

1.2.2 Фазовое опережение и групповая задержка

Ионизованный газ представляет собой диспергирующую среду для радиоволн. Фазовый показатель преломления n_ϕ для радиоволны с частотой f равен

$$n_\phi \approx 1 - \frac{40.3n_e}{f^2}, \quad (1.15)$$

где n_e – плотность электронов. Показатель преломления немного меньше 1 (≈ 0.99998 для центральной частоты L1), и фазовая скорость GPS в ионосфере превышает скорость света в вакууме на достаточно большую для точного позиционирования величину. Из выражения для показателя преломления можно вычислить фазовую задержку I_τ (в секундах), которую испытывает сигнал при его распространении через ионосферу.

$$I_\tau = \frac{1}{c} \int_S^R (n_\phi(s) - 1) ds = -\frac{1}{c} \int_S^R \frac{40.3n_e}{f^2} ds = -\frac{40.3TEC}{cf^2}. \quad (1.16)$$

Фазовая задержка отрицательная, то есть наблюдается опережение по фазе. Фазовое опережение I_ϕ (в метрах) прямо пропорционально количеству электронов на пути сигнала, то есть

$$I_\phi = c \cdot I_\tau = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}. \quad (1.17)$$

Из (1.13) можно определить групповой показатель преломления как

$$n_g = 1 + \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}, \quad (1.18)$$

тогда ионосферная задержка (в метрах) для псевдодальности, измеренной по кодам, будет равна

$$I_P = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}. \quad (1.19)$$

Величина фазового опережения часто выражается в циклах, то есть соответствующем числе длин волн, содержащихся в I_ϕ . Поскольку $\lambda=c/f$, то

$$I_\phi = -\frac{40.3 \cdot TEC}{cf}. \quad (1.20)$$

Формулы (1.17) и (1.19) дают значение ионосферной задержки в метрах, при условии, что f дается в герцах, а TEC – в электронах/м². В последующем будем обозначать групповую ионосферную задержку просто как I , а фазовую задержку как $-I$, при этом возможно указание на ее размерность (в метрах I_ϕ , I_P , в циклах I_ϕ или секундах I_T).

Таблица 1.1. Ионосферная поправка в дальность (в метрах).

Частоты	TEC = 10 ¹⁶ [эл/м ²]	TEC = 10 ¹⁸ [эл/м ²]
100 МГц	40.000	4000.0
400 МГц	2.500	250.0
f_{L1}	0.260	26.0
f_{L2}	0.160	16.0
2 ГГц	0.100	10.0
10 ГГц	0.004	0.4

В таблице 1.1 приводятся ионосферные задержки для нескольких частот и для двух значений величины TEC. Видно, что на диапазон частот L1 и L2 ионосфера оказывает большое влияние. Обычно величина TEC находится в пределах от 10¹⁶ до 10¹⁸.