

В. Н. Козлов¹, В. М. Коротун¹¹ ОАО «НПК «Научно-исследовательский институт Дальней Радиосвязи»»

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ЧАСТОТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ КВ-ДИАПАЗОНА

Для получения быстрой (в пределах нескольких секунд) оценки параметров ионосферного радиоканала вблизи МПЧ предлагается использовать новый алгоритм (метод) многочастотной диагностики канала распространения радиоволн. Такая диагностика позволит наиболее точно оценить оптимальную рабочую частоту (ОРЧ) для обеспечения максимальной пропускной способности (МПС) радиоканала. Новый метод основан на использовании априорной информации о параметрах ионосферы вдоль радиотрассы в совокупности с данными текущего радиозондирования в радиоканале для наилучшей оценки ОРЧ-МПС.

Ключевые слова: НЗ – наклонное зондирование, ВЗ – вертикальное зондирование, МПС – максимальная пропускная способность, МПЧ – максимально применимая частота, ОРЧ – оптимальная рабочая частота, IRI – международная модель ионосферы, мод – часть принятого сигнала, обладающая выраженным отличием от других его частей по какому-либо параметру (время распространения, угол луча, поляризация), КВ – короткие волны, МЧ2М – максимальная частота двухскачкового мода, Л4М – линейно-частотно-модулированный сигнал.

При современной скоростной передаче данных по ионосферному КВ-каналу с высокими требованиями надежности изменчивость во времени ионосферы – основной мешающий фактор. Усреднение и определение корреляционных зависимостей могут дать эффект только при избыточности времени для передачи информации или в среднем по совокупности большого множества посылок. При недостатке времени в эфире можно использовать только регулярные (почти регулярные – квазирегулярные) частотные свойства ионосферного распространения. Одной из неиспользованных до сих пор особенностей ионосферного распространения КВ является квазирегулярная структура поля в зоне ионосферной фокусировки, наиболее полные данные о которой получены в [1, 2]. На рис. 1 и 2 соответственно показаны теоретическая пространственная и соответствующая ей экспериментальная временная закономерности замирания амплитуды узкополосного сигнала в окрестности МПЧ, известные как функция Эйри. Эти замирания обусловлены разностью набега фаз верхнего и нижнего лучей X компоненты волны, сумма которых и формирует сигнал в окрестности МПЧ. Временная функция Эйри (рис. 2) измерялась во время быстрой перестройки ионосферы с дневной на ночную одновременно

в нескольких точках, разнесенных по дальности на несколько километров [2]. Установлено, что природа глубоких замираний сигнала в точке приема носит квазирегулярный характер – происходит горизонтальное перемещение по дальности «замороженной» (слабо флуктуирующей по амплитуде) функции Эйри, имеющей глубокие впадины. Это перемещение соответствует движениям достаточно крупномасштабных горизонтальных ионосферных неоднородностей и слоев в целом. Флуктуации амплитуды самой функции Эйри формируют движения мелкомасштабных неоднородностей. При спокойной ионосфере флуктуации амплитуды квазипериодической функции Эйри практически отсутствуют. Устойчивость формы функции Эйри объясняется близостью траекторий верхнего и нижнего лучей для частот в окрестности МПЧ.

Таким образом, экспериментально подтвержденная закономерность поведения сигнала, описываемая квазипериодической функцией Эйри, может быть использована для компенсации замираний в окрестности МПЧ путем суммирования сигналов разных частот, разнесенных на величину, соответствующую половине квазипериода огибающей функции Эйри. Квазипериод функции Эйри зависит от дальности трассы и может достаточно точно

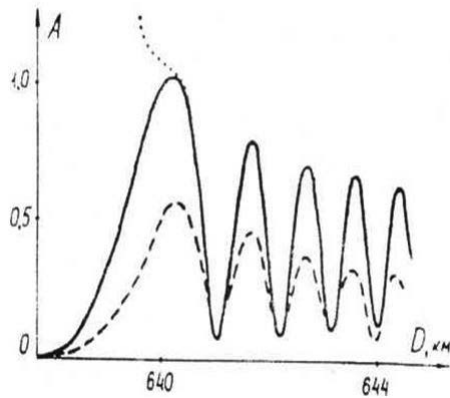


Рисунок 1. Теоретическая функция Эйри

вычисляться при использовании корректируемой модели ионосферы, поскольку реальная устойчивость формы функции Эйри в возмущенных условиях достаточно полно до сих пор не исследована.

Наиболее экономичным способом получения таких экспериментальных данных является измерение частотного эквивалента функции Эйри – измерение амплитуды узкополосного сигнала на серии частот в окрестности МПЧ при адаптивном поддержании излучения на множестве частот в этой окрестности.

Для исследования характеристик распространения радиосигналов на трассе с фиксированной протяженностью используется метод наклонного радиозондирования (НЗ) в частотном диапазоне примерно от 5 до 30 МГц. При этом измеряется ионограмма НЗ, в которой содержится достаточно полная информация о структуре многолучевости канала распространения радиосигнала, и на этой основе оцениваются энергетические и информационные параметры радиоканала. Обычно станции наклонного зондирования ионосферы проходят рабочий диапазон с достаточно малым шагом по частоте (причем в JT4M-зонде с непрерывной перестройкой по частоте), вследствие чего время измерения ионограммы занимает от десятков секунд до нескольких минут. Для получения быстрой оценки параметров радиоканала вблизи МПЧ технология такой оценки должна быть изменена.

Для получения быстрой (в пределах нескольких секунд) оценки параметров ионосферного радиоканала вблизи МПЧ предлагается использовать новый алгоритм (метод) многочастотной диагностики канала распространения радиоволн [3].

Выигрыш по времени для диагностики радиоканала может достигаться за счет уменьшения числа зондирующих частот, их оптимального распределения по спектру сигнала и повышения точности измерения групповой задержки сигналов, определяющей точность интерполяции и экстраполяции. Такая диагностика позволит наиболее точно оценить

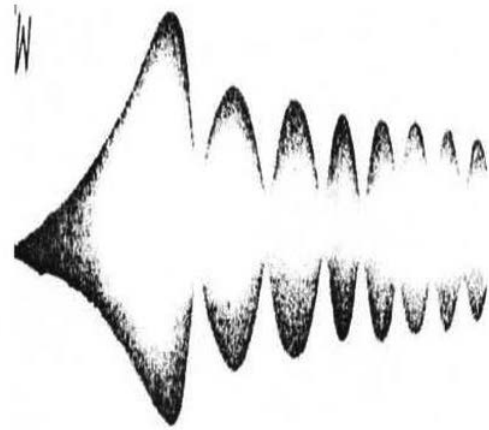


Рисунок 2. Экспериментальная функция Эйри

оптимальную рабочую частоту (ОРЧ) для обеспечения максимальной пропускной способности (МПС) радиоканала. Новый метод основан на использовании априорной информации о параметрах ионосферы вдоль радиотрассы в совокупности с данными текущего радиозондирования в радиоканале для наилучшей оценки ОРЧ-МПС.

На рис. 3 показана блок-схема алгоритма адаптивной диагностики ионосферного КВ-радиоканала.

Блок 4 предназначен для расчета спектра сигнала на основе МПЧ-Т, блок 1 описывает радиотрассу, оснащенную радиопередающей и радиоприемной аппаратурой, с помощью которой осуществляется наклонное зондирование ионосферы. В блоке 2 производится расчет параметров ионосферы по 4-мерной корректируемой региональной модели ионосферы (PMH-4D). Блок 3 предназначен для трассовых расчетов ионограмм на основе PMH-4D и априорной теоретической оценки МПЧ-Т. Блок 5 – для анализа данных радиозондирования и оценки экспериментального значения МПЧ-Э, блок 6 – для расчета ОРЧ-МПС на основе МПЧ-Т и МПЧ-Э. В соответствии с блок-схемой алгоритм оперативной оценки ОРЧ-МПС радиоканала состоит из следующих процедур:

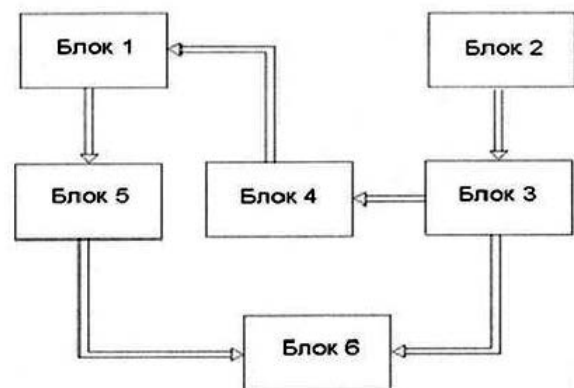


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма адаптивной диагностики ионосферного КВ-радиоканала

- в блоке 3 с использованием модели ионосферы из блока 2 производится расчет ионограммы НЗ данной трассы и вычисляется величина МПЧ-Т и другие основные параметры радиосигналов для текущего момента времени;
- в блоке 4 с учетом величины МПЧ-Т производится расчет спектра зондирующего радиосигнала, который должен в результате зондирования радиоканала обеспечить точное определение МПЧ-Э;
- в блоке 1 производится радиозондирование трассы многочастотным сигналом и регистрируется реальная ионограмма в окрестности МПЧ-Э, при этом измеряются амплитуда, групповая задержка и доплеровский спектр сигналов;
- в блоке 5 анализируется измеренная в блоке 1 ионограмма и производится оценка величины МПЧ-Э;
- в блоке 6 на основе данных об МПЧ-Т и МПЧ-Э производится расчет величины ОРЧ-МПС и других параметров, характеризующих стабильность радиоканала.

Величина МПЧ-Т может отличаться от реальной МПЧ-Э на величину до 10% в спокойных ионосферных условиях. Такая погрешность в определении ОРЧ-МПС может приводить к значительному снижению (в несколько раз) скорости передачи данных в канале за счет увеличения межмодовой задержки в окрестности МПЧ. Наряду с измерением амплитуды радиосигналов для оценки энергетических параметров радиоканала важным является измерение доплеровского смещения A_f и доплеровского уширения $8f$ несущей частоты радиосигналов. Величина доплеровского смещения частоты характеризует нестационарность ионосферного радиоканала и позволяет прогнозировать изменение параметров в пределах от единиц до десятков секунд. Величина доплеровского уширения спектра сигнала позволяет оценивать статистические параметры радиоканала, которые также влияют на качество передачи информации. Отработка алгоритма адаптивной многочастотной диагностики радиоканала проведена с использованием экспериментальных данных на радиотрассе для НЗ Москва – Калининград, протяженностью около 1100 км. Аппаратурный комплекс для исследования ионосферного распространения радиоволн включает ионосферные станции «Базис», многоканальную радиоприемную установку ФДК-8, многоканальный доплеровский комплекс РФИ-М8 и передатчик КВ-диапазона «Зонд». Здесь использовались следующие виды измерений:

- многочастотное радиозондирование с помощью передатчика «Зонд» и приемной установки ФДК-8;

- вертикальное и наклонное зондирование ионосферы с помощью ионосферных станций «Базис» и «Базис-2»;
- доплеровский мониторинг ионосферных возмущений с помощью РФИ-М8.

Для получения экспериментальных данных разработана методика многочастотного радиозондирования, а также использованы известные методики ВЗ, НЗ и доплеровского мониторинга. Методика многочастотных измерений предполагает получение следующих параметров радиосигналов: амплитуда, групповая задержка, доплеровское смещение частоты. Измерение этих параметров обеспечивается на частотах вблизи МПЧ, для чего производится предварительный выбор сетки зондирующих частот по данным вертикального зондирования с использованием стандартного метода оценки МПЧ. На практике для этого достаточно определить критическую частоту слоя F2-fo.

Модовая структура радиосигналов на частотах вблизи МПЧ имеет сравнительно простую структуру, поэтому основной задачей измерений является разделение модов, соответствующих верхнему и нижнему лучам распространения радиоволн на трассе. Для повышения точности определения МПЧ по измерениям групповой задержки сигналов на дискретной сетке частот эти измерения должны выполняться с высокой точностью. При этом для определения МПЧ не обязательно измерять абсолютные значения групповой задержки сигналов t , а достаточно измерять с высокой точностью относительную межмодовую задержку A_t .

Если относительные задержки измерять с некоторой конечной точностью $8t$, которая для обычных ионозондов может быть порядка A_t , то при восстановлении ионограммы НЗ вблизи МПЧ значение величины МПЧ будет оцениваться с ошибкой, превышающей шаг сетки зондирующих частот в несколько раз. Для высокоточных измерений групповой задержки радиосигналов использован спектрально-фазовый метод измерений с помощью когерентных радиоволн [4]. Важным преимуществом этого метода является сочетание высокой точности измерения задержки при импульсном зондировании с относительно большой длительностью зондирующих сигналов, что дает существенный выигрыш в энергетике принимаемого сигнала.

Многочастотный аппаратно-программный комплекс для высокоточных измерений параметров КВ-радиосигналов ФДК-8 позволяет измерять амплитудные, доплеровские и фазовые характеристики когерентных радиосигналов, причем групповая задержка может измеряться с точностью до единиц микросекунд при длительности зондирующего импульса в сотни микросекунд.

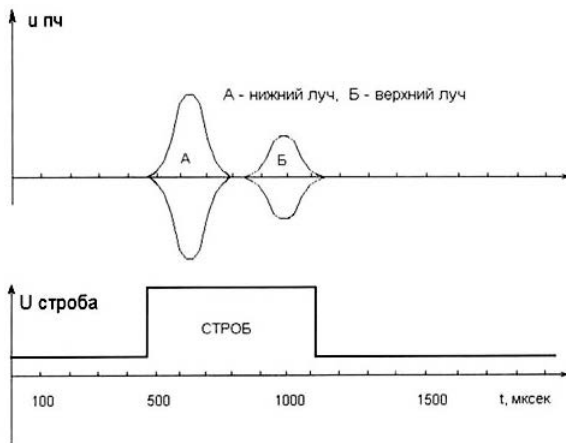


Рисунок 4. Осциллограмма принимаемых импульсов и положение строба (рабочая частота 14260 кГц)

Для оценки точностных характеристик измерения параметров радиоканала при многочастотном зондировании использованы экспериментальные исследования. Так, например, из пункта Калининград с помощью КВ-передатчика «Зонд» излучались когерентные радиоимпульсы длительностью 150 мкс и частотой повторения 100 Гц. Мощность излучения (импульсная) была около 5 кВт, передающая логопериодическая антенна была ориентирована на Москву. В эксперименте излучение производилось на фиксированной частоте, которая выбиралась с учетом МПЧ трассы и которая, в свою очередь, вычислялась по величине критической частоты f_0 ионосферы в период проведения измерений. Прием зондирующих сигналов проводился с помощью установки ФДК-8. Модовая структура принимаемых сигналов контролировалась с помощью осциллографа, на который выводился сигнал промежуточной частоты 128 кГц. Пример такой осциллограммы показан на рис. 4, который проводился на рабочей частоте 14260 кГц. Показано также положение стробирующего сигнала, в пределах которого принимаемые сигналы выделялись и затем проходили когерентное накопление и анализ.

Из рис. 4 видно, что относительная задержка между модами составляет примерно 400 мкс. На рис. 5 показана зависимость от времени относительной групповой задержки ΔT между модами «А» и «Б», где точность измерения ΔT с учетом всех

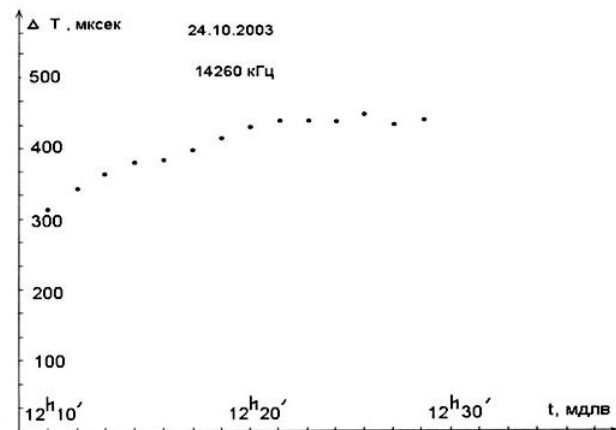


Рисунок 5. Зависимость относительного запаздывания от времени суток

факторов была не хуже 10 мкс. Из рис. 5 видно, что величина ΔT растет со временем от 300 мкс в 12 ч 10 мин до 430 мкс в 12 ч 30 мин. Это соответствует наблюдаемому обычно в утренние часы росту МПЧ трассы. Для этого случая простые оценки показывают, что в результате роста МПЧ и соответствующего роста межмодовой задержки пропускная способность радиоканала на данной рабочей частоте уменьшилась приблизительно на 30% в течение 20 мин. Полученные результаты показывают, что разработанная методика обеспечивает высокоточную диагностику КВ-радиоканала.

Выводы

1. Исследована возможность увеличения стабильности амплитуды сигнала, особенно необходимая при быстрой передаче коротких сообщений, на основе использования квазирегулярных (контролируемых и вычисляемых) частотных характеристик сигнала в окрестности МПЧ для формирования многочастотных радиосигналов.
2. Сформулирован экономичный метод получения экспериментальных данных в интересах оценки достижимой эффективности компенсации флуктуаций в различных геофизических условиях с помощью МЧР.
3. Исследованы экспериментальные данные прецизионного измерения параметров сигнала в окрестности МПЧ трассы Калининград – Москва [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о НИР: Теоретические и технические аспекты диагностики ионосферных возмущений методами радиозондирования декаметровыми волнами. М.: ИЗМИРАН, 1988.
2. Коротун В.М. Итоговый отчет о НИР: Трасса-2. Разработка моделей распространения сигналов на трассах типа «земля – земля», «земля – воздух» (в части разработки методики получения необходимой геогелиофизической информации в реальном масштабе времени с использованием глобальной информационной сети типа Интернет), 2001.

3. Коротун В. М. Алгоритм синтеза структуры пассивной помехи // Вестник ТАИИ. Тула. 2010. С. 28–30.
4. Ким В. Ю., Панченко В. А., Полиматиди В. П. Аналого-цифровая обработка когерентных импульсных сигналов при фазовом измерении групповой задержки // Цифровые ионозонды и их применение. М.: ИЗМИРАН, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, заслуженный конструктор РФ, ОАО «НПК «НИИДАР»», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5. тел.: 8 (499) 162-03-87, факс: 8 (499) 162-73-28.

Коротун Владимир Михайлович, к.т.н., ОАО «НПК «НИИДАР»», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5. тел.: 8 (499) 162-03-87, факс: 8 (499) 162-73-28, e-mail: vkorotun@niidar.ru.

*For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 3. – P. 35–39.
V. Kozlov, V. Korotun*

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF UTILIZATION OF REGULAR FREQUENCY REGULARITY OF IONOSPHERIC DISTRIBUTION OF MULTI-FREQUENCY SIGNALS OF SHORTWAVE RADIO RANGE

In order to receive rapid (within a few seconds) evaluation of parameters of ionospheric radio channel near the MUF it is proposed to use new algorithm (method) of multi-frequency diagnostics of radio waves distribution channel. Such diagnostics will allow to evaluate accurately the optimum working frequency (OWF) for ensuring maximum capacity (MC) of radio channel. The new method is based on utilization of priori information about the parameters of the ionosphere along the radio path together with the data of current radiosonde in the radio channel for optimum valuation of the OWF-MC.

Keywords: OS – oblique sounding, VS – vertical sounding, MC – maximum capacity, MUF – maximum usable frequency, OWF – optimum working frequency, IRI – international reference ionosphere, Mode – part of received signal, which has a significant difference from other parts of it subject to any parameter (distribution time, beam angle, polarization), SW – short wave, MF2M – maximum frequency of double-hop mode, J14M – linear frequency-modulated signal.

REFERENCES

1. Otchet o NIR: *Teoreticheskie i tekhnicheskie aspekty diagnostiki ionosfernykh vozmushcheniy metodami radiozondirovaniya dekametrovymi volnami* [Research report: The theoretical and technical aspects of the diagnostic methods of radio sounding of ionospheric disturbances decameter waves]. M.: IZMIRAN, 1988.
2. Korotun V. M. Itogovyy otchet o NIR: Trassa-2. Razrabotka modeley rasprostraneniya signalov na trassakh tipa «zemlya – zemlya», «zemlya – vozdukh» (v chasti razrabotki metodiki polucheniya neobkhodimoy geogelifizicheskoy informatsii v real'nom masshtabe vremeni s ispol'zovaniem global'noy informatsionnoy seti tipa Internet) [Final research report: Track 2. Development of signal propagation models for the tracks like «land – land», «land – air» (in terms of the development of methods of obtaining the necessary geo-helio physical information in real time using the global information network of the type like Internet)], 2001.
3. Korotun V. M. Algoritm sinteza struktury passivnoy pomekhi [Algorithm of synthesis for the structure of passive interference]. *Vestnik TAII*, Tula, 2010, pp. 28–30.
4. Kim V. Yu., Panchenko V. A., Polimatidi V. P. *Analogo-tsifrovaya obrabotka kogerentnykh impul'snykh signalov pri fazovom izmerenii gruppovoy zaderzhki* [Analog-to-digital processing of coherent pulse signals at the phase measurement of group delay] // *Tsifrovye ionozondy i ikh primeneniye* [Digital ionosondes and their application]. M.: IZMIRAN, 1986.

AUTHORS

Kozlov Victor, doctor of technical sciences, professor, Honored Designer of the Russian Federation, «NPK «NIIDAR»», p. 5, d. 10, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87, fax: +7 (499) 162-73-28.

Korotun Vladimir, PhD, Senior Researcher, «NPK «NIIDAR»», p. 5, d. 10, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87, fax: +7 (499) 162-73-28, e-mail: vkorotun@niidar.ru.