

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

МОДЕЛЬ ПЛАНЕТНОЙ РЕФРАКЦИИ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

УДК 551.593.1

С.В. Соколовский

На основе имеющихся в литературе моделей вертикальных профилей плотности воздуха рассчитаны модельные зависимости угла планетной рефракции и его производной от высоты перигея луча визирования. Приведены формулы, позволяющие рассчитывать коэффициент рефракционного ослабления плотности потока излучения при наблюдениях внеземных источников света через атмосферу из космоса. Разработанная модель может использоваться для определения высоты перигея луча визирования по измерениям углов планетной рефракции, в частности в задачах автономной космической навигации.

Введение

Планетная рефракция в атмосфере Земли оказывает существенное влияние на условия наблюдения внеземных источников электромагнитного излучения из космоса. Угол рефракции для оптического луча, касающегося земной поверхности, составляет $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ рад, т. е. примерно 2 угловых диаметра Солнца. Кроме углового смещения изображений точечных источников (например, звезд) атмосферная рефракция приводит к существенному искажению изображений источников с конечными угловыми размерами (Солнца, Луны) вследствие изменения угла рефракции с высотой перигея просвечивающего луча. Рефракция в атмосфере может приводить также к существенному изменению (в среднем — к уменьшению) плотности потока излучения вследствие дефокусировки его атмосферой. Наконец, зависимость показателя преломления воздуха от длины волны света приводит к дисперсионному размытию изображений источников, которое, с одной стороны, может являться помехой при измерениях углов рефракции, а с другой стороны, будучи измерено, само несет информацию об углах рефракции. Все вышеизложенное свидетельствует о необходимости учета атмосферной рефракции при решении широкого круга задач, связанных с радио и оптическими лимбовыми наблюдениями из космоса.

Поскольку планетная рефракция определяется распределением показателя преломления, т. е. фактически плотности в атмосфере, то относительно малая изменчивость последней приводит к большей стабильности рефракционных свойств атмосферы по сравнению с другими оптическими свойствами, обусловленными экстинкцией. В связи с этим в последнее время появился заметный интерес к методам использования измерений рефракции для определения высоты перигея луча визирования и решения задач автономной космической навигации [1]. Кроме того, рефракционная высотная привязка луча визирования может использоваться при интерпретации данных других лимбовых оптических измерений.

Перечисленный круг задач требует для своего решения соответствующую рефракционную модель атмосферы, т. е. некоторые стандартные зависимости угла планетной рефракции и коэффициента рефракционного ослабления плотности потока излучения от высоты перигея просвечивающего луча и высот источника и приемника для различных широт и сезонов, а также характеристики изменчивости указанных зависимостей. Такая модель была разработана на основе расчетов, проведенных в течение ряда лет в ИФА АН СССР, основные результаты которых содержатся в [2]. В основу проведенных расчетов была положена стандартная модель атмосферы [3], а также данные о статистической структуре метеополей [4]. В настоящее время появилась новая, уточненная и более подробная модель атмосферы, содержащая в том числе статистические характеристики изменчивости метеопараметров на больших высотах [5]. Кроме того, усовершенствованы методики расчетов рефракционных эффектов. Все это позволило приступить к созданию новой рефракционной модели атмосферы, основы которой (методика расчетов и некоторые результаты) приведены в настоящей статье.

Основные соотношения

Будем рассматривать распространение электромагнитных волн в лучевом приближении и предполагать сферическую симметрию распределения показателя преломления с вертикальным профилем, соответствующим точке перигея просвечивающего луча. Показатель преломления n в оптическом диапазоне с точностью 0,3% может быть задан формулой [5]:

$$n = 1 + C(\lambda)\rho = 1 + 2,227 \cdot 10^{-4}(1 + 7,526 \cdot 10^{-3}/\lambda^2)\rho, \quad (1)$$

где ρ — плотность в $\text{кг}/\text{м}^3$; λ — длина волны в мкм .

Траектория луча (см. рис. 1, *a*) описывается известным законом Снеллиуса:

$$rn(r) \sin \varphi = p = \text{const}, \quad (2)$$

где $p = r_0 n(r_0)$ — прицельный параметр, а r_0 — радиус перигея луча.

Угол планетной рефракции луча ε (см. рис. 1, *a*) выражается через показатель преломления следующим образом:

$$\varepsilon = -2r_0 n(r_0) \int_{r_0}^{\infty} \frac{dn/dr}{n(r) [r^2 n^2(r) - r_0^2 n^2(r_0)]^{1/2}} dr \equiv \quad (3)$$

$$\equiv -2p \int_p^{\infty} \frac{d \ln n/dx}{(x^2 - p^2)^{1/2}} dx \cong - (2p)^{1/2} \int_p^{\infty} \frac{dn/dx}{(x - p)^{1/2}} dx, \quad (3a)$$

где $x = rn(r)$, причем выражение (3a) справедливо с точностью 0,05%.

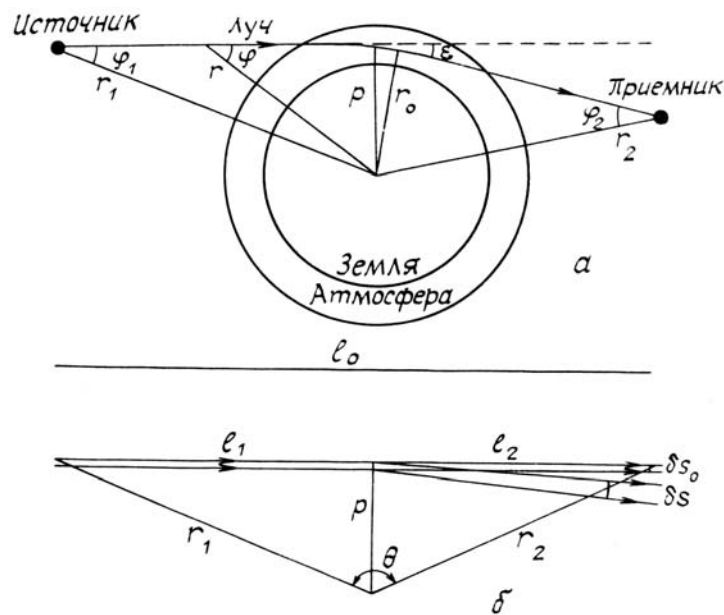


Рис. 1. Геометрия просвечивающего луча — *a* и изменение сечения лучевой трубки, при наблюдениях внеземных источников света через атмосферу из космоса — *б*

Коэффициент рефракционного изменения плотности потока излучения, определяемый как отношение сечений лучевых трубок $K = \delta s_0 / \delta s$ (см. рис. 1, *б*) может быть с помощью (2), (3) записан в виде

$$K = l_0 (l_1 + l_2 - l_1 l_2 d\varepsilon/dp)^{-1}, \quad (4)$$

где $l_1 = r_1 \cos \varphi_1$, $l_2 = r_2 \cos \varphi_2$, $l_0 = (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \vartheta)^{1/2}$. Для бесконечно удаленного источника, например звезды ($l_0 = l_1 = \infty$), вместо (4) получается

$$K = (1 - l_2 d\varepsilon/dp)^{-1}. \quad (5)$$

Следует отметить, что в выражениях (4), (5) величина $d\varepsilon/dp$ определяется только вертикальным профилем показателя преломления и не зависит от r_1 , r_2 , ϑ , а поэтому может быть представлена в виде модели и использована для расчетов рефракционного изменения плотности потока излучения по формулам (4), (5) для различной геометрии наблюдений.

Как следует из формулы (4), коэффициент K инвариантен относительно перестановки источника и приемника излучения (что соответствует известной теореме взаимности). Кроме того, как следует из определения, величина K характеризует также изменение видимого вертикального углового размера малого элемента изображения источника с конечными угловыми размерами.

Для получения основной статистической характеристики изменчивости углов рефракции — среднеквадратического отклонения σ_ε — можно воспользоваться выражением (3 а), линейным по n , откуда получается

$$\sigma_\varepsilon^2(p) = \langle \delta\varepsilon(p)^2 \rangle = 2p \int_p^\infty \int_p^\infty \frac{\partial^2}{\partial x' \partial x''} \langle \delta n(x') \delta n(x'') \rangle (x' - p)^{-1/2} (x'' - p)^{-1/2} dx' dx'', \quad (6)$$

где $\delta n = n - \langle n \rangle$, $\delta\varepsilon = \varepsilon - \langle \varepsilon \rangle$ — отклонения от средних величин. Таким образом, для расчёта σ_ε необходима корреляционная функция вариаций показателя преломления. Практически, однако, аэрологические измерения проводятся на конечном числе уровней и из эксперимента, как правило, известны корреляционные матрицы плотности $\langle \delta\rho_i \delta\rho_j \rangle = \langle \delta\rho(z_i) \delta\rho(z_j) \rangle$, где $i, j = 1, \dots, m$, откуда $\langle \delta n_i \delta n_j \rangle = C^2 \lambda \langle \delta\rho_i \delta\rho_j \rangle$. Поэтому при расчетах по формуле (6) приходится пользоваться интерполяцией, а это означает, что вклад высокочастотной части спектра вариаций показателя преломления в σ_ε не может быть корректно учтен. По-видимому, наиболее надежный способ определения σ_ε — это прямые измерения вариаций углов планетной рефракции.

Методика и результаты расчетов

В качестве исходных данных для расчетов стандартных зависимостей $\varepsilon(p)$ и $K(p)$ были использованы стандартные вертикальные профили плотности, соответствующие различным широтам и сезонам, известные с шагом 2 км в интервале высот 0–90 км [5] (далее в качестве независимой переменной наряду с r будет использоваться высота $z = r - r_3$, а также высота перигея линии визирования $y = p - r_3$, где r_3 — радиус Земли). Показатель преломления рассчитывался по формуле (1) для $\lambda = 0,8$ мкм. Профиль $n(x) - 1$, заданный на сетке $x_i = r_i n(r_i)$, в интервале 0 км $\leq z \leq 90$ км интерполировался между узлами при помощи натурального кубического сплайна [6]. Это позволило, с одной стороны, при расчете зависимости $\varepsilon(p)$ аналитически вычислить интеграл (3 а), а с другой — обеспечило достаточную гладкость профиля $n(x)$ и, следовательно, профиля $\varepsilon(p)$, учитывая математическую некорректность задачи определения $\varepsilon(p)$ по формулам (3), (3 а), содержащих операцию дифференцирования. Поскольку задача определения $d\varepsilon/dp$ также является математически некорректной, то полученная сеточная зависимость $\varepsilon(p)$ снова интерполировалась натуральным кубическим сплайном в интервале 0 км $\leq z \leq 50$ км, после чего производная $d\varepsilon/dp$ вычислялась аналитически. В табл. 1 представлены результаты расчетов для зимней и летней атмосферы средних широт (45°). Данные, приведенные в табл. 1, позволяют вычислять показатель преломления n , угол планетной рефракции ε и коэффициент K рефракционного ослабления плотности потока излучения точечного источника (вертикальной угловой деформации элемента изображения протяженного источника) по формулам (4), (5) для $\lambda = 0,8$ мкм.

Таблица 1

Средние широты, январь

z (км)	y (км)	$n-1$	ε (рад)	$d\varepsilon/dp$ (рад/км)
0	1.867	.2932E-03	.2172E-01	— .2883E-02
1	2.670	.2615E-03	.1938E-01	— .2791E-02
2	3.486	.2333E-03	.1723E-01	— .2557E-02
3	4.326	.2084E-03	.1523E-01	— .2149E-02
4	5.187	.1863E-03	.1352E-01	— .1762E-02
5	6.062	.1666E-03	.1217E-01	— .1503E-02
6	6.948	.1487E-03	.1097E-01	— .1304E-02
7	7.843	.1322E-03	.9801E-02	— .1119E-02
8	8.748	.1174E-03	.8811E-02	— .9701E-03
9	9.663	.1042E-03	.8057E-02	— .8815E-03
10	10.583	.9154E-04	.7307E-02	— .8708E-03
11	11.503	.7891E-04	.6408E-02	— .9375E-03
12	12.430	.6743E-04	.5488E-02	— .9590E-03
13	13.368	.5777E-04	.4668E-02	— .8271E-03
14	14.315	.4959E-04	.3975E-02	— .6589E-03
15	15.271	.4251E-04	.3404E-02	— .5437E-03
16	16.232	.3642E-04	.2921E-02	— .4642E-03

Средние широты, январь

z (км)	y (км)	$n-1$	ϵ (рад)	$d\epsilon/dp$ (рад/км)
17	17.199	.3120E-04	.2502E-02	— .3997E-03
18	18.170	.2672E-04	.2141E-02	— .3433E-03
19	19.146	.2286E-04	.1832E-02	— .2931E-03
20	20.124	.1954E-04	.1568E-02	— .2504E-03
21	21.106	.1669E-04	.1339E-02	— .2153E-03
22	22.090	.1425E-04	.1142E-02	— .1846E-03
23	23.077	.1217E-04	.9741E-03	— .1562E-03
24	24.066	.1040E-04	.8322E-03	— .1314E-03
25	25.056	.8886E-05	.7128E-03	— .1110E-03
26	26.048	.7587E-05	.6110E-03	— .9517E-04
27	27.041	.6463E-05	.5227E-03	— .8318E-04
28	28.035	.5492E-05	.4452E-03	— .7313E-04
29	29.029	.4659E-05	.3769E-03	— .6360E-04
30	30.025	.3953E-05	.3181E-03	— .5420E-04
31	31.021	.3362E-05	.2689E-03	— .4514E-04
32	32.018	.2865E-05	.2279E-03	— .3736E-04
33	33.015	.2445E-05	.1939E-03	— .3128E-04
34	34.013	.2089E-05	.1652E-03	— .2651E-04
35	35.010	.1785E-05	.1406E-03	— .2265E-04
36	36.009	.1527E-05	.1197E-03	— .1935E-04
37	37.008	.1308E-05	.1019E-03	— .1641E-04
38	38.007	.1122E-05	.8683E-04	— .1383E-04
39	39.006	.9645E-06	.7413E-04	— .1163E-04
40	40.004	.8308E-06	.6343E-04	— .9818E-05
41	41.004	.7171E-06	.5442E-04	— .8368E-05
42	42.003	.6198E-06	.4670E-04	— .7166E-05
43	43.003	.5363E-06	.4001E-04	— .6125E-05
44	44.002	.4655E-06	.3434E-04	— .5189E-05
45	45.002	.4058E-06	.2962E-04	— .4342E-05
46	46.001	.3549E-06	.2568E-04	— .3611E-05
47	47.002	.3110E-06	.2236E-04	— .3023E-05
48	48.001	.2730E-06	.1951E-04	— .2602E-05
49	49.001	.2403E-06	.1705E-04	— .2341E-05
50	50.000	.2118E-06	.1490E-04	— .2161E-05

Средние широты, июль

z (км)	y (км)	$n-1$	ϵ (рад)	$d\epsilon/dp$ (рад/км)
0	1.722	.2704E-03	.1876E-01	— .2181E-02
1	2.557	.2440E-03	.1692E-01	— .2045E-02
2	3.403	.2203E-03	.1528E-01	— .1860E-02
3	4.268	.1993E-03	.1381E-01	— .1612E-02
4	5.147	.1801E-03	.1250E-01	— .1385E-02
5	6.034	.1623E-03	.1133E-01	— .1231E-02
6	6.930	.1459E-03	.1027E-01	— .1123E-02
7	7.835	.1311E-03	.9309E-02	— .1032E-02
8	8.749	.1175E-03	.8417E-02	— .9355E-03
9	9.669	.1049E-03	.7590E-02	— .8262E-03
10	10.596	.9350E-04	.6862E-02	— .7219E-03
11	11.530	.8317E-04	.6246E-02	— .6414E-03
12	12.468	.7347E-04	.5675E-02	— .6065E-03
13	13.409	.6415E-04	.5092E-02	— .6256E-03
14	14.353	.5538E-04	.4484E-02	— .6507E-03

Средние широты, июль

z (км)	y (км)	$n-1$	ε (рад)	$d\varepsilon/dp$ (рад/км)
15	15.302	.4740E-04	.3866E-02	— .6277E-03
16	16.257	.4040E-04	.3294E-02	— .5613E-03
17	17.219	.3443E-04	.2802E-02	— .4765E-03
18	18.187	.2934E-04	.2381E-02	— .3988E-03
19	19.159	.2497E-04	.2021E-02	— .3391E-03
20	20.135	.2125E-04	.1714E-02	— .2896E-03
21	21.115	.1811E-04	.1454E-02	— .2440E-03
22	22.098	.1545E-04	.1234E-02	— .2040E-03
23	23.084	.1319E-04	.1050E-02	— .1708E-03
24	24.071	.1128E-04	.8954E-03	— .1434E-03
25	25.061	.9652E-05	.7650E-03	— .1210E-03
26	26.052	.8262E-05	.6544E-03	— .1029E-03
27	27.045	.7069E-05	.5597E-03	— .8850E-04
28	28.038	.6046E-05	.4780E-03	— .7640E-04
29	29.033	.5170E-05	.4072E-03	— .6568E-04
30	30.028	.4424E-05	.3467E-03	— .5595E-04
31	31.024	.3793E-05	.2956E-03	— .4716E-04
32	32.021	.3258E-05	.2525E-03	— .3966E-04
33	33.018	.2802E-05	.2161E-03	— .3353E-04
34	34.015	.2413E-05	.1852E-03	— .2848E-04
35	35.013	.2082E-05	.1590E-03	— .2422E-04
36	36.011	.1798E-05	.1366E-03	— .2061E-04
37	37.010	.1555E-05	.1176E-03	— .1757E-04
38	38.008	.1347E-05	.1014E-03	— .1501E-04
39	39.007	.1168E-05	.8750E-04	— .1284E-04
40	40.006	.1015E-05	.7561E-04	— .1100E-04
41	41.005	.8824E-06	.6542E-04	— .9436E-05
42	42.004	.7683E-06	.5668E-04	— .8098E-05
43	43.004	.6698E-06	.4917E-04	— .6962E-05
44	44.003	.5846E-06	.4268E-04	— .6041E-05
45	45.002	.5107E-06	.3704E-04	— .5299E-05
46	46.002	.4469E-06	.3213E-04	— .4584E-05
47	47.002	.3921E-06	.2788E-04	— .3838E-05
48	48.001	.3450E-06	.2430E-04	— .3213E-05
49	49.001	.3048E-06	.2135E-04	— .2784E-05
50	50.001	.2697E-06	.1886E-04	— .2467E-05

В качестве исходных данных для расчетов $\sigma_\varepsilon(p)$ были использованы вертикальные корреляционные матрицы плотности, известные с шагом 2 км в интервале высот 0–60 км [5] для зимних и летних измерений в нескольких пунктах на различных широтах. Поскольку ансамбль реализаций состоял из многократных измерений, проводимых в одном пункте в одно и то же время года, то получаемый в результате разброс обусловлен изменениями погоды. На основании этих данных были рассчитаны вертикальные корреляционные матрицы показателя преломления. Столбцы матриц $\langle \delta n(x'_i) \delta n(x''_j) \rangle$ интерполировались натуральными кубическими сплайнами и, таким образом, аналитически вычислялся массив первой производной $\partial / \partial x'_i \langle \delta n(x') \delta n(x''_j) \rangle$. Полученный массив затем совершенно аналогично интерполировался натуральными кубическими сплайнами по строкам и, таким образом, вычислялся массив второй производной $\partial^2 / \partial x'_i \partial x''_j \langle \delta n(x') \delta n(x''_j) \rangle$. Вторая производная, заданная таким образом в виде матрицы, определялась между узлами как среднее арифметическое по 4 ближайшим значениям, после чего интеграл в (6) вычислялся аналитически. В табл. 2 представлены результаты расчетов σ_ε для пункта *Wallops Island* (38° N) по данным зимних и летних наблюдений. Из табл. 2 видно, что погодные вариации углов планетной рефракции в зимнее время больше, чем в летнее, и, кроме того, они имеют локальный максимум на высоте 10–12 км (в области тропопаузы).

z (км)	Январь σ_{ϵ} (рад)	Июль σ_{ϵ} (рад)
0	.79E-02	.50E-02
2	.68E-02	.23E-02
4	.55E-02	.12E-02
6	.33E-02	.80E-03
8	.21E-02	.71E-03
10	.20E-02	.86E-03
12	.29E-02	.81E-03
14	.22E-02	.85E-03
16	.14E-02	.81E-03
18	.11E-02	.50E-03
20	.61E-03	.25E-03
22	.52E-03	.15E-03
24	.30E-03	.10E-03
26	.16E-03	.81E-04
28	.12E-03	.81E-04
30	.95E-04	.64E-04
32	.73E-04	.50E-04
34	.64E-04	.37E-04
36	.49E-04	.26E-04
38	.42E-04	.22E-04
40	.41E-04	.22E-04

Заключение

В связи с ограниченным объемом журнальной публикации в настоящей статье представлена только часть результатов расчетов, которая может служить основой для решения ряда прикладных задач, связанных с наблюдениями внеземных источников света через атмосферу Земли из космоса. Более полные данные по рефракционной модели атмосферы для различных широт и сезонов, в том числе и с учетом дисперсионных эффектов, имеются в Институте физики атмосферы АН СССР.

1. White R.L., Thurman S.W., Barnes F.A. // Navigation: Journal of the Institute of Navigation. V. 32. № 4. Winter 1985–1986. P. 317–333.
2. Оптические явления при восходе и заходе Солнца в космосе / Гречко Г.М., Гурвич А.С и др. Тр. ГОИ им. С.И. Вавилова. Л.: 1989. Т. 71. Вып. 205. Гл. 2.
3. U. S. Standard Atmosphere Supplements 1966 / U. S. Air Force. Washington D. C. 20402. 289 с.
4. Справочник по вертикальным корреляционным связям метеорологических элементов в свободной атмосфере над СССР / М.: Гидрометеоздат, 1980. 397 с.
5. Handbook of Geophysics and the Space Environment / Air Force Geophysics Laboratory. U. S. Air Force. 1985. Chapter 14.
6. Шуп Т.А. Решение инженерных задач на ЭВМ. М.: Мир, 1982. 235 с.

Институт физики атмосферы АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
24 января 1991 г.

S. V. Sokolovskiy. A Model of the Planetary Refraction in Terrestrial Atmosphere.

Some model dependences of the planetary refraction angle on the line-of-sight perigee height are calculated based on the use of vertical density profiles models available from the literature. The formulas for estimations of the light flux attenuation due to refraction, at observations of the extraterrestrial light sources through the terrestrial atmosphere from space, are given. The developed model may be used for calculations of the line-of-sight perigee height from the measurements of refraction angles, and in particular for solving the problems of autonomous satellite navigation.