

И. П. СТАХАНОВ

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ВАРИАЦИЙ ПЛОТНОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ РАДИОИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

(Представлено академиком Р. З. Сагдеевым 17 VI 1974)

Как известно, обычные фазовые методы позволяют измерить содержание электронов N в столбе вдоль пути луча. Так, в дисперсионном интерферометре (¹), в котором исключается эффект Доплера, разность фаз принятых сигналов определяется величиной N , а частота биений — производной dN/dt . Пока расстояние между приемной и передающей станцией, одна из которых находится на Земле, а другая на спутнике, были относительно невелики, в формулах, определяющих фазовый путь, можно было не учитывать изменение состояния среды за время распространения сигнала. Однако в настоящее время осуществляется радиосвязь со спутниками, удаленными на расстояния в сотни тысяч и миллионы километров, а это существенно меняет роль указанных эффектов. Разность фаз в этом случае определяется состоянием среды не в момент приема сигнала t , а в момент $t-t'(r)$, где $t'(r)$ — время распространения сигнала от данной точки среды до пункта приема.

Если образовать радиолинию, включающую передачу запросного сигнала со станции O , на станцию O' , формирование и излучение ответного сигнала и прием его на станции O , то на запросной станции O можно образовать биения, частота которых определяется разностью фазовых путей $\Delta\Phi$ запросного и ответного сигналов (^{2, 3}):

$$\Delta\Phi = -\frac{\gamma}{\omega} \int_0^{\pi} \left\{ n\left(\mathbf{r}, t - \frac{2R-r}{c}\right) - n\left(\mathbf{r}, t - \frac{r}{c}\right) \right\} dr, \quad (1)$$

где $\gamma = 2\pi e^2/(mc)$; R — расстояние OO' ; ω — частота сигнала, рад/сек; $n(\mathbf{r}, t)$ — плотность плазмы.

Рассматриваемый метод позволяет значительно ослабить влияние ионосферы Земли на величину $\Delta\Phi$. Действительно, вклад в разность фаз (1) определяется не стационарной плотностью плазмы, а изменением плотности за время, прошедшее между прохождением запросного и ответного сигналов. Поскольку это время вблизи ответной станции O' мало, влияние среды, расположенной около нее, практически полностью исключается. Поэтому, если поместить ответную станцию на поверхность Земли, а запросную на спутник, то влияние ионосферы Земли будет ослаблено приблизительно во столько же раз, во сколько расстояние до спутника превосходит расстояние от наземной станции до максимума плотности плазмы в ионосфере. В результате величина $\Delta\Phi$ при определенных условиях определяется нестационарностями в солнечном ветре и магнитосфере и можно поставить вопрос об исследовании этих нестационарностей радиоинтерференционными методами.

Пусть, например, в пространство между спутником и Землей вторгнется фронт, в котором плотность плазмы возрастает на величину Δn . Предположим, что ширина переходной области, где происходит это изменение, мала и что плотность плазмы до и после фронта остается постоянной. Тогда, если фронт распространяется от спутника к Земле, причем в

момент $t=0$ он проходит мимо спутника (станция O), то

$$n = n_0 + \Delta n \Theta \left(\frac{u}{\cos \alpha} t - r \right), \quad (2)$$

где n_0 — плотность плазмы перед фронтом, u — скорость фронта, α — угол между направлением сигнала OO' и нормалью к фронту ($\alpha < \pi/2$), $\Theta(x)$ — разрывная функция Хевисайда, расстояние r отсчитывается от запросной станции O .

Используя выражение (2) в формуле (1) и производя интегрирование, находим, что зависимость фазы от времени изображается графиком 1 на рис. 1, где

$$(\Delta\Phi)_0 = \frac{\omega_e^2 u R/c}{\omega c \cos \alpha + u/c} \approx \frac{\omega_e^2 u R}{\omega c \cos \alpha} \frac{1}{c}, \quad (3)$$

$$t_1 = \frac{2R}{c}, \quad t_2 = \frac{R \cos \alpha}{u} + \frac{R}{c} \approx \frac{R \cos \alpha}{u} \quad (4)$$

$$\omega_e^2 = \frac{4\pi e^2 \Delta n}{m}.$$

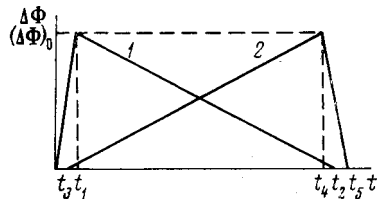


Рис. 1

При $R=10^6$ км, $f_0 = \omega_0/(2\pi) = 40$ МГц, $\Delta n = 10$ частиц в 1 см^3 , $u = 500$ км/сек, $\cos \alpha \approx 1/2$ получаем, что амплитуда смещения разности фаз вследствие вторжения фронта $(\Delta\Phi)_0$ оказывается около 1,5 радиан. Для оценки влияния ионосферы примем, что вся она сосредоточена вблизи максимума, так что для нее

$$n = N_0(t) \delta[r - (R - h)],$$

где $h \approx 400$ км, $N_0(t)$ — интегральное содержание в столбе ионосферы. Используя это выражение, находим

$$\Delta\Phi = \frac{\gamma}{\omega} \left\{ N_0 \left(t - \frac{R-h}{c} \right) - N_0 \left(t - \frac{R+h}{c} \right) \right\} \approx \frac{\gamma}{\omega} \frac{2h}{c} \frac{\partial N_0}{\partial t}. \quad (5)$$

Так как даже при самых значительных ионосферных возмущениях $\partial N_0/\partial t$ не превышает $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, то набег фазы за счет ионосферных возмущений меньше 10^{-2} радиан, т. е. на два порядка меньше того, что могут дать изменения плотности в солнечном ветре. Измеряя величину $(\Delta\Phi)_0$ и длительность возмущения t_2 , можно определить как амплитуду возмущения Δn , так и величину $u/\cos \alpha$. Легко видеть, что $t_2 \gg t_1$. В частности, в рассмотренном выше примере $t_1 \approx 6$ сек., тогда как $t_2 \approx 1000$ сек. Поэтому передний фронт на графике 1 (рис. 1) оказывается значительно более крутым, чем задний. Если ширина вторгающегося плазменного фронта превышает $u \cdot 2R/c \approx 3000$ км, то ее влиянием нельзя пренебрегать. Это должно привести к размытию крутого переднего фронта на графике для $\Delta\Phi(t)$. По ширине такого размытия можно оценить ширину плазменного фронта.

В случае, если фронт распространяется от ответной станции к запросной, изменение фазы представляется графиком 2 на рис. 1. При этом амплитуда $(\Delta\Phi)_0$ определяется формулой (3), $t_3 = R/c$, $t_4 = R \cos \alpha/u$, $t_5 = t_4 + 2R/c$. Схема сбивания сигналов для получения разности фаз, которая определяется формулой (1), рассмотрена в работе (4).

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР

Поступило
12 VI 1974

Академгородок Московской обл.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Д. Альперт, В. В. Мигулин, П. А. Рязин, ДАН, т. 18, 635 (1938). ² Г. С. Иванов-Холодный, А. А. Корчак и др., Геомагнетизм и аэронавтика, т. 12, 398 (1972).
³ А. А. Korchak, I. P. Stakhonov, B. M. Chikhachev, Planet. Space Sci., v. 21, 189 (1973). ⁴ Н. А. Савич, И. П. Стаханов, Геомагнетизм и аэронавтика, т. 14, 664 (1974).