ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И РАЗМЕЩЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО РАДИОДОСТУПА ДИАПАЗОНА ДКМВ

В.В. Зайцев, К.С. Фадеев

Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

Рассмотрены особенности структуры и размещения активных распределённых антенных систем для случайного множественного радиодоступа диапазона ДКМВ. Сеть ДКМВ может содержать многоканальные стационарные узлы территориального радиодоступа, состоящие из разнесённых приемных и передающих радиоцентров, программно-определяемые абонентские радиотерминалы, связанные с узлами сети адаптивными линиями радиодоступа, стационарные узлы зенитного радиодоступа с радиусом зоны обслуживания до 500 км, основной и запасной центры управления сетью, причем соседние стационарные опорные узлы территориального радиодоступа расположены в вершинах смежных равносторонних сферических треугольников с длиной стороны не более 3000 км по дуге большого круга и имеют зону радиодоступа радиусом до 3000 км каждый.

Ключевые слова: активная распределённая антенна, множественный радиодоступ, неперестраиваемые радиомодули, зенитное излучение, коэффициент усиления.

FEATURES OF STRUCTURE AND ARRANGEMENT OF DISTRIBUTED ANTENNA SYSTEMS FOR RANDOM MULTIPLE RADIO ACCESS OF HF RANGE

V.V. Zaytsev, K.S. Fadeev

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

The features of the structure and placement of active distributed antenna systems for random multiple radio access of the HF range are considered. A HF network may contain multichannel stationary nodes of territorial radio access, consisting of spaced receiving and transmitting radio centers, software-defined subscriber radio terminals connected to network nodes by adaptive radio access lines, stationary nodes of anti-aircraft radio access with a radius of the service area of up to 500 km, the main and reserve network control centers moreover, the neighboring stationary reference nodes of the territorial radio access are located at the vertices of adjacent equilateral spherical triangles with the front side is not more than 3000 km along an arc of a large circle and have a radio access zone with a radius of up to 3000 km each.

Keywords: active distributed antenna, wireless multiple access, non-tunable radio modules, nearly vertical incidence skywave, gain constant.

Системы случайного множественного радиодоступа диапазонов метровых и более коротких волн обслуживают мобильных абонентов в зоне прямой видимости от антенны базовой станции. Радиус зоны обслуживания зависит от высоты расположения этой антенны и может достигать нескольких десятков километров. При использовании диапазона ДКМВ с ионосферным распространением радиоволн и использование моды 1F2 радиус зоны доступа абонентов к одному узлу составляет до 3000 км.

При использовании моды 1F2 длина радиолинии и применяемая частота взаимосвязаны, а диапазон рабочих частот для каждой длины радиолинии ограничен сверху макси-

мально применимой частотой (МПЧ). Для дальних радиотрасс используются частоты верхней части диапазона, а для коротких – нижней части. Общая величина диапазона ионосферного распространения составляет 1,5–30 МГц с коэффициентом перекрытия $K_f = 20$. Возможности дуплексного разноса частот в диапазоне ДКМВ крайне ограничены. В связи с большой дальностью радиосвязи мощность передачи в одном канале составляет от нескольких десятков Вт до нескольких кВт. Одновременная работа приемника и мощного передатчика на одну антенну и на близких частотах невозможна. На стороне абонента при организации одного канала проблему решает использование симплексного режима работы, когда вход приемника блокируется на время включения передатчика. Такой режим не возможен на многоканальном узле, когда на каждую антенну или антенный элемент работают одновременно многоканальные приемники и передатчики с независимыми по времени каналами.

На узлах ДКМВ с передатчиками большой мощности используют территориальное разнесение приемного и передающего центров для предотвращения блокирования приемников при одновременной многоканальной работе. При этом узел для доступа с любой дальности должен использовать каналные частоты из всего диапазона ионосферного распространения. Эффективность излучения вибраторной антенны зависит от соотношения длины вибратора и длины волны. Для электрически коротких антенн их эффективность убывает пропорционально квадрату этого отношения. Антенны фиксированных размеров, эффективные для частот верхней части диапазона, теряют эффективность на частотах нижней части.

Абоненты радиодоступа диапазона ДКМВ могут находиться на любых азимутальных углах от узла в диапазоне 0–360 градусов, а их радиолинии на любых углах возвышения в пределах 0–90 градусов в зависимости от дальности. При этом энергетическая эффективность передающего центра прямо зависит от коэффициентов усиления передающих антенн.

Представленная реализация антенной системы обеспечивает увеличение эффективности (пропускной способности системы, зоны уверенного приема, качественных характеристик каналов и т.д.) антенной системы узла множественного случайного радиодоступа диапазона ДКМВ посредством использования для этой цели технических средств и возможностей интеллектуальных антенн.

На рис. 1 представлена структура активной антенной системы для случайного множественного радиодоступа диапазона ДКМВ.

Активная распределенная антенная система для случайного множественного радиодоступа диапазона ДКМВ содержит N частотных групп приемных антенных элементов $2.M_N$, различных для разных частотных приемных групп, соединенных с входами соответствующих неперестраиваемых широкополосных приемных радиомодулей $3.M_N$, различных для разных приемных частотных групп. Вход/выход каждого радиомодуля подключен к высокоскоростной шине данных радиоприема 4, к которой подключены блок частоты и синхронизации приема 5 и процессор обработки принимаемых цифровых сигналов основной полосы частот 6, соединенный дополнительно с мультиплексором локальной сети приемного центра 7, один из входов/выходов которого соединен с выделенным высокоскоростным каналом передачи сигналов и данных между приемным и передающим радиоцентрами 14; N частотных групп передающих антенных элементов $8.P_N$, различных для разных частотных передающих групп, соединенных с входами соответствующих неперестраиваемых широкополосных передающих радиомодулей $9.P_N$, различных для разных передающих частотных групп, при этом вход/выход каждого радиомодуля подключен к высокоскоростной шине данных радиопередачи 10, к которой подключены блок частоты и синхронизации передачи 12 и процессор формирования передаваемых цифровых сигналов основной полосы частот 11, соединенный дополнительно с мультиплексором локальной сети передающего центра 13, один из входов/выходов которого соединен с выделенным высокоскоростным каналом передачи сигналов и данных между приемным и передающим радиоцентрами 14.

Рис. 1. Структура активной антенной системы для случайного множественного радиодоступа диапазона ДКМВ

Образование частотных групп позволяет использовать в различных частотных группах антенные элементы с различными размерами и различными параметрами по входному сопротивлению и направленности излучения. Реализуется возможность выполнить эффективные группы для образования лучей зенитного излучения, средних и малых углов возвышения. При этом коэффициент усиления антенной системы по любому направлению будет существенно больше, чем у одиночного вибратора, с соответствующим увеличением качества приемных и передающих радиоканалов.

Антенная система работает следующим образом.

Каждому сектору или фрагменту общей зоны радиодоступа узла присваивается текущая сетка вызывных частот, соответствующая суточному графику изменения частот и расстоянию до узла. Абоненты, находящиеся в соответствующем секторе, выполняют вызов узла на присвоенной этому сектору группе вызывных частот.

Сигналы от всех приемных антенных элементов $2M_N$ предварительно фильтруются в соответствующих неперестраиваемых широкополосных приемных радиомодулях $3M_N$, преобразуются в высокоскоростных аналого-цифровых преобразователях в цифровые потоки данных и через высокоскоростную шину данных радиоприема 4, поступают в процессор обработки принимаемых цифровых сигналов основной полосы частот 6. Процессор для каждого территориального элемента зоны непрерывно формирует один или несколько лучей диаграммы направленности на соответствующей группе вызывных частот. При обнаружении вызывного сигнала абонента в любом из лучей на одной из соответствующих вызывных частот процессор определяет номер луча и номер вызывной частоты, которые однозначно определяют местоположение абонента и условия радиосвязи (азимут, угол возвышения, диапазон рабочих частот). Полученные параметры радиосвязи процессор через мультиплексор 7 и выделенный высокоскоростной канал передачи сигналов и данных между приемным и передающим радиоцентрами 14 направляет на передающий центр процессору формирования передаваемых цифровых сигналов основной полосы частот 11, который формирует соответствующий луч диаграммы направленности на заданной частоте в

направлении обнаруженного абонента. По выделенным на приемном центре параметрам радиосвязи процессор 11 формирует обратный канал для процедуры установления связи и выполнения сеанса. Так как при регистрации абонента в зоне доступа его местоположение фиксируется в базе данных, то при установлении связи от узла сразу используются известные пространственные параметры абонента и соответствующая группа вызывных частот.

На рис. 2 представлен пример диаграммы направленности системы в горизонтальной плоскости, непрерывно формируемой процессором для одной частотной группы верхней части диапазона ДКМВ.

Рис. 2. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости

Верхняя часть диапазона соответствует радиотрассам максимальной дальности с малыми углами возвышения. На диаграмме представлены 36 перекрывающихся лучей шириной 20° каждый, которые обслуживают все азимуты зоны.

На рис. 3 представлен пример диаграммы направленности системы в вертикальной плоскости, формируемой процессором из сигналов всех частотных групп. Разные углы возвышения лучей соответствуют радиотрассам различной дальности. Зенитный луч соответствует частотной группе нижней части диапазона ионосферного распространения и трассам протяженностью от 0 до 500 км.

Рис. 3. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости

В зависимости от количества частотных групп, количества антенных элементов в группах и вычислительной мощности процессора 6, система может формировать различное количество лучей в горизонтальной плоскости для каждого из заданных углов возвышения. Общее количество лучей приема равно сумме азимутальных лучей для каждого из углов возвышения и может быть от нескольких десятков до нескольких сотен. Общее количество передающих лучей определяет заданным общим количеством одновременно поддерживаемых каналов и вызовов.

Использование в предложенной системе отдельных разнесенных групп приемных и передающих антенных элементов и средств обработки и формирования их сигналов позволяет использовать систему для множественного случайного радиодоступа абонентов с любого азимута и любого расстояния от узла в любой случайный момент времени.

Разделение антенных элементов на несколько неперестраиваемых широкополосных частотных групп позволяет перекрывать диапазон частот от 1,5 до 30 МГц с $K_f = 20$.

Идеализированная структура зон доступа нарушается препятствиями, расположенными на пути падающей на ионосферу и отражённой волн. Влияние таких препятствий можно оценить по геометрической модели, представленной на рис. 4. При расположении препятствия вблизи передатчика уменьшается максимальный радиус зоны обслуживания по азимуту препятствия. При расположении препятствия вблизи приёмника возникает локальная тень непосредственно за препятствием.

Рис. 4. Влияние препятствия на зону обслуживания

Высокие близкорасположенные препятствия уменьшают максимальную дальность одного скачка по азимуту, от стационарного радиоузла (СР) на препятствие.

Если расстояние до препятствия AM' и его высота $h_n = M'D'$ известны, то можно решить треугольник AOD' и определить $\angle OAD'$. С его помощью решить треугольник OAC и вычислить максимальную дальность связи за препятствием

$$\angle OAD' = \frac{AM'}{r_3}, \text{ (рад);} \quad (1)$$

$$AD' = \sqrt{(r_3^2 + (r_3 + h_n)^2 - 2 * r_3 * (r_3 + h_n) * \cos \angle OAD')}^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$\sin \angle ACO = \frac{r_3 * \sin \angle OAD'}{r_3 + h_n}; \quad (3)$$

$$\angle ACO = \sin^{-1} \left(\frac{r_3 * \sin \angle OAD'}{r_3 + h_n} \right), \text{ (рад);} \quad (4)$$

$$AB' = 2 * r_3 * (\pi - \angle OAD' - \angle ACO). \quad (5)$$

В табл. 1 приведены результаты расчёта изменения границы зоны препятствием высотой 1,5 км на различных расстояниях от СР.

С учётом азимутальных границ препятствия, таким образом могут быть рассчитаны искажения внешней границы зоны. Локальная тень для отражённой волны соответствует расстоянию от препятствия до точки пересечения с земной поверхностью траектории касательной к вершине препятствия. Это расстояние может быть определено из этой же модели.

Таблица 1

Зависимость границы зоны от расстояния между СР и препятствием, км

<i>Расстояние до препятствия</i>	10	30	50	70	90	110	130
<i>Граница зоны</i>	2089	2956	3195	3315	3392	3449	3495

Указанные обстоятельства накладывают ограничения на места размещения СР относительно высоких препятствий в виде горных массивов или горных хребтов.

Представляет интерес оценка минимального расстояния между передатчиком и препятствием, при котором не уменьшается максимальный радиус зоны обслуживания этого СР. Для оценки используем ту же геометрическую модель.

Исходные данные:

h_d – действующая высота отражения слоя F2, измеренная вертикальным зондированием; h_n – высота препятствия (отрезки МД и М'Д') задаётся; $r_3 = 6371$ км – радиус земли.

Максимальное расстояние одного скачка АВ

$$\theta_{0 \max} = \arcsin \frac{r_3}{r_3 + h_d}, \quad (6)$$

$$AB = r_3 * 2 \left(\frac{\pi}{4} - \theta_{0 \max} \right), \quad (7)$$

где все углы в радианах.

Из решения прямоугольного треугольника АОД получаем $\angle AOD$ в радианах

$$\angle AOD = \cos^{-1} \left(\frac{r_3}{r_3 + h_n} \right) \quad (8)$$

и минимальное расстояние до препятствия в км

$$AM = r_3 * \angle AOD. \quad (9)$$

В табл. 2 приведена зависимость минимального удаления СР от препятствий различной высоты.

Таблица 2

Зависимость минимального удаления СР от препятствий различной высоты, км

<i>Высота препятствия</i>	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0
<i>Удаление от препятствия</i>	56	79	112	159	225	319

Данные расчеты подтверждают известные ситуации (например, в Восточной Сибири), когда радиоузлы, расположенные в низинах, окружённых горными массивами, не могут использовать радиотрассы с модой 1F2 протяжённостью более 1,5–2,0 тыс. км

С учётом предлагаемого подхода к частотно-пространственному взаимодействию узлов, зон доступа и антенных систем может быть построена национальная сеть радиодоступа ДКМВ диапазона, охватывающая всю территорию РФ при относительно небольшом (20–25) количестве СР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая Линия – Телеком, 2006. 600 с.
2. Поляков В.Т. NVIS – техника ближней связи на КВ // Спецтехника и связь. 2009. № 1. С. 59–63.
3. Степанов Н.Н. Сферическая тригонометрия. Л.; М., 1948.
4. Зайцев В.В., Круковская И.Я. Выбор рабочих частот в зоне обслуживания узла радиодоступа диапазона ДКМВ // Информация и космос. 2015. № 4. С. 10–12.
5. Зайцев В.В. Оценка размеров зоны обслуживания и нижней границы пропускной способности узла радиодоступа диапазона ДКМВ // Информация и космос. 2014. № 1. С. 13–17.
6. Распространение радиоволн: учебник / О.И. Яковлев [и др.]; под ред. О.И. Яковлева. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.