

УДК 550.388

ФОКУСИРОВКА СИГНАЛА ВЧ-ИОНОЗОНДА ПЕРЕМЕЩАЮЩИМИСЯ ИОНОСФЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Ю. Б. Милованов, В. Ф. Пушин, О. Ф. Тырнов
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Поступила в редакцию 25 марта 2009 г.

Рассмотрена фокусировка ВЧ-сигнала линейными и нелинейными волновыми возмущениями при моностатическом зондировании ионосферы. Предложена методика оценки вариаций амплитуды сигнала за счет фокусировки по биениям отраженного сигнала с сигналом опорного гетеродина во время значительных изменений доплеровского смещения частоты (ДСЧ). Приведены соответствующие экспериментальные и расчетные вариации амплитуды биений и фактора фокусировки, а также вариации ДСЧ, которые показали качественное согласие теории и эксперимента. Одновременный анализ вариаций амплитуды биений и ДСЧ позволяет более определенно интерпретировать результаты измерений, например, выделять крупномасштабные ионосферные неоднородности, перемещающиеся с большими скоростями ($v \approx 1$ км/с).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: перемещающиеся ионосферные возмущения, вариации амплитуды сигнала, доплеровское смещение частоты, фактор фокусировки, компьютерное моделирование.

Розглянуто фокусування ВЧ-сигнала лінійними і нелінійними хвильовими збуреннями при моностатичному зондуванні іоносфери. Запропонована методика оцінки варіацій амплітуди сигналу за рахунок фокусування по биттю відбитого сигналу з сигналом опорного гетеродина під час значних змін доплеровського зсуву частоти (ДЗЧ). Приведені відповідні експериментальні і розрахункові варіації амплітуди биття і чинника фокусування а також варіації ДЗЧ, які показали якісну згоду теорії і експерименту. Одночасний аналіз варіацій амплітуди биття і ДЗЧ дозволяє більш безумовно інтерпретувати результати вимірювань, наприклад, виділяти великомасштабні іоносферні неоднорідності, що рухаються з великими швидкостями $v \approx 1$ км/с.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: іоносферні збурення, що рухаються, варіації амплітуди сигналу, доплеровський зсув частоти, чинник фокусування, комп'ютерне моделювання.

HF signal focusing due to linear and nonlinear wave disturbances occurring during monostatic ionospheric sounding is discussed. A technique is developed for estimating signal amplitude variation due to focusing based on beating amplitude measurements during significant Doppler frequency shift events. The intercomparison of measured and modeled variations in beating amplitudes, the focusing index, and Doppler frequency shift show a qualitative agreement. The simultaneous analysis of variations in the beating amplitude and the Doppler frequency shift makes the interpretation of measurements more definite, e.g., it permits the isolation of large scale disturbances traveling at approximately 1 km s⁻¹.

KEY WORDS: traveling ionospheric disturbances, signal amplitude variations, Doppler frequency shift, focusing factor, computer simulation.

Как известно [1–3], в ионосфере наблюдаются перемещающиеся возмущения (ПИВ) электронной концентрации с широким диапазоном размеров (от десятков до тысяч км), скоростей (от сотни метров до единиц км/с) и относительных возмущений электронной концентрации $\Delta N/N$, которые могут достигать 10–30% и более. ПИВ порождаются различными источниками и имеют различные механизмы генерации. Большая часть ПИВ связана с прохождением в атмосфере акустико-гравитационных волн (АГВ). Несмотря на большие достижения в изучении ПИВ за последние полвека, многие вопросы их генерации и динамики не получили должного объяснения. Это связано с глобальностью процессов. В области теоретических исследований линейная теория распространения АГВ в атмосфере развита достаточно хорошо, однако описание нелинейных волн практически отсутствует. В последнее десятилетие, в связи с развитием экспериментальной базы (развитие спутниковых систем навигации типа GPS, появление многофункциональных ВЧ-ионозондов, лидаров и т.п.) а также мощной вычислительной техники, появились новые возможности в исследовании ПИВ. Так, например, в работе [4] обнаружена уединенная волна типа солитон, возникающая в период мощной магнитной бури в момент необычно сильного всплеска магнитного поля. Одновременное измерение нескольких характеристик сигнала ВЧ-ионозонда позволяет более полно оценить вид и параметры ПИВ (см., например, [5–7]). Так доплеровское смещение частоты сигнала зависит от скорости изменения электронной концентрации, т.е. от градиентов в области отражения сигнала и от скорости перемещения возмущения, а фокусировка сигнала определяется, в основном, горизонтальными градиентами N . Цель данной работы – выделить медленные вариации амплитуды сигнала в период заметных вариаций ДСЧ и промоделировать их путем расчета фактора фокусировки (ФФ) и ДСЧ.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В [5] предложена интерференционная модель преобразования радиосигнала при моностатическом и бистатическом зондировании ионосферы. В этой модели не учитываются эффекты рассеяния и дифракции радиоволн за счет мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации. Наличие мод связано с различными механизмами распространения радиоволн и расщеплением падающей на ионосферу волны на магнитоионные составляющие. Тонкая структура моды может возникнуть в виде многолучевости за счет влияния интенсивных крупномасштабных неоднородностей.

Представим напряженность электрического поля в точке наблюдения в виде суперпозиции плоских, в общем случае, эллиптически поляризованных волн. Вариации состояния предельной поляризации отдельных волн определяются, в основном, вариациями углов прихода. При моностатическом зондировании поляризации отдельных волн близки к круговым. В этом случае пренебрежем влиянием диаграммы направленности антенны и вариаций поляризации на изменения амплитуды составляющих сигнала на входе приемника.

Выражение для квадрата амплитуды суммарного сигнала на поверхности Земли в условиях близкоразнесенного приема ($|\Delta x|, |\Delta y| < 1$ км, $\Delta f/f \ll 1$, $\Delta t < 100$ с) может быть записано в виде [5]:

$$R^2(\vec{\xi}, t) = \sum_q \sum_s r_q r_s \cos(\Delta_{q,s} \psi(0) + \vec{\xi} \Delta_{q,s} \vec{k} + t \Delta_{q,s} f_D) \quad (1)$$

где $\vec{\xi} = (\Delta x, \Delta y, \Delta f)$, $\vec{k} = (k_x, k_y, k_f)$ и $\Delta_{q,s} f_D = f_{Dq} - f_{Ds}$, $k_f = 2\pi/c (P'_q - P'_s)$,

$\Delta_{q,s} k_x = k(\sin \beta_q \cos \varepsilon_q - \sin \beta_s \cos \varepsilon_s)$, $\Delta_{q,s} k_y = k(\sin \beta_q \sin \varepsilon_q - \sin \beta_s \sin \varepsilon_s)$ – так называемые разностные модулирующие функции, q, s – индексы для разных лучей, r – амплитуда моды, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, P' – групповой путь, β, ε – угол места и азимут приходящей радиоволны, $|\Delta x|, |\Delta y|$ – малые смещения по координатам x, y на поверхности Земли, Δt – временной интервал, Δf – малое смещение частоты, $\psi(0)$ – начальная фаза.

Спектр квадрата амплитуды есть спектр разностных доплеровских частот. Расчет модулирующих функций конкретного объекта позволяет связать его параметры с характеристиками радиообраза (прямая задача). Измерение модулирующих функций ионосферы – основная задача обработки сигнала при радиозондировании.

При моностатическом зондировании

$$R^2(t) = \sum_q \sum_s r_q r_s \cos(\Delta_{q,s} \psi(0) + t \Delta_{q,s} f_D).$$

Для определения знака ДСЧ введем в качестве одной из мод сигнал опорного гетеродина, смещенного по отношению к излученному сигналу на частоту δf . Амплитуда гетеродина r_0 выбирается значительно больше, чем амплитуда ионосферного сигнала. В этом случае амплитуды межмодовых биений будут значительно меньше, чем амплитуды биений мод с опорным гетеродином. Тогда

$$R^2(t) = \sum_s r_{0s} r_s \cos(\Delta_{0,s} \psi(0) + (f_{Ds} - \delta f)t).$$

При моностатическом зондировании и невысоких частотах зондирующего сигнала амплитуда O -моды, как правило, заметно больше амплитуды H -моды. При сильных возмущениях возможна внутримодовая многолучевость. Спектральный анализ $R^2(t)$ позволяет определить ДСЧ отдельных мод. В работе используется интервал оценки спектра 1 мин. Последовательность спектров через одну минуту образует динамические спектры. Вариации амплитуды O -моды можно оценить по сглаженной реализации $\bar{R}^2(t)$, так как вариации $R^2(t)$ за счет $r_q(t)$ значительно медленнее, чем за счет фазы. Просмотр динамических спектров позволяет выделить интервалы наблюдения ПИВ, оценить лучевую структуру сигнала. Совместный анализ вариаций $f_D(t)$ и $\bar{R}^2(t)$ дает возможность определить вид и параметры ПИВ.

Нами обрабатывались регистрации биений ионосферного сигнала с сигналом опорного гетеродина при моностатическом зондировании, полученные в течение многих лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

На регистрациях ДСЧ находим фрагменты вариаций частоты и по описанной выше методике построим усредненные вариации амплитуды биений. На рис. 2а приведены экспериментальные периодические изменения ФФ и ДСЧ во времени. Динамические спектры показывают появление многолучевости при максимальной фокусировке сигнала. Рис. 3а также демонстрирует экспериментальные периодические вариации ФФ и ДСЧ. Однако в этом случае фокусировка

наблюдается в узком временном интервале (~20 с) и значительно более интенсивна. На рис. 4а и рис. 5 приведены непериодические вариации ФФ и ДСЧ. Характерным для поведения ФФ на рис. 4а является то, что на фоне общей медленно меняющейся дефокусировки сигнала наблюдается короткий всплеск амплитуды. На рис. 5 в отличие от предыдущего случая отсутствуют вариации амплитуды при наличии значительных вариаций ДСЧ.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Для расчета вариаций характеристик зондирующего ВЧ-сигнала необходима аналитическая модель среды. Представим электронную концентрацию в виде $N=N_0(1+\varphi)$, где N_0 – концентрация регулярной ионосферы, φ – возмущающая функция. Регулярное распределение электронной концентрации $N_0(\vec{r}, t)$ задается глобальной моделью Ching-Chiu [8]. Представим возмущающую функцию для волнового процесса в виде плоской неоднородной волны:

$$\varphi(\vec{r}, t) = \delta_N(z)u(\xi - vt), \quad (2)$$

где $\delta_N(z)$ – распределение относительного возмущения $|\Delta N/N|$ по высоте, ξ – координата, отсчитываемая в направлении распространения волны, v – скорость распространения волны. Функцию u будем задавать в виде решений эталонных уравнений теории нелинейных волн [9]. Для волны с периодической структурой $u(\xi)=u(\xi+\Lambda)$, где Λ – длина волны. Представим функцию u в виде, совпадающем с нормированным решением уравнения Бюргерса [10] $V(\theta)/V_{\max}$ на заданном интервале, где

$$V(\theta; Z, \Gamma) = \frac{1}{1+Z} \left[-\theta + \pi \operatorname{th} \frac{\pi\theta}{2\Gamma(1+Z)} \right], \quad -\theta^* \leq \theta < \theta^*, \quad (3)$$

Z и Γ – безразмерные параметры, определяющие профиль нелинейной волны, $\theta=2\theta^*\zeta/\Lambda$, θ^* задается решением уравнения $\theta = \pi \operatorname{th} \frac{\pi\theta}{2\Gamma(1+Z)}$. В области наблюдения волну можно считать "недеформируемой". В этом случае параметры Z и Γ полагаются постоянными. Выражение (3) описывает поведение плоской пилообразной волны с конечной шириной фронта. При $Z \sim 2/\Gamma$ выражение (3) описывает гармоническую волну.

Для уединенной волны в виде импульса положительной или отрицательной полярности будем использовать функцию u в виде решения уравнения Кортевега-де Вриза:

$$u(\xi, t) = \operatorname{ch}^{-2} \left(\frac{\xi - vt}{0.46a} \right), \quad (4)$$

где a – размер возмущения на уровне e^{-1} . Распределение относительного возмущения по высоте зададим в виде:

$$\delta_N(z) = \delta_{\max} \exp \left(- \left(\frac{z - z_0}{H} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где δ_{\max} – максимум относительного возмущения, z_0 – высота максимума, H – полутолщина слоя.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При расчетах используется методика синтеза многопараметрических ионограмм, предложенная в [11, 12]. Известно [13], что днем на низких частотах (менее 4 МГц) O -волна поглощается заметно слабее H -волны. Ночью соотношение амплитуд O - и H -компонент определяется только разделением падающей волны на границе ионосферы и их фокусировкой средой. Дневные профили будут отличаться соотношением значений z_0 и $z_M F_2$, $f_{if_0} F_2$, где $z_M F_2$ – высота максимума слоя F_2 , $f_0 F_2$ – критическая частота слоя. Для плоскостойкой магнитоактивной ионосферы при моностатическом зондировании O -волна отражается на высоте, где $f=f_0$, а H -волна – при $f_0=(f^2 - f_H^2)^{1/2}$, где f_0 – плазменная частота, f_H – гирочастота электрона. Величина и характер радио-отклика зависят от отношения $|\nabla(\Delta N)| / |\nabla N_0|$ в

области отражения ВЧ-волны, где $\Delta N = N_0 \varphi$. Значения z_0 , $z_M F2$ и $f_0 F2$ определяют высоту и величину максимума $|\Delta N|$. Меняя дату, время и эффективное число солнечных пятен в модели Ching-Chiu,



Рис. 1. Вертикальные профили плазменной частоты электронов по модели Ching – Chiu, где кривая 1 – зима, день, $\bar{W}=16$; кривая 2 – зима, день, $\bar{W}=100$; кривая 3 – зима, ночь, $\bar{W}=100$.

изменяем профиль $N_0(z)$. На рис. 1 приведены характерные регулярные профили плазменной частоты электронов, рассчитанные по модели. При проведении эксперимента частота зондирующего сигнала, как правило, выбиралась в диапазоне 2,2 – 4 МГц, в зависимости от времени суток. Отсюда следует, что днем отражение сигнала происходило вдали от максимума электронной концентрации. Расчеты проводились для дневного профиля (кривая 1 на рис. 1) для O-волны.

Влияние крупномасштабных неоднородностей на вариации амплитуды поля радиоволны проявляется в первую очередь в виде фокусировки и дефокусировки. Для изучения этих свойств неоднородностей будем пользоваться фактором фокусировки

$$F = 20 \lg \frac{E}{E_0},$$

где F – фактор фокусировки в децибелах, E и E_0 – амплитуды поля в точке наблюдения для возмущенной и невозмущенной среды соответственно. При этом E и E_0 рассчитываются без учета поглощения в ионосфере и для изотропного излучателя. В геометрооптическом приближении амплитуда поля радиоволны вычисляется по формуле [14]:

$$E(t, \varepsilon, \beta) = E(0, \varepsilon, \beta) \left| \frac{J(0, \varepsilon, \beta)}{J(t, \varepsilon, \beta)} \right|^{1/2},$$

где $E(0, \varepsilon, \beta)$ – напряженность поля падающей волны на границе ионосферы, $J(t, \varepsilon, \beta)$ – якобиан

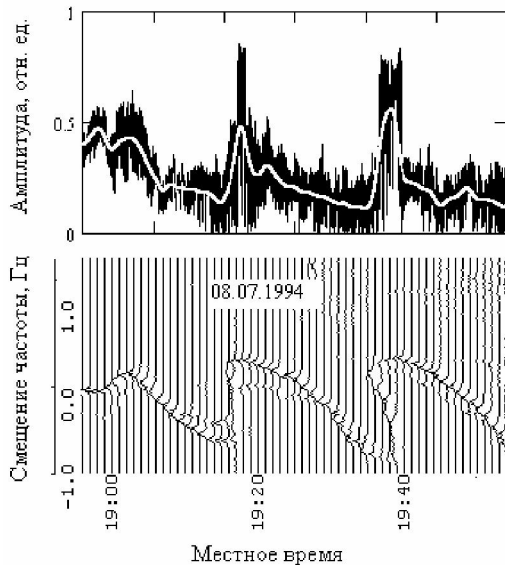


Рис. 2а. Экспериментальные вариации амплитуды биений и ДСЧ сигнала

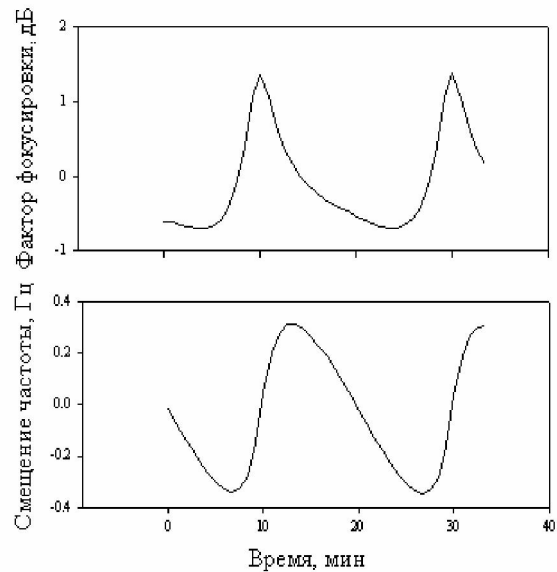


Рис. 2б. Расчетные зависимости ФФ и ДСЧ сигнала от времени

преобразования лучевых координат в прямоугольные декартовы.

Промоделируем экспериментально наблюдаемые вариации ФФ и ДСЧ, используя приведенные выше модели ПИВ. На рис. 2а приведены результаты расчетов фактора фокусировки и доплинограммы при прохождении в дневной ионосфере плоской гармонической волны в горизонтальном направлении вдоль магнитного меридиана на юг. Рабочая частота зондирующей волны $f = 4$ МГц. Параметры волнового возмущения (ВВ) следующие: период волны – $T = 20$ мин, длина волны – 250 км, $\delta = 30\%$. Фазовая скорость такой волны – $0,2$ км/с. Параметры в (3) следующие: $z_0 = 220$ км и $H = 80$ км. Характерным является то, что интервал фокусировки сигнала всегда меньше интервала дефокусировки. Полученные расчетные зависимости $F(t)$ и $f_D(t)$ качественно повторяют характерные особенности поведения ФФ и ДСЧ на рис. 2а. С уменьшением δ кривые для $F < 0$ становятся более симметричными. Аналогично для $F > 0$. При этом доплинограммы становятся гармоническими. На рис. 3 показаны вариации ФФ и ДСЧ при небольшом значении δ .

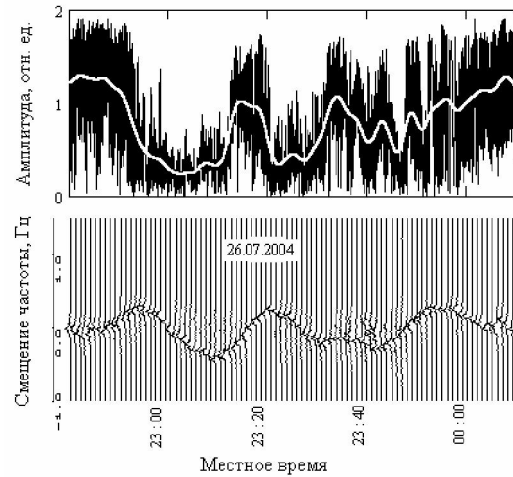


Рис. 3. Экспериментальные вариации амплитуды биений и ДСЧ сигнала

Рассмотрим радиоотклик на прохождение в ионосфере негармонических волн. Такие волны могут являться следствием распространения нелинейных внутренних гравитационных волн (ВГВ) на ионосферных высотах. На рис. 4а приведены фактор фокусировки и доплинограмма, рассчитанные для O -волны при горизонтальном перемещении нелинейного ВВ вдоль магнитного меридиана на юг. Рабочая частота зондирующей волны $f = 6$ МГц. Параметры ВВ следующие: период волны – $T = 20$ мин, длина волны – 100 км, $\delta = 5\%$. Фазовая скорость такой волны – $v \approx 0,1$ км/с. Параметры Z и Γ , характеризующие степень нелинейности, равны 2 и $\pi/24$ соответственно. В области фокусировки имеется острый максимум, описывающий фокусировку на кругом фронте волны, область дефокусировки имеет гладкий минимум. С ростом Γ максимум сужается и растет. Доплинограмма имеет участки, где ДСЧ меняется медленно. Сильная нелинейность приводит к появлению так называемой внутренней многолучевости. Сравнивая рис. 4а и рис. 4б, отметим, что и здесь также наблюдается качественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Отсутствие области дефокусировки на регистрации можно

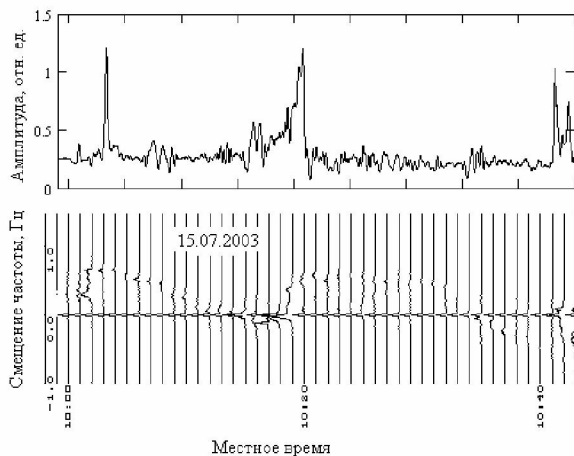


Рис. 4а. Экспериментальные вариации амплитуды биений и ДСЧ сигнала

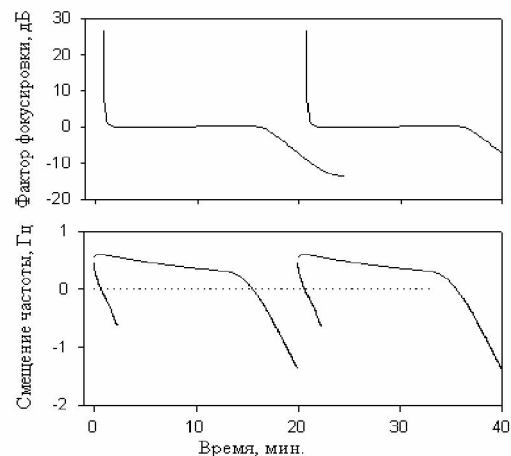


Рис. 4б. Расчетные зависимости ФФ и ДСЧ сигнала от времени

объяснить маскирующим действием просачивающегося зондирующего сигнала.

В ионосфере часто наблюдаются возмущения в виде уединенных волн. Рассмотрим радиоотклик на прохождение в ионосфере уединенной плоской волны в виде однополярного импульса, описываемого формулой (4). На рис. 5 приведены рассчитанные вариации фактора фокусировки и доплинограмма для отрицательного импульса. Рабочая частота зондирующей волны $f = 4$ МГц. Параметры импульса: пространственный размер – 100 км, $v = 0,2$ км/с, $\delta = 30\%$. Импульс движется в меридиональной плоскости горизонтально в направлении на юг. Характерным в поведении ФФ является всплеск амплитуды на фоне общей дефокусировки сигнала.

Известно, что с ростом размера ВВ растет и скорость перемещения. Это приводит к тому, что с увеличением размера уединенной волны ДСЧ меняется медленно, а ФФ быстро убывает, т.е. крупномасштабные ВВ (~1000 км и более) практически не влияют на вариации амплитуды сигнала.

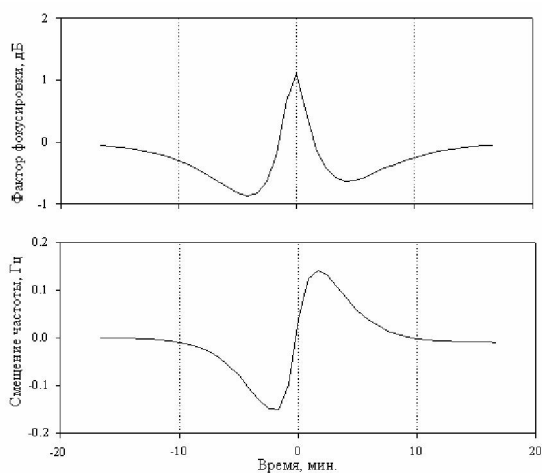


Рис. 5. Расчетные зависимости ФФ и ДСЧ сигнала от времени

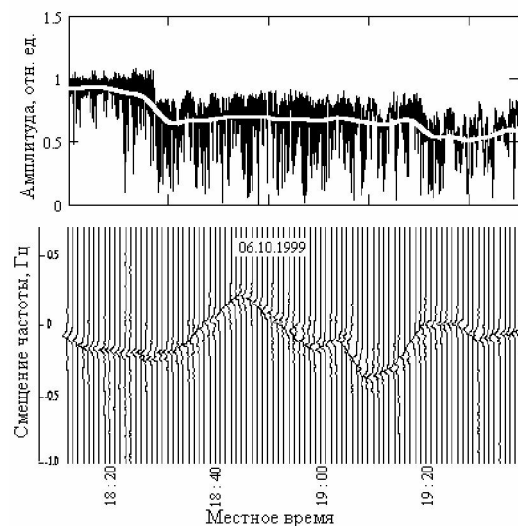


Рис. 6. Экспериментальные вариации амплитуды биений и ДСЧ сигнала

Подобная картина наблюдается на рис. 6.

Для источников АГВ, находящихся на поверхности Земли, в тропосфере или во внешней ионосфере, могут наблюдаться волны, перемещающиеся в вертикальном направлении. В случае вертикального движения фокусирующие свойства ВВ слабые.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качественное согласие экспериментальных результатов с расчетами позволяет предполагать, что в ионосфере наблюдаются возмущения, моделируемые выражениями (2 – 5). Случай, приведенный на рис. 2, ранее описывался в литературе (см., например, [5, 13]). На рис. 4, возможно, наблюдается сильное возмущение в виде пилообразной волны (3). На регистрации ДСЧ видно, что при отсутствии шума амплитуды спектральных составляющих малы. По-видимому, это связано с сильным поглощением в нижележащих слоях ионосферы. На регистрации биений сигнала, приведенной на рис. 6, вариации амплитуды малы при значительных вариациях ДСЧ. Возможно, наблюдается вертикально распространяющееся возмущение или крупномасштабное возмущение (~1000 км) перемещается с большой скоростью (~1 км/с) в горизонтальном направлении.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика выделения медленных вариаций амплитуды биений сигнала в периоды вариаций ДСЧ для ВЧ-ионозонда при моностатическом зондировании ионосферы.
2. Компьютерное моделирование вариаций ФФ и ДСЧ с помощью моделей ПИВ показало адекватность используемых моделей возмущений и эффективность методики обработки.
3. Показано, что совместное использование динамических спектров и вариаций амплитуды биений сигнала позволяет с большей достоверностью интерпретировать результаты измерений и, в частности, разделять среднemasштабные и крупномасштабные ВВ, перемещающиеся горизонтально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М. Наука, 1974. 255 с.
2. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор)// Изв. высш. уч. зав., Радиофизика. 1999. Т. 42. № 1. С. 3 – 25.
3. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995// Ann. Geophys. 1996. V. 14. Pp. 917 – 940.
4. Афраймович Э. Л., Воейков С. В. Экспериментальное доказательство существования уединенной внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30. 10. 2003 г.// ДАН. 2004. Т. 399. № 5. С. 683 – 686.
5. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы, М. Наука, 1982. 198 с.

6. Jacobson A. R., Carlos R. C. Coherent-array HF Doppler sounding of traveling ionospheric disturbances: I. Basic technique// J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V.51. № 4. Pp. 297 – 309.
7. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinish B. W., Pazukhov V. V., Foster J. C., Erickson P. J.. Frequency-and- angular HF sounding and VHF ISR diagnostics of TIDs// Radio Science. 2003. V. 38. № 6. Pp. 1102 – 1111.
8. Chiu Y. T.. An improved phenomenological model of ionospheric density// J. Atmos. Terr. Phys. 1975. V. 37. № 10. Pp. 1563 – 1570.
9. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М. Мир, 1988. 694 с.
10. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М. Наука, 1979. 383 с.
11. Пушин В. Ф., Тырнов О. Ф. Синтез доплинограмм моностатического зондирования возмущенной ионосферы декаметровыми волнами// Вісник Харківського національного університету, № 622, Радіофізика та електроніка. 2004. Вип. 1. С. 64 – 68.
12. Pushin V. F., Kostrov L. S. 3-D Ray-tracing synthesis of multiparameter ionograms as obtained by digital sounders in a disturbed ionosphere// Telecom. and Radio Engineering. 1999. V. 53. № 2. Pp. 58 - 64.
13. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М. Мир, 1973. 503 с.
14. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М. Наука, 1980. 304 с.

© Ю. Б. Милованов, В. Ф. Пушин, О. Ф. Тырнов, 2009