эффективно осуществлять формирование (развитие) С-ПК, а также диагностику ее сформированности. Это актуализирует поиск новых средств и технологий формирования и диагностики С-ПК.

2. В качестве одного из эффективных средств формирования, развития и диагностики С-ПК будущих офицеров могут быть использованы обобщенные учебные задачи, в процессе решения которых у курсантов формируются и развиваются обобщенные знания и умения. Уровень овладения будущими специалистами способами решения обобщенных учебных задач выступает одним из критериев сформированности у них С-ПК.

3. Результаты проведенного исследования [10], а также педагогический опыт автора показали, что в процессе решения обобщенных учебных задач у курсантов формируются комплексные междисциплинарные умения решения целого класса задач военно-профессиональной направленности и универсальные способности, системное и аналитическое мышление, умение переносить знания и опыт в незнакомую область деятельности, что обусловлено междисциплинарным характером задач. Благодаря процессу поиска решения у курсантов развиваются готовность к самоопределению, умения рефлексии, сотрудничества.

Список литературы:

1. Альтшуллер, Г. С. Творчество как точная наука / Г. С. Альтшуллер. – М. : Сов. радио, 1979. – 184 с.
2. Балл, Г. А. Основы теории задач (система основных понятий; психолого-педагогический аспект): дис. ... д-ра психол. наук: 19.00.07 / Г. А. Балл. – Киев, 1990. – 386 л.
3. Беспалько, В. П. Природосообразная педагогика = Natureconformably pedagogy / В. П. Беспалько. – М. : Нар. образование, 2008. – 512 с.
4. Бордовская, Н. В. Педагогика : учеб. пособие / Н. В. Бордовская, А. А. Реан. – СПб. : Питер, 2011. – 304 с.
5. Бояцис, Р. Компетентный менеджер. Модель эффективной работы / Р. Бояцис; пер. с англ. – М. : НИРРО, 2008. – XII, 340 с.
6. Высшее образование. Первая ступень. Цикл социально-гуманитарных дисциплин. – Введ. 01.09.14. [Электронный ресурс]. – Минск: Респ. ин-т высш. шк., 2014. – Режим доступа: <http://www.nihe.bsui.by/index.php/ru/norm-doc>. – Дата доступа: 07.12.2014.

7. Жук, О. Л. Педагогика. Практикум на основе компетентностного подхода : учеб. пособие / О. Л. Жук, С. Н. Сиренко ; под общ. ред. О. Л. Жук. – Минск : Респ. ин-т высш. шк., 2007. – 191 с.
8. Загвязинский, В. И. Теория обучения: современная интерпретация : учеб. пособие / В. И. Загвязинский. – 2-е изд., испр. – М. : Академия, 2004. – 192 с.
9. Зимняя, И. А. Ключевые компетенции как результативно-целевая основа компетентностного подхода в образовании / И. А. Зимняя; М-во образования и науки РФ ; Исслед. центр. проблем качества подгот. специалистов Моск. гос. ин-та стали и сплавов. – М. : ИЦПКПС, 2004. – 38 с.
10. Коклевский А. В. Методическая система формирования технологической компетентности будущих специалистов в процессе военной подготовки в классическом университете: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08 / А. В. Коклевский; Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2013. – 234 л.
11. Кульбеда, В. В. Задачный подход к саморазвитию педагогических компетенций учителя в инновационной деятельности : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.01 / В. В. Кульбеда; Казан. гос. ун-т. – Казань, 2004. – 21 с.
12. Новиков, А. М. Основания педагогики : пособие для авт. учеб. и преподавателей педагогики / А. М. Новиков. – М. : Эгвес, 2010. – 208 с.
13. Макет образовательного стандарта высшего образования первой ступени: приказ М-ва образования Респ. Беларусь, 13 июня 2013 г., № 374 [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.nihe.bsu.by/index.php/ru/norm-doc>. – Дата доступа: 27.02.2015.
14. Орлов, М. А. Азбука ТРИЗ. Основы изобретательского мышления / М. А. Орлов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2010. – 208 с.
15. Пойа, Д. Как решать задачу : пособ. для учителей / Д. Пойа ; пер. с англ. ; под ред. Ю. М. Гайдука. – М. : Учпедгиз, 1959. – 208 с.
16. Равен, Дж. Компетентность в современном обществе : выявление, развитие и реализация / Дж. Равен ; пер. с англ. В. И. Белопольского. – М. : Когито-центр, 2002. – 396 с.
17. Сериков, В. В. Личностно-ориентированное образование: поиск новой парадигмы / В. В. Сериков. – М. : Из-во Волгог. гос. пед. ун-та, 1998. – 182 с.
18. Спенсер, Л. М. Компетенции на работе / Л. М. Спенсер, С. М. Спенсер; пер. с англ. А. Яковенко. – М. : НИРО, 2005. – 384 с.
19. Autio, O. The Development of Technological Competence from Adolescence to Adulthood / O. Autio // J. of Technology Education. – 2011. – Vol. 22, № 2. – P. 71–89.

*Сведения об авторе:

Коклевский Александр Владимирович,
УО «Военная академия Республики Беларусь».
Статья поступила в редакцию 11.05.2015 г.

**Требования к статьям, представляемым для опубликования
в военном научно-теоретическом журнале
«Вестник Военной академии Республики Беларусь»**

Представляемые в редакцию материалы должны отражать оригинальные результаты исследований авторов по актуальной тематике в области военных наук, технических наук (радиотехника, связь, электроника и микроэлектроника, информатика, вычислительная техника и управление, вооружение и военная техника), педагогических наук (воинское обучение и воспитание, военная педагогика). Статья должна быть посвящена решению важной самостоятельной теоретической или прикладной задачи, характеризоваться научной новизной, цельностью, последовательностью и логичностью изложения материала.

Рекомендуется в каждой из статей выделять:

введение с характеристикой состояния дел в соответствующей области исследования, обоснованием актуальности рассматриваемой задачи, а также изложением общего подхода к ее решению;

основную часть, отражающую используемый метод исследования и его результаты в сопоставлении с известными ранее;

выводы, характеризующие обобщения и умозаключения авторов, непосредственно вытекающие из представленного в основной части материала, а также возможные направления и перспективы использования полученных результатов.

К опубликованию не принимаются материалы, представляющие собой компиляцию известных результатов исследований других авторов, а также статьи публицистического характера, не связанные с решением конкретной научной задачи.

В конце статьи приводится список литературных источников, на которые даются ссылки при изложении основного текста. Автор несет ответственность за достоверность цитирования, а также отсутствие плагиата.

Требования к оформлению статей:

общий объем 6–8 страниц формата А4; в исключительных случаях общий объем может быть аргументированно увеличен до 12 страниц;

текстовый редактор Word for Windows версии 6.0 или выше;

редактор формул MathType версий 6.0–6.7;

поля 2 см (со всех сторон);

шрифт Times New Roman Cyr, 12 pt;

межстрочное расстояние 1 интервал.

Основной текст статьи должны предварять:

УДК (выравнивание по левой стороне);

название (шрифт полужирный, буквы прописные, выравнивание по центру);

инициалы, фамилия, ученая степень и ученое звание автора (-ов) (выравнивание по центру);

аннотация на русском и английском языках (курсив, отступ первой строки 1,25 см, выравнивание по ширине).

Форматирование основного текста: отступ первой строки 1,25 см; выравнивание по ширине. Форматирование подписей к рисункам: шрифт светлый, выравнивание по центру. Форматирование заголовков таблиц: шрифт светлый, выравнивание по левому краю таблицы. Форматирование формул: выравнивание по центру, последовательная нумерация (по правому краю, в скобках).

Промежутки между структурными элементами статьи (УДК, название, авторы, аннотация, основной текст, список литературы) по вертикали – 6 пт.

На обороте последней страницы необходимо указать фамилию, имя, отчество автора, подразделение, организацию, номер контактного телефона.

Текст статьи (в распечатанном и электронном вариантах) вместе с выпиской из протокола заседания кафедры (НИЛ), рекомендующей ее к опубликованию, направляется в редколлегию. Если авторы статьи являются сотрудниками внешней организации, дополнительно требуется представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати.