

**Влияние отклонения луча на неоднородностях при  
распространении сверхширокополосного сигнала через ионосферу.**

*А.К. Строев*

Московский физико-технический институт (государственный  
университет)

Открытое акционерное общество «Радиотехнический институт имени  
академика А.Л.Минца»

В настоящее время для достижения высокого разрешения по дальности все более активно применяются широкополосные и сверхширокополосные сигналы. Такие сигналы, даже при достаточно короткой длине волны (дециметры) испытывают существенные дисперсионные искажения при распространении через ионосферу. Одним из возможных мешающих эффектов, требующих изучения, является отклонение луча на ионосферных неоднородностях. Поскольку разные гармоники сигнала отклоняются на разную величину, этот эффект может приводить к нарушению структуры сигнала и затруднять его когерентную обработку.

Для нахождения траектории сигнала применим метод теории возмущений к лучевым уравнениям геометрической оптики [1]:

$$\frac{dr}{d\sigma} = \vec{l} \quad (1)$$

$$\frac{dl}{d\sigma} = \frac{\nabla \varepsilon - \vec{l}(\vec{l}, \nabla \varepsilon)}{2\varepsilon} \quad (2)$$

Малым параметром в данном случае является поправка к диэлектрической проницаемости. Будем ограничиваться нулевым и первым приближением, для которых:

$$\frac{dl_0}{d\sigma} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dr_0}{d\sigma} = l_0 \quad (4)$$

$$\frac{dl_1}{d\sigma} = \frac{\nabla v - \vec{l}_0(l_0, \nabla v)}{2\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\frac{dr_1}{d\sigma} = l_1 \quad (6)$$

Решение данной системы уравнений:

$$r = \sigma \vec{l}_0 + \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_0^\sigma (\sigma - \sigma') \left[ \vec{\nabla} v - \vec{l}_0(\vec{l}_0, \vec{\nabla} v) \right]' d\sigma' \quad (7)$$

Рассмотрим случай плоской волны, распространяющейся от плоскости  $(\xi, \eta)$  вдоль оси  $z$ :

$$\begin{aligned} x &= \xi + \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_0^\sigma (\sigma - \sigma') \frac{\partial v(\xi, \eta, \sigma')}{\partial x} d\sigma' \\ y &= \eta + \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_0^\sigma (\sigma - \sigma') \frac{\partial v(\xi, \eta, \sigma')}{\partial y} d\sigma' \\ z &= \sigma \end{aligned} \quad (8)$$

Эйконал находится по формуле:

$$\varphi(x, y, z) = \varphi_0 + z\sqrt{\varepsilon_0} + \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \int_0^\sigma v \left[ x - \Delta x(x, y, z'), y - \Delta y(x, y, z'), z' \right] dz', \quad (9)$$

где  $\Delta x, \Delta y$  – отклонение луча, которое находим из уравнений (8):

$$\begin{aligned} \Delta x(x, y, z') &= \int_0^{z'} (z' - z'') \frac{\partial v(x, y, z'')}{\partial x} dz'', \\ \Delta y(x, y, z') &= \int_0^{z'} (z' - z'') \frac{\partial v(x, y, z'')}{\partial y} dz''. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим случай гауссовой неоднородности:

$$v(x, y, z) = v_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}{l^2}\right) \quad (11)$$

Тогда отклонение луча задается формулой:

$$\Delta x(x, y, z') = \frac{xv_0}{l} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + 2z_0^2 + z'^2}{l^2}\right) \times \left\{ \begin{aligned} & -l \exp\left(\frac{z_0(z_0 + 2z')}{l^2}\right) + \\ & + \exp\left(\frac{z_0^2 + z'^2}{l^2}\right) \left[ l + \sqrt{\pi} (z_0 - z') \exp\left(\frac{z_0^2}{l^2}\right) \left( \operatorname{Erf}\left(\frac{z_0}{l}\right) - \operatorname{Erf}\left(\frac{z_0 - z'}{l}\right) \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Рассчитаем отклонение луча для  $z_0 = 1000$  км,  $l = 100$  км,  $v_0 = \frac{0.9 \cdot 10^4 N}{f^2} \approx 10^{-6}$  (частота порядка 100 МГц, концентрация электронов в неоднородности порядка  $10^6 \text{ см}^{-3}$ ) на расстоянии 100 км от центра неоднородности. Результаты приведены на графиках (Рис. 1–3).

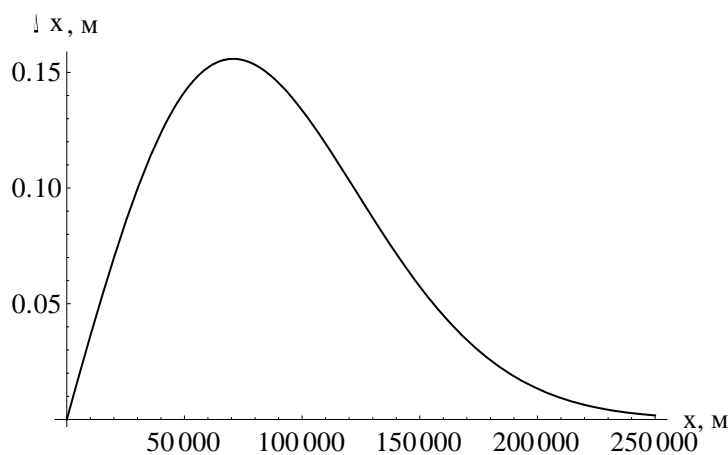


Рис. 1. Отклонение луча в зависимости от начального смещения.

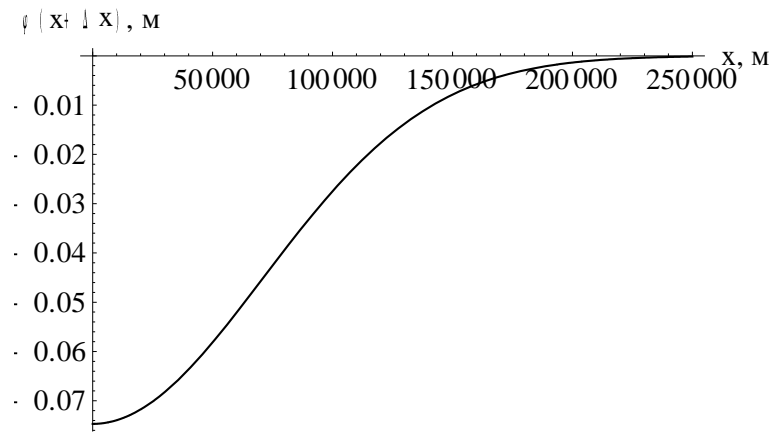


Рис. 2. Поправка к эйконалу за счет неоднородности

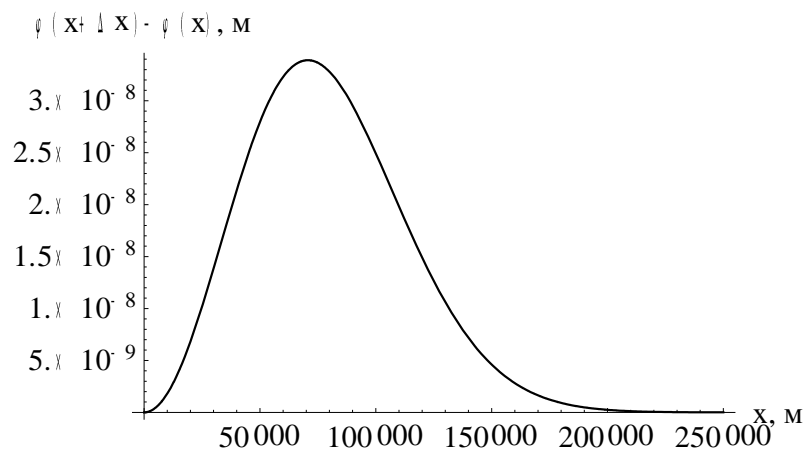


Рис. 3. Поправка к эйконалу за счет отклонения луча

Как видно, даже для сигнала метрового диапазона и при высокой электронной концентрации в неоднородности отклонение луча на масштабах порядка 100 км много меньше как длины волны, так и вероятного размера наблюдаемых объектов. Поправка к эйконалу за счет такого отклонения незначительна и не будет существенно влиять на обработку полученного сигнала. Таким образом, при наблюдении не слишком удаленных объектов данным эффектом можно пренебречь. Основными будут другие эффекты, такие, как дисперсионное расплывание импульса. Однако, описанный в работе эффект может оказаться существенным в следующих случаях:

1. Распространение через несимметричную неоднородность (например, вытянутую вдоль луча)
2. Наблюдение за существенно удаленным объектом

### 3. Рассеяние на множестве неоднородностей

Вопрос оценки и компенсации искажений в этих случаях требует отдельного изучения.

#### **Литература**

1. *Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.