

Численное моделирование влияния акустического возмущения на зависимость доплеровское смещение частоты от времени

Е.Б. Ипатов¹, Е.А. Палкин¹, В.И. Чивилев¹, Д.Е. Ипатов

¹Московский Физико-Технический институт,
141700, г. Долгопрудный, Московская область, Институтский пер. д. 9.
E-mail: ipatoveb@mail.mipt.ru

В докладе рассмотрено влияние воздействия акустической волны на доплеровское смещение частоты радиосигнала, распространяющегося на коротковолновой трассе в ионосфере Земли.

In the report the influence of an acoustic wave on Doppler displacement of frequency of the radio signal extending on a short-wave line in an ionosphere of the Earth is considered.

Введение

Широкое использование доплеровского метода для исследований ионосферы обусловлено тем, что доплеровское смещение частоты радиоволн очень чувствительно к небольшим изменениям параметров ионосферы. С другой стороны этот экспериментальный метод является чрезвычайно информативным и устойчивым к помехам. В работе [1] было установлено, что эффект возмущения электронной плотности, вызванный прохождением акустической волны, сильно зависит от высоты над поверхностью Земли. Высота максимальной модификации ионосферы оказалась лежащей в пределах 150-250 км.

График зависимости доплеровского смещения частоты от времени на трассах наклонного зондирования имеет характерный «седлообразный» вид [2-5]. Амплитуда вариаций доплеровского смещения частоты составляет от долей до десятка герц для интервала времени от одной минуты до получаса.

При достижении ионосферным возмущением высоты, на которой оно оказывается вблизи лучевой траектории, связывающей передатчик и приемник, в приемнике в течение некоторого времени наблюдаются изменения доплеровского смещения частоты. Эти вариации обусловлены изменением электронной концентрации из-за ионосферного возмущения.

Цель работы

Для оценки принципиальной возможности обнаружения ионосферных возмущений, вызванных акустической волной от наземных или подземных источников (землетрясения, взрывы), было проведено компьютерное моделирование, для которого численными методами было рассчитано доплеровское смещение частоты при распространении электромагнитной волны через возмущенную ионосферу.

Следует отметить, что характерные изменения в ионосфере наблюдаются задолго до регистрации самого сейсмического события (период времени порядка 2-3 дней). Это позволяет использовать данный метод для прогнозирования возможных негативных событий.

Математические модели и вычислительный эксперимент

Для компьютерного моделирования характеристик неоднородной среды, в которой распространяется электромагнитная волна, была выбрана модифицированная полуэмпирическая модель распределения электронной концентрации в ионосфере IRI-90 [6].

Электронная концентрация N равна сумме трех функций, описывающих вклад слоев D , E , $F1$, $F2$ ионосферы. Простейшая модель возмущения, вызываемого прохождением акустической волны, учитывающая лишь относительные размеры возмущенной области и ее изменение во времени, может быть задана следующей формулой:

$$N = N_0 \left(1 + \frac{V_e}{V_s} K(H, r, t_m) \right) \quad (1)$$

Здесь N и N_0 - электронная концентрация возмущенной и невозмущенной ионосферы в точке с координатами H (высота над поверхностью Земли) и r (отсчитывается по горизонтали в плоскости трассы от центра возмущения на поверхности Земли).

Скорость звука V_s в (1) вычисляем по известной формуле для идеального газа

$$V_s = \left[\frac{\gamma R_g T}{\mu} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Здесь R_g - универсальная газовая постоянная, γ - показатель адиабаты, который можно принять равным $7/5$ (двухатомный газ). Зависимость молярной массы μ и температуры T в (2) от высоты взяты по данным международной стандартной модели нейтральной атмосферы.

Величина V_e в (1) характеризует амплитуду возмущения и имеет размерность скорости.

Безразмерный коэффициент $K(H, r, t_m)$ характеризует положение центра возмущения в зависимости от времени t_m и характер изменения интенсивности возмущения по мере удаления от центра возмущения. Коэффициент $K(H, r, t_m)$ задается формулой

$$K(H, r, t_m) = F \left[\frac{h}{H_0} \right] \exp \left[- \left[\frac{r}{R_0} \right]^2 \right] \exp \left[- \left[\frac{H_c - H_1}{H_2} \right]^2 \right] \quad (3)$$

Здесь, H_c - высота центра возмущения, поднимающегося вертикально вверх со скоростью V_s ;

$h = H - H_c$ - смещение относительно центра возмущения по высоте;

H_0 - полутолщина возмущения в вертикальной плоскости;

$R_0 = r_0 + H_c \operatorname{tg} \varphi$ - «текущая» полуширина возмущения в горизонтальной плоскости,

r_0 - полуширина возмущения при $t_m = 0$, φ - угол, характеризующий рост горизонтальных размеров возмущения при его подъеме вверх.

В формуле (3) множитель $F(h/H_0)$ характеризует изменение интенсивности возмущения вдоль вертикали на расстоянии h от центра возмущения и задает форму волнового возмущения. Удобно представить F в виде $F = F_1$ или $F = F_2$, где

$$F_1 = \left[\frac{h}{H_0} + \gamma_1 \right] \exp \left[- \left[\frac{h}{H_0} \right]^2 \right], F_2 = k_1 \left\{ \exp \left[- \left[\frac{h}{H_0} + \gamma_2 \right]^2 \right] - k_2 \exp \left[- k_3 \left[\frac{h}{H_0} \right]^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Здесь $k_1 = \pm 1$, k_2 и k_3 - положительные коэффициенты, γ_1 и γ_2 - параметры в формулах.

Интерпретация полученных данных

Используя описанные выше модели с помощью метода численного расчета (использующего метод Доплера) [7]. Были рассчитаны графики зависимости F_1 (при $\gamma_1 = 0.2$) и F_2 (при $k_1=1$, $k_2=1.9$, $k_3=4$, $\gamma_2 = -0.1$) от h/H_0 (рис.1). Результаты численного моделирования вариаций доплеровского смещения частоты, вызванных акустическим возмущением представлены на рис.1-2. На рис.1 зависимость для F_2 качественно согласуется с экспериментальными результатами из [8]. В формуле (4) множитель $\exp[-\frac{r}{R_0}]^2$ характеризует спад интенсивности возмущения по горизонтали.

Множитель $\exp[-\frac{H_c - H_1}{H_2}]^2$ влияет на интенсивность возмущения в зависимости от высоты нахождения возмущения; постоянные величины H_1 и H_2 могут варьироваться в пределах: $H_1 = 100 - 250$ км, $H_2 = 10 - 50$ км. Пределы варьирования других постоянных: $v_e = 0.1 - 50$ м/с, $H_0 = 0.5 - 20$ км, $r_0 = 5 - 25$ км, $\varphi = 5 - 20$ градусов. Заметим, что при $v_e \sim 10$ м/с относительное изменение концентрации электронов не превышает 2%. Из сопоставления с интенсивностью естественных вариаций электронной концентрации видно, что акустическое возмущение может приводить и к меньшим вариациям, чем естественные. Это еще не означает, что доплеровское смещение частоты от акустического возмущения будет меньше, чем от естественных вариаций электронной концентрации. Величину доплеровского смещения определяет не столько величина изменения электронной концентрации, сколько градиенты электронной концентрации, обусловленные возмущением.

Следует отметить, что на исследуемой трассе отчетливо воспроизводится характерная «седлообразная форма» зависимости доплеровского смещения частоты от времени. Рис.2 соответствует частоте 12 МГц.

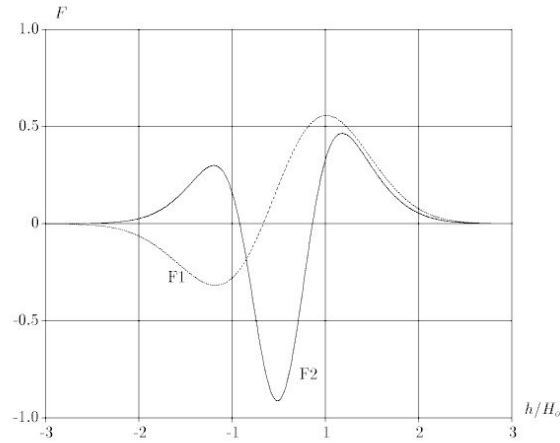


Рис.1

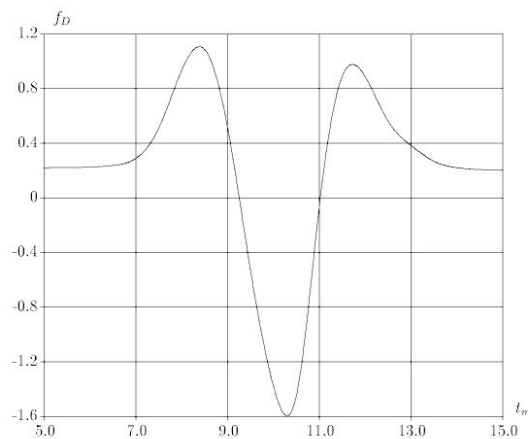


Рис.2

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Альпертович Л.С., Вугмейстер Б.Р., Гохберг М.Б. и др. Об опыте моделирования магнитосферных эффектов при сейсмических явлениях // ДАН СССР. 1983. Т.263. № 3.
2. Таращук Ю.Е., Нагорский П.Н., Борисов Б.Б. и др. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение коротких радиоволн // Изд. ТГУ. Томск. 1986. С.163.
3. Georges T.H. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances // J. Atm. and Terr. Phys. 1968. V.30. P.1441-1481
4. Bartning. Group delay variations of oblique incidence resulting from medium scale traveling ionospheric disturbances // Rad. Science. 1973. V.13. P.147-157.
5. Заец П.Г., Ипатов Е.Б., Лукин Д.С., Макальский С.А., Палкин Е.А., Чешев Ю.В., Школьников В.А. Экспериментальные исследования доплеровских спектров КВ сигналов, излучаемых с ИСЗ // Радиофизические методы обработки сигналов: Сборник научных трудов / МФТИ. М., 1981. С.53-55.
6. Rower K., Ramakrishnan S., Bilitsa P. IRI-1982 // COSPAR URSI, 1982 и <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/iri.html>

7. Лукин Д.С., Школьников В.А. Численный метод расчета эффекта Доплера и приведенной разности доплеровских частот радиоволн, излучаемых когерентно с ИСЗ // Космические исследования. 1968. № 3.
8. Нагорский П.Н., Таращук Ю.Е. Ионосферные возмущения, вызванные мощными взрывами // Изв. вузов. Физика. 1992. № 12. С.110-119.