

В. Б. СИНИЦКИЙ, канд. техн. наук, *И. С. ТУРГЕНЕВ*, д-р техн. наук,
С. И. ШИРМАНОВА

ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ УГЛОВ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ ПО РАДИОЗАХОДАМ ИСЗ НАД МОРЕМ

Рефракция является важнейшей характеристикой земной атмосферы, определяющей условия распространения радиоволн различных диапазонов. Представляют интерес исследования рефракции во всей толще атмосферы с использованием сигналов внеземных источников, в том числе искусственных спутников Земли (ИСЗ). Такая методика перспективна для изучения физики атмосферы и развития методов диагностики условий распространения радиоволн.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований углов атмосферной рефракции на трассе Земля — Космос по данным радиозаходов над морем ИСЗ навигационной системы «Транзит», а также расчеты углов рефракции для некоторых моделей атмосферы.

В основу измерений положен интерференционный метод [1; 2], предполагающий сопоставление характерных точек (минимумов лепестковой структуры поля) на экспериментальной и расчетной зависимостях уровня сигнала при радиозаходе ИСЗ (углы места менее 5—10°). Экспериментальные зависимости получаются на выходе приемного устройства в виде записей уровня сигнала, а расчетные вычисляются по данным навигационного сообщения, принятого с борта ИСЗ.

Прием сигналов ИСЗ «Транзит» (диапазон 400 МГц) производился на полуволновый диполь, установленный на высоте $h_1 = 48$ м над уровнем моря. За основу приемной системы взят приемник типа SMV-8,5, обеспечивающий вместе с устройствами обработки запись по отдельным каналам уровня сигнала и фазовоманипулированной составляющей, содержащей в закодированном виде параметры орбиты ИСЗ. Данные вводятся в ЭВМ для обработки расчета координат ИСЗ в функции времени.

Помимо приема и обработки спутниковых сигналов, методика исследований предполагала проведение в некоторых сериях исследований сопутствующих экспериментов, учитывающих степень рефракции в атмосфере. К ним относятся измерения уровней сигналов сантиметрового диапазона (СМВ), $f = 9300$ МГц, на приводной закрытой трассе протяженностью 60 км и уровней сигналов дециметрового диапазона (ДМВ), $f = 503$ МГц, от телецентра, удаленного на расстояние до 120 км. Имелась возможность сравнения результатов радиотехнических измерений с данными метеорологических зондирований приводного слоя атмосферы с борта корабля или с берега до высоты порядка 700 м, выполненных авторами работы [3].

Представлены результаты измерений, проведенных в 1987—1989 гг. (табл. 1.). Они являются продолжением предыдущих серий измерений 1985—1986 гг., выполненных при высоте приемной антенны 15 м [2].

Основной предмет анализа — временная реализация (запись уровня сигнала) при радиозаходе ИСЗ (использовать радиовосход методически менее удобно, так как при этом наиболее информативный начальный участок записи теряется в процессе поиска сигнала). Типичные примеры реализаций показаны на рис. 1. В опытах имеют место записи нормального и аномального типов. К нормальным (рис. 1, а, б) будем относить те, у которых лепестковая структура, обусловленная двухлучевым распространением вследствие отражений от морской

Таблица 1

Период	Количество сеансов			
	С ИСЗ	Радиоизмерения		Метеозондирование
		На трассе 60 км	На трассе 120 км	
18.09.87—30.09.87	16	15	—	13
30.05.88—14.06.88	49	45	25	21
27.05.89—15.06.89	51	34	37	19
15.09.89—26.09.89	43	29	35	23
Всего	159	123	97	76

поверхности, в целом сохраняется, приобретая лишь дополнительные флуктуации различной интенсивности в районе нижних лепестков. В опытах аномального типа лепестковая структура разрушена: наблюдается повышенная изрезанность записи, приводящая к замыванию минимумов, провалы уровня сигнала (рис. 1, в) или вырождение регулярной лепестковой структуры в случайную в виде хаотических всплесков. Согласно наблюдениям к аномальному типу реализаций с частично или полностью разрушенной лепестковой структурой можно отнести около 10 % всех опытов.

Качественный анализ экспериментальных данных показывает, что типы записей сигналов ИСЗ (рис. 1) в общих чертах согласуются с условиями прохождения сигналов на вагоризонтных трассах. Отмеча-

ется, что нормальному типу реализаций радиозаходов (рис. 1, а, б) обычно соответствуют слабые сигналы ДМВ с множителем ослабления $V \approx -(20 \div 30)$ дБ и умеренно слабые сигналы СМВ $V \approx -(10-40)$ дБ со слабыми флуктуациями. Напротив, преобладающему количеству аномальных радиозаходов соответствуют условия, характеризующиеся высокими устойчивыми сигналами $V \approx (-5 \div +10)$ дБ в диапазоне ДМВ, а также очень интенсивными флуктуациями $V \approx (-20 - +15)$ дБ при высоких средних значениях ($V \approx 0$ дБ) в диапазоне СМВ. Такое поведение сигналов на загоризонтных трассах свойственно аномальным условиям прохождения, кото-

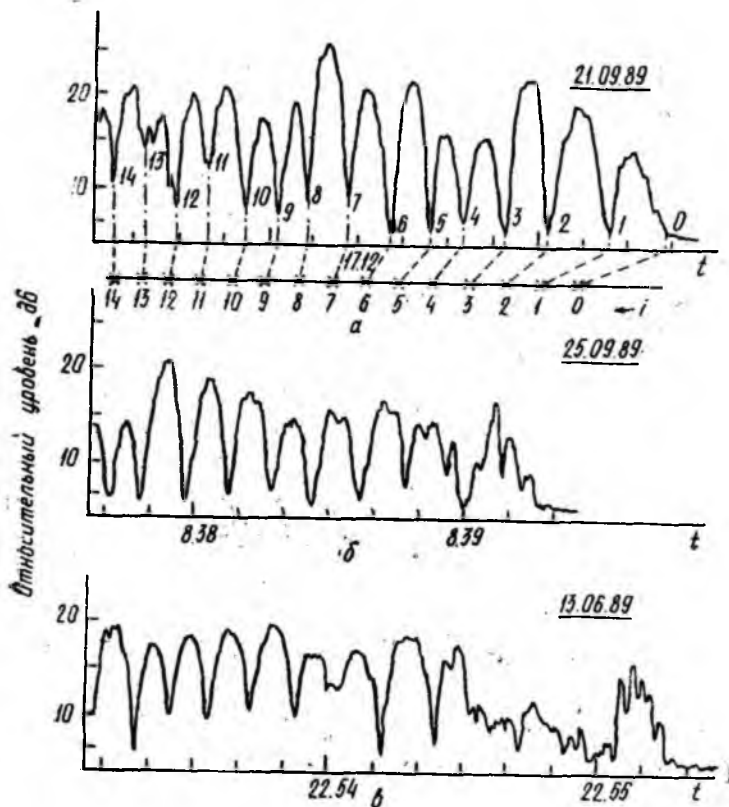


Рис. 1

рые обычно связываются с инверсиями коэффициента преломления атмосферы. Данные вондовых измерений в ряде случаев подтверждают эти наблюдения.

Таким образом, прослеживается качественное соответствие картины радиозахода ИСЗ общим условиям распространения радиоволн. Можно предположить, что нормальные реализации со слабыми флуктуациями соответствуют профилям коэффициента преломления $n(h)$,

локальные градиенты в отдельных участках которых не превышают критических значений, а аномальные записи обусловлены наличием в атмосфере приводных или приподнятых участков (слоев) со сверхкритическими градиентами. Учитывая изложенное, для дальнейшего представляется интерес сопоставление экспериментальных данных с расчетами, основанными на моделях атмосферы со слоистыми образованиями. Ниже рассмотрены некоторые возможные механизмы влияния тропосферных слоев на характеристики сигналов, принимаемых от ИСЗ, включая плавную деформацию лепестков, дополнительные осцилляции в районе радиозахода, провалы уровня сигнала. Основное внимание уделено плавной деформации лепестков как эффекту, в наибольшей мере поддающемуся количественному анализу.

По мере захода ИСЗ и приближения угла места к нулю величина рефракционной ошибки (угла рефракции δ) возрастает, что приводит к соответствующему росту приращения разности хода ΔR и деформации (растяжению) нижних интерференционных лепестков [2]. Степень такой деформации может, служить для измерения углов атмосферной рефракции. В дальнейшем под атмосферной рефракцией будем подразумевать ее тропосферную составляющую, так как в диапазоне 400 МГц добавка к углу рефракции за счет ионосферы достаточно мала [4]. Кроме того, для определенности будем различать рассчитанные (δ_p) и экспериментально измеренные (δ_s) значения углов рефракции δ .

Примем для расчета углов рефракции при плавной деформации лепестковой структуры модель атмосферы, использующую тропосферный профиль $n(h)$, состоящий из трех участков: нижний и верхний — экспоненциальные, средний — линейный (рис. 2)

$$n(h) = \begin{cases} 1 + \Delta n_1 \exp(gh/\Delta n_1) & 0 < h < h_{01}; \\ 1 + \Delta n(h_{01}) + g_1(h - h_{01}) & h_{01} < h < h_{02}; \\ 1 + \Delta n_0 \exp(gh/\Delta n_0), & h_{02} < h < \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где Δn_0 , Δn_1 и g — приземные значения коэффициента преломления и градиент в экспоненциальных участках, h_{01} и h_{02} — нижняя и верхняя границы линейного участка профиля с градиентом g_1 , h — текущее значение высоты. На рис. 2 некоторые из этих параметров показаны для выделенного профиля.

Расчет угла рефракции δ_p обычно производится через приращение $\Delta\theta$ центрального угла θ , который, в свою очередь, для произвольной зависимости $n(h)$ вычисляется через интеграл рефракции [4; 5]:

$$\theta = p \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{(a+h) \sqrt{n^2(h)(a+h)^2 - p^2}}, \quad (2)$$

где $p = (a + h_1) n(h_1) \cos \alpha_k$, h_1 и h_2 — высоты приемника и источника, α_k — кажущийся угол скольжения, $a = 6371$ км — радиус Земли.

Расчеты выполнены для некоторых характерных профилей при докритической рефракции (для градиентов, превышающих критическое

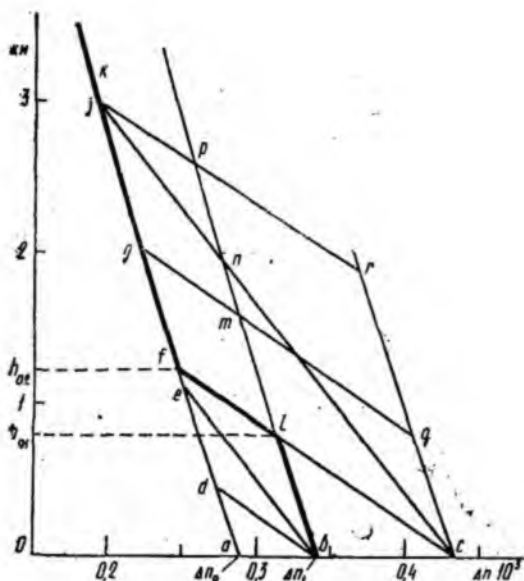


Рис. 2

значение, $g_{\text{кр}} < -\frac{1}{a} = -0,157 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}$, (расчет возможен не при всех сочетаниях параметров в (1)). Профили $n(h)$, использованные в расчете, представлены в табл. 2 и на рис. 2, где принято буквенное обозначение для каждой ломаной кривой. В качестве исходного служит профиль l , соответствующий стандартной экспоненциальной модели (последняя из формул (1) при $0 < h < \infty$ и численных параметрах $\Delta n_0 = 0,289 \cdot 10^{-3}$, $g = -0,393 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}$), принятой для среднеклиматических условий над сушей [5]. Параметры остальных профилей $n(h)$, имеющих повышенные, по сравнению со стандартными, значения Δn_1 и g_1 , в большей мере соответствуют приводному слою атмосферы.

Таблица 2

Номер	Профиль	h_{01}	h_{02}	Δh_c	$g_1 (g)$	$\Delta n_1 (\Delta n_0)$
1	$a-k$	—	—	—	$-0,393 \cdot 10^{-7}$	$0,289 \cdot 10^{-3}$
2	$b-p-i-k$	2600	3000	400	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,340 \cdot 10^{-3}$
3	$b-m-g-k$	1600	2020	420	»	»
4	$b-l-f-k$	800	1240	440	»	»
5	$b-d-k$	0	455	455	»	»
6	$b-n-j-k$	2050	3000	950	$-0,8 \cdot 10^{-7}$	»
7	$b-e-k$	0	1170	1170	»	»
8	$c-r-i-k$	1850	3000	1150	$-0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,432 \cdot 10^{-3}$
9	$c-q-g-k$	800	2010	1210	»	»
10	$c-f-k$	0	1260	1260	»	»
11	$c-j-k$	0	3000	3000	$-0,8 \cdot 10^{-7}$	»

Задачей расчета $\delta_p(\alpha_k)$ по серии профилей $n(h)$ является определение связи δ_p с параметрами слоя $g_1, h_{01}, \Delta n_c = n_c - n_0$ с целью анализа влияния на результат каждой из величин. Для кривые, выбранные для расчета, выполнены так, чтобы сохранилось примерное постоянство одного из параметров при изменении другого, что и отражено в табл. 2.

Результаты расчетов угла рефракции δ_p представлены на рис. 3. Исходному профилю стандартной модели $a-k$ здесь соответствует кривая 1. Остальные кривые, номера которых совпадают с цифрами в первой колонке табл. 2, иллюстрируют изменения δ_p при вариациях параметров слоя.

Из сопоставления рис 2 и 3 видно, что при перемещении слоя с постоянным градиентом по высоте углы рефракции увеличиваются по мере опускания слоя. Этим подтверждается, что максимальный угол рефракции будет иметь место при наличии приземной (приводной) инверсии, а такой же слой, поднятый выше, дает значительно меньшее приращение δ_p , что согласуется с результатами работы [6].

Проведенные расчеты дают возможность оценить пределы изменения углов рефракции в различных лепестках. Например, при $\alpha_k \cong 0,45^\circ$ (1 интерференционный минимум при $h_1 = 48$ м, рис. 3), величина рефракционной ошибки может изменяться в пределах $0,5-1,6^\circ$ (при изменении градиента в слое 0—400 м от стандартного до критического значения). В следующих интерференционных минимумах (при увеличении α_k) расчетные вариации углов рефракции, обусловленные разными профилями $n(h)$, значительно снижаются, существенными остаются только различия, связанные с Δn_1 (следствие теоремы Лапласа). Из рисунка видно также, что некоторые кривые, рассчитанные для разных профилей, практически сливаются (сравним, например, кривую 9 для критического слоя, расположенного в диапазоне высот 800—2000 м, и кривую 11 для слоя с градиентом $-0,8 \cdot 10^{-7}$ 1/м в диапазоне высот 0—3000 м). Разница между этими кривыми достигает всего $0,05^\circ$. Это может вызвать определенные затруднения при попытке восстановления профиля $n(h)$ по зависимости $\delta_p(\alpha_k)$ с целью диагностики состояния атмосферы.

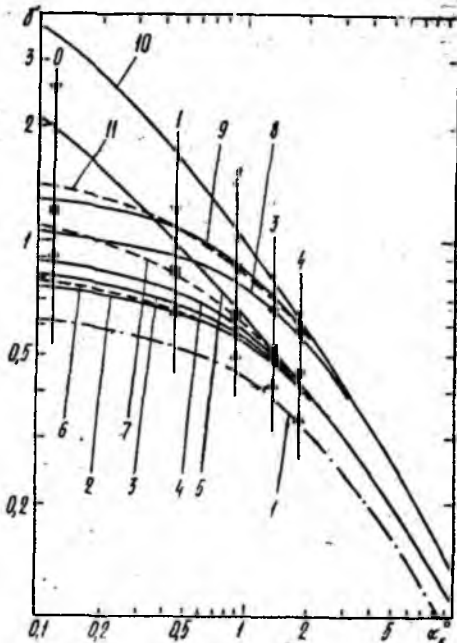


Рис. 3

Перейдем к анализу экспериментальных данных. Обобщая метод, применявшийся нами в работе [2] для нахождения угла рефракции в первом минимуме, определим угол рефракции для произвольного минимума как разность углов места $\delta_{zi} = \alpha_{pi} - \alpha_{zi}$ (3). Здесь α_{pi} — углы места ИСЗ, полученные из траекторного расчета в моменты времени, соответствующие минимумам рассчитанной для вакуума лепестковой структуры (в качестве примера такие точки отмечены знаком \times и пронумерованы по i на рис. 1, а); α_{zi} — углы места, полученные тем же путем для моментов времени экспериментальных минимумов.

Погрешности вычисления δ_{zi} таким методом, обусловленные ошибками при расчете опорной траектории по орбитальным данным ИСЗ и инструментальными ошибками эксперимента и обработки, по нашим оценкам, имеют квазимаксимальные значения порядка $\leq 0,1^\circ$. Добавочная погрешность в районе нулевого минимума, связанная с влиянием высоты приемной антенны и оцениваемая (путем интерполяции результатов [7] для $h_1 = 48$ м) величиной около $(0,015 \div 0,075)^\circ$, в условиях наших экспериментов является достаточно малой.

В результате обработки, проведенной для всех серий измерений, получены массивы экспериментальных данных отдельно для каждого минимума (от 0-го до 10—20-го). Для нижних пяти минимумов ($i = 0-4$), характеризующих наиболее неоднородную часть тропосферы, построены интегральные распределения углов рефракции, позволяющие судить о диапазоне изменения δ_{zi} в наших опытах. Отдельные значения интегральных распределений, характеризующие уровни, превышаемые в 5, 50 (медиана) и 95 % случаев, а также средние значения δ_{zi} и среднеквадратические отклонения (СКО) σ_{δ} для каждого массива представлены в табл. 3. Для сравнения эксперимен-

Таблица 3

Номер минимума	Расчет для стандартной рефракции	Эксперимент				
		δ_{95} (▲)	δ_{50} (■)	δ_5 (▼)	$\bar{\delta}_{zi}$	σ_{δ}
0	0,67	0,95	1,18	2,6	1,39	0,52
1	0,52	0,67	0,84	1,2	0,86	0,17
2	0,43	0,5	0,64	0,85	0,67	0,12
3	0,36	0,42	0,52	0,65	0,54	0,1
4	0,31	0,34	0,45	0,58	0,47	0,09

тальных данных с расчетными в таблицу внесены также расчетные значения $\delta_{рст}$ для стандартного профиля; с этой же целью результаты экспериментов δ_{95} (▲), δ_{50} (■) и δ_5 (▼) в виде указанных символов из табл. 3 перенесены на рис. 3, где 0—4 номера минимумов. Ввиду логарифмического масштаба положение нулевого минимума на рис. 3 показано условно, вблизи $\alpha_k = 0,1^\circ$.

Из анализа табл. 3 и рис. 3 следует, что во всех минимумах диапазон изменения экспериментальных значений δ_{zi} превышает углы реф-

ракции, рассчитанные для стандартной атмосферы, и в основном соответствует профилям рис. 2 с повышенными значениями Δn_1 и g_1 . Здесь нашел свое отражение тот факт, что эксперименты проведены над морем. На рис. 3 медианные значения и уровни, превышаемые в 95 и в 5 % случаев соответственно, уменьшаются по мере роста номера лепестка, практически следуя за изменениями области, занятой расчетными кривыми. Этим подтверждается правильность выбранных методик измерений и расчетов.

Кратко остановимся также на других эффектах при заходах ИСЗ, обусловленных слоистыми неоднородностями. Дополнительные периодические осцилляции, имеющие место на последних лепестках во многих экспериментах (см. рис. 1, б, в), могут объясняться, в частности, интерференцией прямого луча и луча, отраженного от приподнятого слоя [2]. Высота отражающей области слоя h_c может быть найдена из приближенной пропорции

$$\frac{h_c - h_1}{h_1} \cong \frac{T_{\text{осн}}}{T_{\text{доп}}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{осн}}$ — период основной лепестковой структуры, $T_{\text{доп}}$ — период дополнительных осцилляций, h_1 — высота приемной антенны. В некоторых случаях удастся найти численное соответствие определенных таким способом значений h_c высотам слоев, измеренным в процессе метеозондирования в близких по времени сеансах. Однако в большинстве случаев имеются расхождения между рассчитанными и измеренными значениями высот, обусловленные, по-видимому, пространственностью и временной неоднородностью слоев, а также несовершенством методики измерений.

Аномальные эффекты типа провалов уровня сигнала вблизи радиозахода («радиоямы», рис. 1, в) могут быть объяснены экранированием части лучей слоистой неоднородностью. Такие эффекты неоднократно наблюдались на наклонных измерительных трассах (см. например, [8]). Установлено, что замирения вследствие экранирования носят нерегулярный характер, возникают в диапазоне углов места (примерно $1-3^\circ$) и имеют глубину около 15—20 дБ. В наших опытах с ИСЗ провалы уровня сигнала имели место в разных сериях измерений, сопровождаемая, как правило, другими аномалиями радиозахода, свидетельствующими о наличии в атмосфере слоев. В некоторых случаях возможна сложная комбинация рассмотренных эффектов, приводящая к многолучевому распространению, способному полностью разрушить регулярную интерференционную картину для части лепестков. Следует, однако, отметить, что количество измерений с эффектами типа периодических осцилляций и экранирования, а также других аномалий, пока недостаточно, для их уверенной интерпретации требуются дополнительные экспериментальные исследования и модельные расчеты.

Таким образом, в экспериментах с ИСЗ наблюдаются различные реализации радиозаходов, анализируя которые можно в общих чертах судить о состоянии рефракции в атмосфере. Для случая неразрушенной лепестковой структуры возможен количественный расчет углов атмосферной рефракции при углах места, соответствующих мини-

мумам интерференционных лепестков. Из проведенных исследований следует статистическое соответствие экспериментально измеренных значений δ_z результатам расчета δ_p для слоистой модели атмосферы с параметрами профилей, характерными для приводного слоя. В ряде случаев возможна диагностика слоистых неоднородностей по наличию характерных периодических осцилляций на последних лепестках, а также по проявлению аномальных эффектов (экранирование или разрушение лепестков). Дальнейшее исследование требует совершенствования методик экспериментов и расчетов.

Авторы глубоко признательны М. В. Фадееву и Б. М. Курко за помощь при изготовлении аппаратуры и проведении измерений.

Список литературы: 1. *Anderson K. D.* Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements // *Radio Science*. 1982. Vol. 17, N. 5. P. 653—663. 2. *Экспериментальные исследования возможности применения интерференционного метода радиопросвечивания атмосферы с ИСЗ для диагностики условий распространения радиоволн / И. Д. Гонтарь, В. Б. Синицкий, И. С. Синицкий и др.* Х., 1990. 17 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т радиофизика и электроники, № 90—4). 3. *Гонтарь И. Д., Тургенев И. С., Хоменко С. И.* // Отчет по НИР «Траектория-ГБ». Х., 1987. 4. *Современная радиолокация: Пер с англ.* / Под ред. Ю. Б. Кобзарева. М., 1969. 704 с. 5. *Калинин А. И.* Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. М., 1979. 266 с. 6. *Шабельников А. В.* Рефракция электромагнитных волн в атмосфере Земли при наличии слоистых неоднородностей // *Радиотехника и электроника*. 1968. Т. 13, № 12. С. 2115—2121. 7. *Алексеев Г. А., Ширманова С. И.* О возможностях интерферометрического метода диагностики атмосферы, использующего излучение ИСЗ (См. статью в настоящ. сб.), 8. *Троицкий В. Н.* Распространение УКВ в горах. М., 1968. 84 с.

Поступила в редколлегию 22.01.90