

ОБ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРОЙ

О. И. Яковлев, В. И. Бочаров

Теория рассеяния радиоволн на статистических неоднородностях среды применена к задаче об обратном рассеянии коротких радиоволн нижней ионосферой. Вычислена величина рассеянной мощности и коэффициент корреляции сигналов, принимаемых на разнесенные антенны. Приведены результаты предварительных экспериментальных исследований обратного рассеяния радиоволн на частоте 12 мГц.

Известно, что нижняя ионосфера является статистически неоднородной средой, рассеивающей радиоволны. Первое детальное исследование рассеяния коротких радиоволн нижней ионосферой было проведено, по-видимому, Эккерслеем [1]. В связи с тем, что рассеяние радиоволн может обеспечить связь на УКВ на больших расстояниях, Бейли [2] подробно изучил ионосферное рассеяние метровых волн. Букером и Гордоном [3], а позже Вилларсом и Вайскопфом [4] была развита теория рассеяния радиоволн неоднородностями атмосферы. Эти варианты теории базируются на определенных предположениях о статистических закономерностях рассеивающей среды. Вопрос о справедливости принятых закономерностей остается открытым. Сравнение теории с опытами Эккерслея и Бейли затруднительно, потому что эти эксперименты позволяют определить значение эффективного поперечника рассеяния для очень ограниченной области углов рассеяния. В указанных условиях разные варианты теории рассеяния можно привести в соответствие с опытом при надлежащем выборе входящих в теорию параметров.

В связи с этим представляет интерес обнаружение и исследование обратного рассеяния коротких радиоволн нижней ионосферой. При вертикальном зондировании ионосферы на частотах выше критической возможен прием сигналов, обусловленных, по крайней мере, тремя механизмами. Возможно, во-первых, частичное отражение радиоволн от появляющихся нерегулярно областей с большим градиентом электронной концентрации, во-вторых, появление „всплесков“ сигнала, обусловленных метеорной ионизацией, и, наконец, должны существовать сигналы, обязанные обратному рассеянию радиоволн. Сигналы последнего типа должны характеризоваться регулярным присутствием, быстро флюктуирующим слабым уровнем и некоррелированностью мгновенных значений сигналов, принимаемых на разнесенные антенны.

Для расчета рассеянной мощности на входе приемника и коэффициента корреляции рассмотрим идеализированную схему обратного рассеяния, представленную на рис. 1. Плоский, статистически неоднородный слой толщины b , расположенный на высоте h , облучается сферической волной. Пусть передатчик мощностью P генерирует импульсы длительностью τ , а антенная система имеет коэффициент усиления K . Как нетрудно показать, мощность рассеянного сигнала на входе приемника равна

$$W = \frac{PK^2\lambda^2\sigma}{16\pi^2} J, \quad (1)$$

где $J = \int r^{-4} dv$, σ — эффективный поперечник обратного рассеяния радиоволн. Считая диаграммы направленности антенн достаточно широкими, мы не учитываем их роль в выражении (1). Интегрирование в формуле (1) ведется по объему, существенному для обратного рассеяния. Указанный объем определяется пересечением плоского слоя сферическим поясом толщины $a = c\tau/2$ (на рис. 1 этот объем заштрихован). Величина J имеет следующие значения:

$$J = \pi a^2/h^3 \quad (a \leq b);$$

$$J = \pi b [h(2a - b) + a^2] / h(h + a)^2(h + b) \quad (a \geq b). \quad (2)$$

Из приведенных выражений видно, что при длительности импульса $\tau < 2b/c$ величина принимаемой мощности пропорциональна квадрату длительности импульса; при выполнении условия $\tau > 2b/c$ принимаемый сигнал слабо зависит от длительности импульса. Заметим, что в отличие от случая рассеяния радиоволн под малыми углами мощность, рассеянная в обратном направлении, зависит от длительности импульса. Формулы (1) и (2) дают простую связь между величиной принимаемой мощности, значением эффективного поперечника обратного рассеяния и параметрами слоя.

При определении коэффициента корреляции сигналов будем считать, что длительность импульса достаточно велика (так что не происходит ограничения объема, существенного для рассеяния), а антенны имеют широкие диаграммы направленности. Расчет коэффициента корреляции при обратном ионосферном рассеянии коротких радиоволн можно провести, следуя методике, использованной в [5] при аналогичных расчетах тропосферного рассеяния УКВ. В интересующем нас случае коэффициент корреляции определится выражением

$$V_1 V_2^* \sim \int r^{-4} e^{iks \sin \varphi} dv, \quad (3)$$

в котором $s = AB$; смысл угла φ ясен из рис. 1. Из формулы (3) следует, что

$$V_1 V_2^* \sim \int_0^\infty (\rho^2 + h^2)^{-2} \rho \exp(iks \rho / \sqrt{\rho^2 + h^2}) d\rho. \quad (4)$$

Здесь ρ — расстояние CD (см. рис. 1). Из (4) непосредственно получается выражение для искомого коэффициента корреляции:

$$R(s) = 2\alpha^{-2} (2 + \alpha^2 - 2\alpha \sin \alpha - 2 \cos \alpha)^{1/2}. \quad (5)$$

В формуле (5) $\alpha = 2\pi s/\lambda = ks$. Численный анализ выражения (5) показывает, что при увеличении расстояния s коэффициент корреляции быстро убывает, так что при $s > 4\lambda$ напряжения V_1 и V_2 можно считать некоррелированными. Коэффициент корреляции $R(s)$ в случае обратного рассеяния не зависит от вида выражения для эффективного поперечника обратного рассеяния и определяется только геометрией задачи.

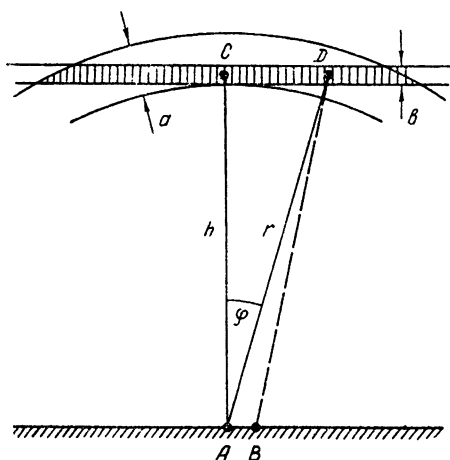


Рис. 1.

Для обнаружения и исследования обратного рассеяния радиоволн был использован передатчик мощностью порядка 50 квт в импульсе; длительность импульса 50 мксек, рабочая частота 12 мгц. Передающая антенна состояла из пяти волновых вибраторов, расположенных на высоте $\lambda/4$ над землей; площадь полотна антенны 25 м × 50 м. В августе и сентябре 1958 года проводилось измерение высот областей рассеяния и определялась степень регулярности появления рассеянных сигналов. Наблюдения велись в течение двух месяцев круглосуточно, по двадцать минут в начале каждого часа. Было обнаружено, что рассеянный сигнал наблюдается регулярно в любое время суток. Существенно, что во время наблюдений критическая частота слоя E ионосферы не превосходила 4 мгц, т. е. была, по крайней мере, в три раза меньше, чем рабочая частота. Рассеянный сигнал имеет слабый уровень и постоянные флюктуации, его легко отличить от нерегулярных метеорных „всплесков“ сигнала. Рассеянный импульс иногда сильно размыт; часто наблюдается появление сигнала сразу от двух-трех областей. Последнее указывает на то, что рассеивает не какой-то узкий участок, а протяженная область ионосферы.

На рис. 2 приведены гистограммы, дающие количественные характеристики высот, на которых наблюдается рассеяние радиоволн. На этих рисунках по вертикальной оси отложено время t ; в течение которого рассеянный сигнал приходил с определенного интервала высот (в процентах от общего времени существования сигнала). Рисунок 2а относится к дневному времени 11 ÷ 14 часов, график 2б относится к

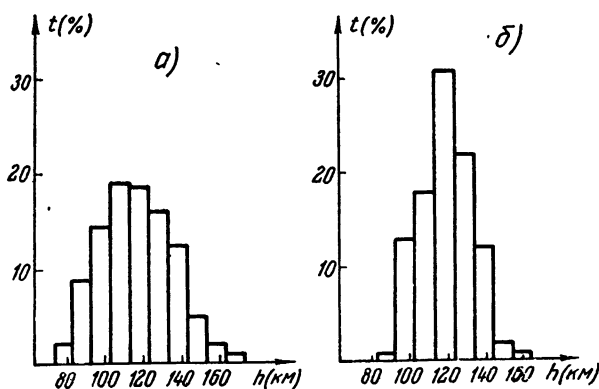


Рис. 2.

ночному интервалу 0 ÷ 3 часа. Аналогичные гистограммы получены и для других временных интервалов. Из опытов Пинео [6] следует, что наиболее эффективно рассеивает УКВ область ионосферы, находящаяся в интервале 75 ÷ 85 км. Исследования Эккерслея, проведенные на коротких волнах, дают значения высот, близкие к величинам, приведенным на рис. 2. Такое различие в значениях высот, полученных на УКВ и коротких волнах, можно объяснить, если предположить, что средний масштаб неоднородностей увеличивается с высотой. При этом области, наиболее эффективно рассеивающие УКВ, будут расположены ниже, чем соответствующие области для коротких радиоволн.

Формулы (1) и (2) позволяют оценить значение эффективного потерь обратного рассеяния. В проведенных опытах мощность рассеянного сигнала на входе приемника W не падала ниже мощности шумов (по нашим оценкам $W > 10^{-14}$ вт). Подставляя в формулы (1) и (2) значения параметров аппаратуры и полагая $h = 120$ км, $b = 10$ км, получим, что $\sigma > 3 \cdot 10^{-15}$ м⁻¹ для $\lambda = 25$ м. На основании приведенных предварительных результатов можно утверждать, что обратное рассеяние радиоволн ионосферой есть регулярно наблюдаемое явление и что рассеяние происходит в области толщиной порядка 10 ÷ 20 км, расположенной на высоте 90 ÷ 140 км.

Измерение величины рассеянного сигнала позволит в дальнейшем

определить величину эффективного поперечника обратного рассеяния, что имеет существенное значение при сопоставлении результатов эксперимента с различными вариантами теории. Опытная проверка формулы (5) важна для подтверждения механизма рассеяния при вертикальном зондировании ионосферы на частотах выше критической. Кроме того, сопоставление флюктуационных характеристик рассеянного сигнала со скоростью ветра в области E ионосферы может способствовать выяснению роли турбулентности как причины образования ионосферных неоднородностей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. T. L. Eckersley, Proc. IEE, **86**, 548 (1940).
2. D. Bailey, R. Bateman, Proc. IRE, **43**, 1181 (1955).
3. H. G. Booker, W. E. Gordon, Proc. IRE, **38**, 401 (1950).
4. F. Villars, V. F. Weisskopf, Proc. IRE, **43**, 1232 (1955).
5. H. Staras, Proc. IRE, **43**, 1374 (1955).
6. V. Pineo, J. Geophys. Res., **61**, 165 (1956).

Сибирский физико-технический институт

Поступила в редакцию
1 декабря 1958 г.