«Оптика атмосферы и океана», **10**, N 12 (1997)

УДК 621.371

О.И. Бернгардт, А.П. Потехин

К ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ

Проведено теоретическое рассмотрение свойств однократно рассеянного в атмосфере и ионосфере радиосигнала для случая однопозиционного зондирования. Предложен способ получения связи между спектром принимаемого сигнала и спектральными характеристиками флуктуаций среды. Дан анализ селективных свойств процесса зондирования.

Введение

Для радиолокационного зондирования атмосферы и ионосферы широко используется метод обратного рассеяния волн на мелкомасштабных флуктуациях среды. В основе теории метода лежит радиолокационное уравнение, устанавливающее связь между корреляционной функцией принимаемого сигнала и параметрами среды, которое строится на основе борновского приближения и дополнительного предположения о малости пространственного радиуса корреляции неоднородностей [1, 2]. Это предположение вполне реалистично и хорошо согласуется с экспериментальными данными при рассеянии на флуктуациях диэлектрической проницаемости $\delta\varepsilon(\mathbf{r}, t)$, обусловленных турбулентностью атмосферы или тепловыми движениями ионосферной плазмы [1, 2].

С теоретической точки зрения представляется важным установить связь между сигналом и характеристиками среды без дополнительных предположений, т.е. для произвольных радиусов пространственной корреляции. В ряде экспериментов [3, 4] наблюдались рассеянные эхосигналы с аномально высоким уровнем мощности, полное теоретическое объяснение которых еще не разработано и, возможно, потребует учета эффектов пространственной когерентности флуктуаций среды.

В данной статье представлены результаты теоретического изучения свойств сигналов обратного рассеяния, установления связи с характеристиками среды без дополнительных ограничений на радиус пространственной корреляции. Рассматривается случай однопозиционного зондирования.

Связь рассеянного сигнала с флуктуациями среды

Вывод всех последующих уравнений основан на хорошо известном борновском приближении однократного рассеяния [1, 2]. Оно применимо в случае достаточно слабых флуктуаций параметров среды и слабости рассеянного поля в сравнении с полем первичной волны. Для однопозиционной схемы эксперимента по рассеянию огибающая принятого сигнала записывается с точностью до постоянных множителей в виде [2, 5]

$$u(t) = \int h\,(t - t')\, a\,(t' - 2r/c)\, \mathrm{e}^{i2k_0 r}\, \frac{\delta\varepsilon\,(\mathbf{r}, t' - r/c)}{r^2}\, g(\mathbf{e}_r)\, d\mathbf{r}\, dt'. \tag{1}$$

Здесь $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$ – единичный вектор; $g(\mathbf{e}_r) = f_s(\mathbf{e}_r)\, f_i(\mathbf{e}_r)\, \mathbf{P}_s[\mathbf{e}_r\, [\mathbf{e}_r\, \mathbf{P}_i]]$; f_i, f_s – диаграммы направленности антенны; $\mathbf{l}_s$, $\mathbf{l}_i$ – единичные векторы поляризации антенны на прием и передачу соответственно; k_0 – волновое число зондирующего сигнала. Комплексная огибающая зондирующего сигнала $a(t)$ и передаточная функция приемника $h(t)$ имеют спектры, полосы которых удовлетворяют условию узкополосности: $\Delta\Omega_h, \Delta\Omega_a \ll k_0 c$. Данное уравнение получено в приближении дальней зоны антенны $r\,\lambda_0 \gg D^2$, где D – ее линейные размеры.

Соотношение (1) является исходным для получения радиолокационных уравнений метода обратного рассеяния, связывающих характеристики среды с параметрами излучающей и приемной систем. Обычно его не используют даже для предварительного анализа, а сразу переходят к квадратичным (энергетическим) характеристикам поля и сигнала [1, 2]. Однако представляет интерес исследовать общие свойства задачи с помощью исходного уравнения, поэтому рассмотрим (1) подробнее.

В рамках борновского приближения основным физическим механизмом формирования сигнала по пространству является рассеяние на пространственных гармониках $\delta\varepsilon$, удовлетворяющих принципу зеркальности и условию Вульфа–Брэгга [1, 5]. Поэтому предпочтительно установить явную связь рассеянного сигнала с Фурье-спектром флуктуаций. Сложность перехода к спектральному представлению обусловлена тем, что радар не находится в зоне Фраунгофера рассеивающего объема, который определяется диаграммой антенны, длительностями a, h и растет с ростом дальности r, поэтому здесь неприменима стандартная процедура приближенной замены сферического фронта волны на плоской во всем объеме рассеяния. При получении связи корреляционной функции сигнала с Фурье-спектром флуктуаций обычно предполагается [1, 2, 5], что пространственный радиус корреляции неоднородностей настолько мал, что в его пределах подобная замена правомерна. Покажем, что искомую связь можно установить, не используя дополнительных предположений.

Уравнение (1) задает связь между рассеянным сигналом и флуктуациями в пространственно-временном представлении. Согласно ему $u(t)$ есть результат усреднения $\delta\varepsilon$ по единичной сфере с весом g и сканирования узкополосным фильтром по переменным r, t'. При этом экспонента сдвигает полосу фильтрации в область высоких пространственных гармоник так, что вклад в сигнал дает лишь узкая часть спектра с $k \cong 2k_0$. В (1) функцию $\delta\tilde{\varepsilon}(\mathbf{r}, t) = \delta\varepsilon(\mathbf{r}, t)/r$ представим в виде интеграла Фурье по волновым векторам $\mathbf{k}$ и перепишем это соотношение в виде

$$u(t) = \int h\,(t - t')\, a\,(t' - 2r/c)\, \mathrm{e}^{i2k_0 r}\, dt'\, r dr \int I(\mathbf{k})\, \delta\tilde{\varepsilon}(\mathbf{k}, t' - r/c)\, d\mathbf{k}, \tag{2}$$

где

$$I(\mathbf{k}) = \int \exp\,(ir\mathbf{k}\,\mathbf{e}_r)\, g(\mathbf{e}_r)\, d\mathbf{e}_r. \tag{3}$$

При этом в интеграле (3) нам следует учитывать волновые векторы $k \cong 2k_0$.

Интеграл (3) можно вычислить двумерным методом стационарной фазы. Действительно, функция $g(\mathbf{e}_r)$ является медленно меняющейся по сравнению с экспонентой, поскольку характерный угловой размер диаграммы $\Delta\Theta \cong \lambda_0/D$. Метод применим при выполнении условия $(\Delta\Theta)^2 kr \gg 1$ [6], которое практически совпадает с условием применимости приближения дальней зоны $r\lambda_0 \gg D^2$, так как $k \cong 2k_0$. Таким образом, применяя метод стационарной фазы, мы остаемся в рамках приближений, в которых получено исходное уравнение (1). В первом приближении метода стационарной фазы получаем следующее выражение для (3):

$$I \approx 2\pi i/(kr)\, [g(-\mathbf{e}_k)\, \mathrm{e}^{-ikr} - g(\mathbf{e}_k)\, \mathrm{e}^{ikr}]. \tag{4}$$

Основным в (4) является первый член, поскольку второй имеет положительную фазу и при интегрировании по r практически не дает вклада в (2).

Подставляя (4) в (2) и переходя к спектральным представлениям всех функций, получаем выражение для спектра принятого сигнала:

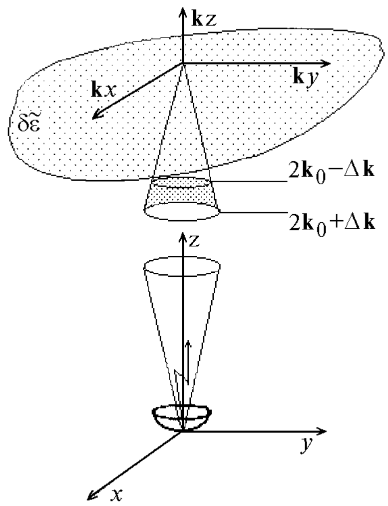
$$u(\omega) = 8\pi^3 i h(\omega) \int (2k_0 + (\omega + \nu)/\mathrm{c})\, a(\nu)\, d\nu \int g(-\mathbf{e}_k)\, \delta\tilde{\varepsilon}\, ((2k_0 + (\omega + \nu)/\mathrm{c})\, \mathbf{e}_k, \omega - \nu)\, d\mathbf{e}_k. \tag{5}$$

Данное уравнение определяет связь между рассеянным сигналом и характеристиками флуктуаций в спектральном представлении. Оно определяет в явном виде селективные свойства процесса зондирования:

1. Область частот анализируемых колебаний среды полностью определяется шириной полосы зондирующего сигнала и приемного фильтра и равна $\Delta\Omega = \Delta\Omega_h + \Delta\Omega_a$.

2. Условие зеркальности: вклад в рассеянный сигнал дают только те пространственные гармоники среды, направления волновых векторов которых лежат в створе углов, определяемом зеркальным отражением диаграммы направленности антенны.

3. Условие Вульфа–Брэгга: волновые числа флуктуаций $\delta\varepsilon$, дающие вклад в принимаемый сигнал, сосредоточены в области $2k_0 \pm \Delta k$, где $\Delta k = \Delta\Omega/c$. Характер селекции по волновым векторам изображен на рисунке.



Селективные свойства процесса рассеяния

Заключение

В статье рассмотрены свойства однократно рассеянного сигнала в случае однопозиционного зондирования. Предложенная процедура позволяет получить связь между линейной характеристикой поля – спектром принимаемого сигнала, и спектральными характеристиками флуктуаций среды, без введения дополнительных ограничений на свойства флуктуаций. Полученное с помощью этой процедуры уравнение является одной из форм записи борновского приближения и дает дополнительную информацию о свойствах однократного рассеяния. Оно в явной форме определяет селекцию свойств среды при зондировании: вклад в сигнал дает область **k**, направления которых лежат в створе углов, определяемом зеркальным отражением диаграммы антенны, а модули лежат между сферами с радиусами $2k_0 \pm \Delta k$; диапазон частот флуктуаций определяется шириной полосы излучаемого сигнала и приемного фильтра.

На основе полученных соотношений могут быть найдены радиолокационные уравнения однопозиционного зондирования атмосферы и ионосферы как для детерминированной постановки задачи диагностики среды, так и статистической, без ограничений на радиус пространственной корреляции флуктуаций.

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. Суни А.Л., Терещенко В.Д., Терещенко Е.Д., Худукон Б.З. Некогерентное рассеяние радиоволн в высокоширотной ионосфере. АН СССР: Апатиты, 1989. 182 с.
3. Foster J.C., Tetenbaum D. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N A2. P. 1251–1261.
4. St-Maurice J.P., Foster J.C., Holt J.M., del Pozo C. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. N A6. P. 6771–6798.
5. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. 464 с.
6. Федорюк М.В. Асимптотика: интегралы и ряды. М.: Наука, 1987. 544 с.

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
г. Иркутск

Поступила в редакцию
1 августа 1997 г.

O.I. Berngardt, A.P. Potekhin. **To Theory of Radio Signals Scattering in the Atmosphere.**

Properties of a single-scattered radio signal in the atmosphere and ionosphere are considered theoretically for the case of one-position sounding. A method of establishing a correspondence between the spectrum of the received signal and spectral characteristics of a medium fluctuations is proposed. Selective properties of the sounding process are analyzed.