

УДК: 621.396.24; 621.371.38

DOI: 10.53816/23061456_2022_9-10_82

**МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА
МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА К ГРУППЕ АНИЗОТРОПНЫХ
РАДИОКАНАЛОВ В СЕТИ ПАКЕТНОЙ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ**

**METHOD OF OPTIMAL CHOICE OF PARAMETERS OF THE ALGORITHM
OF MULTIPLE ACCESS TO A GROUP OF ANISOTROPIC RADIO CHANNELS
IN A PACKET DECAMETER RADIO COMMUNICATION NETWORK**

Р.С. Панин

R.S. Panin

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Статья посвящена изучению особенностей обеспечения множественного доступа в перспективных проектируемых в интересах обороноспособности и безопасности государства сетей декаметровой (ДКМ) радиосвязи специального назначения (СДРС СН). Предполагается, что доступ станций к каналному ресурсу сети осуществляется по методу множественного доступа с контролем занятости. Предложены к рассмотрению основные особенности построения и функционирования СДРС СН, функционирующей при коллективном использовании выделенного частотного ресурса в режиме псевдослучайной перестройки частоты (ППРЧ). Исследованы проблемные вопросы и предложена методика выбора параметров алгоритма множественного доступа к группе коллективно используемых радиоканалов.

Ключевые слова: декаметровая радиосвязь, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, частотный ресурс, алгоритм множественного доступа.

The article is devoted to the study of the features of providing multiple access in promising decameter radio communication networks designed in the interests of the defense capability and security of the state for special purposes. It is assumed that the access of stations to the channel resource of the network is carried out by the method of multiple access with employment control. The main features of the construction and functioning of a special-purpose decameter radio communication network functioning with the collective use of a dedicated frequency resource in the mode of pseudorandom frequency tuning are proposed for consideration. The problematic issues are investigated and the method of choosing the parameters of the algorithm of multiple access to a group of collectively used radio channels is proposed.

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

Характерной особенностью современного этапа развития и совершенствования системы связи Вооруженных Сил Российской Федерации является создание объединенной автомати-

зированной цифровой системы связи (ОАЦСС), обеспечивающей наличие единого инфокоммуникационного пространства. Одним из составных элементов такой системы является автома-

тизированная сеть радиосвязи (АСРС). Целый ряд технико-экономических и эксплуатационных достоинств декаметровая радиосвязи (оперативность, гибкость, быстрая восстанавливаемость, дешевизна) несмотря на ее известные недостатки (относительно малая пропускная способность, зависимость качества связи от условий распространения радиоволн, подверженность различного рода помехам) обуславливает необходимость (целесообразность) не только сохранения этого вида связи в качестве одного из основных средств, но и как важнейшего резерва при обеспечении эффективного и устойчивого функционирования современных территориально распределенных систем управления в случаях выхода из строя или восстановления других видов связи.

Одной из главных тенденций развития и совершенствования системы ДКМ радиосвязи является автоматизация управления процессами установления связи и ведения радиообмена применительно к отдельным линиям, а также к радиостанциям и сетям радиосвязи в целом. Внедрение на радиостанциях автоматизированных систем контроля и управления радиосвязью позволяет повысить оперативность функционирования радиостанций и сетей в целом и достигнуть требуемых технико-эксплуатационных характеристик радиосвязи [1].

Другой важнейшей тенденцией развития системы ДКМ радиосвязи является переход от традиционных, морфологически избыточных структур сетей, основанных на применении закрепленных прямых каналов радиосвязи между пользователями, к распределенным многосвязным, динамически управляемым ячейкам множественного доступа (ЯМД) с возможностью образования обходных путей передачи сообщений через радиостанции-ретрансляторы. Реализация таких сетевых структур при автоматизации процессов установления и ведения связи, коммутации пакетов на радиостанциях, а также организации адаптивной маршрутизации информационных потоков существенно повысит своевременность доставки сообщений потребителям при обеспечении требуемых показателей структурной устойчивости сетей радиосвязи [2, 3]. В такой ЯМД возможна организация не только прямых линий радиосвязи, но и различных обходных маршрутов, где каждый из радиостанций спосо-

бен выполнить функцию радиостанции-ретранслятора. Основными особенностями и преимуществами такой 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, аппаратным, энергетическим и др.), позволяющая обеспечить повышение пропускной способности линий, радиостанций и сети радиосвязи в целом;

- организация связи при помощи как прямых, так и составных радиоканалов с использованием радиостанций-ретрансляторов, удаленных на расстояния до 2000–3000 км, что, как доказано многочисленными исследованиями, повышает помехоустойчивость;

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

В качестве частного примера реализации такого подхода можно привести самоорганизующиеся сети радиосвязи с децентрализованным управлением, не имеющие постоянной структуры. При наличии доступности любые радиостанции могут соединяться в произвольном порядке. Каждая абонентская радиостанция может быть ретранслятором, динамически определяя направления пересылки чужих данных. Частотный ресурс при этом используется коллективно [4, 5].

В существующих системах декаметровая радиосвязи применяются два способа использования частотного ресурса: децентрализованный, когда за каждой радиостанцией закрепляются назначенные ей частоты, и централизованный, при котором частоты, выделенные для группы радиостанций, составляют общий для этой группы ресурс, и каждая из указанных частот может быть использована для связи в любой радиостанции данной группы. В случае децентрализованного использования управление частотными ресурсами в каждой радиостанции осуществляется независимо от других радиостанций, например методами частотной адаптации. При централизованном использовании частотного ресурса управление им может

осуществляться путем оптимального назначения частот радиоприемникам на время их работы с возможностью перераспределения их в группе функционирующих радиоприемников.

Существенное повышение эффективности функционирования АСРС может быть достигнуто комбинированным применением этих способов при использовании всеми станциями сети сигналов с последовательным расширением спектра, то есть систем радиосвязи с ППРЧ. Эти системы используют для установления соединения не одну частоту, а группу стартовых рабочих частот. Вероятность наличия для любого направления связи хотя бы одной пригодной рабочей частоты растет с увеличением числа стартовых частот [6].

Аналитическое выражение вероятности связи $P_{св l}$ на группе рабочих частот в радиоприемнике:

$$P_{св l} = 1 - \prod_{i=1}^{F_{ст}} (1 - P_i),$$

где P_i — вероятность связи на одной из $F_{ст}$ стартовых частот.

Таким образом, вероятность связи в ячейке доступа можно представить выражением:

$$P_{св} = 1 - \prod_{l=1}^L (1 - P_{св l}),$$

где L — количество радиоприемников, в которых требуется установить связь.

Классические алгоритмы множественного доступа к общему ресурсу не учитывают особенностей функционирования систем ДКМ радиосвязи, одной из которых является анизотропия [7]. Анизотропия радиоканалов декаметрового диапазона обусловлена отражением радиоволн от ионосферы, в результате чего одни и те же рабочие частоты обеспечивают различные уровни сигнала на приеме в разных направлениях связи. 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) [8].

Обычно на практике при оценке эффективности распределения частотного ресурса в линиях радиосвязи аналитическими методами по своевременности используют частный показатель — вероятность установления связи при выполнении требований по достоверности $P_{ус} (D \geq D_{доп})$. Задача оптимального распределения частотного ресурса при коллективном использовании группы анизотропных каналов сводится к определению вектора оптимального распределения частот $F^*(f_1, f_2, \dots, f_k)$ в группу из k рабочих частот, на которых качество связи в ячейке доступа будет максимально при выполнении заданных требований в каждом из l направлений:

$$P_{св} (F^*) \rightarrow \max_{(F^*)} \left| P_{св l} (F^*) \geq P_{св l}^{треб} \forall l \right. \quad (1)$$

На первом этапе решения оптимизационной задачи предполагается разделение сети ДКМ радиосвязи на ячейки множественного доступа. Исходными данными для этой процедуры выступают схема организации связи, определяющая состав и количество радиоприемников, и координаты возможного положения КРС. Распределение частотного ресурса между ячейками доступа может быть осуществлено на основе долгосрочного радиопрогноза.

Определение вероятностей установления связи в рамках ячейки доступа осуществляется ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службой (ИВ и ЧДС) на основе краткосрочного (оперативного) прогноза состояния ионосферы и текущих данных наблюдений за состоянием сигнальной и помеховой обстановки на выделенных частотах. С этой целью территория, занимаемая ячейкой множественного доступа, условно делится на области, в пределах которых изменением вероятности установления связи можно пренебречь

$$(\Delta x \Delta y) \in \left\{ x_i y_i, x_j y_j \right\} \left| \Delta P_{св l} \rightarrow \min \right.$$

Вычислительная сложность одного из этапов задачи расчета вероятности связи с учетом деления ЯМД на области определяется

множеством возможных комбинаций их попарного соединения:

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

где N — количество областей в ЯМД.

Задача ИВ и ЧДС по прогнозу во времени, по частоте и в пространстве может быть последовательно редуцирована. На основе матрицы связности КРС (рис. 1) определяется множество направлений связи, в интересах которых необходимо осуществить прогноз.

Таким образом, для дальнейшего анализа используются только те области ячейки доступа, в пределах которых планируется нахождение или перемещение КРС (рис. 2).

Зондирование радиоканалов на всех выделенных частотах осложняет задачу электромагнитной совместимости и приводит к вскрытию

всего пакета частот, что снижает разведзащищенность системы радиосвязи. Выделенный частотный ресурс предлагается разделить на поддиапазоны, в пределах которых изменение номиналов рабочих частот не приведет к заметному изменению вероятности установления связи в радиолинии:

$$\Delta F \in \{\Delta F_1, \Delta F_2 \dots \Delta F_l\} \Big| \Delta P_{св,l} \rightarrow \min.$$

Для повышения эффективности прогнозирования вероятности связи зондирование предполагается осуществлять на требуемых скоростях $C_{\text{треб}}$ и с шириной полосы сигнала Δf , выбранных для работы в режиме ППРЧ, рис. 3

Важную роль при распределении частотного ресурса для его группового использования играет учет поступающей нагрузки. На следующем этапе на основе матрицы связности КРС в ячейке доступа определяется поступающая нагрузка. Для устойчивого функционирования ячейки доступа количество рабочих каналов в частотно-временной матрице (ЧВМ) должно быть больше значения средней суммарной входной нагрузки $\Lambda_{\text{вх}}$ радиолиний, работающих на выделенной группе рабочих частот:

$$F_{\text{ст min}} > \Lambda_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^L \lambda_i.$$

Номер КРС	1	2	3	4	5	6
	прогнозируемая интенсивность нагрузки, Эрл					
1	–	0,31	–	0,15	0,1	–
2	0,31	–	0,11	0,1	–	0,14
3	–	0,11	–	–	0,15	–
4	0,15	0,1	–	–	–	0,1
5	0,1	–	0,15	–	–	0,05
6	–	0,14	–	0,1	0,05	–

Рис. 1. Матрица связности КРС

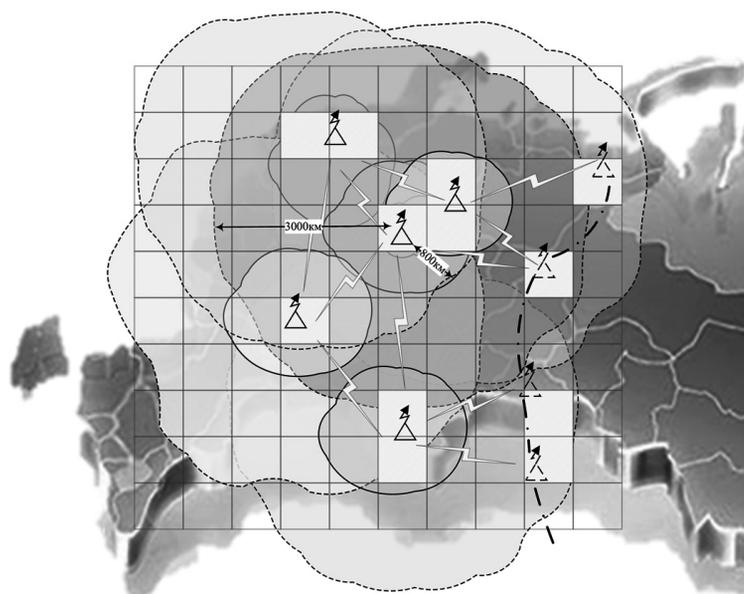


Рис. 2. Определение областей ячейки множественного доступа для расчета вероятности связи

$$P_{cb}(l, f, C) = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & \dots & f_j \\ \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ \dots \\ l_i \end{matrix} & \left| \begin{matrix} 0,7 & 0,75 & 0,65 & 0,5 & 0,3 & \dots & 0,1 \\ 0,6 & 0,7 & 0,6 & 0,4 & 0,3 & \dots & 0,1 \\ 0,5 & 0,6 & 0,65 & 0,55 & 0,4 & \dots & 0,2 \\ 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,4 & 0,6 & \dots & 0,6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,1 & 0,2 & 0,35 & 0,45 & 0,55 & \dots & 0,15 \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

Рис. 3. Матрица вероятности связи

Кроме того, при выборе количества рабочих частотных каналов в ЧВМ необходимо учитывать возможности по подавлению частотных каналов $F_{под}$ средствами РЭП противостоящей группировки РЭБ:

$$F_{ст} \geq \Lambda_{вх} + F_{под}.$$

Количество резервных частотных каналов $F_{рез}$ определяется исходя из возможностей выделения частотного ресурса, при этом минимальное значение количества резервных каналов должно стремиться к количеству каналов в ЧВМ $F_{рез\ min} \rightarrow F_{ст}$.

На основании полученных данных решается задача оптимального распределения частотного ресурса, которая представляет собой задачу нелинейного математического программирования с нелинейными ограничениями. Для решения представленного класса задач применяются методы возможных направлений, и в частности метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Применение метода ОПГ осложнено многомодальным характером функции плотности вероятности связи, вызванным наличием в диапазоне выделенного частотного ресурса участков с запрещенными частотами, а также участков, выделенных для работы вещательных станций, станций маркерных сигналов. Эти обстоятельства приводят к значительной зависимости итогового результата от выбранной начальной точки расчета.

Исходя из этих условий поиск решения оптимального распределения частотного ресурса в ячейке множественного доступа может быть выполнен методом полного перебора. Последующая редукция вычислительной сложности решения задачи может быть достигнута путем сортировки частотных каналов по критерию максимальной априорной плотности вероятно-

сти связи и исключения из перебора каналов, непригодных для всех направлений. Критерием выполнения операции перебора выступает выражение (1).

$$P_{cb,l}(F^*) \geq P_{cb,l}^{треб} \forall l. \quad (2)$$

Вероятность связи в ЯМД рассчитывается на комплектах частот, удовлетворяющих требованиям (2). Группа стартовых рабочих частот определяется по максимальной вероятности связи в ЯМД $P_{cb} \rightarrow \max$. При невозможности выполнения условия (2) на единой группе рабочих частот из ограничений исключается направление связи l с наименьшей прогнозируемой входной нагрузкой $\lambda_l \rightarrow \min$, и процедура поиска оптимальной группы стартовых частот запускается с измененными требованиями. В таком случае при выводе результатов распределения частотного ресурса оператору дополнительно указывается направление связи, в котором необходимо предусмотреть организацию связи через ретранслятор.

Предложенная методика оптимального выбора параметров алгоритма множественного доступа к анизотропным радиоканалам позволяет значительно повысить пропускную способность и эффективность использования выделенного частотного ресурса в сети пакетной декаметровой радиосвязи. Практическое применение рассмотренная методика находит при назначении радиоданных как на этапе планирования, так и в процессе функционирования сети декаметровой радиосвязи, работающей в режиме ППРЧ.

Литература

1. Recommendation ITU-R F.1487 Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators, 2000 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int>.
2. Путилин А.Н. Модель взаимодействия линии радиосвязи и станции радиоэлектронного подавления // Доклад на конф. «Региональная информатика 2012», 24-26 октября 2012 г. — СПб.: СПОИСУ, 2012. 161 с.
3. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. — Киев: Техника, 1989. 129 с.

4. 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.

5. 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.

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

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

8. 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. № 3 (151). 2020. С. 2–13.

References

1. Recommendation ITU-R F.1487 Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators, 2000: [Electronic resource]. URL: <https://www.itu.int>

2. Putilin A.N. Model of interaction of a radio communication line and an electronic suppression station // Report at the conference «Regional Informatics 2012». October 24–26, 2012. — St. Petersburg: SPOISU, 2012. 161 p.

3. Bunin S.G., Voiter A. . Computer networks with packet radio communication. — Kiev: Tekhnika, 1989. 129 p.

4. 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. — Омск, 2021. Pp. 38–40.

5. Berezovsky V.A., Dulkeit I.V., Savitsky O.K. Modern decameter radio communication: equipment, systems and complexes / Edited by V.A. Berezovsky. — М.: Radio Engineering, 2011. 444 p.

6. Sharov A.N., Stepanets V.A., Komashinsky V.I. Radio communication networks with packet transmission of information / Edited by A.N. Sharova. — St. Petersburg: VAS, 1994. 216 p.

7. Shibanov V.S., Lychagin N.I., Seregin A.V. Automation tools in communication systems. — М.: Radio and Communications, 1990. 232 p.

8. Panin R.S., Putilin A.N., Khvostunov Yu.S. The use of the frequency resource by the decameter communication system in the mode of pseudorandom adjustment of the operating frequency // Scientific and Technical Journal. Communication equipment. 2020. No. 3 (151). Pp. 2–13.