

**ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН И ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ
В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ GNSS-ИЗМЕРЕНИЙ
НА ТРАССАХ СПУТНИК—СПУТНИК И СПУТНИК—ЗЕМЛЯ**

А.А. Павельев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал), Фрязино, Россия
alxndr38@gmail.com

**RADIO WAVE PROPAGATION EFFECTS AND PLASMA STRUCTURES IN THE IONOSPHERE AS
MEASURED IN THE SATELLITE—SATELLITE
AND SATELLITE—EARTH COMMUNICATION LINKS USING GNSS SIGNALS**

A.A. Pavelyev

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino Branch), Fryazino, Russia

Аннотация. Классифицированы эффекты ионосферного воздействия слоев и случайно-неоднородных структур на распространение радиоволн на трассах спутник–спутник и спутник–Земля. Рассмотрен суточный, сезонный и широтный ход электронной концентрации на различных высотах в ионосфере по данным измерений амплитуды и фазы сигналов навигационных систем (GNSS) в области полярного овала. Обнаружены случаи воздействия нагревного стэнда HAARP на нижнюю ионосферу.

Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн на трассах спутник–спутник и спутник–Земля, стэнд HAARP.

Abstract. The ionospheric effects produced by layers and randomly inhomogeneous structures on propagation of radio waves in the satellite–satellite and satellite–Earth communication links are classified. The diurnal, seasonal and latitudinal variations of the electron concentration at different heights in the ionosphere are analyzed using measurements of the amplitude and phase of navigation system signals (GNSS) in the polar oval region. Influence of the HAARP heating device is detected.

Keywords: ionosphere, radio wave propagation in satellite–satellite and satellite–Earth communication links, HAARP ionosphere heater.

Введение

Экспериментальные исследования ионосферного распространения радиоволн проводят на трассах радиосвязи между двумя спутниками, а также на трассах спутник–Земля с помощью высокостабильных, синхронизированных атомными стандартами частоты, сигналов, излучаемых космическими навигационными системами GPS, GALILEO, ГЛОНАСС (GNSS). Протяженность спутниковых трасс создает оптимальные условия для создания новых методов изучения различных эффектов распространения радиоволн (рефракции, дифракции, многолучевого прохождения и др.), а также слоисто-неоднородной структуры околоземного пространства, с высоким пространственным и временным разрешением. Высокоточные измерения эффектов распространения радиоволн необходимы для обеспечения успешной работы различных радиосистем связи, навигации и управления [Pavelyev et al., 2015].

Цель доклада состоит в кратком описании методов и предварительных экспериментальных результатов, основанных на применении сигналов навигационной системы GPS для изучения эффектов распространения радиоволн и дистанционного зондирования ионосферы.

Классификация воздействия слоев и неоднородностей на распространение радиоволн

Рассмотрим вопрос о возможности однозначной классификации воздействия (разделении

вкладов) слоистой и случайно-неоднородной структуры плазмы на интенсивность и фазовый путь радиоволн, проходящих через ионосферу. Схема измерений показана на рис. 1. Сигнал от передатчика G проходит сквозь плазму вдоль радиолуча GTL к приемнику L . При сферической симметрии с центром O , прицельный параметр p постоянен вдоль луча GTL и связан с центральным углом θ и углом рефракции $\xi(p)$:

$$rn(r) \sin \gamma_t = p = const, \quad \theta = \pi + \xi_{\mp}(p, r, \gamma_t) - \gamma_{t\mp} - \gamma_G. \quad (1)$$

$$\xi_{\pm}(p, r, \gamma_{t\pm}) = -p \int_{r_x}^{R_G} n^{-1} n'_x (n^2 x^2 - p^2)^{-1/2} dx;$$

$$r_x = r, \quad \gamma_{t-} > \pi/2, \quad r_x = r_T, \quad \gamma_{t\pm} = \pi/2,$$

$$\xi_{+}(p, r, \gamma_{t+}) = \xi_{-}\left(p, r_T, \frac{\pi}{2}\right) - \quad (2)$$

$$-p \int_{r_T}^r n^{-1} n'_x (n^2 x^2 - p^2)^{-1/2} dx,$$

$$\gamma_{t+} < \pi/2,$$

где $\gamma_{t\pm}$ — угол с вершиной в текущей точке $T_{t\pm}$ между направлениями к центру O и касательной к радиолучу (рис. 1, слева). Рефракционное ослабление радиоволн по мощности $X(r)$ в точке $T_{t\pm}$ луча GTL получено нами ранее [Павельев А.А., Павельев А.Г., 2016]:

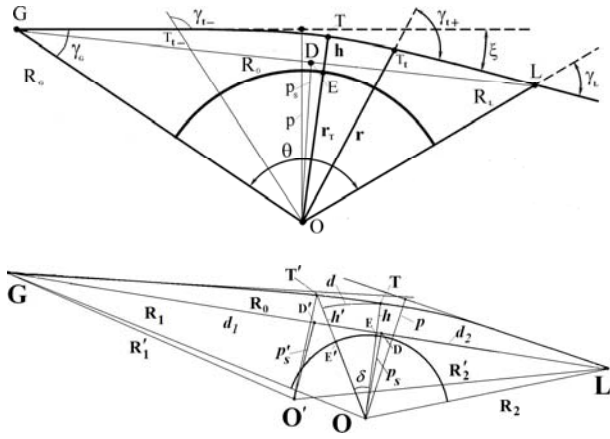


Рис. 1. Сверху. Геометрические параметры при известном положении центра симметрии O . Снизу. Определение высоты, наклона и смещения слоев при смещении точки O

$$X(r) = pR_0 \left[p_s c_g c_r \left| \frac{\partial \theta}{\partial p} \right| \right]^{-1},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial p} = \frac{\partial \xi_{\mp}}{\partial p}(p, r, \gamma_t) \pm c_r - c_g, \quad (3)$$

$$c_g = \sqrt{n^2(R_G)R_G^2 - p^2},$$

$$c_r = \sqrt{n^2(r)r^2 - p^2}.$$

Частные производные в (2), (3) взяты при фиксированных значениях r, R_G, R_L . Знак — при величине ξ соответствует знаку + у второго слагаемого в правой части второго уравнения (2). Рефракционное ослабление (2) удовлетворяет принципу взаимности. В перигее радиолуча T , где выполняется равенство $nr=p$, на частотах спутников системы GPS, рефракционное ослабление (2) при $R_0 \approx R_G, n_G \approx 1, X(r) = pR_0(p_s c_g)^{-1} \approx 1$, близко к единице, т.е., практически отсутствует. Фазовый путь радиоволн (эйконал $\Phi(r, t)$) в произвольной точке T_{\pm} лучевой траектории GTL удовлетворяет уравнению:

$$\Phi(r, t) = \int_G^{T_{\pm}} n(l)dl - R_0 = R_{\mp} - R_0 + p \xi_{\mp}(p) + \kappa(p), \quad (4)$$

$$\xi(p) = -\partial \kappa(p) / \partial p; R_{\pm} = c_{\pm} \pm c.$$

В случае радиозатменного зондирования, в приближении сферически симметричной ионосферы, ускорение эйконала $a = \ddot{\Phi}(R_L, t)$ связано в произвольной точке T_t траектории GTL с вариациями рефракционного ослабления $1-X(L)$ соотношением:

$$1 - X(r) = m \ddot{\Phi}(r, t); m \approx \dot{\theta}^2 d, \quad (5)$$

где d — расстояние между точкой T_t и перигеумом T луча GTL (определяемым относительно центра симметрии O). Точками над символами в (5) обозначено дифференцирование по времени. Доплеровская частота радиоволн $F_d = \lambda^{-1} \dot{\Phi}(t)$ также зависит от изменений рефракционного ослабления: $1 - X(r) = m \lambda \dot{F}_d$, где λ — длина радиоволн в свободном пространстве. Для участка слева от перигеума T в последнем приближенном равенстве (5) знак меняется на обратный, т.е. $m \approx -\dot{\theta}^2 d$; вариации и

ускорения эйконала справа от перигеума T происходят в фазе, а слева — в противофазе.

Соотношение (5) для случая трассы спутник-спутник впервые дано в статье [Liou, Pavelyev, 2006]. Согласно принципу локальности, выполняющемуся при радиозатменном зондировании [Pavelyev et al., 2015] выражение (5) позволяет проводить на трассе спутник-спутник одночастотные измерения высотных профилей интегрального поглощения, определять величину наклона и смещения плазменных слоев. Новым является выполнение соотношения (5) для трасс спутник-Земля. Соотношения (2)–(5) обобщают также результаты указанной выше работы для произвольного положения приемников (в том числе, внутри ионосферы) на трассах спутник-спутник и спутник-Земля.

Пример классификации (разделения вкладов) слоев и мелкомасштабных неоднородностей дан на рис. 2 I, II. На рис. 2 I показаны высотные зависимости рефракционных ослаблений X_a, X_p в атмосфере и ионосфере, измеренные в сеансе CHAMP 02 ч. 34 м. UT 07 апреля 2003 г. в районе с координатами $24.0^\circ S 291.7^\circ W$. Указанные зависимости хорошо коррелируют, что указывает на преобладающее влияние слоев. На рис. 2 II показан результат разделения

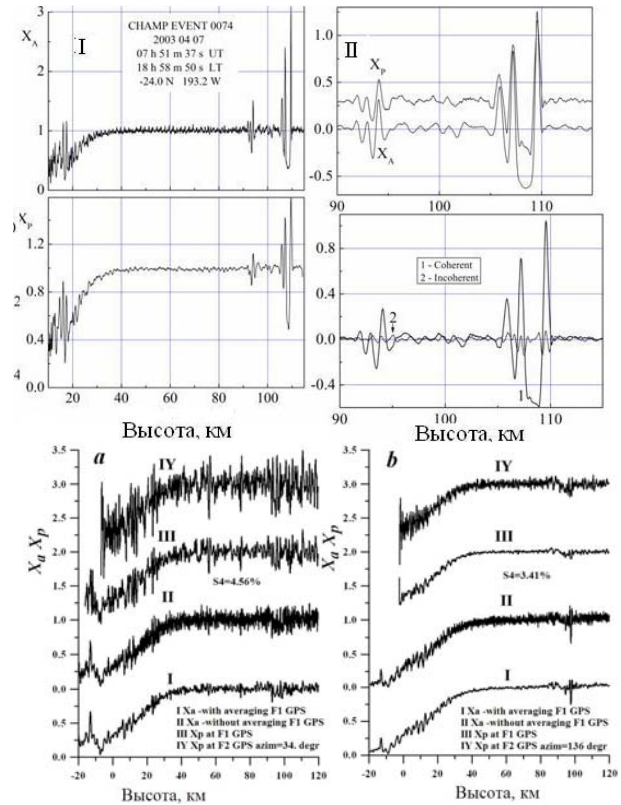


Рис. 2. I. Высотные профили рефракционных ослаблений X_a, X_p в диапазоне высот 10–120 км. II. Вертикальные профили когерентной и некогерентной составляющей вариаций X_a, X_p в ионосфере в интервале 90–110 км. а), б) Зондирование нижней ионосферы над нагревным стендом HAARP 14 июля 2011 года. Вертикальные профили X_a (кривая I — с усреднением, II — без усреднения), X_p (кривые III, IV соответствуют частотам L1 и L2 системы GPS). Магнитное склонение 21°. Азимут, время и координаты перигеума зондирования: а) $34^\circ; 23 \text{ h } 48 \text{ m } 50 \text{ s UT}; 64.8^\circ N 147.1^\circ W$. б) $136^\circ; 23 \text{ h } 36 \text{ m } 10 \text{ s UT}; 62.5^\circ N 145.3^\circ W$.

вкладов когерентной и некогерентной компонент ионосферных слоев. Отличия в вариациях X_a , X_p в диапазоне высот 108–109 км вызваны эффектом дифракции при пересечении аппаратом СНАМР каустической поверхности. Эффект вызван влиянием резких градиентов электронной плотности на верхней и нижней границе спорадического слоя E_s . Когерентная компонента существенно, примерно на порядок, превышает величину некогерентной (турбулентной) компоненты радиозатменного сигнала. Это показывает эффективность соотношений (2)–(5) для разделения вкладов слоев и неоднородных структур.

Оценка относительного влияния слоистых и турбулентных неоднородностей на одной частоте обычно затруднена из-за отсутствия четкого критерия выделения регулярной компоненты прошедшего через среду сигнала. Выявленная связь между амплитудными и фазовыми вариациями позволяет выделить эту компоненту при анализе результатов радиозатменных экспериментов, что важно для оценки параметров линии радиосвязи, систем радионавигации и радиолокации объектов в ионосфере.

Важное значение в настоящее время придается исследованию воздействия нагревных стенов на структуру ионосферы. Наиболее мощной из известных устройств является установка HAARP, расположенная на Аляске. Найден случай радиозатменного зондирования с двух различных азимутальных направлений (рис. 2 а), б) с промежутком времени 8 мин двумя различными спутниками системы FORMOSAT-3 в направлении примерно параллельном и перпендикулярном магнитному полю Земли. Из сравнения рис. 2 а), б) видно, что зондирование в параллельном направлении существенно повышает дисперсию случайных вариаций рефракционных ослаблений X_a , X_p на обеих частотах системы GPS в диапазоне высот от 60 до 120 км. Это указывает на возможность применения радиозатменного метода для выявления эффектов искусственного воздействия на ионосферу.

Заключение

1. Показано, что выявленная ранее закономерная связь между вариациями интенсивности и ускорением эйконала (фазового пути), а также доплеровской частоты на трассах спутник–спутник, выполняется для трасс спутник–Земля, что указывает на необходимость одновременных наземных измерений амплитуды и фазы сигналов навигационных спутников для одночастотного разделения вкладов ионосферных слоев и неоднородностей.

2. Показана эффективность применения указанной закономерной связи для разделения вкладов слоев и случайных неоднородностей на трассах спутник–спутник.

3. Выявлена перспективность зондирования с разных азимутальных направлений для определения воздействия нагревных стенов на структуру ионосферы с помощью предложенного метода.

Работа частично подержана Программой 07 Президиума РАН.

Список литературы

Павельев А.А., Павельев А.Г. Рефракционное ослабление радиоволн и дистанционное зондирование сферически симметричной среды. // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/3. С. 66–69.

Pavelyev A.G., Liou Y.A., Matyugov S.S., et al. Application of locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. P. 2885–2899. DOI: 10.5194/amt-8-2885-2015.

Liou Y.A., Pavelyev A.G. Simultaneous observations of radio wave phase and intensity variations for locating the plasma layers in the ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, N 23, L231021-5. DOI: 10.1029/2006GL027112.