

## 1.2.2 Фазовое опережение и групповая задержка

Ионизованный газ представляет собой диспергирующую среду для радиоволн. Фазовый показатель преломления  $n_\phi$  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 ( $\approx 0.99998$  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  $I_\tau$  (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  $I_\phi$  (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  $I_\phi$ . 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/м<sup>2</sup>. В последующем будем обозначать групповую ионосферную задержку просто как  $I$ , а фазовую задержку как  $-I$ , при этом возможно указание на ее размерность (в метрах  $I_\phi$ ,  $I_P$ , в циклах  $I_\phi$  или секундах  $I_T$ ).

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

Частоты	TEC = 10 <sup>16</sup> [эл/м <sup>2</sup> ]	TEC = 10 <sup>18</sup> [эл/м <sup>2</sup> ]
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 10<sup>16</sup> до 10<sup>18</sup>.