

Модель показателей преломления и тропосферной задержки Хопфилд. Модель Хопфилд (Helen S. Hopfield) основана на соотношениях между показателями преломления на высоте h и у земной поверхности. Эти соотношения были выведены эмпирически по большому объему измерений. Полученную модель называют моделью с профилем показателя преломления четвертого порядка:

$$N_d(h) = N_{d0} \left(1 - \frac{h}{h_d}\right)^4, \quad (1.59)$$

где h – высота над антенной, N_{d0} – сухой показатель преломления на поверхности, а h_d (=43 км) определяет высоту над антенной, на которой показатель преломления равен нулю $N_d(h_d) = 0$

Модель Хопфилд для влажного показателя преломления подобна (1.59):

$$N_w(h) = N_{w0} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4, \quad (1.60)$$

где N_{w0} – влажный показатель преломления на поверхности, и $h_w = 12$ км. Из (1.41) следует:

$$\widetilde{T}_z = 10^{-6} \int [N_d(h) + N_w(h)] dh = \frac{10^{-6}}{5} [N_{d0} h_d + N_{w0} h_w] = \widetilde{T}_{z,d} + \widetilde{T}_{z,w}. \quad (1.61)$$

Подстановка выражений для сухого и влажного показателей преломления из (1.56) дает:

$$\widetilde{T}_{z,d} = 77.64 \cdot 10^{-6} \frac{P_0}{T_0} \frac{h_d}{5} \quad (1.62)$$

$$\widetilde{T}_{z,w} = 0.373 \cdot 10^{-6} \frac{e_0}{T_0} \frac{h_w}{5} \quad (1.63)$$

Значения $\widetilde{T}_{z,d}$ составляют 2.3-2.6 м на уровне моря и становятся меньше с увеличением высоты: около 2 м на высоте около 1.5 км и около 1 м на вершинах пиков в Гималаях. Соответствующая влажная задержка зависит от распределения паров воды вдоль пути сигнала и может быть очень переменной. Модели влажной задержки $\widetilde{T}_{z,w}$, основанные на метеорологических данных для поверхности Земли, обычно менее точны, их типичная ошибка 1-2 см. Использование средних метеорологических условий, а не действительных измерений, вводит дополнительные ошибки моделирования и в сухую, и во влажную задержку, и ошибка в полной зенитной задержке может быть 5-10 см.

Для перехода от направления в зенит к высоте E у Хопфилд вводятся сухая и влажная функции отображения:

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} , \quad m_w(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} . \quad (1.64)$$

В итоге полная тропосферная задержка для высоты E получается по формуле (1.58). Хопфилд разработала несколько моделей тропосферной задержки, которые отличаются способами интегрирования профилей. [Hopfield, 1969; Misra and Enge, 2001; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Модель Саастамойнена (Yuko Saastamoinen) была разработана с использованием газовых законов и упрощающих предположений, касающихся изменений в давлении, температуре и влажности с высотой. Сухая и влажная зенитные задержки даются как

$$\widetilde{T}_{z,d} = 0.002277(1 + 0.0026 \cos 2\varphi + 0.00028H)P_0 \quad (1.65)$$

$$\widetilde{T}_{z,w} = 0.002277\left(\frac{1255}{T_0} + 0.05\right)e_0 \quad (1.66)$$

где T_0 – температура (в Кельвинах), P_0 – полное давление и e_0 – парциальное давление паров воды (оба в миллибарах), все определенные у местоположения антенны по измерениям или по модельным данным стандартной атмосферы, φ - широта, а H – высота антенны над уровнем моря (км). В эту модель не включены дополнительные корректирующие члены, которых мы здесь не касались [Саастамойнен, 1975; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Модель тропосферной задержки Блэка. Блэк (Harold D. Black) опубликовал свою модель в 1978 году [Black, 1978], ее уточнение появилось в 1984 г. [Black and Eisener, 1984]. Следует учитывать, что Блэк разрабатывал модель до появления СРНС, и впоследствии, при уточнении, предполагал использовать ее для низкоорбитальных (1200 км и меньше) спутников.

Представление о геометрии прохождения луча в тропосфере, которое использовал Блэк для своего вывода выражения тропосферной задержки, дает рисунок 1.8. Выражение геометрической дальности ρ , исходя из этого представления, имеет вид:

$$p = \sqrt{r^2 - r_A^2 \cos^2(E^i)} - r_A \sin(E^i) , \quad (1.67)$$

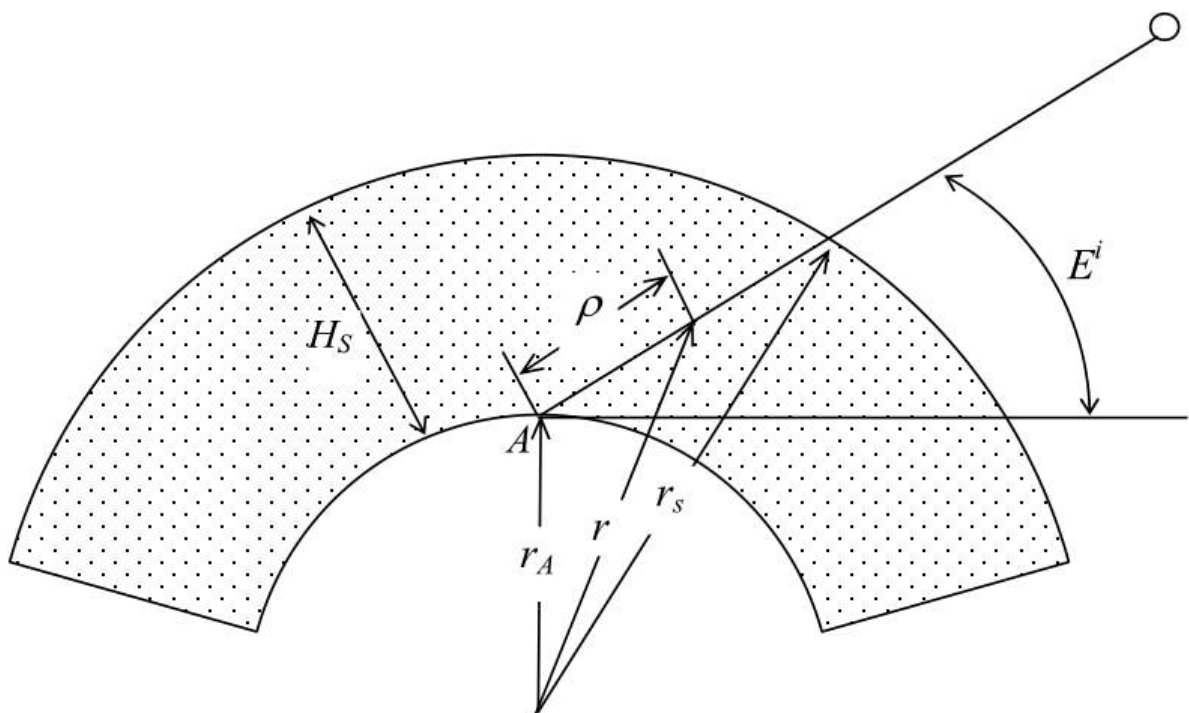


Рис. 1.8. Геометрия прохождения сигнала в модели Блэка.

Подстрочные индексы S и A – соответственно обозначают верхнюю границу нейтральной атмосферы и станцию на поверхности Земли. H_s – высота нейтральной атмосферы, E^i – угловая высота наблюдаемого объекта над горизонтом; r – радиус-вектор положения низкоорбитного спутника или метеорологического баллона, ρ – геометрическая дальность по прямой линии от станции на поверхности до объекта наблюдения в атмосфере, $p = |\vec{r} - \vec{r}_A|$.

При разработке аналитических формул Блэк использовал модель показателя преломления Хопфилд и ее открытие, опубликованное в 1971 году. Основываясь на предположении, что сухая атмосфера подчиняется закону идеального газа и находится в состоянии гидростатического равновесия, Хопфилд сделала вывод о том, что сухая составляющая тропосферной задержки прямо пропорциональна поверхностному давлению и нечувствительна к поверхностной температуре. Используя это утверждение и предположение о малости горизонтальных градиентов давления и температуры, Блэк вывел собственную формулу тропосферной задержки, представив ее, как сумму интегралов гидростатической и влажной составляющих преломления показателей по пути луча:

$$\tilde{T} = 10^{-6} \int_0^p N_h dp + 10^{-6} \int_0^p N_w dp \quad (1.68)$$

Термин «гидростатическая» составляющая был введен в работе [Davis et al., 1985] и считается более точным, чем термин «сухая» составляющая (для атмосферы, показателя преломления или тропосферной задержки), поскольку определяется полным давлением, то есть с включением парциального давления паров воды.

Анализируя выражение гидростатической составляющей в (1.68), Блэк использовал формулу (1.59) показателя преломления N_h , выведенную Хопфилд, для гидростатической (сухой) составляющей нейтральной

атмосферы, а выводы распространил на влажную составляющую, предполагая подобными нормы функционалов N_h и N_w .

Гидростатическую часть тропосферной задержки Блэк представил выражением:

$$\widetilde{T}_h = 2.343 \cdot P_A \left(\frac{T_A - 4.12}{T_A} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos(E^i)}{1 + (1-L)H_{S,h}/r_A} \right]^2}}, \quad (1.69)$$

а влажную составляющую

$$\widetilde{T}_h = k_w \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\cos(E^i)}{1 + (1-L)H_{S,w}/r_A} \right]^2}}, \quad (1.70)$$

где $H_{S,h} = 14898(T_A - 4.12)$ и $H_{S,w} = 13000$ м над станцией; $L = 0,85$; r_A - в метрах; P_A - в атмосферах; T_A - в Кельвинах. Значения для коэффициента k_w приводятся в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Выбор коэффициента k_w в модели Блэка в зависимости от климатических условий.

Климатические условия	k_w
лето в тропиках или средних широтах	0,28
весна или осень в средних широтах	0.20
зима в средних широтах (море)	0.12
Зима в средних широтах (континент)	0.06
полярные районы	0.05

Блэк не рекомендует использовать эту модель для спутников с высотой менее 5° по причине: значительных ошибок от «искривления» луча и из-за увеличения чувствительности к ошибкам выбора вертикальных градиентов характеристик нейтральной атмосферы.