

**Методика управления ресурсами радиолинии ситуационных центров,  
использующей пространственно-временную  
обработку сигналов**

**Быданов Е.В.**

*Военная академия связи им. С.М. Буденного,  
Тихорецкий проспект, 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия*

*e-mail: [egorius.90@mail.ru](mailto:egorius.90@mail.ru)*

***Статья поступила 10.02.2021***

**Аннотация**

Разработана методика управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигналов для передачи данных и предоставления современных сервисов связи операторам, в тех местах, где прокладка оптоволоконных линий связи затруднена или невозможна. Предложенный подход предоставляет возможность осуществлять операторами передачу данных по средствам более безопасной от радиоконтроля и устойчивой к помехам, радиолинии. При этом энергопотребление абонентских терминалов представленной радиолинии значительно меньше, поскольку мощность излучения сигнала меньше, по сравнению с абонентскими терминалами схожих, по технологии, радиолиний, и линейно зависит от расстояния до абонентского терминала собеседника.

**Ключевые слова:** радиосвязь, система связи, множественный вход, множественный выход, широкополосный канал, помехоустойчивость, тактический интернет, информационная решетка.

## **Введение**

Бурное, и буквально, революционное информационное развитие во всем мире предопределило характер и способы ведения военных действий. Если в недалеком прошлом, огневая мощь составляла основу успеха в любом вооруженном конфликте, то на сегодняшний день основой успеха является сокращение циклов боевого управления, от обнаружения цели до принятия решения о ее поражения. Именно сокращение циклов боевого управления напрямую зависит от того, насколько современные технологии внедрены в систему связи. Поэтому, в последнее время, все интенсивнее, происходят изменения именно в системе связи. Цифровое оборудование полностью вытесняет, ставшее традиционным, аналоговое оборудование связи [1, 2].

Во всех силовых структурах создаются и оснащаются всем необходимым современным оборудованием ситуационные центры для связи, как со стационарными пунктами управления, так и для связи с полевыми пунктами управления [2]. Связь между стационарными пунктами в большинстве случаев организуется, с помощью прокладки оптоволоконных линий, что предоставляет возможность оператором использовать современные протоколы сеансов связи для обмена информацией при решении повседневных задач. Для задач предоставления современной связи с подразделениями находящимися в полевых условиях, на море, на самолетах, для связи с

беспилотными летательными аппаратами, где оптоволоконные линии связи проложить не представляется возможным, в работах [3, 25] представлена модель радиолинии, которая соответствует всем требованиям для предоставления высокоскоростной связи.

Анализ работ [4 - 9], показал, что учеными всего мира разрабатываются подходы по созданию радиолиний с большой пропускной способностью, с целью предоставления операторам ситуационных центров возможности организовывать связь между подразделениями в физической среде средствами информационного пространства, в тех местах, где прокладка оптоволоконных линий невозможна. В работах [9 - 12] рассматривается радиолиния стандарта *Global System for Mobile Communication (GSM)*, в которой обеспечивается передача данных с теоретической скоростью 474 кбит/с. Сигнал от абонентского терминала (АТ) такой радиолинии, в связи с отсутствием канала обратной связи, излучается на полной мощности, вне зависимости от расстояния до приемной стороны (до базовой станции), что при длительном использовании приводит к неблагоприятным последствиям для организма оператора. В работах [13 - 15] рассматривается радиолиния стандарта *Evolution-Data Only (EV-DO)*, в которой обеспечивается передача данных с теоретической скоростью 2 Мбит/с. В такой радиолинии, при помощи канала обратной связи, осуществляется выбор вида модуляции в зависимости от длины пакета, который необходимо передать стороне собеседника.

Как видно, ни в одной работе не упоминается о возможности оснащения физического уровня радиолинии с пространственно-временной обработкой сигнала, с

возможность передавать данные со скоростью 80-100 Мбит/с [8]. Также ни в одной работе детально не представлены для таких радиолиний технологий безопасности, передаваемых данных на основе внедрения канала обратной связи, с целью уменьшения энергетика сигнала и получения от собеседника сведений о качестве передаваемых пакетов.

Работы [16 - 18] посвящены проблемам воздействия технического оборудования (абонентских терминалов), на организм операторов при решении ими повседневных задач на автоматизированных рабочих местах объектов информатизации.

Таким образом, учитывая, что вопросам безопасности передаваемых данных на физическом уровне радиолиний с пространственно-временной обработкой сигнала не уделено большого внимания, с целью обеспечения высокоскоростной связи ситуационных центров и пунктов управления подразделений, для тех районов, где прокладка оптоволоконных линий затруднена или невозможна, можно прийти к выводу, что задача построения радиолиний для формирования информационного пространства является актуальной. Целью работы является разработка методики управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров. Предлагается воспользоваться разработанным подходом, позволяющим снизить энергетика передаваемого сигнала и тем самым повысить безопасность передаваемой информации.

### **Постановка задачи**

Для целей формирования информационного пространства (информационной решетки) в районах, где прокладка оптоволоконных линий затруднена или не возможна, на всех подвижных объектах расставляются мобильный портативные абонентские терминалы, которые в свою очередь являются как объектом связи, так и ретранслятором для других абонентских терминалов, которые находятся в зоне его электромагнитной доступности. Такие устройства, в широкой полосе частот  $f_{п.ч.}$  предоставляют, техническую возможность, в реальном масштабе времени, операторам подразделений соединиться с другими абонентскими терминалами операторов подразделения, пункта управления, ситуационного центра [3]. Для формальной постановки и решения задачи разработки методики управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигналов для нужд операторов ситуационных центров, с целью защиты передаваемых пакетов с данными, снижения энергопотребления портативных устройств, уменьшения уровня излучаемого сигнала абонентскими терминалами, в работе введены обозначения исходных данных:

$m$  – число передающих трактов системы связи построенной на основе технологии

*Multiple input Multiple output (MIMO)*;

$M$  – номер, соответствующий виду модуляции сигнала ортогональных подканалов, которые передаются параллельно;

$P_{\min} \dots P_{\max}$  – диапазон соотношения  $E_b/N_0$ , выраженное в децибелах для моделирования сигнала радиолинии  $s(k)$ ;

$T_{\text{сиг}}$  – длительность генерируемого сигнала радиолинии  $s(k)$  для расчёта коэффициента битовой ошибки;

$R_{\text{инф}}$  – информационный поток размером  $L_{\text{инф}}$  бит, который подается на модулятор, в зависимости от заданного вида модуляции, значения переменной  $M$ , для формирования сигнала радиолинии  $s(k)$ ;

$R_{\text{сиг}}$  – эталонный сигнал, по которому осуществляется корреляция для различных временных и частотных сдвигов, до тех пор, пока не появится пик в огибающей взаимной корреляционной функции;

$V_{\text{итер}}$  – число пакетом с данными, которые необходимо передать с одного абонентского терминала на другой.

При проведении моделирования сигналов радиолинии  $s(k)$ , в данной работе будем полагать:

каждый абонентский терминал оснащен аппаратным модулем передачи пакетов с данными в эфир и аппаратным приемным модулем сигналов с пакетами переданных данных.

спектральная плотность шумов в пределах полосы пропускания по частоте радиоприемного устройства сохраняет постоянное значение, также к шумам могут добавляться релеевские замирания, которые вносят дополнительные искажения в переданный сигнал;

прием сигнала радиолинии осуществляется сразу  $n$  радиоприемными трактами абонентского терминала, аппаратными средствами модуля приема сигналов с пакетами данных;

передачу сигнала абонентский терминал может осуществлять  $m$  передающими трактами, аппаратными средствами модуля передачи пакетов с данными в эфир; подразумевается нецелесообразными попытки энергетического подавления сигнала представленной радиолинии подразделениями радиоэлектронной борьбы противника, поскольку данные попытки приведут к подавлению и своих сигналов, функционирующих радиолиний.

### Решение

Для решения поставленной задачи была разработана методика управления ресурсами радиолинии на передающей и на приемной стороне, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров. Представленная радиолиния в отличие от аналогов по технологии, имеет возможность динамического управления  $m$  передающими и  $n$  приемными трактами, что позволяет перераспределять энергетику между антенными элементами, а также регулировать их число в зависимости от электромагнитной обстановки. Спектр сигнала такой радиолинии энергетически сложно обнаружить, поскольку общая энергия сигнала постоянно находится на уровне шумов, которые составляют, в том числе сигналы других абонентских терминалов, передающих данные в то же самое время. Для того чтобы детально рассмотреть за счет чего достигается такой эффект, рассмотрим

основные этапы методики, управления ресурсами радиолинии. Вначале будут детально рассмотрены этапы методики на передающей стороне радиолинии рис. 1, а затем этапы методики на приемной стороне радиолинии рис. 2.

В начале, в блоке 1 на рис. 1, инициализируются исходные данные, необходимые для передачи группового сигнала  $s_m(t)$  от одного абонентского терминала другому.

В блоке 2 на рис. 1 происходит формирование, априорно известных, уникальных последовательностей (преамбул)  $R_{\text{сик}}(k)$  для  $m$  передающих каналов абонентского терминала. Преамбулы задаются так, чтобы абонентский терминал адресата мог выделить их из группового сигнала и по ним определить начало пакета с данными адресованного именно ему. В блоке 3 на рис. 1 происходит формирование, априорно известных, информационных потоков  $R_{\text{инф}}$  и  $W_{\text{инф}}$ , состоящих из  $L_{\text{инф}}$  информационных бит. Информационный поток формируется с учетом исходных значений переменных  $M$  и  $T_{\text{сиг}}$ . В блоке 4 на рис. 1 рассчитывается шаг повышения мощности  $P_{\text{шаг}}$ , Вт, для всех  $m$  передающих трактов абонентского терминала. Расчет происходит по формуле:

$$P_{\text{шаг } i} = P_i / 10 \quad (1)$$

где  $P_1$  – установленное в исходных данных максимальное значение, в Вт, уровня выходного сигнала для  $i$ -го передающего тракта абонентского терминала.

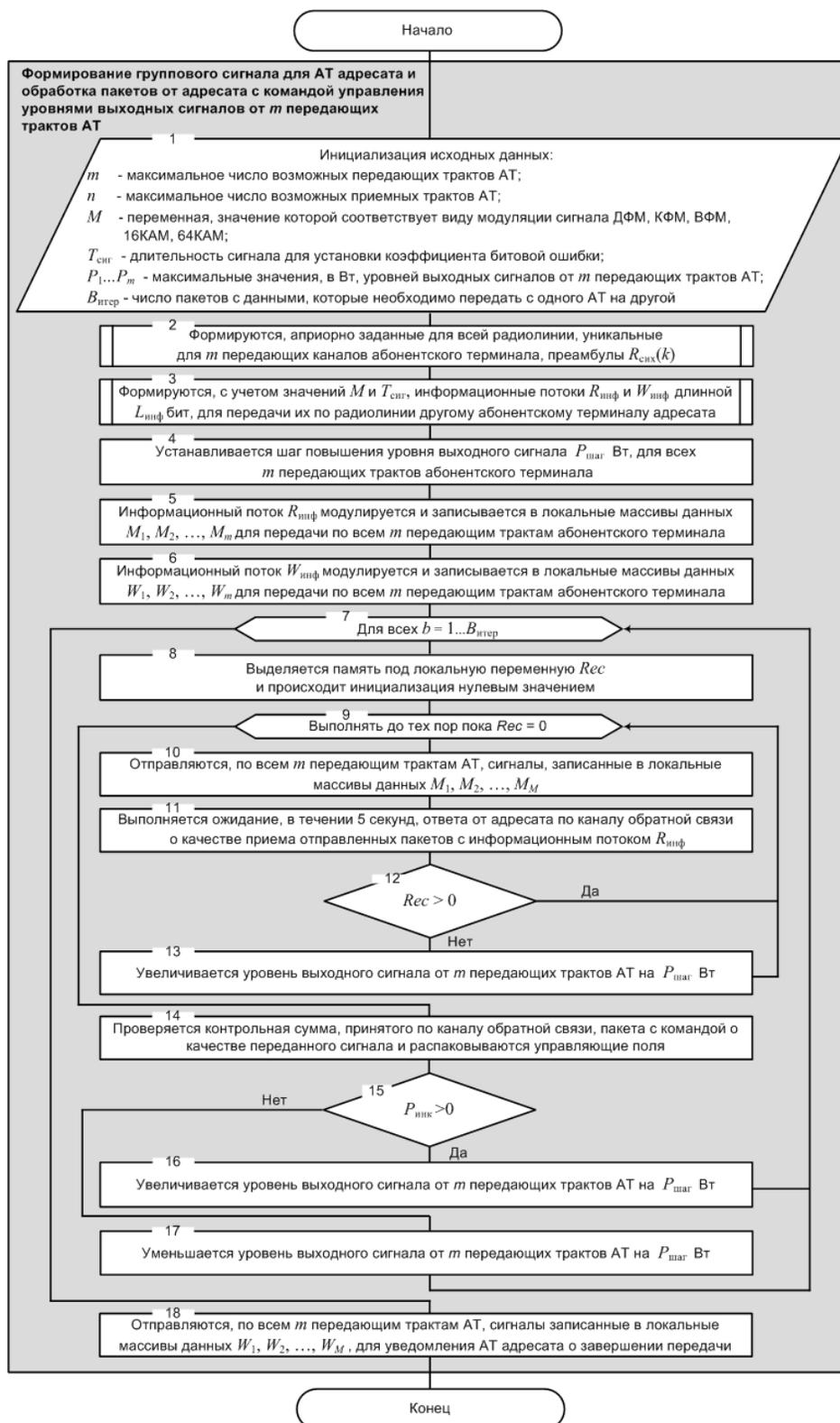


Рис. 1. Схема формирования группового сигнала для АТ адресата и обработка пакетов от адресата с командой управления уровнем выходного сигнала передающих трактов

Уровень выходного сигнала сначала повышается для одного передающего тракта, в случае увеличения уровня до максимального значения, увеличивается уровень во втором передающем тракте и так далее до последнего до  $m$ . Понижение уровня выходного сигнала происходит в обратном направлении от  $m$  до 1 передающего тракта. В блоках 5,6 на рис. 1 модулируется согласно протоколу радиолинии, в соответствии со значениями переменной  $M$ , информационные потоки  $R_{\text{инф}}$  и  $W_{\text{инф}}$ . По информационному потоку  $R_{\text{инф}}$  адресат сможет рассчитать коэффициент битовой ошибки, а в случае приема  $W_{\text{инф}}$  будет понятно, что передача передающей стороной завершилась. При помощи цикла 7 на рис. 1 осуществляется  $V_{\text{итер}}$  раз выполнения одинаковых действий для всех пакетов, которые необходимо передать адресату. В блоке 8 на рис. 1 выделяется память под локальную переменную  $Res$  и инициализируется нулевым значением, что соответствует состоянию отсутствия приема пакета от адресата с командой управления передающими трактами. В случае если переменная  $Res$  будет установлена в значение 1, то при таком состоянии переменной, будем считать, что пакет с данными был получен. В блоке 10 на рис. 1 происходит отправка, по всем  $m$  передающим трактам АТ, заранее подготовленного в блоке 5 на рис. 1 сигнала с пакетами данных. После полной отправки сигнала, в блоке 11 на рис. 1 происходит ожидание ответа и после ожидания, в блоке 12 на рис. 1, происходит проверка состояния получения ответа, значение переменной  $Res$ . В случае, если значение переменной  $Res$  установлено в ноль, в блоке 13 на рис. 1 производится увеличение уровня выходного сигнала от  $m$  передающих трактов, и с помощью цикла 9

на рис. 1 действия по отправке повторяются. В случае, если значение переменной  $Rec$  устанавливается в значение 1, то происходит выход из цикла 9 на рис. 1 и в блоке 14 на рис. 1, при помощи контрольной суммы, проверяется целостность принятого пакета. В случае если пакет не был поврежден, то осуществляется распаковка управляющих полей и в блоке 15 на рис. 1 происходит анализ значения поля  $P_{инк}$ . В случае, если адресат установил это поле в значение 1, то в блоке 16 на рис. 1 происходит увеличение выходного сигнала от  $m$  передающих трактов АТ по алгоритму, описанному в блоке 4 на рис. 1. Если значение переменной  $P_{инк}$  отрицательно, то в блоке 17 на рис. 1 происходит уменьшение уровня выходного сигнала от  $m$  передающих трактов АТ по алгоритму, детально представленному в блоке 4 на рис. 1. После регулировки уровня выходного сигнала от  $m$  передающих трактов абонентского терминала, при помощи цикла 7 на рис. 1 выполняется отправка следующего,  $b$  пакета с данными, и так  $V_{итер}$  раз. После передачи, таким образом, всех подготовленных пакетов в блоке 18 на рис. 1 отправка, по всем  $m$  передающим трактам АТ, заранее подготовленного в блоке 6 на рис. 1 сигнала с пакетами данных. На этом, отправка передающей стороной адресату группового сигнала завершается.

На рис. 2 подробно представлены этапы методики приемной стороны, по формированию пакета с командой для отправки на передающую сторону, с целью динамического управления уровней выходного сигнала от  $m$  передающих трактов абонентского терминала. В начале, в блоке 1 на рис. 2, инициализируются исходные данные, необходимые для приема группового сигнала радиолинии  $s_m(t)$ .

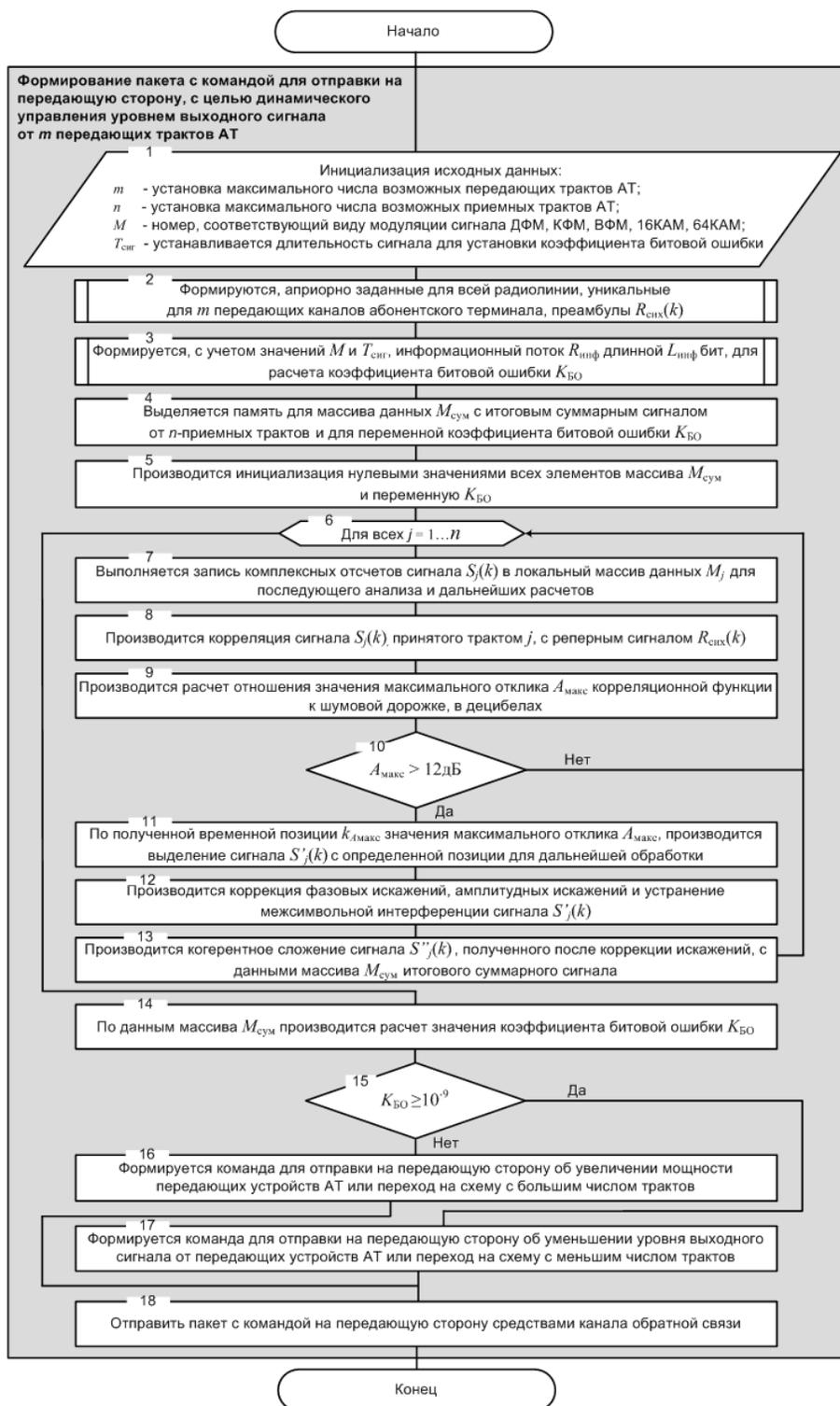


Рис. 2. Схема формирования пакета с командой для отправки на передающую сторону, для динамического управления уровнем выходного сигнала передающих трактов АТ

После приема  $n$  трактами радиоприемного устройства абонентского терминала, сигнал будет представлен  $K$  комплексными отсчетами с частотой дискретизации  $F_s$ , может быть записан как [3]:

$$S_1(k) = s_1(k) + q_1(k), \quad (2)$$

$$S_2(k) = s_2(k) + q_2(k) = \alpha_2 \cdot s_1(k + D_{1,2}) + q_2(k), \quad (3)$$

$$S_n(k) = s_n(k) + q_n(k) = \alpha_n \cdot s_1(k + D_{1,n}) + q_n(k), \quad (4)$$

где  $s_1(k)$  – комплексная огибающая сигнала моделируемой радиолинии, принятого первым трактом приема абонентского терминала;  $s_2(k)$  – комплексная огибающая сигнала моделируемой радиолинии принятого вторым трактом приема с коэффициентом затухания  $\alpha_2$ ;  $s_n(k)$  – комплексная огибающая сигнала моделируемой радиолинии, принятого  $n$ -трактом приема абонентского терминала с коэффициентом затухания  $\alpha_n$ ;  $q_1(k)$ ,  $q_2(k)$ ,  $q_n(k)$  – аддитивные гауссовские центрированные шумы в первом, втором и  $n$ -тракте соответственно;  $D_{1,2}$ ,  $D_{1,n}$  – задержка сигнала  $s_1(k)$  относительно  $s_2(k)$ , сигнала  $s_1(k)$  относительно  $s_n(k)$ , выраженная в комплексных отсчетах сигнала.

В блоке 2 на рис. 2 происходит формирование, априорно известных, уникальных последовательностей (преамбул)  $R_{\text{сик}}(k)$  для  $m$  передающих каналов абонентского терминала. Преамбулы должны быть установлены таким образом, чтобы, имеющимися  $n$  приемными трактами, выделить их из принятого группового сигнала и по ним установить начало переданного сигнала. В блоке 3 на рис. 2 происходит формирование, априорно известного, информационного потока  $R_{\text{инф}}$ , состоящего из

$L_{\text{инф}}$  информационных бит. Информационный поток формируется для побитного сравнения и принятым информационным потоком, таким образом, вычисляя коэффициент битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$ , в зависимости от заданных, в исходных данных, значений переменных  $M$  и  $T_{\text{сиг}}$ . В блоке 4 на рис. 2 выделяется память для массива данных  $M_{\text{сум}}$ , с итоговым суммарным сигналом и для переменной коэффициента битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$ . В массив  $M_{\text{сум}}$ , в конечном итоге, записывается когерентно сложенный сигнал от  $n$ -приемных трактов абонентского терминала. В блоке 5 на рис. 2 производится инициализация нулевыми значениями всех элементов массива  $M_{\text{сум}}$ , а также инициализируется значение переменной  $K_{\text{БО}}$  для дальнейших расчетов в теле основного цикла. При помощи цикла 9 на рис. 2 осуществляется выполнение одинаковых действий для всех  $n$  приемных трактов радиоприемного устройства абонентского терминала. В блоке 7 на рис. 2 происходит запись комплексных отсчетов сигнала  $S_j(k)$  в локальный вспомогательный массив данных  $M_j$  для последующего анализа и дальнейших расчетов.

В блоке 8 на рис. 2, для установления начальных отсчетов сигнала  $S_j(k)$ , выполняется корреляция сигналов  $S_j(k)$  и  $R_{\text{сиг}}(k)$ . Корреляционная функция  $C_{SR}$  рассчитывается для максимально возможной задержки сигнала  $S_j(k)$  [21]:

$$C_{SR} = \begin{cases} \frac{1}{K-|d|} \sum_{k=0}^{K-|d|-1} S_j(k+d) \cdot R_{\text{сиг}}(k)^*, & d = 0, 1, \dots, D_{\text{max}}, \\ \frac{1}{K-|d|} \sum_{k=0}^{K-|d|-1} S_j(k) \cdot R_{\text{сиг}}(k-d)^*, & d = -D_{\text{max}}, -D_{\text{max}} + 1, \dots, -1, \end{cases} \quad (5)$$

где  $()^*$  – обозначает комплексное сопряжение.

Результатом корреляции будет являться массив результирующих амплитуд, который также можно представить графически, в котором позиция наибольшей амплитуды будет являться значением максимального отклика  $A_{\text{макс}}$  корреляционной функции и соответствовать началу сигнала  $S_j(k)$ , а остальные значения будут формировать шумовую дорожку. Шум при увеличении времени интегрирования  $T=K \cdot F_s$  стремится к нулю. В блоке 9 на рис. 2 происходит расчет оценки, в децибелах, значения максимального отклика  $A_{\text{макс}}$  корреляционной функции по отношению к шумовой дорожке. Согласно работам [23, 24] для обнаружения пика максимального отклика на фоне выходных шумов необходимо не менее 10...12 дБ, а для точной оценки задержки сигнала и частоты около 20 дБ. В блоке 10 на рис. 2 происходит сравнение значения максимального отклика  $A_{\text{макс}}$  корреляционной функции с константным значением. В случае если значение максимального отклика  $A_{\text{макс}}$  меньше константного значения, то осуществляется переход для расчетов сигнал следующего приемного тракта. В случае если значение максимального отклика  $A_{\text{макс}}$  больше константного значения, то осуществляет переход к следующему блоку расчетов на сигнале текущего приемного тракта. В блоке 11 на рис. 2 по номеру элемента в локальном массиве данных  $M_j$ , которому соответствует значения максимального отклика  $A_{\text{макс}}$ , устанавливается значение временной позиции  $k_{A_{\text{макс}}}$  и от элемента с данным номером, массива  $M_j$ , происходит выделение сигнала  $S'(k)$ , нулевой элемент которого соответствует началу передачи информационных символом передающей стороной. В блоке 12 на рис. 2 искажения в канале приемного тракта  $j$  оцениваются с

помощью известного переданного сигнала  $R_{\text{сик}}(k)$ . Восстановление искажений в сигнале  $S'(k)$  происходит при помощи одного из множества алгоритмов адаптивной фильтрации, основанных на решении системы линейных алгебраических уравнений любым из стандартных методов линейной алгебры [1]. На выходе адаптивного фильтра получается исправленный сигнал  $S_j''(k)$ . Поскольку во всех приемных каналах адаптивный фильтр выравнивает фазы одинаково, и приводит их, в конечном счете, к одному эталону, следовательно, полученные сигналы  $S_1''(k), S_2''(k), \dots, S_n''(k)$  подготовлены к дальнейшему когерентному сложению. Для целей увеличения соотношения сигнал к шуму в блоке 13 на рис. 2 производится последовательно когерентное сложение, по мере выхода из блока адаптивного фильтра, сигналов  $S_j''(k)$ . В результате такого последовательного сложения сигналов  $S_j''(k)$ , в массиве данных  $M_{\text{сум}}$  формируется итоговый суммарный сигнал, с еще большим соотношением сигнал к шуму, что приводит к снижению числа информационных ошибок. В блоке 14 на рис. 2 по данным массива  $M_{\text{сум}}$  производится расчет значения коэффициента битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$ . В блоке 15 на рис. 2, полученное значение коэффициента битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$  сравнивается с априорно установленным значением  $10^{-9}$ , что соответствует значению оптоволоконной линии связи. В случае, если значение  $K_{\text{БО}}$  больше или равно  $10^{-9}$ , то в блоке 17 на рис. 2 формируется команда для отправки ее на передающую сторону об уменьшении мощности передающих устройств или переход на схему с меньшим числом физических передающих трактов. В случае, если в блоке 15 на рис. 2 значение  $K_{\text{БО}}$  окажется меньше  $10^{-9}$ , то в блоке 16 на рис. 2 формируется команда для

отправки на передающий абонентских терминал о необходимости увеличить мощность передающих устройств или перейти на схему с большим числом физических передающих трактов. В результате, в блоке 18 на рис. 2 сформированная команда в блоке 16 или в блоке 17 на рис. 2 отправляется на передающую сторону по средствам канала обратной связи.

Таким образом, абонентский терминал, осуществляющий передачу радиосигнала, получает сформированную команду в блоке 18 на рис. 2 от приемной стороны и выполняет динамическое управление передающими трактами рис.1. Именно такое управление передающими трактами на физическом уровне радиолинии осуществляет адаптивную подстройку мощности передающего сигнала.

### **Пример применения методики**

Рассмотрим практическое применение разработанной методики управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров.

Моделирование радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала, предлагается проводить при помощи пакета прикладных программ для решения технических задач *Matlab* [25]. При моделировании, согласно представленной методике, были сформированы, случайным образом, информационные потоки  $R_{инф}$  и  $W_{инф}$ . Информационный поток  $R_{инф}$  модулируется квадратурным амплитудным модулятором, а  $W_{инф}$  двоичным фазовым модулятором, рис 3.

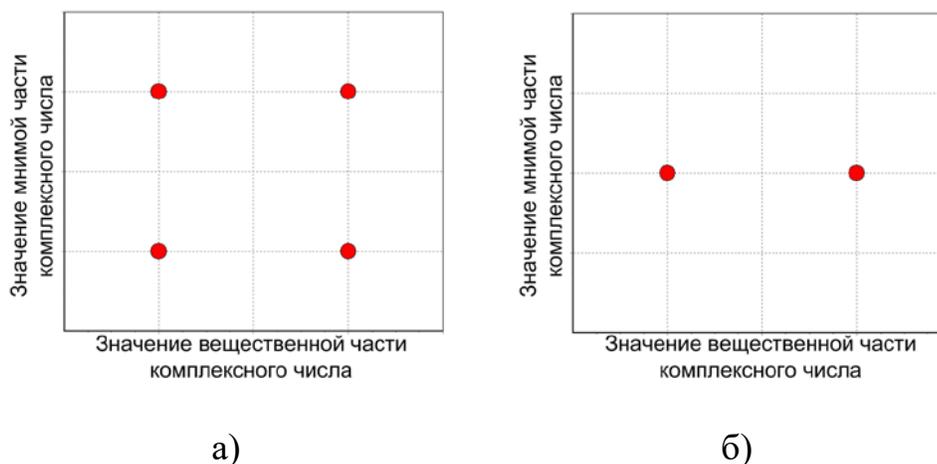


Рис. 3. Сигнальные созвездия на передающей стороне радиолинии: а) квадратурной фазовой модуляции потока  $R_{\text{инф}}$ ; б) двоичной фазовой манипуляции потока  $W_{\text{инф}}$

Сформированные модуляционные символы двух информационных потоков  $R_{\text{инф}}$ ,  $W_{\text{инф}}$  передаются средствами радиолинии через поднесущие, посимвольно, при помощи цифровой схемы мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Средствами *Matlab* смоделирована среда распространения сигнала, согласно ранее принятых ограничений. Прием группового сигнала абонентским терминалам на приемной стороне радиолинии, осуществляется кадрами рис 4 всеми  $n$ -трактами абонентского терминала.

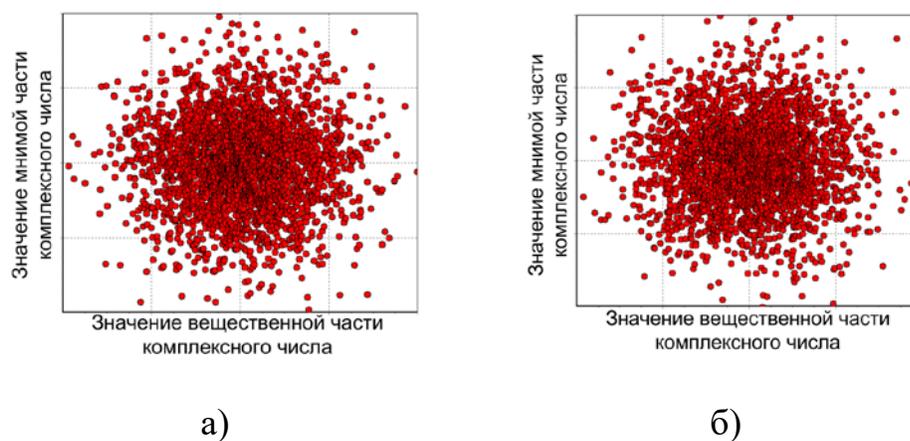


Рис. 4. Сигнальные созвездия принятого сигнала: а) квадратурной фазовой модуляции потока  $R_{\text{инф}}$ ; б) двоичной фазовой манипуляции потока  $W_{\text{инф}}$

При помощи, априорно известной приемной стороне, уникальной последовательности  $R_{\text{сиг}}(k)$  и выбранной схемы адаптивной фильтрации Винера, происходит восстановление искажений, которые были получены в результате передачи сигнала через среду распространения сигнала, рис. 5 [26]. Соотношение сигнал/шум в пяти приемных трактах составляет 13 дБ-17дБ.

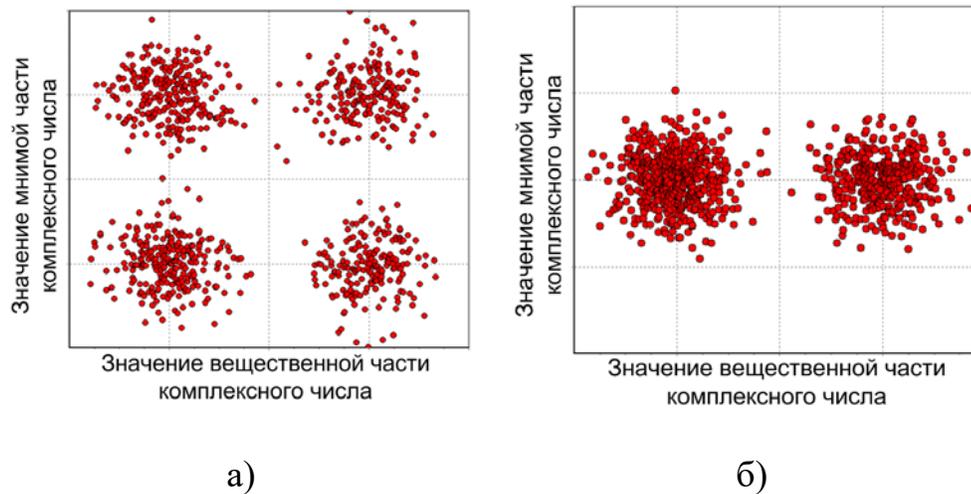


Рис. 5. Сигнальные созвездия принятого сигнала на выходе адаптивного фильтра: а) квадратурной фазовой модуляции потока  $R_{\text{инф}}$ ; б) двоичной фазовой манипуляции потока  $W_{\text{инф}}$

Результатом моделирования будет являться установление зависимости между значениями рассчитанного на приемной стороне соотношения сигнал/шум  $E_b/N_0$  при коэффициенте битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$  равном  $10^{-9}$  и числа переданных команд  $q$  динамического управления уровнями выходного сигнала от  $m$ -трактов абонентского терминала на передающей стороне исследуемой радиолинии рис. 6.



Рис. 6. Зависимость значений  $E_b/N_0$  и числа отправленных команд управления по линии обратной связи

Анализ установленной зависимости на рис. 6 показывает, что при помощи предложенной методики управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров удалость достичь заметного снижения уровня выходных сигналов от  $m$ -передающих трактов абонентского терминала. Такое снижение выходных сигналов от  $m$ -передающих трактов абонентского терминала на передающей стороне сопровождается отсутствием дополнительных потерь в качестве передаваемых пакетов данных. При помощи методики установлен порог отношения/сигнал шум 14 Дб, при котором возможно будет оснастить операторов требуемым качеством связи при помощи предложенной радиолинии.

Априорно известно, что адекватность результатов любого моделирования проверяется соответствием результатам другого моделирования, считающимся

эталонным, либо проверкой и подтверждением экспериментальным путем, при помощи измерительных приборов [21]. Степень адекватности моделирования радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров, проведенной в среде *Matlab*, предлагается оценивать сравнением значений коэффициентов битовой ошибки, полученных абонентским терминалом на приемной стороне, с измеренными значениями прибором *Anritsu MG3710A*. Для оценки адекватности моделирования радиолинии, представленной в методике управления ресурсами, использован критерий допустимой погрешности [21].

Относительная погрешность прибора *Anritsu MG3710A* согласно инструкции по эксплуатации составляет  $(-3 \dots +3)$  дБ, что соответствует  $(-29,21\% \dots +41,25\%)$  [21, 29].

Для оценки адекватности получения результатов моделирования, проведенного согласно представленной методики, при помощи прибора *Anritsu MG3710A* были произведены ряд измерений. Полученные результаты измерений в дальнейшем сопоставляются со значениями, полученными при моделировании радиолинии.

На рис. 7 представлены 19 значений сводных данных по результатам измерений и моделирования радиолинии. Для результатов измерений соотношения  $E_b/N_0$  при коэффициенте битовой ошибки  $K_{\text{БО}}$  равном  $10^{-9}$ , приведены доверительные интервалы в соответствии с точностью измерения прибора *Anritsu MG3710A*.

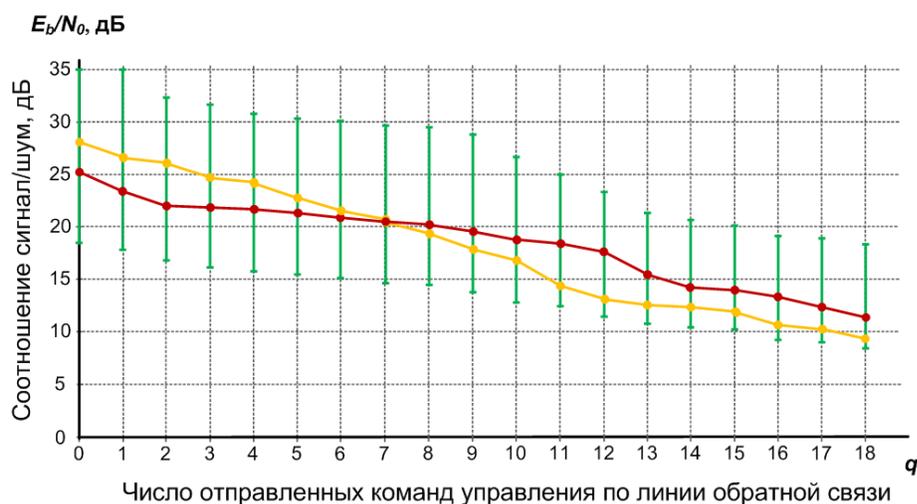


Рис. 7. Измеренные (желтый график) и рассчитанные (красный график) значения соотношения сигнал/шум принятого сигнала при коэффициенте битовой ошибки  $10^{-9}$  (размер вертикальных отрезков соответствует диапазону точности измерения прибора)

Из представленной, на рис. 7, зависимости видно, что моделирование радиолинии, согласно представленной методики, при помощи программы *Matlab* соответствует критерию адекватности [21]:

$$\max|\varepsilon_i| = 0,2490; \varepsilon_{\text{доп}} = 0,2921; 0,2490 < 0,2921. \quad (6)$$

### Заключение

Таким образом, разработана методика управления ресурсами радиолинии, использующей пространственно-временную обработку сигнала для нужд операторов ситуационных центров, которая позволяет:

осуществлять предоставление современных сервисов связи операторам в тех местах, где прокладка оптоволоконных линий связи затруднена или невозможна;

значительно экономить энергопотребление абонентских терминалов за счет управления уровнями выходных сигналов из передающих трактов абонентского терминала;

повысить безопасность передаваемых данных за счет уменьшения мощности передаваемого сигнала.

Моделирование радиолинии, с использованием среды *Matlab* показывает достаточную для практического применения адекватность моделирования передачи пакетов с данными от одного абонента к другому. В результате проверки, по критерию допустимой относительной погрешности между полученными результатами измерений, проведенными при помощи прибора *Anritsu MG3710A* и результатами моделирования, при помощи среды *Matlab*, подтверждена адекватность моделирования радиолинии и правомерность использования разработанной методики.

В дальнейшем, на основе проведенных исследований, целесообразно сформулировать научно-технические предложения по обеспечению дополнительной безопасности передаваемых данных, а именно оснащением физического уровня представленной радиолинии, на передающей стороне возможностью излучения сигнала с псевдослучайной перестройкой частоты, 25 тысяч скачков в секунду, что еще больше усложнит задачу радиоконтроля.

*Выражаю благодарность моему научному руководителю Валентину Андреевичу Мешалкину, кандидату технических наук, доценту, старшему научному сотруднику научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного.*

### Библиографический список

1. Юрков А.С. О программном улучшении подавления зеркального канала в SDR-приемниках с аналоговым преобразованием на низкую промежуточную частоту // Техника радиосвязи. 2020. № 3 (46). С. 45 – 52. DOI:[10.33286/2075-8693-2020-46-45-52](https://doi.org/10.33286/2075-8693-2020-46-45-52)
2. Ревин С.М. Системно-конфигурационный метод проектирования ситуационных центров в системе комплексной безопасности. – М.: Проспект, 2010. – 147 с.
3. Быданов Е.В. Модель радиолиний с использованием пространственно-временной обработки широкополосных сигналов для нужд должностных лиц ситуационных центров комплексной системы безопасности // Современная наука: естественные и технические науки. 2020. № 9. С. 55 - 62. DOI: [10.37882/2223-2966-2020.09.06](https://doi.org/10.37882/2223-2966-2020.09.06)
4. Система связи тактического звена управления сухопутных войск Великобритании. URL:  
[http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/sistema\\_svjazi\\_takticheskogo\\_zvena\\_upravlenija\\_sukhoputnykh\\_vojsk\\_velikobritanii\\_2019/9-1-0-1724](http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/sistema_svjazi_takticheskogo_zvena_upravlenija_sukhoputnykh_vojsk_velikobritanii_2019/9-1-0-1724)
5. Совершенствование сети «Тактический интернет» Сухопутных войск США. URL:  
<http://militaryarticle.ru/zarubezhnoe-voennoe-obozenie/2008-zvo/7664-sovershenstvovanie-seti-takticheskij-internet>
6. Гаврилов А.Д., Лабунский А.Д. Искусственный интеллект для ПВО // Арсенал отечества. 2018. № 3 (35). С. 21 – 26.

7. Yoon C.J., Chan C.C. MIL-STD-188-220A parameter optimization for tactical internet // Proceeding of Military Communication Conference, MILCOM – 98, Boston, USA, 1998, pp. 960 - 965. DOI: [10.1109/MILCOM.1998.726986](https://doi.org/10.1109/MILCOM.1998.726986)
8. Филатов В.И. Широкополосная система радиосвязи повышенной скорости передачи информации // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57889>
9. Li F., Zhu W., Yin C. Research on the effectiveness evaluation of tactical internet based on dynamic entropy method // Proceeding of 3rd Information technology, networking, electronic and automation control conference, ITNEC-2019, Chengdu, China, 2019, pp. 2500 – 2506. DOI: [10.1109/ITNEC.2019.8729386](https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729386)
10. Gu G., Peng G. The survey of GSM wireless communication system // Proceeding of International Conference on Computer and Information Application, ICCIA-2010, Tianjin, China, 2010, pp. 121 - 124.
11. Burki J., Malik F., Mushtaq M. GSM downlink protocol analysis and decoding using open-source hardware and software // Proceeding of 2nd National Conference on Information, Assurance, NCIA, Rawalpindi, Pakistan, 2013, pp. 39 - 46. DOI: [10.1109/NCIA.2013.6725322](https://doi.org/10.1109/NCIA.2013.6725322)
12. Sheikh F. DSP Implementation of Concurrent GSM and CDMA Modems For Software Defined Radios // Proceeding of Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, Singapore, 2003, pp. 1732 - 1736. DOI: [10.1109/ICICS.2003.1292763](https://doi.org/10.1109/ICICS.2003.1292763)

13. Bi Q., Vitebsky S. Performance analysis of 3G-1x EVDO high data rate system // Proceeding of 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, FL, Orlando, USA, 2002, pp. 389 - 395.
14. Byun J., Lee J., Park J., Kim S. SINR Enhancement by Antenna Diversity in 1x-EVDO System // Proceeding of 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, DC, USA, 2005, pp. 483 - 486. DOI: [10.1109/APS.2005.1552292](https://doi.org/10.1109/APS.2005.1552292)
15. Gopal T. EVDO Rev. A Control Channel Bandwidth Analysis for Paging // Proceeding of 2007 Wireless Communications and Networking Conference, Kowlon, China, 2007, pp. 3264 - 3269. DOI: [10.1109/WCNC.2007.601](https://doi.org/10.1109/WCNC.2007.601)
16. Викторов В.А. Модель электромагнитных полей, формируемых автоматизированным рабочим местом объекта информатизации // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 1 - 32. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-10101](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10101)
17. Викторов В.А., Мешалкин В.А., Салтыков В.М. Исследование электромагнитных полей в окружающей среде от оборудования компьютерного комплекса с позиции допустимых требований по электромагнитной безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 246 - 261. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10409](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10409)
18. Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С. Моделирование влияния взаимно коррелированных помех на качество селекции сигнала в антенной решетке, оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения // Труды

МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115129>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-8)

19. Викторов В.А., Мешалкин В.А., Салтыков В.М. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381 - 401. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10415](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10415)

20. Мешалкин В.А., Викторов В.А., Быданов Е.В. Научно-технические предложения по защите оператора от воздействия электромагнитных полей, формируемых автоматизированным рабочим местом, и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной безопасности // Материалы II Всероссийской межведомственной научно-технической конференции «Информационно-управляющие, телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение» (Пенза, 18-19 мая 2020). – Пенза: Пензенский государственный университет, 2020. С. 13 – 30.

21. Викторов В.А. Методика расчета электромагнитных полей, генерируемых автоматизированным рабочим местом объекта информатизации // Техника радиосвязи. 2020. № 3 (46). С. 30 - 44.

22. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, Inc., 2007, 1084 с.

23. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing // IEEE Transactions on acoustics, speech and signal process, 1981, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 588 - 599.
24. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. - М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
25. Дьяконов В.П., Абраменкова И.И. Матлаб обработка сигналов и изображения. – СПб.: Изд-во Питер, 2002. – 608 с.
26. Адаптивная фильтрация цифровых данных. URL: [https://www.studmed.ru/lekciya-adaptivnaya-filtraciya-cifrovyh-dannyh\\_0268fb07f2b.html](https://www.studmed.ru/lekciya-adaptivnaya-filtraciya-cifrovyh-dannyh_0268fb07f2b.html)
27. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердииков П.Г., Кулаков Д.В. Разработка методов различения сложных помехоустойчивых сигналов // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104188>
28. Anritsu Vector Signal Generator MG3710A. URL: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-en/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/mg3710a-datasheet-e1600.pdf>
29. Цветков В.А., Кондратьева С.Г. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6)

# **Radio line resources managing technique, employing space-time signal processing, for situational centers**

**Bydanov E.V.**

*Military Communications Academy named after S.M. Budenny,*

*3, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, 194064, Russia*

*e-mail: [egorius.90@mail.ru](mailto:egorius.90@mail.ru)*

## **Abstract**

Active information development all over the world has predetermined the nature and methods of warfare. If the firepower in the recent past was the basis of success in any armed conflict, as of today, the basis of success is the reduction of the combat control cycles, from the target to detection to the decision of its hitting. Modern technical equipment of all management levels, situational centers in particular, allows achieving this. The most problematic side herewith is provision of stable, high-speed radio communication with the units staying in the field conditions, seaborne and airborne, where fiber optic communication lines laying out is impossible.

One of the ways of solving this problem consists in equipping the physical level of the radio lines in use by the technology involving the time-space signal processing. This will enhance the radio line capabilities, and, besides conventional resources managing, allow managing the number of the antennae elements in use on both receiving and transmitting sides.

Analysis of works devoted to the transmitted data security at the physical level of radio links with similar technology revealed negligible attention to the issue. In this regard, the issue of developing a methodology for controlling a multi-antenna radio line is relevant.

A technique for resources managing of a radio line that employs space-temporal signal processing for data transmission and provides operators with modern communication services in in places where the fiber-optic communication lines laying-out is complicated or impossible, has been developed. The proposed approach allows operators data transmission by the radio line more secured from radio monitoring and noise immune. The power consumption herewith of the subscriber terminals of the presented radio line is much less. This is being achieved by a lower signal emission power, compared to subscriber terminals of similar technology, radio lines, and linearly depends on the distance to the subscriber terminal of the subscriber.

**Keywords:** radio communication, communication system, multiple input, multiple output, broadband channel, noise immunity, tactical internet, information grid.

### References

1. Yurkov A.S. *Tekhnika radiosvyazi*, 2020, no. 3 (46), pp. 45 – 52. DOI:[10.33286/2075-8693-2020-46-45-52](https://doi.org/10.33286/2075-8693-2020-46-45-52)
2. Revin S.M. *Sistemno-konfiguratsionnyi metod proektirovaniya situatsionnykh tsentrov v sisteme kompleksnoi bezopasnosti* (System-configuration method for situational centers designing in integrated security system), Moscow, Prospekt, 2010, 147 p.
3. Bydanov E.V. *Sovremennaya nauka: estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 9, pp. 55 - 62. DOI: [10.37882/2223-2966-2020.09.06](https://doi.org/10.37882/2223-2966-2020.09.06)

4. *Sistema svyazi takticheskogo zvena upravleniya sukhoputnykh voisk Velikobritanii*. URL: [http://factmil.com/publ/strana/velikobritaniya/sistema\\_svjazi\\_takticheskogo\\_zvena\\_upravlenij\\_a\\_sukhoputnykh\\_vojsk\\_velikobritanii\\_2019/9-1-0-1724](http://factmil.com/publ/strana/velikobritaniya/sistema_svjazi_takticheskogo_zvena_upravlenij_a_sukhoputnykh_vojsk_velikobritanii_2019/9-1-0-1724)
5. *Sovershenstvovanie seti "Takticheskii internet" Sukhoputnykh voisk USA*. URL: <http://militaryarticle.ru/zarubezhnoe-voennoe-obozenie/2008-zvo/7664-sovershenstvovanie-seti-takticheskij-internet>
6. Gavrilov A.D., Labunskii A.D. *Arsenal otechestva*, 2018, no. 3 (35), pp. 21 – 26.
7. Yoon C.J., Chan C.C. MIL-STD-188-220A parameter optimization for tactical internet, *Proceeding of Military Communication Conference, MILCOM – 98*, Boston, USA, 1998, pp. 960 - 965. DOI: [10.1109/MILCOM.1998.726986](https://doi.org/10.1109/MILCOM.1998.726986)
8. Filatov V.I. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57889>
9. Li F., Zhu W., Yin C. Research on the effectiveness evaluation of tactical internet based on dynamic entropy method, *Proceeding of 3rd Information technology, networking, electronic and automation control conference, ITNEC-2019*, Chengdu, China, 2019, pp. 2500 – 2506. DOI: [10.1109/ITNEC.2019.8729386](https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729386)
10. Gu G., Peng G. The survey of GSM wireless communication system, *Proceeding of International Conference on Computer and Information Application, ICCIA-2010*, Tianjin, China, 2010, pp. 121 - 124.
11. Burki J., Malik F., Mushtaq M. GSM downlink protocol analysis and decoding using open-source hardware and software, *Proceeding of 2nd National Conference on Information Assurance, NCIA*, Rawalpindi, Pakistan, 2013, pp. 39 - 46. DOI: [10.1109/NCIA.2013.6725322](https://doi.org/10.1109/NCIA.2013.6725322)

12. Sheikh F. DSP Implementation of Concurrent GSM and CDMA Modems For Software Defined Radios, *Proceeding of Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, Singapore, 2003, pp. 1732 - 1736. DOI: [10.1109/ICICS.2003.1292763](https://doi.org/10.1109/ICICS.2003.1292763)
13. Bi Q., Vitebsky S. Performance analysis of 3G-1x EVDO high data rate system, *Proceeding of 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, FL, Orlando, USA, 2002, pp. 389 - 395.
14. Byun J., Lee J., Park J., Kim S. SINR Enhancement by Antenna Diversity in 1x-EVDO System, *Proceeding of 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Washington, DC, USA, 2005, pp. 483 - 486. DOI: [10.1109/APS.2005.1552292](https://doi.org/10.1109/APS.2005.1552292)
15. Gopal T. EVDO Rev. A Control Channel Bandwidth Analysis for Paging, *Proceeding of 2007 Wireless Communications and Networking Conference*, Kowlon, China, 2007, pp. 3264 - 3269. DOI: [10.1109/WCNC.2007.601](https://doi.org/10.1109/WCNC.2007.601)
16. Viktorov V.A. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 1, pp. 1 - 32. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-10101](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10101)
17. Viktorov V.A., Meshalkin V.A., Saltykov V.M. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2019, no. 4, pp. 246 - 261. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10409](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10409)
18. Zvonarev V.V., Pimenov V.F., Popov A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115129>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-8](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-8)
19. Viktorov V.A., Meshalkin V.A., Saltykov V.M. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2019, no. 4, pp. 381 - 401. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10415](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10415)

20. Meshalkin V.A., Viktorov V.A., Bydanov E.V. *Materialy II Vserossiiskoi mezhvedomstvennoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Informatsionno-upravlyayushchie, telekommunikatsionnye sistemy, sredstva porazheniya i ikh tekhnicheskoe obespechenie»*, Penza, Penzenskii gosudarstvennyi universitet, 2020, pp. 13 – 30.
21. Viktorov V.A. *Tekhnika radiosvyazi*, 2020, no. 3 (46), pp. 30 - 44.
22. Proakis J.G., Manolakis D.G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, Inc., 2007, 1084 p.
23. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing, *IEEE Transactions on acoustics, speech and signal process*, 1981, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 588 - 599.
24. Perov A.I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh system* (Statistical theory of radio engineering systems), Moscow, Radiotekhnika, 2003, 400 p.
25. D'yakonov V.P., Abramenkova I.I. *Matlab obrabotka signalov i izobrazheniya* (Matlab signal and image processing), Saint Petersburg, Izd-vo Piter, 2002, 608 p.
26. *Adaptivnaya fil'tratsiya tsifrovyykh dannykh*. URL: [https://www.studmed.ru/lekciya-adaptivnaya-filtraciya-cifrovyyh-dannykh\\_0268fb07f2b.html](https://www.studmed.ru/lekciya-adaptivnaya-filtraciya-cifrovyyh-dannykh_0268fb07f2b.html)
27. Filatov V.I., Borukaeva A.O., Berdikov P.G., Kulakov D.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104188>
28. *Anritsu Vector Signal Generator MG3710A*. URL: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-en/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/mg3710a-datasheet-e1600.pdf>
29. Tsvetkov V.A., Kondrat'eva S.G. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6)