

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ВОЗДУШНЫМ СУДАМ

Сухов А.В., д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФКУ НПО «СТиС» МВД России, гл. спец. ФГБУ «Институт стандартизации»

Пузийчук С.И., начальник центра ФКУ НПО «СТиС МВД России

В статье представлен анализ эффективности радиоэлектронного противодействия несанкционированным беспилотным воздушным судам, основанный на оценке информационного ресурса беспилотного воздушного судна в терминах энтропии покрытия. Информационный ресурс рассматривается как энтропия покрытия по радиоэлектронным показателям беспилотных воздушных судов в условиях внешних радиоэлектронных воздействий.

Для радиоэлектронного подавления задаются радиолинии управления беспилотными воздушными судами, радиолинии навигационных определений по космическим навигационным системам и радиолинии передачи телеметрии. Энтропия покрытия при этом с комплексных целевых позиций позволяет дать информационную оценку эффективности принятых мер по противодействию беспилотным воздушным судам. В целях получения количественных оценок потребовалось провести оценку бюджета радиоканалов, связанных с беспилотными воздушными судами.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, информационный ресурс, энтропия покрытия, радиолиния.

ЗАДАЧИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ВОЗДУШНЫМ СУДАМ

В настоящее время во всех сторонах активной деятельности человечества, связанной с применением технических средств, все большее применение находят беспилотные воздушные суда (БВС), позволяющие значительно облегчить решение поставленных технических задач, расширить круг решаемых технических проблем. Широкое применение БВС находят в военной области, но и в других сферах человеческой деятельности их применение становится все более востребованным, а в ряде случаев просто необходимым [1–3].

К распространенным задачам гражданских БВС можно отнести:

- ведение наблюдения за объектами – аэрофотографическая, тепловая инфракрасная, радиолокационная, многозональная и другие виды съемки;
- геофизическая съемка – аэромагнитная, аэрометрическая, аэроспектрометрическая – в результате выполнения которых получают цифровую информацию об исследуемых объектах;
- транспортировка и доставка грузов и средств в заданный район;
- ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи.

Решение задач, поставленных БВС, осуществляется оператором при их дистанционном управлении или путем автономных действий по заранее заложенной программе.

Но с использованием БВС решаются также и задачи, которые не могут быть согласованы с действующим законодательством. При этом БВС могут нарушать установленные правила полетов воздушных судов и не иметь определяемой законами государства регистрации. Также такие БВС могут являться угрозой жизни, здоровья и имущества граждан в том числе над местами проведения публичных (массовых) мероприятий. Эти БВС определим как **несанкционированные БВС**. В Приказе МВД России от 30 апреля 2020 г. № 252¹ указывается, что в этих случаях пресечение нахождения БВС в воздушном пространстве осуществляется посредством подавления или преобразования сигналов дистанционного управления БВС, воздействия на их пульта управления, а также повреждения или уничтожения БВС и приводится порядок действий должностных лиц органов внутренних дел.

¹ Приказ МВД России от 30 апреля 2020 г. № 252 «Об утверждении Порядка принятия решения о пресечении нахождения беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве в целях защиты жизни, здоровья и имущества граждан над местом проведения публичного (массового) мероприятия и прилегающей к нему территории, проведения неотложных следственных действий и оперативно-разыскных мероприятий и Перечня должностных лиц, уполномоченных на принятие такого решения».

Для выполнения поставленных БВС задач создаются наземные технические средства передачи-получения данных (НТС ППД), используемые для управления полетом и обмена данными о параметрах полета, служебной информацией и информацией о полезной нагрузке такого или таких ВС, и канал связи со службой управления воздушным движением [2, 4].

Наземная станция управления (НСУ) системы управления (СУ) БВС включает в свой состав человека-оператора и НТС ППД, основу которых составляют планшетный компьютер или ноутбук, приемопередатчик (ПП) и антенно-фидерное устройство (АФУ). Математическое обеспечение НТС ППД реализуется программным обеспечением для планирования полетного задания и отображения хода его выполнения. Сигнально-кодовые конструкции, формируемые в ПП, обеспечивают необходимую помехозащищенность радиоканалов.

Полетное задание может составляться автоматически по заданному контуру площадного объекта или по узловым точкам линейного объекта, может формироваться человеком-оператором для решения конкретных задач. Существует возможность проектирования полетных маршрутов, исходя из необходимой высоты полета и требуемого разрешения фотоснимков на местности. Для ряда задач и соответствующих типов БВС используется цифровая модель местности. Оператор во время выполнения полета БВС имеет возможность оперативно выбрать необходимый район посадки или оперативно посадить беспилотник с «красной» кнопки наземной системы управления. По команде человека-оператора (внешнего пилота) могут быть заданы вспомогательные операции для БВС.

В состав БВС для обеспечения навигации и обеспечения полета может быть включен автопилот, который должен управлять маршрутом движения воздушного судна и выполнением специальных операций, например съемкой местности или объектов с заданным межкадровым временным интервалом.

Автопилот должен определять координаты БВС, как правило, с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) или осуществлять ориентирование в пространстве с использованием инерциальных датчиков. Требуемая точность определения координат зависит от технического задания на решаемые БВС задачи.

Полезная информация, получаемая БВС, данные телеметрии о текущем состоянии бортовой аппаратуры, координаты и результаты по решаемым в ходе полета задачам передаются с бортового ПП на НТС ППД.

Противодействие БВС осуществляется с целью недопущения противоправного применения БВС, недопущения решения БВС противоправных задач. При этом в условиях, не связанных с ведением боевых действий, применение зенитных комплексов огневого поражения БВС не является оправданным. Вполне обоснованными способами противодействия БВС являются способы радиоэлектронного подавления радиоканалов БВС таких, как навигационные радиоканалы, каналы радиоуправления, телеметрии, передачи целевой информации. Средства РЭП могут создавать шумовые и имитационные помехи на БВС.

Схема воздействия комплекса радиоэлектронного противодействия (РЭП) на БВС показана на рис. 1.

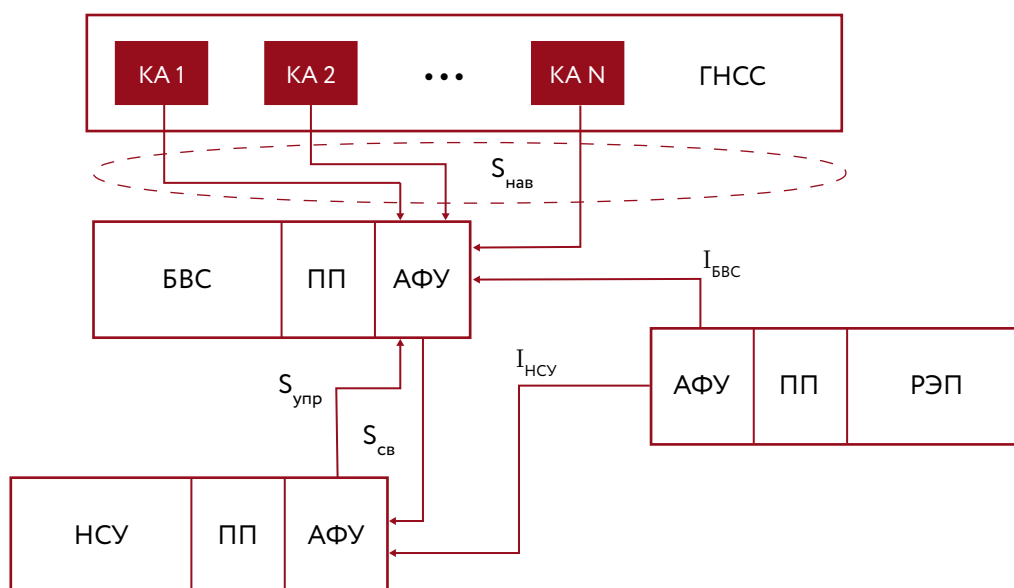


Рис. 1. Схема воздействия комплекса радиоэлектронного противодействия на БВС

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

КА1, КА2, ... КАН – космические аппараты группировки ГНСС, используемые для навигационных определений;

$S_{\text{упр}}$ – линия управления и контроля с НСУ на БВС;

$S_{\text{св}}$ – линия связи БВС с НСУ;

$S_{\text{нав}}$ – сигналы с КА ГНСС, образующие навигационное поле;

РЭП – система радиоэлектронного противодействия;

$I_{\text{БВС}}$ – помехи от системы РЭП на БВС;

$I_{\text{НСУ}}$ – помехи от системы РЭП на НСУ.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БВС, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСТОЙЧИВОСТЬ К РАДИОЭЛЕКТРОННОМУ ПОДАВЛЕНИЮ

Как правило, БВС используют радиоканалы управления и контроля, радиоканалы передачи полезной информации и радиоканалы навигации СНС.

В целях организации РЭП требуется задать диапазоны характеристик БВС, определяющие энергетические характеристики радиоканалов. Поскольку в данной статье не рассматриваются беспилотные летательные аппараты военного назначения, то основное внимание уделим тем характеристикам и их значениям, которые могут ожидать у БВС, используемым в условиях мирного времени.

Классификация БВС приведена в ГОСТ Р 57258–2016². В частности рассматриваемых в статье объектов вводятся следующие определения:

3.2.1 воздушное судно (aircraft): летательный аппарат, поддерживаемый в атмосфере за счет его взаимодействия с воздухом, за исключением случаев взаимодействия с воздухом, отраженным от поверхности земли или воды.

3.2.6 легкое дистанционно пилотируемое воздушное судно (light remotely piloted aircraft): дистанционно пилотируемое воздушное судно с взлетной массой менее 150 кг.

3.2.7 малое беспилотное воздушное судно (small unmanned aircraft): беспилотное дистанционно пилотируемое воздушное судно с взлетной массой менее 30 кг».

Сведения по существующим видам БВС широко распространены [5, 6]. В табл. 1 приведена классификация БАС, разработанная Международной ассоциацией беспилотных систем (AUVSI).

Диапазон значений технических характеристик, достаточно распространенных БВС, приведен в табл. 2.

² ГОСТ Р 57258–2016 Системы беспилотные авиационные. Термины и определения.

Для средств РЭП необходимо определить диапазоны частот и параметры сигналов радиоканалов БВС для радиоподавления.

Характеристики радиосигналов ГНСС, создающих навигационное поле, приведены в табл. 3 [7].

Для приема сигналов от ГНСС могут использоваться антенны с коэффициентом усиления от 0 до 3 дБи, то есть либо всенаправленные антенны, либо антенны с полусферической диаграммой направленности.

Для приема-передачи радиосигналов по другим радиоканалам могут быть использованы диапазоны радиочастот, предназначенные в соответствии с таблицей распределения полос радиочастот в РФ³ для воздушной подвижной (ОР) службы радиосвязи (ВПРС), предназначенной для связи, в том числе связи, касающейся координации полетов главным образом вне национальных или международных гражданских воздушных трасс.

Для воздушной подвижной (ОР) службы радиосвязи на частотах от 3 МГц до 144 МГц определен 21 диапазон. Но в этих диапазонах можно передавать только узкополосные сигналы. На частотах, начиная со 144 МГц и выше, уже можно обеспечить необходимую скорость передачи информации, то есть можно передавать и видеoinформацию.

Диапазон частот 144–146 МГц выделен ВПРС для РЭС любого назначения («СИ» – полоса радиочастот совместного пользования), а диапазон частот 146–148 МГц выделен ВПРС для "ПР" – полоса радиочастот преимущественного пользования РЭС, предназначенными для нужд государственного управления, в том числе президентской связи, правительственной связи, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения

В соответствии с примечанием 127 к таблице радиочастот РФ⁴, для СУ БВС могут использоваться полосы радиочастот 230–299,3 МГц, 308,4–328,6 МГц и 344,4–390 МГц, которые преимущественно используются воздушной подвижной службой (ОР).

Также БВС могут использовать радиодиапазоны, выделенные для беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth, ISM), но в этих диапазонах возможна организация связи только на небольших расстояниях из-за низкой мощности передатчика, поскольку эти средства, как правило, работают в диапазонах частот, которые выделены и на первичной основе, и на вторичной основе другим службам, и создание радиопомех РЭС этим службам недопустимо.

Основные показатели средств РЭП приведены в табл. 4 [8].

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2019 г. № 1203-47. «Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации».

⁴ Там же.

Таблица 1

Значения характеристик БВС, определяющих энергетику радиолиний для РЭП

КАТЕГОРИЯ БВС	РАДИУС ДЕЙСТВИЯ, (км)	ВЫСОТА ПОЛЕТА (м)	ВРЕМЯ ПОЛЕТА (ЧАСЫ)	МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЗЛЕТНЫЙ ВЕС MTOW (кг)
Nano	<1	100	<1	<0,025
Micro	<10	250	1	<5
Mini	<10	150 to 300	<2	<25
Close Range	10 to 30	3 000	2 ... 4	150
Short Range	30 to 70	3 000	4 ... 6	200
Medium Range	70 to 200	5 000	6 ... 10	1 250
Medium Range Endurance	>500	8 000	10 ... 18	1 250
Low Altitude Deep Penetration	>250	50 ... 9 000	0,5 ... 1	350
Low Altitude Long Endurance	>500	3 000	>24	<25
Medium Altitude Long Endurance	>500	14 000	24 ... 48	1 500
High Altitude Long Endurance	>2000	20 000	24 ... 48	5 000
Stratospheric	>2000	>20 000	>48	2 500
Exo-Stratospheric	>2000	>30 500	>48	2 500

Таблица 2

Диапазон технических характеристик БВС

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	МИНИМАЛЬНО УЧИТЫВАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	МАКСИМАЛЬНО УЧИТЫВАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
Высота полета, м	70–150	5000
Радиус применения, км	0,5	100/300°
Максимальная продолжительность полета, ч	0,5	4
Крейсерская скорость, м/с	10	100
ГНСС	ГЛОНАСС (Россия), GPS/NAVSTAR (США), Beidou (Китай), Galileo (ЕС)	

* Радиус применения (с БВС-ретранслятором).

Таблица 3

Диапазонов частот спутниковых систем связи

ГНСС	НЕСУЩИЕ ЧАСТОТЫ, МГц	ПОЛОСА СИГНАЛА, МГц	МОЩНОСТЬ СИГНАЛА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, дБВт
GPS	1575,42; 1227,6; 1176,45	2,046 ... 25,5	157,0–167,5
ГЛОНАСС	1602 + k · 0,5625 k = -7 ... +6; 1601,995; 1248,06; 1246 + k · 0,4375 k = -7 ... +6; 1202,025	1,022 ... 20,46	161–161,5
Galileo	1575,42; 1278,75; 1207,14; 1176,45	4,092 ... 30,7	158–170,4
Beidou	1575,42; 1561,098; 1268,52; 1207,14; 1176,45	4,092 ... 32,7	156,9–169,4

Таблица 4

Основные показатели отечественных средств РЭП

СРЕДСТВО РЭП	ДИАПАЗОНЫ РАДИОЧАСТОТ	МОЩНОСТЬ ПЕРЕДАТЧИКА, ЭИМ*, Вт	ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ, км
Переносной комплекс противодействия БВС «Купол-ПРО»	Каналы связи, управления и навигационного обеспечения БВС	80*	2
Переносной комплекс противодействия БВС «Луч-ПРО»	Одновременное воздействие на каналы связи, управления и навигационного обеспечения БВС	–	4
Объектовый комплекс радиоэлектронного противодействия БВС «Таран-ПРО»	433 МГц ISM; 915 МГц ISM; 1,2 ГГц; 1,5 ГГц ISM; 2,4 ГГц ISM; 5,8 ГГц ISM / WiFi – Каналов GPS, ГЛОНАСС, Галилео (L5, E5ab, L1, E1, G1, G3), Beidou		2,7
Многофункциональный комплекс противодействия беспилотным летательным комплексам «Сапсан-Бекас»	В диапазоне работы средств связи и управления БВС	100	4
Стационарный комплекс противодействия БВС «Рубеж-Автоматика»	Частотные каналы связи, управления и навигационного обеспечения	–	4
Транспортируемый комплекс противодействия БВС «Бастион-Автоматика»	Частотные каналы спутниковой навигации, связи и управления		2
Персональный комплекс борьбы с дронами	1575; 2400–2480 МГц (настраивается в диапазоне от 400 до 2700 МГц)	20	2
Станция борьбы с радиоуправляемыми авиационными моделями	225–510, 800–900, 1100–1800, 2200–2500, 4400–5850 МГц	50	5
Ручной комплекс борьбы с беспилотными летательными комплексами «Гарпун-1»	Диапазоны частот каналов управления и навигации БВС (GPS / ГЛОНАСС / Beidou), 1600–2400, 5725–5875.	–	Дальность действия ограничена дальностью визуального контроля БВС.
Ручной комплекс борьбы с беспилотными летательными комплексами «Гарпун-2М» – многоканальный постановщик помех	433 МГц (430–450 МГц); 868 МГц (860–873 МГц); 900 МГц (902–928 МГц); 1200 МГц (1166–1281 МГц); 1,57542 / 1,602 ГГц; 2,4 ГГц (2,4–2,484 ГГц); 5,2 ГГц (5,15–5,35 ГГц); 5,8 ГГц (5,725–5,875 ГГц).	–	1,5
Комплекс обнаружения и защиты от беспилотных летательных аппаратов «Стриж-3»	433 МГц; 868 МГц; 915 МГц; 1600 МГц; 2400 МГц; 5800 МГц	5	1,5
Мобильный комплекс обнаружения и защиты от беспилотных летательных комплексов «Скворец»	433 МГц; 868 МГц; 900 МГц; 1,6 ГГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц	5	1,5
Средство противодействия БВС «REX-2»	430 МГц, 900 МГц, 1,3 ГГц, 1,8 ГГц, 2,4 ГГц, 2,6 ГГц, 4 ГГц,	–	2
Система «Репеллент»	от 200 до 6000 МГц	канала передачи данных от 300 до 500 Вт; подсистемы канала управления и телеметрии от 500 до 1000 Вт	10 ... 30

* ЭИМ – эффективная излучаемая мощность.

Для управления специальными малыми БВС (например, такими как RQ-7B Shadow 200, RQ-11B Raven, RQ-16T-Hawk и др.), как правило, организуется радиоканалы управления в режиме прямой видимости с НСУ или с ретранслятором:

- каналы в L (1,4–1,85 ГГц), S (2,2–2,5 ГГц), C (4,4–5,85 ГГц), и Ku (15,15–15,35 / 14,4–14,83 ГГц) диапазонах – основные каналы управления;
- в УКВ диапазоне (220–400 МГц) – резервные каналы управления;
- спутниковый канал (как правило используется низкоорбитальная спутниковая система связи Iridium обеспечивающая возможность использования небольших антенн) L-диапазона (1,616–1,6265 ГГц) – резервный канал управления, устанавливаемый опционально на отдельных БВС.

Ширина полос частот каналов СУ БВС [8]:

- канал «вверх» в диапазонах L, S, C и Ku: в режиме фиксированной частоты – 300–700 кГц; в режиме шумоподобного сигнала (ШПС) – 0,7–28 МГц;
- канал «вниз» в диапазонах L, S, C и Ku: 3–20 МГц;
- каналы «вверх»/ «вниз» в УКВ диапазоне: 25 кГц.

Чувствительность приемников находится в пределах: 127–134 дБВт.

Скорости передачи данных в СУ БВС:

- до 20 кбит/с – в линии «вверх»; 200 кбит/с – в линии «вниз» (при передаче только телеметрии); 1,6–12 Мбит/с – в линии «вниз» в диапазонах L, S, C и Ku (при передаче телеметрии совместно с данными от оптико-электронных систем при визуальном управлении оператором);
- 2,4–16 кбит/с в линиях «вверх»/«вниз» в УКВ диапазоне;
- до 2,4 кбит/с в линиях «вверх»/«вниз» по спутниковой линии L диапазона (для спутниковой системы связи Iridium).
- в диапазонах L, C, S, Ku в каналах «вверх»/«вниз»: 5–15 Вт;
- в УКВ диапазоне в каналах «вверх»/ «вниз»: 15–25 Вт.

Для связи с БВС используются типы модуляции сигналов: BPSK, QPSK (DQPSK, SOQPSK), 2FSK, GMSK. Возможно использование режима сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) в пределах разрешенной к использованию полосы частот в диапазонах S, C и Ku. С целью обеспечения необходимой помехоустойчивости применяется помехоустойчивое кодирование сигналов. Скорости кода $R = 1/2, 2/3, 3/4$.

Обобщая приведенный материал и с учетом [8] можно определить требования к основным характеристикам систем РЭП:

1. Требования по радиочастотам:

- диапазон частот, в котором ведется подавление: 200–6000 МГц;
- подавление выделенных полос частот:
 - а) частоты типовых каналов нелегализованных средств радиосвязи: 20–80, 135–174, 400–470 МГц;
 - б) частоты типовых каналов авиационной радиосвязи в диапазоне 220–400 МГц;
 - в) частоты типовых каналов коммерческих систем связи: 430–460, 860–880, 902–928 МГц, CDMA800 (850–894 МГц), GSM900 (890–915, 935–960 МГц), GSM1800 (1710–1880 МГц), 3G (2110–2170 МГц), 4G (725–770, 780–960, 925–960 МГц; 1,7–2,2, 2,5–2,7 ГГц), Wi-Fi (2,4–2,5, 4,9–6,425 ГГц);
 - г) частоты каналов «вниз» спутниковых систем связи (ССС) L-диапазона: Инмарсат (1518–1660,5 МГц), Иридиум (1616–1626,5 МГц);
 - д) частоты каналов ГНСС: GPS (L1 – 1575,42 МГц / L2 – 1227,6 МГц / L5 – 1176,45 МГц), ГЛОНАСС (L1 – 1602 МГц / L2 – 1246 МГц), BeiDou (B1 – 1561,098 МГц / B2 – 1207,14 МГц / B3 – 1268,52 МГц), Galileo (E1 – 1575,42 МГц / E6 – 1278,75 МГц / E5 – 1191,79 МГц);
- дальность подавления приемных трактов:
 - а) средств связи на НСУ: до 10–25 км;
 - б) средств связи на БВС: до 30–50 км;
 - в) канала ГНСС на БВС: до 30–50 км;
- энергопотенциал воздействия:
 - а) на канал передачи данных «БВС – НСУ»: 300–500 Вт;
 - б) на канал управления «НСУ – БВС» и телеметрии «БВС – НСУ»: 500–1000 Вт;
 - в) на канал ГНСС на БВС: 300–1000 Вт;
- тип формируемых помех:
 - а) для каналов связи и управления: прицельная и скользящая по частоте, заградительная по диапазону частот;
 - б) для канала навигации по ГНСС: прицельная по частоте и структуре сигнала с целью формирования ложной навигационной информации (по открытым частотам ГНСС); шумовая прицельная по частоте (по открытым или закрытым частотам ГНСС).

Можно выделить отличительные характеристики небоевых систем РЭП, которым посвящен рассматриваемый материал [8]:

- относительно невысокий энергопотенциал, обеспечивающий требования электромагнитной совместимо-

сти (ЭМС) со службами радиосвязи на рабочих частотах за пределами зоны подавления;

- использование направленных антенных систем, обеспечивающих подавление радиоканалов БВС в заданных секторах;
- обнаружение несанкционированных БВС с использованием средств видеоконтроля и неизлучающих средств радиоконтроля (пассивная радиолокация);
- использование подавления каналов управления БВС с использованием помех, совпадающих по частоте и структуре с широко распространенными средствами связи с малыми БВС (квадрокоптерами);
- идентификация каналов управления, основанная на автоматическом определении типа протокола из числа широко распространенных, использование известных уязвимостей в этих каналах;
- использование режимов подавления и навязывания ложных режимов для закрытых каналов навигации ГНСС с формированием шумовых помех, прицельных по частоте, и формирование ложных сигналов имитирующими помехами, настроенными на частоты и структуру навигационных сигналов, для открытых каналов ГНСС («спуфинг», подмена сигналов ГНСС).

ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС РАДИОКАНАЛОВ БВС В УСЛОВИЯХ РЭП

Зададим информационный ресурс (ИР) несанкционированных БВС как энтропию покрытия [9–11] от способности использования имеющихся радиоканалов в условиях радиоэлектронного противоборства.

Для определения ИР необходимо оценить характеристики радиоканалов несанкционированного БВС и определить их предельные значения. Далее информационный ресурс по своему значению покажет степень эффективности РЭП. Информационный ресурс $I_{БВС}$ определим как сумму энтропий покрытия по каждому радиоканалу БВС:

$$I_{БВС} = \sum_{i=1}^m H_i, \tag{1}$$

где m – количество радиоканалов БВС, по которым ведется подавление

H_i – ‘энтропия покрытия i -го радиоканала БВС

$$H_i = \begin{cases} \ln\left(\frac{I_i}{P_{\max i БВС}}\right), & I_i \geq P_{\max i БВС} \\ 0, & I_i < P_{\max i БВС} \end{cases}, \tag{2}$$

где I_i – мощность помехи от средства РЭП на входе приемника i -го радиоканала БВС, СУ БВС; $P_{\max i БВС}$ – максимальное значение мощности полезного сигнала i -го радиоканала на входе приемника БВС, СУ БВС.

Для радиоканалов с ШПС выражение (2) примет вид:

$$H_i = \begin{cases} \ln\left(\frac{I_{Fi}}{E_{\max i БВС}}\right), & I_i \geq P_{\max i БВС} \\ 0, & I_i < P_{\max i БВС} \end{cases}, \tag{3}$$

где I_{Fi} – плотность мощности помехи от средства РЭП в полосе частот сигнала БВС на входе приемника i -го радиоканала БВС, СУ БВС; $E_{\max i БВС}$ – максимальное значение энергии полезного сигнала i -го радиоканала на входе приемника БВС, СУ БВС.

Уровень энергии помехи от РЭП должен обеспечить вероятность ошибочного приема символов цифровых систем $BER = 0,1 \dots 0,5$ [12]. Расчеты энергетики радиоканалов нежелательно вести для модели распространения радиоволн в свободном пространстве, потому что следует учитывать влияние земной поверхности при прохождении радиоволн в районе наземных средств РЭП и НСУ. Поэтому следует использовать методику, которая приведена в Рекомендации МСЭ-R P.528–3 [13] и позволяет рассчитать бюджет радиоканала с использованием экспериментальных кривых распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. Для расчетов по данной методике была разработана программа на языке программирования VBA.

Рассмотрим три сценария работы, определяемых типами средств БВС и РЭП:

- 1) БВС типа Mini – РЭП типа «Репеллент» и мобильная система РЭП с меньшей мощностью передатчика;
- 2) БВС типа Micro – портативная система РЭП;
- 3) каналы ГНСС БВС типа Mini – мобильная система РЭП.

Этих сценариев достаточно для выявления особенностей применения существующих средств РЭП в целях противодействия БВС.

Характеристики БВС и средств РЭП, необходимые для проведения расчетов информационной эффективности по указанным сценариям, представлены табл. 5.

В первую очередь необходимо рассчитать потери энергии сигнала в радиоканалах. При расчетах радиоканалов в направлениях от наземных радиоэлектронных средств (РЭС) на БИС и от БВС на наземные РЭС, как указывалось выше, была использована модель радиоканала, описанная в [13]. Для ориентировочных расчетов иногда используют модель распространения радиоволн в свободном пространстве [14], но при этом не учитываются ни зоны Френеля, ни затухания в атмосфере и прочие потери. И следует отметить, что *разница в расчетах по этим моделям для рассматриваемых радиоканалов может достигать 15 дБ, что недопустимо.*

Таблица 5

Характеристики БВС и средств РЭП, необходимые для проведения расчетов информационной эффективности

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ТИП БВС				
	MINI		MICRO	MINI/КАНАЛ GPS	
Фс, МГц	145	380	2400	5500	1575,42
БВС э.и.и.м.*, дБВт	14	11,8	10	5	-
НСУ э.и.и.м., дБВт	14	14	-10	-10	-
Расстояние D1 НСУ-БВС, км	0,5; 1,0; 10	0,5; 1,0; 10	0,3; 1,0	0,3; 1,0	-
h1 НСУ, м	10	10	1,5	1,5	-
Высота БВС, м	300	150	70	70	150
РЭП э.и.и.м., дБВт	27,0	7,0	7,0	7,0	7,0
h _{РЭП} , м	10	10	1,5	1,5	10
D _{РЭП-БВС} , км	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

* Эквивалентная изотропно излучаемая мощность – (э.и.и.м.).

Для расчетов энергетике радиоканалов между наземными РЭС использована модель радиоканала, представленная в Рекомендации МСЭ-R P.1546–5 [15]. Но может быть использована и Рекомендация МСЭ-R P.452 [16]. Однако для расчетов прохождения сигналов по Рекомендации МСЭ-R P.452 требуется знание профиля высот трассы распространения радиоволн.

Следует отметить, что расчеты проведены для оптимальных систем приема сигналов для предельных энергетических ситуаций и могут рассматриваться в качестве *потенциально достижимых результатов*.

Кроме уровня помехи от средства РЭП необходимо еще рассчитать требуемый уровень помехи, обеспечивающий, как указывалось выше, вероятность ошибочного приема символов цифровых систем $BER = 0,1 \dots 0,5$. В этих целях воспользуемся следующим выражением для вероятности ошибки, приходящейся на двоичное значение информации в сообщении [17]:

$$BER = P_{\text{ош}} = 1 - F(H_2), \quad (4)$$

где $F(\cdot)$ – интеграл вероятности:

$$F(x) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz, \quad (5)$$

аргументом функции в (4) является:

$$H = \sqrt{E_b / (N_0 + I)}, \quad (6)$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит информации в сообщении;

N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума;

I – энергия помехи от средства РЭП в полосе частот радиоканала.

По заданной вероятности ошибки BER методом итераций для выражения (4) находится аргумент функции (6). Поскольку для вероятностей ошибки $0,1 \dots 0,5$ требуется уровень помехи, сравнимый с уровнем сигнала и даже превышающий его, а уровень полезного сигнала должен более чем на порядок, то собственными шумами и шумом внешней среды N_0 в выражении (6) можно пренебречь.

Энтропия покрытия (ЭП) средства РЭП может быть определена как суммарная энтропия покрытия противодействия на БВС и НСУ. Результаты расчетов информационного ресурса средств РЭП представлены в табл. 6.

Для наглядности для вероятности ошибки $BER=0,1$ промежуточные расчеты представлены в табл. 7, а на рис. 2 приведены диаграммы значений ЭП.

Наиболее эффективным является подавление каналов управления БВС. Но при подавлении радиоканалов БВС может перейти в режим автономной работы. Другим эффективным способом является подавление канала передачи полезной информации от БВС на НСУ. Эти радиоканалы требуют затрат больших ресурсов по полосе частот и энергетике для обеспечения требований по информативности.

Таблица 6

Информационный ресурс средств РЭП

BER = 0,1						
ТИП СРЕДСТВ	РЭП-БВС		РЭП-НСУ		ОБЩАЯ ЭП	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
РЭП1-Mini1	21,5	41,0	0,9	0,0	22,4	41,0
РЭП2-Mini2	1,4	22,1	0,0	0,0	1,4	22,1
РЭП3-Micro1	22,2	33,1	0,0	0,0	22,2	33,1
РЭП4-Micro2	22,3	33,2	0,0	0,0	22,3	33,2
BER = 0,3						
РЭП1-Mini1	13,7	33,2	0,0	0,0	13,7	33,2
РЭП2-Mini2	0,0	14,3	0,0	0,0	0,0	14,3
РЭП3-Micro1	14,5	25,3	0,0	0,0	14,5	25,3
РЭП4-Micro2	14,5	25,4	0,0	0,0	14,5	25,4
BER = 0,45						
РЭП1-Mini1	1,3	20,8	0,0	0,0	1,3	20,8
РЭП2-Mini2	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	1,9
РЭП3-Micro1	2,1	12,9	0,0	0,0	2,1	12,9
РЭП4-Micro2	2,1	13,0	0,0	0,0	2,1	13,0

Таблица 7

Результаты расчетов энергетики радиоканалов

КАНАЛЫ РЭП-БВС											
	MINI1			MINI2			MICRO1		MICRO2		GPS
Fc, МГц	145	145	145	380	380	380	2400	2400	5500	5500	1575.42
D _{НСУ-БВС} , км	0.5	1	5	0.5	1	5	0.3	1	0.3	1	-
L _{НСУ} , дБ	79.31	87.22	98.83	87.70	95.58	108.35	100.85	111.70	108.03	118.95	-
P от НСУ	-65.31	-73.22	-84.83	-73.70	-81.58	-94.35	-110.85	-121.70	-118.03	-128.95	-158.50
L от РЭП	72.98	72.98	72.98	81.40	81.40	81.40	97.75	97.75	104.91	104.91	108.06
I от РЭП	-45.99	-45.99	-45.99	-74.41	-74.41	-74.41	-90.76	-90.76	-97.92	-97.92	-74.41
Отн. С/Ш	1.642	1.642	1.642	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
I треб	-67.47	-75.38	-86.99	-75.86	-83.74	-96.50	-113.00	-123.85	-120.19	-131.11	-160.65
КАНАЛЫ РЭП-НСУ											
Fc, МГц	145	145	145	380	380	380	2400	2400	5500	5500	
D _{НСУ-БВС} , км	0.5	1	5	0.5	1	5	0.3	1	0.3	1	
L _{БВС-НСУ} , дБ	70.25	82.28	99.37	82.09	92.55	107.95	98.43	110.68	105.59	117.84	
P от БВС	-56.27	-68.30	-85.39	-70.33	-80.79	-96.19	-88.43	-100.68	-98.60	-110.85	Рек. 1546-5
L от РЭП	84.53	93.35	132.87	90.69	100.39	143.76	118.48	136.53	127.42	145.79	
I от РЭП	-57.54	-66.36	-105.88	-83.70	-93.40	-136.77	-111.49	-129.54	-120.43	-138.80	
Отн. С/Ш	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	
I треб	-58.43	-70.46	-87.55	-72.49	-82.94	-98.35	-90.59	-102.83	-100.75	-113.00	

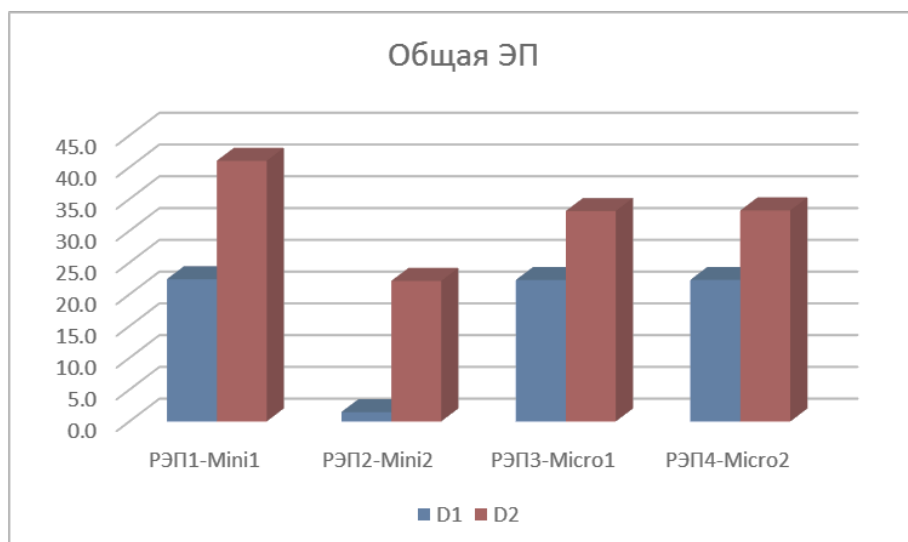
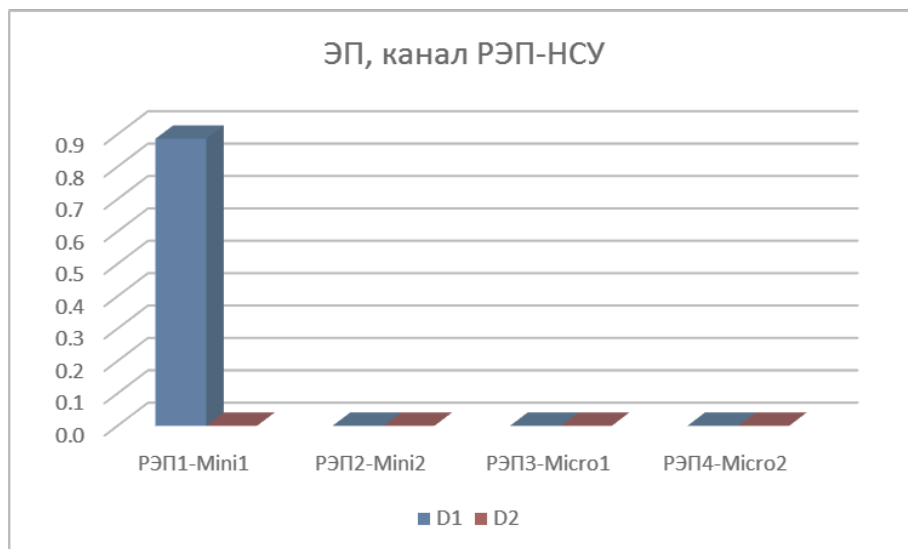
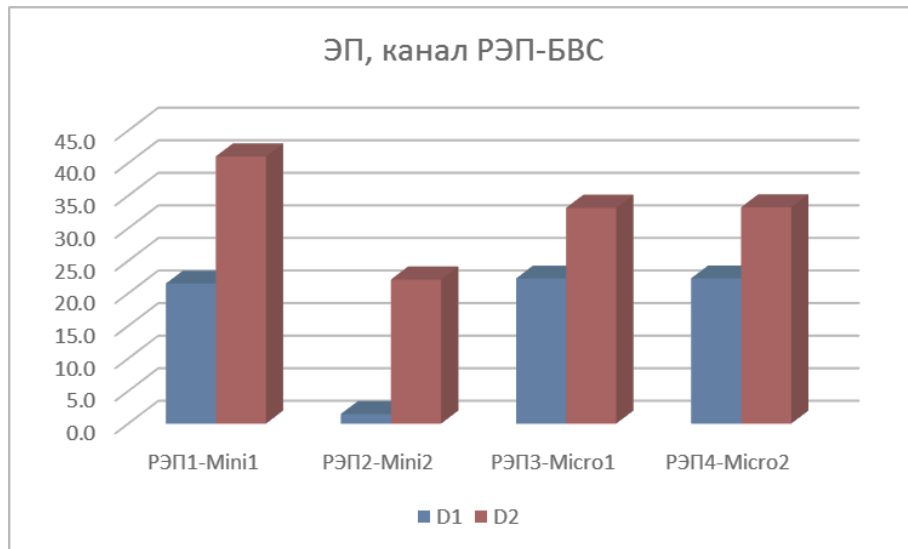


Рис. 2. Значения ЭП для BER = 0,1

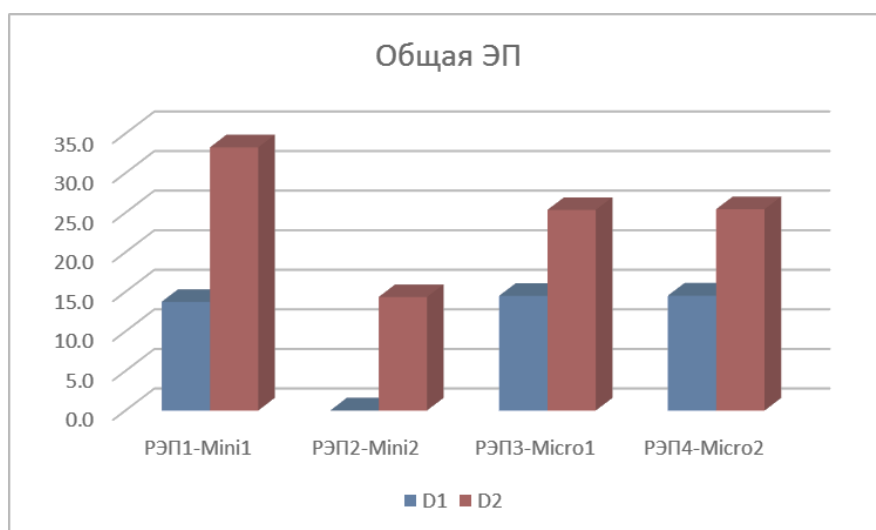


Рис. 3. Значения общей ЭП для BER = 0,3

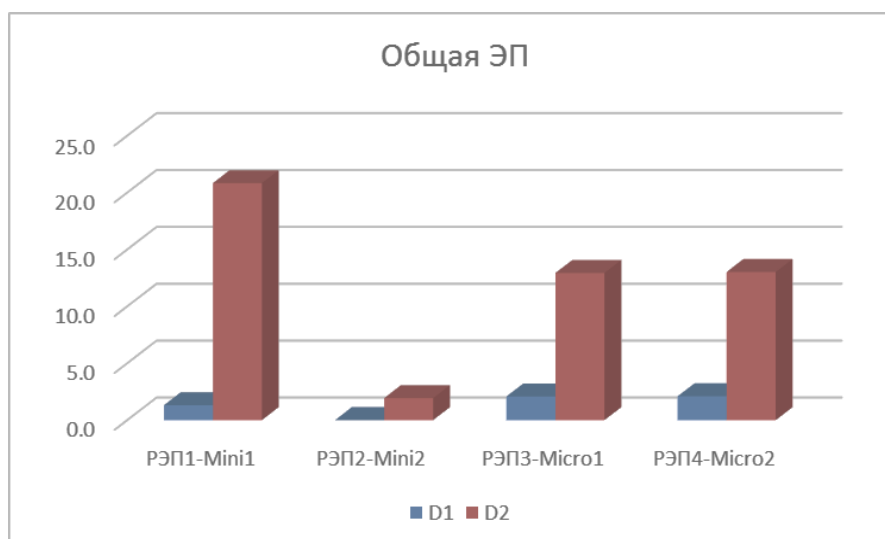


Рис. 4. Значения общей ЭП для BER = 0,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наибольший информационный ресурс имеют средства РЭП типа системы «Репеллент», устанавливаемой на колесном шасси и имеющий наибольшие энергетические характеристики. И по частотным диапазонам, и по типам подавляемых радиоканалов она превосходит другие средства РЭП. Информационный ресурс системы «Репеллент» в зависимости от тактической обстановки меняется от 20 до 45 децидит.

Мобильные средства РЭП имеют достаточный информационный ресурс от 1,5 до 20 децидит только по действию на БВС.

Портативные средства РЭП имеют меньший информационный ресурс и способны обеспечивать достаточный

уровень помех на БВС для вероятности двоичной ошибки в районе 0,1.

Все рассмотренные средства РЭП показали хорошее подавление навигационных каналов. Даже для высокой вероятности ошибки, равной 0,45, информационный ресурс очень высокий и составляет не менее 80 децидит для большинства систем РЭП.

Необходимо также отметить, что расчеты энергетики радиоканалов, связанных с БВС, недопустимо вести по широко распространенной модели распространения радиоволн в свободном пространстве. Проведенные сравнительные расчеты показали превышения таких оценок энергетики радиоканалов от расчетов по модели радиоканала, приведенной в Рекомендации МСЭ-R P.528, на 15 дБ и более.

Список использованных источников и литературы

1. Ломакин М.И., Докукин А. В., Сланчак О. Ю. [и др.] Оценка и оптимизация качества мониторинга территориально-распределенных объектов, проводимого с помощью беспилотных летательных аппаратов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 3(67). С. 39–42.
2. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Оценка качества беспилотных авиационных систем мониторинга окружающей среды // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2017. № 6 (40). С. 4.
3. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений при управлении динамическими объектами // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2015. № 5 (27). С. 2.
4. Сухов А.В., Величко П.С. Конюшев В.В., Левин А.И. Информационный ресурс в общих технических требованиях к информационно-коммуникационной технологии "цифровая полиция" // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 3 (67). С. 56–68.
5. Открытый обзор продукции российских производителей специальных средств и техники для обеспечения общественной безопасности: Научно-технический информационный сборник. Вып. 2 (9). – М.: ФКУ НПО «СТиС» МВД России, 2021. – 68 с.
6. Жданов Ю., Овчинский В. Полиция будущего. [Электронный ресурс]. М.: 2018. 166 с. – URL: <http://ipa-russia.org/библиотека-ассоциации/> (дата обращения: 04.10.2022).
7. Сигналы глобальных навигационных систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/680304/> (дата обращения: 04.10.2022).
8. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
9. Решетников В.Н., Савилкин С.Б., Сухов А.В. Мониторинг частотного ресурса геостационарных спутников-ретрансляторов с использованием энтропии покрытия // Программные продукты и системы. 2017. № 1. С. 119–123.
10. Сухов А.В. Оценка информационного ресурса радионавигационных станций в условиях помех от средств мобильной связи // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 36–45.
11. Sukhov A.V. Dynamics of information flows in a control system of a complex technological system // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2000. Vol. 39. No 4. P. 592–600.
12. Эффективность системы военной связи: учеб.-метод. пособие / И. О. Мачихо [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. – 102 с.
13. Рекомендация МСЭ-Р P.528–3. Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. ИТУ. Женева. 2013.
14. Рекомендация МСЭ-Р P.525–3 Расчет ослабления в свободном пространстве. ИТУ. Женева. 2016.
15. Рекомендация МСЭ-Р P.1546–5. Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. ИТУ. Женева. 2013.
16. Рекомендация МСЭ-Р P.452–16. Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц. ИТУ. Женева. 2015.
17. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

INFORMATION ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF RADIO INTERFERENCE UNMANNED AERIAL VEHICLE

Sukhov A.V., doctor of technical sciences, professor, leading scientific researcher FGI SPA SET of the MIA RF, Chief Specialist, FSBI «RSI»

Puziichuk S.I., head of the center FGI SPA SET of the MIA RF

The article presents an analysis of the effectiveness of electronic countermeasures to unauthorized unmanned aircraft (UA), based on the evaluation of the UA information resource in terms of covering entropy. The information resource is considered as the covering entropy according to the radio-electronic indicators of the UA in the conditions of external radio-electronic influences.

For radio-electronic suppression, the UA control radio lines, the navigation definition radio lines for space navigation systems and the telemetry transmission radio lines are set. At the same time, the covering entropy from complex target positions allows us to give an informational assessment of the effectiveness of the measures taken to counteract UA. In order to obtain quantitative estimates, it was necessary to assess the budget of the radio channels.

Keywords: unmanned aerial vehicles, information resource, covering entropy, radio line.

References

1. Lomakin M.I., Dokukin A. V., Slanchak O. Yu. [et al.] Ocenka i optimizaciya kachestva monitoringa territorial'no-raspredeleenny'x ob'ektov, provodimogo s pomoshh'yu bespilotny'x letatel'ny'x apparatov. Informacionno-e'konomicheskie aspekty' standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. 2022, no. 3(67), pp. 39–42.
2. Buryi A.S., Shevkunov M.A. Ocenka kachestva bespilotny'x aviacionny'x sistem monitoringa okružhayushhej sredy. Informacionno-e'konomicheskie aspekty' standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. 2017, no. 6(40), pp. 4.
3. Buryi A.S., Shevkunov M.A. Intellektual'ny'e sistemy' podderzhki prinyatiya reshenij pri upravlenii dinamicheskimi ob'ektami. Informacionno-e'konomicheskie aspekty' standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. 2015, no. 5(27), pp. 2.
4. Sukhov A.V., Velichko P.S. Konyshhev V.V., Levin A.I. Informacionny'j resurs v obshhix texnicheskix trebovaniyax k informacionno-kommunikacionnoj tehnologii "cifrovaya policiya". Informacionno-e'konomicheskie aspekty' standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. 2022, no. 3(67), pp. 56–68.
5. Otkry'ty'j obzor produkcii rossijskix proizvoditelej special'ny'x sredstv i texniki dlya obespecheniya obshhestvennoj bezopasnosti: Nauchno-texnicheskij informacionny'j sbornik. Vy'p. 2 (9). Moscow, FKU NPO "STiS" MVD Rossii Publ., 2021, 68 p.
6. Zhdanov Yu., Ovchinskij V. Policiya budushhego [Elektronny resurs]. Moscow, 2018, 166 p. – URL: <http://ipa-russia.org/biblioteka-associacii/> (Accessed 12 October 2022).
7. Signaly' global'ny'x navigacionny'x sistem [Elektronny resurs]. – URL: <https://habr.com/ru/post/680304/> (Accessed 12 October 2022).
8. Makarenko S.I. Protivodejstvie bespilotny'm letatel'ny'm apparatam: Monografiya. Sankt-Peterburg, Naukoemkie tehnologii Publ., 2020, 204 p.
9. Reshetnikov V.N., Savilkin S.B., Sukhov A.V. Monitoring chastotnogo resursa geostacionarny'x sputnikov-retranslyatorov s ispol'zovaniem e'ntropii pokry'tiya. Programmny'e produkty' i sistemy, 2017, no. 1, pp. 119–123.
10. Sukhov A.V. Ocenka informacionnogo resursa radionavigacionny'x stancij v usloviyax pomex ot sredstv mobil'noj svyazi. Pravovaya informatika, 2019, no. 1, pp. 36–45.
11. Sukhov A.V. Dynamics of information flows in a control system of a complex technological system. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2000, vol. 39, no 4, pp. 592–600.
12. Machixo, I.O., [et al.]. E'ffektivnost' sistemy' voennoj svyazi : ucheb.-metod. Posobie. Minsk, BGUIR Publ., 2017, 102 p.
13. Recommendation ITU-R P.528–3. Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands. ITU. Geneva, 2013.
14. Recommendation ITU-R P.525–3. Calculation of free-space attenuation. ITU. Geneva, 2016.
15. Recommendation ITU-R P.1546–5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. ITU. Geneva, 2013.
16. Recommendation ITU-R P.452–16. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz. ITU. Geneva, 2015.
17. Varakin L.E. Sistemy' svyazi s shumopodobny'mi signalami. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985, 384 p.