УДК 621.371:551.510.535

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНОВ ОПТИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЧАСТОТ АДАПТИВНЫХ ДАЛЬНИХ РАДИОЛИНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПАНОРАМНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЛЧМ-СИГНАЛОМ

© 2010 г. ***В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Бастракова***

Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола

nvr@marstu.net

Поступила в редакцию 16.12.2009

Представлены методики и алгоритмы автоматической оценки полосы пропускания декаметровой радиолинии, диапазонов оптимальных рабочих частот, отношения сигнал/шум для радиолиний протяженностью 2.6–3.5 Мм по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы широкополосным ЛЧМ-сигналом. Предложен алгоритм и проведен расчет потока смены частот при автоматическом выборе оптимальной рабочей частоты, среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот. Проведена экспериментальная апробация разработанных методик и алгоритмов измерения параметров исследуемых декаметровых радиолиний для различных сезонов года и времени суток.

Ключевые слова: декаметровая радиосвязь, линейно-частотно-модулированный сигнал, диапазон оптимальных рабочих частот, коэффициент двоичной ошибки.

Введение

Радиосвязь в декаметровом (ДКМ) диапазоне длин волн играет важную роль как средство внутренней, зоновой, подвижной и производственно-диспетчерской связи общего и ведомственного пользования. Обычно на ионосферных радиолиниях связь возможна на рабочих частотах от наименьшей применимой (НПЧ) до максимально применимой частот (МПЧ) [1]. На рабочей частоте формируется радиосигнал с полосой частот, равной Δf. Для ДКМ-радиоканала она обычно составляет 3 кГц. Таким образом, на линии связи возможна организация $n = (f_{\text{МПЧ}} - f_{\text{НПЧ}})/\Delta f$ ортогональных радиоканалов [2]. Канал характеризуется рабочей частотой, за которую принимается средняя частота из полосы Δf. Из-за изменчивости ионосферы – среды распространения связного сигнала и многолучевого характера приема надежность ДКМ-связи на отдельных участках рабочих частот может быть недостаточно высокой [3]. Решение задачи обеспечения установленных требований по надежности и помехоустойчивости ДКМ-радиосвязи связано с адаптацией по рабочей частоте системы связи к изменяющимся условиям распространения радиоволн [4]. Одной из основных характеристик, определяющих надежную работу радиолинии, является диапазон оптимальных рабочих частот (ДОРЧ). ДОРЧ определяют как по результатам прогнозов, так и экспериментально. Для того чтобы определить ДОРЧ в автоматическом режиме по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы, необходимо предварительно разработать алгоритмы оценки полосы пропускания и отношения сигнал/шум (SNR) для ДКМ-радиолинии. В практике радиосвязи нередко среднее превышение уровня полезного сигнала над уровнем помех на данной частоте оказывается недостаточным для приема информационного сигнала с заданной достоверностью. Это приводит к необходимости использовать группу частот в интересах одного или нескольких радионаправлений с автоматическим выбором оптимальной рабочей частоты в любой требуемый момент времени [3]. Групповой метод использования частот решает одновременно, с одной стороны, задачу повышения надежности радиосвязи, а с другой – задачу наиболее рационального использования частотно-временных и частотно-энергетических ресурсов линии связи.

Цель работы. Экспериментальное исследование ДОРЧ по данным панорамного зондирования ионосферы широкополосным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом при использовании различных радиомодемов. Моделирование и оценка среднего энергетического выигрыша от применения группы частот по

сравнению с работой на одной частоте для исследуемого ДОРЧ, а также моделирование потока смены частот.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка методики и алгоритма автоматической оценки ДОРЧ по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы при использовании в системе связи различных типов радиомодемов.

2. Оценка ДОРЧ на радиолиниях протяженностью 2.6–3.5 Мм по экспериментальным данным панорамного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом.

3. Численное моделирование среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот при автоматическом выборе оптимальной рабочей частоты из ДОРЧ.

Техника и условия проведения эксперимента

Исследования проведены на основе экспериментальных данных наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом, полученных на сети ЛЧМ-ионозондов, которая является эффективным инструментом мониторинга ионосферного распространения ДКМ-волн [1]. Для диагностики радиолиний использовались ЛЧМ-ионозонды, разработанные в Марийском государственном техническом университете (МарГТУ) и Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), а также фрагмент западноевропейской сети ионозондов. Приемопередающая станция ЛЧМ-ионозонда (разработки МарГТУ) состоит из трансивера IC-78; модема, ПЭВМ, блока питания (БП) и антенны [2]. Зондирующий сигнал поэлементно сжимается в приемнике. На выходе системы сжатия регистрируется амплитудный спектр сигнала. Получаемые последовательно спектры отображаются в виде ионограмм. В данной работе исследовались экспериментальные данные, полученные на радиотрассах: г. Иркутск – г. Йошкар-Ола и о. Кипр – г. Йошкар-Ола, протяженностью 3561 км и 2623 км соответственно. Приемный пункт находился в г. Йошкар-Оле, а передатчики – в г. Иркутске и на о. Кипр. Наблюдения проводились круглосуточно с периодом 15 минут. Экспериментальные данные взяты из банка данных МарГТУ, которые получены в марте, июне, октябре, декабре 2003–2004 гг. Выборка из 2230 ионограмм охватывала все сезоны года и являлась однородной. Расчеты диапазонов оптимальных рабочих частот проведены для случаев использования модемов с некогерентным приемом сигналов частотной телеграфии (ЧТ) с узкополосным трактом, некогерентным приемом ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей, а также для модемов, использующих сигналы с восьмипозиционной фазовой модуляцией (8ФМ).

Методика и алгоритм автоматической оценки ДОРЧ и SNR

Полоса прозрачности ДКМ-линии связи (диапазон прохождения сигнала) определяется наименьшей наблюдаемой частотой (ННЧ) и максимально наблюдаемой частотой (МНЧ) [2]. Наиболее важным, с точки зрения использования в системах связи, из этих двух параметров является диапазон вблизи МНЧ, поскольку поглощение волны быстро уменьшается с ростом частоты. При этом уменьшается и уровень помех приему сигналов. В этом случае, как правило, уменьшается многолучевость приема, растет SNR и, следовательно, растет помехоустойчивость системы связи. Однако при работе на частотах, близких к МНЧ, негативное влияние оказывают ионосферные возмущения, поэтому необходима оперативная диагностика ионосферных радиолиний с использованием сети ионозондов. Определение ННЧ и МНЧ в автоматическом режиме проводится информационно-аналитической системой ЛЧМ-ионозонда [2, 4] разработки МарГТУ. При этом используется следующий алгоритм.

Каждый вектор-столбец ионограммы, очищенной от помех [2, 4], проверяется на наличие в нем сигнала. При этом крайний левый столбец соответствует ННЧ, а крайний правый – МНЧ. Для защиты от сбоев алгоритма оценки ННЧ и МНЧ в алгоритм вводятся два защитных условия:

1) граница диапазона прозрачности должна включать не менее трех смежных вектор-столбцов ионограммы, содержащих полезный сигнал;

2) вектор-столбец ионограммы содержит полезный сигнал, если в нем есть не менее трех смежных ненулевых элементов.

Процедура защиты алгоритма состоит в последовательной проверке всех вектор-столбцов ионограммы на выполнение условий 1 и 2 и определении номера вектор-столбца (рабочих частот), где условие 1 выполняется в первый (ННЧ) и последний (МНЧ) раз.

При определении оптимальных рабочих частот для систем связи можно рассматривать только частоты из диапазона от ННЧ до МНЧ. В частотном диапазоне от ННЧ до МНЧ производится оценка качества каналов. Критерием качества является рассчитываемое по ионограммам SNR в рассматриваемом радиоканале. После того как частотные зависимости вероятностей ошибок для случаев применения в системе связи узкополосных сигналов и широкополосных сигналов определены, по заданному пороговому значению SNR находятся диапазоны оптимальных рабочих частот (ДОРЧ), в пределах которых SNR не превышает своего порогового значения, и выбираются наилучшие каналы для связи. Для выбранных каналов рассчитываются следующие рабочие параметры: коэффициент двоичной ошибки (КДО), максимальная скорость передачи данных; мощность передатчика, необходимая для обеспечения заданного уровня SNR [2, 4].

SNR определяет возможность работы системы передачи информации в данном частотном радиоканале. Если система связи и ЛЧМ-ионозонд используют для работы идентичные антенные системы, то решение задачи обнаружения и выделения непрерывного ЛЧМ-сигнала на выходе системы сжатия его в частотной области позволяет решить задачу определения SNR для системы связи.

В ионосферном канале достаточно часто реализуется квазирелеевский канал, когда в полезном сигнале присутствуют зеркальная и флуктуационная компоненты и для расчета вероятности ошибки в таком канале необходимо, кроме отношения сигнал/шум, знать и отношение энергии зеркальной компоненты к энергии флуктуационной компоненты сигнала.

Критерием оценки ДОРЧ можно использовать значения коэффициента двоичной ошибки, рассчитанные в зависимости от отношения сигнал/шум и типа применяемого в системе связи модема. Согласно разработанному алгоритму определения SNR (обозначим Z) [5], спектральные амплитуды шума в вектор-столбцах ионограммы распределены по закону Релея, а смеси сигнала и шума – по закону Райса. Таким образом, SNR можно оценить по формуле [2]:

$$Z = 10\lg\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (1)$$

После выделения полезного сигнала на экспериментальной ионограмме определяется среднее значение квадрата смеси сигнала и шума:

$$\left\langle \rho_1^2 \right\rangle = 2\sigma^2 + A^2. \qquad (2)$$

Дисперсия шума определяется по формуле:

$$\left\langle \rho_2^2 \right\rangle = 2\sigma^2. \qquad (3)$$

Обращаясь к формулам (2) и (3), SNR можно оценить по следующей формуле через средние квадраты амплитуд ансамблей:

$$Z = 10\lg\left[\ \left(\left\langle \rho_1^2 \right\rangle - \left\langle \rho_2^2 \right\rangle\right)/\left\langle \rho_2^2 \right\rangle\ \right]. \qquad (4)$$

В ЛЧМ-ионозонде по разработанным программам автоматически определяется SNR и рассчитываются частотные зависимости SNR для рабочих частот из ДОРЧ [2, 4].

Определенные частотные зависимости SNR по результатам ЛЧМ-зондирования пересчитываются на аналогичные SNR для систем декаметровой радиосвязи с использованием следующей формулы:

$$Z_{св} = Z - 10\lg\frac{P_0 \Delta f_{св}}{P_{св}\delta F}, \qquad (5)$$

где Z – SNR для ионозонда при мощности его сигнала, равной P_0; δF – разрешение анализатора спектра ионозонда; $P_{св}$ – мощность связного передатчика; $\Delta f_{св}$ – полоса связного радиоканала.

Критерием оценки ДОРЧ являлись рассчитанные по ионограммам значения априорного коэффициента двоичной ошибки КДО = –lg(P), где P – вероятность ошибки в принятом сообщении в радиоканалах из полосы прозрачности. КДО рассчитывается в зависимости от SNR и типа применяемого в системе связи модема.

Результаты экспериментального исследования ДОРЧ на дальних радиолиниях протяженностью 2.6–3.5 Мм для систем связи, использующих разные типы модемов

Для проведения сравнительного анализа ДОРЧ на исследуемых радиолиниях были определены границы диапазонов оптимальных рабочих частот, пересчитанные затем в относительные частоты ([f_1/МНЧ; f_2/МНЧ], где f_1 – – нижняя, а f_2 – верхняя границы ДОРЧ), что делает результаты приведенного исследования более универсальными. Расчеты ДОРЧ приведены с учетом использования различных модемов связи. Данные были разделены по исследуемому сезону, для дневного и ночного времени суток. Экспериментальные значения относительных границ ДОРЧ для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола и о. Кипр – Йошкар-Ола представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

По результатам исследования установлено, что с применением в системе связи сигналов с 8ФМ-модуляцией границы ДОРЧ расширяют-

Таблица 1

Экспериментальные значения относительных границ ДОРЧ на радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола для различных типов приема

Тип приема / Сезон года, время суток	Некогерентный прием ЧТ с узкополосным трактом	Некогерентный прием ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей	Прием сигналов с 8ФМ-модуляцией
Весна, день	0.61–0.94	0.48–0.55 0.75–0.92	0.38–1
Весна, ночь	0.6–0.62 0.95–0.98	0.87–0.89	0.37–1
Лето, день	0.7–0.95	0.65–0.9	0.35–1
Лето, ночь	0.65–0.92	0.6–0.85	0.37–0.99
Осень, день	0.58–0.72	0.56–0.68 0.82–0.88	0.36–0.98
Осень, ночь	0.34–0.39	0.49–0.51	0.31–0.98
Зима, день	0.45–0.52	0.64–0.88	0.37–1
Зима, ночь	0.48–0.62	0.75–0.84	0.34–0.99

Таблица 2

Экспериментальные значения относительных границ ДОРЧ на радиолинии о. Кипр – Йошкар-Ола для различных типов приема

Тип приема / Сезон года, время суток	Некогерентный прием ЧТ с узкополосным трактом	Некогерентный прием ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей	Прием сигналов с 8ФМ-модуляцией
Весна, день	0.72–0.87	0.77–0.85	0.58–0.99
Весна, ночь	0.77–0.96	0.79–0.88	0.57–0.99
Лето, день	0.82–0.98	0.85–0.94	0.54–1
Лето, ночь	0.78–0.95	0.8–0.92	0.51–0.99
Осень, день	0.78–1	0.93–0.95	0.55–1
Осень, ночь	0.665–1	0.9–0.92	0.685–1

ся по сравнению со случаями некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом и некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей. Установлено, что при переходе от дневного к ночному времени суток на радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола для весеннего и осеннего периодов при применении обоих видов модемов происходит резкое сужение границ ДОРЧ (на 90%), в то время как при приеме сигналов с 8ФМ-модуляцией они остаются практически постоянными для всех случаев приема. В летний период при переходе от ночного к дневному времени суток границы ДОРЧ остаются постоянными для всех случаев приема, а для зимнего периода происходит расширение в 2 раза границ ДОРЧ для ЧТ с узкополосным трактом и уменьшение в 2 раза – для ЧТ с широкополосным трактом. На радиолинии о. Кипр – Йошкар-Ола для всех исследуемых радиомодемов для различных сезонов года при переходе от ночного к дневному времени суток границы ДОРЧ практически не изменяются, но при применении в системе связи сигналов с 8ФМ-модуляцией границы ДОРЧ расширяются в 2.5 раза по сравнению с применением ЧТ с узкополосным трактом и в 5 раз – при применении ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей лучей.

Средний энергетический выигрыш при групповом использовании частот из ДОРЧ в системе связи

С целью повышения надежности радиосвязи проводят резервирование радиоканалов путем использования групп частот на одно или несколько направлений из диапазонов выделенных частот. Смена частот и выбор новых рабочих частот из числа резервных могут производиться по различным критериям [6]. Алгоритм определения среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот представляет собой следующую последовательность.

1. Определение интегральной функции распределения вероятностей превышения SNR некоторого значения [4]:

$$P(Z'<Z)=F\left(\frac{Z-\bar{z}}{\sigma_z}\right)F^{Q-1}\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right)+$$
$$+D(Z-z_\partial)\left[F\left(\frac{Z-\bar{z}}{\sigma_z}\right)-F\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right)\right]\times \quad (6)$$
$$\times\left[1-F^{Q-1}\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right)\right]F^{-1}\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right),$$

где $\bar{z}$ – среднее значение превышения SNR; σ_z – среднеквадратичное отклонение превышения SNR; z_∂ – допустимое значение превышения SNR; Q – количество частот в группе частот, Z – текущее значение SNR, $D(Z)$=1, если $(Z-z_\partial)\geq 0$ и $D(Z)$=0, если $(Z-z_\partial)<0$, F – интегральная функция распределения вероятностей Z.

2. Расчет плотности распределения вероятностей величины Z при работе на любой доступной частоте из группы Q запишется в виде:

$$\omega_Q(Z)=\omega(Z)F^{Q-1}\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right)+$$
$$+\omega(Z)\left[1-F^{Q-1}\left(\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}\right)\right]\cdot\left[F^{Q-1}\left(\frac{z-\bar{z}_\partial}{\sigma_z}\right)\right], \quad (7)$$

где $\omega(z)$ – логарифмически нормальная плотность распределения вероятностей величины Z на любой одной случайно выбранной частоте.

3. Определение среднего значения величины $\bar{z}$ в рабочем канале:

$$(\bar{z})_Q=\int_0^\infty z\omega_Q(z)dz=H_{0.5}\exp\left(\frac{\sigma_z^2}{2M_1^2}\right)V(\xi,Q), \quad (8)$$

где $V(\xi,Q)=F^{Q-1}(\xi)+\frac{1-F^{Q-1}(\xi)}{F(-\xi)}F\left(\frac{\sigma_z}{M_1}-\xi\right)$ – промежуточная функция для $\xi=-\frac{z_\partial-\bar{z}}{\sigma_z}$, M_1 =20lg(e) – коэффициент перехода от натуральных логарифмов к десятичным (при расчетах в децибелах), $H_{0.5}$ – квантиль уровня Z при вероятности 0.5.

4. Нахождение среднего энергетического выигрыша SNR ΔZ при использовании группы частот по сравнению с работой на одной частоте:

$$\Delta Z(Q,Z,\sigma_z,Z_\partial)=20\lg\frac{(z)_Q}{z_1}=20\lg V(\xi,Q), \quad (9)$$

где z_1 – превышение SNR при работе на одной частоте, z_Q – превышение SNR при работе на Q частотах.

По предложенной методике разработана программа и проведено моделирование. Результаты моделирования среднего энергетического выигрыша от применения группы частот для некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом и систем связи, использующих сигналы с 8ФМ-модуляцией, для σ_z = 20 дБ приведены на рис. 1.

Показано, что с увеличением числа частот в группе Q и среднеквадратичного отклонения SNR (σ_z) для тех же моделируемых групп частот и одинаковых условий приема средний энергетический выигрыш ΔZ увеличивается. Для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ-модуляцией, средний энергетический выигрыш на 8 дБ выше, чем для узкополосного случая приема при одинаковых значениях относительного допустимого превышения SNR из групп частот.

Оценка плотности потока смены частот при автоматическом выборе оптимальной рабочей частоты из ДОРЧ в адаптивной системе радиосвязи

Процесс переходов на оптимальную рабочую частоту при работе в экстремальном (оптимальном) канале представляет собой случайный поток событий. Характеристикой такого потока является плотность, равная количеству переходов с частоты на частоту при работе системы связи в единицу времени, т.е. средней частости переключений каналов (рабочих частот). Алгоритм определения среднего количества переходов как плотность потока переходов можно представить в следующем виде:

1. Вероятность перехода за время Δt с рабочей частоты на любую доступную частоту из группы $P_n(\Delta t)$ как условную вероятность можно записать в виде [5]:

$$P_n(\Delta t)=P\left(z(t+\Delta t)<\frac{z_\partial}{z(t)}>z_\partial\right)=\frac{2T(\xi,\alpha)}{F(-\xi)}, \quad (10)$$

где $\alpha=\frac{1-R_z(\Delta t)}{\sqrt{1-R_z^2(\Delta t)}}$;

$T(\xi,\alpha)=\frac{1}{2\pi}\int_0^\infty e^{-\frac{\xi^2}{2}(1+x^2)}\frac{dx}{1+x^2}$ – интегральная функция двумерного нормального закона распределения; $F(\xi)$ – интегральная функция распределения.

2. Нормированная корреляционная функция процесса $z_i(t)$ находится по формуле:

$$R_z(\Delta t)=\frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2}R_x(\Delta t)+\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2}R_y(\Delta t). \quad (11)$$

3. При стационарности и независимости процессов $z_i(t)$ процесс перехода представляет собой стационарный поток. Используя теорему

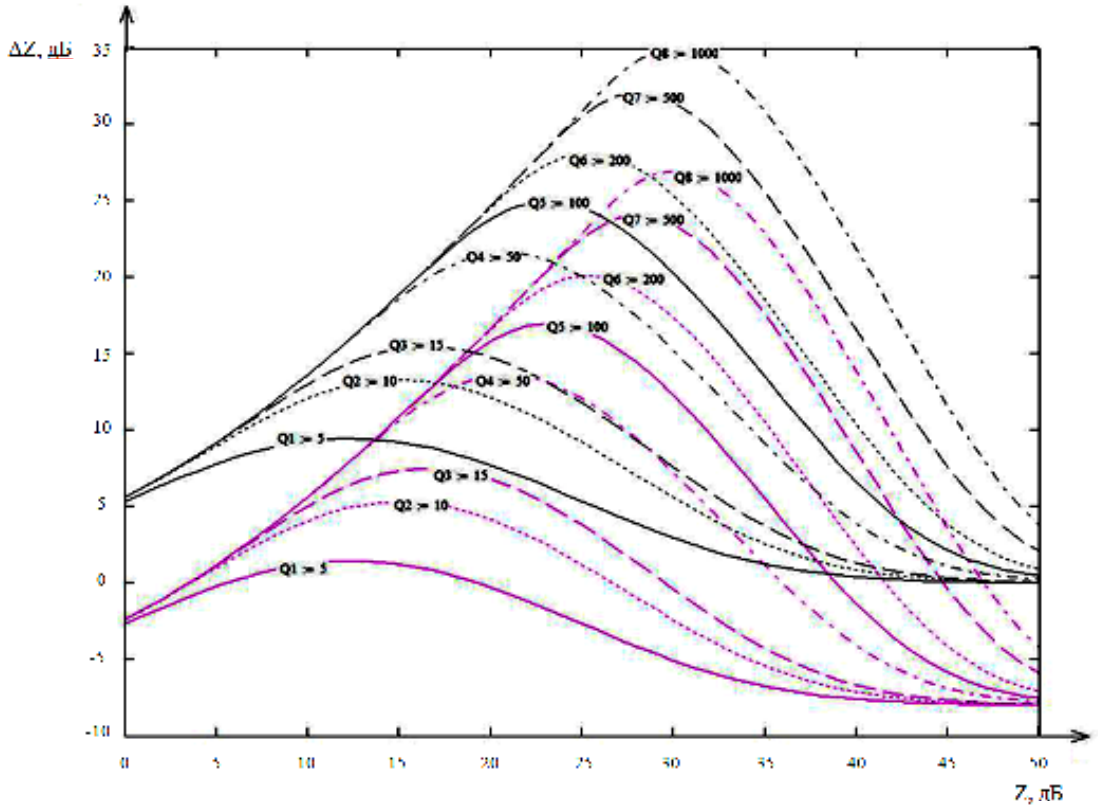


Рис. 1. Средний энергетический выигрыш для различных значений относительного допустимого превышения SNR, различных групп частот Q (при $\sigma_z = 20$ дБ):
— – для некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом;
▬ – для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ-модуляцией;
… – для некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей

А.Я. Хинчина [1] о существовании плотности для любого стационарного потока, можно определить среднее количество переходов как плотность потока переходов [6]:

$$K = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_n(\Delta t)}{\Delta t}. \qquad (12)$$

Среднее количество переходов в единицу времени в зависимости от относительного значения допустимого превышения SNR: $\xi = -\frac{z_\partial - \bar{z}}{\sigma_z}$ и корреляционной функции $R_z(\Delta t)$ равно:

$$K(\xi, R_z, (\Delta t)) = \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) F^{-1}(-\xi) K(0), \qquad (13)$$

где $K(0)$ – среднее количество пересечений процессом $z(t)$ среднего уровня сверху вниз (или снизу вверх).

Таким образом, при использовании доступных частот среднее количество смен частот в единицу времени на автоматизированной радиолинии равно:

$$K = f(\xi) K(0). \qquad (14)$$

Результаты моделирования потока смены частот для значения вероятности ошибок $P = 10^{-3}$ для модемов, использующих некогерентный прием ЧТ с узкополосным трактом, и с 8ФМ-модуляцией представлены на рис. 2.

Результаты моделирования показали, что для обеспечения меньшей вероятности ошибок P принимаемого сообщения при одинаковом числе переходов на «лучшую» частоту требуется большее SNR. Например, при узкополосном случае приема, при $P = 10^{-4}$, $z_{cp} = 30$ дБ, $\sigma_z = 20$ дБ, число переходов $K = 3$, а при $P = 10^{-3}$, $z_{cp} = 30$ дБ, $\sigma_z = 20$ дБ число переходов $K = 2$. С увеличением среднеквадратического отклонения SNR, т.е. вариаций уровня сигнала и шума в канале, на 5 дБ, в среднем, число переходов увеличивается в 2–3 раза. Для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ-модуляцией, количество переходов на новую частоту меньше, чем для узкополосного случая приема при тех же значениях среднего SNR и среднеквадратического отклонения SNR.

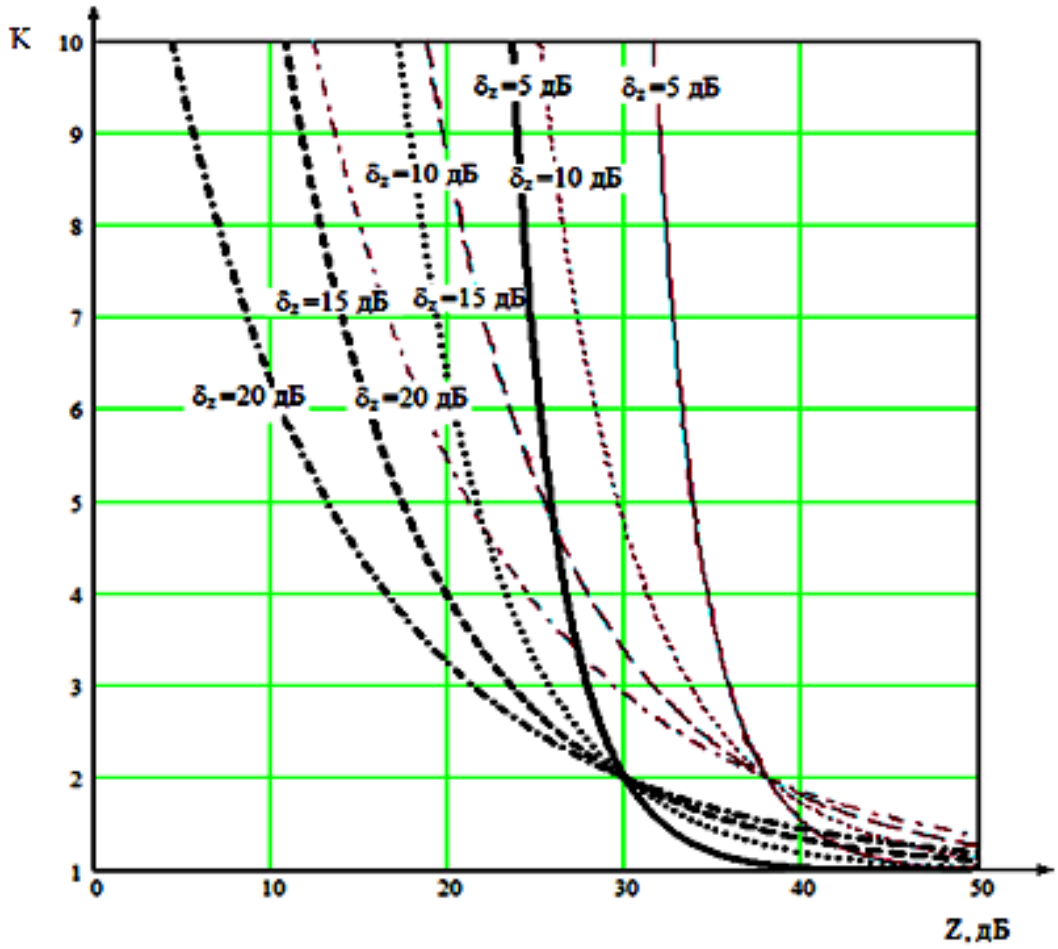


Рис. 2. Зависимости количества переходов с одной частоты на другую от среднего превышения SNR при $P = 10^{-3}$ для различных значений среднеквадратичного отклонения σ_z:

—— – для некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом;

▬ – для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ-модуляцией;

… – для некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей

Выводы

1. Разработаны методики и алгоритм расчета ДОРЧ, потока смены частот и среднего энергетического выигрыша от применения группы частот при автоматическом выборе частоты радиосвязи по экспериментальным данным панорамного зондирования ионосферных радиолиний ЛЧМ-сигналом.

2. Экспериментально установлено, что при использовании в системе связи сигналов с 8ФМ-модуляцией можно расширить ДОРЧ по сравнению со случаями некогерентного приема с ЧТ с узкополосным трактом и некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей.

3. Численное моделирование среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот при автоматическом выборе оптимальной рабочей частоты из ДОРЧ показало, что для рационального и эффективного использования частотно-энергетических и частотно-временных резервов ДКМ-диапазона необходимо вести статистический контроль за качеством рабочего канала приема, выбирать в любой требуемый момент с наименьшими потерями новую достигнутую или «лучшую» частоту приема по SNR из ДОРЧ и проводить частотную адаптацию системы радиосвязи на выбранную рабочую частоту.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИСЗФ СО РАН под руководством профессора В.И. Куркина за совместные эксперименты на радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 08-02-12081-офи; 09-07-00331-а; Федеральных целевых программ: «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

на 2009–2013 годы (ГК № 02.740.11.0233); «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» (проект № 2.1.1/3896).

Список литературы

1. Иванов В.А., Егошин А.Б., Рябова Н.В. и др. // Оперативное моделирование систем КВ-связи // Труды Международной н.-т. конференции «Радиолокация, навигация и связь». Воронеж, 1999. С. 1711–1716.

2. Рябова Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 292 с.

3. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / Под ред. проф. В.А. Иванова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. 204 с.

4. Егошин А.Б., Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровой радиосвязи. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 322 с.

5. Рябова Н.В., Бастракова М.И., Мальцев А.В. Исследование влияния ионосферы на надежность декаметровых радиоканалов // Тез. докл. XI региональной конференции по распространению радиоволн. СПб., 2005. С. 56–58.

6. Рябова Н.В., Бастракова М.И., Мальцев А.В. Расчет надежности коротковолновой связи с заданной достоверностью // Тез. докл. XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: МЭИ, 2006. Т. 1. С. 560.

7. Ткачев Г.Н., Савельев С.М., Клименко А.А. Экспериментальная оценка качества помехоустойчивой передачи данных на короткой ДКМВ радиолинии // Труды Международной н.-т. конференции «Радиолокация, навигация и связь» (RLNCC2006). Воронеж, 2006. Т. 2. С. 802–807.

8. Рябова Н.В., Бастракова М.И., Мальцев А.В. Экспериментальное исследование влияния условий распространения радиоволн в среднеширотной ионосфере на надежность декаметровых систем радиосвязи // Тез. докл. 61-й научной сессии, посвященной Дню радио. М.: МЭИ, 2006. С. 128–131.

9. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. О.В. Головина. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. С. 354.

10. Рябова Н.В., Бастракова М.И., Мальцев А.В. Исследование надежности декаметровых систем связи на трассах протяженностью 2.6–5.7 Мм на основе данных панорамного зондирования ионосферных радиолиний // Труды Международной н.-т. конференции «Радиолокация, навигация и связь» (RLNCC2007). Воронеж, 2007. Т. 2. С. 456–465.

11. Бастракова М.И. Экспериментальное исследование диапазонов оптимальных рабочих частот декаметровых систем связи //. Вестник МарГТУ. №2(3). Йошкар-Ола, 2008. С. 3–12.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPTIMUM OPERATING FREQUENCY RANGES OF ADAPTIVE RADIO LINES BY IONOSPHERE PANORAMIC LFM SOUNDING

V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, M.I. Bastrakova

The authors present the procedures and algorithms for an automatic estimation of a decameter radio line passband, optimum operating frequency ranges, signal-to-noise ratio for a radio line 2.6-3.5 Мм long using the experimental data of oblique ionospheric sounding by a LFM signal. An algorithm has been proposed and calculations have been made of a frequency change pattern for the automatic mode of optimum operating frequency selection. Average energy gain has also been calculated for the case when frequency group policy is used. Experimental verification of the developed procedures and algorithms to measure the parameters of decameter radio lines for different seasons of the year and times of the day has been performed.

Keywords: decameter (dkm) radio communication, linearly frequency modulated (LFM) signal, optimum operating frequency range, binary error coefficient.