

АНАЛИЗ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ США «НАВСТАР» КАК ОБЪЕКТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

Ануфриев А.А.¹, Чиркин П.М.², Шипунов В.А.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-1-20-33

Ключевые слова: орбитальная группировка, искусственный спутник земли, вооруженный конфликт, беспилотный летательный аппарат, корректируемый боеприпас, боевая задача, уязвимость, приемник навигационного сигнала, аппаратура потребителей, инерциальная навигационная система.

Аннотация

Цель работы: заключается в разработке новых подходов к радиоподавлению приемников сигналов спутниковой радионавигационной системы «Навстар» в связи с проводимыми работами по повышению ее помехоустойчивости и совершенствованию организационно-технических решений ее применения.

Метод исследования: на основе анализа решений, обеспечивающих помехозащищенность спутниковой радионавигационной системы «Навстар», разработать предложения по подавлению приемников радионавигационных сигналов для защиты от средств поражения противника войск, вооружения, военной и специальной техники.

Результаты: определены основные особенности решения задачи радиоподавления аппаратуры потребителей СРНС в условиях трансформации и милитаризации их использования. Предложены приоритетные направления реализации организационно-технических принципов построения и управления распределенной системой подавления навигационного поля для устойчивого подавления приемников на протяжении длительного времени в интересах территориальной защиты от средств поражения противника войск, вооружения, военной и специальной техники.

Научная новизна: заключается в получении численных показателей условий радиоподавления аппаратуры потребителей СРНС «Навстар» при ее интеграции с инерциальными навигационными модулями, наземными и космическими дополнениями.

Введение

Одной из главных военно-технических особенностей современных вооруженных конфликтов стало массовое применение беспилотных летательных аппаратов (далее — БПЛА), а также так называемых барражирующих (корректируемых) боеприпасов. Их использование дает существенные преимущества при выполнении тех или иных боевых задач. Сегодня такие средства применяются там, где раньше было даже трудно представить.

У БПЛА и корректируемых боеприпасов существуют две основные уязвимости. Это приемник навигационного сигнала, обычно спутниковой радионавигационной системы (далее — СРНС) и линии передачи команд управления. Их радиоподавление средствами радиоэлектронной борьбы (далее — РЭБ) затрудняет полноценное выполнение задач. Кроме этого, СРНС позволяет

синхронизировать работу систем связи, которые используют ППРЧ и пакетный принцип передачи данных.

Как показывает практика успех военных действий в значительной степени определяется устойчивостью работы системы навигационно-временного обеспечения применения вооружения и военной техники.

Постановка задачи

В настоящее время существуют следующие глобальные СРНС: «Навстар» (GPS) — США, «Галилео» — Евросоюз, «Бейдоу» — КНР и ГЛОНАСС — Российская Федерация.

Самым распространенным средством координатно-временного навигационного обеспечения (определения пространственных координат и времени) в глобальном масштабе военных и гражданских пользователей, систем

¹Ануфриев Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронной борьбы Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irbis453@mail.ru

²Чиркин Павел Михайлович, преподаватель кафедры радиоэлектронной борьбы Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 67-ccsr@mail.ru

³Шипунов Владимир Алексеевич, кандидат военных наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронной борьбы Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: colonel53@mail.ru

управления оружием, в т. ч. высокоточного, а также других средств наземного, воздушного, морского и космического базирования является СРНС министерства обороны США «Навстар» (NAVSTAR — NAVigation System using Timing And Ranging, имеет также наименование GPS — Global Positioning System). Исходя из этого, в данной работе GPS рассматривается как объект РЭБ.

В данной системе применен пассивный дальномерно-доплеровский способ навигационных измерений с хранением начала отсчета.

Для определения местоположения потребителя используется так называемый беззапросный метод. Сущность метода состоит в том, что все спутники излучают синхронизированные сигналы, а в аппаратуре потребителя измеряется время прихода сигнала от каждого спутника в локальной группировке относительно начала отсчета, определяемого опорным напряжением в этой аппаратуре.

В состав СРНС «Навстар» входят:

- ❖ орбитальная группировка навигационных спутников (космический сегмент);
- ❖ средства управления, контроля и закладки данных (наземный комплекс);

- ❖ носимые и установленные на платформах различного базирования навигационные приемники (аппаратура потребителей) [1].

Система обеспечивает для потребителей стандартный (SPS — Standard Positioning Service) и точный (PPS — Precise Positioning Service) режимы определения местоположения, которые отличаются между собой структурой используемых навигационных сигналов, а также дополнительный (дифференциальный) режим. В основе функционирования лежит использование единого системного времени.

Точность определения пространственного положения (без применения дифференциального режима) в настоящее время составляет 1–3 и 3–6 м в точном и стандартном режимах соответственно. В результате проводимой модернизации космического элемента, наземных контрольно-измерительных средств и аппаратуры потребителей этот показатель будет составлять 0,5–1 и 1–3 м, а к 2030 году — 0,15–0,5 и 0,6–1 м [1, 2].

В составе орбитальной группировки СРНС используются ИСЗ второго поколения «Навстар-2» четырех модификаций, ИСЗ третьего поколения «Навстар-3» (табл. 1).

Таблица 1 — Состав орбитальной группировки СРНС «Навстар»

Тип ИСЗ	Годы запусков	Количество ИСЗ в системе	Навигационные сигналы	Расчетный срок функционирования, лет
«Навстар-2А»	1990–1997	7 (ОР)	L1C/A, L1P(Y), L2P(Y)	7,5
«Навстар-2R»	1997–2004	10	L1C/A, L1P(Y), L2P(Y)	7,5
«Навстар-2RM»	2005–2009	7	L1C/A, L1P(Y), L1M, L2C, L2P(Y), L2M	10
«Навстар-2F»	2010–2017	12	L1C/A, L1P(Y), L1M, L2C, L2P(Y), L2M, L5	12,5
«Навстар-3»	2017–н.в.	2	L1C/A, L1P(Y), L1M, L2C, L2P(Y), L2M, L5	15

Бортовые радиопередатчики ИСЗ излучают на трех частотах: L-диапазона (L1 — 1575,42 МГц, L2 — 1227,6 МГц,

L5 — 1176,45 МГц) семь навигационных сигналов, в том числе три открытых и четыре защищенных (рис. 1).

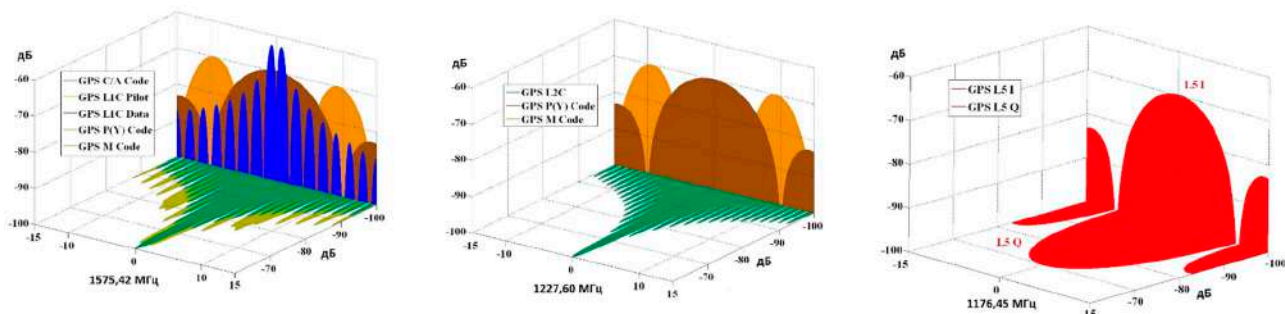


Рис. 1. Частотные и спектральные характеристики навигационных сигналов ИСЗ семейства «Навстар»

Решения, посредством которых обеспечивается помехозащищенность системы.

Структура формируемого навигационного сигнала обеспечивает заданные точности измерения навигационных параметров, высокую вероятность декодирования служебной информации, минимальную мощность излучения, разделимость сигналов от различных спутников при использовании других систем, устойчивость к помехам, аппаратную реализуемость. Для измерения дальности и скорости он имеет большую эффективную длительность и эффективную ширину спектра сигнала, что не реализуемо для простых сигналов, но в той или иной мере реализуемо для так называемых сложных (шумоподобных) (далее ШПС) сигналов.

Теоретической основой для используемых сигналов является фундаментальная теорема Шеннона, которая объединяет пропускную способность информационного канала C (бит/с), ширину полосы W_s , мощность сигнала P_s и мощность ограниченного по полосе аддитивного белого гауссовского шума P_j согласно выражению:

$$C = W_s \log_2 (1 + P_s / P_j).$$

Зависимость устанавливает связь между предельной скоростью надежной передачи информации по каналу с заданным отношением сигнал/шум и отведенной для передачи

информации полосой частот. В соответствии с этим может происходить «обмен» мощности сигнала на полосу пропускания информационного канала, т. е. при расширении полосы пропускания канала больше чем это требуется для передачи информации, радиоканал может работать при значительном превышении мощности шума над мощностью полезного сигнала. Отсюда помехоустойчивость определяется соотношением, связывающим отношение сигнал/помеха на выходе приемника (коррелятора) q^2 с отношением сигнал-помеха на входе приемника p^2 , где B отношение ширины полосы промодулированного сигнала к ширине полосы исходного сигнала, так называемая база сигнала.

$$q^2 = 2 B p^2.$$

Видно, что прием ШПС коррелятором сопровождается усилением сигнала (или подавлением помехи) в $2 B$ раз. Ввиду этого данный способ нашел применение в СРНС.

В СРНС используется метод расширения спектра сигнала путем последовательной перестройки фазы передаваемого сигнала двоичной псевдослучайной последовательностью. Она формируется путем умножения сигнала несущей на ПСП с тактовой частотой, намного превышающей ширину полосы частот информационного сигнала (рис. 2).

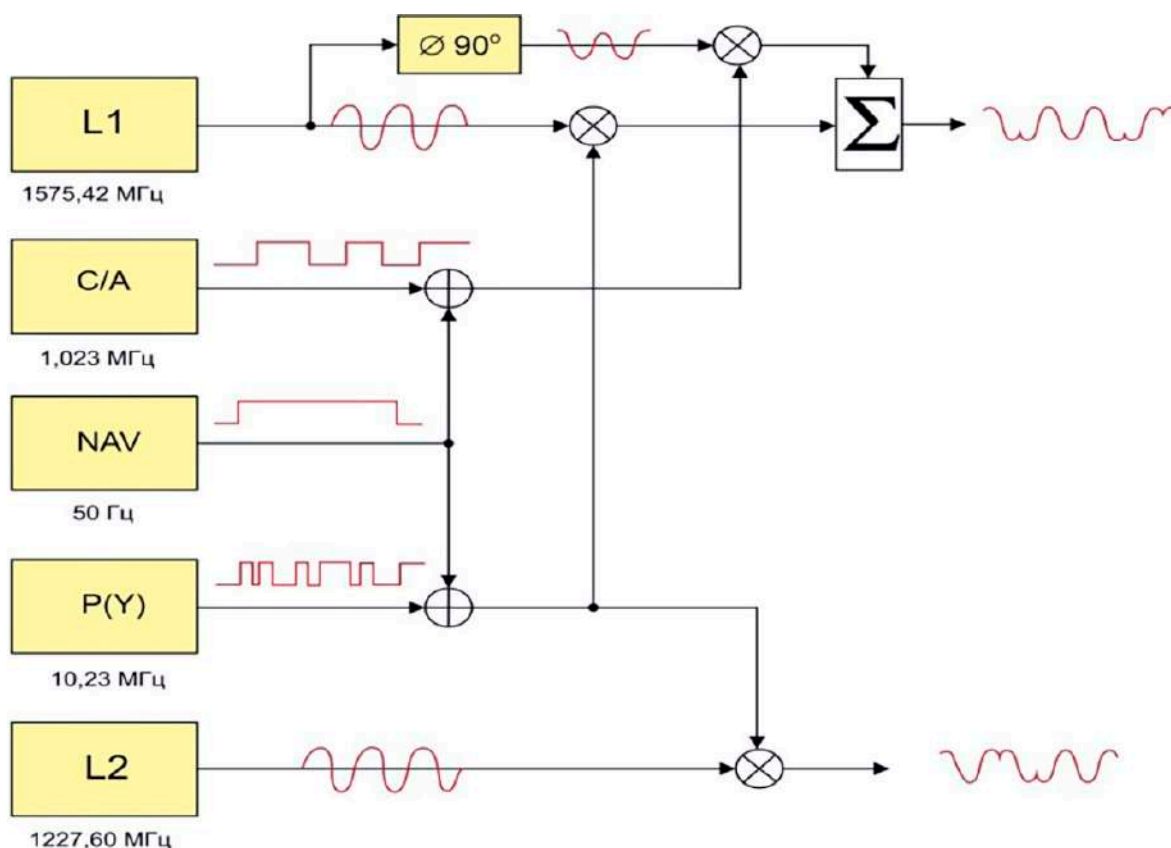


Рис. 2. Структура формирователя навигационных сигналов ИСЗ семейства «Навстар»

Все спутники излучают синхронные сигналы одинаковой структуры, служащие для измерения дальности и радиальной скорости. Индивидуальным является содержание служебной информации в сигнале, формирующем навигационные параметры конкретного спутника.

Навигационные сигналы, излучаемые аппаратурой спутника — это периодические фазоманипулированные сигналы с параметрами:

- ❖ открытый сигнал L1C/A — длительность дискреты 0,98 мкс, период равен 1 мс (база равна 1023), соотношение сигнал/шум обеспечивающий функционирование - 23 дБ;
- ❖ открытый сигнал L2C — длительность дискреты 0,196 мкс, период равен 1500 мс (база равна 7653), соотношение сигнал/шум, обеспечивающий функционирование - 32 дБ;
- ❖ закрытый сигнал L2P(Y)L1P(Y) — длительность дискреты 0,098 мкс, период составляет неделю (база приблизительно равна $6 \cdot 10^{12}$). соотношение сигнал/шум обеспечивающий функционирование - 47 дБ;
- ❖ закрытый сигнал L2M L1M — оценочное соотношение сигнал/шум обеспечивающий функционирование - 87 дБ;

- ❖ открытый сигнал L5 — оценочное соотношение сигнал/шум, обеспечивающий функционирование - 47 дБ.

Все кодовые последовательности формируются от одной и той же опорной частоты и привязаны к одному и тому же моменту времени с погрешностью 3 нс, сигнал C/A и L2C служит ключом для ускоренного вхождения в синхронизм по коду P.

Открытый сигнал C/A слабее защищен от преднамеренных помех, и в условиях их воздействия ускоренная синхронизация по коду P невозможна. В условиях помех синхронизация возможна только при использовании потребителем высокостабильных генераторов со стабильностью не хуже 10^{-12} , что не всегда приемлемо или доступно. Для устранения этого недостатка в процессе модернизации введен открытый сигнал L2C с более высокими защитными свойствами. Начиная с аппаратов IIR-M, введён в эксплуатацию новый M-код (используется комбинированная модуляция ВОС (10, 5)). Использование M-кода позволяет обеспечить функционирование системы в рамках концепции Navwar (навигационная война).

М-код передается на существующих частотах L1 и L2. Данный сигнал обладает повышенной помехоустойчивостью, и его достаточно для определения точных координат (в случае с Р-кодом было необходимо получение и кода С/А).

Модернизированный сигнал (М-код) разработан для военного использования, для замены сигнала Р(У). М-код имеет модуляцию с цифровой поднесущей (ВОСsin(10,5)). Цифровая поднесущая — это меандровое колебание, которое модулирует радиосигнал, уже модулированный дальномерным кодом. Для описания ВОС модуляции используется два параметра: частота выборки символов дальномерного кода f_c и частота цифровой поднесущей f_s . Для ВОС модуляции введено обозначение $\text{ВОСsin}(m,n)$, где m — коэффициент кратности частоты поднесущей базовой

частоте 1,023 МГц ($m=f_s / 1,023 \text{ МГц}$), а n — коэффициент кратности тактовой частоты дальномерного кода базовой частоты 1,023 МГц ($n=f_c / 1,023 \text{ МГц}$). Границы смены символов дальномерного кода совпадают с границами символов цифровой поднесущей, при этом начальная фаза синусоидального колебания равна $\varphi = 0^\circ$. М-код обеспечивает большую помехозащищенность, чем Р-код. Преимущество М-кода состоит в защищенности и спектральной изоляции от «гражданских» сигналов (С/А и L1С кодов), а также в том, что ему не требуется предварительной синхронизации с С/А-кодом. Частота следования символов дальномерного кода составляет 5,115 МГц, а частота модулирующего меандра 10,23 МГц. Сигнал на частоте L5 мощнее на 3 дБ, чем гражданский сигнал, и имеет занимаемую полосу в 10 раз его шире (табл. 2) [1–2].

Таблица 2 — Навигационные сигналы ИСЗ семейства «Навстар-2»

Обозначение сигнала	Несущая частота, МГц	Ширина полосы, МГц	Тактовая частота дальномерного кода, МГц	Структура сигнала	Мощность сигнала у земли, дБВт	Вид сигнала
L1C/A	1575,42	20,46 (2,046)	1,023	BPSK	-158,5	Открытый
L1P(Y)	1575,42	20,46	10,23	BPSK	-161,5	Защищенный
L1M	1575,42	24	5,115	ВОС(10,5)	-158,0	Защищенный
L2C	1227,6	20,46	1,023	BPSK & TM	-160,0	Открытый
L2P(Y)	1227,6	20,46	10,23	BPSK	-161,5	Защищенный
L2M	1227,6	24	5,115	ВОС(10,5)	-161,0	Защищенный
L5	1176,45	20,46	10,23	QPSK	-157,9	Открытый

Спутниковое оборудование включает передатчик с выходной мощностью около 50 Вт, ЭИИМ 25/27 дБ/Вт, антенна 12 элементная решетка спиральных антенн.

Потери на трассе распространения (Космос-Земля) — 184 дБ.

На аппаратах начиная с 2RM обеспечивается возможность изменять мощность излучения ста-

рых (Р-кодов) и новых (М-кодов) сигналов для военных потребителей в целях повышения их помехозащищенности. В частности, реализовано отключение «новых» сигналов, что приводит к значительному увеличению мощности «старых».

Сигнал ИСЗ модификации 2F на третьей частоте (L5) совместим с аналогичным сигналом E5a европейской СРНС «Галилео».

Перспективные спутники типа «Навстар-3» должны заменить в 2025 году находящиеся в эксплуатации аппараты второго поколения и обеспечить повышенную точность определения местоположения потребителей и защищенность военных навигационных сигналов от средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Особенностью системы при полном развертывании и эксплуатации ИСЗ третьего поколения станет использование межспутниковых линий связи в УВЧ-диапазоне для передачи команд управления и контроля функционирования спутников, также использование узконаправленных бортовых антенн для передачи сигналов с М-кодом в заданных районах земной поверхности в зоне диаметром около 1000 км для обслуживания военных пользователей, с увеличенной на 10–20 дБ мощностью излучения в целях противодействия средствам РЭБ. В пределах этой зоны мощность сигнала на входе навигационного приемника должна составлять $160 \cdot 10^{-16}$ Вт, что приблизительно в 100 раз больше существующего значения.

Аппаратура потребителей (АП) предназначена для определения пространственных координат, скорости и направления движения (для

подвижных пользователей) и точного системного времени. Она выполняет в автоматическом режиме поиск, обнаружение и прием навигационных радиосигналов, излучаемых спутниками, измерение значений радионавигационных параметров, решение навигационной задачи.

В АП определяются расстояния до выбранных спутников (не менее четырех из 5–12 ИСЗ в зоне радиовидимости) посредством измерений временных сдвигов принимаемых дальномерных кодов относительно генерируемых в АП. Эти временные сдвиги являются мерой дальности распространения сигналов от каждого ИСЗ до навигационного приемника.

Для обеспечения помехозащиты АП в настоящее время реализован ряд мер [1, 3, 4].

Наиболее эффективными являются внешние многоэлементные антенны, повышающие качество приема навигационных сигналов и уровень защищенности приемников от средств РЭП противника.

В них реализована технология пространственной фильтрации активных помех путем формирования нулей (провалов) диаграммы направленности в направлении источника помех (рис. 3).

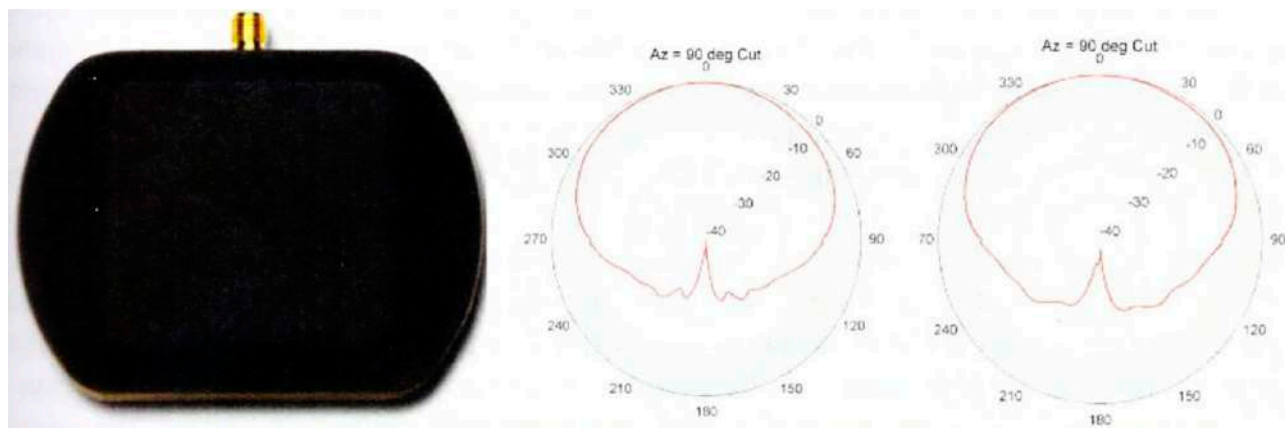


Рис. 3. Общий вид и диаграммы направленности (L1 и L2) антенны RA-1

На устройствах наземного и морского базирования часто применяются 7-элементные антенны типа «Гаджит-700ML и -700MS» (рисунок) совместной разработки канадской фирмы «Новател» (NovAtel) и британской «Кинетик» (QinetiQ).

Антенны этой серии могут формировать до шести нулей ДН с уровнем подавления помех 40 дБ, имеет коэффициент усиления — 30 дБ, размеры 29 × 12 см и массу 7,5 кг. Блок электронного управления «Гаджит-АЕ-Н» (GAJT-AE-N—AntennaElectroniseNclosure) создан для большин-

ства 4-элементных антенн, формирующих до трех нулей диаграммы направленности. Он предназначен для установки на небольшие дистанционно управляемые машины и БЛА. Размеры блока составляют 15 × 15 × 4 см, масса около 1 кг, потребляемая мощность менее 20 Вт.

Другими важными направлениями по повышению помехозащищенности СРНС «Навстар» являются:

- ❖ модернизация навигационных приемников для обеспечения обработки сигналов М-кода;

- ❖ использование дифференциального режима;
- ❖ криптографическое преобразование защищенных Р-сигналов;
- ❖ режим селективной доступности;
- ❖ использование так называемых «космических и наземных дополнений».

Подробный анализ мер по повышению помехозащищенности СРНС «Навстар»

Процесс модернизации военных навигационных приемников для обеспечения обработки сигналов М-кода, которые в настоящее время излучают 22 спутника из 31, а в перспективе будут передаваться всеми ИСЗ системы, а также оснащение АП блоками инерциальной навигации, измеряющими изменения место-

положения пользователя путем точного отслеживания его перемещений, позволяет снижать воздействие преднамеренных помех, в том числе имитирующих радионавигационные сигналы; использование дифференциального режима (DGPS) повышает точность определения местоположения, скорости и времени.

Принцип организации работы в дифференциальном режиме основан на передаче в аппаратуру потребителей корректирующих данных (поправок) от одной или нескольких опорных станций (DGPS), расположенных в местах с координатами, определенных с максимальной точностью геодезическими способами на незначительном удалении (как правило, от 20 до 200 км) от пользователя (рис. 4).

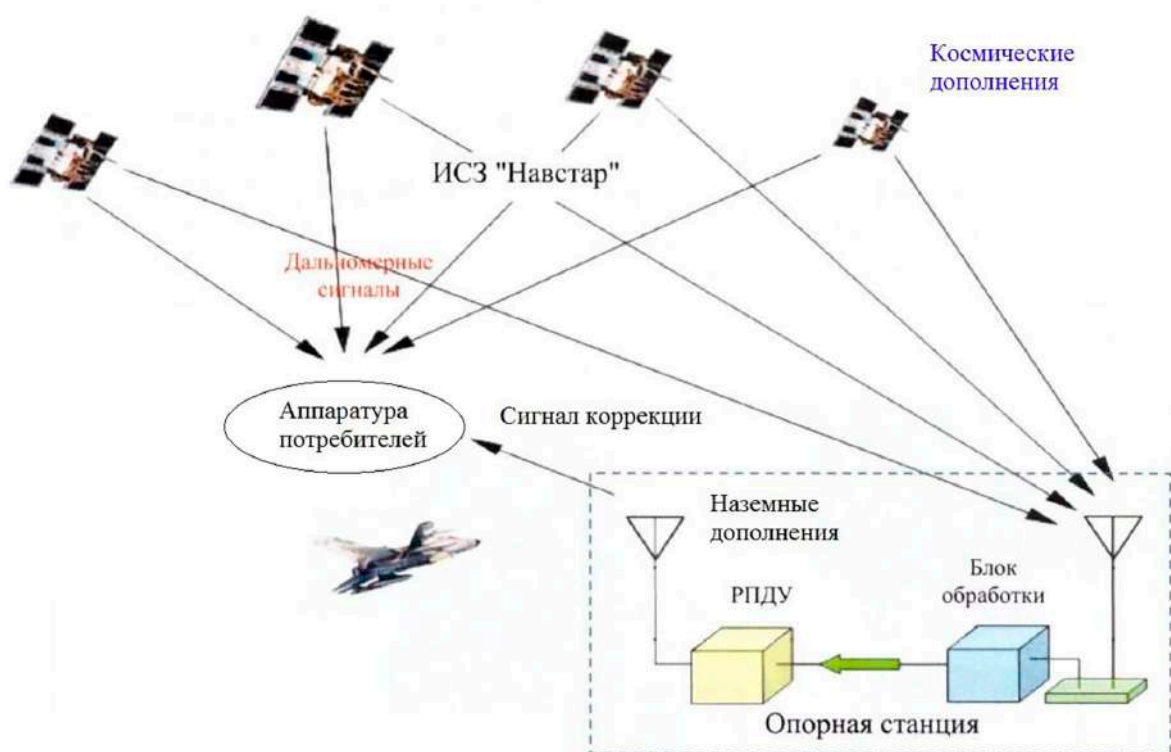


Рис. 4. Принцип организации работы СРНС в дифференциальном режиме

Применение дифференциального режима позволяет потребителям с АП стандартного режима выйти на уровень точности, предоставляемый защищенными навигационными сигналами. В точном режиме дифференциальная коррекция способствует повышению боевой устойчивости бортовой военной АП, так как позволяет эффективно подавлять погрешности, возникающие при нештатной работе системы, например, при уходе бортовых шкал времени отдельных ИСЗ, помехах, отказе бортового

стандарта частоты или нарушении работы наземного комплекса системы.

Для предотвращения имитации и несанкционированного использования защищенных сигналов применяется криптографическое преобразование защищенных Р-сигналов на частотах L1 и L2 в шифрованные Y-сигналы. Шифрованный вариант Р-сигнала называется Р(Y)-сигналом. Этот метод реализуется путем оснащения АП военных и других санкционированных пользователей модулем

SAASM (Selective Availability Anti-Spoofing Module), обеспечивающим безопасность данных в точном режиме навигационно-временных определений.

Основное назначение модуля SAASM: исключение несанкционированного доступа к точному режиму и обеспечение защиты при захвате такого АП противником. В нем реализована также проверка сигналов на подлинность (Signal Authentication).

Для предотвращения имитации и несанкционированного использования корректирующих сигналов дифференциального режима также осуществляется криптографическая обработка (шифрование) этих сигналов перед передачей потребителям.

Режим селективной доступности — это вводимое министерством обороны США ограничение точности определения пространственного положения несанкционированными потребителями путем преднамеренного искажения значений некоторых параметров, передаваемых с помощью навигационных сообщений открытых и защищенных сигналов. При этом ошибки вносятся в значения эфемерид и коэффициенты полинома коррекции шкалы времени бортовых стандартов частоты ИСЗ. Искорженные значения с помощью наземных станций управления закладываются по радиоканалу в навигационное оборудование спутников и в дальнейшем передаются потребителям.

Защита от радиоподавления АП СРНС «Навстар» от средств РЭП осуществляется посредством увеличения мощности спутниковых сигналов точного режима, использованием на АП антенн с управляемой диаграммой направленности (формированием нулей ДН в направлении источника помех) и применением различных методов фильтрации и специальной обработки защищенных сигналов. Кроме того, для снижения влияния преднамеренных помех осуществляется сопряжения АП с инерциальными навигационными системами (в аппаратуре 1 класса это обязательная опция).

В ходе модернизации предполагается поэтапно осуществить уменьшение максимальной дальности подавления радионавигационных сигналов с нынешних 90–100 км до 4–5 км.

По оценкам, внедрение новых антенн и инерциальных модулей, а также серийное производство военной АП, обеспечивающей обработку М-кода, позволит уменьшить максимальную дальность подавления до 3 км.

Предпринимаемые меры снижают эффективность использования маломощных передатчиков помех и вынуждает создавать дорогостоящие и крупногабаритные станции

радиоподавления, что облегчает их обнаружение и уничтожение.

Так же одним из способов повышения помехозащищенности СРНС «Навстар» является использование так называемых «космических и наземных дополнений». Принцип их функционирования основан на использовании дифференциального режима и дополнительных передатчиков дальномерных навигационных сигналов, установленных, как правило, на геостационарных и/или геосинхронных спутниках, а также на земле. Так, например, в этих целях осуществляется передача дополнительных навигационных сигналов большой мощности, транслируемых через ИСЗ спутниковой системы подвижной связи «Иридиум» (рис. 5).

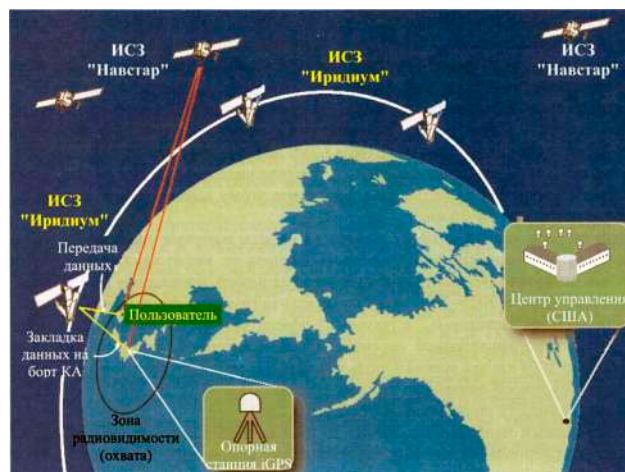







Рис. 5. Принцип использования системы «Иридиум» в качестве дополнения СРНС «Навстар»

Для формирования дополнительных сигналов с навигационными данными и дифференциальными поправками предусматривается использование автономных наземных опорных станций iGPS. Безопасность опорных станций будет достигаться за счет их размещения на территории дружественных США государств.

Кроме этого, в сложных для распространения сигнала условиях (в том числе преднамеренные помехи) ситуацию можно улучшить путем дополнения данных, получаемых спутниковым навигационным приемником, информацией от станций мобильной связи, т. е. от GSM.

Например, компания U-blox создала технологию гибридного позиционирования, которая основана на использовании «смеси» данных спутниковой навигации и данных, получаемых от GSM-станций мобильной связи. Эта технология получила название CellLocate. При помощи CellLocate можно определять местоположение даже без использования навигационного приемника (табл. 3).

Таблица 3 — Основные технические характеристики навигационных приемников U-blox

Параметры	LEA-7N	NEO-7N/ NEO-7M	MAX-7C/ MAX-7Q/ MAX-7W	IT530M	US530M
Внешний вид					
Габаритные размеры, мм	17,0x22,4x2,4	12,2x16,0x2,4	9,7x10,1x2,5	9,6x14,0x1,85	9,6x14,0x1,95
Напряжение питания, В	2,7–3,6	2,7–3,6/ 1,65–3,6	1,65–3,6/ 2,7–3,6/ 2,7–3,6	3,0–4,3	
Ток потребления, мА	23	15/17	15/17/17	11	
Холодный старт, с	29	29/30	30/29/29	31	
Чувствительность, дБм	холодный старт	–148			
	слежение		–162		–165

Принцип работы основан на том, что для любой точки местности существует определенная комбинация «видимых» GSM-станций. CellLocate позволяет «связать» полученную при помощи навигационного приемника позицию с данными о станциях мобильной связи, которые «видимы» с этой точки, передать эту информацию на CellLocate сервер, оценивающий позицию на основе информации от других приборов, которые определяли свое местоположение при помощи навигационного приемника при видимости тех же самых станций мобильной связи, и отослать свою оценку обратно на модуль. Данный сервис общедоступный.

Широкое распространение сети мобильной связи стандарта GSM позволяет производить определение позиции при помощи технологии CellLocate практически везде и в любых условиях.

В современных образцах вооружения, военной и специальной техники, таких как корректируемые авиабомбы и снаряды, оперативно-тактические ракеты и БПЛА, для получения дополнительной навигационной информации используются псевдолиты, радиомаяки и другие устройства. Для повышения устойчивости функционирования навигационной системы и повышения вероятности поражения цели применяются дополнительные датчики для корректировки сигналов GPS или целые автономные навигационные приборы для интеграции с GPS, например инерциальные системы (модули).

Инерциальные навигационные систе-

мы (ИНС) не подвержены воздействию искусственных помех. Основными источниками погрешностей в ИНС являются системные погрешности инерциальных датчиков (гироскопов и акселерометров).

Чем бы ни была вызвана погрешность инерциального датчика: внутренними механическими дефектами, погрешностью электроники или другими факторами, в конечном итоге это приводит к погрешности в выходных данных этих устройств. В гироскопах основная погрешность возникает в измерениях угловой скорости, а в акселерометрах — в измерениях кажущегося ускорения. В обоих случаях наиболее серьезными погрешностями, как правило, являются нестабильность смещения нуля, которая измеряется в о/ч для гироскопов или в микро-г для акселерометров, и стабильность масштабного коэффициента, которая обычно измеряется в миллионных долях (ppm) значений инерциальных параметров. Чем меньше погрешность инерциального датчика, тем выше точность навигационной системы. Соответственно, более точные датчики повышают стоимость системы.

В большинстве случаев погрешность в координатах инерциальной навигационной системы, оснащенной гироскопами с нестабильностью смещения нуля 0,01 о/ч и имеющей рабочий цикл в несколько часов, возрастает со скоростью 1,5–2 км в час. Если продолжительность операции намного короче по времени, дрейф гироскопа, смещение нуля акселерометра,

погрешность начальной выставки ИНС и погрешности исходных данных также приводят к соответствующей погрешности определения местоположения.

Гироскопы на основе микроэлектромеханической системы (МЭМС) выгодно отличаются стоимостью и массогабаритными характеристиками, благодаря чему сфера применения таких устройств неуклонно расширяется.

Развитие этих приборов определяет военный рынок, в частности такие направления, как «интеллектуальное» оружие, автопилоты летательных аппаратов и ракет, системы наведения тактических ракет ближнего действия,

Небольшие по размеру МЭМС-системы послужили основой создания высокоинтегрированных инерциально-спутниковых систем (рис. 6).






Рис. 6. МЭМС Honeywell HG1930 (а) и Honeywell HR4930 (б)

Типичным представителем современных ИНС на МЭМС является Honeywell HG1930 массой менее 100 грамм, объемом 100 куб. см, потребляемой мощностью < 3 Вт, с нестабильностью смещения нуля гироскопа 20 о/ч и случайным уходом по углу 0,09 о/ч. Еще один пример — система HG4930

объемом 5 куб. дюймов, с нестабильностью смещения нуля гироскопа 7 о/ч гироскопа по углу 0,04 о/ч.

В настоящее время налажено серийное производство малогабаритных гироскопов и навигационных модулей на базе этой технологии (табл. 4).

Таблица 4 — Характеристики малогабаритных гироскопов и навигационных модулей

Навигационный модуль STIM202	Навигационный модуль SRS03	Гироскоп CRM200, CRM202	Навигационный инерциально-измерительный модуль DMU02	Навигационный модуль CRS07-11S, CRS07-13S
нестабильность смещения — 0,5 %/ч; угловой случайный уход (шум) — 0,15 %/√ч; масса — 55 г; объем — 35 см ³ .	защищенный корпус — 29x29x18,4 мм; дрейф нуля (систематическая ошибка) — 0,2 %/ч; случайный угловой уход, дрейф ± 0,55 %/с в любой период длительностью 30 с; масса — < 18 г.	размер — 6,3x5,5x2,7 мм; диапазон измерений от ± 0,75 %/с до ± 2700 %/с; дрейф нуля (систематическая ошибка) 24 40 %/ч; случайный угловой уход 0,28 %/√ч; масса — 0,1 г.	три гироскопа CRG20 и 3-х осевой акселерометр; защищенный корпус — 25x25x25 мм; дрейф нуля: акселерометр — ± 5,5 mg; гироскоп — ± 2,5 %/с; масса — 17 г.	бескорпусный — 22x22x13,2 мм; дрейф ± 0,55 %/с в любой период длительностью 30 с; чувствительность — 20, 25 мВ/°/с; масса — 10 г.
				

Выводы и пути решения задачи по повышению эффективности

Анализ возможности радиоподавления СРНС.

Некоторое время назад традиционно было принято считать, что недостатком СРНС является низкая помехоустойчивость навигационной АП по отношению к воздействию маскирующих (например, шумовых или сигналоподобных), а также дезинформирующих (интеллектуальных) радиопомех. Однако в настоящее время и на перспективу ситуация, характеризующаяся низкой помехоустойчивостью АП СРНС, радикально меняется. Это связано с внедрением в АП описанных выше средств помехозащиты, основанных на внедрении цифровых антенных решеток с адаптивной пространственно-временной и частотно-временной обработкой навигационных сигналов и помех, передовых алгоритмов формирования и обработки сигнала,

аппаратно-программной фильтрации внеполосных сигналов, а также методов защиты от дезинформирующих помех и «глубокой интеграции» инерциальных навигационных систем и GPS. Очевидно, что задача разработки эффективных средств подавления радионавигационных систем и средств их защиты, обеспечивающих устойчивость функционирования АП навигационных систем при действии помех в области расположения АП, является актуальной.

Обобщая изложенный материал, а также результаты теоретических и экспериментальных работ, можно сделать следующие выводы.

Для создания помех СРНС, при котором отсутствует решение навигационной задачи, требуются различные уровни превышения мощности «классических» радиопомех над уровнем сигнала в полосе пропускания приемника (табл. 5, табл 6) [1, 5, 6].

Таблица 5 — Требуемые значения соотношения помеха/сигнал, при котором отсутствует решение навигационной задачи аппаратурой потребителей

Канал АП СРНС	Тип помехи	Вероятность подавления канала АП	Требуемое соотношение помеха/сигнал, дБ	Мощность сигнала у земли, дБВт
L1C/A	Шумовая	0,8	25-27	-158,5
	Гармоническая	0,8	38-45	
L2C	Шумовая	0,7	35	-160,0
	Гармоническая	0,7	50	
L1P(Y) L2P(Y)	Шумовая	0,6	47-50	-161,5
	Гармоническая	0,6	65-70	
L1M /L2M	Шумовая	0,6	90/85	-158,0/ -161,0
	Гармоническая	0,6	110/95	
L5	Шумовая	0,6	47-50	-157,9
	Гармоническая	0,6	70-75	

Таблица 6 — Энергетический выигрыш при дополнительных мерах помехозащиты

Дополнительные меры помехозащиты	Значение
4-х элементная антенная решетка	20 дБ
7- элементная антенная решетка	30-40 дБ
Цифровая адаптивная решетка с дросселем	40-70 дБ
Интеграция с АП ГНСС с ИНС	10-20 дБ

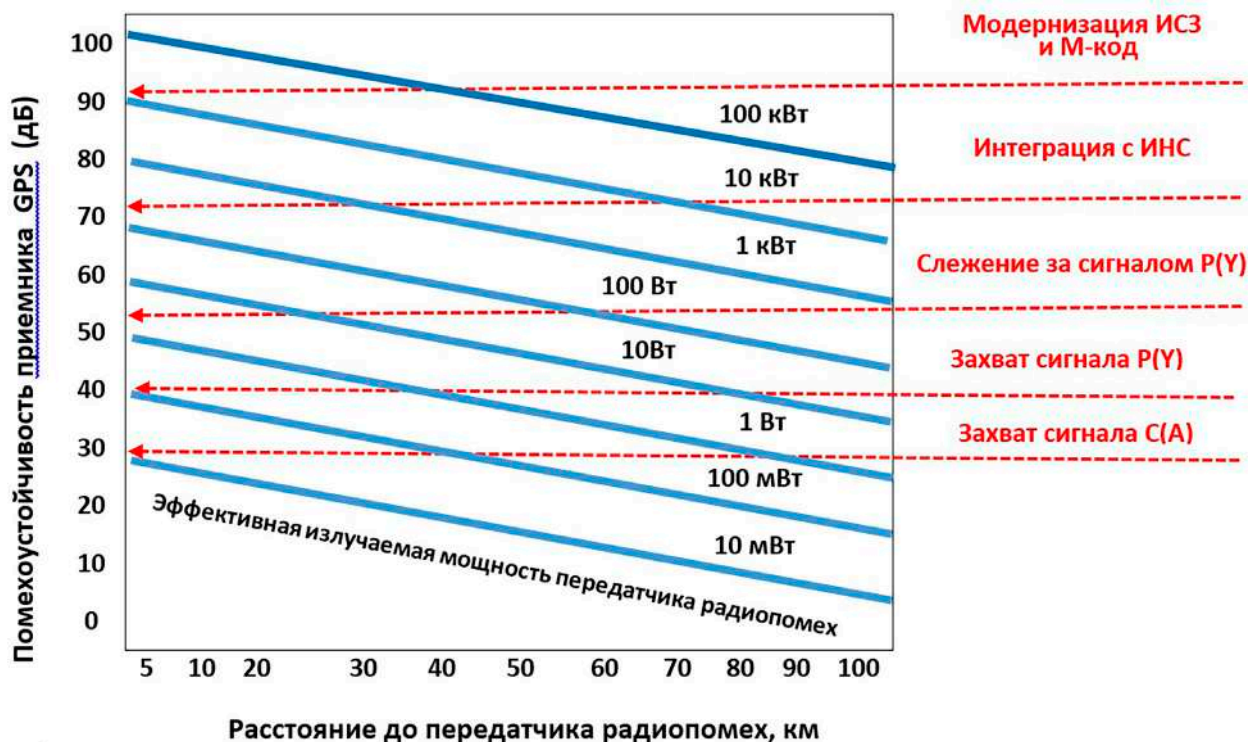


Рис. 7. Энергетические условия радиоподавления СРНС «Навстар»

Для подавления каналов СРНС в современной технике РЭП применяются с разной степенью эффективности:

- ❖ шумовая помеха (белый шум высокой мощности на частотах каналов СРНС);
- ❖ гармоническая (полигармоническая) помеха (одночастотное или модулированное гармоническое колебание на частоте (на частотах) сигнала);
- ❖ прицельная имитирующая помеха (помеха имитирует структуру сигнала);
- ❖ заградительная имитирующая помеха (имитирует набор сигналов спутников СРНС).

Технические особенности формирования помеховых сигналов и погрешности аппаратуры обуславливают необходимость увеличения ширины спектра помехи на 15–20 % сверх занимаемой полосы навигационным сигналом и, как следствие, увеличение необходимой для подавления мощности передатчика помех.

Таким образом, существующее положение дел повышает требования к энергетическим и технико-экономическим затратам и снижает эффективность одиночных систем и комплексов РЭП СРНС.

Логическое решение данной проблемы, это создание управляемого зонального противонавигационного поля радиопомех (УЗПНПР) в интере-

сах территориальной защиты от вооружения, в основе временного и навигационного обеспечения которых лежат описанные выше системы.

При низких значениях мощности навигационного сигнала у земли достижение больших значений отношения помеха/сигнал при их постановке технической проблемой не является. Для блокирования навигации необходимо достижение устойчивого подавления приёмников СРНС на протяжении длительного периода времени, поэтому прежде всего следует определиться с конфигурацией системы подавления и целесообразным уровнем мощности помехи. При выборе пространственной конфигурации следует принять во внимание то, что в диапазоне частот СРНС подавление эффективно только в пределах прямой радиовидимости. Исходя из необходимости организации покрытия радиопомехами достаточно больших площадей, структура системы должна быть многопозиционной с шагом сетки, в зависимости от энергетических показателей модулей помех, от единиц до десятков километров.

Соотношение выбранной мощности сигнала помехи одного передатчика и позиционный шаг размещения средств требуют детального исследования для оптимизации информационно-технических, информационно-боевых (оперативно-технических), боевых (оперативно-тактических) показателей всей системы в целом.

Очевидно, что увеличение мощности модулей радиопомех будет усиливать эффект подавления, увеличивать кратность покрытия территории, сокращать количество элементов структуры и, в целом, удешевлять систему. Однако очевидно и то, что увеличение числа передатчиков усложняет борьбу противника с ней и повышает скрытность и живучесть системы, а также эффективность подавления АП СРНС, оснащенных управляемыми антенными решётками.

Опыт применения передатчиков помех типа «Поле 21» для подавления АП СРНС в различных условиях боевого применения показывает эффективность регулярного построения по принципу мозаичной сети с размерностью кластеров, определяемой используемой диаграммой направленности АФУ. Правильное пространственное распределение передатчиков помех и размещение, и ориентация их антенн обеспечивает перманентное подавление защищенных АП СРНС.

Развитие элементной базы высокочастотной микроэлектроники, внедрение SDR и USRP технологий, а также появление малога-

баритных и емких аккумуляторов открывают новые технологические пути решений данной задачи, а именно создание пространственно-распределенной системы подавления АП СРНС на основе компактных необслуживаемых передатчиков помех с автономными химическими источниками электропитания с программно-определяемыми значениями выходной мощности и структуры помехи, объединенных в дистанционно управляемую сеть.

Такое технологическое решение позволит применять систему в режиме взаимно коррелированных помех, что может свести практически на ноль эффективность управляемых антенных решеток и автокомпенсаторов АП СРНС. Интеграция такой системы с элементами автоматизированной ПВО существенно повысит защищенность военных и радиоэлектронных объектов.

Возможность централизованной координации использования УПРПНП и радиоэлектронных объектов другого назначения обеспечит высокий уровень устойчивости собственных систем управления войсками и оружием.

Литература

1. Ануфриев А.А., Чиркин П.М., Шипунов В.А. Анализ помехоустойчивости системы навигационно-временного обеспечения «НАВСТАР». В сборнике: инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации // Труды всеармейской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 42–51.
2. Монаков А.А. Теоретические основы радионавигации: учебник для вузов / А.А. Монаков. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 432 с.
3. Камнев Е. А. Радиоподавление помехозащищенной навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в интересах объектово-территориальной защиты. Дис. канд. техн. наук по спец. 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация». – М.: МАИ (НИУ), 2018. – 160 с.
4. Пантенков Д. Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 57–68.
5. Schmidt, G.T. (Independent Consultant, Lexington, Massachusetts), GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 1 (104), pp. 3-21.
6. Костромицкий С. М., Дятко А. А., Шумский П. Н. Создание эффективных помех системам глобальной навигации // *Базис*. 2019. № 1(5). С.14–20.

ANALYSIS OF THE «NAVSTAR SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEM OF THE USA AS AN OBJECT OF ELECTRONIC WARFARE»

Anufriev A.A.¹, Chirkin P.M.², Shipunov V.A.³

Keywords: orbital grouping, artificial earth satellite, armed conflict, unmanned aerial vehicle, correctable ammunition, combat mission, vulnerability, navigation signal receiver, consumer equipment, inertial navigation system.

Annotation

The aim of the work is to develop new approaches to radio suppression of signal receivers of the «Navstar» satellite radio navigation system, in connection with ongoing work to increase its noise immunity and improve organizational and technical solutions for its application.

The research method: Based on the analysis of solutions that ensure the noise immunity of the «Navstar» satellite radio navigation system, proposals should be developed to suppress radio navigation signal receivers to protect troops, weapons, military and special equipment from enemy weapons.

Results: the main features of solving the problem of radio suppression of SRNS consumer equipment in the context of transformation and militarization of their use are determined. Priority directions for the implementation of organizational and technical principles for the construction and management of a distributed navigation field suppression system for sustained suppression of receivers over a long period of time in the interests of territorial protection from enemy weapons, troops, military and special equipment are proposed.

Scientific novelty: it consists in obtaining numerical indicators of the radio suppression conditions of the «Navstar» SRNS consumer equipment when it is integrated with inertial navigation modules, ground and space add-ons.

References

1. Anufriev A.A., Chirkin P.M., Shipunov V.A. Analiz pomehustojchivosti sistemy navigacionno-vremennogo obespechenija «NAVSTAR». V sbornike: innovacionnaja dejatel'nost' v Vooruzhennyh Silah Rossijskoj Federacii. Trudy vsearmejskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 2022. S. 42–51.
2. Monakov A.A. Teoreticheskie osnovy radionavigacii: uchebnik dlja vuzov / A.A. Monakov. – Sankt-Peterburg: Lan', 2024. – 432 s.
3. Kamnev E. A. Radiopodavlenie pomehozashhishhennoj navigacionnoj apparatury potrebitelej sputnikovyh radionavigacionnyh sistem v interesah ob#ektovo-territorial'noj zashhity. Dis. kand. tehn. nauk po spec. 05.12.14 «Radiolokacija i radionavigacija». – M.: MAI (NIU), 2018. – 160 s.
4. Pantenkov D. G. Rezul'taty matematicheskogo modelirovanija pomehustojchivosti sputnikovyh radionavigacionnyh sistem pri vozdejstvii prednamerennyh pomeh // Uspehi sovremennoj radioelektroniki. 2020. № 2. S. 57–68.
5. Schmidt, G.T. (Independent Consultant, Lexington, Massachusetts), GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments, Giroskopiya i Navigatsiya, 2019, vol. 27, no. 1 (104), pp. 3-21.
6. Kostromickij S. M., Djatko A. A., Shumskij P. N. Sozdanie jeffektivnyh pomeh sistemam global'noj navigacii // BAZIS. 2019. № 1(5). S.14–20.

¹Alexey A. Anufriev, Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Warfare of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: irbis453@mail.ru

²Pavel M. Chirkin, Lecturer, Department of Electronic Warfare of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: 67-cccc@mail.ru

³Vladimir A. Shipunov, Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Warfare of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: colonel53@mail.ru

