

Результаты эксперимента по исследованию временных вариаций  $\sigma$  на оптимальной частоте наблюдения при нагреве на частотах 4,6 и 5,75 МГц приведены на рис 2а и 3а. На рисунках видны различия в динамике  $\sigma$  при нагреве на различных частотах.

Для уточнения закономерностей временных вариаций  $\sigma$  были более детально проанализированы условия проведения эксперимента.

На рис. 2б и 3б приведены вариации критических частот невозмущенного слоя  $f_2$  в районе ИВ. На этих же рисунках пунктирной линией отмечена рабочая частота нагревного передатчика. Были также проведены расчеты диапазона высот ( $\Delta H$ ), для которого выполняются условия ракурсности в случае обратного рассеяния на искусственных неоднородностях, расположенных на удалении 1300 км от источника пробных волн. Расчеты проводились в геометрооптическом приближении с учетом регулярных пространственных вариаций параметров ионосферы. Предполагалось, что условия ракурсности выполнены, если величина угла  $\psi$  не превышала  $\pm 2^\circ$ . Результаты расчетов приведены на рис. 2в, 3в. Здесь же сплошной линией показан временной ход высоты отражения мощной радиоволны при работе передатчика нагрева на частотах 4,6 и 5,75 МГц.

Сопоставляя результаты эксперимента с данными, качественно отражающими условия его проведения, можно отметить следующее.

1) Согласно расчетным данным условия ракурсности в данном эксперименте выполнялись в течение всего сеанса наблюдений, независимо от рабочей частоты передатчика нагрева. По-видимому, различие во времени начала регистрации СОР при различных частотах нагрева, наблюдавшееся в эксперименте, связано с изменением условий возбуждения искусственной ионосферной турбулентности.

2) По мере приближения  $f_0 F_2$  к частоте нагрева величина  $\sigma$  вначале увеличивается, достигая при  $(f_0 F_2 - f_n) \approx 1$  МГц максимального значения, после чего заметно уменьшается. Последнее связано с уменьшением эффективности генерации искусственной ионосферной турбулентности при отсутствии полного внутреннего отражения от ионосферы мощных нагревных радиоволн.

Таким образом, метод регистрации сигналов обратного рассеяния радиоволн при наклонном зондировании области искусственного нагрева может быть использован для определения параметров мелкомасштабных неоднородностей, возникающих при воздействии на ионосферу мощных радиоволн и для выбора оптимальных условий по исследованию влияния искусственных возмущений на ионосферное распространение радиоволн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику.— М.: Наука, 1978, 2.
2. Беленов А. Ф., Бубнов В. А., Ерухимов Л. М. и др.— Изв. вузов—Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1805
3. Васильков В. В., Гуревич А. В. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме— Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81.

Поступила в редакцию  
3 августа 1982 г.

УДК 621.396.24

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ ДВИЖУЩИМСЯ ТЕРМИНАТОРОМ

*В. Г. Галушко, Ю. М. Ямпольский*

При распространении радиоволн декаметрового диапазона часто возникает ситуация, когда поле в точке приема носит многолучевой характер. В этом случае селекцию лучей можно проводить по ряду параметров сигнала: углы прихода, время распространения импульсных посылок, спектральные характеристики. Обычно анализируют одновременно их комбинации [1].

Ниже рассмотрен эффект, когда поле у приемника формируется двумя пространственными компонентами—прямым сигналом (обычная односкачковая траектория) и отраженным от движущейся границы «ночь—день». На рис. 1 схематично на горизонтальной плоскости показаны возможные траектории лучей. В том случае, когда терминатор находится далеко от приемного пункта В, направление отраженного сигнала по азимуту сильно отличается от прямой волны, и его можно выделить с помощью остронаправленной антенны. По мере приближения переходной области пространственная селекция становится затруднительной, и необходимо использовать частотную фильтрацию, основанную на том, что отражение от движущегося относительно наблюдате-

ля терминатора должно сопровождаться доплеровским смещением частоты  $F_d$ . В предположении о том, что максимальный уровень отраженного сигнала соответствует зеркальному лучу, выражение для  $F_d$  имеет следующий вид:

$$F_d = 2 \frac{f V_0}{c} \cos \gamma \sin \left\{ \arctg \frac{2V_0(t_0 - t - |\Delta t/2|) \cos \gamma}{D \cos(\gamma - \beta)} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  — угол между терминатором и меридианом,  $\beta$  — угол между радиотрассой и меридианом,  $V_0$  — проекция скорости движения терминатора на плоскость падения радиоволны,  $t_0$  — момент касания радиотрассы линией терминатора на поверхности Земли,  $\Delta t$  — разность времен восхода Солнца у приемника и передатчика,  $f$  — частота,  $c$  — скорость света. Искривление лучей в ионосфере и кривизна Земли при расчете не учитывались.

Экспериментальные исследования отражения сверхдлинных волн от терминатора были проведены авторами ранее [2]. В декаметровом диапазоне подобных измерений ранее не было.

Наблюдения проводились следующим образом. В качестве передатчика использовалась станция РВМ Государственной службы времени и частоты, расположенная в Москве [3]. Прием осуществлялся на Радиоастрономической обсерватории (РАО).

Отделения радиоастрономии ИРЭ АН УССР в пос. Граково. Длина прямой радиотрассы  $D$  приблизительно равна 640 км. Приемно-измерительный комплекс подробно описан в работе [4]. Здесь перечислим его основные характеристики. Суточная нестабильность частоты приемного тракта  $\delta f/f \approx 5 \cdot 10^{-9}$ , динамический диапазон выходного спектроанализатора не хуже 40 дБ в полосе анализа 20 Гц. Частотное разрешение  $\Delta F = 0,1$  Гц. В качестве приемной антенны использовалась антенная система «Север—Юг» радиотелескопа УТР-2 [5]. Измерения проводились на частоте  $f = 9,996$  МГц, для которой в дневное время суток выполнялось условие  $f < f_{мпч}$ , а в ночное —  $f > f_{мпч}$ .

Отражение от терминатора регистрировалось на восходе Солнца, когда передатчик и приемник находились в ночных условиях, а граница «ночь—день» надвигалась с востока на радиотрассу. Благодаря выбору рабочей частоты  $f > f_{мпч}$ , прямой сигнал в ночных условиях оказывался ослабленным по уровню относительно дневного на  $-55 \div 65$  дБ, что облегчало селекцию отраженной волны. Электрически управляемая антенна телескопа ориентировалась по углу места и азимуту, соответствующим направлению зеркального отражения от терминатора. Координаты точки отражения, как

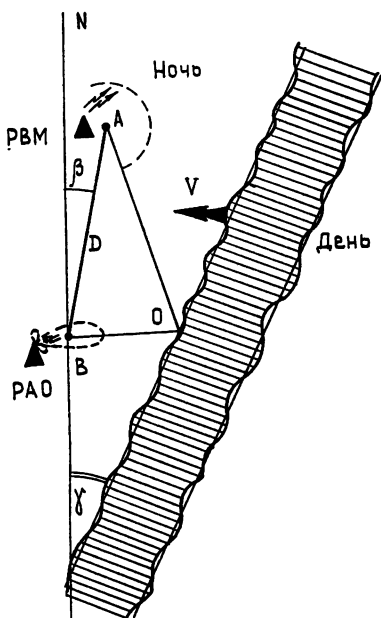


Рис. 1.

и величина доплеровского смещения частоты, зависят от времени. Измерения проводились для разных сезонов года, как правило, в течение двух часов, предшествующих моменту восхода Солнца, восьмиминутными сеансами в начале каждого получаса. Такой ритм работы определялся режимом излучения станцией РВМ монохроматического сигнала, по которому велась спектральная обработка. Продолжительность записи, по которой восстанавливался амплитудный спектр сигнала, была равной 10 с. Полное время анализа единичной реализации порядка 1 мин. В общей сложности для различных сезонов года было проанализировано несколько сот спектров сигналов. Наиболее часто отражение от терминатора наблюдалось в зимние месяцы. Ниже приводятся результаты, полученные в январе—феврале 1982 г. Поскольку априорно соотношение уровней прямого и отраженного сигналов не было известно, были приняты меры по защите анализирующего устройства от перегрузки прямым сигналом. Для этого с выхода синхронного детектора приемника преобразованный по частоте сигнал подавался на аналоговый полосовой фильтр (его амплитудно-частотная характеристика показана на рис. 2б—5). С помощью высокостабильного опорного гетеродина частота прямого сигнала сдвигалась по полосе пропускания фильтра на величину  $\Delta f$ . Преобразование проводилось по формуле  $\Delta f = f_r - f_c$ . Таким образом, спектр прямого сигнала переносился в окрестность частоты  $\Delta f$ . Оценка частоты сигнала проводилась по максимуму спектральной кривой.

На рис. 2 в качестве примера приведены экспериментальные амплитудные спектры сигналов  $S(F)$ , полученные в январе 1982 г за два часа до восхода Солнца (рис. 2а) и за несколько минут до восхода (рис. 2б). В первом случае  $\Delta f = 14$  Гц, во втором —

$\Delta f = 7$  Гц. Рост спектральной плотности в окрестности этих частот соответствует прямому сигналу. Спектры, полученные за два часа до восхода Солнца с интервалом около одной минуты, показывают, что  $F_d$  меняется незначительно. Однако тенденция к уменьшению  $F_d$  на рис. 2а прослеживается. По мере приближения рассеивающей области  $F_d$  меняется более быстро (рис. 2б). Эти данные согласуются с результатами расчета (см. рис. 3).

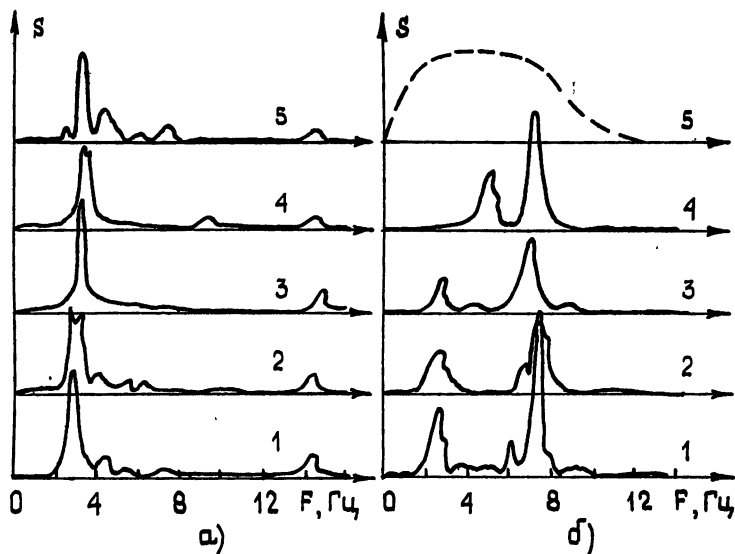


Рис. 2.

Методика измерений не позволяла произвести оценку коэффициента отражения от терминатора, поскольку не было известно падающее на неоднородность «ночь-день» поле. Однако некоторые энергетические оценки можно произвести. Уровень отраженного сигнала в среднем на 10–15 дБ был ниже прямого сигнала. Это обстоятельство подтверждает выводы о том, что условия зеркального отражения на терминаторе не выполняются и регистрируемое поле является результатом рассеяния волны на градиентах электронной концентрации и неоднородностях переходной области. Отличительным свойством этих неоднородностей должно быть движение со скоростью, близкой к скорости движения терминатора. На возможность их образования указывается в работах [6, 7].

Наиболее часто надежное обнаружение отраженного от терминатора сигнала происходило на дальностях порядка 1500–2000 км и непосредственно перед восходом Солнца. По-видимому, это обстоятельство связано с изменением падающего на терминатор поля.

Для всего массива спектральных данных были получены оценки доплеровского смещения частоты  $F_d$  как функции времени наблюдения. Для этого проводилось усреднение спектров одних и тех же по времени сеансов наблюдения за разные дни. Результаты такой обработки представлены на рис. 3. В качестве погрешности оценки  $F_d$  на этом же рисунке вертикальными линиями нанесены для каждого сеанса стандарты  $\sigma_F$ . Некоторое расхождение экспериментальных значений  $F_d$  с расчетными (сплошные кривые) может быть объяснено упрощенной постановкой расчетной задачи, не учитывавшей кривизны Земли, отличие свойств среды до терминатора от вакуума, неоднородную структуру переходной области.

В заключение авторы выражают благодарность П. В. Блюху за внимание к данным исследованиям и полезные советы, а также С. В. Кащееву за помощь в проведении измерений.

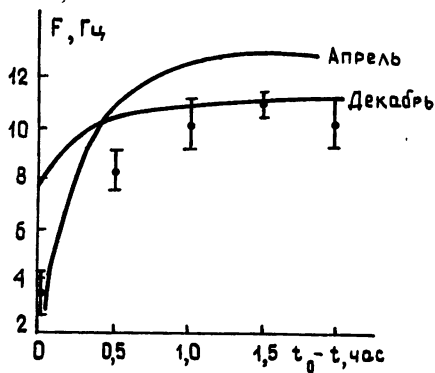


Рис. 3. Зависимость доплеровского смещения частоты отраженного сигнала от времени наблюдения для двух сезонов года; сплошные линии — расчет, точки — экспериментальные значения  $F_d$ , полученные зимой 1982 г.

1. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере.— М.: Мир, 1973, 503 с.
2. Безродный В. Г., Блюх П. В., Фалькович И. С., Ямпольский Ю. М.— Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, с 1583.
3. Бюллетень В<sup>05</sup>. Эталонные сигналы частоты и времени.— М.: Стандарт, 1981.
4. Галушко В. Г., Рабинович Л. М., Ямпольский Ю. М. Институт радиофизики и электроники АН УССР. Препринт № 182. Харьков, 1981.
5. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г.— В сб.: Антенны.— М.: Связь, 1978, вып. 26, с. 3
6. Сомсиков В. М., Троицкий Б. В.— Геомагнетизм и аэрономия, 1975, 15, № 5, с. 856.
7. Григорьев Г. И., Савина О. Н., Сомсиков В. М., Троицкий Б. В.— В сб.: Волновые возмущения в атмосфере.— Алма-Ата: Наука, Каз.ССР, 1980, с. 5.

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
12 июля 1982 г.

УДК 519.25 : 621.371.2

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СЛИКОВ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*З. А. Борсутский, М. Б. Каневский*

В радиолокационных (РЛ) исследованиях морской поверхности значительное внимание уделяется обнаружению сликов — участков с относительно слабым волнением, появление которых связано с выходом на поверхность внутренних волн, нефтяными загрязнениями и т. д. [1, 2]. В случае сликов слабого контраста простой качественный анализ РЛ изображения морской поверхности не позволяет принять обоснованное в статистическом смысле решение о наличии или отсутствии слика, поэтому процедуру обнаружения необходимо формализовать. При этом следует иметь в виду, что распределение отраженного РЛ сигнала зависит от характеристик лоатора, углов зондирования и степени волнения [3, 4], вследствие чего предпочтительно использовать непараметрические алгоритмы, устойчивые к виду распределения сигнала.

В настоящей работе непараметрический алгоритм, предложенный в работе [5], исследуется применительно к задаче РЛ обнаружения сликов на морской поверхности.

Предположим, что зондирование поверхности моря осуществляется с помощью импульсного некогерентного радиолокатора сантиметрового диапазона, перемещающегося с постоянной скоростью  $V$ . Если зондирование проводится при углах скольжения  $\leq 70^\circ$ , то наличие слика приводит к уменьшению эффективной площади рассеяния морской поверхности, т. е. к ослаблению отраженного сигнала. Для простоты будем считать, что слик имеет заданный линейный размер  $L$ , т. е. отраженный от слика РЛ сигнал содержит  $l = L/V\tau$  некоррелированных импульсов ( $\tau$  — время корреляции отраженного сигнала).

Математически задача обнаружения формулируется следующим образом. Имеется выборка независимых значений интенсивности отраженного от морской поверхности РЛ сигнала:

$$x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_N. \quad (1)$$

Требуется проверить гипотезу  $H_0$ , состоящую в том, что все элементы выборки (1) имеют одно и то же распределение  $f_0(x)$ , против альтернативы  $H_1$ , при которой элементы  $x_j, \dots, x_{j+l-1}$  ( $j$  — неизвестный, а  $l$  — известный параметры) имеют распределение  $f_1(x) = (1/\theta)f_0(x/\theta)$ ,  $\theta < 1$ .

Очевидно, распределение  $f_0(x)$  соответствует сигналу от однородного моря, а  $f_1(x)$  — сигналу от слика; отношение средних значений  $\theta = E(x)_1/E(x)_0$  — параметр, характеризующий вызванное наличием слика уменьшение эффективной площади рассеяния морской поверхности (контраст слика).

Расположим элементы выборки (1) в порядке их возрастания и выделим  $q$  первых элементов. Пусть максимальный из них имеет величину  $x^{(q)}$ . Элементы  $x_i < x^{(q)}$  расположим в порядке возрастания индексов, причем, индексы переобозначим (см рис. 1) через  $a_k$ :

$$a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_q. \quad (2)$$

Для членов последовательности (2), начиная со второго, введем функцию

$$S_k^{(q)} = \sum_{m=1}^{k-1} a_{km}, \quad a_{km} = \begin{cases} 1, & a_k - a_{k-m} \leq l - 1 \\ 0, & a_k - a_{k-m} > l - 1 \end{cases}. \quad (3)$$