

УДК 520.874.3+550.388.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ СРЕДНЕШИРОТНОГО КОГЕРЕНТНОГО ЭХА

К.В. Гркович, О.И. Бернгардт

DETERMINING CHARACTERISTICS OF FINE STRUCTURE OF MID-LATITUDE COHERENT ECHO SIGNAL SPECTRUM

K.V. Grkovich, O.I. Bergardt

В работе представлены результаты статистического анализа характеристик неусредненных спектров сигналов среднеширотного когерентного эха (КЭ). Обработка большого объема экспериментальных данных подтвердила наличие у отдельных реализаций сигналов КЭ тонкой структуры. Эта структура определяется небольшим числом (как правило, от 2 до 4) ярко выраженных гармоник, на которые приходится значительная часть энергии сигнала. Подобная структура может быть объяснена тем, что сигнал рассеивается небольшим числом мощных пространственных гармоник.

In this work, we present results of the statistic analysis of mid-latitude coherent echo (CE) unaveraged spectrum characteristics. Processing large body of experimental data confirmed the presence of CE signal fine structure in separate time series. This structure is defined by a small amount of frequencies (usually 2 or 4) which contain significant part of signal energy. The presence of this structure may be explained by the fact that a radio signal is scattered by a small amount of strong spatial inhomogeneities.

Введение

Одним из эффектов, определяющихся влиянием солнечной и геомагнитной активности на распространение радиоволн в ионосферной плазме, является развитие плазменных неустойчивостей. Эти неустойчивости формируют неоднородности, которые приводят к аномально мощному рассеянию радиосигналов в E-слое ионосферы, известному как когерентное эхо (КЭ) [1, 2], поэтому одним из широко используемых методов исследования подобных неустойчивостей является метод обратного рассеяния радиоволн. В 1998–2006 гг. на Иркутском радаре НР проводились целенаправленные исследования по изучению особенностей среднеширотного КЭ [3, 4]. Традиционно при исследовании ионосферной плазмы изучаются лишь среднеквадратичные характеристики рассеянного сигнала, полученные усреднением по достаточно большому количеству последовательных сеансов зондирования (реализациям) [5]. Данный доклад посвящен новому направлению в исследовании сигналов когерентного эха – исследованию тонкой структуры спектров сигналов когерентного эха до их статистического усреднения. Понятие тонкой структуры спектров сигналов когерентного эха было введено в 2006 г. [6]. На рис. 1

приведены 3 реализации спектров, из которых формировался средний спектр мощности. Как видно из графиков, спектр отдельной реализации обладает ярко выраженной «гребенчатой» структурой и может быть представлен как суперпозиция отдельных пикообразных функций. Целью данной работы была проверка предположения о существовании тонкой структуры сигналов КЭ на большом объеме экспериментальных данных.

Модель с ортогональными гармониками

Для проверки предположения о том, что структура ненакопленных спектров сигналов КЭ, в основном, определяется вкладом небольшого числа гармоник, сначала было выполнено фитирование спектров сигналов несколькими пиками, соответствующими спектру единичной гармоники. Центральные частоты пиков, которыми производилось фитирование спектров, выбирались таким образом, чтобы соответствующие гармоники были ортогональны в окне спектральной обработки. При этом для фитирования выбирались четыре гармоники, имеющие наибольший модуль.

На рис. 2 приведены распределения коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и

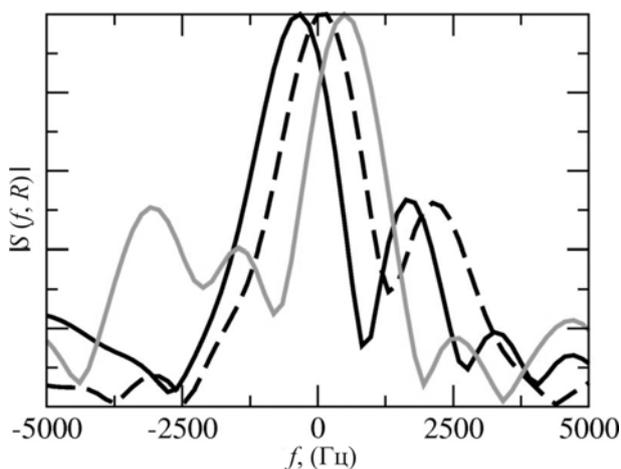


Рис. 1. Реализации спектров, из которых формируется средний спектр мощности.

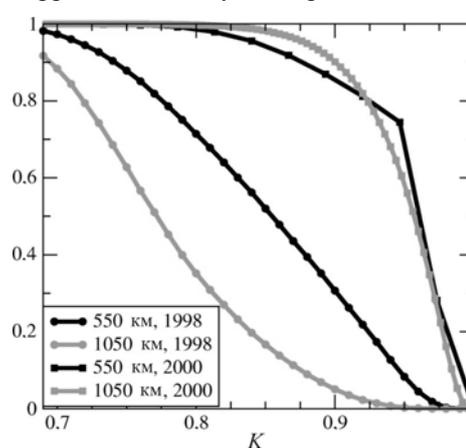


Рис. 2. Распределения коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и спектрами, полученными при помощи модели с ортогональными гармониками.

спектрами, полученными при помощи используемой модели. На графике приведены распределения для данных, полученных в ходе экспериментов 1998 и 2000 гг. Графики для дальностей 1050 км и 550 км изображены раздельно, серой и черной линией соответственно. Как видно из приведенных графиков, около половины спектров на дальностях 550 км в 1998 г. и подавляющее большинство спектров за 2000 г. хорошо аппроксимируются малым количеством гармоник. Кроме того, обработка данных показала, что существует ярко выраженная связь между коэффициентом корреляции и мощностью сигнала. На рис. 3 показана зависимость коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и спектрами, полученными при помощи описанной модели, от средней амплитуды спектра. Из рисунка видно, что модель тем лучше описывает сигнал, чем выше его мощность, что, в свою очередь, косвенно указывает на то, что модель пригодна для описания сигналов КЭ, так как именно повышенный уровень мощности является одним из критериев наличия таких сигналов.

Модель с произвольными гармониками

Теперь, когда установлено, что тонкая структура спектров сигналов КЭ определяется небольшим числом гармоник, можно попробовать перейти от фитирования ортогональными гармониками к фитированию пиками с произвольными центральными частотами. При проведении такого фитирования амплитуды гармоник находились методом поординатного спуска, при этом спектр фитировался набором из M частот, выбранных из N равноотстоящих гармоник, где M – количество отсчетов при оцифровке сигнала, а $N > M$. После этого из полученного набора гармоник для фитирования выбирались те, мощность которых превышает среднюю мощность в окне ± 6 кГц. Распределения коэффициентов корреляции между спектрами, полученными таким образом, и исходными спектрами сигналов приведены на рис. 4. Видно, что распределения слабо меняются и по-прежнему остается большое количество модельных спектров, хорошо описывающих сигнал.

Видимые изменения произошли в зависимости мощности от частоты (рис. 5). След, образованный этой зависимостью, становится более размазанным, однако увеличение коэффициентов корреляции при увеличении мощности легко просматривается и в этом случае.

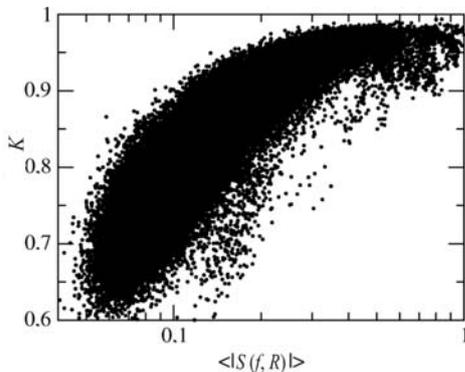


Рис. 3. Зависимость коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и спектрами, полученными при помощи модели с ортогональными гармониками, от средней амплитуды спектра.

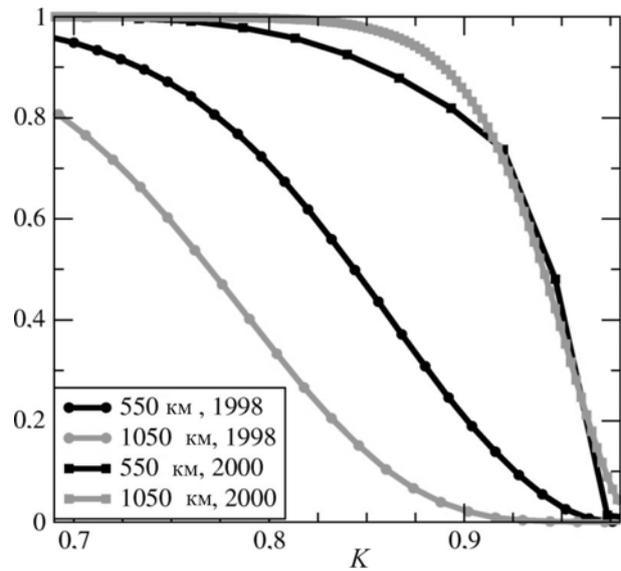


Рис. 4. Распределения коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и спектрами, полученными при помощи модели с произвольными гармониками.

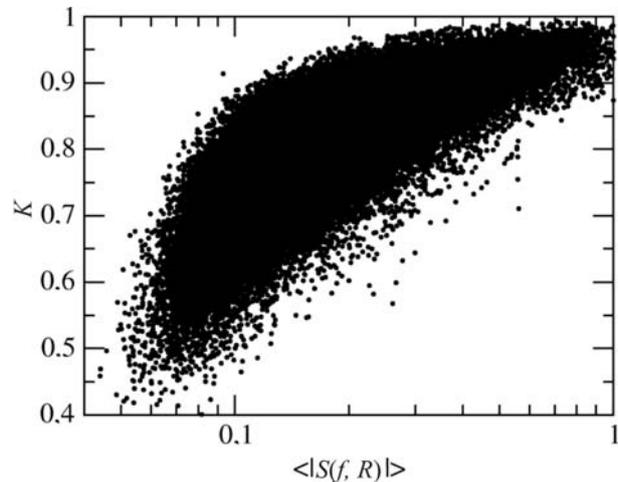


Рис. 5. Зависимость коэффициентов корреляции между спектрами сигналов КЭ и спектрами, полученными при помощи модели с произвольными гармониками от средней амплитуды спектра.

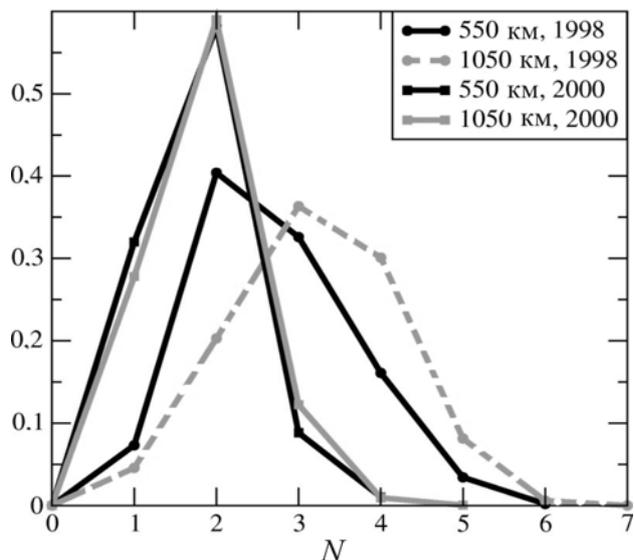


Рис. 6. Плотность распределения числа гармоник модельного спектра.

Наибольшие изменения при проведении такого фитирования коснулись количества гармоник, которыми аппроксимируется спектр. На рис. 6 приведена плотность распределения числа гармоник модельного спектра. Около половины модельных спектров для дальностей 550 км в данных эксперимента 1998 г. и около 90 % спектров из данных 2000 г. имеют в своем составе по одному–два пика. Таким образом, учитывая, что происходит значительное снижение числа гармоник, необходимых для аппроксимации сигнала, на фоне относительно слабого уменьшения качества аппроксимации, можно утверждать, что свойства фитирования улучшаются при применении метода покоординатного спуска.

Заключение

В работе проведена проверка предположения о существовании тонкой структуры отдельных реализаций спектров сигналов КЭ с привлечением большого количества экспериментальных данных. Аппроксимация спектров малым количеством ортогональных колебаний выявила хорошее совпадение предложенной модели с экспериментом. Кроме того, обработка данных показала, что тонкая структура сильнее выражена у более мощных сигналов. Фитирование спектра набором гармоник, на которые не наложено условие ортогональности, показало, что тонкая структура определяется небольшим числом (как правило, от 2 до 4) ярко выраженных пиков, на которые приходится значительная часть энергии сигнала. Подобная структура может быть объяснена тем, что сигнал рассеивается небольшим числом мощных пространственных гармоник.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №07-05-01084а, и частичной поддержке ИНТАС, грант №06-1000013-8823.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farley D.T. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere // JGR. 1963. N 68. P. 6083–6097.
2. Buneman O. Excitation of field-aligned sound waves by electron streams // Phys. Rev. Lett. 1963. N 10. P. 285–287.
3. Золотухина Н.А., Бернгардт О.И., Шпынев Б.Г. Исследование магнитосферных возмущений, сопровождающихся сигналами среднеширотного когерентного эха // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47, № 3. С. 364–372.
4. Жеребцов Г.А. Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 7. С. 1–7.
5. Суни А.Л., Терещенко В.Д., Терещенко Е.Д. и др. Некогерентное рассеяние радиоволн в высокоширотной ионосфере // АН СССР. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1989. 182 с.
6. Бернгардт О.И. Модель спектров реализаций сигналов когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 6. С. 459–477.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск