



Результаты экспериментов в средних широтах с использованием широкополосных коротковолновых сигналов для связи и диагностики структуры ионосферы

Л.Б. Волкомирская¹, О.А. Гулевич¹, И.В. Крашенинников¹, Н.В. Кривошеев²,
А.Е. Резников¹, В.И. Сахтеров¹

¹Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук им. Н.В. Пушкова.

²Донской государственный технический университет

Аннотация: Обсуждаются результаты экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург. Показана принципиальная возможность использования широкополосных (150-600 кГц) КВ сигналов для передачи информации и для исследования тонкой структуры ионосферы в различных гелиогеофизических условиях.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, ионосфера, тонкая структура, помехоустойчивость, оперативный прогноз, передача информации, многолучевая структура, разделение сигналов, базовые частоты, замирание сигналов, долгосрочное прогнозирование.

С внедрением широкополосных систем КВ связи и радиолокации стали актуальными исследования влияния ионосферы на параметры широкополосных сигналов. При использовании обычных узкополосных систем связи многолучевой характер распространения радиоволн, часто приводит к глубоким интерференционным замираниям сигнала [1, 2]. Использование широкополосных сигналов с применением квазиоптимальной схемы приемника позволяет осуществить прием с «разделением по лучам», и использовать энергию всех волн с целью повышения помехоустойчивости системы связи [3- 4].

В 1999-2004 гг. были проведены серии экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург протяженностью около 1500 км. Устройство и принцип работы приемной и передающей установок описано в [5].

Эксперименты проводились при различных выходных уровнях усилителя мощности (от 10 до 200 Вт), в диапазоне частот от 6 до 24 МГц и с разными антенными системами.

При интерпретации полученных экспериментальных результатов использовалась программа оперативного и долгосрочного прогноза HfPro, [6-12]. Пакет программ HfPro позволяет производить оперативное и долгосрочное прогнозирование радиосвязи в КВ диапазоне.

В программе HfPro используются справочные модели ионосферы СМИ-88 и IRI-2001, предназначенные для расчета электронной концентрации и частоты соударений электронов на высотах 60-1000 км на низких, средних и высоких широтах [12]. Входными параметрами ионосферных моделей являются индекс солнечной активности F10.7 и количество солнечных пятен R. Для оперативного прогнозирования используются также данные вертикального зондирования ионосферы, в частности, критическая частота слоя f_0F2 и его истинная высота h_mF2 . Использовались данные, полученные с помощью ионозонда «Парус» в ИЗМИРАН. Для заданной трассы, программа выдает прогнозируемые слои, количество модов, напряженность поля в точке приема, групповое запаздывание, наименьшую применимую частоту (НПЧ), максимальную применимую частоту (МПЧ), оптимальную рабочую частоту (ОРЧ) и углы прихода сигнала в вертикальной и азимутальной плоскостях. Для всех модов указываются минимальная и максимальная частоты для данной трассы и рассчитываются данные для 3 базовых частот. Для заданных частот расчет производится отдельно. Полученные результаты представляются в графическом и текстовом виде. Оперативный прогноз предполагает расчет параметров на 4 последующих часа.

Первые эксперименты в 1999-2000 гг. проводились на фиксированных частотах: 6,8 и 8,2 МГц. Излучение велось длительное время, прием осуществлялся приемником прямого преобразования на видеочастоту, и

после обработки аналогово-дискретным согласованным фильтром сигнал записывался в ПК платой АЦП. Для передачи использовался стандартный усилитель мощности от радиостанции «Ангара-РБ». Целью этих испытаний было экспериментальное определение максимальной ширины рабочей полосы и теоретическое и экспериментальное определение максимальной скорости передачи информации. Эксперименты проводились при ширине полосы от 20 до 600 кГц, использовались ПСП длиной от 32 до 256 элементов. В ходе экспериментов было выяснено, что оптимальная с точки зрения скорости передачи информации и надежности связи ширина рабочей полосы составляет 150 кГц. Сигнал наблюдался и при более широких полосах, но при этом происходило резкое уменьшение амплитуды принимаемого сигнала. При ширине полосы равной 300 кГц ослабление составляло -10...-15 дБ относительно уровня сигнала при полосе 20 кГц, а при полосе 600 кГц – ниже -20 дБ. Скорость передачи информации изменялась в пределах от 300 до 2400 бит/с в зависимости от длины ПСП при ширине рабочей полосы 150 кГц.

Эксперименты 2001 г. проводились в диапазоне частот от 9 до 16,5 МГц и в полосе шириной от 20 до 150 кГц. Длина ПСП, используемой для расширения спектра, была выбрана в 256 элементов. Изменение скорости передачи и, соответственно, ширины спектра передаваемого сигнала осуществлялись путем изменения длительности одного элемента ПСП [13, 14]. В экспериментах анализировался сигнал на выходе согласованного фильтра и включенного за ним накопителя с коэффициентом накопления 0,96 [13, 14].

В качестве иллюстрации на рис.1 приведены осциллограммы сигналов на выходе накопителя, полученные в сеансах связи в июне 2001 г. при скорости передачи 300 бит/с.

На рис.1а наблюдались условия однолучевого распространения (мод 1F2), которые можно считать практически идеальными для всех средств связи, в том числе и узкополосных [15, 16].

На следующей осциллограмме (рис. 1б) отчетливо проявляется многолучевость – главные максимумы корреляционной функции сигнала раздвоены. Сопоставление с результатами расчетов с помощью программы HfPro показывает, что наблюдаемые два пика, по всей вероятности, соответствуют обыкновенной и необыкновенной волнам, отраженным от слоя F2.

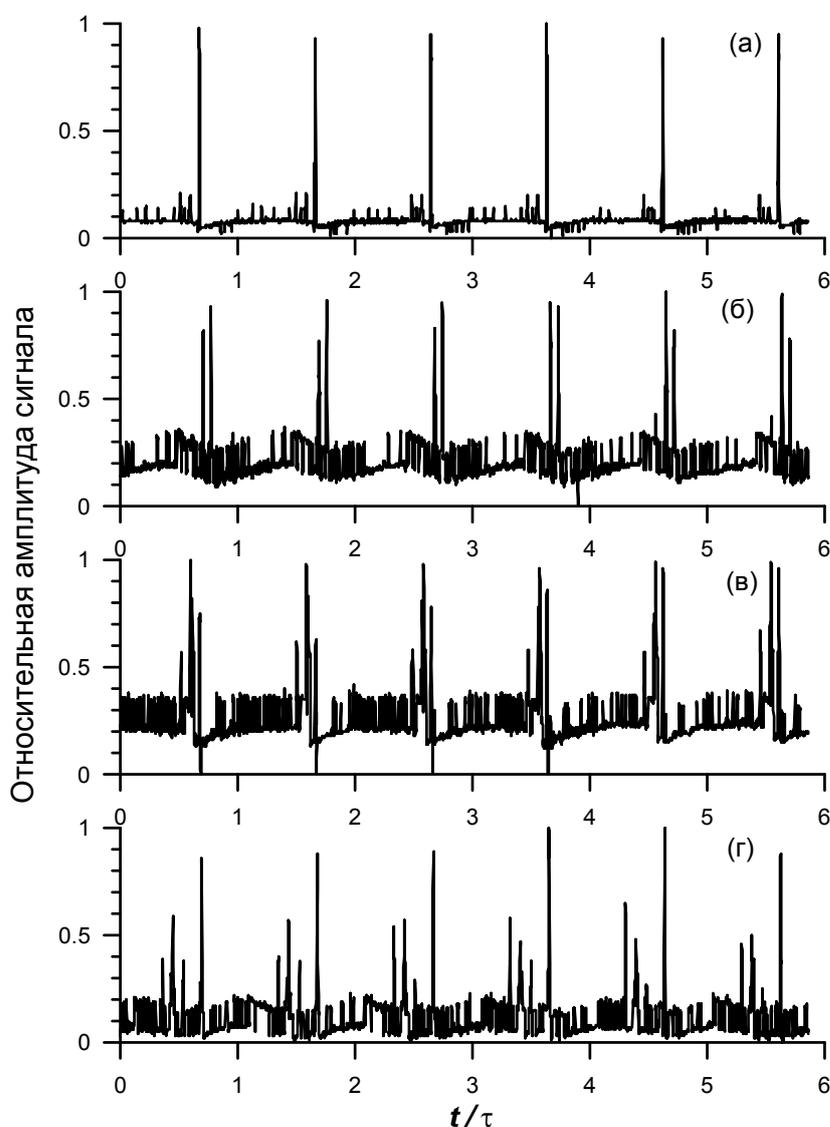


Рис. 1. Сигналы с выхода накопителя. Наблюдается (а) один мод, (б) два мода, (в) три мода и (г) четыре мода

На осциллограмме, показанной на рис. 1в, наблюдается еще более сложная многолучевая структура принимаемого сигнала. В течение каждого периода присутствуют три расположенных рядом корреляционных пика значительной амплитуды. Из результатов расчетов с помощью программы HfPro следует, что наблюдаемые пики можно сопоставить модам E_r , $1F2_o$ и $1F2_x$.

На следующей осциллограмме (рис. 1г) приводится случай четырехмодового сигнала: здесь наблюдаются моды E_r , $1F1$, $1F2$ и $2F2$.

Как известно, для трасс протяженностью 1000-2000 км многолучевость является типичным явлением. В годы средней солнечной активности в течение около 80% времени условия распространения коротких радиоволн соответствуют моделям IV и V по классификации Хмельницкого[14]. Для этих моделей характерным является то, что в точке приема наблюдается одновременно два-три сопоставимых по амплитуде сигнала, соответствующих модам $1F$, $2F$ и $1E$. Данные модели являются наиболее неблагоприятными для узкополосных систем связи вследствие глубоких интерференционных замираний. В широкополосных системах этих замираний можно избежать, осуществляя разделение сигналов, пришедших в точку приема по различным путям, с последующим суммированием их энергии.

Максимальное время запаздывания между лучами в 95% случаев составляло порядка 1 мс, что соответствует разности путей распространения в 300 км. В последующих экспериментах использовалась ПСП из 127 элементов и периодом следования 1,6 мс, что позволило гарантированно производить разделение лучей в большинстве случаев.

Эксперименты 2003-2004 гг. проводились на модернизированном аппаратном комплексе в автоматическом режиме с 15-минутными интервалами между измерениями и в непрерывном режиме на отдельных частотах. Типичный вид сигнала на выходе накопителя при однолучевом и двухлучевом распространении радиоволн приведен на рис. 2. Если характеристики радиоканала стабильны, данный подход с накоплением сигнала позволяет измерять разницу времен распространения различных модов с точностью порядка длительности одного элемента ПСП, составляющей 13 мкс и соответствующей разности хода около 4 км, что в 2.5-8 раз лучше, чем у известных импульсных и широкополосных ионозондов.

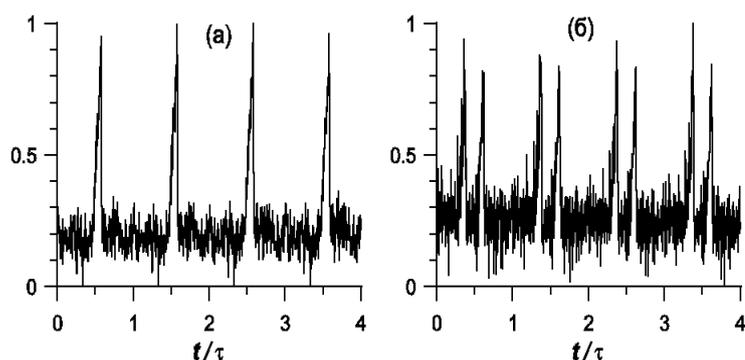


Рис. 2. Нормированная амплитуда сигнала на выходе накопителя при (а) однолучевом и (б) двухлучевом распространении радиоволн, измеренная в экспериментах 13-14 июля 2004 г. Время нормируется на длительность τ одной ПСП.

Таким образом, была достигнута цель испытаний - экспериментальное определение максимальной ширины рабочей полосы и теоретическое и экспериментальное определение максимальной скорости передачи информации.

Литература

1. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. 564 с.
 2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. 479 с.
 3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. 143 с.
 4. Окунев Ю.Б., Яковлев Л.А. Широкополосные системы связи с составными сигналами. – М.: Связь, 1968. 251с.
 5. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Крашенинников И.В., Кривошеев Н.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Устройство и принцип работы установки передачи и приема коротковолновых сигналов для связи и диагностики структуры ионосферы. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5280.
 6. Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М. Моделирование многочастотного распространения КВ-сигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. – 1993. – Т. 33. – № 1. – С. 158.
 7. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Коломийцев О.П., Черкашин Ю.Н. Погрешности прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн на основе глобальной ионосферной модели // Геомагнетизм и аэрномия. – 2004. – Т. 44. – № 2. – С. 221.
 8. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 1987. 240 p.
 9. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. v. 62. № 8. p. 685, 2000.
 10. Krasheninnikov I., Egorov I.B. IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting. Jour. Advances in Space Research. V.45. p.268, 2010.
-

11. Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15, p. 1661. 2001.
12. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере / Часовитин Ю.К., Широчков А.В. и др. // Ионосферные исследования. – М.: МГК, 1988. – № 44. – С. 6-13.
13. Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Швец Д.П. Коротковолновая широкополосная радиостанция «Ангара-5М» // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47. – № 9. – С. 1149-1152.
14. Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е., Железняков В.И., Швец Д.П. Цифровая коротковолновая широкополосная радиостанция "Ангара-5М" // Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003. – С. 451-454.
15. Хмельницкий Е.А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
16. Омелянчук Е.В., Тихомиров А.В., Кривошеев А.В. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн // Инженерный вестник Дона, 2013, №2.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.

References

1. Al'pert YA.L. Rasprostranenie radiovoln i ionosfera. [Radio wave propagation and ionosphere]. М.: Nauka, 1972. 564 p.
 2. Dehvis K. Radiovolny v ionosfere. [Radio waves in the ionosphere]. М.: Mir, 1973. 479 p.
-



3. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami. [Communication systems with noise-like signals]. M.: Radio i svyaz', 1985. 143 p.
 4. Okunev YU.B., YAKovlev L.A. Shirokopolosnye sistemy svyazi s sostavnymi signalami. [Broadband communication systems with composite signals]. M.: Svyaz', 1968. 251 p.
 5. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krasheninnikov I.V., Krivosheev N.V., Reznikov A.E., Sakhterov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5280.
 6. Kishcha P.V., Krasheninnikov I.V., Lukashkin V.M. Geomagnetizm i aehronomiya. 1993. V. 33. №1. 158 p.
 7. Krasheninnikov I.V., Egorov I.B., Kolomijcev O.P., CHerkashin YU.N. Geomagnetizm i aehronomiya. 2004g, v. 44, № 2, 221 p.
 8. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 1987. 240 p.
 9. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. v. 62. №8. p. 685, 2000.
 10. Krasheninnikov I., Egorov I.B. Jour. Advances in Space Research. V.45. p.268, 2010.
 11. Rishbeth H., Mendillo M. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15, p. 1661. 2001.
 12. Chasovitin Yu.K., Shirochkov A.V. and others. Ionospheric studies. M.: MGK, 1988. № 44. Pp. 6-13.
 13. Sakhterov V.I., Pisarev R.V., Lobzin V.V., Kopeikin V.V., Reznikov A.E., Zheleznyakov V.I., Shvets D.P. Radiotechnology and electronics. 2002. V.47, № 9. pp. 1149-1152.
 14. Sakhterov V.I., Pisarev R.V., Lobzin V.V., Kopeikin V.V., Volkomirskaya L.B., Reznikov A.E., Zheleznyakov V.I., Shvets D.P. Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchnoj konferencii "Ultrawideband signals in radar, communications and acoustics." Murom: Publishing and Printing Center MI VIGU, 2003. Pp . 451-454
-



15. Hmel'nickij E.A. Ocenka real'noj pomexhozashchishchennosti priema signalov v KB diapazone. [Evaluation of the actual noise immunity of receiving signals in the KB range]. M.: Svyaz', 1975. 232 p.
16. Omel'yanchuk E.V., Tihomirov A.V., Krivosheev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.