ДИНАМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В КОРОТКОВОЛНОВЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТРИК И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА КАНАЛОВ

Лукьянченко В. Н.[1], Велигоша А. В.[2], Третьяков Е. А.[3], Ханин С. А.[4]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-75-85

Ключевые слова: *коротковолновая связь, динамическая маршрутизация, ионосферный канал, вероятностные метрики, корреляция замираний, графовая модель, алгоритм Дейкстры, таблицы маршрутизации, LQA, STANAG-5066.*

Аннотация

Цель исследования: *разработка метода динамической маршрутизации в сетях КВ-связи, обеспечивающего повышение вероятности своевременной доставки сообщений за счёт комплексного учёта вероятностных характеристик каналов и пространственно-частотной корреляции замираний между трассами.*

Метод исследования: *построена ориентированная графовая модель КВ-сети, где вершины – радиостанции, рёбра – потенциальные ионосферные трассы. Вес каждого ребра задан через логарифм вероятности успешной передачи, вычисляемой на основе долгосрочных прогнозов МПЧ, статистических моделей замираний (Релей, Райса, Накагами) и данных оперативного LQA-зондирования. Для учёта корреляции введена корреляционная матрица сети и штрафные добавки к весам. Оптимальный маршрут находится модифицированным алгоритмом Дейкстры, а таблицы ретрансляции формируются по принципу link-state с двухуровневой архитектурой (таблица частот и таблица маршрутов), совместимой со стандартами MIL-STD-188-141 и STANAG-5066.*

Результаты исследования: *предложен метод динамической маршрутизации, позволяющий выбирать пути с максимальной вероятностью доставки пакета с учётом корреляции каналов. Разработана процедура заполнения таблиц ретрансляции на основе графа кратчайших путей; приведён численный пример для сети из шести узлов. Показано, что учёт корреляции позволяет избежать выбора маршрутов с сильно скоррелированными участками и даёт возможность формировать резервные слабо зависимые пути. Метод адаптируется к квазистационарным изменениям ионосферы и быстрым замираниям при допустимой служебной нагрузке.*

Научная новизна: *для задач КВ-маршрутизации предложен комплексный вероятностный подход, объединяющий логарифмическую метрику надёжности ребра на основе интегральных распределений замираний; корреляционную матрицу сети, вычисляемую по данным LQA; модификацию алгоритма Дейкстры, учитывающую штрафы за корреляцию рёбер. Новизна также заключается в сохранении совместимости с существующими стандартами ALE и STANAG-5066 при переходе от реактивной к упреждающей вероятностной маршрутизации, что повышает живучесть военных и специальных систем связи в условиях нестабильности спутниковых и наземных каналов.*

Введение

Коротковолновая (КВ) радиосвязь занимает особое место в системах военной и специальной связи благодаря присущим ей свойствам – способности обеспечивать передачу информации на сотни и тысячи километров без использования ретрансляции и независимо от космического сегмента. В условиях угрозы подавления спутниковых каналов и разрушения наземных линий связи, КВ-диапазон остаётся единственным резервом дальней связи, способным функционировать автономно. Вместе с тем внедрение КВ-сетей препятствует крайняя нестабильность среды распространения радиоволн, обусловленная изменчивостью ионосферы. Ионосферный канал характеризуется многолучевостью, интерференционными замираниями, суточными и сезонными вариациями максимальных применимых частот (МПЧ) [1, 2]. Уровень сигнала в точке приёма подвержен случайным флуктуациям, описываемым распределениями Релея, Райса или Накагами [4, 5], что делает вероятность своевременной передачи пакета информации отличной от единицы и переменной во времени. В таких условиях статическая маршрутизация, при которой радиолиния и ее рабочая частота назначаются на основе долгосрочного прогноза, не может гарантировать требуемой надёжности связи.

1 ***Лукьянченко Вадим Николаевич***, начальник отдела Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации. Москва, Россия. E-mail: lwn77@yandex.ru

2 ***Велигоша Александр Васильевич***, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры № 52 Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: aveligosha@mail.ru

3 ***Третьяков Евгений Александрович***, адъюнкт Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: 2923201@mail.ru

4 ***Ханин Сергей Александрович***, курсант Филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Shmel7604dota@yandex.ru

1. Перспективы развития маршрутизация в КВ-радиосвязи

Современные системы КВ-связи решают задачу адаптации на физическом и канальном уровнях с помощью механизмов автоматического установления соединения (ALE, Automatic Link Establishment), стандартизованных в документе MIL-STD-188-141 и его отечественном аналоге ГОСТ Р 50658-94 [5, 6]. Эти механизмы формируют таблицу доступных частот (трасс) на основе оценивания качества канала (LQA) и позволяют выбирать оптимальную частоту для связи с конкретным корреспондентом. На сетевом уровне спецификация STANAG-5066, вводит процедуры ретрансляции пакетов и протокол управления ретрансляцией HRMP [11], реализующий дистанционно-векторный принцип заполнения таблиц ретрансляции. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, существующие подходы обладают принципиальными ограничениями:

- они слабо учитывают пространственно-частотную корреляцию замираний в различных трассах;
- используют упрощённые метрики качества;
- ориентированы на реактивное переключение маршрута post factum, а не на упреждающий вероятностный выбор.

Целью исследования является разработка метода динамической маршрутизации в КВ-сети, обеспечивающего повышение вероятности своевременной доставки сообщений за счёт комплексного учёта вероятностных характеристик каналов и корреляционных связей между ними. Предлагаемый метод опирается на графовую модель сети, где вершины соответствуют радиостанциям, а ориентированные рёбра – потенциальным ионосферным трассам, вес каждого ребра представляет собой функцию вероятности успешной передачи, вычисляемую с привлечением моделей прогнозирования МПЧ, данных зондирования и статистических моделей замираний. Маршрутизация формулируется как задача поиска пути (или совокупности путей) с максимальной надёжностью, решаемая модифицированным алгоритмом Дейкстры с учётом корреляции.

В статье последовательно рассмотрены: графовая модель КВ-сети и принципы формирования весов рёбер; процедура заполнения таблиц маршрутизации на основе предложенного алгоритма и её связь с классической IP-маршрутизацией; математический аппарат расчёта вероятностных метрик, включая модели замираний и методы оценки корреляции каналов; выводы по полученным результатам и определены направления дальнейших исследований.

Таким образом, материал статьи направлен на устранение разрыва между развитыми методами теории вероятностей, теории графов и практическими потребностями военной КВ-связи, где цена ошибки маршрутизации выражается не в потере пропускной способности, а в нарушении живучести системы управления.

2. Графовая модель КВ-сети как основа динамической маршрутизации

Рассмотрим КВ-сеть, состоящую из N радиостанций (узлов), каждая из которых способна выполнять функции источника, получателя и ретранслятора сообщений. Ввиду пространственной разнесённости узлов и изменчивости ионосферы канал связи между парой станций существует не всегда и характеризуется переменным во времени характеристиками. Это обстоятельство делает непригодными модели сетей с фиксированной топологией.

Сеть представляется ориентированным графом (1)

$$G(t) = (V, E(t), W(t)), \quad (1)$$

где V – множество вершин, отождествляемых с радиостанциями ($|V| = N$), $E(t)$ – множество ориентированных рёбер, существующих в момент времени t. Ребро e_{ij} направлено от узла i к узлу j и означает, что в данный момент существует хотя бы одна ионосферная трасса, пригодная для передачи сигнала с заданным качеством, $W(t)$ – множество весов рёбер, характеризующих качество соответствующей трассы.

Особенность графа $G(t)$ – его нестационарность: множество рёбер $E(t)$ и их веса $W(t)$ изменяются во времени вследствие суточного хода ионосферы, сезонных вариаций и случайных возмущений. По этой причине статические методы поиска кратчайших путей, развитые для проводных сетей [8, 9], должны быть дополнены процедурами периодического или событийного пересчёта маршрутов.

Наличие ребра e_{ij} определяется не только состоянием ионосферы, но и техническими характеристиками антенных систем узлов i и j. Коротковолновые антенны обладают выраженной пространственной избирательностью, формируя диаграмму направленности с главным лепестком, ориентированным под определённым азимутальным углом и углом места [10]. Ионосферная трасса реализуется, если:

1) рабочая частота лежит в интервале между НПЧ и МПЧ для данной дальности и текущего состояния ионосферы;
2) геометрические углы прихода и излучения согласуются с диаграммами направленности антенн;

3) отношение сигнал/шум в точке приёма превышает порог, требуемый для заданной вероятности ошибки.

Таким образом, антенная система определяет допустимые направления в графе. В терминах графовой модели это означает, что ребро e_{ij} может отсутствовать даже при благоприятной ионосферной обстановке, если антенны корреспондентов не обеспечивают мощность излучения в направлении трассы. Учёт данного фактора превращает задачу маршрутизации из чисто частотно-адаптивной в пространственно-частотную.

В предлагаемом методе вес ребра w_{ij} интерпретируется не как пропускная способность или задержка (традиционные метрики в стационарных сетях), а как мера надёжности канала – величина, связанная с вероятностью успешной передачи пакета по трассе (i, j). Конкретный вид функции веса может выбираться исходя из решаемой задачи. Два наиболее обоснованных варианта:

Вес, равный обратной величине вероятности успеха, взятый с логарифмическим масштабированием (2):

$$w_{ij} = -\ln P_{ij}, \qquad (2)$$

где P_{ij} – вероятность безошибочной передачи пакета. При таком определении вес пути, равный сумме весов составляющих его рёбер, пропорционален логарифму вероятности успешной доставки по всему маршруту: минимизация суммарного веса эквивалентна надёжности. Данный подход используется для поиска наиболее надёжного пути в сетях с ненадёжными элементами [12] и удобен при использовании алгоритмов поиска кратчайших путей, в частности алгоритма Дейкстры.

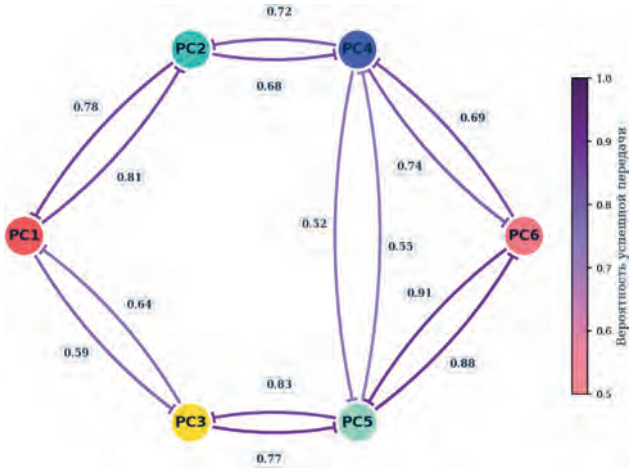

Рис. 1. Ориентированный граф КВ-сети с вероятностными метриками ребер

Вес, задаваемый как пара (P_{ij}, C_{ij}), где C_{ij} – пропускная способность канала (бит/с). В этом случае маршрутизация превращается в задачу многокритериальной оптимизации, допускающую поиск компромисса между надёжностью и скоростью передачи. Такой подход уместен при передаче разнородного трафика, однако в настоящей работе в качестве базового рассматривается однокритериальный вариант с логарифмическим весом, как наиболее отвечающий требованию живучести военных сетей.

Изменчивость ионосферы приводит к тому, что граф $G(t)$ реализуется в двух масштабах времени:

Квазистационарные изменения топологии (минуты – часы) обусловлена регулярным суточным ходом электронной концентрации. В этом масштабе меняется само множество рёбер $E(t)$: трассы, устойчивые днём, могут исчезать ночью, и наоборот.

Быстрые флуктуации (минуты) связаны с замираниями интерференционной и поляризационной природы. Они изменяют веса существующих рёбер $w_{ij}(t)$, но, как правило, не приводят к мгновенному исчезновению ребра, если среднее отношение сигнал/шум превышает порог.

Следовательно, алгоритм динамической маршрутизации должен предусматривать два контура обновления:

- контур обновления топологии – с периодом порядка десятков минут, на основе ионосферных прогнозов и эпизодических данных зондирования, для коррекции множества $E(t)$;
- контур обновления метрик – с периодом порядка нескольких минут, определяемым допустимой служебной нагрузкой на сеть.

В рамках данного контура используется пассивное оценивание качества канала (LQA) по принимаемым сигналам либо целенаправленный обмен короткими тестовыми посылками в выделенные временные окна. Частота обновлений выбирается из компромисса между актуальностью метрик и затратами пропускной способности на служебный трафик. Такое разделение позволяет, с одной стороны, оперативно реагировать на быстрые замирания, с другой – избегать чрезмерной нагрузки на сеть служебной информацией, неизбежной при непрерывном обмене топологической информацией в КВ-канале с присущей ему низкой пропускной способностью.

Предложенная графовая модель естественным образом погружает задачу КВ-маршрутизации в контекст хорошо изученных методов теории графов и компьютерных сетей [8, 9]. Поиск оптимального маршрута сводится

к нахождению пути с минимальным суммарным весом в графе с неотрицательными весами, что допускает непосредственное применение алгоритма Дейкстры. Однако в отличие от классической постановки, где веса рёбер полагаются детерминированными и статическими на периоде расчёта, в рассматриваемом случае они являются случайными величинами с известными (оценёнными) характеристиками. Это обстоятельство потребует модификации алгоритма, учитывающей не только точечные оценки P_{ij}, но и корреляционные связи между рёбрами (см. раздел 4), а также вводит задачу нахождения нескольких альтернативных, слабо коррелированных маршрутов для резервирования передачи.

Таким образом, построенная графовая модель служит мостом между физикой КВ-канала и формализованными процедурами маршрутизации, позволяя сформулировать задачу выбора маршрута в терминах, допускающих строгое математическое решение. В следующем разделе на основе этой модели разрабатывается структура таблиц маршрутизации и процедура их заполнения.

3. Формирование таблиц маршрутизации

В КВ-сетях, функционирующих на основе стандартов автоматического установления соединения и пакетной передачи, маршрутная информация сосредоточена в таблицах двух уровней таблице рабочих частот (трасс), формируемой на канальном уровне средствами ALE, и таблице ретрансляции, относящейся к сетевому уровню и определяющей следующий узел на пути к получателю. Эта двухуровневая организация является прямым следствием специфики среды: в отличие от проводных сетей, где физический интерфейс всегда активен и переход к следующему узлу требует только его адреса, в КВ-связи для передачи пакета конкретному соседу необходимо дополнительно указать рабочую частоту, на которой данный сосед доступен в текущий момент.

Таким образом, решение о маршруте принимается на сетевом уровне путём выбора следующего узла, а его реализация возлагается на канальный уровень, который по предварительно составленной таблице частот определяет физический канал для передачи. Предлагаемый метод динамической маршрутизации сохраняет данную архитектуру, однако изменяет принцип заполнения таблицы ретрансляции, подчиняя его графовой модели и вероятностным метрикам, описанным в разделе 2.

Таблица рабочих частот, называемая также таблицей трасс, является работой механизма автоматического установления соединения. Её классическая структура описана в документах MIL-STD-188-141 и ГОСТ Р 50658-94; фундаментальные принципы построения таких таблиц изложены в работах. Каждая запись таблицы связывает конкретного корреспондента (или группу корреспондентов) с набором рабочих частот и соответствующими оценками качества канала LQA.

Метрика качества является интегральной оценкой, учитывающей измеренное отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки или иной показатель, позволяющий ранжировать доступные частоты по надёжности. Процедура ведения таблицы включает пассивное сканирование каналов, приём зондирующих сигналов и, при необходимости, активный обмен тестовыми посылками. Период обновления записей определяется циклом сканирования и допустимой служебной нагрузкой (типичные значения – от десятков секунд до нескольких минут).

Для целей сетевой маршрутизации таблица рабочих частот рассматривается как вспомогательная: когда сетевой уровень определяет, что очередной пакет должен быть отправлен соседу X, канальный уровень обращается к своей таблице и выбирает частоту с наилучшей текущей метрикой для корреспондента X. Тем самым достигается разделение задач: сетевой уровень пользуется логическими адресами узлов и метриками путей, а канальный – физическими частотами и оценками их мгновенного качества.

На сетевом уровне КВ-систем, реализующих пакетную передачу с возможностью ретрансляции, центральное место занимает таблица ретрансляции, аналогичная таблице маршрутизации в классических IP-сетях. Её структура регламентирована спецификацией STANAG-5066 (Edition 3) в разделах, посвящённых Subnet Interface и Relay Routing. Каждая запись таблицы содержит:

1. Адрес узла назначения (Destination Node Address);
2. Адрес следующего узла на маршруте (Next-Hop Node Address) – соседа, которому следует передать пакет для продвижения к цели;
3. Метрику маршрута – величину, характеризующую качество пути от данного узла до узла назначения через указанного соседа;
4. Статус записи (активна/неактивна) и время последнего обновления.

В классической IP-маршрутизации метрикой может служить количество промежуточных узлов (хопов), пропускная способность или административный вес; в рассматриваемой КВ-сети метрика маршрута определяется как суммарный логарифмический вес пути, вычисленный

в соответствии с подразделом 2.3. Иными словами, метрика пути от узла S к узлу D через соседа N равна:

$$M(S,D,N) = w_{SN} + M(N,D), \quad (3)$$

где w_{SN} – вес ребра (S,N), а $M(N,D)$ – метрика лучшего пути от N к D, известная данному узлу (или вычисленная централизованно). При использовании логарифмического веса минимизация метрики эквивалентна максимизации вероятности успешной доставки пакета по всему маршруту.

В отличие от дистанционно-векторных протоколов, таких как HRMP, где каждый узел обменивается со своими соседями векторами расстояний и итеративно уточняет собственную таблицу, предлагаемый метод опирается на знание полного графа сети $G(t)$ (или его связной компоненты). В зависимости от архитектуры сети граф может строиться либо централизованно (на узле-координаторе, располагающем вычислительным ресурсом и информацией о текущем состоянии каналов), либо распределённо, путём распространения сообщений о состоянии рёбер по аналогии с протоколами состояния связей (link-state) [9].

Процедура заполнения таблицы ретрансляции на заданном узле S состоит из следующих шагов.

1. Получение актуального графа $G(t)$ сети. Узел получает (или формирует самостоятельно) матрицу весов рёбер w_{ij}, вычисленных на основе данных LQA, ионосферных прогнозов и статистических моделей замираний в соответствии с методом раздела 4.
2. Построение дерева кратчайших путей. Для узла S запускается алгоритм Дейкстры на графе с неотрицательными весами w_{ij}. Результатом является множество кратчайших (в смысле минимума суммы весов) путей до всех достижимых узлов $D \in VD \in V$. Для каждого D фиксируется первый шаг пути – сосед $N1N1$, которому узел S должен передать пакет.
3. Заполнение таблицы ретрансляции. Для каждого достижимого узла D в таблицу заносится запись: «Назначение: D; Следующий узел: $N1(D)$; Метрика: сумма весов пути $S \rightarrow D$; Статус: активна». Если узел D недостижим (не принадлежит той же компоненте связности графа, что и S), запись для него либо отсутствует, либо помечается как неактивная.
4. Периодическое и событийное обновление. Таблица ретрансляции обновляется в двух случаях: при существенном изменении топологии (появление или исчезновение рёбер), обнаруживаемом контуром квазистационарного обновления; при значимом отклонении метрик существующих рёбер, выявляемом контуром обновления метрик (период – минуты).

Для иллюстрации процедуры рассмотрим сеть из шести радиостанций (PC1-PC6), граф которой с указанием вероятностей успешной передачи на рёбрах приведён на рисунке 1. Вероятности P_{ij} получены в результате обработки данных LQA и ионосферного прогноза.

Таблица 1.
Вероятности успешной передачи P_{ij}

Ребро	P_{ij}
PC1 → PC2	0,78
PC2 → PC1	0,81
PC1 → PC3	0,64
PC3 → PC1	0,59
PC2 → PC4	0,72
PC4 → PC2	0,68
PC3 → PC5	0,83
PC5 → PC3	0,77
PC4 → PC6	0,69
PC6 → PC4	0,74
PC5 → PC6	0,91
PC6 → PC5	0,88
PC4 → PC5	0,55
PC5 → PC4	0,52

Переведём вероятности в логарифмические веса $w_{ij} = -\ln P_{ij}$ (с округлением до трёх знаков):

Таблица 2.
Логарифмические веса рёбер

Ребро	w_{ij}
PC1 → PC2	0,248
PC2 → PC1	0,211
PC1 → PC3	0,447
PC3 → PC1	0,528
PC2 → PC4	0,329
PC4 → PC2	0,386
PC3 → PC5	0,186
PC5 → PC3	0,261
PC4 → PC6	0,371
PC6 → PC4	0,301
PC5 → PC6	0,094
PC6 → PC5	0,128
PC4 → PC5	0,598
PC5 → PC4	0,654

На основе этих результатов формируется таблица ретрансляции узла РС1.

Таблица 3.

Таблица ретрансляции узла РС1

Узел назначения	Следующий узел	Метрика (суммарный вес)	Вероятность успеха пути $P(\pi)$
РС2	РС2	0,248	exp(–0,248)≈0,78
РС4	РС2	0,577	exp(–0,577)≈0,56
РС5	РС3	0,633	exp(–0,633)≈0,53
РС6	РС3	0,727	exp(–0,727)≈0,48

Формально таблица ретрансляции КВ-сети имеет ту же структуру, что и таблица маршрутизации IP-маршрутизатора: адрес назначения, следующий узел, метрика. Принципиальные отличия лежат в природе метрики и способе её вычисления.

В IP-сетях метрика, как правило, статична или квазистатична. В КВ-сети метрика – величина случайная с быстрой динамикой, оцениваемая вероятностными методами.

Классические протоколы типа RIP используют дистанционно-векторный подход и не требуют знания полной топологии; OSPF распространяет сообщения о состоянии связей и строит дерево кратчайших путей, но оперирует детерминированными весами. Предлагаемый метод занимает промежуточное положение: он использует link-state-принцип (для формирования графа) и алгоритм Дейкстры, однако дополняет его учётом корреляции каналов (раздел 4) и при необходимости вычислением нескольких слабо коррелированных путей для повышения надёжности.

Штатный протокол HRMP, определённый в STANAG-5066, реализует дистанционно-векторную логику, подобную RIP: узлы обмениваются сообщениями, содержащими оценки расстояний до всех известных адресатов, и на основе полученной информации обновляют свои таблицы. Такой подход прост в реализации, однако обладает известными недостатками – медленной сходимостью, склонностью к образованию петель и невозможностью учесть корреляцию между каналами. Предлагаемый метод, базирующийся на полной графовой модели и централизованном (или координированном) расчёте путей, свободен от указанных ограничений и обеспечивает возможность использования строго обоснованных вероятностных метрик

Приведённые выше алгоритм и числовой пример построены в предположении статистической независимости каналов на различных рёбрах. В реальной КВ-сети замирания могут быть коррелированы, что приводит к завышению оценки вероятности успеха маршрута при простом перемножении частных вероятностей. Методы оценки корреляции подробно рассматриваются в разделе 4. Здесь же укажем, каким образом корреляция может быть учтена непосредственно при заполнении таблицы ретрансляции.

Первый способ состоит в предварительной коррекции весов рёбер добавлением штрафа, пропорционального средней корреляции ребра с остальными рёбрами графа. Модифицированные веса $w_{ij} = -\ln P_{ij} + \Delta_{ij}$ затем используются в алгоритме Дейкстры без каких-либо изменений его логики. Это позволяет избежать выбора маршрутов, содержащих сильно скоррелированные участки, и сохраняет совместимость с типовой структурой таблицы.

Второй способ предполагает поиск нескольких альтернативных путей с низкой взаимной корреляцией и включение в таблицу дополнительных записей с пометкой «резервный». Это обеспечивает возможность быстрого переключения на резервный маршрут при ухудшении качества основного без повторного зондирования всей сети.

Выбор конкретного способа определяется вычислительными ресурсами узла и допустимой степенью детализации таблиц. В обоих случаях логическая структура записи таблицы ретрансляции (адрес назначения, следующий узел, метрика) остаётся неизменной, а корреляционные поправки отражаются в величине метрики или в наличии резервных записей.

Заполненная таблица ретрансляции определяет лишь логический следующий узел. Физическая передача пакета этому узлу осуществляется с использованием таблицы рабочих частот, ведущейся на канальном уровне. Для каждого соседа, фигурирующего в столбце «следующий узел», канальный уровень должен поддерживать хотя бы одну активную запись с приемлемой метрикой LQA. Если по каким-либо причинам канал до выбранного соседа временно недоступен (все частоты имеют неудовлетворительное качество), узел может инициировать внеочередное зондирование либо временно исключить данное ребро из графа, что запустит пересчёт сетевого маршрута. Так реализуется обратная связь между сетевым и канальным уровнями, обеспечивающая устойчивость маршрутизации в условиях глубоких замираний.

Таким образом, предлагаемый способ формирования таблиц маршрутизации обеспечивает строгую математическую основу для выбора путей и допускает реализацию как в существующей архитектуре STANAG-5066 (с заменой

протокола HRMP на предлагаемый механизм), так и в перспективных когнитивных КВ-сетях. Математический аппарат, необходимый для вычисления вероятностных метрик и оценки корреляции каналов, составляет предмет следующего раздела.

4. Математический аппарат вычисления вероятностных метрик и учёта корреляции каналов

Пусть имеется КВ-сеть, представленная ориентированным графом $G = (V, E)$, где каждое ребро $e_{ij} \in E$ и характеризуется случайной величиной X_{ij}, отражающей текущее качество ионосферного канала (например, отношение сигнал/шум или вероятность битовой ошибки). Задача динамической маршрутизации заключается в нахождении для каждой пары узлов (s, d) такого пути $\pi(s, d)$, который максимизирует вероятность успешной доставки пакета $P(\pi)$ за заданное время либо минимизирует некоторую функцию риска, связанную с нестационарностью среды.

Уровень сигнала в точке приёма подвержен случайным флуктуациям, которые принято описывать с помощью многолучевых моделей. Наиболее употребительными распределениями амплитуды огибающей являются:

- распределение Релея – для каналов с отсутствием регулярной (прямой) составляющей;
- распределение Райса – при наличии доминирующей компоненты;
- распределение Накагами (m-распределение), обобщающее оба предыдущих и позволяющее гибко учитывать степень замираний [4, 5].

Вероятность того, что мгновенное отношение сигнал/шум γ на входе приёмника превысит пороговое значение γ_0, необходимое для декодирования пакета с заданной вероятностью ошибки, определяется интегральной функцией распределения:

$$P(\gamma > \gamma_0) = 1 - F(\gamma_0), \quad (4)$$

где $F(\gamma_0)$ – функция распределения принятой модели замираний.

Пакет успешно доставляется, если на каждом ребре (скачке) он был правильно декодирован. Декодирование считается успешным, когда мгновенное отношение сигнал/шум γ в приёмнике превышает пороговое значение γ_0, определяемое используемым видом модуляции и помехоустойчивым кодированием. Таким образом, вероятность успеха на отдельном скачке – это и есть $P_{ij} = P(\gamma > \gamma_0)$.

Для райсовского канала, например, данная вероятность выражается через обобщённую Q-функцию Маркума.

В качестве метрики качества ребра e_{ij} естественно принять именно эту вероятность:

$$P_{ij} = P(\gamma > \gamma_0). \quad (5)$$

Она зависит от средней мощности сигнала (определяемой дальностью, поглощением в ионосфере и усилением антенн) и глубины замираний.

Средняя мощность сигнала и, следовательно, P_{ij} являются функциями рабочей частоты и состояния ионосферы [1, 12]. В соответствии с Рекомендацией МСЭ R P.533 для любой трассы и заданного времени суток можно рассчитать максимальную применимую частоту (МПЧ) и наименьшую применимую частоту (НПЧ). Частота считается доступной, если она лежит в пределах от НПЧ до МПЧ, и прогнозная медианная напряжённость поля превышает требуемое пороговое значение. Это даёт возможность вычислить долгосрочную вероятность доступности трассы $P_{ij}^{\text{долг}}$ для каждой пары узлов и каждой номинальной частоты.

Однако долгосрочный прогноз не учитывает быстрых замираний. Поэтому итоговая вероятность успешной передачи на выбранной частоте получается умножением долгосрочной доступности на вероятность превышения порога при условии, что трасса открыта:

$$P_{ij} = P_{ij}^{\text{долг}} \cdot P(\gamma > \gamma_0). \quad (6)$$

В оперативном контуре целесообразно уточнять сомножитель $P(\gamma > \gamma_0)$ по данным текущего LQA-зондирования, что даёт апостериорную оценку вероятности. (Когда радиостанция выполняет LQA-зондирование (принимает тестовые сигналы, измеряет выборку значений γ за последние десятки секунд), у неё появляются конкретные данные, относящиеся именно к этой радиолинии в этот момент).

Выбор маршрута только по точечным вероятностям P_{ij} может привести к ошибочным решениям, если каналы, составляющие путь, испытывают скоррелированные замирания. Например, две трассы, проходящие через одну и ту же возмущённую область ионосферы, с высокой вероятностью окажутся недоступными одновременно. Поэтому в метрику маршрута необходимо ввести поправку на корреляцию.

Пусть $X_a(t)$ и $X_b(t)$ – случайные процессы, описывающие, например, мгновенное отношение сигнал/шум (в дБ) на двух трассах a и b в момент времени t. Тогда коэффициент корреляции Пирсона между этими процессами (в предположении стационарности) определяется (7):

$$\rho_{ab} = \frac{cov(X_a, X_b)}{\sigma_a \sigma_b} = \frac{E[(X_a - \mu_a)(X_b - \mu_b)]}{\sqrt{E[(X_a - \mu_a)^2 E[(X_b - \mu_b)^2}}, \quad (7)$$

где $\mu_a = E[X_a]$, $\mu_b = E[X_b]$, σ_a, σ_b – стандартные отклонения. Величина ρ_{ab} принимает значения в интервале, причём $\rho_{ab} = 1$ означает полную положительную корреляцию, $\rho_{ab} = 0$ – отсутствие линейной связи, а $\rho_{ab} = -1$ – полную отрицательную корреляцию.

В реальной системе доступны не истинные моменты, а временны́е ряды измеренных значений LQA (например, SNR, измеренное в дБ с периодом $T_{\text{зонд}}$). Пусть за интервал наблюдения накоплено NN синхронных отсчётов (x_{a1}, x_{b1}), …, (x_{aN}, x_{bN}). Тогда выборочный коэффициент корреляции вычисляется по формуле (8):

$$\hat{\rho}_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^{N}(x_{ak} - \bar{x}_a)(x_{bk} - \bar{x}_b)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(x_{ak} - \bar{x}_a)^2 \sum_{k=1}^{N}(x_{bk} - \bar{x}_b)^2}} \quad (8)$$

где $\bar{x}_a = 1/N\sum x_{ak}$, $\bar{x}_b = 1/N\sum x_{bk}$ – выборочные средние. Эта оценка используется в оперативном контуре для постоянного обновления корреляционной матрицы сети.

Корреляционная матрица сети

Рассмотрим все ориентированные рёбра графа $E = \{e_1, e_2, \ldots, e_M\}$, где $M = |E|$. Для каждой пары рёбер $(e_p, \ )$ определён коэффициент корреляции ρ_{pq}. Тогда корреляционной матрицей сети называется квадратная симметричная матрица размера $M \times M$:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} & \cdots & \rho_{1M} \\ \rho_{21} & 1 & \rho_{23} & \cdots & \rho_{2M} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & 1 & \cdots & \rho_{3M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M1} & \rho_{M} & \rho_{M3} & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$

где $\rho_{pq} = \rho_{qp}$, а диагональные элементы равны единице, так как любое ребро полностью коррелировано само с собой.

Для сети из шести узлов (РС1–РС6) с четырнадцатью ориентированными рёбрами, перечисленными в таблице 1, матрица R имеет размер 14×14. Её элементы вычисляются либо по прогнозной модели (через геометрию точек отражения и частотный разнос), либо по выборочным данным LQA.

Для вычисления среднего модуля корреляции $\bar{\rho}_a$ для каждого ребра и последующей коррекции весов:

$$\bar{\rho}_a = \frac{1}{M-1}\sum_{q \neq a}^{N}|\rho_{aq}|, \; w_a' = -\ln P_a + \alpha \cdot \rho_a, \quad (9)$$

где параметр $\alpha \geq 0$ регулирует степень влияния корреляции (например, $\alpha = 0{,}1 - 0{,}5\alpha = 0{,}1 - 0{,}5$). В приведённом примере для ребра РС3→РС5 средний модуль корреляции будет наибольшим, что приведёт к заметному увеличению его веса и, как следствие, к снижению вероятности его включения в маршрут совместно с ребром РС5→РС6.

Для каждого ребра e_{ij} вычисляется модифицированный вес:

$$w_{ij} = -\ln P_{ij} + \Delta(\rho), \quad (10)$$

где $\Delta(\rho) \geq 0$ – неотрицательная добавка, компенсирующая эффект корреляции. При $\Delta = 0$ получаем классический логарифмический вес, а при $\Delta > 0$ рёбра, сильно коррелированные с уже выбранными, получают больший штраф, что снижает вероятность их включения в один маршрут.

Метрика пути $\pi = (v_1, v_2, \ldots, v_k)$ задаётся суммой:

$$W(\pi) = \sum w_{v_i v_{i+1}}. \quad (11)$$

Оптимальным считается путь, минимизирующий $W(\pi)$. Поскольку все w' неотрицательны, задача решается алгоритмом Дейкстры (или его модификацией при поиске нескольких путей). Периодический пересчёт метрик и корреляций позволяет адаптироваться как к квазистационарным изменениям топологии, так и к флуктуациям качества каналов.

Таким образом, предлагаемый математический аппарат объединяет строгие модели теории вероятностей и случайных процессов [3, 4, 13] с инженерными методами прогнозирования ионосферных трасс [2,12] и формализует задачу маршрутизации в виде задачи о кратчайшем пути в графе со случайными, скоррелированными весами.

Заключение

Выполненное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения надёжности связи в коротковолновых сетях, функционирующих в условиях нестационарной ионосферной среды. Показано, что статические и квазистатические методы маршрутизации, включая типовые реализации ALE и протокол HRMP стандарта STANAG-5066, не в полной мере учитывают случайный характер замираний и корреляционные связи между трассами, что может приводить к выбору маршрутов с низкой фактической вероятностью доставки пакета.

В рамках статьи предложен метод динамической маршрутизации, основанный на графовой модели КВ-сети, вершины которой отождествлены с радиостанциями, а ориентированные рёбра – с потенциальными ионосферными трассами. Вес каждого ребра выражен через вероятность успешной передачи пакета, вычисляемую

с привлечением долгосрочных ионосферных прогнозов, статистических моделей замираний (Релея, Райса, Накагами) и оперативных данных зондирования. Благодаря переходу к логарифмической метрике задача выбора оптимального маршрута сведена к поиску кратчайшего пути в графе с неотрицательными весами и допускает эффективное решение алгоритмом Дейкстры.

Процедура формирования таблиц маршрутизации сохраняет двухуровневую архитектуру «таблица рабочих частот – таблица ретрансляции», что обеспечивает совместимость с существующими стандартами MIL-STD-188-141 и STANAG-5066 и допускает поэтапное внедрение предложенных алгоритмов в аппаратно-программные комплексы КВ-связи.

Для обеспечения устойчивости к пространственно-частотной корреляции замираний введены поправочные члены к весам рёбер, штрафующие сильно скоррелированные каналы и позволяющие при необходимости формировать несколько слабо зависимых маршрутов для резервирования передачи. Коэффициенты корреляции определяются через ковариации измеряемых параметров каналов и сводятся в корреляционную матрицу сети, которая используется для вычисления штрафных добавок к весам. В оперативном режиме элементы матрицы уточняются по данным LQA-зондирования.

Математический аппарат метода опирается на положения теории вероятностей, теории случайных процессов и теории графов. Применение апостериорных оценок вероятности, обновляемых по данным LQA, позволяет адаптировать маршруты к быстрым флуктуациям каналов без перегрузки сети служебным трафиком.

Основным ограничением предложенного подхода является необходимость получения достоверных исходных данных – параметров ионосферы, коэффициентов корреляции и статистических характеристик замираний, – что требует либо развёртывания специализированных средств зондирования, либо использования точных прогнозных моделей. Перспективным представляется и распространение полученных результатов на гибридные сети, объединяющие КВ- и спутниковые сегменты, что позволит дополнительно повысить живучесть систем военной и специальной связи.

Таким образом, предложенный метод динамической маршрутизации, базирующийся на вероятностных метриках и графовой модели, обеспечивает строгую математическую основу для автоматического выбора маршрутов в КВ-сетях и вносит вклад в решение задачи обеспечения надёжной дальней связи в условиях деструктивных воздействий на космическую и наземную инфраструктуру.

Литература

1. Пашинцев, В. П. Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконь, С. А. Коваль, А. Д. Скорик // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 6. – С. 40–52. – DOI 10.32603/1993-8985-2022-25-6-40-52.
2. Уточненный метод определения интервала пространственной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии / В. П. Пашинцев, С. А. Коваль, Д. А. Потягов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.2.6.
3. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Овчинников // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 11. – С. 162–177. – DOI 10.18127/j00338486-202211-23.
4. Marques, A. A. S. Analysis and empirical verification of prediction models for HF communication in low latitude regions / A. A. S. Marques, P. H. P. Carvalho // XXXVIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing (SBrT 2020): материалы конференции. – 2020. – DOI 10.14209/SBRT.2020.1570650078.
5. A review and prospects of operational frequency selecting techniques for HF radio communication / J. Wang, Y. Shi, C. Yang, F. Feng // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 69, № 8. – Pp. 2989–2999. – DOI 10.1016/j.asr.2022.01.026.
6. Machine learning to optimize TCP communications over high frequency communications links / A. Dmello, D. Jayalath, E. Foo, J. Reid // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 125526–125537. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3225401.
7. Simulations of the minimum frequencies of ionospheric modes for radio communication forecast / I. A. Nosikov, A. M. Padokhin, I. V. Krasheninnikov [и др.] // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 64, № 8–9. – Pp. 605–617. – DOI 10.1007/s11141-022-10135-0.
8. Analysis of the ordinary and extraordinary ionospheric modes for NVIS digital communications channels / J. Male, J. Porte, T. Gonzalez [и др.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 6. – P. 2210. – DOI 10.3390/s21062210.
9. Modelling and simulation frameworks for wireless sensor networks: a comparative study / R. Sharma, V. Vashisht, U. Singh // IET Wireless Sensor Systems. – 2020. – Vol. 10, № 5. – Pp. 181–197. – DOI 10.1049/iet-wss.2020.0046.

10. Koziniec, T. Precomputed ionospheric propagation for HF wireless sensor transmission scheduling / T. Koziniec, D. Murray, M. Dixon // 2021 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS): материалы конференции. – 2021. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/MASCOTS53633.2021.9614288.
11. Gholipoor, P. Performance analysis of multi-hop token relay strategy in HF networks / P. Gholipoor, M. H. Madani, S. Poursajadi // Telecommunication Systems. – 2023. – Vol. 83, № 3. – Pp. 277–287. – DOI 10.1007/s11235-023-01019-z.
12. Zander, J. Greedy channel allocation in meshed wideband HF radio networks with channel aggregation / J. Zander // 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): материалы конференции. – Madrid, 2022. – Pp. 1–5. – DOI 10.23919/EuCAP53622.2022.9769257.
13. Improving the performance of HF radio networks in the presence of interference through automatic link establishment with frequency hopping technique / M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi // Wireless Personal Communications. – 2022. – Vol. 127, № 3. – Pp. 2647–2666. – DOI 10.1007/s11277-022-09889-3.

DYNAMIC ROUTING IN SHORTWAVE NETWORKS BASED ON PROBABILISTIC METRICS AND CORRELATION CHANNEL ANALYSIS

Lukyanchenko V. N.[5], Veligosha A. V.[6], Tretyakov E. A.[7], Khanin S. A.[8]

Keywords: *shortwave communication, dynamic routing, ionospheric channel, probabilistic metrics, fading correlation, graph model, Dijkstra's algorithm, routing tables, LQA, STANAG-5066.*

Abstract

The purpose of the study *is to develop a method of dynamic routing in HF communication networks, which provides an increase in the probability of timely delivery of messages due to the comprehensive consideration of the probabilistic characteristics of channels and the spatial-frequency correlation of fading between routes.*

The weight of each edge is given through the logarithm of the probability of successful transmission, calculated on the basis of long-term predictions of the HF-network, statistical fading models (Rayleigh, Rice, Nakagami) and data of operational LQA sounding. To take into account the correlation, a network correlation matrix and penalty additions to the weights were introduced. The optimal route is found by a modified Dijkstra algorithm, and the relay tables are formed according to the link-state principle with a two-level architecture (frequency table and route table) compatible with the MILSTD188141 and STANAG 5066 standards.

Results of the study: *a method of dynamic routing is proposed, which allows you to select paths with the maximum probability of packet delivery, taking into account the correlation of channels. A procedure for filling in relay tables based on the graph of the shortest paths has been developed; a numerical example for a network of six nodes is given. It is shown that taking into account the correlation allows you to avoid the choice of routes with strongly correlated sections and makes it possible to form backup weakly dependent paths. The method adapts to quasi-stationary changes in the ionosphere and rapid fading at a permissible service load.*

Scientific novelty: *for HF routing, a complex probabilistic approach is proposed, combining a logarithmic metric of edge reliability based on integral fading distributions, a network correlation matrix calculated from LQA data, a modification of the Dijkstra algorithm that takes into account penalties for edge correlation. The novelty also lies in maintaining compatibility with the existing ALE and STANAG 5066 standards when switching from reactive to proactive probabilistic routing, which increases the survivability of military and special communication systems in conditions of instability of satellite and terrestrial channels*

References

1. Pashincev, V. P. Metodika ocenki nadezhnosti svyazi v korotkovolnovoj radiolinii s rajsovskimi zamiraniyami s uchetom diffuznosti ionosfery / V. P. Pashincev, D. A. Belokon', S. A. Koval', A. D. Skorik // Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij Rossii. Radioelektronika. – 2022. – V. 25, No. 6. – Pp. 40–52. – DOI 10.32603/1993-8985-2022-25-6-40-52.
2. Utochnennyj metod opredeleniya intervala prostranstvennoj korrelyacii zamiranij v odnoluchevoj dekametrovoj radiolinii / V. P. Pashincev, S. A. Koval', D. A. Potyagov [i dr.] // Zhurnal radioelektroniki. – 2021. – No. 2. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.2.6.
3. Novye vozmozhnosti sistem shirokopolosnoj kognitivnoj svyazi, rabotayushhix v ionosfernyx KV-radiokanalax s vnutrimodovoj dispersiej / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, V. V. Ovchinnikov // Radiotexnika. – 2022. – V. 86, No. 11. – Pp. 162–177. – DOI 10.18127/j00338486-202211-23.

5 ***Vadim N. Lukyanchenko***, Head of Department of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: lwn77@yandex.ru

6 ***Alexander V. Veligosha***, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department No. 52 of the Branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: a veligosha@mail.ru

7 ***Evgeny A. Tretyakov***, adjunct of the Branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: 2923201@mail.ru

8 ***Sergey A. Khanin***, cadet of the Branch of the Military Academy named after Peter the Great. Serpukhov, Russia. E-mail: Shmel7604dota@yandex.ru

4. Marques, A. A. S. Analysis and empirical verification of prediction models for HF communication in low latitude regions / A. A. S. Marques, P. H. P. Carvalho // XXXVIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing (SBrT 2020): materialy konferencii. – 2020. – DOI 10.14209/SBRT.2020.1570650078.
5. A review and prospects of operational frequency selecting techniques for HF radio communication / J. Wang, Y. Shi, C. Yang, F. Feng // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 69, No. 8. – Pp. 2989–2999. – DOI 10.1016/j.asr.2022.01.026.
6. Machine learning to optimize TCP communications over high frequency communications links / A. Dmello, D. Jayalath, E. Foo, J. Reid // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 125526–125537. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3225401.
7. Simulations of the minimum frequencies of ionospheric modes for radio communication forecast / I. A. Nosikov, A. M. Padokhin, I. V. Krasheninnikov [i dr.] // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 64, No. 8–9. – Pp. 605–617. – DOI 10.1007/s11141-022-10135-0.
8. Analysis of the ordinary and extraordinary ionospheric modes for NVIS digital communications channels / J. Male, J. Porte, T. Gonzalez [i dr.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 6. – P. 2210. – DOI 10.3390/s21062210.
9. Modelling and simulation frameworks for wireless sensor networks: a comparative study / R. Sharma, V. Vashisht, U. Singh // IET Wireless Sensor Systems. – 2020. – Vol. 10, 5. – Pp. 181–197. – DOI 10.1049/iet-wss.2020.0046.
10. Koziniec, T. Precomputed ionospheric propagation for HF wireless sensor transmission scheduling / T. Koziniec, D. Murray, M. Dixon // 2021 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS): materialy konferencii. – 2021. – Pp. 1–8. – DOI 10.1109/MASCOTS53633.2021.9614288.
11. Gholipoor, P. Performance analysis of multi-hop token relay strategy in HF networks / P. Gholipoor, M. H. Madani, S. Poursajadi // Telecommunication Systems. – 2023. – Vol. 83, No. 3. – Pp. 277–287. – DOI 10.1007/s11235-023-01019-z.
12. Zander, J. Greedy channel allocation in meshed wideband HF radio networks with channel aggregation / J. Zander // 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): materialy konferencii. – Madrid, 2022. – Pp. 1–5. – DOI 10.23919/EuCAP53622.2022.9769257.
13. Improving the performance of HF radio networks in the presence of interference through automatic link establishment with frequency hopping technique / M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi // Wireless Personal Communications. – 2022. – Vol. 127, No. 3. – Pp. 2647–2666. – DOI 10.1007/s11277-022-09889-3.