

жестко стабилизированного источника напряжения, а, во-вторых, вся схема генератора шума термостатирована. Температура термостатирования не имеет значения. Усилительная часть самого радиометра не требует высокой стабильности усиления, так как радиометр обрабатывает почти нулевой сигнал. От усиления радиометра зависит только сигнал ошибки, для которого даже значительные вариации коэффициента усиления значения не имеют.

Работа макета радиометра была проверена следующим образом. Были взяты три жидкостных эталона радиоизлучения с известными температурами U двух, служащих для калибровки, коэффициент отражения по мощности был равен 0,02, а у третьего, «измеряемого», — 0,2. Ошибка измерения не превышала флуктуационного порога чувствительности радиометра, равного $0,05^\circ$, в диапазоне измеряемых температур 30—40° С.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Троицкий В. С. и др. Препринт НИРФИ № 131. — Горький, 1979.
- 2 Троицкий В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 9, с 1054.
- 3 Ludeke K. M., Schiek B., Kohler J — Electr. Lett., 1978, 14, № 6, p. 194.
- 4 Рахлин В. Л. — Изв вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 9, с 1204.
- 5 Троицкий В. С. Препринт НИРФИ № 186. — Горький, 1984.
- 6 Рахлин В. Л. и др. — ПТЭ, 1970, № 2, с 151.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
4 ноября 1986 г.

УДК 550 388 2

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ВОЛН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НЕОДНОРОДНОСТЯМИ F-СЛОЯ СУБПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Н. М. Богута, О. И. Максименко, В. П. Урядов, И. П. Цыганаш

В исследованиях мелкомасштабной структуры полярной ионосферы широко применяется радарный метод. При этом с помощью УКВ радаров можно получать сведения только о неоднородностях, расположенных на высотах E -слоя ионосферы [1]. Это связано с геометрией зеркального рассеяния радиоволн на магнитно-ориентированных неоднородностях высокоширотной ионосферы. Использование КВ сигналов позволяет с учетом рефракции радиоволн лоцировать неоднородности, расположенные в F -области ионосферы.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований обратного рассеяния КВ субполярной ионосферой. Эксперимент проводился в январе—марте 1985 г. Для зондирования ионосферы использовался КВ передатчик, установленный в п. Дымер Киевской области ($\varphi_{\text{геом}} = 48^\circ$). Передатчик работал на ряде фиксированных частот в диапазоне 11—20 МГц и мог излучать в двух направлениях: на север и северо-восток ($A=51^\circ$) с помощью двух горизонтальных ромбических антенн типа РГ $\frac{65}{4}$ 1. Переключение антенн осуществлялось дистанционно с пульта управления.

Передатчик работал в импульсном режиме с пиковой мощностью $P_0 = 25$ кВт; длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 1$ мс, частота повторения $F_{\text{п}} = 20$ Гц. Прием сигналов осуществлялся на те же ромбические антенны, а также на антенную систему, состоящую из 8 горизонтальных широкополосных диполей, установленных на мачте высотой 93 м. Различные комбинации подключения диполей позволяли формировать четыре диаграммы направленности антенной системы в вертикальной плоскости с угловой шириной порядка 6° , что позволяло измерять углы прихода рассеянных сигналов.

Измерения проводились в основном в вечерние и ночные часы. В большинстве случаев наблюдались сигналы двух типов: тип I — сигналы с задержками $\tau_{31} \approx 7-10$ мс, тип II — сигналы с задержками $\tau_{32} \approx 13-20$ мс. Характер сигналов отличался друг от друга. Сигналы типа I принимались только в вечерние и ночные часы,

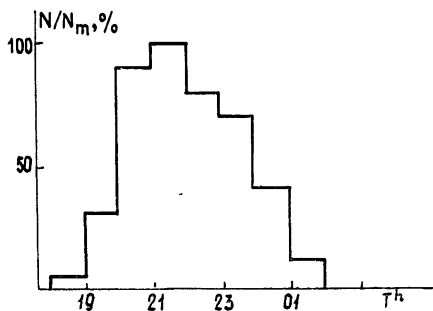


Рис. 1.

имели высокую скорость флуктуаций и идентифицировались как рассеянные ионосферой. Сигналы типа II, задержка которых увеличивалась с ростом частоты, идентифицировались как сигналы, отраженные от Земли (сигналы ВНЗ). При переключении передатчика с антенны «север» на антенну «северо-восток» уровень сигнала типа I падал на 10—20 дБ, а уровень сигнала типа II либо не изменялся либо несколько возрастал. Возрастание уровня сигнала типа II, по-видимому, связано с геометрией эксперимента, поскольку с северо-восточного направления сигнал ВНЗ отражается от Земли в районе Уральских гор. На рис. 1 приведена усредненная по всем частотам гистограмма появляемости рассеянных сигналов в зависимости от времени наблюдений. Как видно из рисунка, сигналы, рассеянные ионосферой, принимаются только в вечерние часы (20—24^h) с максимумом появляемости в 21—22^h (время московское). Анализ ионосферных и магнитных данных по п. Ленинград показал, что на фоне умеренно низкой магнитной активности с K_p индексом, равным 2—3, вероятность наблюдения рассеянных сигналов увеличивается с ростом критической частоты f_oF_2 в области рассеяния. Для значений $f_oF_2 \lesssim 3$ МГц появляемость рассеянных сигналов заметно падала. Это указывает на важную роль рефракции при наблюдении обратного рассеяния КВ субполярной ионосферы.

Для локализации положения области ионосферы, ответственной за рассеяние КВ были проведены расчеты лучевых траекторий с использованием результатов измерений углов прихода⁴ и времени задержки рассеянных сигналов. Расчеты проводились в предположении ракурсного характера рассеяния КВ на магнитно-ориентированных неоднородностях. В нашем случае для приема обратнорассеянных сигналов в области рассеяния должно выполняться условие ортогональности волнового вектора падающей волны к геомагнитному полю [2]. В субполярной F -области это условие может быть выполнено только с учетом рефракции радиоволны в ионосфере. Результаты расчетов, проведенные с учетом реальных ионограмм вертикального зондирования, снятых в пп. Дымер и Ленинград, представлены на рис. 2. На рисунке для каждой траектории указаны углы прихода луча и утолщениям отмечены участки, где выполняются условия ортогональности волнового вектора падающей волны геомагнитному полю и которые соответствуют по дальности экспериментально наблюдаемым величинам задержек рассеянных сигналов. Как можно видеть из рисунка, за рассеяние ответственна F -область субполярной ионосферы на высотах ~220—310 км. При этом по дальности положение рассеивающей области приходится на интервал геомагнитных широт ~57—58,5°, что совпадает с положением южной границы главного ионосферного провала [3].

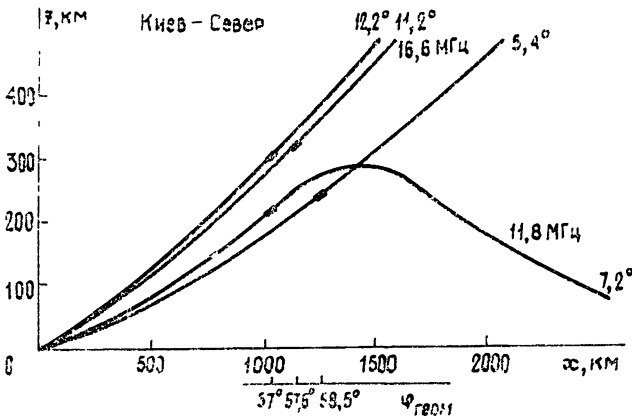


Рис. 2.

На основе полученных данных представляется возможным сделать оценку интенсивности неоднородностей, ответственных за рассеяние. Будем исходить из выражения для принимаемой мощности рассеянного излучения в виде [4]

$$P_s = \frac{P_0 \lambda^2 e^{-\Gamma}}{16\pi^2} \int \frac{G_1(\theta, \varphi) G_2(\theta, \varphi) \sigma dv}{r_1^2 r_2^2}, \quad (1)$$

где $\sigma = (\pi/2) k_0^4 \Phi_e(\chi) \sin^2 \chi$ — эффективное сечение рассеяния единичного объема, P_0 — мощность передатчика, λ — длина волны, $k_0 = \omega/c$ — волновое число, G_1 и G_2 — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, $e^{-\Gamma}$ — потери сигнала, $\Phi_e(\chi)$ — спектральная плотность флуктуаций диэлектрической проницаемости, χ — угол между волновым вектором рассеянной волны и вектором поля падающей волны, r_1 и r_2 — расстояния от передатчика и приемника до рассеивающей области.

В случае рассеяния КВ на магнитно-ориентированных неоднородностях выражение для $\Phi_e(\chi)$ можно представить в виде [5]

* Углы прихода на частотах 10,8 и 16,6 МГц (на этих частотах зарегистрировано наибольшее число рассеянных сигналов) в основном составляли значения в интервале ~11 ± 3°.

$$\Phi_{\varepsilon}(x) = C_{\varepsilon}^2 \exp\left(-\frac{x_{\parallel}^2 l_{\parallel}^2}{4}\right) \left[1 + \left(\frac{x_{\perp}}{K}\right)^2\right]^{p,2}, \quad (2)$$

т. е. спектр имеет степенной вид для поперечных к геомагнитному полю масштабов неоднородностей, $l_{\perp} = 2\pi/\kappa_{\perp}$, и гауссово обрезание для продольных масштабов l_{\parallel} , $L = 2\pi/K$ — внешний масштаб неоднородностей. Коэффициент C_{ε}^2 находится из условия нормировки

$$\int \Phi_{\varepsilon}(x) d^3x = \langle(\Delta\varepsilon)^2\rangle = \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \left\langle\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2\right\rangle, \quad C_{\varepsilon}^2 = \frac{\omega_0^4}{\omega^4} l_{\parallel} K^{-2} \left\langle\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2\right\rangle \times \\ \times [4\pi^{3/2} B(2, p-2) {}_2F_1(1, p/2-1; p/2+1, 1)]^{-1}, \quad (3)$$

B — бета-функция, ${}_2F_1$ — обобщенная гипергеометрическая функция. Принимая для обратного рассеяния $r_1 = r_2 = r$, $\sin^2 \chi = 1$ и вводя угол ψ между направлением волнового вектора падающей волны и направлением вытянутости неоднородностей ($x_{\parallel} = 2k_0 \cos \psi$, $x_{\perp} = 2k_0 \sin \psi$), после подстановки (2), (3) в (1) подынтегральное выражение принимает вид

$$\int \frac{G_1 G_2 \exp[-4\pi^2 (l_{\parallel}/\lambda)^2 \cos^2 \psi] r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi}{r^4 [1 + 4 \sin^2 \psi (L/\lambda)^2]^{p/2}}$$

Для используемых в эксперименте приемопередающих антенн со сравнительно широкими диаграммами направленности вертикальный размер рассеивающего объема будет определяться гауссовым обрезанием при отклонении рассеянного излучения от зеркального направления. При этом интервал углов $\Delta\theta \sim \Delta\psi \approx \lambda/2\pi l_{\parallel}$. Горизонтальный размер рассеивающего объема определяется шириной диаграммы направленности передающей ромбической антенны, которая составляет в нашем случае величину $\Delta\varphi \approx 15^\circ$. Размер эффективного объема Δr в направлении вектора рассеяния можно оценить по расплыванию импульсного сигнала $\Delta r = (c/2)(\tau_R - \tau_T)$, где τ_T , τ_R — длительности излучаемого и принимаемого сигналов, c — скорость света.

Для значений $\tau_T = 1$ мс, $\tau_R \approx 1,7$ мс, $r \approx 1000$ км, $l_{\parallel}/\lambda = 5^*$ получаем эффективную величину объема рассеяния $v_{\Delta\Phi\Phi} \approx e^{-1} r^2 \Delta r \sin \theta \Delta\theta \Delta\varphi \approx 3 \cdot 10^5$ км³. После подстановки в (1) значений $P_0 = 2,5 \cdot 10^4$ Вт, $P_s = 6 \cdot 10^{-14}$ Вт, $L/\lambda = 10^3$, $f = \omega/2\pi = 16,6$ МГц, $f_0 = \omega_0/2\pi = 4$ МГц, $G_1 G_2 = 5 \cdot 10^2$, $p = 2,5$, $e^{-\Gamma} = 0,3$ получаем

$$\sqrt{\langle(\Delta N/N)^2\rangle} \approx 1,7 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о существовании в ночные часы на высоте F -слоя мелкомасштабных неоднородностей в области экваториальной стенки провала, что согласуется с данными [7] о наличии на широтах $\Phi_{\text{инв}} \sim 55-57^\circ$ (что соответствует для наших условий $\Phi_{\text{геом}} \sim 56-58^\circ$) субаврорального пика появляемости ионосферных неоднородностей. В заключение заметим, что использование КВ радаров позволяет исследовать турбулентность в F -слое в области главного ионосферного провала, через который проходит экваториальная граница области крупномасштабной конвекции плазмы — плазмопауза.

Авторы благодарны Л. М. Ерухимову за интерес к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Джонс Т. Б. В кн. Полярная верхняя атмосфера / Под ред. Ч. Дири и Я. Холтега. — М.: Мир, 1983, с. 72.
- 2 Möller H. G. — J. Atm Terr Phys., 1974, 36, № 9, p. 1487.
- 3 Miller N. J. — J. Geophys. Res., 1970, 75, № 34, p. 7175.
- 4 Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. — М.: Мир, 1981, т. 2, с. 518.
- 5 Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984, с. 392.
- 6 Е. Гунцзе, Лю Чжао-хань — ТИИЭР, 1982, 70, № 4, с. 5.
- 7 Clark D. H., Raitt W. J. — Planet Space Sci., 1975, 23, № 12, p. 1647.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
1 октября 1986 г.

* Принятое значение соответствует для случая обратного рассеяния ($l_{\perp} = \lambda/2$) отношению размеров $l_{\parallel}/l_{\perp} = 10$ [8]