

УДК 520.874.3, 550.388.2

## УЧЕТ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СИГНАЛА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ КОГЕРЕНТНОГО ЭХА

К.В. Гркович, О.И. Бернгардт

### IMPROVEMENT OF COHERENT BACKSCATTER DATA PROCESSING TECHNIQUES BY TAKING ACCOUNT OF THE FINE STRUCTURE OF SIGNAL

K.V. Grkovich, O.I. Bergardt

Целью данной работы являлось исследование структуры отдельных реализаций сигналов когерентного эха и выявление особенностей сигнала, позволяющих определить наличие когерентных радиоотражений, а также улучшить методы обработки таких сигналов. В работе предложена модель принятого сигнала в виде прямоугольного импульса длительностью порядка длины импульса зондирования, заполненного единичной гармоникой с произвольной частотой. Показано, что в ряде случаев применение предложенной модели может быть достаточно эффективным для интерпретации сигналов когерентного эха. В работе предложено два варианта практического применения данной модели: методика, позволяющая выделять сеансы зондирования, в которых присутствуют достаточно мощные сигналы когерентного эха на фоне остальных сигналов, принимаемых Иркутским радаром некогерентного рассеяния (ИРНР), и методика повышения пространственного разрешения.

The aim of the present work was investigation of coherent echo signal separate sample structure and determination of signal features that allow us to detect coherent backscatter presence and also improve approaches of this signal processing. In the present work we offered a model of the received signal in the form of close-to-sounding-signal square pulse that modulates random frequency harmonic function. The model offered is shown to be quite effective to interpret coherent echo signals in some cases. In the present work there are two ways to apply offered model. One is a technique which allows to detach separate powerful-signal-containing samples from all signals which are received by Irkutsk incoherent scatter radar. The other is a technique of spatial resolution improvement.

#### 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) [Farley, 1963; Buneman, 1963], поэтому одним из широко используемых методов исследования подобных неустойчивостей является метод обратного рассеяния радиоволн. Наиболее интенсивно явление КЭ изучалось в высоких и экваториальных широтах [Haldoupis, 1989], однако в последнее десятилетие такие неоднородности активно исследуются в средних широтах, где условия их возникновения менее изучены [Potekhin et al., 1999; Золотухина и др., 2007].

Традиционно при исследованиях ионосферной плазмы изучаются лишь среднеквадратичные характеристики рассеянного сигнала, полученные усреднением по достаточно большому количеству реализаций. Работы, посвященные исследованию отдельных реализаций сигнала, появились только в последнее время [Бернгардт, 2006].

Целью данной работы являлось исследование структуры отдельных реализаций сигналов КЭ и выявление особенностей сигнала, позволяющих определить наличие когерентных радиоотражений, а также улучшить методы обработки таких сигналов.

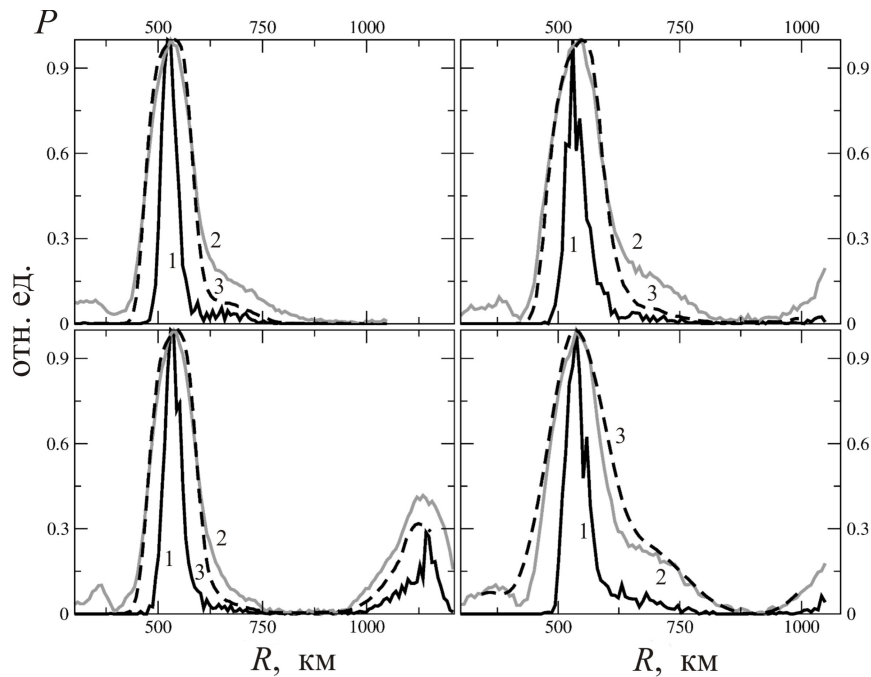
#### Методика обработки сигнала

Предварительный анализ позволил предположить, что сигнал когерентного рассеяния приближенно можно считать состоящим из малого набора отдельных импульсов, которые с точностью до доплеровского сдвига частоты повторяют излученный

сигнал, и аддитивных шумов, обусловленных различными шумами: аппаратными, квантования, ионосферными и т. д. Обработка данных показала, что количество реализаций сигнала, которые соответствуют нашему предположению о структуре сигнала КЭ, составляет от 30 до 70 % в зависимости от мощности сигнала в обрабатываемом отрезке данных.

Наличие в принятом сигнале копий излученного сигнала было использовано для построения методики получения усредненных профилей мощности с разрешением по дальности, значительно превышающим разрешение, определяемое длиной импульса зондирования. Поскольку мы имеем дело с нестационарной средой, имеет смысл предположить, что копии излученного сигнала в принятый сигнал входят со своими спектральными смещениями, распределение которых определяется характеристиками среды распространения. Задача одновременного нахождения положения и доплеровского смещения сигнала известной формы может быть решена с помощью нахождения коэффициента корреляции между принятым и излученным сигналом, где коэффициент зависит не только от дальности, но и от частоты. После нахождения такой функции корреляции для каждой реализации анализировались ее максимумы. Если функция в точке максимума превышала пороговое значение, принималось решение о наличии в этой точке копии излученного сигнала. Каждая детектированная копия излученного сигнала заменялась единичным отсчетом с амплитудой и дальностью, равными рассчитанным для данной копии значениями этих параметров. В остальных точках реализации принималась равной нулю. В таком виде реализации суммировались до получения итогового профиля мощности. Таким образом, пространственное разрешение приближается к частоте оцифровки сигнала.





В основе принятия решения о классификации сигналов лежит пороговая обработка. Для упрощения алгоритма была проведена эмпирическая калибровка минимального значения коэффициента корреляции. Поскольку методика использует в качестве модели сигнала дискретный набор откликов от сильно локализованных (точечных) рассеивателей, хорошим приближением сигнала является сигнал, рассеянный от различного рода искусственных объектов в околоземном космическом пространстве. Такие сигналы регистрируются на ИРНР, и число этих наблюдений достаточно для использования их в целях калибровки величины критерия при пороговой обработке.

Разработанная методика применялась для накопления профилей мощности сигналов КЭ с высоким разрешением по дальности с использованием данных зондирования длинным импульсом, полученных на ИРНР во время эксперимента 25 сентября 1998 г. (см. рисунок). На рисунке черной линией 1 приведены профили мощности, полученные при помощи описанной методики. Серой линией 2 показаны профили, накопленные традиционным способом. Черная штриховая линия 3 соответствует профилю мощности, полученному из профиля 1 путем сглаживания скользящим средним с окном равным длине импульса зондирования. При сравнении профилей 1 и 2 видно, что для профиля 1 области наиболее мощного рассеяния существенно сужаются. Проверка точности обращения свертки проводилась сверткой среднего профиля мощности сигнала, полученного с высоким пространственным разрешением (черная линия 1), с формой зондирующего сигнала. Проверка показала, что результат свертки (штриховая линия 3) и профиль мощности, полученный без улучшения пространственного разрешения (серая линия 2), практически совпадают. Эта проверка позволила установить, что данная методика повышения пространственного разрешения имеет удовлетворительную точность, а также что модель пригодна для описания данных ИРНР по наблюдению КЭ.

### Заключение

В работе показано, что применение в качестве модели сигнала прямоугольного импульса длительностью порядка длины импульса зондирования, заполненного единичной гармоникой с произвольной частотой, в ряде случаев может быть достаточно эффективным при интерпретации сигналов КЭ. Разработана также методика, позволяющая выделять достаточно мощные сигналы КЭ на фоне остальных сигналов, принимаемых радаром некогерентного рассеяния. Кроме того, разработана методика накопления профилей мощности сигналов КЭ с высоким разрешением по дальности из реализаций, полученных при зондировании длинным импульсом. Применение данной методики при обработке данных, полученных на ИРНР, показало хорошее соответствие модели экспериментальным данным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернгардт О.И. Модель спектров реализаций сигналов когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния // Изв. вуз. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 6. С. 459–477.
- Золотухина Н.А., Бернгардт О.И., Шпынев Б.Г. Исследование магнитосферных возмущений, сопровождающихся сигналами среднеширотного когерентного эха // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47, № 3. С. 364–372.
- Buneman O. Excitation of field-aligned sound waves by electron streams // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 10. P. 285–287.
- Farley D.T. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 6083–6097.
- Haldoupis C. A review of radio studies of auroral E-region ionospheric irregularities // Ann. Geophys. 1989. V. 7, N 3. P. 239–258.
- Potekhin A.P., Berngardt O.I., Kurkin V.I., et al. Observation of abnormally powerful scattering with ISTP IS radar // Sixth International Symposium on Atmosphere and Ocean Optics. 1999. P. 328–335. (Proc. SPIE. V. 3983.)

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск