

В. Е. Захаров, Д. С. Котова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ЛЧМ-СИГНАЛОВ
В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ
ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**

34

Проведены численные эксперименты по исследованию дисперсионных искажений при распространении ЛЧМ-импульсов в ионосфере с учетом трехмерной неоднородности, анизотропии и дисперсии среды распространения, а также зависимости параметров ионосферы и нейтральной атмосферы от геофизических условий. Проанализированы распространение, поглощение и групповое запаздывание для обыкновенной и необыкновенной волновых мод.

Numerical experiments are performed to investigate the dispersion distortions of chirp pulses propagating in the ionosphere with taking the three-dimensional non-uniformity, anisotropy, and dispersion of ionosphere in dependence on geophysical conditions into account. Propagation, absorption, and the time delay of ordinary and nonordinary waves are analysed.

Ключевые слова: ЛЧМ-импульс, дисперсионные искажения, неоднородная анизотропная ионосфера, волновой пакет.

Key word: LFM pulse, dispersion distortion, inhomogeneous anisotropic ionosphere, the wave packet.

Экспериментальное и теоретическое исследование дисперсионных искажений широкополосных сигналов при распространении в ионосфере – актуальная задача [1]. Так, цифровые ЛЧМ-ионозонды широко применяются для радиофизической диагностики ионосферы и каналов КВ-связи [2]. Отмечено, что дисперсионное расплывание сигналов усиливается на частотах, близких к критической частоте плазмы. Развитие пространственно-временной геометрической оптики и теории дифракции позволило проанализировать особенности временных искажений широкополосных сигналов [3]. Моделирование распространения радиоимпульса с произвольной начальной огибающей в холодной плазме проведено в работе [4]. Современные подходы к исследованию и моделированию стохастических ионосферных ВЧ радиоканалов представлены в статье [5]. В частности, развита теория радиозондирования стохастических ВЧ-каналов сложными радиосигналами. Разработана численная модель распространения ЛЧМ-импульсов в ионосфере с учетом трехмерной неоднородности, анизотропии и диспер-



сии среды распространения, а также зависимости параметров ионосферы и нейтральной атмосферы от геофизических условий [6].

Целью данной работы является анализ дисперсионных искажений ЛЧМ-импульсов в трехмерно неоднородной анизотропной ионосфере посредством численных экспериментов на основе модели [6].

На рисунке 1–4 представлены некоторые результаты проведенных численных расчетов для условий летнего солнцестояния при высокой солнечной активности ($F_{10,7} = 150$). Выбрана гипотетическая среднеширотная передающая станция на поверхности Земли с географическими координатами (50 и 290°). Приняты обозначения: α и β – угол места и азимут излучения передающей антенны соответственно. На рисунках 1 и 2 $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$, а на рисунках 3 и 4 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 90^\circ$. Результаты расчетов на рисунках 1 и 2 получены для мирового времени UT = 16,65 ч, а на рисунках 3 и 4 – для UT = 4,65 ч, на рисунках 1 и 3 – для обыкновенной волновой моды, а рисунках 2 и 4 – для необыкновенной волновой моды. Для передающей антенны во всех случаях рассматривается излучение ЛЧМ-импульса

$$u(t) = 0, \quad t < 0, \quad t > \tau_u, \quad u(t) = A \exp\left(j \int_0^t (\omega_0 + \mu t) dt\right), \quad 0 < t < \tau_u, \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса; τ_u – длительность импульса с началом в момент $t = 0$; ω_0 и μ – параметры частотной модуляции.

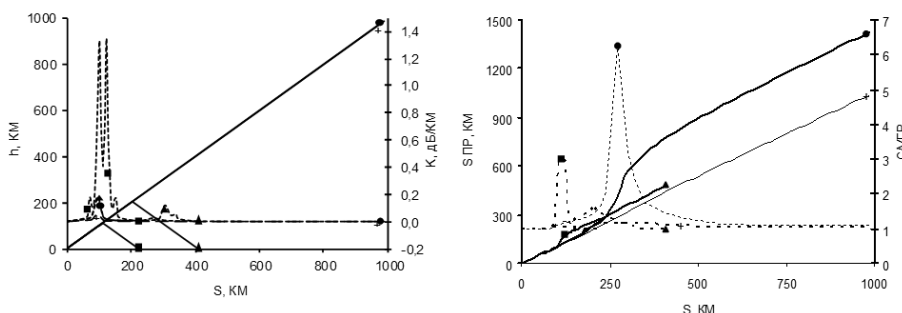


Рис. 1. Результаты численных расчетов зависимостей величин h , k , $s_{ГП}$ и $c/v_{ГП}$ от s для волновых пакетов обыкновенной волновой моды со средними частотами 3,18 (кривые с маркером ■), 6,06 (кривые с маркером ▲), 6,42 (кривые с маркером ●) и 11,82 МГц (кривые с маркером +) в составе ЛЧМ-импульса при вертикальном зондировании ионосферы в дневных условиях

Излучение ЛЧМ-импульса рассматривается как излучение непрерывной последовательности волновых пакетов с длительностью Δt у каждого из них. На длительности ЛЧМ-импульса содержится целое число $N = \tau_u / \Delta t$ интервалов дискретизации. Волновой пакет с номером ℓ , где $\ell = 0, 1, \dots, N - 1$, имеет центральную частоту $\omega_{\ell+1/2} = \omega_0 + \mu(t_\ell + t_{\ell+1})/2$, где $t_\ell = \ell \Delta t$. Пусть k – относительное изменение функции частотной модуляции на длительности ЛЧМ-импульса, $k = \mu \tau_u / \omega_0$. Если заданы $\omega_0 = 6\pi \cdot 10^6$ 1/с, $k = 3$, $\tau_u = 10^{-4}$ с и $\Delta t = 4 \cdot 10^{-6}$ с, то ЛЧМ-импульс порождает излучение $N = \tau_u / \Delta t = 25$ волновых пакетов.

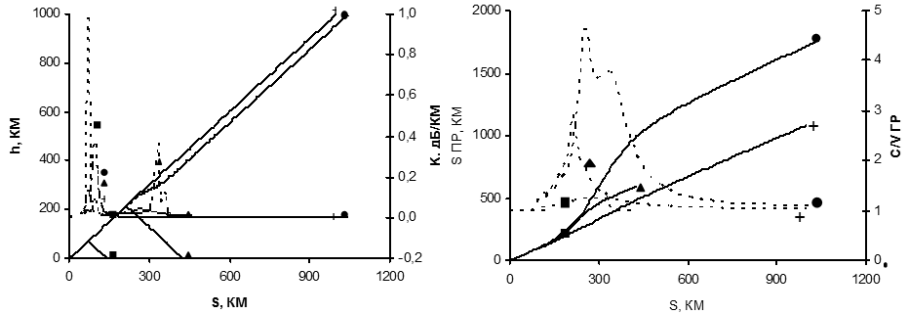


Рис. 2. То же, что и на рисунке 1, но для необыкновенной волновой моды и волновых пакетов со средними частотами 3,18 МГц (кривые с маркером ■), 6,78 МГц (кривые с маркером ▲), 7,14 МГц (кривые с маркером ●) и 11,82 МГц (кривые с маркером +)

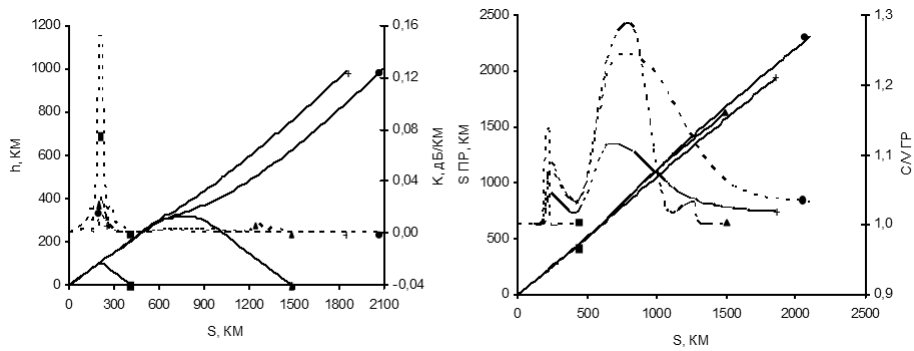


Рис. 3. То же, что и на рисунке 1, но для волновых пакетов со средними частотами 3,18 МГц (кривые с маркером ■), 8,58 МГц (кривые с маркером ▲), 8,94 МГц (кривые с маркером ●) и 11,82 МГц (кривые с маркером +) при наклонном зондировании ионосферы в ночных условиях

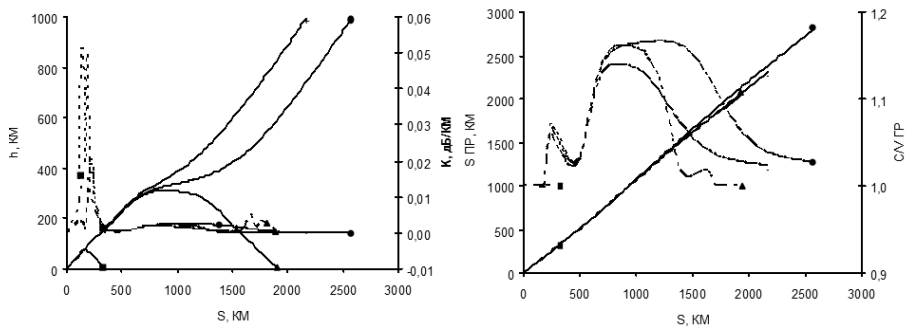


Рис. 4. То же, что и на рисунке 3, но для необыкновенной волновой моды и волновых пакетов со средними частотами 3,18 МГц (кривые с маркером ■), 10,74 МГц (кривые с маркером ▲), 11,10 МГц (кривые с маркером ●) и 11,82 МГц (кривые с маркером +)



На рисунках 1–4 слева представлены графики эффективных лучевых траекторий выделенных волновых пакетов, где в координатах — геометрическая длина s , км; вдоль лучевой траектории — высота h , км над поверхностью Земли (по основной оси ординат). Там же показаны графики дифференциального поглощения k , дБ/км, применительно к амплитудам прямоугольных огибающих тех же пакетов с использованием вспомогательной оси ординат. Искажением формы отдельных волновых пакетов и дисперсионным расщеплением лучевых траекторий их гармонических составляющих пренебрегается. На рисунках 1–4 справа по оси абсцисс отложена та же величина, что и слева. В каждом случае по основной оси ординат отложены значения приведенной длины s_{np} вдоль той же траектории, а по вспомогательной оси ординат — отношение c/v_{gp} скорости света к групповой скорости волнового пакета. Текущее значение приведенной длины $s_{np} = ct_{gp}$, где t_{gp} — время группового запаздывания каждого волнового пакета от точки излучения до текущей точки на лучевой траектории.

В выбранных условиях критическая частота слоя F2 ионосферы находится в полосе частот спектра заданного ЛЧМ-импульса.

В каждом случае графики представлены для четырех волновых пакетов из состава ЛЧМ-импульса — с граничными средними частотами из всего спектра, а также с наиболее низкой средней частотой волнового пакета, проходящего сквозь ионосферу, и с наиболее высокой средней частотой пакета, еще отражающегося от ионосферы. Из-за дисперсии плазмы ионосферы волновые пакеты с разными несущими частотами не только имеют различные групповые скорости, но и распространяются вдоль различных лучевых траекторий. При эффективной длительности Δt каждого волнового пакета его длина $\Delta\sigma$ изменяется при распространении в неоднородной ионосфере вдоль соответствующей лучевой траектории, причем для слабонеоднородной среды $\Delta\sigma \approx v_{gp}\Delta t$.

Отношение $c/v_{gp} \geq 1$ для выделенного волнового пакета возрастает при погружении в ионосферу вместе с уменьшением вещественной части показателя преломления ионосферной плазмы n_1 и ростом интенсивности поглощения пакета. Рост дисперсионных искажений пакета проявляется в его сильном расплывании. В конце концов понятие групповой скорости теряет смысл. Некорректные значения групповой скорости ($c/v_{gp} < 1$) в расчетах возможны в областях ионосферы, где $n_1 < 0,3$. Такой эффект характерен для обыкновенной волновой моды, особенно в условиях применимости приближения геометрической оптики. Возникает необходимость коррекции модельного описания распространения волновых пакетов по сравнению с использованным выше. Коррекцию можно провести, например, на основе спектрального подхода.



Модель [6] применима для исследования искажений ЛЧМ-импульсов, излучаемых передающей антенной в одном и том же направлении, как при распространении в ионосфере, так и при многолучевом приеме с учетом конечности ширины диаграмм направленности этих антенн. Подход к динамическому представлению сложного сигнала последовательностью цугов колебаний – узкополосных процессов для последующего исследования распространения волновых пакетов можно применить не только для ЛЧМ-сигналов, но и для других типов сложных сигналов, например фазоманипулированных.

Список литературы

1. Анютин А.П., Крюковский А.С., Лукин Д.С. и др. Дисперсионные искажения широкополосных сигналов при распространении в ионосфере. Теория и эксперимент // Сборник докладов XXIII Всерос. науч. конф. по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 1. С. 31–38.
2. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. Развитие радиофизических методов диагностики ионосферы и каналов КВ-связи с использованием цифрового ЛЧМ-ионозонда // Там же. С. 20–30.
3. Анютин А.П. Пространственно-временная геометрическая теория дифракции сигналов в диспергирующей среде и ее некоторые обобщения // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12. № 9. С. 26–38.
4. Стрелков Г.М. Сложный радиосигнал в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, вып. 9. С. 1094–1103.
5. Зернов Н.Н., Герм В.Э., Заалов Н.Ю. и др. Ионосферный стохастический ВЧ-радиоканал: теория, моделирование, эксперимент // Сборник докладов XXIII Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 1. С. 85–98.
6. Захаров В.Е., Котова Д.С. Модель распространения ЛЧМ-импульсов в ионосфере // Распространение радиоволн : сб. науч. тр. XVIII регион. конф. СПб., 2012. С. 57–60.

Об авторах

Вениамин Ефимович Захаров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: vezakharov@kantiana.ru

Дарья Сергеевна Котова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: Darshu@yandex.ru

About authors

Dr Veniamin Zakharov – prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: vezakharov@kantiana.ru

Darja Kotova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: Darshu@yandex.ru