

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОЙ РАДИОСВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК И АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛОВ**Сулима Алексей Александрович**

заместитель начальника научно-исследовательского отделения АО «НПП «Полет».

E-mail: onti@npp-polyot.ru

Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пл. Комсомольская, д. 1.

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения помехозащищённости методом увеличения энергетического потенциала в направлении вызываемого объекта. Приведён вариант повышения помехозащищённости с использованием методов адаптивной авиационной связи с помощью фазированной антенной решётки системы воздушной радиосвязи, управляемой бортовым вычислителем летательного аппарата, эффективность и способы применения данного метода. Рассмотрены способы обработки сигнала с использованием алгоритмов Аламути и Кейпона при работе систем с ФАР. Показаны преимущества антенн, построенных с использованием фазированных антенных решёток перед классическими всенаправленными антеннами. Смоделированы графические представления направленности линейных решёток в системе MATLAB для линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из пяти элементов.

Ключевые слова: радиосвязь, помехозащищённость, фазированная антенная решётка, эквалайзер, отношение сигнал/шум, метод Кейпона, метод Аламути.

Одним из основных параметров системы радиосвязи является помехозащищённость и связанные с ней разведзащищённость и надёжность связи. Улучшение этих взаимосвязанных между собой параметров достигается путём совмещения с помощью программных модулей, обеспечивающих процедуры технологии «когнитивное радио», пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), автоматического адаптивного ведения связи, осуществляемые в едином бортовом вычислителе.

Рассмотрим вариант организации авиационной адаптивной автоматической радиосвязи (рис. 1) в радиоканалах «борт–борт» на незакреплённых частотах (без частотного планирования), обеспечивающий надёжность передачи сообщений (0,98–0,999), экономию частотного ресурса за счёт применения технологии мониторинга радиочастотного спектра, разнесения каналов по частоте и времени, использования псевдослучайной перестройки рабочей частоты, одновременной адаптации по частоте, скорости передачи информации, мощности и трафику ретрансляции сообщений в «обход» помехи че-

рез автоматически выбранные бортовым вычислителем летательных аппаратов (ЛА) (рис. 1) [1, 2].

Указанные процедуры выполняются с помощью бортового вычислителя и четырёх приёмопередатчиков, представляющих из себя сдвинутые относительно друг друга на 90^0 фазированные антенные решётки (ФАР), которые образуют объединённую круговую диаграмму направленности (ДН) по азимуту и слабонаправленную — по углу места.

Известно [3], что для улучшения характеристик системы радиосвязи, в том числе — обеспечения заданной помехозащищённости, применяют остронаправленные адаптивные фазированные антенные решётки, которые улучшают условия приёма–передачи, снижают необходимую мощность излучения, повышают надёжность связи и устраняют опасность обнаружения сеанса связи с помощью средств радиотехнической разведки из-за малого уровня боковых лепестков ДН антенны во всех направлениях, кроме направления на вызываемого абонента (улучшается разведзащищённость).

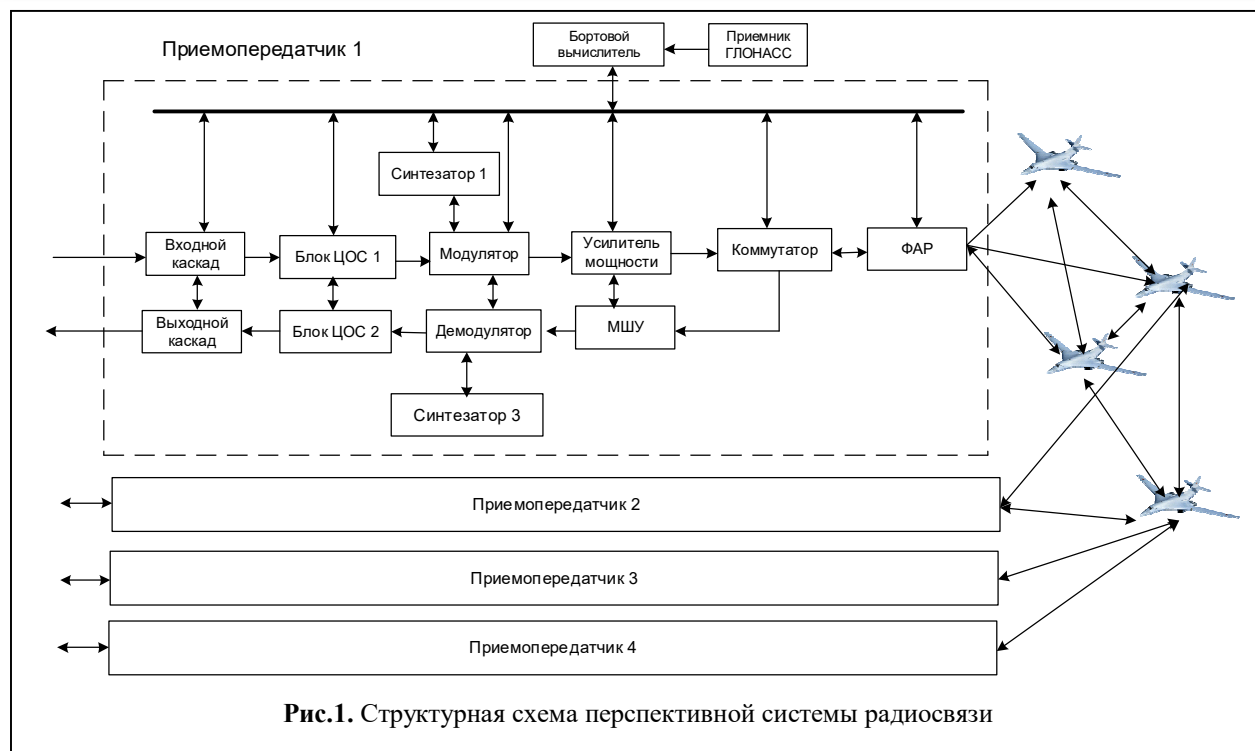


Рис.1. Структурная схема перспективной системы радиосвязи

В качестве одного из четырёх сегментов ФАР можно использовать неравномерную линейную решётку, состоящую из n излучателей, в которой амплитуды токов, управляемых с помощью сигналов управления вычислителя, подаваемых на фазовращатели, в её элементах будут различны, т.е. с неравномерной амплитудной характеристикой [5]. Диаграмму направленности любой эквидистантной неравномерной решётки можно представить в виде суммы множителей равномерных эквидистантных решёток. Данные множители будут иметь одинаковый вид и различаться только сдвигом по фазе ψ [6–8], при этом суммарная диаграмма будет выражаться:

$$\Theta = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\left(kd \cos\theta - \psi - m \frac{\pi}{n}\right)\right)}{N \sin\left(\frac{1}{2}\left(kd \cos\theta - \psi - m \frac{\pi}{n}\right)\right)}, \quad (1)$$

где m — порядок лепестка; θ — угол луча; n — номер излучателя; k — волновой коэффициент равный $2\pi/\lambda$; d — расстояние между элементами решётки.

Если амплитудное распределение представлено в виде «приподнятого косинуса»:

$$I_n = I\left(p + \cos\left(\frac{\pi}{n}(N-1)\right) e^{-j(N-1)\psi}\right), \quad (2)$$

где p — величина пьедестала «приподнятого косинуса»; N — число излучателей, то получим выражение для электрического поля решётки:

$$E = B e^{-jk r_1} \sum_{N=1}^n \left(p + \cos\left(\frac{\pi}{n}(N-1)\right) \right) \times e^{j[(N-1)(kd \cos\theta - \psi)]}, \quad (3)$$

где B — амплитудный коэффициент, зависящий от вида излучающего элемента.

Распределение амплитуды (3) можно разложить по экспонентам:

$$\begin{aligned} & \cos\left(\frac{\pi}{n}(N-1)\right) e^{j[(N-1)(kd \cos\theta - \psi)]} = \\ & = \frac{e^{jb} + e^{-jb}}{2} e^{j[(N-1)(kd \cos\theta - \psi)]} = \\ & = \frac{1}{2} \left(e^{j\left((N-1)\left(kd \cos\theta - \psi + \frac{\pi}{n}\right)\right)} + e^{j\left((N-1)\left(kd \cos\theta - \psi - \frac{\pi}{n}\right)\right)} \right). \quad (4) \end{aligned}$$

Таким образом, получим выражение такое же, как и для равномерной решётки, но сдвинутое на $\pm \frac{\pi}{n}$, а значит, выражение для диа-

граммы направленности будет состоять из суммы диаграмм направленностей трёх равномерных решёток:

$$I_n = p \frac{\sin\left(\frac{n}{2}(kd \sin \theta - \sin \theta_m)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \sin \theta_m)\right)} + \frac{1}{2} \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\left(kd \sin \theta - \sin \theta_m + \frac{\pi}{n}\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(kd \sin \theta - \sin \theta_m + \frac{\pi}{n}\right)\right)} + \frac{1}{2} \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\left(kd \sin \theta - \sin \theta_m - \frac{\pi}{n}\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(kd \sin \theta - \sin \theta_m - \frac{\pi}{n}\right)\right)}. \quad (5)$$

В качестве примера на основе представленных выше формул для диаграмм направленности линейных решёток в системе MATLAB построены их графические представления для случая линейной эквидистантной антенной решётки, состоящей из пяти элементов. Проведенная оценка влияния различных расстояний между элементами равномерной решётки (5) показывает, что при увеличении расстояния между элементами лепестки сужаются и их количество увеличивается. На рис. 2 на оси абсцисс отложены угловые значения, равные произведению величины измеренного угла на π радиан $-\theta \times \pi$ рад, а по оси ординат — нормированная амплитудная характеристика диаграммы направленности в логарифмическом масштабе $-10\lg|F|$.

В системе радиосвязи с помощью бортового вычислителя и соответствующих узлов может быть организован временной параллельный метод сканирования диаграммой направленности антенны передающей и/или приёмных секций [9, 10], при котором угол наклона ДН антенны не зависит от частоты, что дает возможность работать в широкой полосе частот.

Использование ФАР для борьбы с помехами, поставленными средствами РЭБ противника, необходимо для

повышения энергетического потенциала радиолинии \mathcal{E}_n , сосредоточенного в направлении на вызываемый абонент, который определяется выражением:

$$\mathcal{E}_n = \frac{P \cdot L \cdot k}{P_{ш} \cdot g}, \quad (6)$$

где P — средняя мощность передающего устройства; L — потери мощности радиосигнала на трассе распространения радиоволн; k — суммарный коэффициент усиления передающей и приёмной антенн в направлении на вызываемого абонента; $P_{ш}$ — мощность тепловых шумов приёмника в эквивалентной полосе частот $\Delta f = 2\nu$; ν — скорость передачи информации; g — заданное отношение сигнал/шум по мощности для обеспечения требуемой достоверности передачи информации.

Из формулы (6) видно, что для борьбы с помехами необходимо использовать также следующие процедуры:

- увеличивать среднюю мощность передающего устройства, если сделать это позволяет его элементная база, энергетика и электромагнитная совместимость с другим бортовым оборудованием;
- уменьшать потери мощности радиосигнала на трассе распространения, выбирая диапазон рабочих частот в окнах прозрачности атмосферы;
- повышать коэффициент усиления

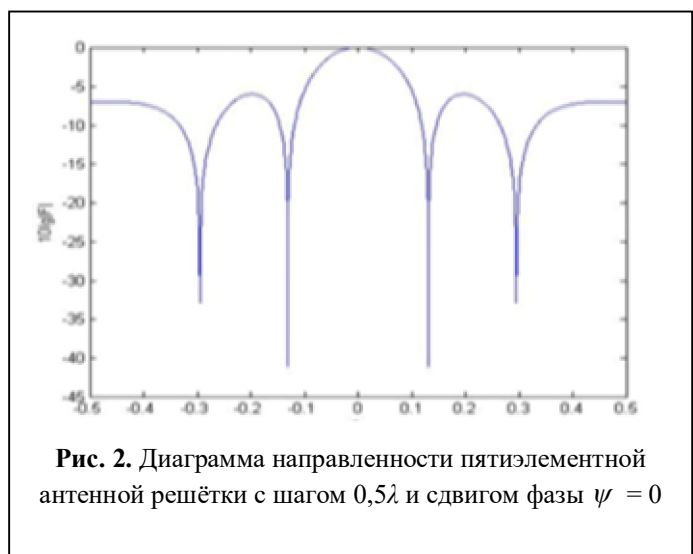


Рис. 2. Диаграмма направленности пятиэлементной антенной решётки с шагом $0,5\lambda$ и сдвигом фазы $\psi = 0$

передающей и приёмной антенн в направлении на вызываемого абонента за счёт использования на объекте нескольких секторных фазированных антенных решёток с управляемым главным лучом, образующих круговую диаграмму по азимуту, и построенных, например, по принципу конформной антенны [15];

- осуществлять пространственно-временную обработку сигналов на выходе элементов ФАР с использованием метода Аламоути, в котором с помощью программных процедур формируется в ДН антенны в направлении на помеху минимум коэффициента усиления [11, 12];

- уменьшать мощность тепловых шумов приёмника за счёт применения на его входе малошумящего усилителя, сокращения скорости передачи информации до оптимального значения, а, следовательно, и эквивалентной полосы [13];

- уменьшать заданное отношение сигнал/шум по мощности (снижать порог вынесения решения о приёме сигнала) за счёт применения «мощных» помехоустойчивых кодов [14].

Существуют методы «обхода» помехи с помощью использования абонентов-ретрансляторов с известными координатами и параметрами движения, полученными с выхода приёмника глобальной навигационной спутниковой системы и переданных всем пользователям системы радиосвязи.

Эти операции выполняются программно с помощью блока цифровой обработки сигналов (ЦОС), дополнительных модулей, конструктивно встраиваемых в бортовые вычислители и/или выполненных в виде отдельных узлов, входящих в «обрамление» указанных вычислителей. Бортовой вычислитель (рис. 1) может состоять из нескольких процессоров, объединённых общей шиной, соединённых между собой и с другими блоками системы с помощью локально-вычислительных сетей (ЛВС), которые могут состоять из нескольких интерфейсов со своими физическими линиями,

например, МКИО, Ethernet, RS-232 и других [16, 17].

Кодирование передаваемых данных может быть осуществлено, например, с помощью свёрточного кодирования по Витерби с мягким решением и использованием модифицированной решающей обратной связи [14]. Для борьбы с замираниями в условиях многолучевого распространения радиоволн может быть использован, например, широкополосный сигнал и приём разнесённых во времени сигналов по схеме «РЕЙК», в которой обеспечивается разделение и адаптивное весовое сложение сигналов в динамике профиля многолучёвости [14].

Необходимо выделить метод повышения помехозащищённости широкополосной радиолинии связи СВЧ диапазона, работающей в диапазоне частот с использованием метода пространственно-временного блочного кодирования, например, с помощью способа, предложенного Аламоути [12]. В нём обеспечивается одновременное излучение с двух антенн (двух разнесённых элементов ФАР) двух пар одинаковых радиосигналов в двух интервалах передачи таким образом, что при синфазном их сложении на приёме повысится отношение сигнал/шум. 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

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В первом столбце матрицы (7) представлена последовательность, передаваемая в первом интервале передачи, во втором столбце — во втором интервале передачи. Первый ряд формулы (7) соответствует символам, передаваемым с первой антенны, второй ряд — передаваемым со второй антенны. В течение первого

символьного интервала первая антенна передаёт сигнал s , вторая антенна передаёт сигнал s_2 . В течение второго символьного интервала первая антенна передаёт сигнал $-s_2^*$, а вторая антенна передаёт 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 передаётся одновременно информация, разнесённая в пространстве и во времени. Этим характеризуется пространственно-временное кодирование. Информационные последовательности радиосигналов, посылаемые вызываемому абоненту с первой и второй антенн СВЧ диапазона, ортогональны [13, 19].

Коэффициенты передачи радиосигналов с первой и второй антенн СВЧ диапазона можно выразить через $h_1(t)$ и $h_2(t)$ соответственно. Если принять постоянство этих коэффициентов в течение двух интервалов передачи информационной последовательности символов, то получим:

$$\begin{aligned} h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 &= |h_1| e^{j\theta_1} \\ h_2(t) = h_2(t+T) = h_2 &= |h_2| e^{j\theta_2} \end{aligned} \quad (8)$$

где $|h_i|$ и θ_i — амплитуда и фаза сигналов с i -й антенны СВЧ диапазона каждого абонента, передаваемых с соответствующей бортовой аппаратуры связи; $i = 1, 2$; T — длительность символа.

Для приёма кодированного по алгоритму Аламоути двухсимвольного сигнала аппаратурой связи вызываемого абонента достаточно одного сегмента ФАР СВЧ диапазона и пары временных отсчётов сигнальной смеси [19]. После приёма и преобразования в цифровую форму сигнальной смеси в двух последовательных временных интервалах может быть получена совокупность напряжений

$$\begin{cases} y_i = h_1 x_i + h_2 x_{i+1} + n_i \\ y_{i+1} = -h_1 x_{i+1}^* + h_2 x_i^* + n_{i+1} \end{cases} \quad (9)$$

где n_i и n_{i+1} — независимые комплексные переменные с нулевым значением, различающи-

ся лишь в том, что представляют собой аддитивный белый гауссовский шум в интервале времени $\{t, t+T\}$ соответственно; x_i и x_{i+1} — символы передаваемой последовательности, разделённой на пары, например, на смежные — чётный и нечётный [4].

Для оценки коэффициентов передачи радиосигналов с первой и второй бортовых антенн СВЧ диапазона $h_1(t)$ и $h_2(t)$ при составлении канала связи транслируются заранее известные пилот-сигналы, например, преамбула. Затем по этим данным в наземной аппаратуре связи вычисляются коэффициенты передачи $h_1(t)$ и $h_2(t)$ на интервале времени $\{t, t+T\}$ и осуществляется декодирование пары передаваемых символов, например, по критерию максимального правдоподобия.

Если местоположение источников сигнала и помех разнесено в пространстве, то повысить помехозащищённость системы можно, разделив их на основе пространственной селекции с помощью сегментов ФАР СВЧ диапазона по разным углам прихода радиосигналов. При поступлении сигналов и помех на сегменты ФАР СВЧ диапазона с разных угловых направлений, различающихся более, чем на ширину главного луча диаграммы направленности антенны, их можно разделить обычной пространственной селекцией. Например, при наличии ФАР СВЧ диапазона с узкой ДН антенны $(1-6)^\circ$ каждого сегмента [5] можно сформировать главный луч диаграммы направленности приёмной антенны, электронным способом сориентировать его в направлении максимальной проходящей мощности сигнала и минимизировать коэффициент усиления антенны в направлении на источник помех.

При различии в направлениях приёма сигнала и помехи, не превышающем ширины главного луча диаграммы направленности антенны сегмента ФАР СВЧ диапазона, а остальные их параметры совпадают, передаваемые радиосигналы могут быть разделены на основе методов углового сверхразрешения по процедуре Кейпона [11]. Рассмотрим этот метод на примере двухвibratorной антенны. Если уг-

ловые координаты излучателей (β_m) абонента относительно нормали к сегменту ФАР СВЧ диапазона известны, например, по точным данным о текущем местоположении вызываемого абонента, полученным с помощью обработки сигналов с выхода приёмника глобальных навигационных спутниковых систем, то задача разделения сигналов, излучённых парой вибраторов, сводится к решению системы уравнений, составленных по одному отсчёту 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 приёмных антенн; x_1, x_2 — неизвестные комплексные амплитуды излучённых сигналов; $h_1(\beta_m), h_2(\beta_m)$ — известные формы диаграмм направленности антенных элементов сегментов ФАР СВЧ диапазона в направлениях источников излучения на требуемого абонента системы воздушной радиосвязи [13, 15, 19].

Неизвестные угловые координаты источников излучения β_m определяются на этапе вхождения в связь при цифровом формировании диаграмм направленности антенных элементов сегментов ФАР СВЧ диапазона. Для этого можно применять нелинейные математические операции, например, процедуру Кейпона [11] в результате которой диаграммы направленности подобных антенн являются виртуальными функциями, будут крайне узконаправленными и остроконечными, что позволяет дополнительно повысить пространственную избирательность сегментов ФАР СВЧ диапазона по сравнению с классической обработкой посредством преобразования Фурье [11]. Характерно, что передавать радиосигналы в данном случае может антенна с широкой (слабонаправленной) диаграммой направленности. Это особенно важно, поскольку при нелинейной обработке сигналов принцип взаимности не выполняется и воспроизвести столь же узконаправленные диаграммы направленности для передающей антенны на летательном аппарате невозможно. При организации радиолинии связи,

например, в сантиметровом диапазоне для использования предложенной технологии на ФАР конформного типа [15] можно создать большой разнос антенных элементов — до 10 длин волн [13, 15]. Это обеспечивает лучшую декорреляцию сигналов в режиме передачи. Алгоритм сверхразрешения по методу Кейпона при обработке сигналов в антенной решётке с неидентичными каналами приведён в работах [11, 12].

Операции формирования и обработки передаваемых и принимаемых сигналов, например, по алгоритму Аламоути, осуществляются в блоках ЦОС и бортовых вычислителях соответственно. Процедуры борьбы с замираниями радиосигнала из-за эффекта отражения от поверхности Земли и «формирования» виртуальной сверхузкой ДН антенны, например, по методу Кейпона, производятся программно в блоке ЦОС и бортовом вычислителе системы воздушной радиосвязи, которая состоит, например, из радиостанции СВЧ диапазона и соответствующей цифровой аппаратуры обработки и передачи данных. В радиостанции для создания широкополосного сигнала могут быть использованы, например: метод непосредственной модуляции сигнала промежуточной частоты фазоманипулированной последовательностью; псевдослучайная перестройка несущей частоты; малошумящий усилитель на входе приёмника для снижения его собственных шумов; виды модуляции, например, SR-FQPSK, формирующие непрерывную огибающую радиосигнала на выходе, что позволяет применять усилители мощности класса С и Д, имеющие высокий коэффициент полезного действия (более 50%).

При приёме «важной» информации энергетический потенциал нескольких сегментов ФАР СВЧ диапазона может быть объединён и направлен в сторону соответствующего абонента.

Сектор сканирования луча ДНА ФАР СВЧ диапазона может быть, например, по азимуту 360° , по углу места — практически от 0 до 180° (без учёта углов закрытия и особенностей

связи при углах места вблизи 90^0). Наведение ДНА на соответствующего абонента системы осуществляется путём нахождения пространственного вектора между двумя объектами системы и направления по нему центра ДНА сегмента ФАР СВЧ диапазона. Для этого с учётом тенденции (экстраполяции) движения с привязкой к единому всемирному времени используются точные координаты абонентов, вычисляемые по выходным сигналам приёмников глобальных навигационных спутниковых систем, например, ГЛОНАСС/GPS [21], либо путём получения информации от иных бортовых систем определения местоположения.

При совпадении направления пространственного вектора между двумя объектами системы с направлением на источник помех, положение которого определено в наземном вычислителе по результатам оценки достоверности принятой информации от абонента с помощью, например, процедуры Кейпона, указанными ранее процедурами обеспечивается заданная помехозащищённость.

Использование перспективной системы воздушной радиосвязи позволяет:

- повысить помехозащищённость передачи широкополосной информации в условиях сложной помеховой обстановки, многолучевого распространения радиоволн и связанных с ним частотно-селективных замираний путём увеличения энергетического потенциала системы за счёт формирования общей ДН антенны несколькими сегментами ФАР СВЧ диапазона в направлении на абонента с «важной» информацией совместно с пространственно-временным кодированием широкополосной информации, введения операций помехоустойчивого кодирования широкополосной информации, устранения взаимных помех с помощью различных методов разделения каналов, например, частотного или временного, сосредоточения энергетического потенциала с помощью сегментов ФАР на K направлениях ($K < n$), организации обмена данными между

абонентами одновременно по нескольким радиоканалам;

- обеспечить приём широкополосной информации не с одного, а одновременно с n направлений и, следовательно, расширение зоны управления и контроля, повышение объёма обрабатываемой и передаваемой потребителю информации в n раз;

- заменить существующие направленные антенны СВЧ диапазона, управляемые электромеханическим приводом, n -сегментами фазированных антенных решёток с быстрым электронным сканированием по азимуту и углу места, что повышает оперативность организации широкополосной радиолинии и улучшает показатели надёжности системы.

Выводы

Описанная модификация кодирования позволяет эффективно бороться с негативными последствиями межсимвольной интерференции цифровых сигналов, использующих модуляцию QPSK. Улучшение качественных показателей зависит от параметров канала передачи и от уровня шумов каскадов приёмника.

Литература

1. Пат. РФ № 2762743. Комплекс бортовых средств цифровой радиосвязи самолёта фронтовой авиации / Комяков А.В., Войткевич К.Л., Сулима А.А., Колобков А.В. Заявл. 20.10.2020; опубл. 22.12.21.
2. Сулима А.А., Зац П.А. Некоторые вопросы применения элементов искусственного интеллекта для организации систем связи вооружённых сил // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения». 2018. С. 133–136.
3. Комяков А.В., Сулима А.А. Инновационные решения в комплексах радиосвязи для перспективных летательных аппаратов / Связь в Вооружённых силах РФ. 2021. С. 174–175.
4. Сулима А.А., Зац П.А. Проблемы совместного использования пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в единых сетях обмена информации. Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в системах связи и управления», Калуга. 9–10 сентября 2021 г. С. 63–65.
5. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и её применение. М.: Фирма АКТИОН, 2011. 427 с.

6. Слюсар В. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2007. № 5. С. 78–83; № 6. С. 82–89.

7. Brown J. Artificial dielectrics having refractive indices less than unity. Proc. Inst. Elect. Eng (London), May 1953. Part IV. Vol. 100. No. 62R. Pp. 51–62.

8. Справочник по радиолокации в 4 т. / под ред. М.И. Скольника. М.: Сов. Радио, 1977. Т.2: Радиолокационные антенные устройства. 438 с.

9. Синани А.И., Алексеев О.С., Винярский В.Ф. Активные ФАР. Концепция построения и опыт разработки // Антенны. 2005. Вып. 2(93). С. 64–68.

10. Кашин В.А., Леманский А.А., Митяшев М.Б., Скосырев В.Н., Созинов П.А. Проблемы создания АФАР сантиметрового диапазона для мобильных многофункциональных радиолокаторов зенитных ракетных комплексов // Вопросы перспективной радиолокации / под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. С. 240–255.

11. Литвинов О.С. Алгоритм сверхразрешения по методу Кейпона при обработке сигналов в антенной решётке с неидентичными каналами // Антенны. 2004. № 8–9 (87–88). С. 72–79.

12. Alamouti S.M. Space-time block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Oct. 1998. Vol. 16. Pp. 1451–1458.

13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.:

пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

14. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / Под ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 126 с.

15. Вахитов М.Г., Клыгач Д.С. Моделирование конформной антенной решётки для беспилотного летательного аппарата // Журнал радиоэлектроники. 2021. №3. С. 1–12.

16. Эрглис К.Э. Интерфейсы открытых систем. М.: Горячая линия–Телеком, 2000. 256 с.

17. Мячев А.А. Интерфейсы средств вычислительной техники. Энциклопедический справочник. М.: Радио и связь, 1993. 350 с.

18. Беккиев А.Ю., Галеев Р.Г., Захаров П.Н., Сысоев Н.Н. Экспериментальные исследования адаптивного эквалайзера с использованием нейронных сетей для квадратурной модуляции со сдвигом в условиях многолучевого распространения радиоволн // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 3 (113). С. 97–101.

19. Слюсар В.И. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. № 8. С. 52–59.

20. Кейстович А.В., Милов В.Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 278 с.

21. GPS — глобальная система позиционирования. М.: ПРИН, 1994. 76 с.

Поступила 21 декабря 2022 г.

English

NOISE IMMUNITY ENHANCEMENT METHOD FOR ADVANCED AERIAL COMMUNICATION SYSTEMS USING PHASED ANTENNA ARRAYS AND CHANNEL ADAPTIVE PLANNING ALGORITHMS

Alexey Aleksandrovich Sulima — Deputy Head of the Research Department of JSC NPP "Polyot".

E-mail: onti@npp-polyot.ru

Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya Square, 1.

Abstract: This article examines an option of managing aircraft adaptive automatic radio communication in air-to-air radio channels at non-fixed frequencies, which ensures high reliability of messaging, through monitoring of radio frequency spectrum technology, simultaneous frequency adaptation using the system of a computer and four transceivers that make a phased antenna array (PAA). Formulas to calculate the emission pattern of equispaced antenna array and their combination are given. Graphical representations for a linear equispaced antenna array made of five elements are constructed in MATLAB system based on the given formulas for the emission patterns of linear arrays. PAA use for anti-jamming against enemy's electronic warfare equipment is necessary to increase the power budget of wireless link concentrated in the direction of the target party. There are considered methods and a set of methods for enhancing noise immunity, including the use of convolutional coding methods and Alamouti algorithms. Application features of Alamouti algorithms in communication system operation for reception and transmission using phased antenna arrays are considered. Noise spatial selection is described when the location of signal and noise sources is spaced apart and it is possible to increase system noise immunity by separating them based on spatial selection using PAA and microwave segments at different angles of coming radio signals. Signals and noise can be separated by stand-

ard spatial selection when signals and noise enter into PAA and microwave segments from different angular directions, which differ by more than the main beam width of the antenna pattern. Transmitted radio signals can be separated based on angular superresolution methods after Capon procedure with difference in directions of signal and noise reception if not exceeding the main beam width of antenna pattern of PAA segment, and if their other parameters are the same. Guidance to the corresponding system user is done by finding a spatial vector between two system objects and directing PAA segment center along it. The final part describes the benefits of constructing an advanced communication system using PAA and the considered signal processing methods.

Keywords: radio communication, noise immunity, phased antenna array, equalizer, signal-to-noise ratio, Capon method.

References

1. RU Pat. No. 2762743. The complex of on-board digital radio communications of the aircraft of front-line aviation. *Komyakov A.V., Voitkevich K.L., Sulima A.A., Kolobkov A.V.* Appl. 20.10.2020; publ. 22.12.21.
2. *Sulima A.A., Zats P.A.* Some issues of the use of artificial intelligence elements for the organization of communication systems of the armed forces. Collection of scientific articles on materials VI International Scientific and Practical Conference "Academic Zhukovsky readings". 2018. Pp. 133–136.
3. *Komyakov A.V., Sulima A.A.* Innovative solutions in radio communication complexes for advanced aircraft. Communications in the Armed Forces of the Russian Federation. 2021. Pp. 174–175.
4. *Sulima A.A., Zats P.A.* Problems of joint use of manned and unmanned aerial vehicles in unified information exchange networks. All-Russian Scientific and Technical Conference "New Information Technologies in Communication and management systems", Kaluga. September 9–10, 2021, Pp. 63–65.
5. *Zaitsev D.F.* Nanophotonics and its application. Moscow: Firma AKTION, 2011. 427 p.
6. *Slyusar V.* Fractal antennas. A fundamentally new type of "broken" antennas. ELECTRONICS: NTB. 2007. No. 5. Pp. 78–83; No. 6. Pp. 82–89.
7. *Brown J.* Artificial dielectricshaving refractive indices less than unity. Proc. Inst. Elect. Eng (London), May 1953. Part IV. Vol. 100. No. 62R. Pp. 51–62.
8. Handbook of radar in 4 volumes. Edited by M.I. Skolnik. Moscow: Sov. Radio, 1977. Vol. 2: Radar antenna devices. 438 pp.
9. *Sinani A.I., Alekseev O.S., Vinyarsky V.F.* Active HEADLIGHTS. Construction concept and development experience. Antennas. 2005. Issue 2(93). Pp. 64–68.
10. *Kashin V.A., Lemansky A.A., Mityashev M.B., Skosyrev V.N., Sozinov P.A.* Problems of creating AFAR of the centimeter range for mobile multifunctional radars of anti-aircraft missile complexes. Questions of perspective radar. Edited by A.V. Sokolov. Moscow: Radio Engineering, 2003. Pp. 240–255.
11. *Litvinov O.S.* The algorithm of super-resolution by the Capon method in signal processing in an antenna array with non-identical channels. Antennas. 2004. No. 8–9 (87–88). Pp. 72–79.
12. *Alamouti S.M.* Space_time block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Oct. 1998. Vol. 16. Pp. 1451–1458.
13. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical foundations and practical application. 2nd edition, ispr.: trans. from English. Moscow: Publishing house "Williams", 2003. 1104 p.
14. *Zolotarev V.V., Ovechkin G.V.* Noise-resistant coding. Methods and algorithms: Handbook / Ed. By *Yu.B. Zubarev*. Moscow: Hotline–Telecom, 2004. 126 p.
15. *Vakhitov M.G., Klygach D.S.* Modeling of a conformal antenna array for an unmanned aerial vehicle. Journal of Radio Electronics. 2021. No.3. C. 1-12.
16. *Erglis K.E.* Interfaces of open systems. M.: Hotline-Telecom, 2000. 256 p.
17. *Myachev A.A.* Interfaces of computer equipment. Encyclopedic reference book. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 350 p.
18. *Bekkiev A.Yu., Galeev R.G., Zakharov P.N., Sysoev N.N.* Experimental studies of adaptive equalizer using neural networks for quadrature modulation with shift in conditions of multipath propagation of radio waves // Izvestiya rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk. No. 3 (113). 2020. Pp. 97–101
19. *Slyusar V.I.* MIMO systems: principles of construction and signal processing. Electronics: Science, Technology, Business. 2005. No. 8. Pp. 52–59.
20. *Keistovich A.V., Milov V.R.* Types of radio access in mobile communication systems. Textbook for universities. Moscow: Hotline–Telecom, 2015. 278 p.
21. GPS — global positioning system. Moscow: PRIN, 1994. 76 p.