

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОШИБКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ РЕФРАКЦИИ В ТРОПОСФЕРЕ НА ТРАССЕ ГИСЗ – ЗЕМЛЯ**

Д. Д. Халамейда

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [hdd78@mail.ru](mailto:hdd78@mail.ru)*

Рассмотрена возможность применения интерферометра, принимающего радиосигнал с геостационарного искусственного спутника Земли (ГИСЗ), для измерения интегрального по трассе градиента коэффициента преломления тропосферы в рамках экспоненциальной модели тропосферы. Приведены факторы, влияющие на точность измерений угла прихода, такие как шумы приемника, нестабильность положения фазового центра антенн, изменение свойств фидерного тракта, и проведена их оценка. Рассмотрены требования к различным характеристикам интерферометра. Ил. 18. Библиогр.: 27 назв.

**Ключевые слова:** рефракция, интерферометр, геостационарный спутник.

Исследование рефракции электромагнитных волн (ЭМВ) в тропосфере широко обсуждалось во многих работах [1-13]. Это связано с существенным влиянием ее на распространение ЭМВ различных диапазонов посредством искривления траектории распространения радиоволны. Поэтому наблюдаемое положение источника излучения отличается от истинного, а время задержки сигнала увеличивается.

Рефракционные свойства тропосферы описываются высотным профилем коэффициента преломления, для измерения которого используются контактные [14, 15] и бесконтактные [1-6, 9-12, 15-17] (дистанционные) методы. В первом случае для измерения используются данные о температуре, давлении и влажности атмосферы, а также непосредственные измерения с помощью рефрактометра, установленного на борту летательного аппарата. Во втором случае рефракционные свойства определяются косвенно, используя параметры зондирующего сигнала. Решается обратная задача для нахождения высотного профиля коэффициента преломления.

В практических приложениях часто достаточно использовать оценки параметров стандартных моделей высотного профиля тропосферы. В частности, широко применяется экспоненциальная модель тропосферы [17]

$$n(h) = 1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta n_0 = n_0 - 1$ ;  $n_0$  – приземный коэффициент преломления;  $g_n$  – градиент. Достаточно измерить значение приземного коэффициента прелом-

ления  $n_0$ , значение коэффициента преломления  $n_h$  на некоторой высоте и найти градиент [18]

$$g_n = \frac{N_0 \cdot 10^{-6}}{h} \ln\left(\frac{N_h}{N_0}\right), \quad (2)$$

где  $N = (n - 1) \cdot 10^6$  – приведенный показатель преломления, для чего используются датчики температуры  $T$ , давления  $p$  и влажности  $e$  [19]

$$N = \frac{0,776}{T} \left( P + \frac{4810e}{T} \right). \quad (3)$$

Погрешность определения приведенного показателя преломления  $\Delta N$  соответствует погрешности измерения градиента  $\Delta g$

$$\Delta g = \frac{N_0 10^{-6}}{N(h) \cdot h} \cdot \Delta N, \quad (4)$$

которая зависит от высоты  $h$ . На рис. 1 показана зависимость погрешности измерения градиента  $\Delta g$  от высоты для заданной погрешности измерения приведенного показателя преломления  $\Delta N = \pm 1$  ед., рассчитанная в соответствии с выражением (4).

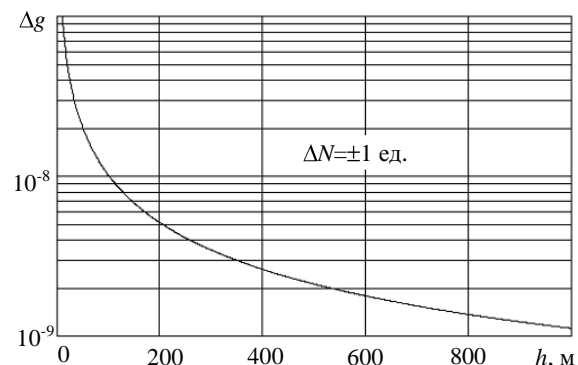


Рис. 1. Погрешность измерения градиента коэффициента рефракции  $g$

В условиях стандартной атмосферы погрешность оказывается недопустимо большой  $\approx 4 \cdot 10^{-8}$ , в связи с чем необходимо применять мачты высотой в сотни метров даже для предельно достижимой точности измерения приведенного показателя преломления  $\Delta N = \pm 0,1$  ед. Это достаточно жесткое требование, в связи с чем представляет интерес использование дистанционных методов измерения градиента показателя преломления.

Поэтому было предложено [2] использовать радиоинтерферометр для измерения градиента путем определения угла прихода сигналов, излучаемых геостационарным спутником. Траектория луча в неоднородно-слоистой тропосфере зависит от рефракционных свойств тропосферы, как показано на рис. 2, где введены обозначения [17]:  $\beta$  – угол полной рефракции (угол между касательными к лучу в точках передачи и приема);  $\chi$  – угол фотограмметрической рефракции;  $\delta = \alpha_a - \alpha_v$  – угол истинной рефракции (рефракционная ошибка);  $\alpha_a$  – угол прихода;  $\alpha_v$  – угол места спутника.

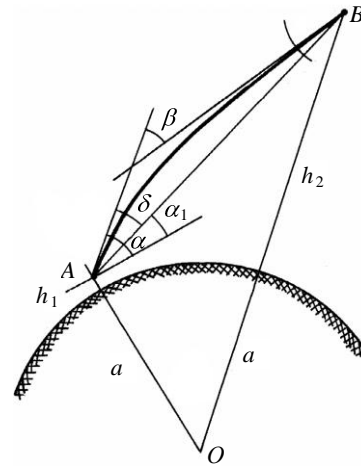


Рис. 2. Ход лучей в тропосфере:  $a$  – радиус Земли;  $A$  – приемная антенна;  $B$  – геостационарный спутник Земли

Углы рефракции связаны соотношением  $\beta = \delta + \chi$ , которое для достаточно удаленного источника ( $h_2 > 100$  км) переходит в  $\beta = \delta$ , когда  $\chi = 0$ . В общем случае рефракционная ошибка записывается в виде [17]

$$\delta = \alpha_a - \alpha_v = -\frac{1}{2} n \epsilon_A \left(1 + \frac{h_A}{a}\right) \cos \alpha_a \int_{h_{A1}}^{h_c} \frac{\frac{\partial n}{\partial h} dh}{\sqrt{n^2 \epsilon_A \left(1 + \frac{h}{a}\right)^2 - n^2 \epsilon_A \left(1 + \frac{h_A}{a}\right)^2 \cos^2 \alpha_a}}, \quad (5)$$

где  $a$  – радиус Земли;  $h_A$  и  $h_C$  – высота установки антенн рефрактометра и орбиты спутника. Ограничивая рассмотрение экспоненциальной моделью тропосферы, используем выражение (1) для профиля показателя преломления и его производной в виде

$$\frac{\partial n}{\partial h} = g_n \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right), \quad (6)$$

что позволяет рассчитать ожидаемое значение рефракционной ошибки.

Таким образом, для нахождения градиента показателя преломления достаточно решить

интегральное уравнение (5) по данным измерения угла прихода –  $\alpha_a$ , угла места –  $\alpha_v$  и коэффициента преломления  $n_0$  (4). При этом угол места спутника  $\alpha_v$  вычисляется с использованием существующих методов траекторного анализа [20-22] и программного продукта *Trakstar* [20].

Схема радиоинтерферометра в общем виде содержит две антенны (рис. 3), сигналы с выхода которых подаются на волноводный тройник ВТ, в одном из плеч которого установлен переменный фазовращатель ФВ, а затем разностный сигнал с выхода ВТ поступает на квадратичный детектор КД.

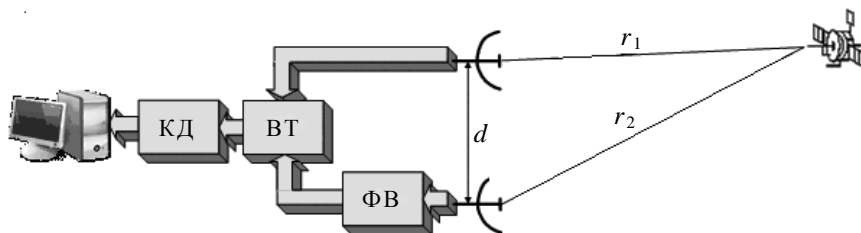


Рис. 3. Структурная схема интерферометра

Выходной сигнал детектора обрабатывается с помощью персонального компьютера. Длина плеч интерферометра равняется  $L_1$  и  $L_2$ , а разность хода приходящих лучей составляет  $\Delta L$ , что соответствует разности фаз  $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda}$ ,  $d$  – база интерферометра. Тогда равенство электрических длин плеч соответствует направлению на источник, а при изменении настройки фазовращателя можно, в определенных пределах, сканировать положение пеленга в пространстве.

Рассматривая прохождение сигнала в схеме (рис. 3), можно показать, что сигнал на выходе фазового детектора записывается в виде

$$U = U_0 \left[ F_1(\alpha_a) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} - F_2(\alpha_a) \frac{e^{-j(k r_2 + \Delta\varphi)}}{r_2} \right], \quad (7)$$

где  $F_{1,2}(\vartheta)$  – диаграмма направленности (ДН) антенн интерферометра;  $\Delta\varphi$  – сдвиг фаз в фазовращателе;  $r_{1,2}$  – длины лучей от спутника до обеих антенн;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны. Опуская громоздкие выкладки, запишем выражение для зависимости мощности на выходе фазового детектора от параметров интерферометра в виде

$$P_d = P_0 F_1^2(\vartheta) \left[ 1 + \left( \frac{F_2(\vartheta)}{F_1(\vartheta)} \right)^2 - 2 \frac{F_2(\vartheta)}{F_1(\vartheta)} \cos \Phi \right]; \quad (8)$$

$$\Phi = kd \sin \theta + \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_\phi, \quad (9)$$

где  $P_0$  – константа, зависящая от дальности, усиления в каналах интерферометра и др.;  $\Delta\varphi_k$  – разность набег фаз в фидерном тракте интерферометра;  $\Delta\varphi_\phi$  – фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем. В случае идентичных антенн  $F_1(\vartheta) \equiv F_2(\vartheta) \equiv F(\vartheta)$  выражение (8) существенно упрощается и преобразуется в известное соотношение

$$P_d = 2P_0 F^2(\vartheta) [1 - \cos \Phi]. \quad (10)$$

Для антенн апертурного типа с круглым раскрывом и осесимметричным спадающим распределением поля ДН хорошо аппроксимируется выражением [23]

$$F_a = F_0 \Lambda_2 \left( \frac{kD_a}{2} \sin \theta \right), \quad (11)$$

где  $F_0$  – нормирующий множитель;  $\Lambda_2$  – лямбда-функция первого порядка [23]. На рис. 4 (гладкая кривая) приведена нормированная ДН интерферометра (8) ( $d = 50\lambda_0$ ,  $D = 20\lambda_0$ ,  $L_1 = L_2$ ,  $\Delta\varphi_{ФВ} = 0$ ). Как видно, быстро осциллирующая компонента, обусловленная интерференцией из-

лучения антенн, разнесенных на расстояние  $d$ , промодулирована ДН отдельной антенны (штрихпунктир). Как было отмечено выше, в направлении оси интерферометра формируется нуль, положение которого зависит от фазовых соотношений в плечах интерферометра.

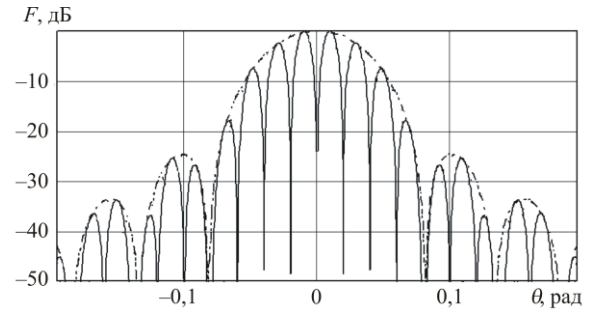


Рис. 4. Диаграмма направленности интерферометра

Например, при изменении фазового сдвига  $\Delta\varphi_\phi$ , вносимого фазовращателем, положение

нуля смещается на угол  $\Delta\theta = \arcsin \frac{\lambda \Delta\varphi_\phi}{2\pi d}$ . Поэтому, изменяя фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем, можно измерить пеленгационную характеристику интерферометра при постоянном положении источника (рис. 5), минимум которой в точности соответствует углу прихода  $\alpha_a$ .

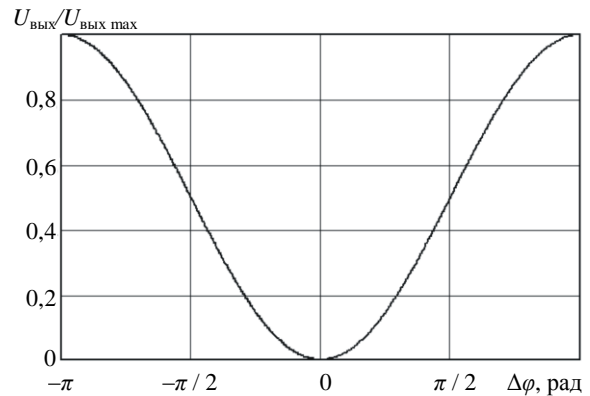


Рис. 5. Пеленгационная характеристика интерферометра

Чтобы оценить требования к точности измерения углов прихода, на рис. 6 приведена зависимость рефракционной ошибки  $\delta = \alpha_a - \alpha_v$  от градиента  $g_n$  для различных величин приземного показателя преломления  $n_0$ . При этом пределы изменения градиента на суше и приземного коэффициента преломления выбирались на основании данных работы [17]:  $g_n \in [3 \cdot 10^{-8}, -5 \cdot 10^{-8}] \text{ м}^{-1}$ ,  $N_0 \approx [70 \div 350] \text{ N ед}$ . Как видно, рефракционная

ошибка изменяется в пределах  $\leq 1$  угл. мин. при изменении градиента показателя преломления в пределах  $(-3 \div -4,5) \cdot 10^{-8}$ , в связи с чем точность измерения угла прихода должна быть не хуже  $\pm 0,1$  угл. мин. Так как угол места спутника линейно входит в выражение для рефракционной ошибки  $\delta = \alpha_a - \alpha_v$ , требования к точности измерения угловых координат спутника также должны быть не хуже  $\pm 0,1$  угл. мин.

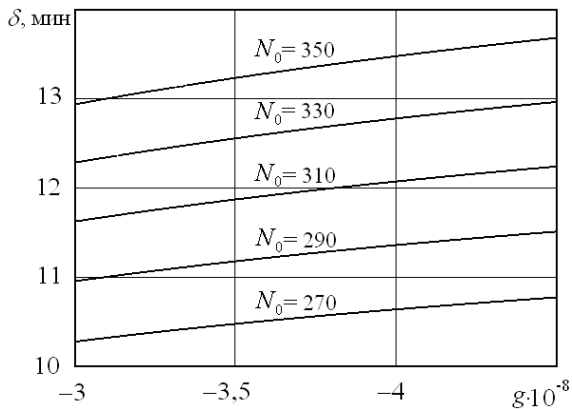


Рис. 6. Зависимость рефракционной ошибки от градиента показателя преломления

Анализ рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что точность измерения приземного коэффициента преломления должна быть лучше  $\pm 1 N$  ед., что соответствует точности серийно выпускаемого измерительного метеорологического оборудования.

Таким образом, необходимая точность измерения углов прихода является достаточно высокой, в связи с чем рассмотрим требования, которым должна отвечать аппаратура радиointерферометра. В общем случае, когда отдельные составляющие погрешности измерения некоррелированы, точность пеленгации удаленного источника можно записать в виде

$$\delta_\gamma = \sqrt{\delta_{ш}^2 + \delta_a^2 + \delta_\phi^2 + \delta_c^2 + \delta_n^2}, \quad (12)$$

где  $\delta_{ш}$  – погрешность измерений, обусловленная влиянием шумов приемника;  $\delta_a$  – погрешность измерений, обусловленная нестабильностью положения фазового центра антенн (ветровое воздействие, механические факторы и др.);  $\delta_\phi$  – погрешность измерений, обусловленная нестабильностью параметров фидерного тракта;  $\delta_c$  – погрешность измерений в связи с неточностью определения положения спутника на орбите;  $\delta_n$  – погрешность измерения вследствие многолучевого распространения. Рассмотрим составляющие погрешности измерения по отдельности.

**1. Погрешность измерений, обусловленная влиянием шумов приемника  $\delta_{ш}$ ,** определяется в основном смещением минимума пеленгационной характеристики вследствие влияния флуктуационной составляющей сигнала с выхода приемного устройства. Используя результаты работы [25], можно показать, что в рассматриваемом случае выражение для погрешности измерений, обусловленной влиянием шумов приемника, записывается в виде

$$\delta_{ш} = \Delta\theta_{ин} \frac{2}{\pi\sqrt{R_m}}, \quad (13)$$

где  $\Delta\theta_{ин} \approx 1,03 \frac{\lambda}{d}$  – ширина интерференционного лепестка по уровню половинной мощности;

$R_m = 2L_p L_m \left( \frac{S}{N} \right)$  – энергетический коэффициент;

$L_p$  – коэффициент потерь, связанный с формой пеленгационной характеристики;  $L_m$  – коэффициент потерь, обусловленный несовершенством согласованной фильтрации;

$\left( \frac{S}{N} \right)$  – отношение сигнал/шум.

В рассматриваемом случае  $L_p \approx 2$ ,  $L_m \approx 1,26$ , а результаты расчета нормированного значения точности пеленгации  $\bar{\delta}_{ш} = \frac{\delta_{ш}}{\Delta\theta_{0,5}}$

приведены на рис. 7. В частном случае, при  $d \approx 50\lambda$ , требуемая точность пеленгации  $\delta_{ш} \leq 0,05$  угл. мин. достигается при отношении сигнал/шум более  $30 \div 40$  дБ.

В частном случае, при  $d \approx 50\lambda$ , требуемая точность пеленгации  $\delta_{ш} \leq 0,05$  угл. мин. достигается при отношении сигнал/шум более  $30 \div 40$  дБ.

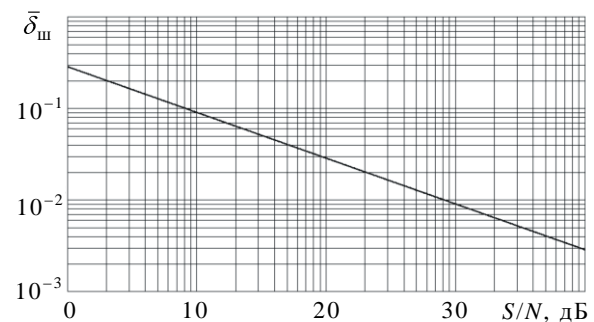


Рис. 7. Влияние шумов приемника на точность пеленгации

**2. Погрешность измерений, обусловленная нестабильностью положения фазовых центров антенн,** связана с влиянием механических факторов, включая ветровые нагрузки, которые приводят к смещению взаимного положения антенн и появлению дополнительного фазового сдвига  $\Delta\varphi_A$ . Можно показать, что среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности измере-

ния угла прихода определяется выражением  $\delta_a = \arcsin \frac{\delta_r}{d}$ , где  $\delta_r$  – СКО положения фазовых центров антенн. На рис. 8 приведены результаты расчетов, которые показывают, что требования к стабильности взаимного положения антенн возрастают при уменьшении его базы. Например, для базы  $d = 4$  м и длины волны  $\lambda_0 = 8$  см ( $d = 50 \lambda_0$ ) необходимо обеспечить СКО положения фазовых центров антенн с точностью  $\leq 0,051$  мм ( $\delta_a \leq 0,05$  угл. мин.).

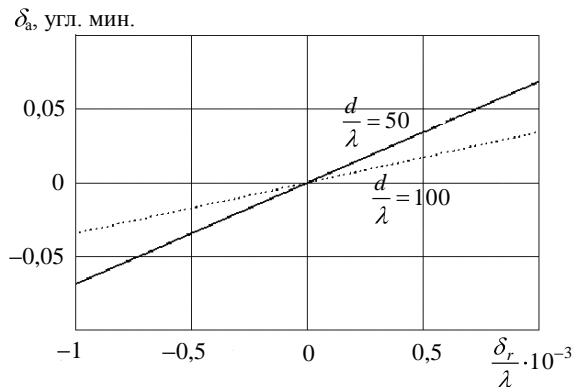


Рис. 8. Влияние флуктуаций положения фазового центра антенны на точность пеленгации

Анализ показывает, что неточная ориентация электрических осей антенн, как и неидентичность их ДН, существенно не влияет погрешность измерений угла прихода.

**3. Погрешность измерений, обусловленная изменением параметров фидерного тракта  $\delta_\phi$**  связана преимущественно с удлинением фидера  $\Delta l = \alpha \Delta T l$  при изменении температуры окружающей среды  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$  ( $l$  – длина фидера,  $\alpha$  – температурный коэффициент удлинения). При этом вносимая фазовая ошибка равна  $\Delta \phi_l = \beta \Delta l$ , где  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$  – постоянная

распространения в фидере;  $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{K}$  – длина волны в фидере;  $K$  – коэффициент укорочения фидера. Можно показать, что изменение угла прихода, связанное с температурным удлинением фидерного тракта, определяется выражением  $\delta_\phi = \arcsin \left[ K \alpha_M \delta_T \frac{l_1 - l_2}{d} \right]$ , где  $\delta_T$  – СКО изменения температуры окружающей среды ( $K = 1,56$ ;  $\delta_T = 25$  К);  $l_1$  и  $l_2$  – длины фидеров первого и второго плеча.

При равенстве длин соединительных кабелей каналов интерферометра влияние изменения температуры практически отсутствует, что важно при практической реализации интерферо-

метра. Однако в случае кабелей разной длины погрешность определения угла прихода может достигать заметной величины.

**4. Погрешность измерения, обусловленная многолучевым распространением  $\delta_\Pi$** . Выше рассмотрена работа интерферометра в свободном пространстве. В реальных условиях, когда антенны интерферометра установлены на конечной высоте, необходимо учитывать влияние подстилающей поверхности, которое состоит в формировании дополнительного канала приема вследствие наличия отраженного луча (рис. 9).

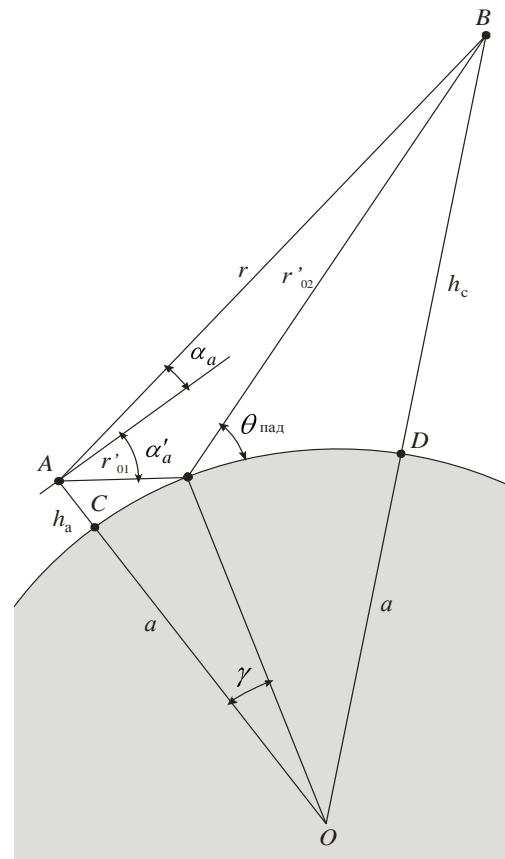


Рис. 9. Геометрия траектории распространения при многолучевом распространении

Здесь использованы следующие обозначения:  $A$  – приемная антенна;  $B$  – передающая антенна;  $\alpha_a$  – угол места спутника;  $\alpha'_a$  – угол прихода отраженного луча;  $h_a$  – высота антенны от поверхности Земли;  $h_c$  – высота спутника;  $r_{01}$ ,  $r_{02}$  – расстояния от приемной и передающей антенны до точки отражения;  $a$  – радиус Земли.

Работа интерферометра с учетом влияния подстилающей поверхности поясняется на рис. 10, где  $r_1, r_2, r'_1, r'_2$  – длины прямых и отраженных лучей;  $\Delta r, \Delta r'$  – разность хода прямых и отраженных лучей.

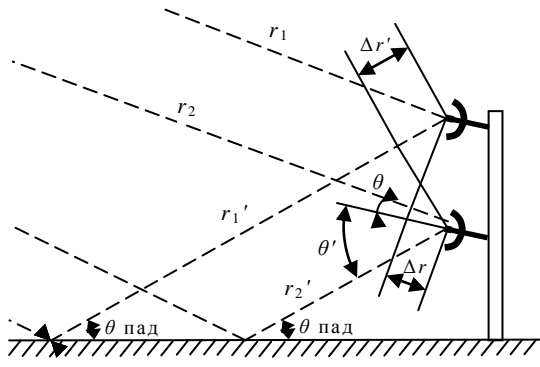


Рис. 10. Влияние подстилающей поверхности

В этом случае выражение для сигнала на выходе фазового детектора (7) заметно усложняется и в случае идентичных антенн принимает вид

$$I_d = I_0 \left| \frac{F(\theta) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} + \dot{\Gamma}_{\text{эф}} F(\theta') \frac{e^{-jk r_1'}}{r_1'} - F(\theta) \frac{e^{-j\langle r_2 + \Delta\varphi \rangle}}{r_2} - \dot{\Gamma}_{\text{эф}} F(\theta') \frac{e^{-j\langle r_2' + \Delta\varphi \rangle}}{r_2'}}{2} \right|^2, \quad (14)$$

где  $\dot{\Gamma}_{\text{эф}}$  – эффективное значение комплексного коэффициента отражения подстилающей поверхности;  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_\phi$ . При отсутствии отражений  $|\dot{\Gamma}_{\text{эф}}| = 0$  выражение (14) переходит в (7), которое соответствует свободному пространству. Аналогичный предельный переход имеет место также в том случае, когда угол прихода отраженного луча  $\alpha'_a$  существенно больше ширины ДН антенны интерферометра по уровню половинной мощности  $\alpha'_a \gg \Delta\theta_a$ , чему соответствует  $F(\alpha'_a) \rightarrow 0$ .

Запишем выражение для мощности сигнала на выходе фазового детектора в виде

$$P_d = 2P_0 \{ A + B + C \}, \quad (15)$$

где

$$A = F^2 \{ \cos(k\Delta r + \psi) \};$$

$$B = |\dot{\Gamma}|^2 F^2 \{ \cos(\Delta r' + \psi) \};$$

$$C = |\dot{\Gamma}| F \{ \begin{matrix} \cos \langle (r_1 - r_1') - \varphi_\Gamma \rangle \\ + \cos \langle (r_2 - r_2') - \varphi_\Gamma \rangle \\ - \cos \langle (r_1 - r_2') + \psi - \varphi_\Gamma \rangle \\ - \cos \langle (r_2 - r_1') - \psi - \varphi_\Gamma \rangle \end{matrix} \};$$

$$\psi = \beta \Delta l + \Delta\varphi.$$

Как и ранее при отсутствии подстилающей поверхности ( $|\dot{\Gamma}_{\text{эф}}| = 0$ ) выражение (15) переходит в выражение (10) для свободного пространства. В частности, на рис. 11 приведен при-

мер численного моделирования влияния подстилающей поверхности на ДН интерферометра (15) ( $h_a = 50$  м;  $h_c = 36000$  км;  $|\dot{\Gamma}| = 0,8$ ;  $\varphi_\Gamma = 0$ ;  $\alpha_a = 4,4^\circ$ ;  $d = 4$  м;  $D = 1,5$  м;  $\lambda = 8$  см). Отражения от подстилающей поверхности приводят к изрезанности ДН интерферометра и, как следствие, к смещению минимума пеленгационной характеристики интерферометра (рис. 12). Гладкая кривая – соответствует свободному пространству, пунктир – подстилающей поверхности. Данные рассчитаны для значений параметров, как и в предыдущем случае (рис. 5).

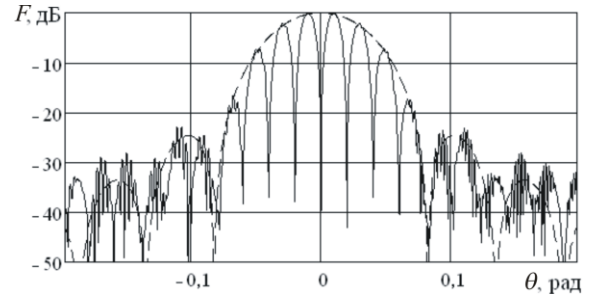


Рис. 11. Влияние подстилающей поверхности на ДН интерферометра ( $|\dot{\Gamma}| = 1$ ,  $\varphi_\Gamma = 0$ )

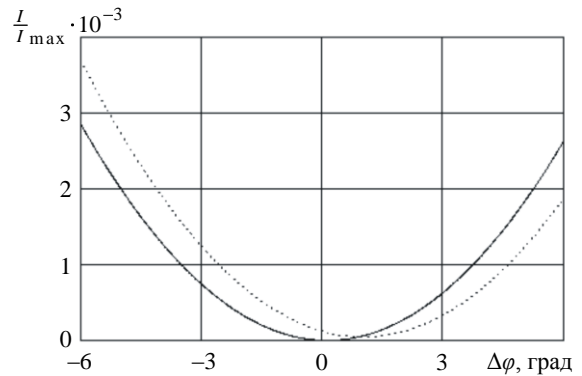


Рис. 12. Пеленгационная характеристика интерферометра

Чтобы рассчитать влияние подстилающей поверхности на точность измерения угла прихода, необходимо определить угол визирования точки зеркального отражения  $\zeta = \alpha'_a + \alpha_a$ . Можно показать, что для случая отсутствия атмосферы указанный угол удовлетворяет трансцендентному уравнению

$$r'_{01} \cos \left( \arcsin \frac{a \cos \alpha_a}{a + h_c} + \alpha_a + \gamma \right) = \left[ r_{01}^2 + r^2 + 2r'_{01}r \sin \left( \alpha_a - \arcsin \frac{a \sin \gamma}{r'_{01}} \right) \right] \sin \gamma, \quad (16)$$

$$\text{где } r'_{01} = \sqrt{\langle h_a \rangle^2 + a^2 - 2a \langle h_a \rangle \cos \gamma};$$

$$r = (r_0 + h_a) \frac{\cos\left(\arcsin \frac{a \cos \alpha_a}{a + h_c} + \alpha_a\right)}{\cos \alpha_a};$$

$$\alpha'_a = \alpha_a - \arccos \frac{a \sin \gamma}{r_{01}}.$$

На рис. 13 приведена зависимость угла визирования точки зеркального отражения  $\zeta$  от угла места спутника  $\alpha_a$ , полученная в результате численного решения трансцендентного уравнения (16) для разных высот установки радиоинтерферометра (гладкая и пунктирная кривые соответствуют диапазону установки антенн  $h_a = 10 \div 50$  м). Как оказалось, для спутников, угол места которых превышает  $\alpha_a > 1^\circ$ , высота антенн практически не влияет на угол прихода отраженного луча в широком интервале высот установки антенн ( $h_a < 100$  м).

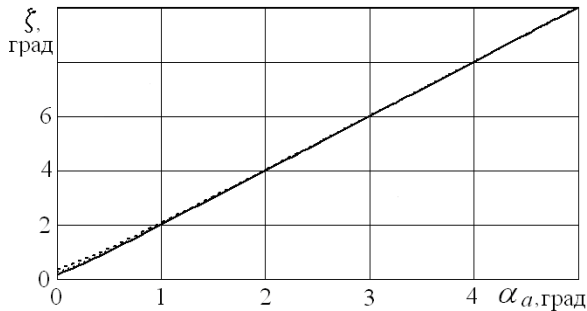


Рис. 13. Зависимость угла визирования точки зеркального отражения от угла места ИСЗ

Это обусловлено малостью параметра  $\frac{h_a}{h_c} \ll 1$ , в связи с чем расстояние до точки зеркального отражения увеличивается пропорционально высоте установки антенн (рис. 14), причем в случае  $\alpha_a > 3^\circ$  зависимость практически линейна (рис. 15), что позволяет аппроксимировать выражение (16) простым соотношением  $\zeta \cong 2\alpha_a$ .

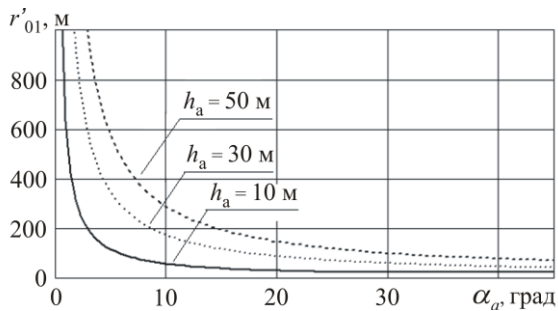


Рис. 14. Зависимость расстояния точки зеркального отражения  $r_1$  от угла места ИСЗ

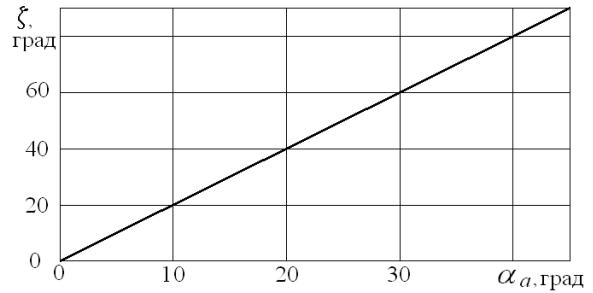


Рис. 15. Зависимость угла визирования точки зеркального отражения в от угла места ИСЗ

В связи со сложной лепестковой структурой излучения антенны (11) совпадение угла визирования точки зеркального отражения с нулем в ДН антенны весьма маловероятно, поэтому для оценки влияния подстилающей поверхности целесообразно аппроксимировать структуру бокового излучения антенны в виде огибающей боковых лепестков [25]

$$F(\theta) \cong \frac{6,5}{\left[k \frac{d}{2} \sin \theta\right]^{5/2}}; \theta > \theta_0, \quad (17)$$

где  $\theta_0$  – ширина главного лепестка в ДН антенны. На рис. 16 показан пример ДН интерферометра с использованием (17), которая имеет смысл оценки «сверху» и в дальнейшем использована для описания влияния подстилающей поверхности на точность измерения угла прихода  $\alpha_a$ .

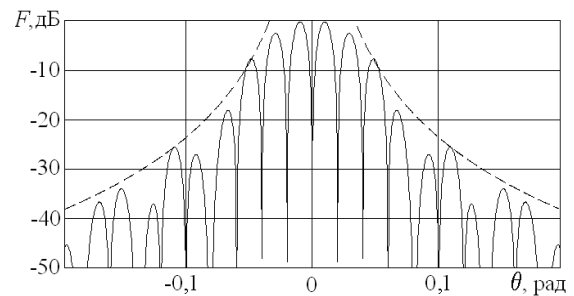


Рис. 16. Огибающая боковых лепестков ДН интерферометра (17)

Чтобы провести численный анализ влияния подстилающей поверхности, запишем выражение (14) в следующем виде:

$$I_d = I_0 \left[ \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} - \frac{e^{-j(\zeta r_2 + \Delta \varphi)}}{r_2} + \eta \left[ \frac{e^{-jk r'_1}}{r'_1} - \frac{e^{-j(\zeta' r'_2 + \Delta \varphi)}}{r'_2} \right] \right]^2, \quad (18)$$

где  $\eta = \left| \frac{F(\theta)}{F(\theta_0)} \right| e^{j\varphi_r}$  – общее ослабление зеркально отраженного луча. Выполняя преобразования,

аналогичные (15), выражение (18) можно записать в симметричном виде

$$\frac{P_d}{P_0} = 2F^2 (A + B + C), \quad (19)$$

где  $A = 1 - \cos(k\Delta r + \psi)$ ,  $B = |\eta|^2 [1 - \cos(k\Delta r' + \psi)]$ ,

$$C = |\eta|^2 \begin{bmatrix} \cos(k(r_1 - r'_1) - \varphi_\Gamma) \\ + \cos(k(r_2 - r'_2) - \varphi_\Gamma) \\ - \cos(k(r_1 - r'_2) + \psi - \varphi_\Gamma) \\ - \cos(k(r_2 - r'_1) - \psi - \varphi_\Gamma) \end{bmatrix}.$$

Численный анализ (19) показал, что погрешность измерения угла прихода  $\delta\theta$  отклоняется в положительную или отрицательную область в зависимости от фазы коэффициента отражения  $\varphi_\Gamma$  (рис. 17) и убывает по экспоненциальному закону при уменьшении модуля общего ослабления зеркально отраженного луча  $|\eta|$  (рис. 18).

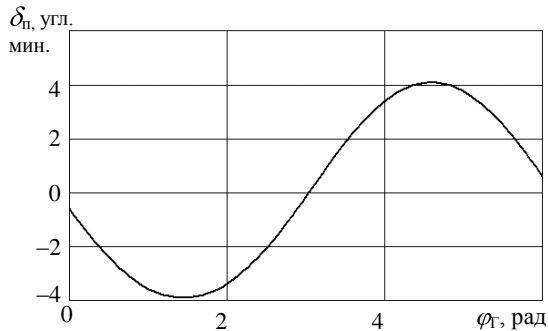


Рис. 17. Зависимость погрешности измерения угла прихода от фазы коэффициента отражения от подстилающей поверхности при  $|\eta| = 8$  дБ

На рис. 18 область вероятных значений погрешности измерения угла прихода выделена серым цветом. Расчет проведен для следующих параметров трассы:  $h_a = 50$  м;  $h_c = 36000$  км;  $\alpha_a = 4,4^\circ$ ;  $d = 3,56$  м;  $D = 1,5$  м;  $\lambda = 8,3$  см. Для обеспечения необходимой точности измерений множитель ослабления зеркального луча не должен превышать значение  $|\eta| \leq -(25 \div 30)$  дБ.

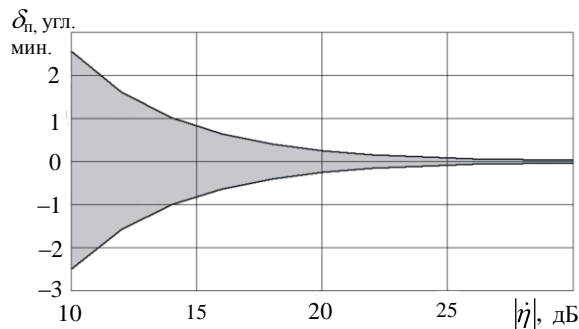


Рис. 18. Погрешность измерения угла прихода, обусловленная влиянием подстилающей поверхности

**Выводы.** Таким образом, для измерения градиента показателя преломления тропосферы предложено использовать радиоинтерферометр, который позволяет определять угол прихода сигналов геостационарного спутника. Для измерения градиента показателя преломления с точностью  $1 \cdot 10^{-9}$  точность измерения угла прихода должна быть не хуже  $\pm 0,1$  угл. мин. Проанализированы требования к отдельным составляющим точности измерений, в том числе: погрешность измерений вследствие влияния шумов приемника, нестабильности положения фазового центра антенн, нестабильности параметров фидерного тракта, погрешность измерений, обусловленная неточностью определения положения спутника на орбите и влияния подстилающей поверхности. Показано, что отношение сигнал – шум приемника должно быть не менее  $30 \div 40$  дБ; положение антенн должно выдерживаться с точностью  $\leq 0,05$  мм (база интерферометра  $d \cong 50 \lambda$ ); для уменьшения влияния многолучевого распространения ослабление зеркального луча должно быть не менее  $25 \div 30$  дБ, что требует применения антенн с низким уровнем бокового излучения в широком диапазоне углов.

1. Гонтарь И. Д., Турганев И. С., Сеницкий В. Б., Ширманова С. И. Экспериментальные исследования возможности применения интерферометрического метода радиопросвечивания атмосферы с ИСЗ для диагностики условий распространения радиоволн. – Харьков, 1989. – 17 с. – (Препр. / АН Украины. Ин-т радиофизики и электрон.; № 90-4).
2. Отчет по НИР «Радар-1» / Рук. С. И. Хоменко Гос. рег. 01.974006565. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2001. – 195 с.
3. Сеницкий В. Б., Турганев И. С., Ширманов С. И. Измерение и расчет углов атмосферной рефракции по радиозаходам ИСЗ над морем // Радиотехника. Харьков. гос. ун-т. – 1993. – № 96. – С. 52-60.
4. Гайкович К. П. О наземной доплеровской радиорефрактометрии атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1992. – 35, № 3,4. – С. 211-219.
5. Гайкович К. П., Гурвич А. С., Наумов А. П. О восстановлении метеопараметров по внутренним измерениям оптической рефракции космических источников // Изв. АН СССР. ФАО. – 1983. – 19, № 7. – С. 675-682.
6. Бозатуров А. Н., Гайкович К. П., Гурвич А. С. О возможности определения отражающих слоев в тропосфере над морем по вариациям уровня радиосигналов ИСЗ // Докл. АН СССР. – 1990. – 315, № 4. – С. 830-834.
7. Павельев А. Г. К решению обратной задачи рефракции // Радиотехника и электрон. – 1980. – 25, № 12. – С. 2504-2509.
8. Павельев А. Г. Решение обратной задачи рефракции // Радиотехника и электрон. – 1982. – 27, № 5. – С. 1037-1039.
9. Колосов М. А., Павельев А. Г. Радиопросвечивание атмосферы при помощи источников искусственного и естественного происхождения // Радиотехника и электрон. – 1982. – 27, № 12. – С. 2310-2317.
10. Арманд Н. А., Андрианов В. А., Смирнов В. М. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли // Радиотехника и электрон. – 1987. – 32, № 4. – С. 673-680.



11. Алексеев Г. А., Белоброва М. В. Об уравнении обратной задачи рефракции типа свертки // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2003. – 8, № 2. – С. 229-230.
12. Василенко Н. А., Гайкович К. П., Сумин М. И. Восстановление высотных профилей показателя преломления и метеорологических параметров атмосферы из измерений астрономической рефракции. – Горький, 1985. – 29 с. – (Препр. / АН СССР. НИРФИ; № 200).
13. Якубов В. П., Симакова Н. А. Обратная задача рефракции в атмосфере Земли // Радиотехника и электрон. – 1987. – 32, № 7. – С. 1367-1373.
14. Bean V. R., Dutton E. J., Radio meteorology, NBS monograph 92. – 1976.
15. Шабельников А. В. Эволюция проблемы рефракции электромагнитных волн // Зарубеж. радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 9. – С. 31-35.
16. Гайкович К. П., Черняева М. Б. Определение атмосферной рефракции при измерениях с различными трассами луча // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – 43, № 4. – С. 304-309.
17. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. – М.: Связь, 1979. – 269 с.
18. Bean V. R., Thayer G. D. Models of the atmospheric radio refractive index // Proc. of the IRE – 1959. – 47, No. 5. – P. 740-755.
19. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры, Марса. – М.: Сов. радио, 1976. – 219 с.
20. <http://www.CelesTrak.com/>
21. Hoofs F. R., A Short. Efficient Analytical Satellite Theory // AIAA Paper. – 1980. – No. 80-1659.
22. Hilton C. G. Kuhlman J. R. Mathematical Models for the Space Defense Center // Philco-Ford Publication. – 1966. – No. U-3871. – P. 17-28.
23. Кюн Р. Микроволновые антенны / Пер. с нем. под ред. М. П. Долуханова. – Л.: Судостроение, 1967. – 517 с.
24. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Пер. с нем. под ред. Л. И. Седова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 344 с.
25. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям / Пер с англ. под ред. М. М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
26. Белавин О. В. Основы радиопеленгации. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
27. Троицкий В. Н. О замираниях ультракоротких волн на радиорелейных линиях связи // Электросвязь. – 1957. – № 10. – С. 32-39.

## INSTRUMENTAL ERRORS OF INTERFEROMETRICAL METHOD OF RESERCH ON TROPOSPHERIC REFRACTION ON PATH GEO SATELLITE – EARTH

D. D. Khalameyda

Possibility of using interferometer receiving radio signals of Geostationary Satellite for measuring tropospheric refraction index is discussed. For this reason exponential model of troposphere is used. Factors decreasing the accuracy of measuring of arrival angle, such as receiver noise, instability of antenna phase center location, variation of properties of feeder tract, are shown. Demands for different characteristics of interferometer are discussed.

**Key words:** refraction, interferometer, geostationary satellite.

## ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ПОМИЛКИ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕФРАКЦІЇ В ТРОПОСФЕРІ НА ТРАСІ ГШСЗ – ЗЕМЛЯ

Д. Д. Халамейда

Розглянуто можливість застосування інтерферометра, що приймає радіосигнал з геостационарного штучного супутника Землі (ГШСЗ), для вимірювання інтегрального по трасі градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери в рамках експоненціальної моделі тропосфери. Приведено фактори, що впливають на точність вимірювань кута приходу, такі як шуми приймача, нестабільність положення фазового центру антен, зміна властивостей фідерного тракту, і проведена їх оцінка. Розглянуто вимоги до різних характеристик інтерферометра.

**Ключові слова:** рефракція, інтерферометр, геостационарний супутник.

*Рукопись поступила 4 июля 2008 г.*