

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ОТ АНИЗОТРОПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

А.К. Строев

АО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца», Москва, Россия  
ak.stroev@gmail.com

## MODELING THE RADAR SIGNALS SCATTERED FROM ANISOTROPIC IONOSPHERIC IRREGULARITIES

A.K. Stroeв

Joint Stock Company «Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute», Moscow, Russia  
ak.stroev@gmail.com

**Аннотация.** Описан метод моделирования неоднородной ионосферы с заданными статистическими характеристиками. Модель включает в себя рассеяние радиоволн на малоразмерных анизотропных ионосферных флуктуациях. Зависимость интенсивности рассеяния от угла наблюдения согласуется с литературными сведениями.

**Ключевые слова:** случайные поля, неоднородная ионосфера, высокоширотная ионосфера.

**Abstract.** The method of modeling the inhomogeneous ionosphere with given statistical characteristics is presented. The model includes scattering of radio waves by small anisotropic ionospheric fluctuations. The dependence of the scattering intensity on the observation angle is consistent with the literature data.

**Keywords:** random fields, inhomogeneous ionosphere, high-latitude ionosphere.

### ВВЕДЕНИЕ

При работе радиолокационной станции в полярном регионе часто наблюдаются так называемые авроральные отражения, представляющие собой радиолокационные отклики, не связанные с наличием летательных аппаратов или других представляющих интерес объектов. Причиной возникновения авроральных отражений являются ионосферные неоднородности. Как известно [Кравцов и др., 1983], ионосферные неоднородности в полярной области могут быть весьма интенсивными и сильно вытянуты вдоль магнитного поля. Из-за этого они могут создавать сильные радиолокационные отклики даже на достаточно высоких частотах. Механизм возникновения таких неоднородностей исследуется, например, в [Farley, 1963].

Кроме естественных неоднородностей, можно ожидать наличия искусственных, вызванных мощным электромагнитным излучением. Такие неоднородности также имеют весьма небольшой поперечный размер (до долей метра), в то время как их длина может достигать сотен метров и даже километров.

### МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Как показано в [Кравцов и др., 1983], отраженный от ионосферной неоднородности сигнал можно с точностью до постоянного коэффициента найти по формуле:

$$u(t) = \int v(\mathbf{r}) s\left(t - \frac{2R}{c}\right) \exp(2ikR) d^3\mathbf{r}, \quad (1)$$

где  $v$  — флуктуации диэлектрической проницаемости,  $R$  — расстояние от антенны до точки интегрирования. В данной работе не учитывается движение неоднородностей, так как используемые сигналы предполагаются достаточно короткими, а их доплеровский сдвиг не исследуется.

Простейшей моделью анизотропных неоднородностей является предложенная Букером [Booker, 1956] гауссовская модель со следующим спектром:

$$\Phi_\varepsilon(\mathbf{\kappa}) = \frac{l_\perp l_\parallel^2}{(2\pi)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)l_\perp^2 + \kappa_z^2 l_\parallel^2\right]\right\}. \quad (2)$$

Для нахождения отраженного сигнала необходимо провести моделирование реализации случайного поля  $v(\mathbf{r})$  с заданным энергетическим спектром. Возьмем за основу наиболее популярный в литературе метод моделирования случайных полей — метод фильтрации белого шума [Быков, 1971]. Поясним идею данного метода на примере моделирования одномерного случайного процесса, а затем обобщим результаты на трехмерный случай.

Наша задача — построить такой фильтр, который при подаче на вход белого шума даст на выходе случайный процесс с заданным спектром. Как известно из теории случайных процессов, энергетический спектр шума на выходе линейной системы равен произведению энергетического спектра входного шума на квадрат модуля передаточной функции:

$$G(\omega) = |K(i\omega)|^2 N_0, \quad (3)$$

где  $N_0$  — спектральная плотность входного белого шума. Следовательно, условию удовлетворяет фильтр со следующей передаточной функцией:

$$K(i\omega) = \sqrt{\frac{1}{N_0} G(\omega)}. \quad (4)$$

Импульсная характеристика такого фильтра будет

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int \sqrt{\frac{1}{N_0} G(\omega)} e^{i\omega t} d\omega. \quad (4)$$

Обобщая на трехмерный случай, получим следующее выражение для импульсной характеристики:

$$h(x, y, z) = \frac{1}{8\pi^3} \int \sqrt{\frac{1}{N_0} \Phi(\mathbf{\kappa})} \exp(i\mathbf{\kappa}\mathbf{r}) d^3\mathbf{\kappa}.$$

Реализация случайного поля может быть найдена как результат прохождения дельта-коррелированного гауссова шума через данный фильтр:

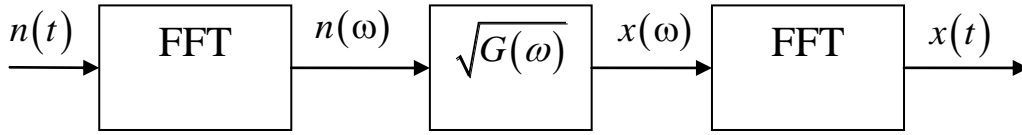


Рис. 1. Схема получения случайного процесса со спектральной плотностью на основе белого шума

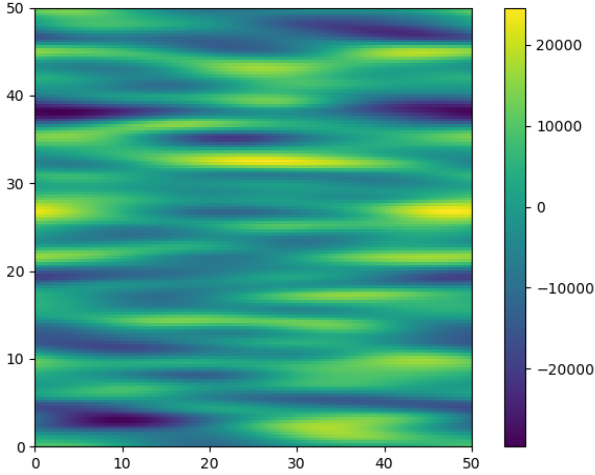


Рис. 2. Пример реализации случайного поля

$$\begin{aligned} \xi(x, y, z) = \\ = \sum \eta(x-i, y-j, z-k)h(i, j, k)dx dy dz. \end{aligned} \quad (5)$$

Для моделирования случайного поля со спектром (2) фильтр должен иметь спектральную переходную характеристику

$$\begin{aligned} K(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z) = \sqrt{\Phi(\mathbf{\kappa})} = \\ = \sqrt{8\pi^3 l_{\perp}^2 l_z} \exp\left[-\frac{1}{4}(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)l_{\perp}^2 - \frac{1}{4}\kappa_z^2 l_z^2\right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, импульсная характеристика фильтра будет

$$h(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{\pi^3 l_{\perp}^2 l_z}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{l_{\perp}^2} - \frac{z^2}{l_z^2}\right). \quad (7)$$

В данной работе для простоты фильтрация происходит в спектральной области без перехода к формуле **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Алгоритм моделирования в результате будет следующим:

1. создать реализацию белого шума;
2. при помощи БПФ перейти к реализации спектра;
3. умножить полученный спектр белого шума на спектральную характеристику фильтра (6), получив в результате реализацию спектра моделируемого случайного поля;
4. обратным БПФ перейти к реализации случайного поля.

Схема алгоритма моделирования изображена на рис. 1.

На рис. 2 приведен пример реализации случайного поля ионосферных флуктуаций (в плоскости OXZ). Интенсивность флуктуаций (стандартное отклонение) равно 104 см<sup>-3</sup>. На рис. 3 приведены нормиро-

ванные корреляционные функции вдоль осей X и Z. Пунктирной линией показана ожидаемая корреляционная функция, а сплошной — посчитанная из смоделированной реализации. Расстояния по обеим осям на рис. 2 и по оси абсцисс на рис. 3 указаны в метрах. На рис. 4 изображена спектральная плотность случайного поля вдоль осей X и Z. Волновое число вдоль оси абсцисс измеряется в м<sup>-1</sup>. Радиусы корреляции случайного поля на всех рисунках составляют соответственно 1 м вдоль осей X и Y и 10 м вдоль оси Z. Из рисунков видно, что качество моделирования случайного поля выбранным методом является приемлемым.

Перейдем теперь к численным оценкам интенсивности отражения от ионосферных неоднородностей. Для этого надо восстановить амплитудные множители в формуле (1):

$$\begin{aligned} u(t) = \frac{k^2 \exp(-i\omega t)}{4\pi} \times \\ \times \int \frac{f(\mathbf{r})}{R^2} v(\mathbf{r}) s\left(t - \frac{2R}{c}\right) \exp(2ikR) d^3\mathbf{r}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $f(\mathbf{r})$  — множитель диаграммы направленности антенны (в дальнейшем будем считать его равным единице),  $s(t)$  — комплексная огибающая излучаемого сигнала. Отклик от неоднородностей нужно сравнить с откликом от точечного объекта с заданной ЭПР  $\sigma$ :

$$u_0(t) = \frac{\sigma}{4\pi R^2} s\left(t - \frac{2R}{c}\right) \exp(2ikR) \exp(-i\omega t). \quad (8)$$

Как указано в [Кравцов и др., 1983], интенсивность флуктуаций электронной концентрации в ионосфере может достигать 104 см<sup>-3</sup>. Флуктуации электронной концентрации можно пересчитать во флуктуации диэлектрической проницаемости по формуле

$$v = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon_0} = 8.07 \cdot 10^7 \frac{N}{f^2}, \quad (9)$$

где флуктуации электронной концентрации  $N$  измеряются в см<sup>-3</sup>, а частота в герцах. Таким образом, чтобы рассчитать интенсивность отклика относительно объекта с заданной ЭПР, необходимо домножить результаты на

$$C = 8.07 \cdot 10^7 \frac{4\pi^2}{c^2} : 3.5 \cdot 10^{-4}.$$

На рис. 5 приведен пример нормированного отклика от участка неоднородной ионосферы, находящегося на расстоянии 100 км, в виде куба ребром 50 м с радиусами корреляции 1 и 10 м. По оси абсцисс указано расстояние в метрах относительно центра моделируемой области, а по оси ординат — отклик согласованного фильтра при единичной амплитуде излучаемого сигнала. В модели используется ЛЧМ-сигнал с поло-

сой 10 МГц на несущей 150 МГц.

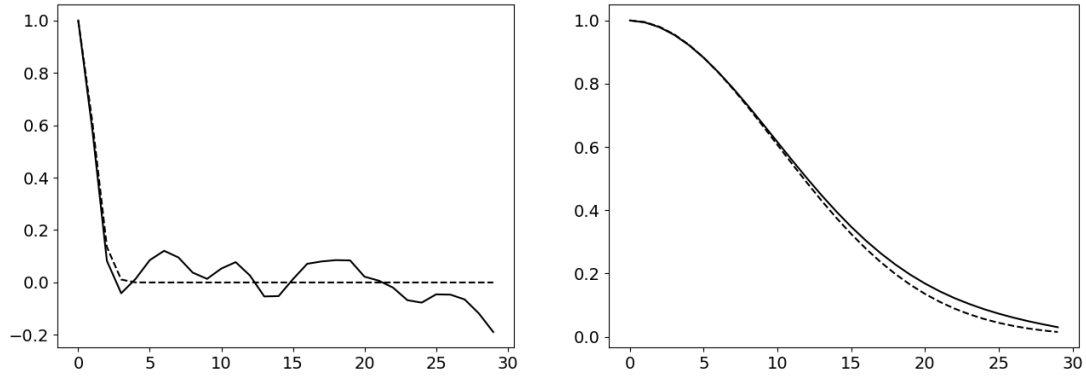


Рис. 3. Ожидаемые (пунктир) и полученные (сплошная линия) корреляционные функции вдоль осей X и Z

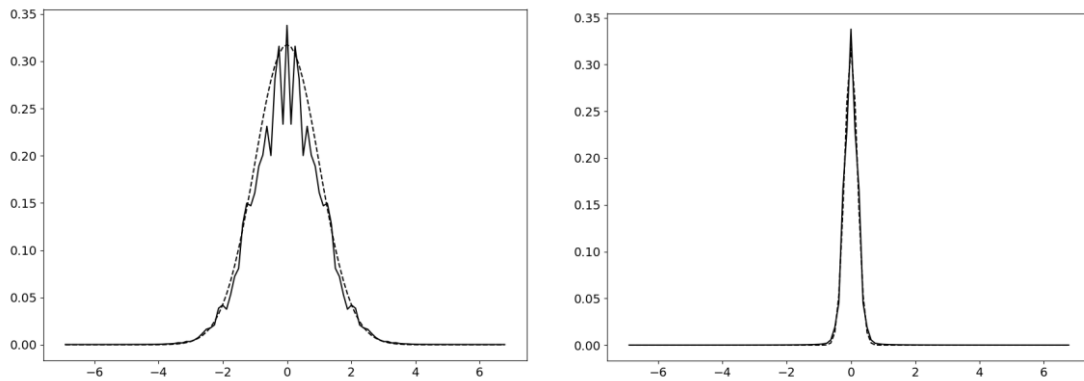


Рис. 4. Ожидаемая и полученная спектральная плотность моделируемых случайных полей вдоль осей X и Z

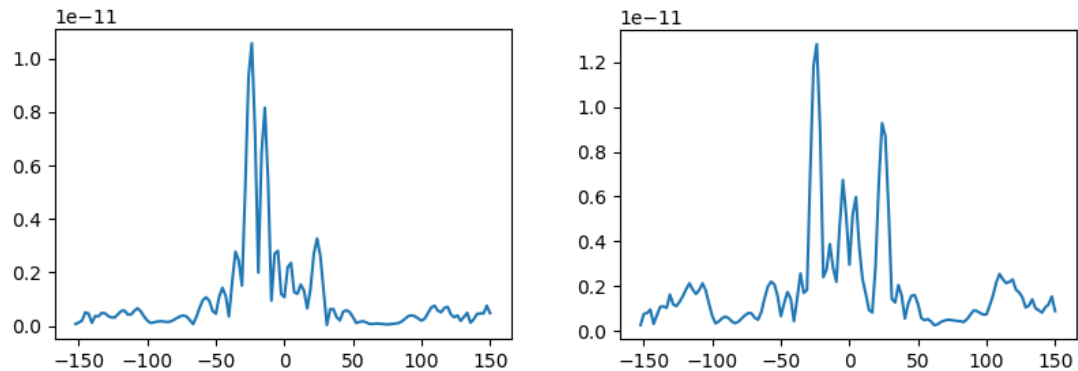


Рис. 5. Примеры отклика от участка неоднородной ионосферы

Известно, что при отражении от авроральных неоднородностей наблюдается так называемый ракурсный эффект — зависимость отклика от угла наблюдения. Исследуем данный эффект с помощью нашей модели. Средний отклик согласованного фильтра [Кравцов и др., 1983]:

$$\begin{aligned} \langle F^2(\tau) \rangle &= \frac{\pi k^4}{2} \times \\ &\times \int A(t') A\left(t' - \tau + \frac{2R}{c}\right) F_1\left(\tau - \frac{2R}{c}\right) \times \\ &\times \Phi_\varepsilon(\mathbf{k}, \mathbf{R}) dt' d^3\mathbf{R}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$F_1(\tau) = \int A(t'') A(t'' - \tau) dt''. \quad (11)$$

Здесь  $F_1(\tau)$  — автокорреляционная функция сигнала,  $\mathbf{k}$  — локальный вектор рассеяния. Пусть теперь поле флуктуаций диэлектрической проницаемости однородно в пределах рассматриваемой области  $V$  и равно нулю вне ее. Тогда

$$\langle F^2(\tau) \rangle = \frac{\pi k^4}{2} \Phi_\varepsilon(\mathbf{k}) \int_V F_1^2\left(\tau - \frac{2R}{c}\right) d^3\mathbf{R}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что можно ввести удельную ЭПР участка неоднородной ионосферы по формуле

$$\sigma_V = \frac{\pi k^4}{2} \Phi_\varepsilon(\mathbf{k}). \quad (13)$$

Рассчитаем зависимость удельной ЭПР от угла наблюдения в нашей модели. Результаты для частот 150, 300 и 450 МГц приведены на рис. 6–8. Синей ли-

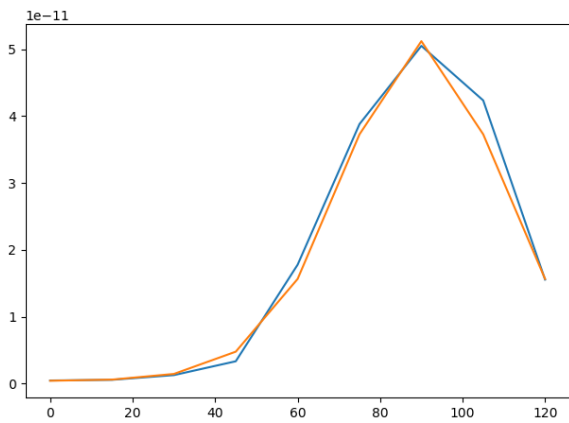


Рис. 6. Зависимость удельной ЭПР от угла наблюдения на частоте 150 МГц

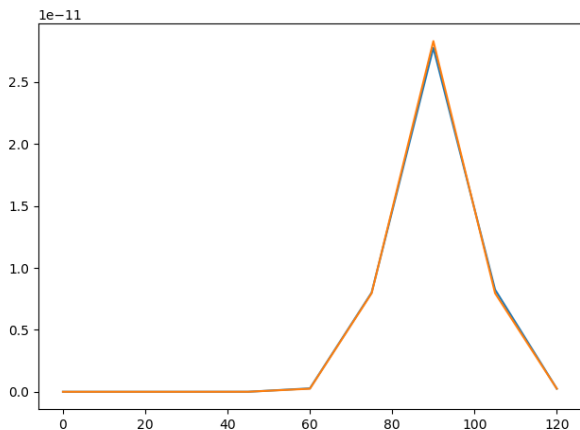


Рис. 7. Зависимость удельной ЭПР от угла наблюдения на частоте 300 МГц

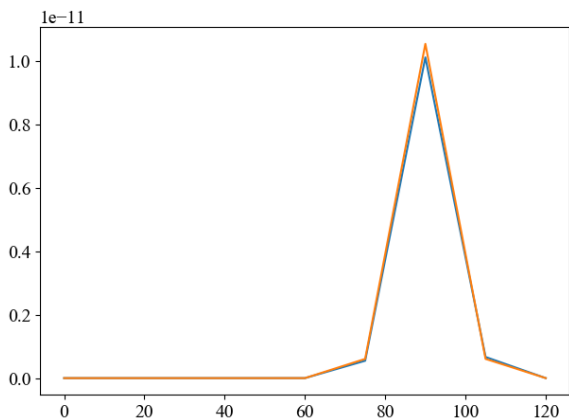


Рис. 8. Зависимость удельной ЭПР от угла наблюдения на частоте 450 МГц

нией изображена модельная ЭПР, оранжевой — теоретически ожидаемая. Усреднение проводилось по 50 реализациям. Для ускорения расчета размер моделируемого участка был уменьшен до 20 м. Радиусы корреляции были уменьшены до 0.1 и 0.5, так как иначе обратное рассеяние оказывается слишком слабым, так что начинают сказываться вычислительные погрешности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель, позволяющая моделировать отражение от анизотропных случайных неоднородностей ионосферы. Такая модель будет полезна при исследовании работы РЛС в полярном регионе. Корректность работы программы подтверждается статистическими характеристиками моделируемого случайного поля, а также возможностью наблюдать ракурсный эффект.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. Советское радио, 1971. 328 с.
- Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
- Booker H.G. A theory of scattering by nonisotropic irregularities with applications to radar reflection from the aurora // J. Atmos. Terr. Phys. 1956. V. 8, N 2, P. 204.
- Farley Jr, D.T. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere // J. Geophys. Res. 1963. V. 68, N 22. P. 6083–6097.