

УДК 537.874.4

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ КОГЕРЕНТНОГО ЭХА В ПРИБЛИЖЕНИИ МАЛОГО ЧИСЛА ТОЧЕЧНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

К. В. Гркович, О. И. Бернгардт

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из механизмов влияния солнечной и геомагнитной активности на ионосферную плазму является развитие плазменных неустойчивостей. Эти неустойчивости, в свою очередь, ответственны за формирование неоднородностей ионосферной плазмы различных, в основном мелких, масштабов. Данные неоднородности способны оказывать влияние на распространение радиосигналов в различных диапазонах, в т. ч. и рассеивать электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн, соответствующем характерным пространственным масштабам этих неоднородностей.

Метод обратного рассеяния радиоволн, основанный на данном механизме, широко используется для исследования состояния ионосферной плазмы. Одним из известных проявлений этого эффекта является часто наблюдаемое аномально мощное рассеяние радиосигналов метрового и декаметрового диапазонов в ионосфере, известное как когерентное эхо или радиоаврора [1]. Это явление также широко используется, например, в исследовании высокоширотной ионосферы сетью радаров SuperDARN [2].

Сигналы когерентного эха образуются в результате рассеяния на неоднородностях, вытянутых вдоль магнитного поля Земли, которые генерируются неустойчивостями двухпоточкового и градиентно-дрейфового типов в E -слое ионосферы [3, 4]. Рассеяние на подобных неоднородностях обладает ярко выраженной чувствительностью к направлению рассеяния относительно магнитного поля Земли (мощность рассеянного сигнала резко убывает при отклонении луча зондирования радара от перпендикуляра к направлению геомагнитного поля в зондируемой области). Поскольку существование таких неоднородностей требует наличия сильных электрических полей в области генерации неоднородностей, явление когерентного эха наиболее интенсивно изучалось в верхних и экваториальных широтах [1]. В последнее десятилетие такие неоднородности активно исследуются и в средних широтах, где условия их возникновения менее изучены [5–9].

Традиционно, при исследованиях ионосферной плазмы изучаются лишь среднеквадратичные характеристики рассеянного сигнала, такие, как спектральная мощность и высотный профиль мощности, полученные усреднением по достаточно большому числу реализаций (сеансов зондирования). Работы, посвященные исследованию отдельных реализаций сигнала, появились

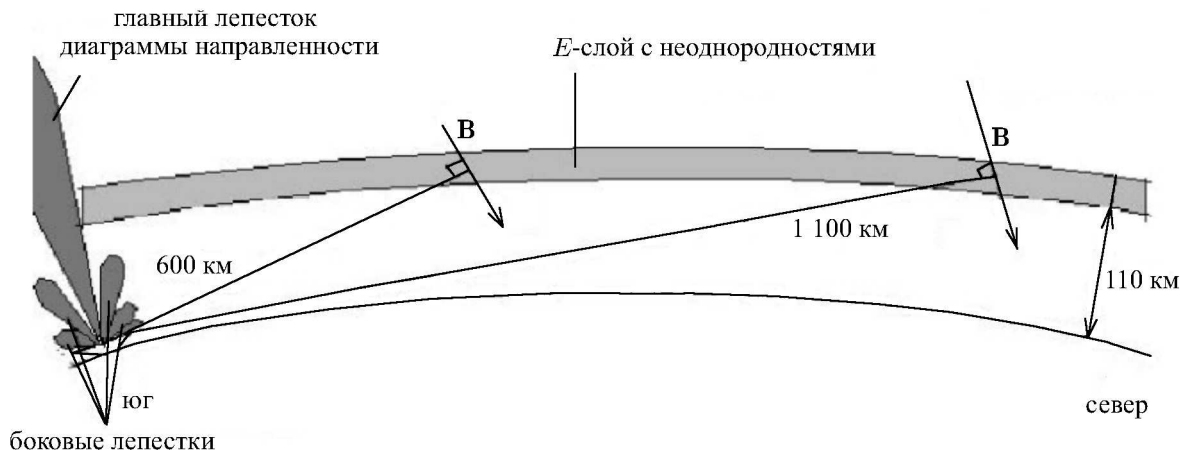


Рис. 1. Геометрия эксперимента по наблюдению когерентного эха на Иркутском радаре некогерентного рассеяния

только в последнее время [10], и общепринятой модели таких сигналов, пригодной для практического использования в задачах интерпретации сигналов когерентного эха, пока не развито.

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.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Иркутский радар некогерентного рассеяния [11] — это среднеширотный радар (54° с. ш., 102° в. д.), работающий в метровом диапазоне радиоволн $150 \div 160$ МГц. Радар в основном используется для исследования слабого рассеяния радиоволн на тепловых флуктуациях электронной концентрации. Во время сильных геомагнитных возмущений радар позволяет принимать нижними боковыми лепестками диаграммы направленности (с ослаблением порядка 100 дБ) сигнал когерентного эха, рассеянный на неоднородностях E -слоя ионосферы с дальностей $500 \div 1000$ км к северу от радара (см. рис. 1). Наиболее мощный сигнал принимается с дальностей 550 и 1100 км, которые соответствуют выполнению условия ортогональности луча зрения и магнитного поля Земли на высоте E -слоя ($90 \div 110$ км) в секторе диаграммы направленности антенны. Более детально геометрия эксперимента и механизм формирования максимумов в пространственном профиле мощности рассматривался в [6, 12].

В настоящее время основным режимом работы радара является излучение длинного (порядка 750 мкс) и короткого (порядка 150 мкс) прямоугольных импульсов на различных частотах и регистрация квадратурных компонент сигнала для последующей вторичной обработки. Перерыв между сеансами зондирования составляет порядка 40 мс.

Изложенный в работе анализ основан на исследовании данных по наблюдению когерентного эха, полученных на Иркутском радаре некогерентного рассеяния во время сильной геомагнитной бури 25–26 сентября 1998 года. Объем выборки с данными составлял около 35 000 реализаций.

2. МОДЕЛЬ ПРИНЯТОГО СИГНАЛА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В результате анализа неусреднённых реализаций сигналов когерентного эха (рис. 2) было установлено, что в реализациях пространственного профиля мощности рассеянного сигнала часто

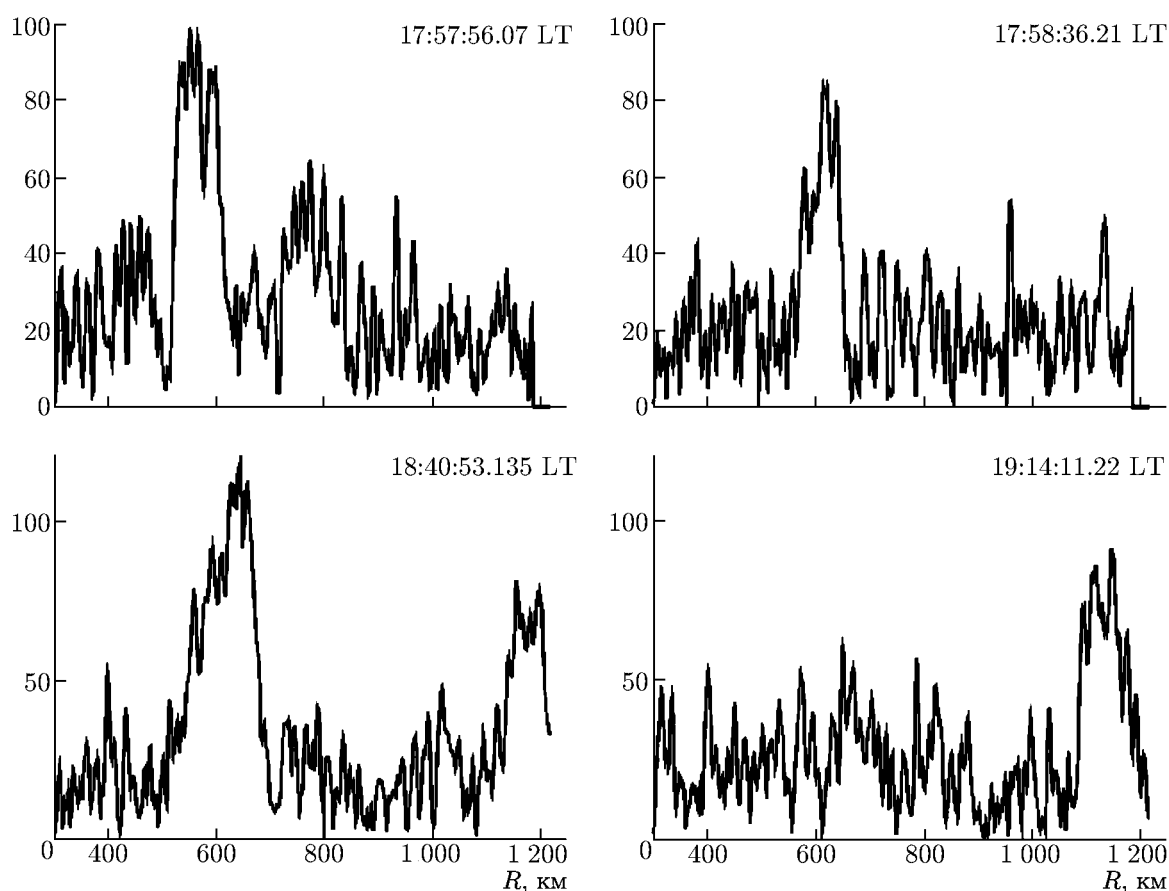


Рис. 2. Появление отдельных ярко выраженных импульсов с длительностью порядка длительности импульса зондирования в модуле реализаций сигналов когерентного эха. Представленные реализации сигнала получены во время эксперимента по наблюдению когерентного эха 25 сентября 1998 года (на рисунке приведено местное время; по оси ординат отложены отсчёты амплитуды сигнала, определяемые при помощи аналого-цифрового преобразователя)

наблюдаются ярко выраженные импульсные сигналы с формой, близкой к прямоугольной: с относительно резкими фронтами, модуляцией амплитуды плато, не превышающей уровня шума, и с длительностью, сопоставимой с длиной импульса зондирования. Предварительный анализ принятых сигналов также показал, что эти импульсы в основном локализованы в областях, где когерентное рассеяние происходит наиболее интенсивно. Высокая интенсивность рассеяния в этих областях, согласно модели среднего профиля мощности сигналов когерентного эха для используемого радара [12], вызвана в основном наилучшими условиями рассеяния (направление геомагнитного поля в этих областях близко к перпендикуляру с направлением луча зондирования) и диаграммой направленности антенны (рис. 1).

Всё вышеизложенное позволяет предположить, что сигнал когерентного рассеяния часто можно приближённо считать состоящим из аддитивных помех, обусловленных различными шумами (аппаратурными, квантования, ионосферными и т. д.), а также малого набора отдельных импульсов, которые с точностью до доплеровского сдвига частоты повторяют излучённый сигнал.

Проверка предложенной эмпирической модели реализаций сигналов когерентного эха проводилась следующим образом.

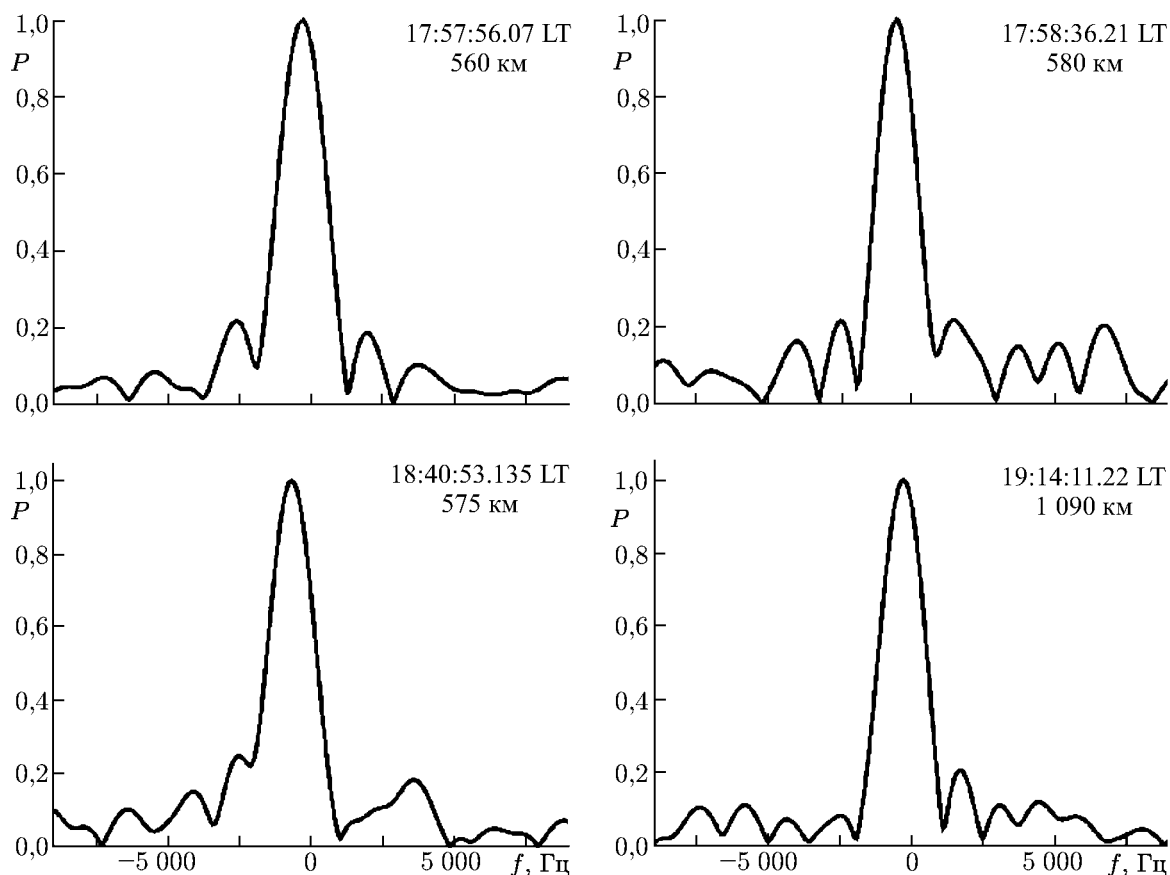


Рис. 3. Спектры мощности реализаций сигналов когерентного эха. Спектры соответствуют реализациям, приведённым на рис. 2. Для каждого спектра указана дальность и время, которым он соответствует (на рисунке приведено местное время; по оси ординат отложена нормированная на единицу мощность P)

Сначала в данных выделялись отрезки (порядка 550 ± 100 км и 1050 ± 100 км), по которым проводилась проверка модели. Выбор этих отрезков обусловлен тем, что в условиях, при которых проводился наш эксперимент, существуют две области когерентного рассеяния, где направление геомагнитного поля очень близко к перпендикуляру с направлением луча зондирования (рис. 1). Это приводит к образованию двух максимумов в накопленном профиле мощности рассеянного сигнала на указанных дальностях. Для каждого интервала дальностей строилась последовательность преобразований Фурье φ с шагом по дальности порядка 7 км, длиной окна $o(r)$, примерно равной длине импульса зондирования R_0 , и спектральным разрешением порядка 1,3 кГц:

$$\varphi(R, \omega) = \int_{r_1}^{r_2} U(r) \exp[i\omega (R - r)] o(R - r) dr; \tag{1}$$

$$o(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq R_0; \\ 0, & x \leq 0; x \geq R_0. \end{cases} \tag{2}$$

Здесь R и r — радиолокационная дальность, ω — пространственная частота, $U(r)$ — принятый сигнал, нижний предел интегрирования r_1 ограничен моментом начала регистрации реализации

сигнала после излучения импульса, верхний предел r_2 ограничен моментом окончания регистрации реализации сигнала.

После этого для каждого спектра находилась максимальная амплитуда и нормировалась на корень из полной энергии спектра:

$$\overline{|\varphi(R)|^2} = \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} |\varphi(R, \omega)|^2 d\omega; \quad (3)$$

$$K(R) = \alpha |\varphi(R, \omega_{\max})| / \sqrt{\overline{|\varphi(R)|^2}}. \quad (4)$$

здесь $\Delta\omega$ — это полуширина спектра, а ω_{\max} — частота, которой соответствует его максимальная амплитуда.

Если учесть, что полная энергия спектра пропорциональна полной энергии исходной функции, то полученная в уравнении (4) величина с точностью до нормировочного множителя α , который определяется нормой базисной функции $\exp(-i\omega r)$, равна коэффициенту корреляции исходной функции с единичной гармоникой, т. е. определяет вклад гармоники в энергию функции. Фактически вся процедура соответствует нахождению корреляционной функции принятого сигнала с модельным сигналом и последующему анализу максимумов полученной функции двух переменных, где корреляция зависит не только от дальности, но и от частоты. Модельный сигнал представлял собой прямоугольный импульс, равный по длине импульсу зондирования и заполненный гармонической функцией с произвольной частотой.

Далее из условия максимума функции $K(R)$ определялись дальность R_{\max} и частота ω_{\max} модельного рассеянного сигнала. Частота гармоники, заполняющей модельный импульс, интерпретировалась как доплеровский сдвиг частоты. В завершение на основе значения функции $K(R)$ в максимуме принималось решение о соответствии принятого сигнала модельному. Было принято, что модельный сигнал удовлетворительно описывает экспериментальные данные, если $K_{\max}(R)$ превышает заданное пороговое значение, о котором будет сказано ниже. Пределы интегрирования r_1 и r_2 в выражении (1) определяли границы наиболее интенсивного когерентного рассеяния (максимумы в районе 550 и 1050 км, см. выше). Данные обрабатывались отрезками по 1,5 мин, что примерно соответствует 2000 реализаций. Примеры спектров приведены на рис. 3.

Обработка данных показала, что количество реализаций сигнала, в которых при помощи описанной методики были обнаружены когерентные отражения, представимые единственной гармоникой, составляет от 30 до 70 % в зависимости от мощности сигнала в обрабатываемом отрезке данных.

На рис. 4 показана зависимость коэффициентов корреляции между спектрами сигналов когерентного эха и единичной гармоникой от средней мощности спектра. Из приведённого рисунка видно, что с увеличением мощности сигнала коэффициент корреляции между сигналом и моделью возрастает. Это обстоятельство, в свою очередь, косвенно указывает на то, что модель

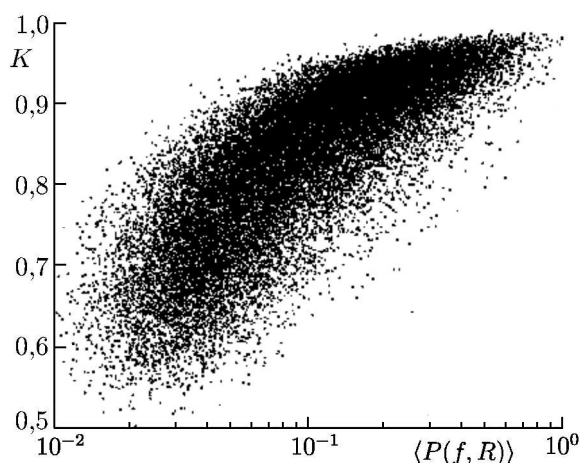


Рис. 4. Зависимость коэффициентов корреляции между спектрами и окном, заполненным единичной гармоникой, от мощности сигнала

Таблица 1

время (LT), ч:мин:с	μ_f , Гц	σ_f , Гц	$N_{\text{coh}530}$	Z_{all}	Z_{coh}	Z_{incoh}	N_{coh}	$N_{\text{coh}1}$	$N_{\text{coh}2}$
18:41:38	-342,6	267,4	663	4,74	7,02	3,38	786	742	44
18:43:44	-362,4	275,2	767	5,25	7,76	3,58	847	796	51
18:45:54	-355,7	280,6	895	6,24	8,50	3,99	1 023	908	115
19:02:53	-358,9	280,7	884	5,50	7,03	3,60	1 222	933	289
19:14:24	-304,7	316,9	1 037	6,96	8,02	4,20	1 460	962	498
19:28:44	-377,4	282,2	475	3,46	4,62	2,78	696	633	63
19:44:24	-387,2	336,6	853	11,91	17,64	8,67	830	827	3
20:01:12	-381,5	314,7	628	7,74	13,16	5,74	617	616	1

пригодна для описания сигналов когерентного эха, т. к. именно повышенный уровень мощности является одним из критериев наличия таких сигналов.

В пользу предложенной модели говорит и тот факт, что доплеровский сдвиг частоты, получаемый при обработке данных в рамках модели одиночной гармонике, является случайной величиной с математическим ожиданием, близким к ионно-звуковой скорости, и достаточно низкой дисперсией. Соответствующие данные приведены в табл. 1.

В первом столбце табл. 1 приведено среднее местное время набора реализаций, по которому находилась статистика; μ_f — средняя частота, рассчитанная по когерентным радиоотражениям, найденным в интервале 530 ± 100 км; σ_f — среднеквадратичное отклонение, рассчитанное по когерентным радиоотражениям, найденным в интервале 530 ± 100 км; $N_{\text{coh}530}$ — число реализаций, в которых на интервале 530 ± 100 км были найдены импульсы, обладающие высокой корреляцией с предложенной моделью (когерентные радиоотражения); Z_{all} — эффективность детектирования сигналов когерентного эха, оценённая по профилям, накопленным по всем реализациям из набора; Z_{coh} — эффективность детектирования сигналов когерентного эха, оценённая по профилям, в которых были детектированы когерентные радиоотражения (без ограничения по дальности); Z_{incoh} — эффективность детектирования сигналов когерентного эха, оценённое по профилям, в которых не было детектировано когерентных радиоотражений; N_{coh} — число реализаций, в которых были найдены когерентные отражения (без ограничения по дальности); $N_{\text{coh}1}$ — число реализаций, в которых было найдено по одному когерентному отражению (без ограничения по дальности); $N_{\text{coh}2}$ — число реализаций, в которых было найдено более одного когерентного отражения (без ограничения по дальности). Расчёты проведены на основе данных, полученных во время эксперимента по наблюдению когерентного эха 25 сентября 1998 года.

3. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКИ

Как было показано ранее, в основе принятия решения о классификации сигналов лежит пороговая обработка. Существуют относительно точные методы, учитывающие статистику появления ошибок различного рода, подробно исследуемые при анализе сигнала байесовскими методами [13]. 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 околосреднем космическом пространстве. Такие сигналы регистрируются на Иркутском радаре некогерентного рассеяния и

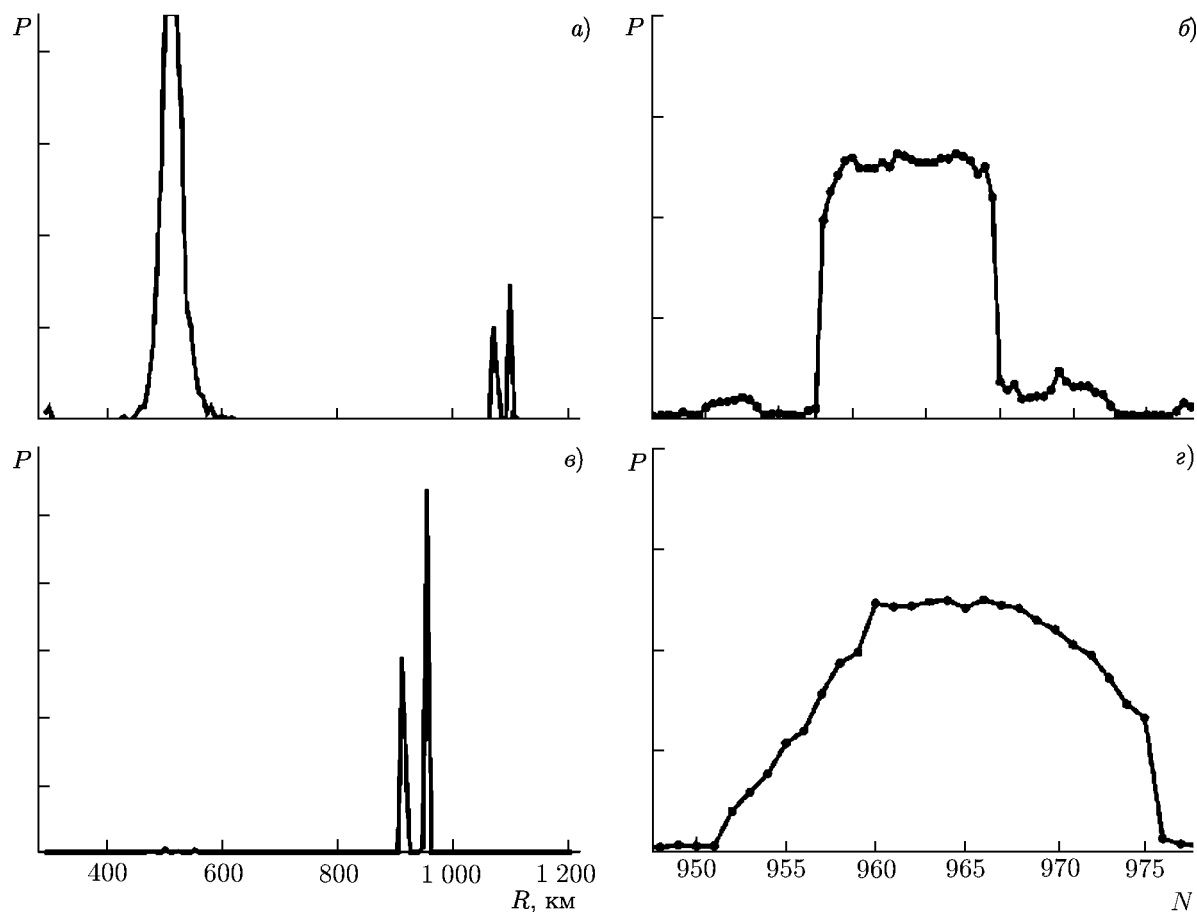


Рис. 5. Локализованные выбросы на профиле мощности, полученном при помощи описанной методики, характеризующие наличие сигналов, рассеянных от спутников, (а, в), и временной ход мощности, соответствующий данным пролётам спутников (б, г). На панелях б и г по оси абсцисс отложен номер реализации N . По оси ординат отложена нормированная мощность

число этих наблюдений достаточно для использования их в целях калибровки пороговой обработки.

Задача выделения сигналов, рассеянных от спутников, не несёт в себе существенных трудностей, т. к. эти сигналы обладают ярко выраженными особенностями, среди которых можно выделить повышенный уровень мощности, на один-два порядка превышающий уровень остального сигнала (рис. 5б, г), а также высокую стабильность доплеровского сдвига частоты и дальности рассеянного сигнала от реализации к реализации.

Для решения этой задачи среди всех полученных при помощи описанной методики накопления профилей сначала выбирались те, в которых существовали отклики от спутников, и определялись соответствующие дальности r_0 (рис. 5а, в). Далее в этих реализациях скользящим окном на интервале $[r_0 - 100 \text{ км}; r_0 + 100 \text{ км}]$ искался максимум коэффициента корреляции с используемой моделью сигнала, после чего выделялись реализации, в которых присутствовал необходимый сигнал. Критерием при отборе реализации служила повышенная мощность сигнала.

Таким образом, из всего имеющегося объёма экспериментальных данных удалось выделить 8 пролётов спутников, каждый из которых предоставлял от 15 до 40 последовательных реализаций отражённого сигнала, общим числом 230 откликов. Полученная выборка коэффициентов корреляции между сигналами, рассеянными на спутниках, и модельным сигналом использова-

лась для нахождения минимального значения при пороговой обработке. Было принято, что для эффективной работы пороговое значение должно отсекалть не более 5 % полезных импульсов. Для оценки этого значения выборка упорядочивалась по возрастанию, затем выделялись первые 10 % выборки (наименьшие значения), для которых считалось среднее. Полученное среднее значение, которое составило порядка $K_{\min} = 0,9$, использовалось в качестве порогового при обработке данных.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЛИЧИЯ КОГЕРЕНТНОГО ЭХА

Высокая частота появления в сигналах когерентного эха копий излучённого сигнала была показана ранее. Поэтому наличие в принятом сигнале копий излучённого сигнала может быть использовано как критерий наличия в выбранной реализации когерентных радиотражений.

На рис. 6 проиллюстрирован процесс накопления усреднённых пространственных профилей мощности сигналов когерентного эха с применением такого критерия. Здесь сплошной линией изображены профили, накопленные по 2 000 последовательных реализаций. При накоплении профилей, изображённых светлой линией, из набора последовательных реализаций выбирались только те, которые соответствуют критерию наличия когерентного эха. Профили, изображённые

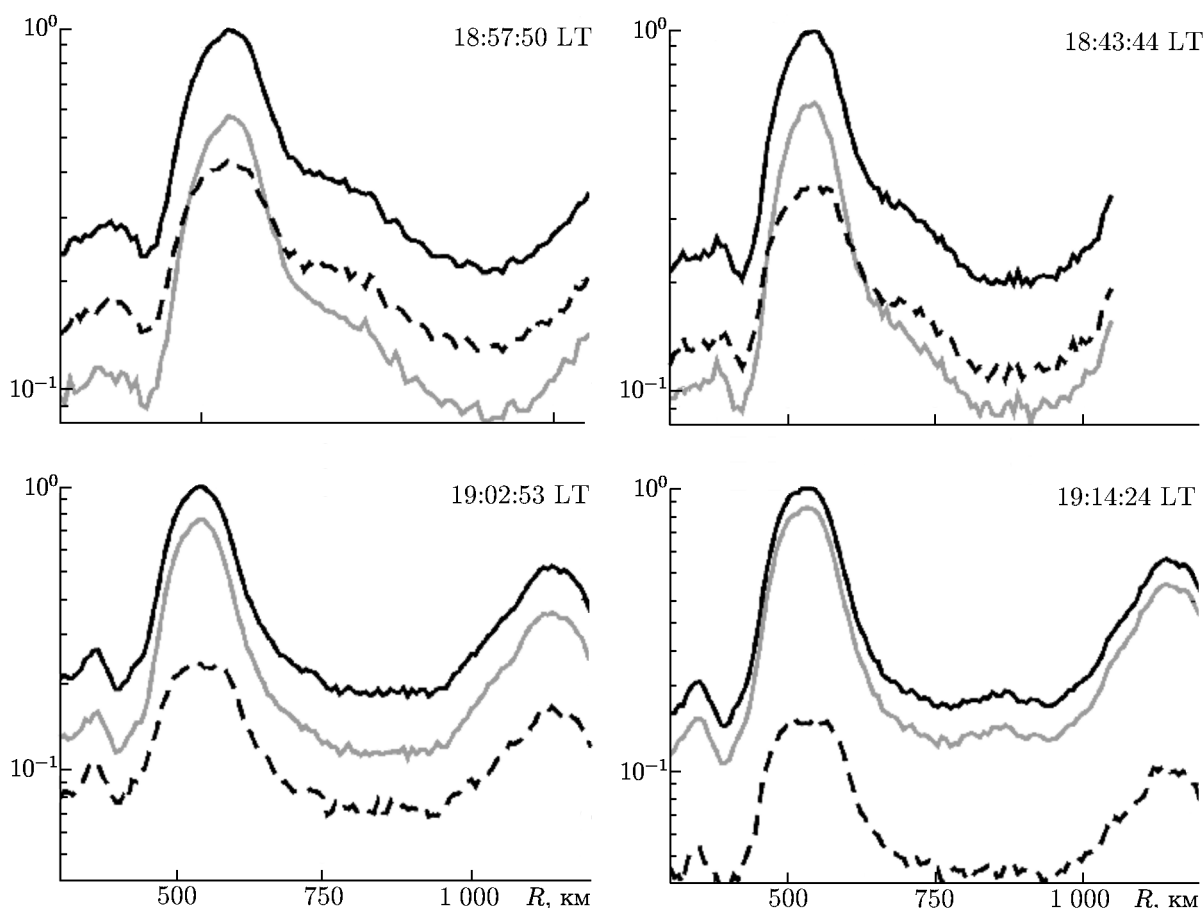


Рис. 6. Процесс накопления профилей мощности с применением критерия наличия сигналов когерентного эха (по оси ординат отложена нормированная на единицу мощность)

ные штриховой линией, усреднялись по оставшимся реализациям. На рис. 6 изображены четыре набора профилей для различных моментов времени.

Определим величину Z , характеризующую эффективность определения наличия сигналов когерентного эха, равную отношению максимума сигнала в районе 550 км к минимуму, расположенному на дальности порядка 900 км. Теоретически, в отсутствие ионосферного шума, при постоянной величине электрического поля в этом диапазоне широт и при условии наличия когерентного эха в каждой реализации, величина Z должна составлять порядка нескольких десятков.

В табл. 1 для обработанных профилей приведено количество реализаций, в которых обнаружено когерентное эхо, а также отношение Z . В табл. 1 также приведён средний сдвиг частоты одиночной гармоники, получаемый при обработке данных в рамках такой модели, и дисперсия сдвига частоты. Усреднение проводилось интервалами с длительностью 1,5 мин (см. выше).

Как показывают результаты обработки, при применении отсева «малоинформативных» реализаций по указанному признаку наличия когерентного эха, профиль мощности становится более ярко выраженным. Это является ещё одним косвенным признаком применимости предлагаемой модели рассеянного сигнала.

5. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Как показывают приведённые графики (рис. 6), отношение Z значительно увеличивается при суммировании только реализаций, удовлетворяющих введённому нами критерию наличия сигналов когерентного эха. Также необходимо отметить, что энергетическая норма профилей, накопленных по реализациям, в которых было предположено наличие когерентного эха, превышает энергетическую норму профилей, накопленных по оставшимся реализациям, даже в тех случаях, когда количество первых меньше или равно количеству вторых.

В соответствии с изложенной моделью, в профиле мощности сигналов когерентного эха по данным используемого радара часто присутствуют копии излучённого сигнала. Поэтому наличие в принятом сигнале копий излучённого сигнала может быть использовано не только как один из критериев наличия в выбранной реализации когерентных радиоотражений, но и как основа для методов повышения пространственного разрешения получаемых данных. Поскольку мы имеем дело с нестационарной средой, имеет смысл предположить, что копии излучённого сигнала входят в принятый сигнал со своими спектральными смещениями, распределение которых определяется характеристиками среды распространения. Параметры модельного сигнала могут быть определены по методу, описанному выше.

Если при накоплении заменять модельный сигнал, детектированный при помощи изложенной выше методики, на короткий импульс, который при свёртке с зондирующим сигналом будет давать модельный отклик, то, фактически, мы будем обращать свёртку принятого сигнала с зондирующим сигналом, что означает повышение пространственного разрешения.

Для этого для каждой реализации строилась функция $K(R)$, как было показано в разделе 3 (см. (1)–(4)), однако в данном случае пределы интегрирования r_1 и r_2 определялись соответственно минимальной и максимальной дальностями, на которых существовали отсчёты сигнала, т. е. интеграл брался по всему интервалу, на котором проводилась оцифровка сигнала во время эксперимента.

Полученные функции (зависимость амплитуды от дальности и зависимость коэффициента корреляции от дальности) использовались для построения пространственного профиля мощности следующим образом:

- 1) определялись локальные максимумы функции $K(R)$;

- 2) отбрасывались точки, в которых максимум функции $K(R)$ не превышает заданного порогового значения;
- 3) если какие-либо две точки максимума располагались на расстоянии, не превышающем длины импульса зондирования, меньший максимум отбрасывался;
- 4) формировалась функция $\Theta(R)$, принимающая значения 1 в точках, выделенных на шагах 1–3, в остальных точках функция $\Theta(R)$ принимала значение 0;
- 5) функция $|\varphi(R, \omega_{\max})|^2$ умножалась на функцию $\Theta(R)$ и в таком виде добавлялась к итоговому профилю мощности.

Таким образом, методика повышения пространственного разрешения (или обращения свёртки принятого сигнала с зондирующим) сводится к накоплению только квадратов амплитуды профиля одиночной реализации в максимумах функции корреляции, в остальных точках профиль мощности отдельной реализации при накоплении считался нулевым.

Иными словами, в методике неявным образом решается задача обращения свёртки принятого сигнала с прямоугольным зондирующим импульсом, сводящаяся к замене прямоугольных модельных откликов в рассеянном сигнале на дельтаобразные. В отличие от обычно используемых методов обращения свёртки [14, 15], эта методика выполняется до статистического накопления и поэтому потенциально, по-видимому, более устойчива к шуму.

Разработанная методика была использована для накопления профилей мощности сигналов когерентного эха с высоким разрешением по дальности с учётом данных зондирования длинным импульсом, полученных на Иркутском радаре некогерентного рассеяния во время эксперимента 25 сентября 1998 года. На рис. 7 сплошной линией приведены профили мощности, рассчитанные при помощи описанной методики. Светлой линией изображены профили, полученные традиционным способом, а штриховой линии соответствуют профили мощности, полученные из рассчитанных профилей с помощью скользящего среднего с окном с длиной, равной длине импульса зондирования.

Как видно из графиков, области наиболее сильного рассеяния существенно сужаются по сравнению с профилями, накопленными обычным способом. Проверка точности обращения свёртки проводилась свёрткой среднего профиля мощности сигнала, полученного с высоким пространственным разрешением (рис. 7, сплошная линия), с профилем зондирующего сигнала. Проверка показала, что результат свёртки (показан на рис. 7 штриховой линией) и профиль мощности, полученный без улучшения пространственного разрешения (рис. 7, светлая линия), практически совпадают.

Это обстоятельство, с одной стороны, говорит об удовлетворительной точности данной методики повышения пространственного разрешения, а с другой — об удовлетворительной степени применимости модели, позволяющей интерпретировать данные Иркутского радара некогерентного рассеяния по наблюдению когерентного эха.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы являлось исследование структуры отдельных реализаций сигналов когерентного эха и выявление особенностей сигнала, позволяющих определять наличие когерентных радиоотражений, а также улучшение методов обработки таких сигналов когерентного эха. Изложенный в работе анализ основан на исследовании данных по наблюдению когерентного эха, полученных на Иркутском радаре некогерентного рассеяния во время сильной геомагнитной бури 25–26 сентября 1998 года.

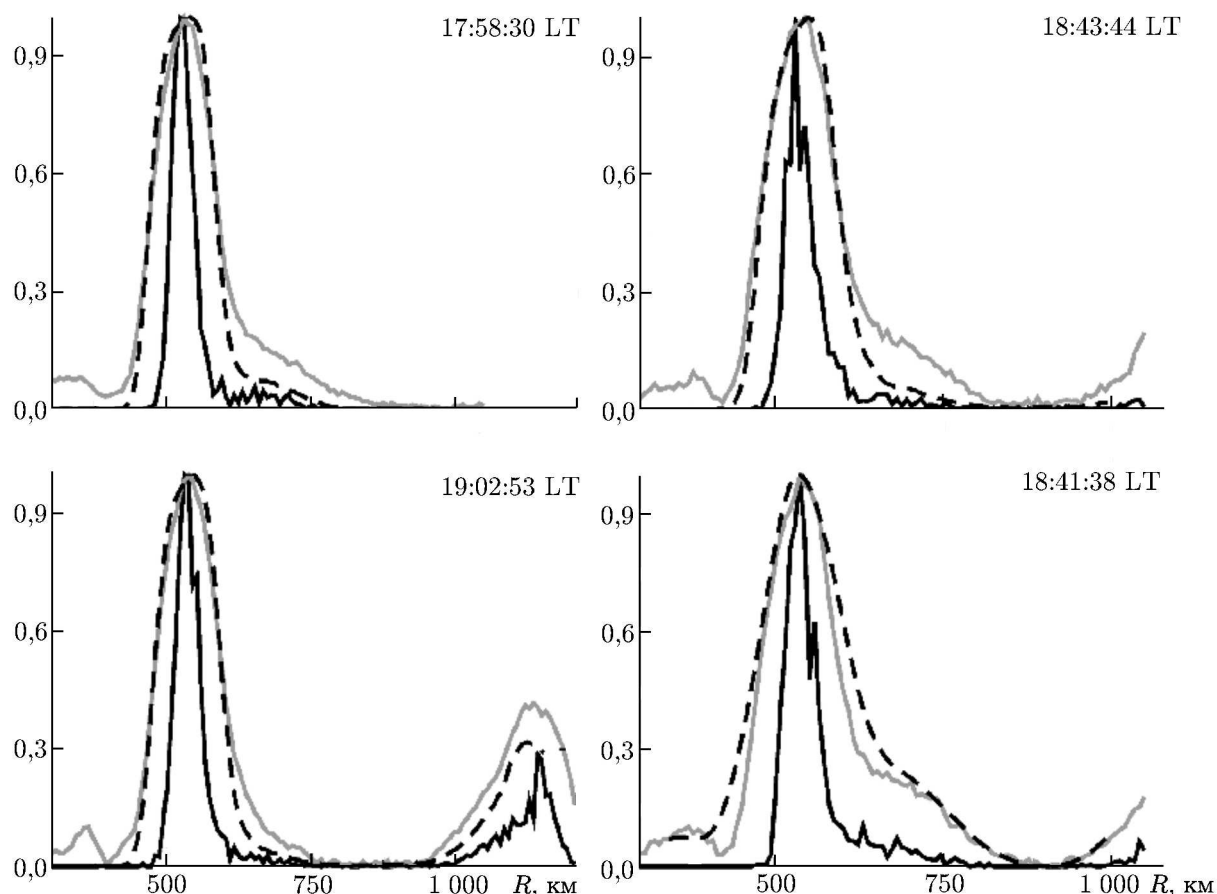


Рис. 7. Пространственные профили мощности, рассчитанные при помощи описанной методики (сплошная линия) и полученные традиционным способом (светлая линия), а также профили мощности, полученные из рассчитанных профилей путём скользящего среднего с окном с длиной, равной длине импульса зондирования (штриховая линия). По оси ординат отложена нормированная на единицу мощность

В работе показано, что применение в качестве модели сигнала прямоугольного импульса с длительностью порядка длины импульса зондирования, заполненного единичной гармоникой с произвольной частотой, в ряде случаев может быть достаточно эффективным для интерпретации сигналов когерентного эха. Следует заметить, что подобные структуры наблюдались на практике и на других радарах. Экспериментальные наблюдения в средних широтах локализованных (менее $3^\circ \div 5^\circ$ по широте) областей с высокими скоростями дрейфа (более 250 м/с) в относительно малом интервале дальностей приводились, например, на радаре некогерентного рассеяния Миллстон-Хилл в работе [16]. Появление высоких скоростей дрейфа часто приводит к возникновению неоднородностей, проявляющихся в наблюдении мощного когерентного эха. Однако в отличие от [16] в нашем случае подобные области наблюдаются не при длительном усреднении и с относительно медленной динамикой, а в одиночной реализации с относительно быстрой динамикой (менее чем 40 мс), т. е. являются быстро живущими структурами, условия возникновения которых и характеристики пока требуют объяснения и дальнейших исследований.

Калибровка метода (определение оптимального уровня коэффициента корреляции, достаточного для уверенного определения модельного импульса на фоне помех) проводилась по наблюдению искусственных спутников Земли.

В работе также предложены два варианта практического применения данной модели: методика, позволяющая выделять сеансы зондирования, в которых имеются достаточно мощные сигналы когерентного эха на фоне остальных сигналов, принимаемых радаром, и методика повышения пространственного разрешения. Результаты, полученные при практическом применении модели, оказались удовлетворительными и позволили косвенно подтвердить её состоятельность.

Применение данной методики для интерпретации экспериментальных данных позволит проводить оценки толщины и высоты слоя с неоднородностями, их угловой чувствительности и модуля электрического поля с более высоким пространственным разрешением. Для этого планируется использовать алгоритмы обработки данных, которые подробно обсуждались в работе [12]. В настоящее время ведётся обработка и сравнение данных, полученных традиционным методом и с повышением пространственного разрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haldoupis C. // *Ann. Geophys.* 1989. V. 7, No. 3. P. 239.
2. Chisham G., Lester M., Milan S. E., et al. // *Surveys Geophys.* 2007. V. 28. P. 33.
3. Buneman O. // *Phys. Rev. Lett.* 1963. V. 10. P. 285.
4. Farley D. T. // *J. Geophys. Res.* 1963 V. 68. P. 6 083.
5. Foster J. C., Tetenbaum D. // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1 251.
6. Potekhin A. P., Berngardt O. I., Kurkin V. I., et al. // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3 983. P. 328.
7. Афраймович Э. Л., Бернгардт О. И., Золотухина Н. А. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2001. Т. 41, № 5. С. 595.
8. Золотухина Н. А., Бернгардт О. И., Шпынёв Б. Г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2007. Т. 47, № 3. С. 364.
9. Бернгардт О. И., Золотухина Н. А., Шпынёв Б. Г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2004. Т. 44, № 6. С. 787.
10. Бернгардт О. И. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2006. Т. 49, № 6. С. 459.
11. Жеребцов Г. А., Заворин А. В., Медведев А. В. и др. // *Радиотехника и электроника.* 2002. Т. 47, № 7. С. 1.
12. Гркович К. В., Бернгардт О. И. // *Солнечно-земная физика.* 2009. Вып. 13 (126). С. 3.
13. Хелстром К. *Статистическая теория обнаружения сигналов.* М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 432 с.
14. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач.* М.: Наука, 1979. 285 с.
15. Voronov A. L., Shpynev B. G. // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3 583. P. 414.
16. Foster J. C., Vo H. B. // *J. Geophys. Res. A.* 2002. V. 107, No. 12. Art. no. SIA 16-1.

Поступила в редакцию 20 июня 2011 г.; принята в печать 2011 г.

THE TECHNIQUE OF COHERENT ECHO PROCESSING IN THE APPROXIMATION OF A SMALL NUMBER OF POINT SCATTERERS

K. V. Grkovich and O. I. Berngardt

In this paper, we aim at studying separate samples of the coherent echo signals and determining signal features that permit one to detect coherent backscatter and also improve the methods of signal processing. We offer a model of the received signal in the form of a square pulse with duration of the order of the wavelength of the sounding pulse and filled with a sinusoidal signal of arbitrary frequency.

It is shown that this model is quite effective to interpret coherent echo signals in some cases. There are two ways of practical use of the model. One is a technique which permits one to single out the sounding sessions in which high-power coherent echo signals are extracted against the background of other signals received by the Irkutsk incoherent scatter radar. Another is a technique of the spatial resolution improvement.