# Решение задачи выбора параметров множественного доступа к анизотропным радиоканалам декаметрового диапазона

**Панин Роман Сергеевич**
соискатель ученой степени кандидата технических наук, Военная академия связи им. С.М.Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, paninrs@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

**Введение:** предлагается методика оптимального выбора параметров алгоритма множественного доступа к коллективно используемому частотному ресурсу сети радиосвязи декаметрового диапазона в режиме псевдослучайного переключения рабочих частот. **Постановка задачи:** повышение производительности сети радиосвязи декаметрового диапазона, функционирующей в условиях сложной радиоэлектронной обстановки, а также снижение вычислительной сложности процедуры распределения частотного ресурса. **Методы:** методы решения задач в теории оценивания и принятия решения; методы теории вероятности; методы поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов; методы возможных направлений. **Результаты:** осуществлена постановка научной задачи на оптимизацию параметров множественного доступа к группе анизотропных радиоканалов, которая декомпозирована на частные задачи: определение параметров алгоритма множественного доступа, подлежащих оптимизации, разработка методики их выбора с учетом анализа применимости методов математического программирования, а также формирование научно-технических предложений по реализации данной методики. **Практическая значимость:** реализация предлагаемой методики позволяет существенно повысить вероятность связи в сети радиосвязи декаметрового диапазона и эффективность использования частотного ресурса, а также значительно сократить временные интервалы, затрачиваемые на установление соединения. Указанные достоинства позволяют обеспечить переход сетей радиосвязи декаметрового диапазона к технологии самоорганизующихся сетей радиосвязи с гибкой топологией и последующего повышения их производительности с учетом оптимизации маршрутизации и перераспределения циркулирующей в сети нагрузки. Применение методики позволяет автоматизировать и тем самым снизить трудоемкость процесса назначения и смены радиоданных не только на этапе планирования, но и в процессе функционирования сети декаметровой радиосвязи специального назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: декаметровая радиосвязь; псевдослучайная перестройка рабочей частоты; алгоритм множественного доступа; частотный ресурс.

**Введение**

Создание единой цифровой системы связи, обеспечивающей наличие единого инфокоммуникационного пространства, является характерной особенностью современного этапа развития и совершенствования системы связи Вооруженных Сил Российской Федерации. Направление совершенствования автоматизированной сети радиосвязи (АСРС), как составного элемента такой системы, подразумевает реализацию совокупности взаимоувязанных между собой стационарных и полевых автоматизированных радиоцентров, расположенных на всей территории страны. Способность каждого радиоцентра выполнять функции ретранслятора предопределяет возможность перехода от традиционных структур радиосетей, основанных на применении закрепленных прямых каналов радиосвязи между абонентскими станциями, к распределенным многосвязным, динамически управляемым системам множественного доступа (СМД) с возможностью образования обходных путей передачи сообщений через радиоцентры-ретрансляторы [1, 2, 3]. Реализация таких сетевых структур при автоматизации процессов установления и ведения связи, коммутации пакетов на радиоцентрах, а также организации адаптивной маршрутизации информационных потоков существенно повысит пропускную способность и своевременность доставки сообщений потребителям при обеспечении требуемых показателей структурной устойчивости сетей радиосвязи [4, 5].

Основными достоинствами перспективной сети являются:

многосвязность структуры сети и возможность ее изменения при воздействии различных факторов в динамике ведения связи;

возможность управления различными видами ресурсов такой сети (частотным, аппаратурным, энергетическим и др.), позволяющая обеспечить повышение пропускной способности линий, радиоцентров и сети радиосвязи в целом;

повышение помехоустойчивости при использовании составных радиоканалов с использованием удалённых на расстояния до 1500-3000 км. радиоцентров-ретрансляторов;

обеспечение высокой мобильности абонентских станций (при смене местоположения возможна быстрая организация связи на удаленные расстояния), снижение затрат на организацию каналов связи;

автоматизация и алгоритмизация управления параметрами и режимами работы сети радиосвязи в динамике ее функционирования при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

**Степень разработанности темы**

Вопросы управления различными ресурсами линий и центров декаметровой связи достаточно подробно рассматривались в работах Хвостунова Ю. С., Семисошенко М. А., Постюшкова В. П., Шарова А. Н. и других зарубежных и отечественных авторов. Вместе с тем вопрос повышения пропускной способности сети декаметровой радиосвязи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты при коллективном использовании анизотропных радиоканалов требует разработки методики оптимального выбора параметров алгоритма множественного доступа к выделенному частотному ресурсу.

Существующие сети радиосвязи декаметрового диапазона (ДКМД) не удовлетворяют требованиям по предоставлению современных услуг по обмену информацией, оперативному доступу к ресурсам и абонентам других систем обмена

информацией. Снижение эффективности функционирования радиосвязи ДКМД и затруднение ее использование в современных телекоммуникационных системах вызвано как низкой помехоустойчивостью образуемых каналов за счет доступности среды распространения сигналов и взаимного влияния средств декаметровой радиосвязи, так и жестким закреплением выделенных частот за радионаправлениями [6].

Преодоление указанных недостатков возможно за счет коллективного использования частотного ресурса и применения защиты от преднамеренных помех путем псевдослучайного переключения рабочих частот (ППРЧ) [7]. Для разделения каналов абонентских станций на едином пакете частот в радиостанциях сети реализуется единое время и синхронно запускаются двоичные датчики случайных чисел (ДСЧ). С окончанием временного слота, выделяемого на передачу одного пакета данных, происходит синхронное изменение состояния ДСЧ, которое определяет циклический сдвиг рабочей частоты нулевого канала (рис. 1). Исключение наложения пакетов различных станций достигается введением между слотами защитных интервалов.

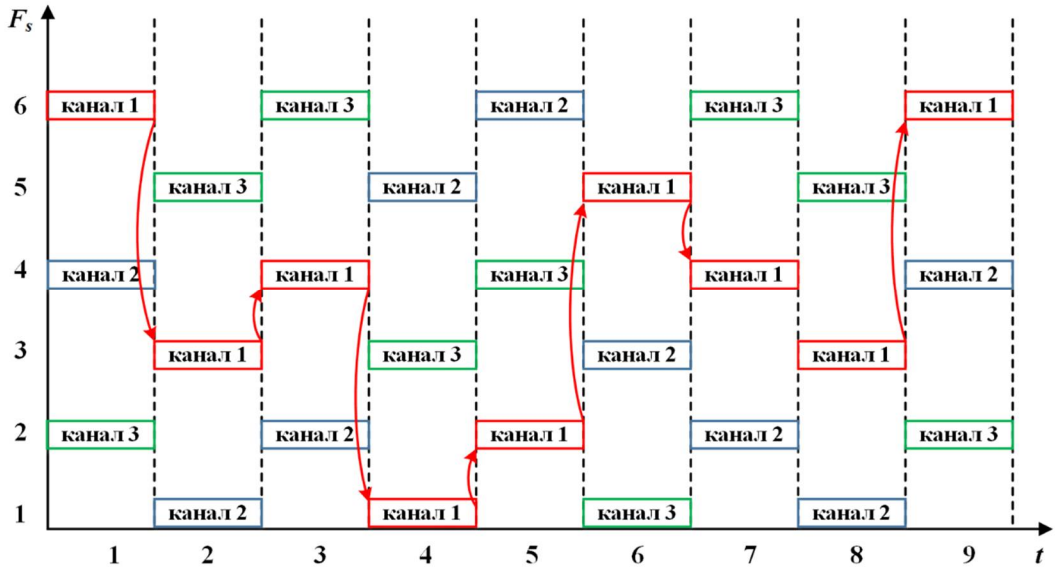


**Рис. 1.** Пример частотно-временного расписания сети радиосвязи

Отличительной особенностью технологии СМД [8, 9] является использование для установления соединения не одной, а группы стартовых рабочих частот. Это позволяет значительно повысить вероятность установления связи. Аналитическое выражение вероятности связи $P_{c\,l}$ на группе рабочих частот в $l$ радиолинии [10, 11]:

$$P_{c\,l}\left(\overline{F}_s\right)=1-\prod_{i=1}^{F_s}\left(1-P_c\left(f_i\right)\right), \tag{1}$$

где $P_c(f_i)$ – вероятность связи на одной из $f_i$ стартовых частот.

После установления соединения на группе стартовых частот в радиолинии децентрализовано осуществляется частотная адаптация (рис. 2), что значительно повышает устойчивость функционирования СМД при воздействии средств радиоэлектронного подавления (РЭП). Передаваемые в пакете данные закрываются корректирующим кодом. На приёме определяется число исправленных в слоте ошибок

для каждой частоты отдельно. Если оно приближается к максимальному значению, то принимается решение на замену данной частоты из числа запасных частот. По окончанию функционирования радиолинии выполняется переход на стартовые частоты.

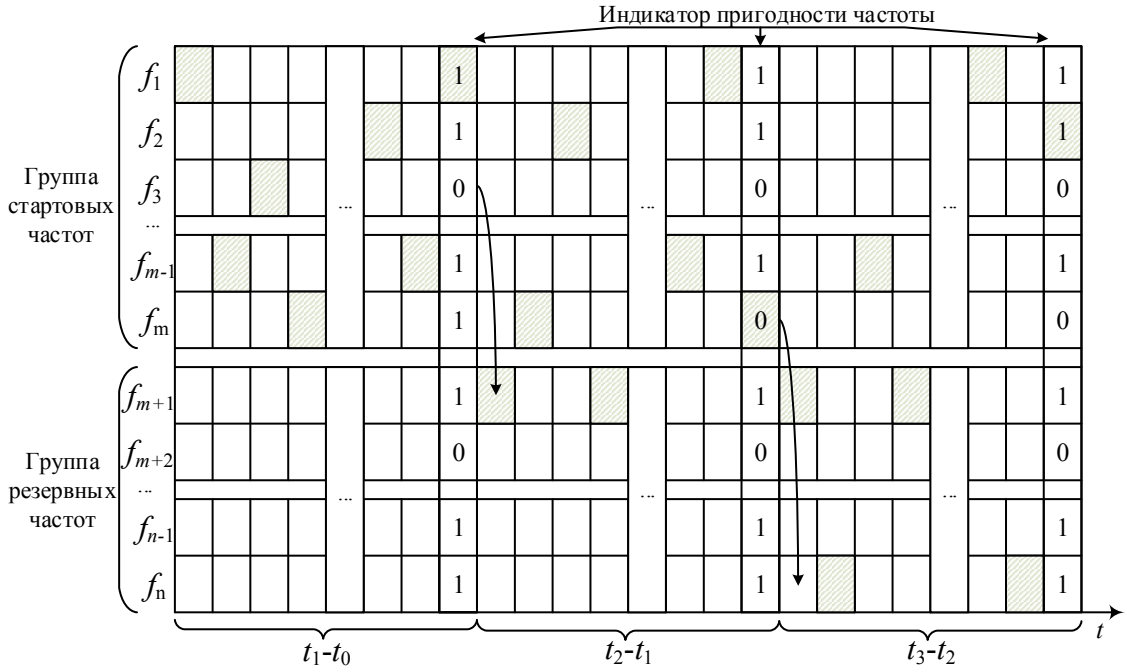


**Рис. 2.** Принцип частотной адаптации в радиолинии

**Обоснование выбора алгоритма множественного доступа**

Основной проблемой при создании перспективных сетей радиосвязи является выбор алгоритма множественного доступа (АМД) к группе коллективно используемых радиоканалов. Алгоритм доступа в наибольшей степени должен соответствовать условиям функционирования сети в экстремальных ситуациях и быть некритичным к пульсирующему характеру трафика, динамике изменения структуры сети и параметров каналов радиосвязи [12]. От выбранного вида АМД зависит насколько полно учитываются коллективные интересы абонентов, т.е. на сколько корректно действуют абоненты в «узком» месте сети [13]. Следовательно, повышение производительности сети ДКМ радиосвязи может быть достигнуто путем оптимизации параметров алгоритма множественного доступа к общему частотному ресурсу.

Классические алгоритмы множественного доступа к общему ресурсу не учитывают особенностей функционирования сети ДКМ радиосвязи, вызванных влиянием ионосферы. Отражение радиоволн от ионосферы обуславливает анизотропию радиоканалов декаметрового диапазона, в результате чего одни и те же рабочие частоты обеспечивают различные уровни сигнала на приёме в разных направлениях связи. Анизотропия рабочих частот и направлений передачи приводит к невозможности использования радиостанциями сети свободных рабочих частот в произвольном порядке. Выбор группы рабочих частотных каналов для установления и поддержания соединения в сети режима ППРЧ и алгоритм множественного доступа, определяющий порядок их использования, непосредственно связаны и взаимно зависимы. Данное обстоятельство требует учета пригодности каждого рабочего частотного канала для установления

соединения в различных направлениях, которая может быть обусловлена состоянием ионосферы, взаимным положением корреспондирующих радиостанций (КРС). Алгоритм множественного доступа к коллективно используемым анизотропным каналам должен учитывать такие параметры, как множество стартовых частот для установления соединения $\bar{F}_s$, множество рабочих частот $\bar{F}_{of}$ и вероятность занятия свободного канала $P_k$. Таким образом, множество параметров алгоритма множественного доступа есть $\gamma=(\bar{F}_{of}, \bar{F}_s, P_k)$. Эти параметры являются предметом оптимизации.

Исходными данными для оптимизации параметров АМД выступают схема организации связи, определяющая состав и количество радиолиний, местонахождение КРС, прогнозируемую поступающую нагрузку и вероятности установления связи.

Для построения СМД специального назначения используется метод доступа с контролем занятости (МДКЗ), обеспечивающий высокую производительность в условиях как регулярной, так и взрывной нагрузки [14, 15]. Процедура доступа заключается в разделении канала доступа на $F_s$ каналов и выбора $P_k$ вероятности занятия свободного канала. Приёмники радиостанций должны контролировать все каналы. При возникновении заявки на установление соединения, радиостанция выбирает один из свободных каналов, и с вероятностью $P_k$ принимает решение о его занятии до начала слота. При отрицательном решении в этом же временном слоте выбирается следующий свободный канал. Процедура повторяется до последнего свободного канала. При отсутствии положительного результата радиостанция ожидает следующий слот и повторяет процедуру. При отсутствии квитанции об установлении соединения со стороны вызываемого абонента принимается решение о столкновении пакетов различных станций. После детектирования коллизии процедура возобновляется.

Жесткий МДКЗ в условиях взрывной и регулярной нагрузки обеспечивает производительность сети (доля обслуженной нагрузки) для любого трафика выше 0,868. Возможность применения гибкого МДКЗ с большей производительностью не рассматривается, ввиду произвольного увеличения в нем времени занятия канала.

**Параметрическая оптимизация алгоритма множественного доступа**

Определение количества стартовых частот требует учета объема передаваемой в час наибольшей нагрузки с учетом возможности расширяемости сети. Для устойчивого функционирования системы множественного доступа количество рабочих каналов в частотно-временной матрице (ЧВМ) должно превышать количественные показатели циркулирующей в сети нагрузки $\Lambda_\Sigma$:

$$F_{s\,\min} > \Lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{L} \lambda_i \,. \qquad (2)$$

Обеспечение гарантированного установления соединения во всех условиях функционирования осуществляется за счет нахождения в группе стартовых каналов пригодных для информационного обмена частот, то есть частот на которых есть прохождение сигнала и не блокированных преднамеренной помехой.

В достаточно общем случае оптимальный алгоритм ППРЧ на каждом временном интервале выбирает для передачи информации рабочую частоту равновероятно из имеющейся совокупности частот, а оптимальная стратегия источника помех распределяет равномерно среднюю мощность помех на совокупности рабочих частот радиолинии. В частности, оптимальное подавление радиолинии может быть реализовано путем

равновероятного выбора с определенной периодичностью совокупности подавляемых частот и воздействия на них с одинаковой мощностью [16, 17]. Таким образом, в условиях воздействия преднамеренных помех при выборе количества рабочих частотных каналов в ЧВМ необходимо учитывать технические возможности средств радиоэлектронного подавления противостоящей группировки радиоэлектронной борьбы по подавлению частотных каналов $F_p$:

$$F_s \geq \Lambda_{\Sigma} + F_p \ . \tag{3}$$

Значительное превышение требуемого количества рабочих каналов в ЧВМ приведет к увеличению времени, затрачиваемого на анализ пригодности радиоканала. Количество резервных частотных каналов $F_r$ определяется исходя из возможностей выделения частотного ресурса, при этом минимальное значение количества резервных каналов должно стремиться к количеству каналов в ЧВМ $F_{r\,min} \rightarrow F_s$.

Для эффективного распределения частотного ресурса в линиях радиосвязи аналитическими методами используют частный показатель – вероятность установления связи при выполнении требований по достоверности $P_c(D \geq D_{dop})$ [18, 19]. Задача оптимального распределения частотного ресурса при коллективном использовании группы анизотропных каналов в сети радиосвязи сводится к определению вектора оптимального распределения частот $\overline{F}(f_1, f_2, \ldots f_k)$ в группу из $k$ рабочих частот, на которых качество связи в системе множественного доступа будет максимально при выполнении заданных требований в каждом из $l$ направлений:

$$P_c(\overline{F}) \rightarrow \max_{(\overline{F})} \Big| P_{c\,l}(\overline{F}) \geq P_{c\,l}^{tr} \forall l \ , \tag{4}$$

Определение вероятностей установления связи осуществляется ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службой (ИВ и ЧДС) на основе оперативного прогноза состояния ионосферы и текущих данных наблюдений за состоянием сигнальной и помеховой обстановки на выделенных частотах [20, 21].

Для наиболее точного прогнозирования вероятности связи зондирование осуществляется в режимах с шириной полосы сигнала $\Delta f$, выбранной для работы на требуемых скоростях $C_{tr}$. На основе прогноза составляется матрица вероятностей связи в системе множественного доступа по каждому радионаправлению $l_i$ и частоте $f_j$ (рис. 3).

$P_c(l, f, C) =$

| | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $f_4$ | $f_5$ | $f_6$ | $f_7$ | ... | $f_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $l_1$ | 0,55 | 0,46 | 0,3 | 0,03 | 0,27 | 0,33 | 0,52 | 0,12 | 0,48 |
| $l_2$ | 0,11 | 0,57 | 0,46 | 0,59 | 0,41 | 0,62 | 0,19 | 0,3 | 0,2 |
| $l_3$ | 0,32 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,5 | 0,65 | 0,63 | 0,49 | 0,02 |
| $l_4$ | 0,37 | 0,63 | 0,32 | 0,33 | 0,13 | 0,31 | 0,31 | 0,34 | 0,29 |
| $l_5$ | 0,33 | 0,45 | 0,45 | 0,28 | 0,24 | 0,65 | 0,52 | 0,34 | 0,33 |
| $l_6$ | 0,44 | 0,43 | 0,13 | 0,13 | 0,55 | 0,61 | 0,26 | 0,59 | 0,48 |
| $l_7$ | 0,21 | 0,38 | 0,62 | 0,53 | 0,45 | 0,29 | 0,24 | 0,42 | 0,41 |
| ... | 0,36 | 0,15 | 0,09 | 0,58 | 0,17 | 0,22 | 0,52 | 0,65 | 0,46 |
| $l_i$ | 0,08 | 0,44 | 0,48 | 0,15 | 0,09 | 0,39 | 0,39 | 0,08 | 0,08 |

**Рис. 3.** Пример матрицы вероятности связи

Для обеспечения высокой мобильности абонентских станций, коммутационных центров при смене местоположения необходима быстрая организация связи на удаленные расстояния. С этой целью территория, занимаемая системой множественно доступа, делится на условные области в пределах которых изменение вероятности связи стремится к минимуму

$$(\Delta x \Delta y) \in \{x_i y_i, x_j y_j\} \Big|_{\Delta P_{cl} \to \min} \tag{5}$$

Вычислительная сложность задачи расчета вероятности связи на одной частоте с учетом деления территории, занимаемой СМД, на подобласти определяется множеством возможных комбинаций их попарного соединения:

$$C_N^2 = \frac{N!}{2(N-2)!}\ , \tag{6}$$

где $N$ – количество подобластей в СМД.

Редукция вычислительной сложности задачи ИВ и ЧДС по прогнозу вероятности связи может быть достигнута исключением из анализа подобластей, в которых нахождение КРС физически невозможно из-за географических условий. При необходимости могут использоваться только те подобласти СМД, в пределах которых планируется нахождение или перемещение КРС (рис. 4).

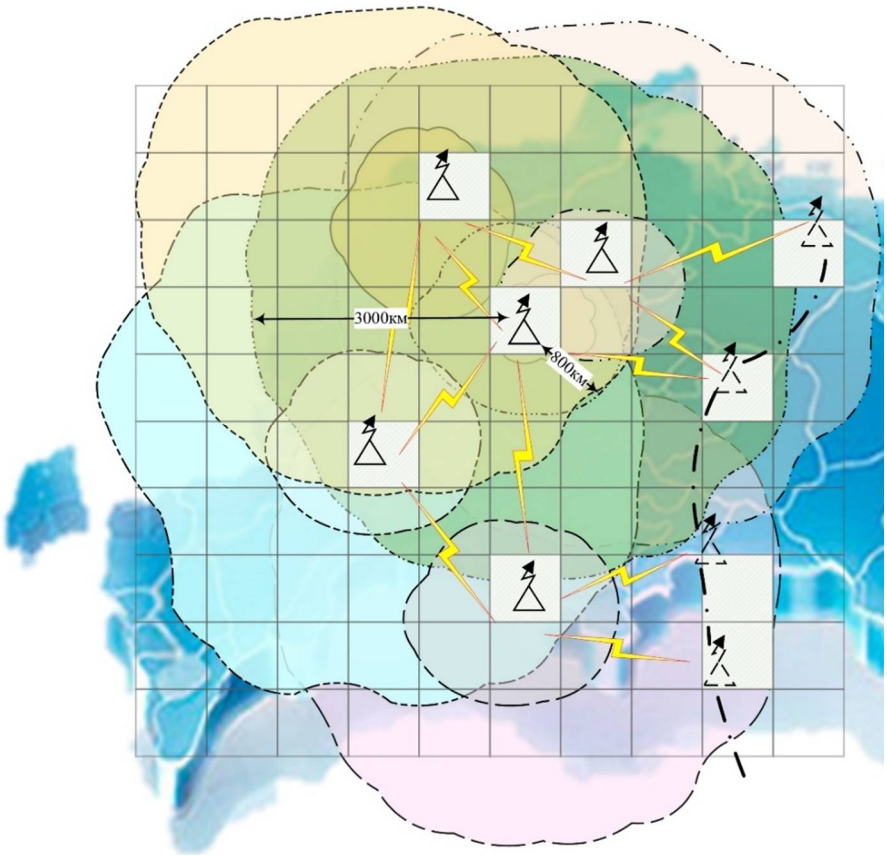


**Рис. 4.** Определение областей системы множественного доступа для расчета вероятности связи

Оперативное зондирование радиоканалов во всем выделенном диапазоне осложняет задачу обеспечения электромагнитной совместимости и приводит к вскрытию средствами радиоэлектронной разведки противоборствующей стороны всего пакета частот, что снизит разведзащищенность системы радиосвязи. Снижение влияния указанных факторов, а также вычислительной сложности оптимизационной задачи достигается уменьшением количества частот, на которых осуществляется прогнозирование. С этой целью выделенный частотный ресурс делится на участки $\Delta F_i$, в пределах которых изменение номиналов рабочих частот не приведет к существенному изменению вероятности связи в радиолинии:

$$\Delta F \in \{\Delta F_1, \Delta F_2 \ldots \Delta F_i\}\Big|_{\Delta P_{cl} \to \min}, \tag{7}$$

На основании полученного ИВЧДС оперативного прогноза решается задача оптимального выбора частотного ресурса (8), которая представляет собой задачу нелинейного математического программирования с нелинейными ограничениями (9).

$$P_{\text{c}}\left(\overline{F}\right) = 1 - \prod_{l=1}^{L}\left(1 - P_{\text{c}\,l}\left(\overline{F}\right)\right) \to \max, \tag{8}$$

$$P_{c\,l}\left(\overline{F}\right) = 1 - \prod_{i=1}^{F_s}\left(1 - P_c\left(f_i\right)\right) \geq P_{c\,l}^{tr}. \tag{9}$$

Для решения подобного класса задач широкое применение получили методы возможных направлений, и в частности метод обобщенного приведенного градиента. Однако на практике сложность применения методов возможных направлений вызвана многомодальным характером функции плотности вероятности связи, обусловленным наличием в выделенном частотном диапазоне участков с запрещенными частотами, а также участков, закрепленных за вещательными радиостанциями и станциями маркерных сигналов. Эти обстоятельства приводят к значительной зависимости итогового результата от выбранной начальной точки расчета. Кроме того, практические расчеты показали, что при увеличении количества частотных каналов в частотно-временной матрице приращение функции плотности вероятности связи стремится к минимуму. Как следствие, включение в группу рабочих частот частотных каналов, уступающих по своим показателям по всем направлениям связи.

Исходя из этих условий поиск решения оптимального выбора частотных каналов в системе множественного доступа выполняется методом полного перебора. Последующая редукция вычислительной сложности решения задачи может быть достигнута путем сортировки частотных каналов по критерию максимальной априорной плотности вероятности связи (байесовский критерий оптимизации (БКО) и исключения из перебора каналов непригодных для всех направлений. Процедура поиска оптимальных параметров АМД представлена на рис. 5.

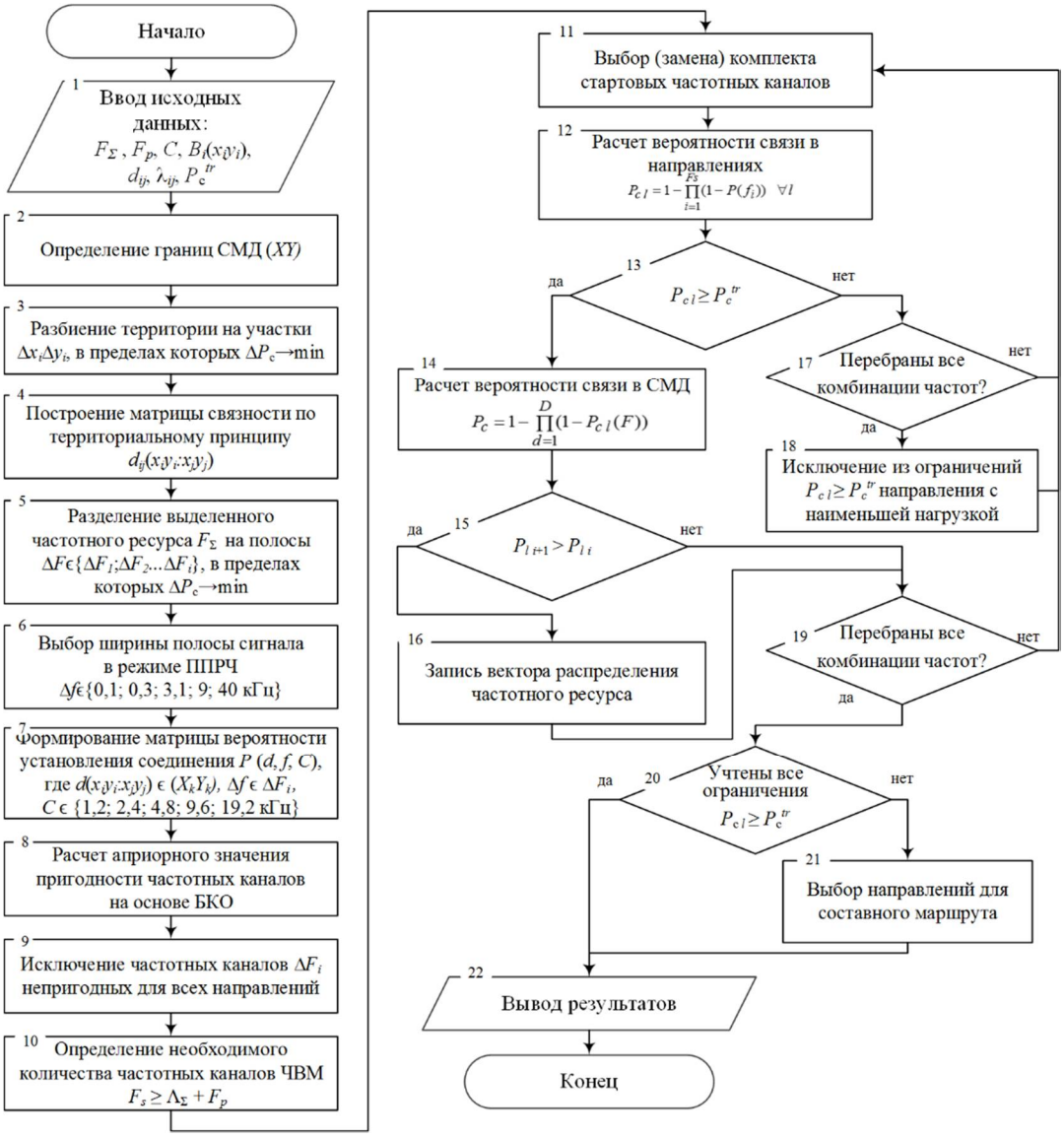


**Рис. 5.** Алгоритм выбора оптимальных параметров АМД

Вероятность связи в СМД рассчитывается на комплектах частот, удовлетворяющим требованиям (9). Множество стартовых рабочих частот определяется по максимальной априорной вероятности связи в СМД $P_c \to \max$. При невозможности выполнения условия (9) на единой группе рабочих частот из ограничений исключается направление связи $l_i$ с наименьшей прогнозируемой входной нагрузкой $\lambda_l \to \min$, после чего процедура поиска оптимальной группы стартовых частот запускается с измененными требованиями. В таком случае при выводе результатов распределения частотного ресурса необходимо дополнительное указание направления связи, в котором на этапе планирования необходимо предусмотреть организацию составной линии связи. Определение оптимального вектора закрепления рабочих частотных каналов позволяет построить многосвязную сеть радиосвязи с высокой вероятностью установления соединения. Как следствие, появляется возможность сокращения не только временных затрат на установление соединения, но и энергетических с уменьшением мощности радиопередатчиков.

**Заключение**

Предложенная методика позволяет осуществить оптимальный выбора параметров алгоритма множественного доступа к группе анизотропных радиоканалов. Результатом оптимального выбора является не только повышение пропускной способности и спектральной эффективности использования выделенного частотного ресурса, но и возможность построения самоорганизующейся сети радиосвязи в декаметровом диапазоне. Высокая вероятность установления соединения и реализация гибкой топологии сети обуславливают возможность дальнейшей оптимизации с учетом маршрутизации и перераспределения нагрузки в сети пакетной декаметровой радиосвязи [22]. Практическое применение рассмотренная методика находит при назначении радиоданных как на этапе планирования, так и в процессе функционирования сети декаметровой радиосвязи специального назначения.

**Литература**

1. *Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К.* Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / Под ред. В. А. Березовского. М.: Радиотехника, 2011. 444 с.

2. Сети радиосвязи с пакетной передачей информации. А. Н. Шаров, В. А. Степанец, В. И. Комашинский / Под ред. А. Н. Шарова СПб.: ВАС, 1994. 216 с.

3. *Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.* Основные направления модернизации декаметровой системы связи // Техника средств связи. 2019. № 1. С. 13-25.

4. *Лазоренко В. С.* Направления развития ведомственной сети декаметровой радиосвязи // Радиотехника, электроника и связь (РЭиС-2017): Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции, Омск, 2017. С. 90-93.

5. *Шибанов В. С., Лычагин Н. И., Серегин А. В.* Средства автоматизации в системах связи. М.: Радио и связь, 1990. 232 с.

6. *Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А.* Эффективность использования когнитивной радиосвязи в декаметровом диапазоне частот // Техника средств связи. 2018. № 2. С. 6-21.

7. *Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А.* Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.

8. *Панин Р. С., Путилин А. Н., Хвостунов Ю. С.* Технология построения сетей декаметровой радиосвязи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции. Радиотехника, электроника и связь. Омск, 2021. С. 38-40.

9. *Панин Р. С., Путилин А. Н., Хвостунов Ю. С.* Использование частотного ресурса системой декаметровой связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты Научно-технический журнал. Техника средств связи. Вып. № 3 (151), 2020. С. 2-13.

10. *Вентцель Е. С.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. 5-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2016. 448 с.

11. *Панин Р. С., Путилин А. Н.* Обобщенная модель функционирования сети декаметровой радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот // Электросвязь. 2022. № 4. С. 15-20. DOI 10.34832/ELSV.2022.29.4.003.

12. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Неймана. М.: Радио и связь, 1979. 432 с.

13. *Панин Р. С.* Предпосылки к созданию самоорганизующихся сетей пакетной декаметровой радиосвязи специального назначения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 126-130.

14. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012. 960 с.

15. Денисенко В.В., Киреева К. А., Борникова Е. М. Метод управления обменом CSMA/CD // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 7(23). С. 948-951.

16. *Дворников С. В., Гордейчук А. Ю., Иванов В. А., Русинов М. А., Семисошенко М. А.* Оценка помехозащищенности линий радиосвязи в режиме с медленной программной перестройкой рабочей частоты // Труды учебных заведений связи. 2017. Т.3. №4. С. 36-42.

17. *Шадрин Б. Г., Зачатейский Д. Е., Дворянчиков В. А.* Повышение помехоустойчивости передачи данных в ведомственных системах связи коротковолновых диапазона // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 1 (36). С. 7-19.

18. *Семисошенко М. А., Крживокольский Д. В.* Особенности построения системы управления при распределении частотного ресурса в сети пакетной декаметровой радиосвязи // Техника средств связи. 2018. № 1 (141). С. 231-234.

19. *Чернов Ю. А.* Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: Техносфера, 2018. 689 с.

20. *Bilitza D.* IRI the International Standard for the Ionosphere // Adv. Radio Sci. 2018. Vol. 16, pp. 1–11.

21. *Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Киселев Д.П., Сенокосов М.А.* Зависимость надежности связи в декаметровой радиолинии от выбора рабочей частоты учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 300-322. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.

22. *Чуднов А. М., Попов А. И., Макарова У. В.* Проблема совместного управления маршрутизацией и канальной структурой мобильной пакетной сети радиосвязи на основе распределения информационных потоков // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы V межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 2019. С. 159-161.

# SOLVING THE PROBLEM OF CHOOSING PARAMETERS FOR MULTIPLE ACCESS TO ANISOTROPIC RADIO CHANNELS OF THE DECAMETER RANGE

**ROMAN S. PANIN**
Doctoral Student. Military Academy of Communications St. Petersburg, Russia,
paninrs@yandex.ru

**ABSTRACT**

**Introduction:** the method of optimal choice of parameters of the algorithm of multiple access to the collectively used frequency resource of the decameter radio network in the mode of pseudorandom switching of operating frequencies is proposed. **Problem statement:** improving the performance of a decameter radio communication network operating in a complex electronic environment, as well as reducing the computational complexity of the frequency resource allocation procedure. **Methods:** methods of solving problems in the theory of estimation and decision-making; methods of probability theory; methods of finding solutions by exhausting all possible options; methods of possible directions. **Results:** a scientific task has been formulated to optimize the parameters of multiple access to a group of anisotropic radio channels, which is decomposed into particular tasks: determining the parameters of the multiple access algorithm to be optimized, developing a methodology for their selection, taking into account the analysis of the applicability of mathematical programming methods, as well as the formation of scientific and technical proposals for the implementation of this technique. **Practical significance:** the implementation of the proposed methodology can significantly increase the probability of communication in the decameter radio network and the efficiency of using the frequency resource, as well as significantly reduce the time intervals spent on establishing a connection. These advantages make it possible to ensure the transition of decameter radio networks to the technology of self-organizing radio networks with a flexible topology and the subsequent increase in their performance, taking into account the optimization of routing and redistribution of the load circulating in the network. The application of the technique makes it possible to automate and thereby reduce the complexity of the process of assigning and changing radio data not only at the planning stage, but also during the operation of a special-purpose decameter radio network.

**Keywords:** decameter radio communication; pseudorandom tuning of the operating frequency; multiple access algorithm; frequency resource.

**REFERENCES**


1. Berezovsky V. A., Dulkeit I. V., Savitsky O. K. Modern decameter radio communication: equipment, systems and complexes / Edited by V. A. Berezovsky. M.: Radio Engineering, 2011. 444 p. (In Rus).
2. Radio communication networks with packet transmission of information. A. N. Sharov, V. A. Stepanets, V. I. Komashinsky / Edited by A. N. Sharov St. Petersburg: VAS, 1994. 216 p. (In Rus).
3. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. The main directions of modernization of the decameter communication system. Equipment of means of communication. 2019. No. 1. Pp. 13-25. (In Rus).
4. Lazorenko V. S. Directions of development of the departmental decameter radio communication network. Radio engineering, electronics and communications (REiS-2017): Collection of reports of the IV International Scientific and Technical Conference, Omsk, 2017. Pp. 90-93. (In Rus).
5. Shibanov V. S., Lychagin N. I., Seregin A.V. Automation tools in communication systems Moscow: Radio and Communications, 1990. 232 p. (In Rus).
6. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. The effectiveness of the use of cognitive radio communication in the decameter frequency range. Communication equipment. 2018. No. 2. Pp. 6-21. (In Rus).
7. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. Noise immunity of communication systems with pseudorandom adjustment of the operating frequency: monograph. St. Petersburg: Its publishing house, 2013. 166 p. (In Rus).
8. Panin R. S., Putilin A. N., Khvostunov Yu. S. Technology of building decameter radio communication networks in the mode of pseudorandom adjustment of the operating frequency. Abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference. Radio engineering, electronics and communications. Omsk, 2021. Pp. 38-40. (In Rus).
9. Panin R. S., Putilin A. N., Khvostunov Yu. S. The use of a frequency resource by a decameter communication system in the mode of pseudorandom adjustment of the operating frequency Scientific and Technical Journal. Communication equipment. Vol. No. 3 (151), 2020. Pp. 2-13. (In Rus).
10. Wentzel E. S. Theory of random processes and its engineering applications: textbook. E. S. Wentzel, L. A. Ovcharov. 5th ed., ster. M.: KNORUS, 2016. 448 p. (In Rus).
11. Panin R. S., Putilin A. N. Generalized model of functioning of a decameter radio communication network with pseudorandom adjustment of operating frequencies. Telecommunication. 2022. No. 4. Pp. 15-20. DOI 10.34832/ELSV.2022.29.4.003. (In Rus).
12. Kleinrock L. Theory of queuing. Trans. with English; Edited by V.I. Neiman. M.: Radio and Communications, 1979. 432 p. (In Rus).
13. Panin R. S. Prerequisites for the creation of self-organizing networks of packet decameter radio communication for special purposes. Actual problems of infotelecommunications in science and education: collection of scientific articles: in 4 volumes, St. Petersburg, February 24-25, 2021. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruevich, 2021. Pp. 126-130. (In Rus).
14. Tanenbaum E., Weatherall D. Computer networks. 5th ed. St. Petersburg: St. Petersburg, 2012. 960 p. (In Rus).
15. Denisenko V.V., Kireeva K. A., Bornikova E. M. The CSMA/CD exchange management method. Alley of Science. 2018. Vol. 1. No. 7(23). Pp. 948-951. (In Rus).
16. Dvornikov S. V., Gordeychuk A. Yu., Ivanov V. A., Rusinov M. A., Semisoshenko M. A. Evaluation of interference immunity of radio communication lines in the mode with slow program adjustment of the operating frequency. Proceedings of educational institutions of communications. 2017. Vol.3. No. 4. Pp. 36-42. (In Rus).
17. Shadrin B. G., Zachateysky D. E., Dvoryanchikov V. A. Improving the noise immunity of data transmission in departmental communication systems of the short–wave range. Radio communication technology. 2018. No. 1 (36). Pp. 7-19. (In Rus).
18. Semisoshenko M. A., Krzhivokolsky D. V. Features of building a control system for the distribution of frequency resources in packet decameter radio communication networks. Communications equipment. 2018. No. 1 (141). Pp. 231-234. (In Rus).

19. Chernov Yu. A. Special issues of radio wave propagation in communication and radio broadcasting networks. Moscow: Technosphere, 2018. 689 p. (In Rus).
20. Bilitza D. IRI the International Standard for the Ionosphere. Adv. Radio Sci. 2018. Vol. 16, Pp. 1–11.
21. Pashintsev V. P., Skorik A.D., Koval C. A., Kiselev D. P., Senokosov M. A. Dependence of communication reliability in a decameter radio line on the choice of the operating frequency taking into account the signal-interference situation and the diffusivity of the ionosphere. Control systems, communications and security. 2019. No. 4. Pp. 300-322. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412. (In Rus).
22. Chudnov A.M., Popov A. I., Makarova U. V. The problem of joint management of routing and the channel structure of a mobile packet radio network based on the distribution of information flows. Promising directions for the development of domestic information technologies: materials of the V interregional scientific and practical conference, Sevastopol, 2019. Pp. 159-161. (In Rus).