

С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов, Д. Д. Халамейда

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕФРАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРОПОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

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

Приведены результаты разработки радиофизического комплекса на базе радиоинтерферометра СВЧ-диапазона для исследования рефракционных свойств тропосферы путем измерения угла прихода радиосигналов геостационарных искусственных спутников Земли. Рассмотрены схема построения, параметры комплекса и результаты исследований точности измерений. Показано, что достигнутые параметры позволяют обеспечить среднеквадратическое отклонение ошибки измерения угла прихода $\delta\theta = 0,1'$, требуемое для получения градиента коэффициента преломления радиоволн в экспоненциальной модели тропосферы. Ил. 11. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: рефракция, интерферометр, геостационарный спутник, градиент коэффициента преломления.

Как известно [1], тропосфера оказывает значительное влияние на распространение радиоволн и работу радиосистем, что, в частности, связано с рефракцией радиоволн. Поэтому измерение характеристик рефракции с помощью дистанционного зондирования представляет значительный интерес. Целью данной работы является описание разработанного и изготовленного измерительного интерферометрического комплекса для измерения градиента коэффициента преломления тропосферы, выполненного на базе интерферометра, и оценка его точностных характеристик.

1. Трасса распространения. Высотный профиль коэффициента преломления тропосферы часто аппроксимируют экспоненциальной моделью [2–4]

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

где g_n – градиент коэффициента преломления; h – высота; $\Delta n_0 = n_0 - 1$; n_0 – приземный коэффициент преломления (часто используется приведенный показатель преломления $N = (n - 1) \cdot 10^6$). Рефракция радиоволн обеспечивает искривление траектории луча, в связи с чем угол прихода радиоволны отличается от его истинного угла. Это свойство лежит в основе предложенного метода [2, 3], в котором градиент g_n находят путем измерения угла прихода сигналов геостационарного искусственного спутника Земли (ГИСЗ) (рис. 1).

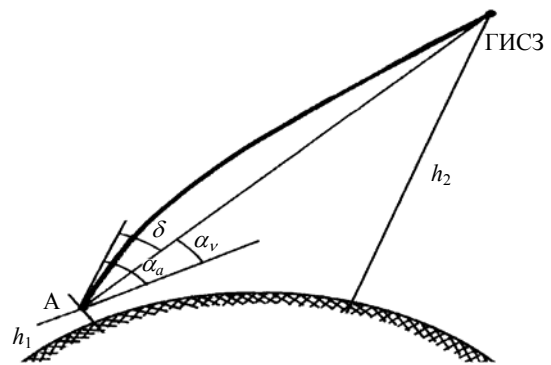


Рис. 1. Рефракция лучей в тропосфере: А – антенна

В этом случае [5] разность угла прихода α_a и истинного угла места α_v источника излучения (рис. 1) определяют как рефракционную ошибку $\delta = \alpha_a - \alpha_v$, которую можно вычислить, воспользовавшись выражением [5]:

$$\delta = -(n_0 - 1)a \sin \alpha_a \times \int_a^R \frac{dr}{n(r)\sqrt{n^2(r)r^2 - (n_0 - 1)^2 a^2 \sin^2 \alpha_a}} \frac{dn}{dr}, \quad (2)$$

где $a = 6\,370$ км – радиус Земли; R – высота верхней границы тропосферы. Подставляя выражение для экспоненциального высотного профиля коэффициента преломления (1) в соотношение (2), можно получить интегральное уравнение для расчета градиента коэффициента преломления, который определяет рефракционные свойства тропосферы:

$$\frac{\delta}{\Delta n_0 a \sin \alpha_a} = - \int_a^R \left\{ \frac{g_n \exp\left(\frac{g_n r}{\Delta n_0}\right)}{\left(1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n r}{\Delta n_0}\right)\right)} \sqrt{\left(1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n r}{\Delta n_0}\right)\right)^2 r^2 - \Delta n_0^2 a^2 \sin^2 \alpha_a} \right\} dr. \quad (3)$$

На рис. 2 приведен пример численного решения уравнения (3) для следующих параметров тропосферы: $R = 10$ км, $\alpha_v = 4,4^\circ$.

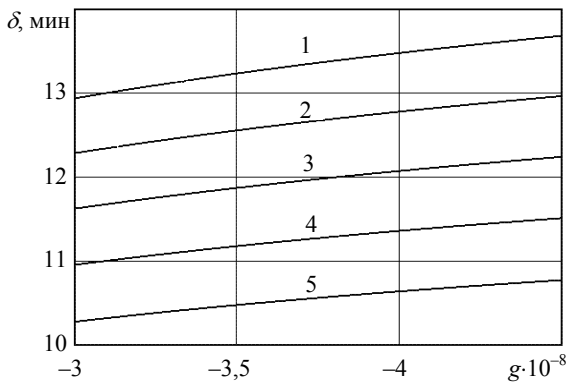


Рис. 2. Зависимость градиента коэффициента преломления от рефракционной ошибки: 1 – $N_0 = 270$ ед.; 2 – $N_0 = 290$ ед.; 3 – $N_0 = 310$ ед.; 4 – $N_0 = 330$ ед.; 5 – $N_0 = 350$ ед.

Из анализа рис. 2 следует, что в диапазоне изменения градиента $g_n \in [-2 \div -8] \cdot 10^{-8}$ (м^{-1}) [6] рефракционная ошибка меняется в пределах $\delta \in 1' \div 3'$. Поэтому для обеспечения погрешности измерения градиента коэффициента преломле-

ния $\sigma_g \leq 3 \cdot 10^{-9}$ инструментальная точность измерения рефракционной ошибки должна быть не хуже $0,1' \div 0,3'$.

2. Аппаратура и методика измерений.

Для проведения экспериментальных исследований рефракционных свойств тропосферы нами разработан радиофизический комплекс, позволяющий производить пеленгацию сигналов ГИСЗ на основе радиоинтерферометра в 8-см диапазоне радиоволн. Структурная схема комплекса показана на рис. 3, в которой сигналы антенн интерферометра поступают в боковые плечи балансного СВЧ-моста в виде двойного волноводного тройника 2Т, в одном из плеч которого установлен СВЧ-фазовращатель ФВ. К H -плечу тройника подключен конвертор, работающий в диапазоне частот $3,4 \div 4,2$ ГГц, который состоит из малошумящего усилителя МШУ (шумовая температура 15 К), смесителя СМ1, гетеродина Г1 и усилителя 1-й промежуточной частоты УПЧ1 в диапазоне $950 \div 1750$ МГц. Выход УПЧ1 подключен к смесителю СМ2 (в качестве гетеродина Г2 используется измерительный генератор Г4-78), затем к усилителю 2-й промежуточной частоты УПЧ2 в диапазоне (485 ± 15) МГц, выходной сигнал которого поступает на частотный детектор ЧД.

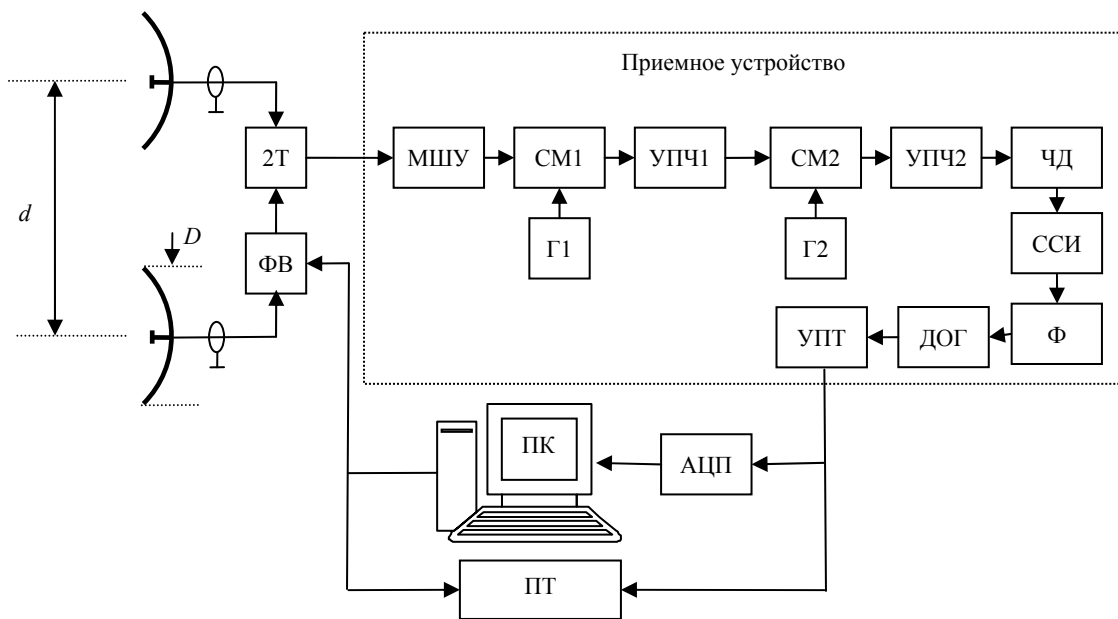


Рис. 3. Структурная схема измерительного комплекса

Механически перестраиваемый фазовращатель ФВ позволяет пеленговать сигналы ИСЗ путем внесения контролируемого фазового сдвига в одном из плеч интерферометра. ФВ перестраивается с помощью шагового двигателя, который управляется от персонального компью-

тера ПК и обеспечивает изменение фазы на 250° перемещением положения нуля в диаграмме направленности (ДН) интерферометра по минимуму сигнала с выхода СВЧ-моста. В результате угол прихода α_a сигнала ИСЗ вычисляется по минимуму пеленгационной характеристики и рефе-

ренсному значению угла места α_0 , от которого производится последующий отсчет измеренных значений угла прихода [7]:

$$\alpha_a = \sin^{-1} \frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi d} + \alpha_0, \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения ИСЗ; $\Delta\varphi$ – величина фазового сдвига, определяемого по шкале калиброванного фазовращателя; d – база интерферометра.

Сигнал на выходе ЧД соответствует телевизионному стандарту *PAL/SECAM* с амплитудной модуляцией, в котором используются строчные импульсы, так как их амплитуда практически не зависит от передаваемого телевизионного изображения. Для их выделения служит селектор строчных импульсов ССИ, а для повышения чувствительности приемного устройства используется узкополосный фильтр Φ с полосой пропускания 2 Гц, который селектирует гармонику с частотой строчной развертки $f_0 = 15,625$ кГц. После детектора огибающей ДОГ постоянная составляющая напряжения подается на усилитель постоянного тока УПТ и затем, посредством аналого-цифрового преобразователя АЦП, на ПК для дальнейшей обработки с целью вычисления положения минимума пеленгационной характеристики. Для контроля используется плоттер ПТ, который формирует изображение пеленгационной характеристики в реальном масштабе времени и позволяет визуально контролировать работу комплекса.

Как показано [3], чтобы обеспечить необходимую точность измерения угла прихода, отношение сигнал-шум на входе приемника должно быть не менее 30 дБ, в связи с чем в работе проводилась оценка энергетических соотношений на трассе ИСЗ-интерферометр для указанных выше параметров интерферометра и с помощью соотношений, приведенных в работе [1]. Параметры разработанной конструкции интерферометра обеспечивают отношение сигнал-шум не хуже 35 дБ, что соответствует необходимым требованиям.

Антенны интерферометра (рис. 4) установлены на высоте 27 м, база интерферометра равна $d = 3,56$ м, а диаметр раскрытия каждой из антенн равна $D_1 = 1,5$ м и $D_2 = 1,8$ м.



Рис. 4. Интерферометрический измерительный комплекс

Так как в разработанной конструкции коаксиальные кабели между антеннами и приемным устройством имеют значительную длину ≈ 3 м и подвергаются воздействию внешних погодных условий, то для уменьшения влияния температурного расширения на электрическую длину кабелей они в обоих плечах имеют равную длину и заключены в термоизоляционные кожухи.

3. Точность измерений аппаратуры.

Для оценки влияния тепловых шумов и внешней температуры на точностные характеристики разработанного радиофизического комплекса проводились экспериментальные исследования с помощью стенда (рис. 5).

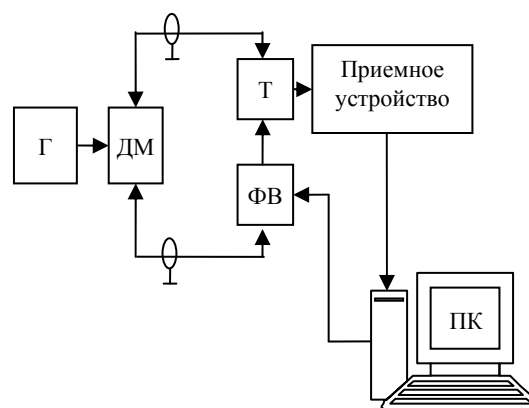


Рис. 5. Структурная схема измерения параметров радиофизического комплекса

Сигнал высокостабильного СВЧ-генератора Γ , мощность и частота которого соответствует сигналу ИСЗ на выходе антенн интерферометра, делится на два канала с помощью 3-дБ делителя мощности ДМ и подается на вход T моста и фазовращателя ФВ, а затем на вход приемного устройства.

Исследование влияния тепловых шумов на точность интерферометра проводилось в течение 5 сут с интервалом 1 ч и, как показали результаты статистической обработки данных, среднеквадратическое отклонение (СКО) положения минимума пеленгационной характеристики соответствует СКО ошибки измерения угла прихода не более $0,05'$.

Для комплексной оценки точности разработанного интерферометра, включая влияние внешней температуры на антенно-фидерный тракт и многолучевости, были проведены измерения точности пеленгации точечного источника излучения в виде рупорной антенны, расположенного на расстоянии $R = 160$ м от интерферометра – рис. 6 (дальняя зона для используемых антенн $R_d = 30$ м), который запитывался от генератора стандартных сигналов Г4-80, а уровень излучения составлял -37 дБ·Вт. Антенны интер-

ферометра и дополнительного источника установлены на высоте $h \geq 27$ м, что исключает влияние подстилающей поверхности.

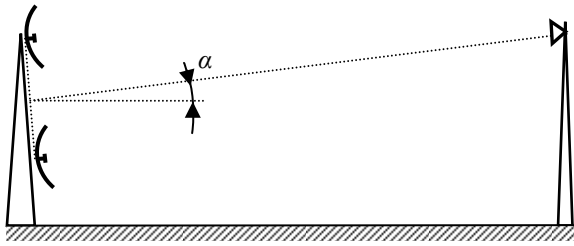


Рис. 6. Схема исследования точности интерферометра

Измерения проводились в летнее время (утром, днем и вечером) в течение 5 сут. с интервалом в 30 мин, когда суточный перепад температуры достигал 12 °С. Как оказалось, СКО ошибки измерения угла прихода составляет 0,1', что, как показано [2], соответствует СКО измерения градиента коэффициента преломления $\sigma_g \leq 3 \cdot 10^{-9}$.

Для комплексной проверки работоспособности разработанного интерферометра проведены предварительные эксперименты по измерению градиента коэффициента преломления тропосферы с помощью сигналов геостационарного ИСЗ «AsiaSat 3S» (105,5° в. д.). В месте расположения интерферометра ($B_3 = 36,1^\circ$ в. д., $A_3 = 50^\circ$ с. ш.), угол места ИСЗ α_a вычисляется с помощью выражения [4]

$$\alpha_a = \text{tg}^{-1} \times \frac{[\cos A_3 \cos(B_3 - B_{ГСЗ})] - 0,151}{\sin[\cos^{-1}(\cos A_3 \cos(B_3 - B_{ГСЗ}))]} = 4,4^\circ, \quad (5)$$

которое позволяет найти только средние значения угла места ИСЗ. В то же время положение ИСЗ прецессирует во времени за счет влияния факторов, возмущающих его движение (Луна, Солнце и др.), в связи с чем для более точного вычисления положения ИСЗ использовались данные, периодически обновляемые на сайте <http://celestrak.com> с помощью программного обеспечения «Trakstar».

Для определения начального положения минимума пеленгационной характеристики интерферометра – референсного значения угла прихода α_0 , а также для исключения влияния неидентичности плеч интерферометра в работе проводилась его калибровка при стандартном профиле коэффициента преломления. В этом случае для расчета рефракционной ошибки δ с помощью выражения (2) использовались результаты измерений профиля тропосферы, полученные с помощью шара-зонда, которые соответ-

ствуют экспоненциальному профилю (1), как показано на рис. 7.

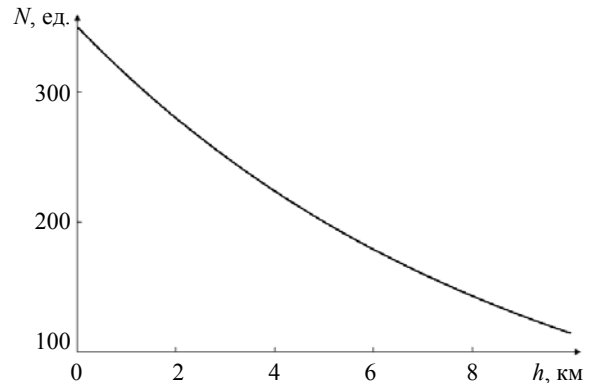


Рис. 7. Стандартный высотный профиль коэффициента преломления ($N_0 \approx 350$ ед., $g_n \approx -3,93 \cdot 10^{-8}$)

Референсное значение угла прихода можно рассчитать, воспользовавшись выражением

$$\alpha_0 = \alpha_v - \delta - \sin^{-1} \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi d}. \quad (6)$$

Аппаратура разработана таким образом, чтобы температурное расширение антенно-фидерного тракта минимально влияли на точность ее измерений. Но для получения максимальной точности необходимо периодически повторять процедуру калибровки описанным выше способом для уточнения величины α_0 .

Для оценки возможностей разработанной аппаратуры проведена серия измерений градиента рефракции тропосферы. Примеры пеленгационных кривых приведены на рис. 8: условия спокойной тропосферы рис. 8, а, а изменчивые погодные условия – рис. 8, б.

Пеленгационные кривые измерялись с интервалом 2 ч в дневное время суток. Положение минимума, измеренного в спокойную погоду (рис. 8, а) практически не изменяется, в то время как для изменчивых погодных условий положение минимума меняется довольно значительно (рис. 8, б).

Угол прихода определяется по минимуму пеленгационной характеристики методом равноточных зон, когда положение минимума сигнала находится как среднее арифметическое углов, соответствующих симметричным точкам на обоих скатах пеленгационной характеристики для одного уровня сигнала. Для уменьшения погрешности, обусловленной искажениями формы пеленгационной характеристики, среднее арифметическое значение угла прихода находилось для трех нормированных уровней сигнала

$$\frac{U}{U_{\max}} = 0,02; 0,04; 0,06.$$

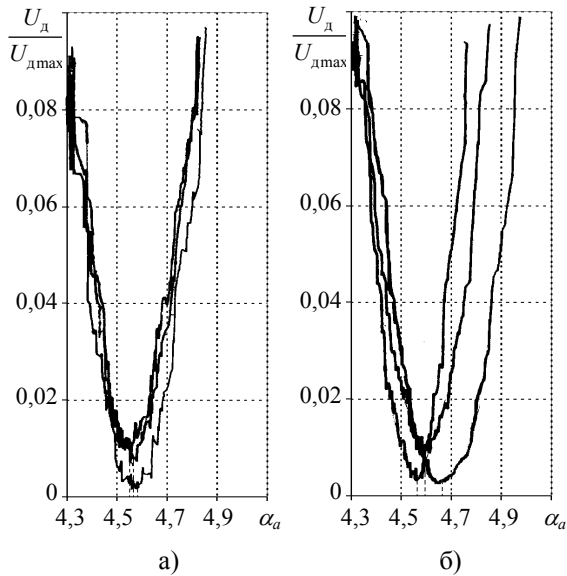


Рис. 8. Записи сигнала на выходе радиоинтерферометра: а) – спокойная тропосфера; б) – изменчивые погодные условия

На рис. 9 приведены результаты сравнения угла места ИСЗ, рассчитанного с помощью программного обеспечения «Trackstar» (сплошная кривая) с измеренным углом прихода (квадраты), в течение 4 сут, который в среднем соответствует рефракционной ошибке около $0,2^\circ$. Как видно, данные интерферометрических измерений хорошо коррелируют со значениями угла места ИСЗ, который меняется в соответствии с прецессией спутника на орбите.

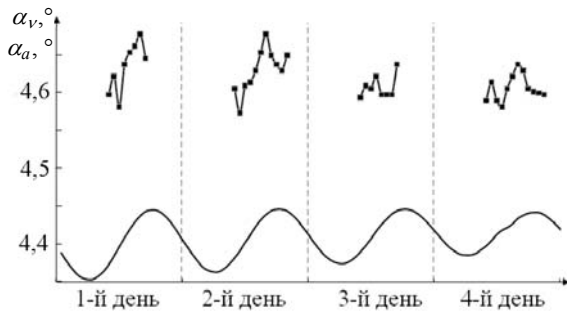


Рис. 9. Измерения угла места ИСЗ (сплошная кривая – угол места спутника, квадраты – измерения угла прихода)

Для вычисления градиента коэффициента преломления g_n численно решено интегральное уравнение (3), а полученные результаты сопоставлены с данными контактных измерений. Использовались результаты измерений профиля коэффициента преломления, полученные в Харьковском аэропорте с помощью шара-зонда, запуск которого проводился на 14 км южнее места нахождения интерферометрического комплекса.

Для вычисления градиента коэффициента преломления g_n измеренные профили аппроксими-

ровались экспоненциальной кривой (1) по методу наименьших квадратов. Полученные данные условно разбиты на две категории, первая категория хорошо описывается экспоненциальной моделью (рис. 10, а). Такого рода данные наблюдаются, как правило, в спокойную, безветренную погоду и характеризуются малой величиной ошибки аппроксимации ($\delta_{\text{апп}} < 2 N$ -ед.). Вторая категория наблюдается преимущественно в ветреную и изменчивую погоду и связана с большой ошибкой аппроксимации ($\delta_{\text{апп}} > 2 N$ -ед.) – (рис. 10, б).

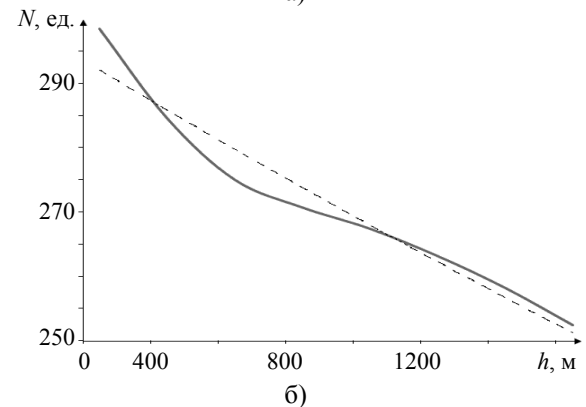
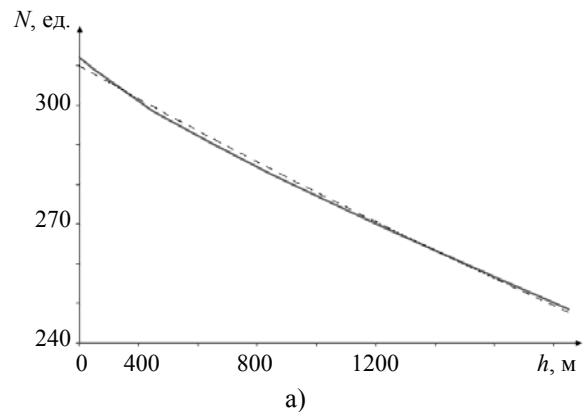


Рис. 10. Высотные профили коэффициента преломления (сплошные кривые) и их экспоненциальные аппроксимации (пунктирные кривые), измеренные помощью шара-зонда

Рассчитанные с помощью аппроксимированных данных (рис. 10) значения градиента коэффициента преломления для разного времени суток приведены на рис. 11 (кружки), где также показаны результаты измерений с помощью разработанного комплекса (крестики). Как видно из рисунка, большинство измеренных данных удовлетворительно совпадает с результатами расчетов, использующих контактные измерения для модели экспоненциального профиля (рис. 10, а).

В ряде случаев (рис. 11, измерения на 10, 12 и 17-е сутки) наблюдается значительное расхождение результатов, которые характерны для второй категории профилей показателя преломления (рис. 10, б). Это значит, что возможности

описанного метода измерения градиента коэффициента преломления с помощью радиointерферометра существенно ограничены для условий распространения радиоволн в тропосфере, когда профиль коэффициента преломления не соответствует экспоненциальной модели (1).

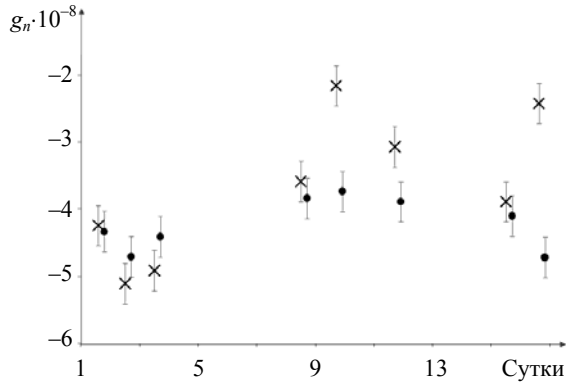


Рис. 11. Сопоставление градиентов коэффициента преломления, полученных контактнм методом (кружки) и по результатам измерений интерферометрического комплекса (крестики)

Однако приведенные данные экспериментального исследования радиофизического комплекса хорошо соотносятся с данными контактных измерений, что в целом подтверждает работоспособность приведенного интерферометрического метода измерения градиента коэффициента преломления [2, 3] в соответствии с экспоненциальной моделью высотного профиля.

Выводы. Таким образом, проведена оценка аппаратной точности измерения разработанного измерительного комплекса и показано, что СКО измерения угла прихода точечного излучателя составляет $-0,05'$ за счет влияния собственных шумов приемника.

Общая аппаратная погрешность с учетом температурного расширения антенно-фидерного тракта и многолучевости не превышает $0,1'$.

Параметры разработанного радиофизического комплекса позволяют обеспечить СКО ошибки измерений градиента коэффициента преломления не более $\sigma_g \leq 3 \cdot 10^{-9}$.

Сопоставление полученных результатов измерений градиента коэффициента преломления с контактными измерениями показали удовлетворительное соответствие. В случае, когда высотный профиль коэффициента преломления тропосферы сильно отличается от экспоненциального, данный метод дает значительные погрешности измерения градиента коэффициента преломления, что накладывает ограничения в применении этого метода.

1. *Спутниковая связь и вещание: справочник* / под ред. Л. Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1988. – 345 с.

2. 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.
3. 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.
4. Bean V. R. Models of the atmospheric radio refractive index / V. R. Bean, G. D. Thayer // *Proc. of the IRE.* – 1959. – 47, N 5. – P. 740–755.
5. Колосов М. А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М. А. Колосов, А. В. Шабельников. – М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.
6. Белавин О. В. Основы радиопеленгации / О. В. Белавин. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
7. Моргул Г. М. Измерение характеристик морского волнения на макете декаметрового РЛС поверхностной волны. / Г. М. Моргул, И. И. Пикулик // *Радиофизические исследования мирового океана: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – Х., 1992. – С. 20–28.

S. I. Khomenko, G. I. Khlopov, D. D. Khalameyda

MEASURING APPARATUS ON BASIS OF INTERFEROMETER FOR RESEARCH OF REFRACTION OF TROPOSPHERE USING GEOSTATIONARY SATELLITE RADIATION

Results of development of the apparatus on the basis of interferometer for research of refraction of troposphere by means of measurements of arrival angle of geostationary satellite radiation are presented. Block diagram, parameters and accuracy studying results of the apparatus are described. Achieved parameters of the apparatus provide arrival angle measurement accuracy which is required to get a gradient of refraction index of exponential model of the troposphere.

Key words: refraction, interferometer, geostationary satellite, gradient of refraction index.

С. И. Хоменко, Г. І. Хлопов, Д. Д. Халамейда

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕФРАКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРОПОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОВІПРОМІНЮВАННЯ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

Наведено результати розробки радіофізичного комплексу на базі радіointерферометра НВЧ-діапазону для дослідження рефракційних властивостей тропосфери шляхом виміру кута приходу радіосигналів геостационарних штучних супутників Землі. Розглянуто схему побудови, параметри комплексу й результати досліджень точності вимірів. Показано, що досягнуті параметри дозволяють забезпечити середньоквадратичне відхилення помилки виміру кута приходу $\delta\theta = 0,1'$, потрібне для одержання градієнта коефіцієнта заломлення радіохвиль у експоненціальній моделі тропосфери.

Ключові слова: рефракція, інтерферометр, геостационарний супутник, градієнт коефіцієнта заломлення.

Рукопись поступила 26.05.11 г.