

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ВОЗДУШНОЙ СВЯЗИ

Сулима А. А.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-51-57

Ключевые слова: воздушно-наземная радиосвязь, пространственно-временная обработка сигналов, кодирование, фазированная антенная решетка.

Цель: выполнение анализа существующих и разработка новых способов повышения помехозащищенности методами пространственно-временной обработки сигналов, увеличения энергетического потенциала с помощью управляемого вычислителем луча диаграммы направленности фазированной антенной решетки в направлении вызываемого объекта на объектах фронтовой авиации. Интеграция полученных решений в существующие комплексы связи.

Результаты: полученные результаты позволили повысить уровень помехозащищенности комплекса в среднем на 10 ДБ, что обеспечивает устойчивую работу систем связи в сложной помеховой обстановке и на больших дальностях боевого применения. Реализация описанных в статье способов в комплексах связи, установленных на действующих объектах оперативно-тактической авиации позволила значительно повысить надежность доведения команд управления, устойчивость межобъектового обмена и ситуационную осведомленность пилота.

Научная новизна: разработаны алгоритмы установления и поддержания связи в сложной помеховой обстановке с реализацией элементов когнитивного радио. Впервые выполнена интеграция нескольких описанных способов повышения помехозащищенности связи в одном комплексе.

Введение

Как показали последние события в мире, радиосвязь становится важным элементом на театре военных действий. При этом значительно выросли возможности средств РЭБ потенциального противника, а потеря связи при выполнении ВКС боевого задания приводит к снижению оперативности доведения приказов и снижению скорости реакции объектов управления на поле боя, что в итоге может приводить к невыполнению боевых задач и поражению объектов и подразделений. В связи с этим встает вопрос повышения помехозащищенности каналов связи и комплексов связи обеспечивающих их, а также внедрения новых аппаратных и комплексных решений. В статье рассмотрены варианты повышения помехозащищенности комплексов связи, а также способы построения системы, не уступающей зарубежным аналогам по параметрам: помехозащищенность, разведзащищенность и надежность связи.

При этом комплексы связи, разрабатываемые в обеспечение повышения данных качеств, должны удовлетворять требованиям по минимально возможным массогабаритным характеристикам и максимально возможной

автоматизации процессов установления и ведения связи.

При проектировании новых систем связи необходимо учитывать постоянно растущие возможности систем РЭР и РЭБ противника, рост плотности компоновки БРЭО самолета и соответственно усложнение ЭМС для комплекса связи, рост требований к массогабаритным характеристикам и функциональному наполнению, в связи с чем требования по помехозащищенности комплекса являются критической многопараметрической задачей, включающую в себя как новые подходы к архитектуре комплекса, аппаратные и алгоритмические методы повышения помехозащищенности и методы отстройки от помех. Перспективный комплекс связи также должен включать в себя технические решения с учетом сохранения их актуальности на промежуток от 15 лет. Разработка комплексов связи нового поколения является наиболее сложной и многопараметрической научно-технической задачей в области создания средств телекоммуникации, в связи с чем требуется рассмотрение различных путей технической реализации новых требований.

При этом, основными требованиями к комплексам связи, которые могут позволить

¹ Сулима Алексей Александрович, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, АО «НПП «Полет», г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: onti@npp-polyot.ru

считать их перспективными, является улучшение массогабаритных характеристик одновременно с появлением новых функциональных возможностей, повышением помехозащищенности по сравнению со средствами, стоящими на вооружении. Помехозащищенность комплекса определяется как минимально допустимое соотношение сигнал/шум при котором обеспечивается функционирование каналов связи с заданной вероятностью ошибок. Соответственно повышение помехозащищенности может выполняться несколькими методами, в частности снижением уровня наводимых помех на вход приёмника (складывающихся из шумов в эфире и шумов в антенно-фидерном тракте и собственных шумов аппаратуры), повышением уровня полезного сигнала на входе приемника (может достигаться повышением уровня мощности передатчика, и использования направленных антенн), а также использованием помехоустойчивых кодов и эффективных сигнально-кодовых конструкций [1].

Варианты повышения помехозащищенности комплексов связи

Вариантами аппаратного решения этой задачи в составе единого комплекса является создание новой архитектуры системы связи с переходом на интегрированную модульную структуру, с использованием единой унифицированной помехозащищенной шины для объединения составных частей, минимизация дублирования исполняемого функционала, широкое использование различных типов SMART-антенн (в частности АФАР) и реализация решений комплекса на базе технологии программно-определяемого и когнитивного радио.

Комплекс связи включающий все вышеперечисленные решения в настоящее время разрабатывается на предприятии АО «НПП «Полет» [2]. С целью повышения помехозащищенности комплекса связи и снижения уровня влияния внутрибортовых помех в нем реализованы такие решения как переход на оптоволоконные тракты между модулями цифровой обработки и усилителями, и между иными составными частями комплекса. Подобный подход должен решить сразу три проблемы, первая это снижение массы, вторая это улучшение внутрибортового ЭМС, а также снижение уровня шумов в трактах от иного бортового

оборудования. Все составные части комплексов разработаны по принципам, модульности, открытой архитектуры, перепрограммируемости, что обеспечивает высокий модернизационный потенциал и возможность сохранения паритета с техническими решениями потенциального противника. Натурные эксперименты показали, что уровень внутрибортовых помех наводимый на антенно-фидерный тракт объекта составляет от 10 до 80 мкВ, в зависимости от диапазона, при реализованной чувствительности приемника от 1 до 2 мкВ, что в итоге полностью нивелирует высокую чувствительность используемых приемников. Использование ВОЛС для объединения составных частей комплекса позволяет снизить уровень шума, вызванного проблемами ЭМС на объекте на входе приемника практически до нуля [3], что позволяет значительно увеличить соотношение сигнал/шум и соответственно достоверность информации, а также повысить эффективную дальность и помехозащищенность связи.

Кроме того, при создании комплексов связи важнейшей задачей является алгоритмическая составляющая работы комплекса, в частности это переход на технологию когнитивного радио (на первом этапе внедрения, это алгоритм с адаптивным выбором частоты), а также использование новых решений в части антенн и использование АФАР для широкого диапазона длин волн, с реализацией методов, повышающих помехозащищенность комплекса, таких как, метод Кейпона (для оценки направлений на абонентов) и метод Аламоути [1].

Адаптация системы и реализация режимов когнитивного радио заключаются в ее автоматическом приспособлении к условиям окружающей среды [4], в том числе к существующей помеховой обстановке, за счет проведения следующих процедур:

- непрерывное сканирование по выделенным частотам, когда нет данных для передачи;
- оценка наличия помех с помощью мониторинга радиочастотного спектра;
- посылки на вызываемый объект кратковременной служебной информации, состоящей, например, из адресов получателя и источника информации, координат и параметров движения источника информации, номера частоты следующего сеанса связи,

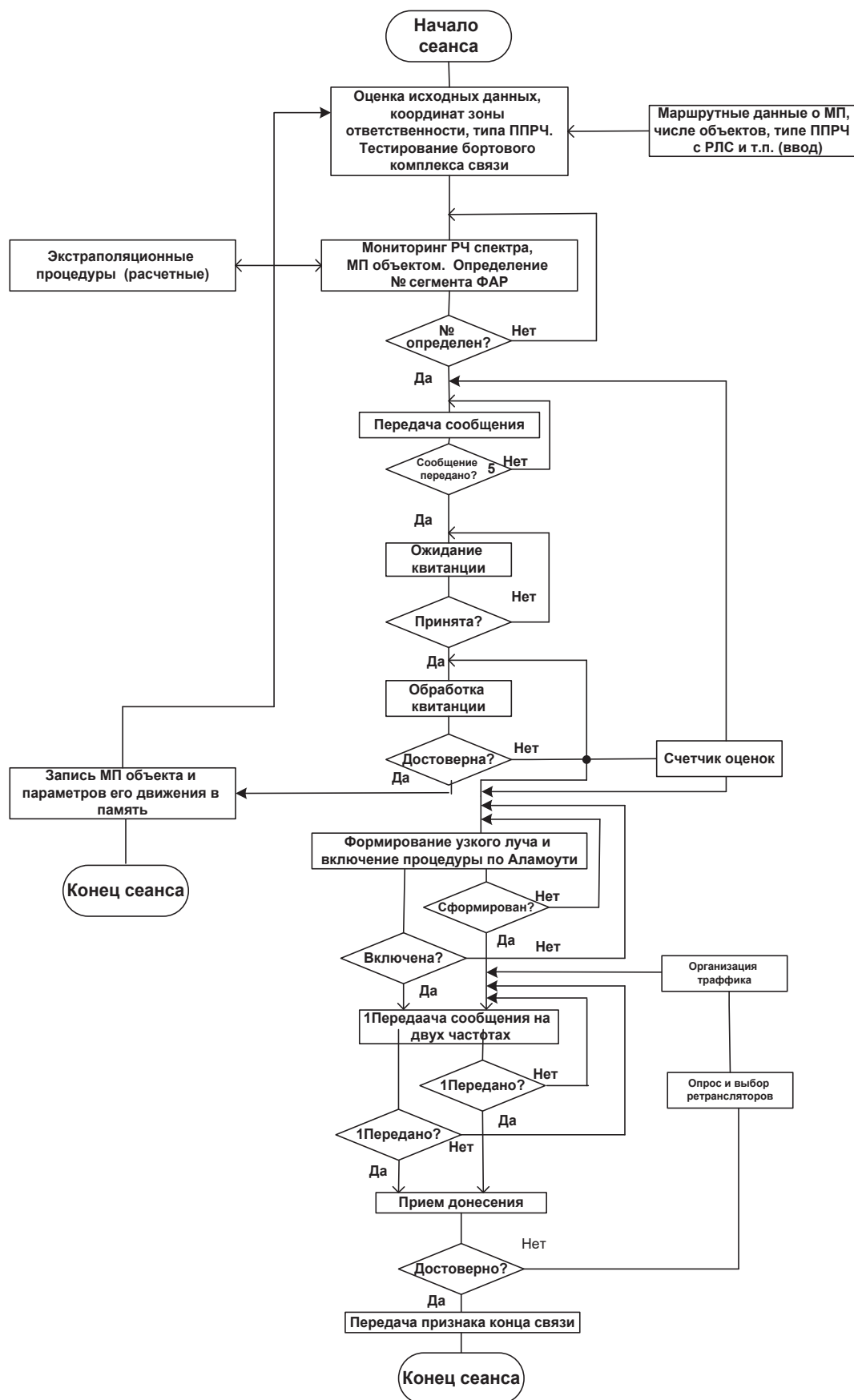


Рис. 1. Структурная схема алгоритма организации связи

набор предпочтительных частот для сканирования ранжированных по приоритетам и величины скорости передачи информации;

- прием ответной квитанции на служебную информацию, состоящей, например, из адресов получателя и источника информации, номера частоты следующего сеанса связи и величины скорости передачи информации;
- оценка битовой ошибки на основе сравнения содержания сообщений и анализа состояния используемого радиоканала на основании данной информации;
- составление прогноза загруженности радиоканалов и помеховой обстановки на используемых радиочастотах;
- определение местоположения вызываемого абонента по полученным координатам и параметрам движения вызываемого абонента в ответном сообщении или принятым от внешних систем сообщению, например, методом экстраполяции устанавливается в нужном направлении главный луч передающей антенны (или излучающих элементов АФАР);
- при влиянии помехи на достоверность связи выдача вызываемому абоненту сообщения об интервале частот, занимаемой помехой, и переходе на другую частоту и системное время новой связи, а также оценка оптимальных частот для приема сообщений от собеседника;
- прием квитанции о подготовке вызываемого абонента на переход на другую вероятно -оптимальную на данный момент времени частоту и новую скорость передачи информации;
- динамическое изменение мощности излучения при работе между абонентами на небольшой дистанции.

В случае определения факта сокращения расстояния между абонентами решается задача плавного уменьшения мощности излучаемого радиосигнала, что приведет к энергосбережению с одной стороны, а с другой к снижению радиозаметности аппарата для радиотехнических разведок (адаптация по мощности).

Кроме того, в комплексе связи реализованы и иные технологии повышения помехозащищенности, такие как использование пространственного ресурса радиолинии, в тех

случаях, когда использование АФАР нецелесообразно.

Использование пространственного ресурса радиолинии – пространственного разнесения источников полезного сигнала и помех, приводящего к различиям в углах прихода полезной и помеховой радиоволн в точку приема. Такие различия можно использовать для пространственной режекции помехового излучения [5]. Пространственный фильтр строится при помощи антенной решетки с разнесенными в пространстве антенными элементами, суммирование антенных колебаний, в котором осуществляется таким образом, чтобы полезный сигнал в парциальных антенных колебаниях складывался, а помеховые колебания вычитались. Устройства пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), кроме борьбы с помехами, дают возможность увеличить частотный ресурс радиолиний, обеспечивая одновременный раздельный прием полезного сигнала, несущие частоты которого не совпадают. Число каналов (сигналов) при этом определяется количеством ветвей разнесения в адаптивной антенной решетке. При этом, на сегодняшний день в АО «НПП «Полет» создан комплекс связи в котором реализован цифровой приемник прямого усиления, что позволяет одновременно на одном приемнике обрабатывать сигналы разных частот (и соответственно использовать одну антенну для приема полезных сигналов на двух или трех рабочих частотах одновременно), что улучшает помехозащищенность комплекса за счет компенсации провалов в диаграммах направленности и повышения уровня принимаемого сигнала (MISO-система) даже при использовании всего двух приемных антенн [6]. Пример улучшения диаграмм направленности приведен на рисунках 2 и 3.

Из приведенных диаграмм видно, что использование описанного технического решения позволяет повысить уровень полезного сигнала на 6–8 дБ.

Снижение порога вынесения решения о приеме сигнала и применения в то же время «мощных» помехоустойчивых кодов, например турбо-кодов, представляющих собой параллельный каскадный блочный систематический код, способный исправлять ошибки, возникающие при передаче цифровой информации по каналу связи с шумами. Повышение помехоустойчивости системы связи при применении подобного типа кодирования вырастает

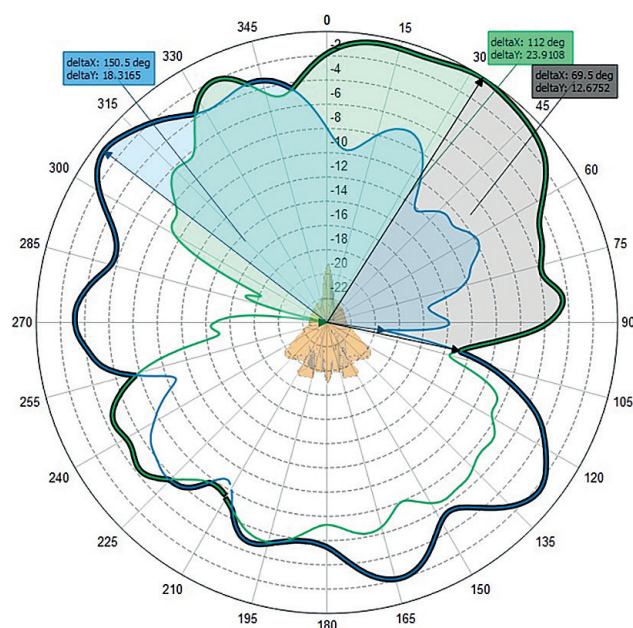


Рис. 2. Азимутальная диаграмма направленности излучателей МВ на частоте 100 МГц

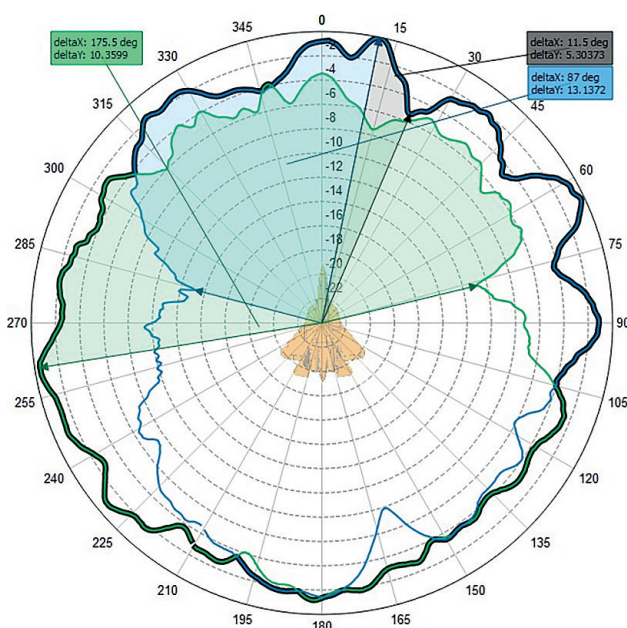


Рис. 3. Азимутальная диаграмма направленности излучателей МВ на частоте 400 МГц

— ··· — диаграмма направленности левой антенны;
— ··· — диаграмма направленности правой антенны;
— — — суммарная диаграмма направленности.

минимум на 2 дБ, по сравнению с традиционным в авиационной связи кодированием Рида-Соломона [7].

Использование одновременного излучения радиосигналов с двух антенн (двух разнесенных элементов ФАР) двух пар одинаковых радиосигналов в двух интервалах передачи таким образом, что при синфазном их сложении на приеме повысится отношение сигнал/шум (метод Аламути) [8]. В этом случае информационные биты сначала модулируются М-арным кодом. Затем бортовым кодирующим устройством формируется блок из двух символов s_1 и s_2 в каждой операции кодирования, который затем модулируется в бортовой аппаратуре связи и в форме двух радиосигналов посылается на две слабонаправленные передающие антенны СВЧ диапазона в соответствии с матрицей кодирования

$$s = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

В первом столбце матрицы (1) представлена последовательность, передаваемая в первом интервале передачи, во втором столбце — во втором интервале передачи. Первый ряд формулы (1) соответствует символам, передаваемым с первой антенны, второй ряд —

передаваемым со второй антенны. В течение первого символического интервала первая антенна передает сигнал s_1 и вторая антенна передает сигнал s_2 . В течение второго символического интервала первая антенна передает сигнал $-s_2^*$, а вторая антенна передает сигнал s_1^* , который является комплексной величиной от s_1 . Следовательно, с каждого из n элементов ФАР одного абонента системы на ФАР другого абонента на разных частотах передается одновременно информация, разнесенная в пространстве и во времени. Этим характеризуется пространственно-временное кодирование. Информационные последовательности радиосигналов, посылаемые вызываемому абоненту с первой и второй антенн, ортогональны. Для приема кодированного двухсимвольного сигнала в аппаратуре связи вызываемого абонента достаточно одного сегмента ФАР и пары временных отсчетов сигнальной смеси, более того, как было сказано ранее возможен прием сигналов передаваемых с двух передающих антенн на одну приемную антенну, без задействования ФАР (режим MISO).

Использование метода углового «сверхразрешения» на основе двухвибраторной антенны (метод Кейпона) при использовании АФАР

формировать минимум диаграммы направленности на помеху, а максимум на абонента. Если угловые координаты излучателей (β_m) абонента относительно нормали к сегменту ФАР известны, то задача разделения сигналов, излученных парой вибраторов, сводится к решению системы уравнений, составленных по одному отсчету аналогово-цифрового преобразователя (АЦП):

$$\begin{cases} y_1 = h_1(\beta_1)x_1 + h_1(\beta_2)x_2, \\ y_2 = h_2(\beta_1)x_1 + h_2(\beta_2)x_2, \end{cases}$$

где y_1, y_2 – выходные напряжения приемных антенн; x_1, x_2 – неизвестные комплексные амплитуды излученных сигналов, $h_1(\beta_m), h_2(\beta_m)$ – известные формы диаграмм направленности

антенных элементов сегментов ФАР в направлениях источников излучения на требуемого абонента системы воздушной радиосвязи.

Выводы

Указанные выше процедуры позволяют повысить помехозащищенность системы наземно-воздушной радиосвязи до 10 дБ даже при частичной реализации их в составе комплексов связи. В частности, подобные технические решения применены в комплексе С-111, используемом в качестве бортового комплекса связи в составе самолета пятого поколения Су-57 позволили обеспечить объект качественной и надежной связью даже в условиях активного радиоэлектронного противодействия.

Литература

1. Комяков А. В., Сулима А. А. «Инновационные решения в комплексах радиосвязи для перспективных летательных аппаратов» в тематический сборник «Связь в Вооружённых силах РФ». – 2021. – С. 174-175.
2. Комплекс бортовых средств цифровой связи самолета фронтовой авиации: патент РФ № 2762743 РФ, заявка № 2020134531; зарег. 22.12.21; Авторы А. А. Сулима и другие.
3. Lezekiel S. «Microwave Photonics: Devices and application», Wiley-IEEE Press, 2022.
4. Yonina C., H. Poor «Machine Learning and wireless communication», Cambridge University Press, 2023..
5. Семенов А. В., Кременцкий А. А. «Беспроводные системы связи с интеллектуальным реконфигурируемыми поверхностями», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024.
6. Leibo Liu, Shunming Zhang «Massive MiMO Detection Algorithm and VLSI Architecture», Springer 2024.
7. Белоус А., Шведов С. «СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия (Книга 2)», Техносфера, 2022 г.
8. Золотарёв В. В. «Кодирование для цифровой связи и систем памяти», Горячая линия–Телеком, 2004.

METHODS OF INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF AIR RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS

Sulima A. A.²

Keywords: air-ground radio communication, space-time signal processing, coding, noise immunity, phased array antenna.

Abstract

Objective: to analyze existing and develop new ways to increase noise immunity by spatiotemporal signal processing methods, increase energy potential using a computer-controlled beam pattern of a phased array antenna in the direction of the called object at front-line aviation facilities. Integration of the solutions received into existing communication complexes.

Results: the results obtained made it possible to increase the noise immunity level of the complex by an average of 10 DB, which ensures stable operation of communication systems in a complex interference environment and at long ranges of combat use. The implementation of the methods described in the article in communication complexes installed at existing operational and tactical aviation facilities has significantly improved the reliability of communicating control commands, the stability of inter-object exchange and situational awareness of the pilot.

² Alexey A. Sulima, Deputy head of the scientific and technical center, SC «NPP «Polet», Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: radio@mail.polyot.ru

Scientific novelty: Algorithms have been developed for establishing and maintaining communication in a complex interference environment with the implementation of elements of cognitive radio. For the first time, the integration of several described methods of increasing the noise immunity of communications in one complex has been performed.

References

1. Komjakov A. V., Sulima A. A. «Innovacionnye reshenija v kompleksah radiosvjazi dlja perspektivnyh letatel'nyh apparatov» v tematiceskij sbornik «Svjaz' v Vooruzhjonnyh silah RF». – 2021. – S. 174–175.
2. A. A. Sulima «Kompleks bortovyh sredstv cifrovoj svjazi samoleta frontovoj aviacii» patent RF № 2762743 RF, zjavka № 2020134531; zareg. 22.12.21;
3. Lezekiel S. «Microwave Photonics: Devices and application», Wiley-iEEE Press, 2022.
4. Yonina C., H. Poor «Machine Learning and wireless communication», Cambridge University Press, 2023.
5. Semenov A. V., Kremenickiy A. A. «Besprovodnie sistemy svazy c intellektualnym rekonfiguriruemimi poverhnostiamy», MGTU im. N. E. Baumana, 2024.
6. Leibo Liu, Shunming Zhang «Massive MiMO Detection Algorithm and VLSI Architecture», Springer 2024.
7. Belous A., Shvedov S. «SVCHE-elektronika v sistemah radiolokacii I svazy. Tehnicheskaya enciklopedia (Kniga 2)». Tehnosfera, 2022.
8. Zolotarjov V. V., «Kodirovanie dlja cifrovoy svyazi i system pamayty» Gorjachaja linija–Telekom, 2004.

