

Исследование многомерного коротковолнового радиоканала с использованием панорамного ионозонда

В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова, А. Р. Лащевский, Р. Р. Бельгибаев, А. А. Елсуков, А. В. Мальцев, В. В. Павлов, М. И. Рябова, А. А. Чернов

Марийский государственный технический университет; 424000, РФ, респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3; miryabova@mail.ru

Представлен теоретический анализ, алгоритмы обработки и результаты круглосуточных натурных исследований по зондированию векторного КВ радиоканала панорамным ЛЧМ-зондом. Представлены результаты вычислительного и натурального экспериментов по исследованию оптимальных рабочих частот и максимально наблюдаемых частот.

The algorithms of processing are presented and twenty-four-hour natural researches into the sounding of a vector short-wave radio channel by a panoramic chirp sounder have been carried out. The results of computing and natural experiments on investigation into optimal working frequencies and maximum observed frequencies are presented.

Введение. В течение многих десятилетий коротковолновая (КВ) радиосвязь через ионосферу являлась достаточно простым и эффективным способом установления связи на очень большие расстояния (до многих тысяч километров) по всему земному шару [1]. КВ-радиосвязь оказывалась особенно важной, когда использование кабелей было невозможно: для связи с самолетами, кораблями и другими мобильными пользователями. Она могла быть осуществлена в любое время и по любому направлению. В последние три десятилетия бурное развитие получили спутниковые СВЧ-радиосистемы, которые давали альтернативный способ связи с мобильными и удаленными пользователями в большом диапазоне расстояний. Спутниковая связь превосходит коротковолновую по скорости передачи информации и надежности, однако, она пока значительно уступает ей по стоимости. Главным недостатком спутниковой связи является ее уязвимость в военное время. По этой причине необходимо сохранять и развивать КВ связь в качестве резервного вида. Важное направление развития КВ связи заключается в повышении ее производительности и надежности. Однако, КВ связи присущи недостатки, обусловленные изменчивостью характеристик среды распространения связного радиосигнала - ионосферы Земли. Для уменьшения негативного влияния среды применяется адаптация параметров системы связи к характеристикам среды на основе данных радиозондирования. Поэтому развитие методов радиозондирования ионосферных КВ радиоканалов остается актуальной научной проблемой.

Цель работы – представить теоретический анализ, алгоритмы обработки и результаты круглосуточных натурных исследований по зондированию векторного КВ-радиоканала панорамным ЛЧМ-зондом для анализа суточных вариаций его основных параметров.

В диапазоне 3-30 МГц (КВ-диапазоне) в принципе возможна организация ~ 9000 примыкающих (ортогональных) каналов с полосой $B=3$ кГц. Известно, что на линии КВ-связи заданной протяженности из точки излучения в точку приема могут прийти только гармонические сигналы с частотами от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимально (МПЧ) применимой частоты. Поэтому диапазон частот МПЧ – НПЧ частот называют полосой прозрачности линии КВ-связи [2]. Существование полосы прозрачности позволяет организовать на КВ-радиолинии лишь $J \approx (\text{МПЧ} - \text{НПЧ})[\text{кГц}] / B [\text{кГц}]$ ортогональных каналов. Граничные значения полосы прозрачности

радиолинии, определяющие размерность канала, зависят как от технических характеристик аппаратуры связи, так и от состояния среды распространения, поэтому они требуют организации слежения за ними путем панорамного зондирования.

Произвольный j -ый парциальный канал имеет свои частотную и импульсную характеристики [3]. Параметром, отличающим парциальные каналы между собой, является их средняя частота (рабочая частота). Все множество парциальных каналов можно представить в виде многомерного (векторного) канала, размерностью J , у частотной и импульсной характеристик которого компонентами является упорядоченное множество соответствующих характеристик парциальных (скалярных) каналов. Порядок скалярного канала задается номером j его средней частоты.

Итак, имеем:

$$\vec{H}(T, f) = \{H_j(f, T, \bar{f}_j)\}, \quad \vec{h}(T, \tau) = \{h(\tau, T, \bar{f}_j)\}, \quad \text{где } j = \{1 \dots J\}, \quad (1)$$

поэтому для простоты рассмотрения скалярные каналы принято связывать с рабочими частотами и отождествлять с ними. В этой связи в технике КВ-связи говорят не о выборе оптимального канала, а о выборе оптимальной рабочей частоты (ОРЧ).

Задача выбора ОРЧ [4] из множества частот аналогична задаче тестирования каналов проводной связи, когда для выбора исправного провода все провода «прозваниваются». Это позволяет также выбрать провод с наименьшими потерями – «оптимальный» канал проводной связи. Именно функцию «прозванивания» (зондирования) и реализует панорамный зонд. При этом «исправность» парциального канала оценивается по величине измеренных его основных параметров. Именно поэтому специалисты в области КВ-связи для панорамного зондирования давно используют системы, именуемые ЛЧМ-ионозондами (chirpsounders). В этом ионозонде используется сигнал с линейной частотной модуляцией, занимающий в частотной области диапазон частот от 2,0 до 30,0 МГц. При зондировании этот сигнал последовательно «проходит» все скалярные каналы из полосы прозрачности линии дальней связи. При этом он позволяет получать информацию о крайних частотах этой полосы.

Скалярные КВ-радиоканалы из-за многолучевости распространения и доплеровского смещения частоты относятся к каналам со случайными замираниями, у которых частотная и импульсная характеристика являются стохастическими функциями «медленного» времени T . Статистически устойчивой характеристикой произвольного j -ого канала является функция рассеяния канала (ФРК) [5]:

$$S_j(\tau, F_d) = \int_{-\infty}^{\infty} R_j(\tau, t) \exp(-i2\pi F_d t) dt, \quad (2)$$

где $R_j(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_j^*(T, \tau) h_j(T+t, \tau) dT$, τ – «быстрое» время (задержка), F_{dj} –

доплеровский сдвиг частоты, $h^*(T, \tau)$ – функция, сопряженная с ИХ канала.

ФРК скалярных каналов часто можно аппроксимировать гауссовой поверхностью в виде импульса, в вертикальных сечениях которой, проходящих через вершину, имеем функции Гаусса, а в горизонтальных – эллипсы с осями, направленными по координатным осям: (τ, F_d) . Такая ФРК имеет следующий аналитический вид:

$$S_j(\tau, F_{dj}) = \left(\frac{S}{N}\right)_j \exp \left[-\frac{(\tau - \bar{\tau}_j)^2}{2\sigma_{\tau_j}^2} - \frac{(F_d - \bar{F}_{dj})^2}{2\sigma_{F_{dj}}^2} \right], \quad (3)$$

где $2\sigma_{\bar{t}_j}$ – рассеяние в канале по задержке, \bar{t}_j – задержка в канале по «быстрому» времени, $2\sigma_{F_{dj}}$ – рассеяние в канале по доплеровскому сдвигу частоты, \bar{F}_{dj} – доплеровский сдвиг частоты в канале, $(S/N)_j$ – отношение сигнал/шум в канале.

Отметим, что ФРК скалярного канала зависит от пяти параметров: \bar{t}_j , \bar{F}_{dj} , $(S/N)_j$, $2\sigma_{\bar{t}_j}$, $2\sigma_{F_{dj}}$, первые два из которых, регулируются с помощью синхронизации, поэтому три остальных параметра считаются основными. Именно панорамный ЛЧМ-зонд позволяет оценивать основные параметры векторного канала.

Техника и условия эксперимента. В рамках данной работы эксперимент по зондированию ионосферы и ионосферных радиоканалов проводился на трассе Йошкар-Ола – Воронеж. Использовался ионозонд [6], представляющий собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из передающей и приёмной станций. Для синхронизации приёмной и передающей станций используется модуль единого времени с подстройкой по GPS [7]. Управление передающей станцией осуществляется ПЭВМ в соответствии с заданной программой (расписанием), управление приёмной станцией и обработка принятого сигнала осуществляется ПЭВМ также в соответствии с расписанием, заданным программно. Алгоритм «очистки» ионограмм и оценки отношения S/N подробно описан в работе [8].

Алгоритм определения основных параметров ФРК позволяет определить ОРЧ, для широкополосных скалярных каналов и диапазоны ОРЧ (ДОРЧ) для узкополосных каналов. При этом качестве критерия выбора ДОРЧ используются значения измеряемых ионозондом основных канальных параметров для векторного канала. На основании автоматической обработки [9] строится график изменения отношения S/N за весь период измерений. Рассеяние по задержке в узкополосном канале зависит от межмодовых задержек, принимаемых в канале мод [10], поэтому была проведена обработка данных на предмет оценки количества этих мод.

На рис.1 представлена зависимость рассеяния по быстрому времени в канале от рабочей частоты и времени суток. Наименьшее рассеяние (меньше 0,6 мс) наблюдается для случаев одномодового распространения. Для двухмодового распространения рассеяние составляет в среднем 1 – 2 мс. Максимальное рассеяние имеет место в ночное время для частот близких к наименьшей применимой частоте (НПЧ), где оно достигает $\sim 3 - 5$ мс.

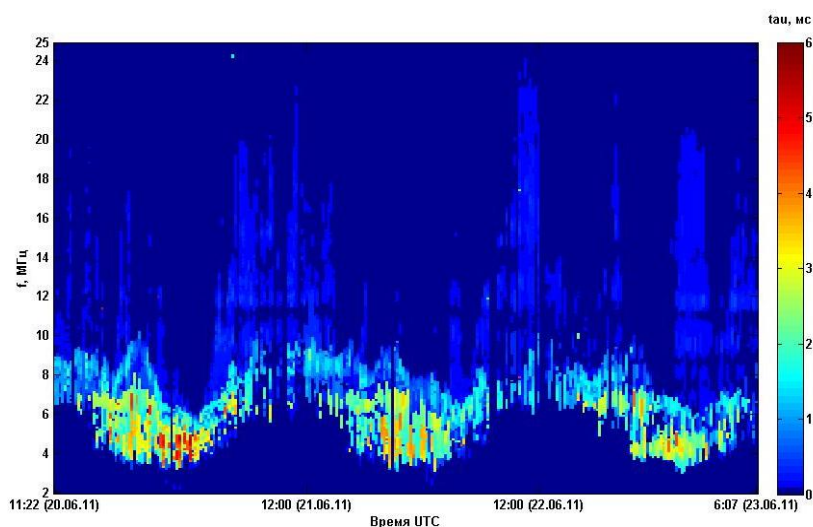


Рис.1. Рассеяние по быстрому времени в узкополосных скалярных каналах в зависимости от времени суток

Выводы. Представлен теоретический анализ, алгоритмы обработки и результаты круглосуточных натурных исследований по зондированию многомерного (векторного) КВ-радиоканала панорамным ЛЧМ-зондом. Показано, что вариации в «медленном» времени частотного диапазона радиолинии и основных параметров ФРК требуют периодического ее зондирования во всем КВ-диапазоне с целью определения диапазона оптимальных рабочих частот (ДОРЧ) и ОРЧ связи. Часто параметры рассеяния ФРК в частотной области (особенно для среднеширотных трасс) находятся в области допустимых значений. В этих случаях основными параметрами, определяющими кондиционность канала, становятся отношение S/N и рассеяние по быстрому времени. Панорамный зонд в силу разработанного алгоритма очистки ионограмм позволяет оценивать эти параметры на всех рабочих частотах из полосы прозрачности радиолинии.

Установлено, что наличие E_s приводит к аномальному увеличению МПЧ в 2 – 3 раза, причем данное увеличение носит случайный характер и может длиться от 30 минут до нескольких часов. Наибольшее отношение S/N имеет место при наличии спорадического слоя E на частотах 0,8 – 0,9 МПЧ. Одномодовое распространение наблюдается в основном для моды, отражающейся от спорадического слоя E и для слоя E на частотах 0,80 – 1,0 МПЧ. Наименьшее рассеяние (меньше 0,6 мс) по быстрому времени наблюдается для случаев одномодового распространения. Для двухмодового распространения рассеяние составляет в среднем 1 – 2мс. Максимальное рассеяние, достигающее ~ 3 – 5мс имеет место в ночное время для частот, близких к НПЧ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 10-02-00620; 10-07-00466-а; 11-07-00420-а; ФЦП: ГК № 14.740.11.1147, № 14.740.11.1209; №14.740.11.1436; АБЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011.

Литература

1. Arthur, P.C. Application of a high quality ionosonde to ionospheric research / P.C. Arthur, M. Lissimore, P.S. Cannon, N.C. Davies // Seventh Int. Conf. on HF RadioSystems and Techniques, IEE Conf. Pub., Nottingham, 2002, N 441, pp. 135-139.
2. Иванов, В.А. Современные подходы в краткосрочном прогнозировании помехоустойчивых ионосферных радиоканалов для декаметровых телекоммуникационных систем / В.А. Иванов, Н.В. Рябова // Вестник МарГТУ – Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2007. - №1 – С.23-34.
3. Иванов, Д.В. Оптимальные полосы частот сложных сигналов для декаметровых радиолиний / Д.В. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т.51, – №4, – С. 389-396.
4. Иванов, В.А. Экспериментальное исследование диапазонов оптимальных рабочих частот адаптивных дальних радиолиний по результатам панорамного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Бастракова // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского: Радиофизика. – 2010. – № 3. – С. 87-94
5. ITU-R Rec. F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of Up to about 12 kHz Using Ionospheric Channel Simulators. (available from International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland). – 2000.
6. Иванов, В.А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, Д.В. Иванов // Вестник МарГТУ – Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – №1. – С 3 -37.
7. Иванов, В.А. Устройство и алгоритмы синхронизации радиотехнических систем связи и зондирования ионосферных высокочастотных радиоканалов / В.А. Иванов, Е.В.

Катков, А.А. Чернов // Вестник МарГТУ – Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – №2. – С 114 -126.

8. Рябова, Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Монография / Н.В. Рябова. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2003. – 292 с.

9. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровой радиосвязи: Монография / Д.В. Иванов, А.Б. Егшин, В.А. Иванов, Н.В. Рябова; под ред. В.А. Иванова. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2006. – 256 с.

10. Иванов, В.А. Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // Радиотехника и электроника. – Т. 55. – № 3. М.: Академиздатцентр «Наука», – 2010. – С.285-291