

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН

К. П. Гайкович

Развивается метод определения углов рефракции на низких углах места, основанный на регрессионных соотношениях между величиной рефракции радиоволн и яркостными температурами теплового радионизлучения атмосферы для различных комбинаций частот и углов измерений. В рассматриваемом методе используется также связь рефракции с приземными метеопараметрами. Обсуждаются вопросы выбора оптимальных частот и углов измерений радионизлучения, влияния погрешности измерений на точность прогноза рефракции.

Среди проблем, связанных с рефракцией радиоволн в атмосфере, значительный интерес представляет достаточно точное вычисление рефракции при низких углах места. В работе рассматривается рефракция микрорадиоволн (длина волны $\lambda \leq 5$ см), на распространение которых не оказывает влияния ионосфера. В диапазоне углов места $10^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$ согласно «теореме Лапласа» рефракция с точностью $\sim 1''$ определяется приземным значением показателя преломления [1]. Для расчетов рефракции используются различные модели зависимости показателя преломления от высоты, например, биэкспоненциальная модель

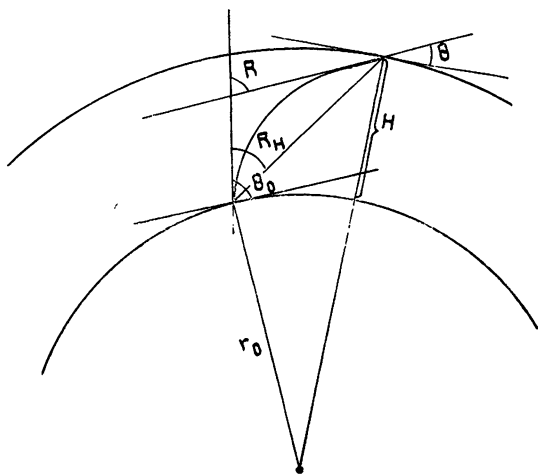


Рис. 1.

Колосова [1], модель диэлектрической проницаемости, разработанная в ИРЭ АН СССР [3]. На более низких углах места наблюдаются значительные отклонения от «теоремы Лапласа», связанные со случайным характером распределения метеопараметров вдоль пути луча. Показано [2], что основное влияние на рефракцию оказывают приземные слоистые неоднородности. В работе будет рассматриваться регулярная (не связанная с флуктуациями) астрономическая и атмосферная рефракция (соответственно R и R_H на рис. 1) в сферически-стратифицированной атмосфере. Геометрия рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

Показатель преломления, распределение которого вдоль пути луча определяет рефракцию, связан соотношением (5) с давлением, температурой и влажностью атмосферы. Яркостная температура собственного теплового излучения атмосферы также зависит от распределения этих метеопараметров, что дает возможность извлечь из измерений излучения информацию о метеопараметрах, а следовательно, и о рефракции. Это сделало бы осуществимым создание автоматизированных систем определения рефракции, действующих в реальном времени.

В данной работе исследуется метод, перспективность применения которого была показана в [4, 5]. Этот метод основан на нахождении прямых связей между величиной рефракции и яркостными температурами излучения атмосферы на ряде длин волн и углов в виде регрессионных соотношений, включающих в себя также статистические связи рефракции с приземными метеопараметрами. По сравнению с [4, 5] в работе использовалась конкретная сезонная метеорологическая статистика, учтены вариации приземного давления, исследовано большее число комбинаций измерений, предложен метод, позволяющий рассчитывать рефракцию в диапазоне углов места $1^\circ \leq \theta_0 \leq 5^\circ$. Показана также предпочтительность использования в схеме прогноза приземных значений температуры и влажности вместо приземного показателя преломления. Все это позволило заметно улучшить точность прогноза рефракции.

1. Для исследований брались ансамбли зондовых данных, соответствующие летним и зимним условиям для Центральной части ЕТ СССР. Эти данные пересчитывались на систему выбранных уровней по давлению (до 40 уровней), следующих в нижней части атмосферы через 10 мбар. Яркостные температуры вычислялись на ряде длин волн и углов по формуле

$$T_{\text{я}}(\varphi, \nu) = \int_0^{\infty} T(\tau) e^{-\tau} d\tau + T_{\text{рел}} e^{-\tau}, \quad (1)$$

где $\tau(\varphi, \nu, L) = \int_0^L \gamma[\nu, T(l), q(l), P(l)] dl$ — оптическая толщина вдоль пути луча длиной L , T — температура в К, φ — угол места приемника, ν — частота, q — удельная влажность, P — давление, $T_{\text{рел}}$ — температура реликтового фона. Коэффициент поглощения γ для рассматриваемых частот обусловлен вкладом линий кислорода и водяного пара [7]. Яркостная температура с учетом рефракции в сферической атмосфере рассчитывалась аналогично [6].

Рассчитывались также значения астрономической рефракции R и атмосферной рефракции R_H для высоты источника $H = 30$ км. Для стратифицированной сферической атмосферы траектория луча определяется законом Снеллиуса:

$$nr \cos \theta = n_0 r_0 \cos \theta_0. \quad (2)$$

Отсюда (подробный вывод содержится в [1]) можно получить формулы для нахождения рефракции

$$R = -n_0 r_0 \cos \theta_0 \int_{n_0}^1 \frac{1}{n} \frac{dn}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta}}; \quad (3)$$

$$R_H = -\text{ctg} \theta_0 \int_{n_0}^{n_H} \left(1 - \frac{h}{H}\right) dn + \frac{\text{tg} \theta_0}{\sin^2 \theta_0} \int_{n_0}^{n_H} \left(1 - \frac{h}{H}\right) \times$$

$$\times \left[1 - \frac{1}{1 + 2\text{ctg}^2 \theta_0 \frac{h}{r_0}} + \frac{\text{ctg}^2 \theta_0 (n - n_0)}{\left(1 + 2\text{ctg}^2 \theta_0 \frac{h}{r_0} \right)^{3/2}} \right] dn, \quad (4)$$

где n — показатель преломления, вычисляемый по формуле [7]:

$$(n - 1) \cdot 10^6 = \frac{77,607(P - l)}{T} + \frac{77,6l}{T} + 3,747 \cdot 10^5 \frac{l}{T^2}, \quad (5)$$

n и n_n — показатели преломления соответственно на высоте h , равной соответственно 0 и H ; P — атмосферное давление в мбар, l — упругость водяного пара в мбар, $r_0 = 6370$ км — радиус Земли.

2. По формулам, приведенным выше, были рассчитаны для каждого зонда из летнего и зимнего ансамблей значения рефракции и соответствующие им наборы яркостных температур на различных длинах волн и углах. В работе приводятся вычисления для угла места приемника $\theta_0 = 1^\circ$. Для того, чтобы исключить неопределенность в значениях яркостных температур и рефракции, связанную с вариациями приземного давления P_0 , фиксировался начальный уровень давления. Вычисления производились для ряда давлений на начальном уровне ($h = 0$), таким образом, приземное давление входит как параметр во все полученные величины.

Прежде всего определялись средние значения рефракции и ее естественные вариации, связанные с вариациями метеопараметров. Вариации вычислялись по формуле

$$\sigma_R = \sqrt{\langle (R - \langle R \rangle)^2 \rangle}, \quad (6)$$

где символ $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение по всем зондам в наборе. Результаты приведены в табл. 1, 3. Ошибка прогноза рефракции по ее среднему значению равна σ_R . Эту погрешность можно существенно уменьшить, используя статистические связи рефракции с приземными метеопараметрами и с тепловым излучением атмосферы.

Таблица 1

Средние значения рефракции, ее вариации, ошибки прогноза по формуле (11) и коэффициенты регрессии для (11) при различных начальных давлениях

P_0 , мбар	Лето					Зима				
	$\langle R \rangle$	σ_R	δR	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$	$\langle R \rangle$	σ_R	δR	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$
1010	29' 52"	2' 44"	35"	- 6,42	31,64	28' 12"	48"	19"	- 6,46	40,30
1000	29' 33"	2' 32"	33"	- 6,41	31,24	28' 04"	47"	19"	- 6,32	39,08
990	29' 15"	2' 26"	32"	- 6,40	31,10	27' 49"	45"	20"	- 6,16	37,95
980	28' 57"	2' 23"	32"	- 6,42	31,31	27' 35"	43"	21"	- 6,00	29,65

Величина рефракции искалась в виде линейной регрессии от приземных метеопараметров и яркостных температур на различных частотах и углах:

$$\tilde{R} = \bar{a}^T \bar{T}_n, \quad (7)$$

где $\bar{a} = [a_1, \dots, a_n]$ — n -мерный вектор регрессионных коэффициентов, а $\bar{T}_n = [T_0, q_0, T_{я_1}, \dots, T_{я_{n-1}}]$ — n -мерный вектор данных. Коэффициенты регрессии определяются из условия минимума среднеквадратичной ошибки δR прогноза:

$$(\delta R)^2 = \langle (R - \bar{a}^T \bar{T}_n)^2 \rangle. \quad (8)$$

Условием минимума δR будет

$$\nabla_{\bar{a}}(\delta R)^2 = 0, \quad (9)$$

где $\nabla_{\bar{a}}$ обозначает дифференцирование по каждой компоненте вектора \bar{a} , т. е. (9) является системой линейных уравнений. Решением (9) будет

$$\bar{a} = (\langle \bar{T}_\alpha \bar{T}_\alpha^t \rangle)^{-1} \langle \bar{T}_\alpha R \rangle. \quad (10)$$

В формулах (7) — (10) знак «т» означает транспонирование, а все величины представляют из себя отклонения от своих средних значений.

Вычисления были выполнены на ЭВМ БЭСМ-6. На вычисленные по зондовым данным значения яркостных температур набрасывалась нормально распределенная случайная ошибка с нулевым средним и дисперсией $(\delta T_\alpha)^2$, равной дисперсии погрешности измерений. Полученные таким путем «данные» использовались затем в (10) для получения регрессионных коэффициентов. После этого на точные яркостные температуры вновь набрасывалась случайная ошибка и вычислялись по формуле (7) прогнозируемые значения рефракции \tilde{R} . Сравнивая полученные значения рефракции с рассчитанными по зондовым данным согласно (3), (4), получаем среднеквадратичную ошибку прогноза $\delta R = \sqrt{\langle (R - \tilde{R})^2 \rangle}$.

3. В табл. 1 представлены результаты прогноза рефракции по приземным значениям температуры и удельной влажности по формуле, получаемой из (7):

$$\tilde{R} = \langle R \rangle + a_1(T_0 - \langle T_0 \rangle) + a_2(q_0 - \langle q_0 \rangle), \quad (11)$$

где R — в радианах, T_0 — в К, q_0 — в г/кг.

Из сравнения с приведенными здесь же вариациями видно, что учет этих статистических связей уменьшает неопределенность в прогнозе рефракции приблизительно в 6 раз для летних условий и в 2,5 раза — для зимних. Зимой корреляция рефракции с приземными метеопараметрами меньше из-за наличия инверсий их высотного распределения, но меньше и вариации рефракции, что связано с резким уменьшением по сравнению с летом влажности и ее вариаций. Прогноз по приземному значению показателя преломления оказывается на 3—4'' хуже. Это связано с тем, что, как видно из (5), одному значению n_0 могут соответствовать самые разные наборы T_0 и q_0 . Профили T и q хорошо коррелируют с приземными значениями, но в значительной мере статистически независимы друг от друга, следовательно, для прогноза профиля n нужно использовать и T_0 и q_0 . Из табл. 1 видно, что коэффициенты регрессии слабо зависят от P_0 , особенно летом, поэтому без внесения заметной ошибки можно пользоваться единой формулой с усредненными коэффициентами. Не исключено, что летняя формула будет неплохо работать для зимних условий.

Для дальнейшего уточнения рефракции в схему прогноза включались данные о тепловом излучении атмосферы. Одним из важнейших здесь является вопрос выбора частот и углов измеряемого излучения атмосферы. Поскольку, как видно из (5), рефракция зависит от распределений температуры и влажности, представляется разумным выбирать частоты излучения в линиях поглощения кислорода (около 60 ГГц) и водяного пара (например, 22,235 ГГц). Углы, вообще говоря, надо выбирать ближе к углу θ_0 , на котором рассматривается рефракция, чтобы были отражены условия вдоль пути луча. В работе исследовались

5 частот на склоне полосы поглощения кислорода в диапазоне 52—56 ГГц и 5 частот в полосе водяного пара в диапазоне 19,5—22,235 ГГц на углах места от 1 до 90° в комбинациях, включающих от одного до трех измерений радиоизлучения. Для приведенных результатов полагалась ошибка измерений с $\delta T_{я} = 1$ К. Среди комбинаций, включающих одно измерение, лучшей для летних условий оказалась комбинация с яркостной температурой $T_{я_1}$ на частоте $\nu = 19,5$ ГГц и угле места $\varphi = 10^\circ$. Прогноз рефракции выполнялся по формуле, получаемой из (7):

$$\tilde{R} = \langle R \rangle + a_1(T_0 - \langle T_0 \rangle) + a_2(q_0 - \langle q_0 \rangle) + \sum_i a_{i+2}(T_{я_i} - \langle T_{я_i} \rangle). \quad (12)$$

Таблица 2

Коэффициенты регрессии в формуле (12) и ошибка прогноза в схеме с использованием одной яркостной температуры $T_{я_1}$ ($\nu = 19,5$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$) для летних условий

P_0 , мбар	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$	$a_3 \cdot 10^5$	δR
1010	-6,40	41,01	-1,34	16"
1000	-6,41	41,13	-1,33	19"
990	-6,30	40,30	-1,24	21"
980	-6,34	40,45	-1,22	21"

Результаты приведены в табл. 2. Необходимые средние величины можно найти в табл. 1, 3. Прогноз по формуле (12) уменьшает неопределенность в рефракции еще почти в два раза по сравнению с прогнозом по (11). И в этом случае коэффициенты регрессии слабо зависят от P_0 . В зимних условиях добавление одного измерения излучения мало улучшает точность прогноза. В табл. 4 представлены лучшие результаты прогноза рефракции по формуле (12) среди всех исследованных комбинаций. Для летних условий лучшей оказалась комбинация из трех измерений: $T_{я_1} = T_{я}$ ($\nu = 19,5$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$); $T_{я_2} = T_{я}$ ($\nu = 54$ ГГц, $\varphi = 90^\circ$); $T_{я_3} = T_{я}$ ($\nu = 22$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$). По сравнению с вариациями неопределенность в определении рефракции для такого прогноза уменьшается в 12 раз, по сравнению с прогнозом по приземным метеопараметрам согласно (11) — в 2,5—3 раза. Для зимних условий лучшей оказалась комбинация из двух измерений: $T_{я_1} = T_{я}$ ($\nu = 19,5$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$); $T_{я_2} = T_{я}$ ($\nu = 54$ ГГц, $\varphi = 90^\circ$), которые несут информацию о распределении соответственно влажности и температуры. Неопределенность по сравнению с вариациями уменьшается здесь в 8 раз и в 3 раза по сравнению с прогнозом (11). Достигнутая здесь точность $\sim 6''$ приближается уже к погрешности вычислений. Добавление в схему прогноза третьего измерения не приводило к заметному уменьшению погрешности. Казалось бы, что хорошие результаты должны получаться точно в резонансе водяного пара ($\nu = 22,235$ ГГц), где поглощение наибольшее, однако точно в центре линии ядро интеграла в (1) имеет такой вид, что основной вклад в излучение вносит водяной пар на больших высотах, а для рефракции важно распределение в нижних слоях атмосферы. Не исключено тем не менее, что в какой-нибудь комбинации эта частота окажется эффективной, хотя измерения точно в резонансе требуют очень высокого разрешения по частоте ($\sim 0,1$ МГц).

Исследовалось влияние погрешностей измерения, вводимых в схему расчета, на точность прогноза. При увеличении на 0,5 К ошибка возрас-

тала на 2" в интервале 0—1,5 К. Это лучше, чем оценка погрешности прямо по формуле (12), что связано с тем, что ошибка частично компенсируется самой схемой вычисления изменением регрессионных коэффициентов и перераспределением вклада слагаемых. Таким образом, лучше всего вводить в схему погрешности используемых приборов. Для лучших приведенных результатов максимальная ошибка прогноза рефракции в ансамбле не превышала 15" для зимних условий и 30" для летних.

Таким образом, в условиях, когда атмосферу можно считать стратифицированной, прогноз рефракции статистическими методами оказывается весьма эффективным. Можно предложить следующий метод использования приведенных результатов. В диапазоне P_0 от 970 до 1020 мбар можно прогнозировать рефракцию по (11), (12), линейно интерполируя или экстраполируя по P_0 приведенные в таблицах коэффициенты регрессии и средние значения входящих в формулу величин, что не приводит к заметным ошибкам. Результаты приводятся для рефракции при $\theta_0 = 1^\circ$. Строго говоря, на других углах необходимо использовать свои коэффициенты регрессии. Интерес представляют углы места $\theta_0 = 1-5^\circ$, на более высоких углах хорошо работают известные модели. Однако рефракция на этих углах почти полностью коррелирована с рефракцией при $\theta_0 = 1^\circ$ [8]. Пользуясь табл. 3, можно путем линейной интерполяции по θ_0 получить среднее значение рефракции $\langle R(\theta) \rangle$. А затем, пользуясь результатами для $\theta_0 = 1^\circ$, полученными согласно (11), (12), вычислить рефракцию на другом угле по формуле

$$\tilde{R}(\theta) = \tilde{R}(1^\circ) \frac{\langle R(\theta) \rangle}{\langle R(1^\circ) \rangle}. \quad (13)$$

При этом точность прогноза составит

$$\delta R(\theta) = \delta R(1^\circ) \frac{\langle R(\theta) \rangle}{\langle R(1^\circ) \rangle} + 1 \div 3". \quad (14)$$

Таблица 3

Средние значения T_0 , q_0 , $T_{я_1}$ ($\nu = 19,5$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$), $T_{я_2}$ ($\nu = 54$ ГГц, $\varphi = 90^\circ$), $T_{я_3}$ ($\nu = 22$ ГГц, $\varphi = 10^\circ$) и рефракции на углах места 2—5°

P_0 , мбар	Лето, средние значения для формул (11)—(13)								
	T_0 , К	q_0 , г/кг	$T_{я_1}$, К	$T_{я_2}$, К	$T_{я_3}$, К	$R(2^\circ)$	$R(3^\circ)$	$R(4^\circ)$	$R(5^\circ)$
1010	297,1	9,327	05,7	26°,5	195,0	21'19"	16'24"	13'14"	11'01"
1000	296,3	9,042	102,5	260,9	191,7	21'05"	16'13"	13'05"	10'54"
990	295,4	8,779	99,4	259,5	188,5	20'53"	16'04"	12'53"	10'48"
980	294,5	8,504	96,5	258,1	185,2	20'41"	15'54"	12'49"	10'41"
Зима, средние значения для формул (11)—(13)									
1010	262,4	1,603	39,8	236,5		20'09"	15'30"	12'30"	10'25"
1000	262,0	1,558	38,7	235,4		20'03"	15'25"	12'26"	10'22"
990	261,9	1,534	37,7	234,4		19'52"	15'16"	12'19"	10'16"
980	261,8	1,512	37,0	233,2		19'42"	15'09"	12'13"	10'11"

При увеличении угла места величина вариаций рефракции быстро уменьшается, что позволяет с хорошей точностью пользоваться формулой (13).

Результаты для атмосферной рефракции R_H для $H = 30$ км примерно совпадают по полученной точности с приведенными. Для произвольной высоты H , по-видимому, можно предложить метод, сходный с (13).

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты регрессии в формуле (12) для лучших комбинаций измерений и ошибки прогноза

P_0 , мбар	Лето, прогноз по $T_0, q_0, T_{я_1}, T_{я_2}, T_{я_3}$						Зима, прогноз по $T_0, q_0, T_{я_1}, T_{я_2}$				
	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$	$a_3 \cdot 10^5$	$a_4 \cdot 10^5$	$a_5 \cdot 10^5$	δR	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^5$	$a_3 \cdot 10^5$	$a_4 \cdot 10^5$	δR
1010	-7,91	41,83	-3,27	2,01	1,17	12"	-7,33	46,63	-1,45	3,10	6"
1000	-7,82	42,69	-3,44	1,78	1,22	15"	-7,42	46,78	-1,42	3,13	6"
990	-7,87	41,98	-3,47	1,99	1,25	16"	-7,51	47,75	-1,52	3,22	7"
980	-8,03	42,16	-3,75	2,34	1,39	15"	-7,30	46,26	-1,64	3,35	7"

Возможно, эффективным оказалось бы включение в схему инфракрасных измерений или других участков радиодиапазона. Использование этого метода ограничено климатическими условиями использованной для нахождения необходимых параметров метеорологической статистики. Лучше всего применять такой прогноз в стационарных условиях, пользуясь найденной для данного места статистикой. Не исключено, что окажется возможным получить достаточно универсальный вариант метода. Облачность не влияет на величину рефракции, однако может сильно изменять яркостные температуры. Тут возможны два пути: выбор частот наблюдения в области, где облака не влияют на излучение, или учет их влияния на яркостные температуры.

Автор признателен А. П. Наумову за обсуждение полученных результатов и Т. П. Кирасировой за помощь в оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Колосов, А. А. Шабельников, Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса, изд. Сов. радио, М., 1976.
2. В. А. Ефанов, М. А. Колосов, И. Г. Моисеев и др., XII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, Тезисы докладов, ч. 1, изд. Наука, М., 1978, с. 9.
3. Н. А. Арманд, М. А. Колосов, Радиотехника и электроника, 10, № 8, 1401 (1965).
4. M. A. Gallor, L. E. Telford, Radio Sci., 8, № 10, 819 (1973).
5. M. A. Gallor, L. E. Telford, Radio Sci., 10, № 11, 935 (1975).
6. К. П. Гайкович, А. П. Наумов, Радиотехника и электроника, 24, № 1, 168 (1979).
7. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. вузов — Радиофизика, 10, № 9—10, 1214 (1967).
8. А. П. Наумов, Препринт № 120, НИРФИ, Горький, 1978.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
3 июля 1979 г.

ON THE USE OF MEASUREMENTS OF ATMOSPHERE HEAT RADIATION FOR DEFINITION OF THE RADIO WAVE REFRACTION

K. P. Gajkovich

A method is developed for refraction angles definition at low elevation angles. It is based on regressive relations between the value of radio wave refraction and brightness temperatures of the heat atmosphere radiation for different combinations of frequency and measurement angles. In the method considered a relation of refraction with ground meteoparameters is used. Problems of a choice of the optimal frequencies and angles of the radiation measurement are discussed as well as the effect of measurement errors on the accuracy of the refraction prognosis