

Д. Д. Халамейда

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ НА РАБОТУ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА

Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: khrameyda@ire.kharkov.ua

Рассмотрено влияние флуктуаций в турбулентной тропосфере на точность измерения угла прихода радиоволн для оценки рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра. Получены выражения, описывающие работу интерферометра, и проведено исследование его характеристик с помощью метода Монте-Карло. Показано, что даже в случае сильно турбулентной тропосферы (среднеквадратическое отклонение $\Delta N = 10 N$ -ед.), флуктуации фазового фронта падающей на антенны интерферометра волны позволяют получить достаточную точность измерения угла прихода для расчета интегрального по трассе градиента коэффициента преломления тропосферы. Ил. 8. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: рефракция, интерферометр, геостационарный спутник, численное моделирование, тропосфера.

Работа практически всех радиотехнических систем, использующих распространение радиоволн (радиолокация, радионавигация, связь и др.), подвержена влиянию свойств среды, в которой происходит распространение электромагнитной волны. В частности, значительный практический интерес представляет измерение рефракционных свойств тропосферы, особенно с помощью дистанционного зондирования. В работах [1, 2] описан метод измерения градиента коэффициента преломления с помощью радиоинтерферометра (интерферометра) и проведена оценка точности измерений в зависимости от его параметров. Показано, что интерферометр должен обеспечивать точность измерения угла прихода радиоволн не хуже $0,1'$, что предъявляет весьма высокие требования к конструкции интерферометра. Однако вариации угла прихода за счет турбулентных свойств тропосферы могут маскировать эффект рефракции радиоволн, в связи с чем возникает вопрос: насколько сильно влияют флуктуации коэффициента преломления в приземном слое тропосферы на работу интерферометра?

Целью настоящей работы является оценка влияния флуктуаций коэффициента преломления в турбулентной тропосфере на точность измерения градиента коэффициента преломления с помощью метода, описанного в работах [1, 2].

1. Влияние турбулентности тропосферы на работу интерферометра. Рассмотрим упрощенную схему радиоинтерферометра (рис. 1), на который падает поле источника, прошедшее турбулентный слой толщиной L , индекс коэффициента преломления которого равен $N = (\sqrt{\epsilon} - 1)10^6$, N -ед., а радиус корреляции – l_0 . Выходные сигналы двух идентичных антенн подаются на балансное устройство (БУ), на выходе которого установлены квадратичный детектор (КД) и фильтр нижних частот (ФНЧ), а для обработки принятых сигналов используется

ПК. Переменный фазовращатель (ФВ) установлен в одном из плеч интерферометра, регулировка которого позволяет в определенных пределах сканировать диаграммой направленности (ДН) интерферометра в пространстве. Электрические длины плеч интерферометра (с учетом коэффициента укорочения), L_1 и L_2 , их разность $\Delta L = L_1 - L_2$ соответствует разности фаз $\Delta\varphi = kd \sin\theta_i$, где d – база интерферометра, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, θ_i – угол прихода поля источника.

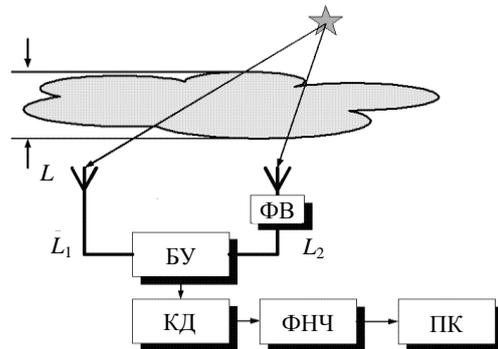


Рис. 1. Структурная схема интерферометра

Если сквозь слой турбулентной тропосферы на раскрыв линейной антенны падает излучение источника в дальней зоне (рис. 1), то в первом приближении [3] сигнал на согласованной нагрузке антенны можно записать в виде

$$U(\theta_i) = U_0 \frac{e^{jkr}}{r} \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x)}, \quad (1)$$

где θ_i – угол прихода поля источника; D – раскрыв антенны; $A(x)$ – амплитудно-фазовое распределение в раскрыве антенны; $\psi = \psi' + j\psi''(x)$ – флуктуации падающего поля (ψ' и ψ'' – случайная модуляция фазы и амплитуды по раскрыву). В общем случае [4], если толщина турбулентного

слоя существенно превышает интервал корреляции $L_C \gg l_0$, причем выполняется условие дальней зоны $\chi = 4L/kl_0^2 \gg 1$ (в рассматриваемом случае $L \geq 10$ км, $\lambda \approx 0,1$ м, $l_0 \leq 10$ м), флуктуации фазы и уровня поля одного порядка. Как известно, двухканальная схема интерферометра гораздо менее чувствительна к флуктуациям амплитуды, в связи с чем, структура обработки сигналов существенно уменьшает влияние флуктуаций уровня, поэтому далее, мы ограничимся рассмотрением влиянием флуктуаций фазы $\psi = \psi'$.

Объединяя сигналы с выходов плеч интерферометра (рис. 2), суммарный сигнал на выходе балансного устройства можно представить в следующем виде:

$$U_{\Sigma}(\theta_i) = U_1 - e^{j\Phi} U_2 = U_0 \frac{e^{jkr}}{r} (a - b),$$

$$a = \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x)}, \quad (2)$$

$$b = e^{j\Phi - \frac{kd}{2} \sin \theta_i} \int_{-D/2}^{D/2} dx A(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j\psi(x+d)},$$

где d – база интерферометра; Φ – фазовый сдвиг фазовращателя.

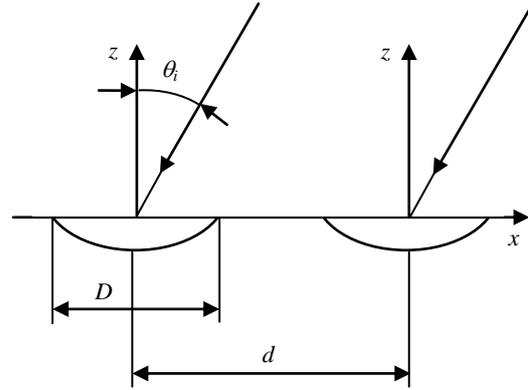


Рис. 2. Система координат интерферометра

Сигнал на выходе квадратичного детектора (рис. 1) вычисляется как квадрат модуля выражения (2):

$$U_{\Delta} = |U_{\Sigma}|^2 = U_0 \iint_D dx_1 dx_2 A(x_1) A(x_2) e^{j \frac{k}{2} (x_1 - x_2) \sin \theta_i} \left\{ \begin{aligned} & e^{j[\psi(x_1, t) - \psi(x_2, t)]} - e^{j[\Phi_d - \Phi + \psi(x_1, t) - \psi(x_2 + d, t)]} - \\ & - e^{j[\Phi - \Phi_d + \psi(x_1 + d, t) - \psi(x_2 + d, t)]} + e^{j[\psi(x_1 + d, t) - \psi(x_2 + d, t)]} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\Phi_d = \frac{kd}{2} \sin \theta_i$ – сдвиг фаз между антеннами интерферометра. Так как в общем случае амплитудно-фазовое распределение поля, падающего на интерферометр, зависит от времени $\psi = \psi(x, t)$, то для уменьшения дисперсии сигнала на выходе квадратичного детектора $U_{\Delta}(t)$ включен ФНЧ, который сглаживает флуктуации напряжения в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_0^{\infty} dt' U_{\Delta}(t') H(t, t'), \quad (4)$$

где $H(t, t')$ – импульсная характеристика ФНЧ.

В результате в направлении оси интерферометра формируется нуль ДН, положение которого зависит от фазовых соотношений в плечах интерферометра (рис. 3).

При изменении фазового сдвига на $\Delta\Phi$ положение нуля смещается на угол $\Delta\theta = \arcsin \frac{\Delta\Phi \lambda}{2\pi d}$, поэтому значение угла прихода θ_i можно восстановить, измеряя фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем.

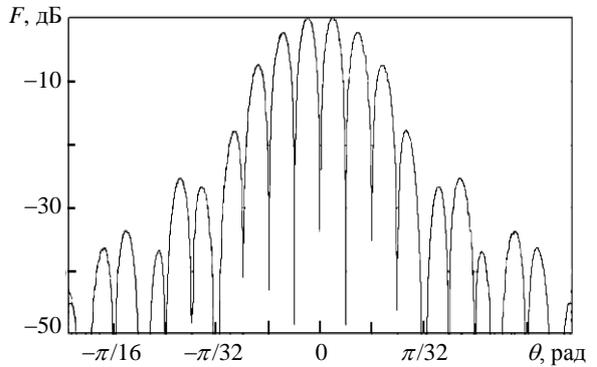


Рис. 3. Пеленгационная характеристика интерферометра

Например, устанавливая фазовращатель в положение, которое соответствует направлению ДН на источник сигнала, в отсутствие флуктуаций коэффициента преломления (без ограничения общности положим $\Phi = 0$), можно вычислить угол прихода падающего поля θ_i , измеряя напряжение на выходе ФНЧ в соответствии с уравнением (5):

$$1 - \cos \frac{kd}{2} \sin \theta_i = \frac{U_{\text{вых}}}{2U_0 |F_A(\theta_i)|^2}, \quad (5)$$

где $F_A(\theta_i)$ – ДН антенны в отсутствие турбулентности тропосферы. Как правило, флуктуации фазы достаточно малы, следовательно, можно записать $\sin \theta_i \cong \theta_i$ и упростить выражение (5)

$$\theta_i \cong \frac{2}{kd} \arccos \left(1 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{2U_0 |F_A(\theta_i)|^2} \right) \quad (6)$$

Таким образом, влияние флуктуаций коэффициента преломления на точность измерения угла прихода (градиента коэффициента преломления) в первом приближении описывается величиной дисперсии измеренных углов прихода $\sigma_\theta^2 = \langle (\theta_i - \langle \theta_i \rangle)^2 \rangle$.

2. Численное моделирование. Полученные выражения (2)–(6) не позволяют выполнить расчеты в аналитической форме, поэтому нами использован метод статистического моделирования (метод Монте-Карло) [5] для численного моделирования работы интерферометра в условиях турбулентной тропосферы. Для этого рассмотрим флуктуации коэффициента преломления в виде гауссовой модели

$$n(r) = \langle \Delta n^2 \rangle e^{-\left(\frac{r}{l_0}\right)^2}, \quad (7)$$

где $\langle \Delta n^2 \rangle$ – дисперсия флуктуаций коэффициента преломления. При большом значении волнового параметра $\chi = \frac{4L}{kl_0^2} \gg 1$ (дифракция Фраунгофера)

вид корреляционной функции флуктуаций фазы совпадает с корреляционной функцией флуктуаций коэффициента преломления [4], которая в плоскости раскрытия интерферометра записывается в виде

$$\langle \Delta \psi(x_1) \Delta \psi(x_2) \rangle = \langle \Delta \psi^2 \rangle \exp \left(-\frac{|x_1 - x_2|^2}{l_0^2} \right), \quad (8)$$

где $\langle \Delta \psi^2 \rangle = 2\pi^2 \frac{l_0 L}{\lambda^2} \langle \Delta N^2 \rangle 10^{-12}$; $\langle \Delta N^2 \rangle$ – дисперсия флуктуаций индекса рефракции N -ед. (для рассматриваемых параметров – $L \approx 10$ км, $\lambda \approx 0,1$ м, $l_0 \approx 1$ м, слабые флуктуации показателя преломления $\delta_{\Delta N} = \sqrt{\langle \Delta N^2 \rangle} \approx 1$ N -ед. соответствуют среднеквадратическому отклонению (СКО) флуктуаций фазы $\approx 0,4^\circ$, а сильные флуктуации коэффициента преломления $\delta_{\Delta N} \approx 10$ N -ед. соответствуют СКО флуктуаций фазы $\approx 4^\circ$).

При численном моделировании случайных процессов одним из условий его адекватности является достаточно большой объем выборки реализаций случайного процесса. Поэтому нами использовалось случайное числовое поле с про-

странственным периодом дискретизации 0,01 м, временным периодом дискретизации 4 мс и гауссовым распределением в рамках модели «замороженной» тропосферы, когда флуктуации коэффициента преломления n зависят от пространственной и временной координат следующим образом [6]:

$$n[r, (t - \tau)] = n[(r - V\tau), t], \quad (9)$$

где V – поперечная скорость переноса неоднородностей по отношению к трассе распространения радиоволн.

Для формирования заданной корреляционной функции (8) использовался метод гауссовой фильтрации [5]. В качестве примера на рис. 4 приведены выборочные реализации флуктуаций фазы поля, прошедшего через слой ($L = 10^4$ км) сильно турбулентной атмосферы $\delta_{\Delta N} \approx 10$ N -ед., где гладкая кривая соответствует радиусу корреляции $l_0 \approx 0,1$ м, а пунктир – $l_0 \approx 1$ м.

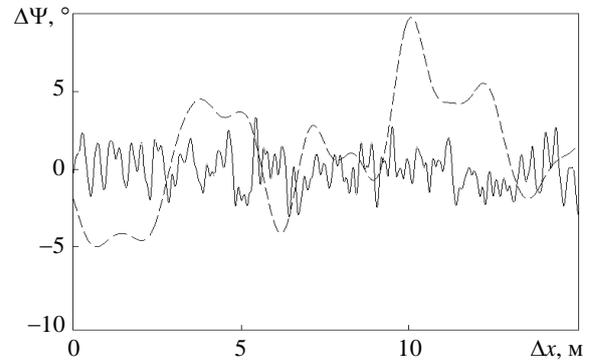


Рис. 4. Пространственное распределение флуктуаций фазы ($l_0 = 0,1$ м – сплошная линия, $l_0 = 1$ м – пунктир)

Адекватность численного моделирования можно оценить путем сравнения расчетов коэффициента корреляции $\bar{C}(x_1, x_2) = \frac{\langle \Delta \psi(x_1) \Delta \psi(x_2) \rangle}{\langle \Delta \psi^2 \rangle}$

(рис. 5, гладкая кривая) и результатов численного моделирования (пунктир), которые в данном случае совпадают с графической точностью, что позволяет перейти к моделированию характеристик пеленгования бесконечно удаленного точечного источника.

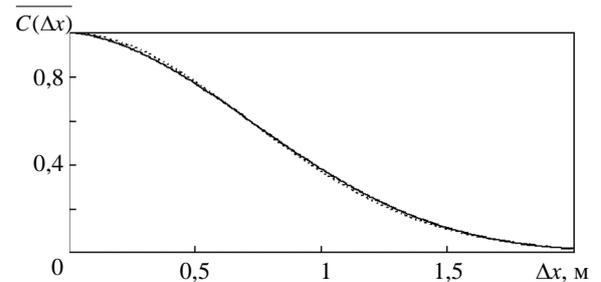


Рис. 5. Коэффициент корреляции флуктуаций фазы падающего поля

Численное моделирование производилось в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 1. Сигнал на выходе антенны вычислялся в соответствии с выражением [3]

$$\dot{U}_a = \dot{U}_0 \int_D dx B(x) e^{j \frac{kx}{2} \sin \theta_i + j \psi(x)}, \quad (10)$$

где $B(x)$ – амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве антенны, которое для параболической антенны с цилиндрическим рупорным излучателем хорошо описывается спадающим распределением [7]

$$B(x) = 2 \left(1 - \left(\frac{2x}{D} \right)^2 \right). \quad (11)$$

С выхода антенн сигнал поступает на балансный СВЧ-мост, например двойной волноводный тройник, на выходе которого установлен квадратичный детектор

$$\dot{U}_D = |\dot{U}_{a1} - \dot{U}_{a2}|^2, \quad (12)$$

где \dot{U}_{a1} , \dot{U}_{a2} – сигналы с выходов каналов интерферометра (рис. 1).

В результате угол прихода электромагнитной волны можно выразить через величину напряжения с выхода детектора \dot{U}_D следующим образом:

$$\theta_x = \frac{2}{kd} \arccos \left[1 - \frac{\dot{U}_D}{2U_0 |\dot{F}(\theta)|^2} \right]. \quad (13)$$

При этом для однозначного измерения угла прихода его значение не должно превышать величину $\theta_x < \theta_{\max} = \arcsin \left(\frac{\lambda}{2d} \right)$. Чем больше

база интерферометра, тем выше его чувствительность к отклонению угла прихода θ_x от нормали, но меньше диапазон однозначного измерения углов прихода. Точность измерения угла прихода определяется размерами антенн интерферометра, его базой и статистикой пространственных флуктуаций коэффициента преломления. На рис. 6 приведены результаты расчета СКО ошибки измерения угла прихода в зависимости от размеров апертур для различных радиусов корреляции коэффициента преломления ($l_0 = 0,1 \div 10$ м). Как видно, увеличение размеров антенн приводит к эффективной пространственной фильтрации флуктуаций показателя преломления и обеспечивает выигрыш в точности измерения угла прихода при условии, что раскрыв антенн превышает радиус корреляции l_0 . Обычно радиус корреляции для тропосферы лежит в пределах $l_0 = 1 \div 10$ м, поэтому эффект усреднения пространственных

флуктуаций имеет место только для достаточно больших размеров антенн $D \geq 3l_0$.

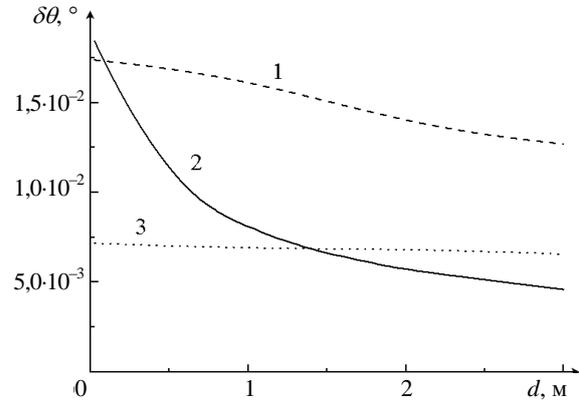


Рис. 6. Зависимость СКО ошибки измерения угла прихода от раскрыва антенны ($d = 3$ м): 1 – $l_0 = 1$ м; 2 – $l_0 = 0,1$ м; 3 – $l_0 = 10$ м

В то же время увеличение базы интерферометра d приводит к декорреляции сигналов в плечах интерферометра и также уменьшает флуктуации угла прихода, как показано на рис. 7. При этом вертикальный пунктир соответствует минимально возможной базе интерферометра, равной раскрыву антенн $d = D$, а скорость спада зависит от соотношения базы интерферометра и радиуса корреляции l_0 . Как видно, даже при небольших значениях базы интерферометра $d \geq 3l_0$ влияние пространственных флуктуаций на точность измерения угла прихода подавляется достаточно эффективно.

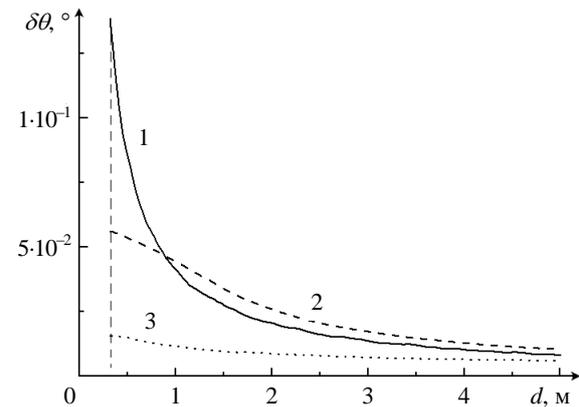


Рис. 7. Зависимость СКО ошибки измерения угла прихода от базы интерферометра ($D = 0,3$ м): 1 – $l_0 = 0,1$ м; 2 – $l_0 = 1$ м; 3 – $l_0 = 10$ м

Пространственные флуктуации изменяются во времени, в соответствии с моделью «замороженной» тропосферы (9). Для уменьшения их влияния на работу интерферометра можно использовать ФНЧ на выходе квадратичного детектора.

Тогда выходное напряжение запишем в виде

$$U_{\text{ФНЧ}}(t) = \int_0^{\infty} dt' U_{\text{Д}}(t') H(t' - t), \quad (14)$$

где $H(t' - t)$ – импульсная характеристика фильтра, которая для простейшего случая RC (первого порядка) имеет вид

$$H(\tau) = \frac{1}{\tau_{\phi}} e^{-\frac{\tau}{\tau_{\phi}}}, \quad (15)$$

где $\tau_{\phi} = RC$ – постоянная времени фильтра.

Подобный ФНЧ позволяет усреднить выходной сигнал детектора и тем самым повысить точность измерения угла прихода.

На рис. 8 представлены зависимости СКО ошибки измерения угла прихода от постоянной времени фильтра τ_{ϕ} для различных скоростей ветра V . Чем меньше скорость ветра, тем медленнее флуктуирует поле волны во времени, тем большая постоянная фильтра требуется для эффективного усреднения флуктуаций. Как следует из рис. 8, в случае величины базы интерферометра $d = 3$ м необходимая точность измерения угла прихода для обеспечения возможности измерения градиента коэффициента преломления по методу, описанному в работах [1, 2], обеспечивается при постоянной времени фильтра $\tau_{\phi} \geq 10$ с.

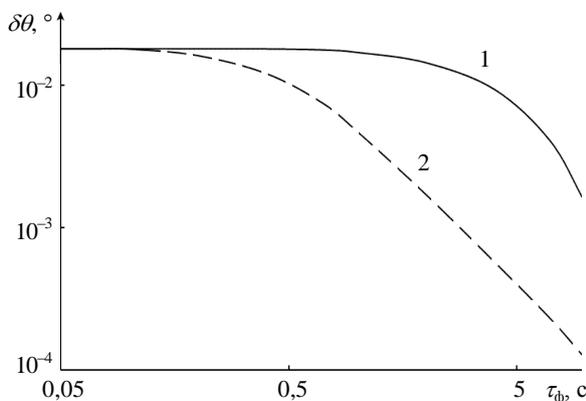


Рис. 8. Зависимость СКО ошибки угла прихода от постоянной времени ФНЧ ($D = 1,5$ м, $d = 3$ м, $\lambda = 0,1$ м, $\Delta N = 10$ N -ед., $l_0 = 1$ м): 1 – $V = 3$ м/с; 2 – $V = 20$ м/с

Выводы. Получены выражения для напряжения на выходе двухканального радиointерферометра при падении на раскрыв антенн электромагнитного поля удаленного источника, прошедшего слой случайно-неоднородной тропосферы. Разработан алгоритм для численного моделирования работы интерферометра на основе метода Монте-Карло при случайном пространственном и временном распределении фазы па-

дающего поля. В приближении дифракции Фраунгофера ($\chi = \frac{4L}{kl_0^2} \gg 1$) и гауссовой модели «замороженной тропосферы» проведено численное моделирование влияния флуктуаций коэффициента преломления турбулентной тропосферы на точность измерения угла прихода удаленного источника. В результате численного анализа показано, что точность измерений заметно улучшается, когда апертуры или база интерферометра превосходят радиус корреляции флуктуаций коэффициента более чем в 3 раза. Кроме того, выбирая постоянную времени ФНЧ на выходе радиointерферометра 5...10 с возможно на порядок уменьшить ошибку пеленгации в диапазоне скоростей ветра до 3...20 м/с. Показано, что выбирая рекомендованные параметры интерферометра, можно получить точность измерения угла прихода удаленного точечного источника 0,05...0,1', что позволяет измерять градиент коэффициента преломления с точностью 10^{-9} при помощи метода, описанного в работах [1, 2].

1. Халамейда Д. Д. Некоторые результаты оценки рефракционных свойств тропосферы с использованием радиоизлучения геостационарных спутников / Д. Д. Халамейда, С. И. Хоменко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 1. – С. 61–64.
2. Халамейда Д. Д. Инструментальные ошибки интерферометрического метода исследования рефракции в тропосфере на трассе ГИСЗ – Земля / Д. Д. Халамейда // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 3. – С. 503–511.
3. Шифрин Я. С. О статистике поля линейной антенны в зоне Френеля / Я. С. Шифрин, Ю. М. Бородавке // Радиотехника и электрон. – 1988. – 33, № 9. – С. 1870–1878.
4. Чернов Л. А. Волны в случайных средах / Л. А. Чернов. – М.: Наука, 1975. – 171 с.
5. Шалыгин А. С. Прикладные методы статистического моделирования / А. С. Шалыгин, Ю. И. Палагин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: в 2-х т. Т. 2 / А. Исимару. – М.: Мир, 1981. – 318 с.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн; пер. с нем. под ред. М. П. Долуханова. – Л.: Судостроение, 1967. – 517 с.

D. D. Khalameyda

INFLUENCE OF FLUCTUATIONS OF RADIOWAVE REFRACTION COEFFICIENT OF TROPOSPHERE ON RADIO INTERFEROMETER ACCURACY

Influence of fluctuations in turbulent troposphere on accuracy of arrival angle measurement by interferometer for estimation of refraction properties of troposphere has been studied. Mathematical model of interferometer has been given. Characteristics of the interferometer have been obtained with the help of Monte-Carlo method. It has been shown that fluctuations of phase front of an incident wave on interferometer antennas allow obtaining sufficient accuracy of arrival angle measurement to calculate

gradient of refraction coefficient in troposphere almost in case when troposphere is greatly turbulent (RMS of $\Delta N = 10$ units).

Key words: refraction, interferometer, geostationary satellite, numerical simulation, troposphere.

Д. Д. Халамейда

ВПЛИВ ФЛУКТУАЦІЙ КОЕФІЦІЄНТА
ЗАЛОМЛЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ТРОПОСФЕРІ
НА РОБОТУ РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРА

Розглянуто вплив флуктуаций в турбулентній тропосфері на точність виміру кута приходу радіохвиль для оцін-

ки рефракційних властивостей тропосфери за допомогою радіоінтерферометра. Отримано вирази, що описують роботу інтерферометра, і проведено дослідження його характеристик за допомогою методу Монте-Карло. Показано, що навіть у разі сильно турбулентної тропосфери (середньоквадратичне відхилення $\Delta N = 10$ N-ед.) флуктуації фазового фронту хвилі, що падає на антени інтерферометра, дозволяють отримати достатню точність виміру кута приходу для розрахунку інтегрального по трасі градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери.

Ключові слова: рефракція, інтерферометр, геостационарний супутник, числове моделювання, тропосфера.

Рукопись поступила 09.07.10 г.