

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИЕНИЙ ОПОРНОГО СИГНАЛА И ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ ВЧ СИГНАЛА

*Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования физических эффектов, сопровождающих процессы в магнитосфере и ионосфере. Для наблюдений использовался доплеровский ВЧ радар вертикального зондирования. Для обработки данных применялся спектральный анализ биений в режиме доплеровской фильтрации для обнаружения акустических волн. Спектральный анализ использовался также для выделения колебаний в диапазоне частот  $1 \div 12$  Гц (электромагнитные УНЧ волны). Методика обработки проверялась путем численного эксперимента. Экспериментально установлено, что в дневное время наблюдаются УНЧ волны с частотой 1.5 Гц.*

*Ключевые слова:* моделирование биений ВЧ сигнала, доплеровский радар, ионосфера, спектральный анализ, электромагнитные УНЧ волны, акустические волны

### 1. Введение

Одним из эффективных методов исследования нестационарных процессов в ионосфере ниже максимума слоя F2 (высоты  $z \approx 100 \div 300$  км) является высокочастотное (ВЧ) зондирование на фиксированных частотах  $1.5 \div 15$  МГц с измерением биений отраженного сигнала и сигнала опорного гетеродина [1]. Основное достоинство этого метода – высокая чувствительность к возмущениям ионосферы и возможность их непрерывного мониторинга. К недостаткам метода следует отнести относительную сложность интерпретации результатов измерений. Особый интерес представляют исследования волновых процессов в нейтральной атмосфере и ионосферной плазме, условий их генерации и распространения. Дело в том, что волны в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера ответственны за взаимодействие подсистем в этой системе, за перенос энергии, возмущений и т. д.

В Харьковском национальном университете имени В. Н. Каразина в течение нескольких десятилетий проводится зондирование ионосферы доплеровским ВЧ радаром вертикального зондирования. В результате накоплен обширный банк первичных данных, связанных с различными геофизическими явлениями естественного и антропогенного происхождения (солнечный терминатор, солнечные затмения, землетрясения, пуски и полеты ракет, нагрев ионосферы мощной радиоволной и т. п.).

© В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор, 2014

Целью работы является изучение возможности расширения традиционного диапазона частот наблюдаемых периодических волновых возмущений, например, в область акустических волн [2–4] и ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных волн в плазме [5–7] с помощью изменения методики обработки.

### 2. Средства диагностики

Доплеровский радар вертикального зондирования ионосферы использовался для регистрации ионосферных возмущений. Радар расположен вблизи г. Харьков (Украина) на территории Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, ее координаты:  $49^{\circ}38'$  с. ш.,  $36^{\circ}20'$  в. д. Основные параметры радара: диапазон частот  $f = 1 \div 24$  МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность зондирующего импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Частота выборки выходных данных равна 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления  $G \approx 1 \div 10$  в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха  $q$  в ночное время достигает  $10^5 \div 10^6$ . В дневное время  $q$  обычно на  $1 \div 2$  порядка меньше. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную

обработку отраженного от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени.

Доплеровский радар относится к высокопрецизионным радиосистемам. За счет внутреннего кварцевого синтезатора частоты на основе прибора Ч6–31 обеспечивается кратковременная (в течении 1 мин) относительная нестабильность частоты около  $1.5 \cdot 10^{-10}$  (абсолютная нестабильность – около  $(4.5 \div 6) \cdot 10^{-4}$  Гц). Долговременная нестабильность частоты контролируется рублиевым стандартом частоты Ч1–69, у которого относительная нестабильность частоты составляет около  $10^{-11}$ .

Разрешающая способность радара по частоте близка к 17 МГц.

В настоящей работе рассматриваются результаты измерений, выполненные на частотах зондирования 3.2 и 4.2 МГц.

Высотная протяженность отраженного сигнала равна  $ct/2 \approx 75$  км ( $c$  – скорость света в вакууме). Поэтому использовалось стробирование по высоте с дискретностью  $\Delta z = 75$  км в диапазоне действующих высот  $z' = 75 \div 450$  км (им соответствовали 1–5 каналы приемно-региструющей аппаратуры). В основном канале амплитуда сигнала принимала максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

### 3. Моделирование процесса биений

#### 3.1. Общие соотношения

В рамках интерференционной модели [1] ВЧ сигнала, отраженного от ионосферы, рассмотрим суперпозицию  $M$  синхронных скалярных гармонических колебаний

$$s = \sum_{i=1}^M A_i \cos(\omega t - \varphi_i).$$

После преобразований имеем [8]

$$s = A \cos(\omega t - \varphi),$$

где

$$A^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M A_i A_j \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum_{i=1}^M A_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^M A_i \cos \varphi_i}.$$

Рассмотрим важный частный случай, когда одно из колебаний имеет амплитуду значительно большую, чем амплитуды других колебаний, т. е.

$$A_1 \gg A_i, \quad i = 2, 3, \dots, M.$$

Тогда для амплитуды биений получим

$$A \approx A_1 + \sum_{i=2}^M A_i \cos(\varphi_1 - \varphi_i). \quad (1)$$

Согласно данным многочисленных экспериментов при зондировании F-области ионосферы довольно часто (до 50 % случаев) встречается одномодовый сигнал. В этом случае  $A_1$  будет амплитудой колебаний сигнала опорного гетеродина, а  $A_2$  – амплитудой сигнала, отраженного от ионосферы. Чисто интерференционная модель сигнала не учитывает дифракционные эффекты и статистические эффекты рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации. С учетом рассеяния сигнала на мелкомасштабных неоднородностях имеем для фазы биений

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Phi(t) + \theta(t), \quad (2)$$

где  $\Phi(t)$  – детерминированный процесс,  $\theta(t)$  – стационарный случайный процесс, связанный с рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях. Задача состоит в оценке параметров детерминированного процесса. В этом случае случайный процесс играет роль шума. Как это принято в концепции аналитического сигнала, будем называть “мгновенным” смещением частоты величину

$$\omega = \frac{d\Phi}{dt}.$$

С учетом соотношений (1) и (2) выражение для биений имеет вид

$$A(t) = A_1 + A_2 \cos(\Phi(t) + \theta(t)).$$

Размеры мелкомасштабных неоднородностей малы по сравнению с размерами области, существенно влияющей на отраженный сигнал, а время их жизни  $t_{sd}$  мало по сравнению с характерным временем изменения крупномасштабных неоднородностей  $t_{td}$ . В этом случае постановка задачи может быть сформулирована следующим образом. Задан случайный процесс в виде (2).

Характерное время детерминированного процесса равно  $t_{id}$ , а для стационарного случайного процесса интервал корреляции  $\tau_c \ll t_{id}$ . В качестве детерминированного процесса рассмотрим гармонический процесс

$$\Phi(t) = a \cos(\Omega t + \psi_0),$$

где  $a$  – амплитуда процесса;  $\Omega = 2\pi/T_{id}$ ,  $T_{id}$  – период крупномасштабных неоднородностей;  $\psi_0$  – начальная фаза. Параметры  $A_1$  и  $A_2$  будем считать постоянными. Исходя из сказанного выше, в качестве  $\theta(t)$  возьмем модель белого шума с гауссовской функцией распределения

$$w(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\theta - \bar{\theta})^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\bar{\theta}$  – среднее значение,  $\sigma^2$  – дисперсия. Предположим, что задача состоит в оценке параметра  $T_{id}$ .

Пусть интервал анализа равен  $T$  и не превосходит интервал стационарности процесса  $A(t)$ . Для ионосферы значение интервала стационарности близко к  $10^2$  с.

### 3.2. Случай “медленных” процессов

Рассмотрим сначала традиционный случай, когда  $T_{id} \gg T$ . Условимся называть такие временные изменения “медленными”. Тогда можно считать, что на интервале времени анализа  $[0, T]$

$$\Phi(t) \approx \omega(0)t + \Phi(0),$$

где  $\omega(0) = -2\pi a \sin \psi_0 / T_{id}$ ,  $\Phi(0) = a \cos \psi_0$ . В этом случае величина  $f_d = \omega(0)/(2\pi)$  называется доплеровским смещением частоты (ДСЧ) на интервале анализа. Выражение для  $A(t)$  на интервале  $[0, T]$  принимает вид

$$A(t) \approx A_1 + A_2 \cos(2\pi f_d t + \Phi(0) + \theta(t)).$$

Полученный результат переносится на случай суперпозиции  $M$  колебаний.

Разобьем интервал наблюдения на  $(n-1)$  отрезков, равных  $T$ . При слабом шуме (т. е.  $a/\sigma > 1$ ) получим ряд оценок ДСЧ  $f_{di}$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1$ , для каждого отрезка:

$$f_{di} = -\frac{a}{T_{id}} \sin\left(\frac{2\pi i}{T_{id}} T + \psi_0\right).$$

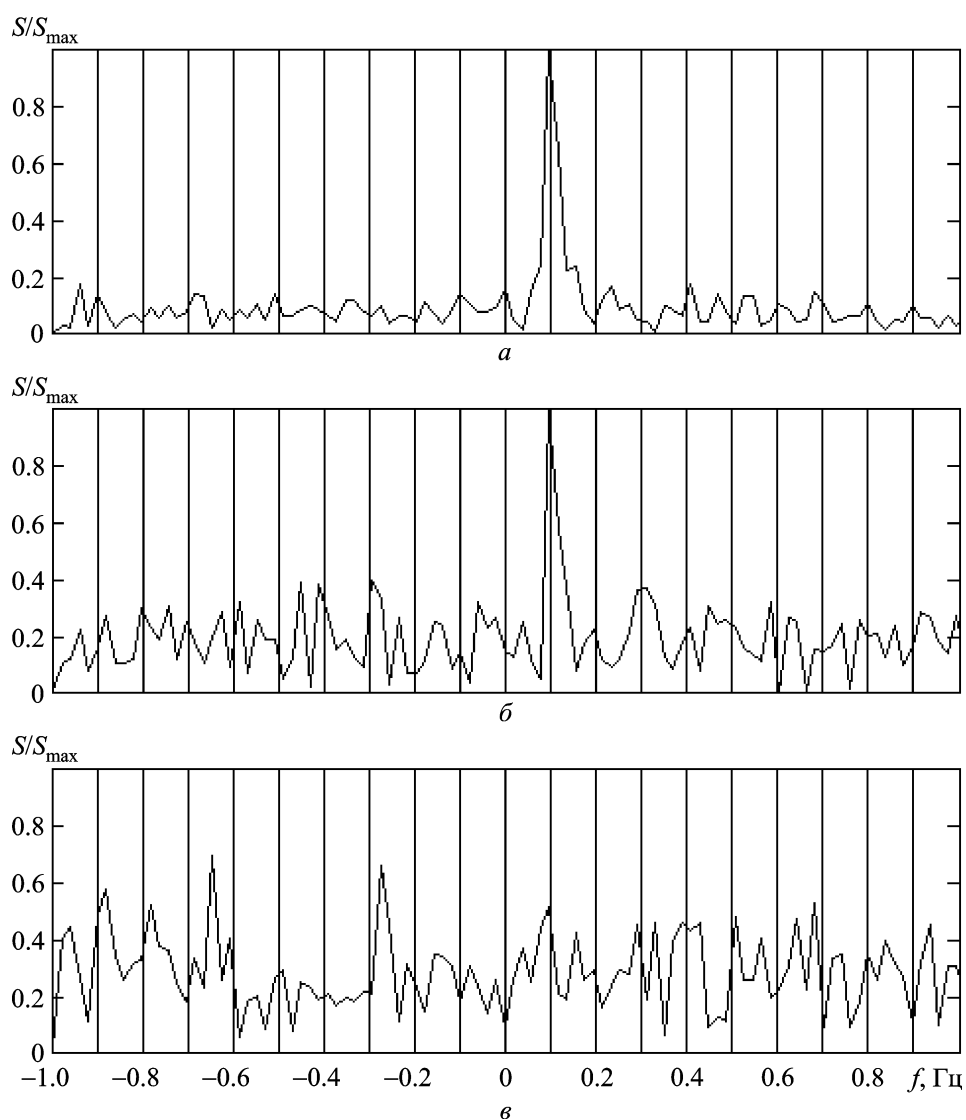
Искомый параметр  $T_{id}$  определим путем спектрального анализа временного ряда. Чем больше мощность шума, тем выше погрешность оценки параметров детерминированного процесса. Для предложенной модели проанализируем влияние случайной составляющей фазы сигнала на точность оценки параметров детерминированной части случайного процесса.

Волновые возмущения в ионосфере с достаточно большими периодами связывают с волновыми процессами в нейтральной атмосфере [2, 9]. Дисперсионные характеристики атмосферных волн имеют две ветви: высокочастотную (акустические волны) и низкочастотную (внутренние гравитационные волны (ВГВ)). Между этими ветвями существует незначительная запретная зона. Диапазон изменения временных периодов для ВГВ составляет от 5 мин до единиц часов. Будем полагать, что на минимальном периоде должно укладываться, например, не менее чем  $5T$ . Тогда  $T \leq 1$  мин. Однако следует помнить, что с уменьшением  $T$  уменьшается точность оценки  $f_d$ .

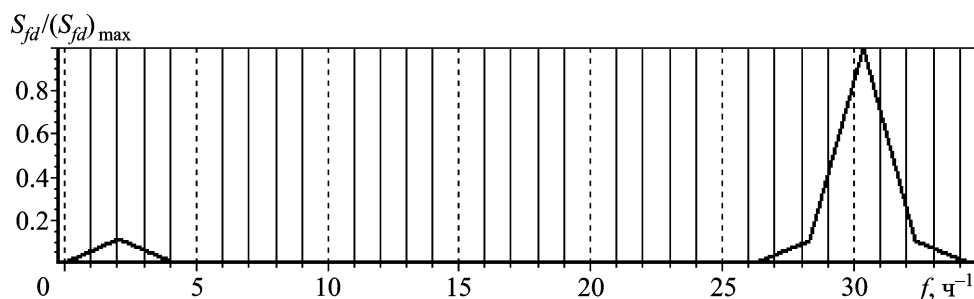
Для спектрального анализа биений, который называют доплеровской фильтрацией, будем использовать дискретный гармонический анализ и метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) [10]. Для определения знака ДСЧ введем смещение частоты излучаемого сигнала относительно частоты опорного гетеродина  $\Delta f_0$ . При шаге квантования  $\Delta t = 0.1$  с зададим  $\Delta f_0 = 1$  Гц – значение, равное максимально ожидаемому отрицательному смещению частоты. В методе БПФ размер анализируемого временного ряда  $A_i = A(i\Delta t)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ , равен  $N$ , где  $N = 2^q$ , а число оценок –  $(2^{q-1} + 1)$ . Зададим  $q = 9$ . Тогда  $N = 512$ , и при шаге квантования  $0.1$  с  $T = 51.1$  с. Дискретность оценок спектра составляет  $\Delta f = 1/T \approx 0.02$  Гц. Для сглаживания данных на краях временного ряда используется косинусное окно [10].

На рис. 1, *a–в* приведены нормированные спектральные плотности мощности биений  $S$  при  $f_d = 0.1$  Гц для перемещающихся ионосферных возмущений на интервале анализа для различных среднеквадратичных отклонений случайной составляющей фазы сигнала ( $\sigma = 1, 1.5, 3$ ).

На рис. 2 показана нормированная спектральная плотность мощности вариаций ДСЧ



**Рис. 1.** Нормированные спектральные плотности мощности биений ВЧ сигнала при  $f_d = 0.1$  Гц для перемещающихся ионосферных возмущений на интервале анализа для различных среднеквадратичных отклонений случайной составляющей фазы сигнала: *a* –  $\sigma = 1$ , *б* –  $\sigma = 1.5$ , *в* –  $\sigma = 3$



**Рис. 2.** Нормированная спектральная плотность мощности вариаций ДСЧ

при отсутствии шума для  $a = 10$ ,  $T_{id} = 2$  мин и  $T = 20$  с на интервале наблюдения, равном 30 мин.

### 3.3. Случай “быстрых” процессов

Представляет интерес случай, когда  $T_{id} \leq T$ . Условимся называть такие временные изменения “быстрыми”. В этом случае на интервале анализа функция  $\Phi(t)$  является нелинейной и мгновенная частота изменяется во времени. Выражение для  $A(t)$  запишем в виде

$$A(t) = A_1 + A_2 F_1(t) \cos \theta - A_2 F_2(t) \sin \theta, \quad (3)$$

где  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  – детерминированные периодические функции. При  $a \ll 1$  разложим  $F_1$ ,  $F_2$  в степенные ряды и ограничимся членами порядка  $a^2$ . Тогда выражение (3) примет вид

$$A(t) \approx A_1 + A_2 \left[ \left(1 - a^2/4\right) \cos \theta(t) - a \sin \theta(t) \cos(\Omega t) - \left(a^2/4\right) \cos \theta(t) \cos(2\Omega t) \right] + O(a^3/3!). \quad (4)$$

Величина  $a$  зависит от амплитуды неоднородности электронной концентрации  $|\Delta N_e|_{\max}$ .

Обычно считают, что ВГВ создают в ионосфере крупномасштабные неоднородности. Спектральный анализ ВГВ дает степенной закон уменьшения их интенсивности при уменьшении периода с показателем, равным 2, [9]. Отсюда можно предположить, что с уменьшением  $T_{id}$  уменьшается и  $a$ . Так как  $|f_d| \sim a/T_{id}$ , то можно допустить, что с уменьшением  $T_{id}$  уменьшается и  $|f_d|$ .

Из соотношения (4) следует, что детерминированный процесс присутствует в биениях в виде скрытых гармоник. При  $\Delta t = 0.1$  с частота Котельникова (Найквиста) равна  $f_N = 5$  Гц. Точность оценки параметра  $T_{id}$  зависит от отношения мощности детерминированной составляющей фазы к мощности случайной составляющей, т. е. от отношения сигнал/шум. Расчеты спектров биений, проведенные в рамках модели, показали, что при заданных  $a = 0.1$ ,  $a/\sigma = 1$  и  $T_{id} = 1$  с оценки  $T_{id}$  устойчивы практически для всех значений  $\bar{\theta}$ , при  $\bar{\theta} = \pi/4$ ,  $\bar{\theta} = \pi/2$  оценки  $T_{id}$  устойчивы при  $a/\sigma \geq 1/3$ . При приближении  $\bar{\theta}$  к  $\pi/2$  или  $3\pi/2$  влияние шума на второе слагаемое в (4) ослабевает.

### 3.4. Случай “быстрых” и “медленных” процессов

Рассмотрим случай, когда в фазе присутствуют одновременно “быстрые” и “медленные” временные изменения. Тогда выражение для  $A(t)$  в линейном приближении по  $a$  имеет вид

$$A(t) \approx A_1 + A_2 \left[ \cos(\theta - \omega' t) - (a/2) (\cos \theta (\sin(\omega_- t) + \sin(\omega_+ t)) + \sin \theta (\cos(\omega_- t) + \cos(\omega_+ t))) \right], \quad (5)$$

где  $\omega_{\pm} = \omega' + \Omega$ ,  $\omega' = \omega_d + \Delta\omega_0$ ,  $\Delta\omega_0 = 2\pi\Delta f_0$ . Из соотношения (5) следует, что в биениях присутствуют комбинационные частоты  $\omega_{\pm}$ . Рассмотрим наблюдаемые комбинационные частоты как функции частот быстрых колебаний  $f = \Omega/2\pi$ . Пусть частота отсечки низкочастотного фильтра  $f_c = 2f_N$  и  $\Delta f_0 = f_N/2$ . Тогда в случае, когда  $f_{\pm} \in [0, f_N]$ , комбинационные частоты симметричны относительно  $(\Delta f_0 + f_d)$  и

$$f = f_{\pm} - (\Delta f_0 + f_d).$$

Значения  $f_{\pm}$  с увеличением  $f$  при малых  $f_d$  почти одновременно достигают правой и левой границ интервала  $[0, f_N]$ . При дальнейшем увеличении  $f$  наблюдаемые комбинационные частоты имеют вид:

$$f_- = f - (\Delta f_0 + f_d), \quad f_+^* = 2f_N - (\Delta f_0 + f_d) - f, \quad (6)$$

где звездочка обозначает частоту наложения. За счет  $f_d$  значения  $f_{\pm}$  смещаются на величину  $-f_d$  и спектральная плотность мощности несимметрична относительно  $(\Delta f_0 + f_d)$ . С увеличением  $f$  наблюдаемые комбинационные частоты смещаются навстречу друг другу и меняются сторонами. Из выражения (6) следует, что

$$f = f_N \pm \frac{1}{2} |f_- - f_+|,$$

т. е. частота  $f$  определяется в этом случае неоднозначно. При дальнейшем росте  $f$  частоты  $f_{\pm}$  почти одновременно достигают граничных значений  $f_N$  и  $f_c$ . Далее будут наблюдаться только

отрицательные комбинационные частоты в виде частот наложения

$$f_-^* = 2f_N + (\Delta f_0 + f_d) - f. \quad (7)$$

Из выражения (7) находим, что

$$f = 2f_N + (\Delta f_0 + f_d) - f_-^*. \quad (8)$$

Из соотношения (8) следует, что максимальная определяемая частота колебаний выше  $f_c$  на величину, приблизительно равную  $\Delta f_0$ .

Предположим, например, что  $f_d = 0$  Гц,  $\Delta f_0 = 2.5$  Гц и  $f = 2$  Гц. Оценим значения комбинационных частот путем спектрального анализа биений. Для того чтобы главная составляющая

спектра не “забивала” побочные, умножим спектр на передаточную функцию заградительного фильтра, построенного на основе фильтров нижних и верхних частот Баттерворта [7], с центральной частотой  $f_c = \Delta f_0 + f_d = 2.5$  Гц и шириной полосы  $b$ , равной 0.3 Гц. На рис. 3, *a* приведена спектральная плотность мощности биений сигнала. Максимумы спектра соответствуют частотам близким к 0.5 и 4.5 Гц, что отвечает модели биений.

Если комбинационные частоты выходят за пределы  $[0, f_N]$ , наблюдается наложение частот. На рис. 3, *б* и *в* приведены спектральные плотности мощности для  $f = 6$  Гц. Для рис. 3, *б*  $f_d = 0$ , а для рис. 3, *в*  $f_d = -0.2$  Гц. Сравнивая рисунки, видим, что при  $f_d < 0$  спектральные составляющие

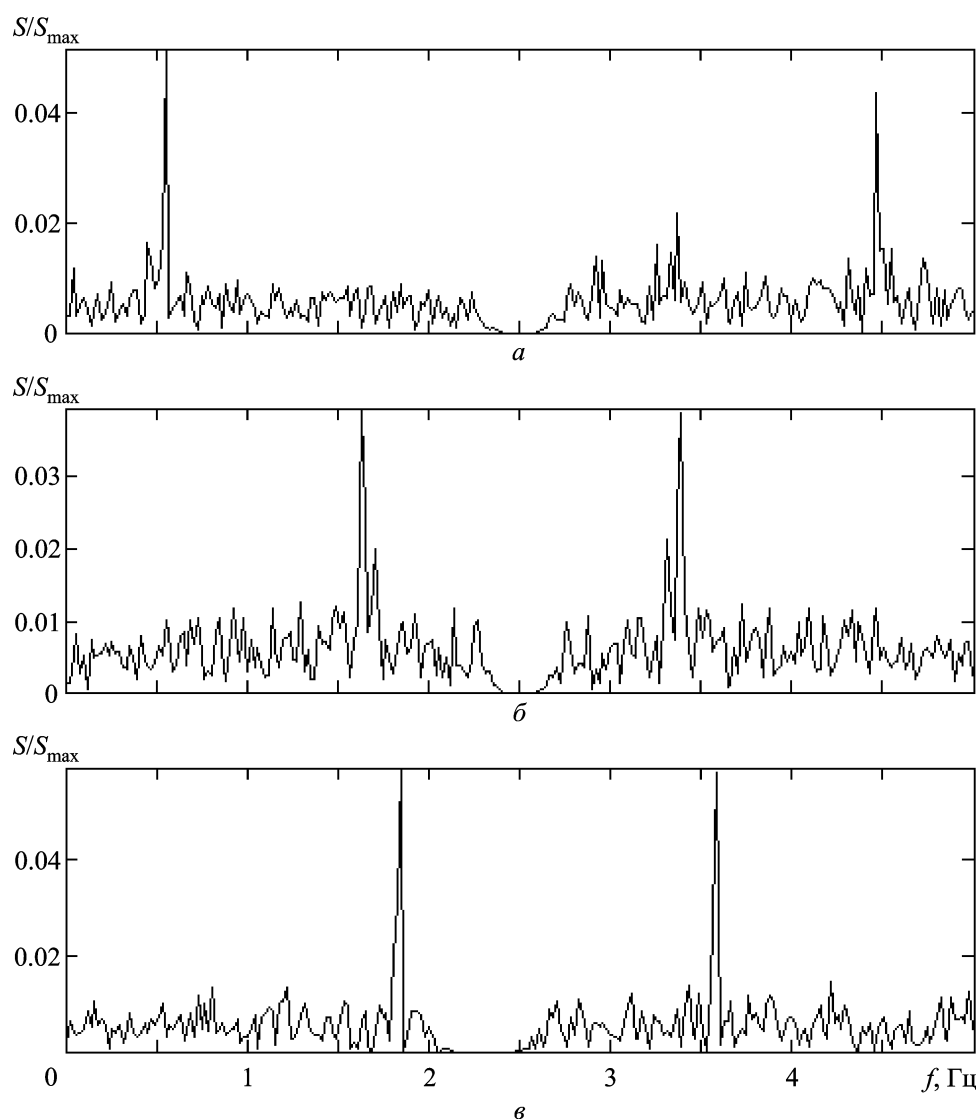


Рис. 3. Спектральная плотность мощности биений ВЧ сигнала вне полосы заграждения при  $\Delta f_0 = 2.5$  Гц: *a* –  $f_d = 0$  Гц,  $f = 2$  Гц, *б* –  $f_d = 0$  Гц,  $f = 6$  Гц, *в* –  $f_d = -0.2$  Гц,  $f = 6$  Гц

щие сместились в сторону увеличения частоты на величину  $-f_d$ .

При наличии суммы гармоник в фазе биений в линейном приближении в спектральной плотности мощности будет наблюдаться набор комбинационных частот.

В общем случае для оценки параметра  $T_{id}$  в одномодовом эксперименте обычно используется “классический” фазовый метод [1].

При обработке и анализе биений реального ВЧ сигнала, отраженного от ионосферы, следует учитывать описанные выше результаты модельного анализа биений.

#### 4. Результаты эксперимента

Перейдем к рассмотрению реальных биений сигнала, отраженного от ионосферы, при вертикальном ВЧ зондировании ионосферы. Биения сигнала регистрируются приемной системой ВЧ радара в диапазоне  $0 \div 10$  Гц. При этом  $\Delta t = 0.1$  с,  $\Delta f_0 = 2.5$  Гц.

В табл. 1 приведены комбинационные частоты и их частоты наложения  $f^*$  для различных частот колебаний в фазе биений при  $f_d = 0$ . Для частот  $f < 2.5$  Гц спектр симметричен относительно частоты смещения, для частот  $7.5 > f > 2.5$  Гц верхние частоты спектра появляются вследствие наложения частот, для частот  $12.5 > f > 7.5$  Гц положительные комбинационные частоты “обрезаются” десятигер-

Таблица 1. Зависимость комбинационных частот  $f_{\pm}$  и частот наложения  $f_{\pm}^*$  от частоты колебаний в фазе биений

$f$ , Гц	$f_{-}$ , Гц	$f_{-}^*$ , Гц	$f_{+}$ , Гц	$f_{+}^*$ , Гц
1	1.5	–	3.5	–
2	0.5	–	4.5	–
3	–0.5	–	5.5	4.5
4	–1.5	–	6.5	3.5
5	–2.5	–	7.5	2.5
6	–3.5	–	8.5	1.5
7	–4.5	–	9.5	0.5
8	–5.5	4.5	(10.5)	–
9	–6.5	3.5	(11.5)	–
10	–7.5	2.5	(12.5)	–
11	–8.5	1.5	(13.5)	–
12	–9.5	0.5	(14.5)	–

цовым фильтром (в табл. 1 они указаны в скобках) и спектр становится несимметричным.

Для примера приведем результаты эксперимента, проведенного 22 марта 2010 г. (10:30:02 местного времени) на доплеровском ВЧ радаре вблизи Харькова на частотах 3.2 и 4.2 МГц.

На рис. 4, *a* и *б* приведены биения, полученные на рабочей частоте 4.2 МГц и пропущенные через полосовой фильтр. Центральная полоса фильтра равняется  $f_c = 4$  и 1 Гц соответственно. Ширина полосы фильтра равна  $b = 0.2 f_c$ .

На рис. 5, *a* и *б* приведены те же биения, но в более крупном масштабе в окрестности максимума биений. Выделенные частоты соответствуют комбинационным частотам для возмущения в ионосферной плазме с частотой, равной 1.5 Гц. На рис. 6, *a* и *б* приведены биения, полученные на рабочей частоте 3.2 МГц. Максимумы биений на этих рисунках совпадают по времени. Можно предположить, что наблюдаются колебания электронной концентрации вблизи области отражения радиоволн с частотами 4.2 и 3.2 МГц.

#### 5. Обсуждение

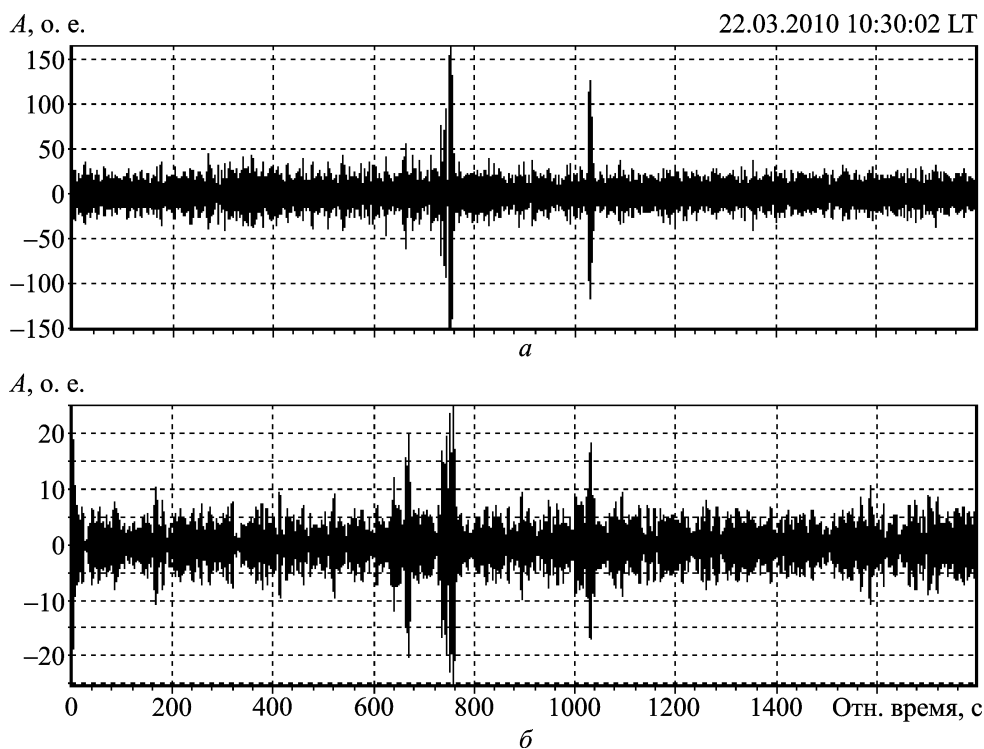
Биения с наблюдаемой частотой, равной 1.5 Гц, могут вызываться, например, распространением УНЧ волн в ионосферной плазме, для которых выполняется условие [4]

$$\omega_{LF} \ll \Omega_i,$$

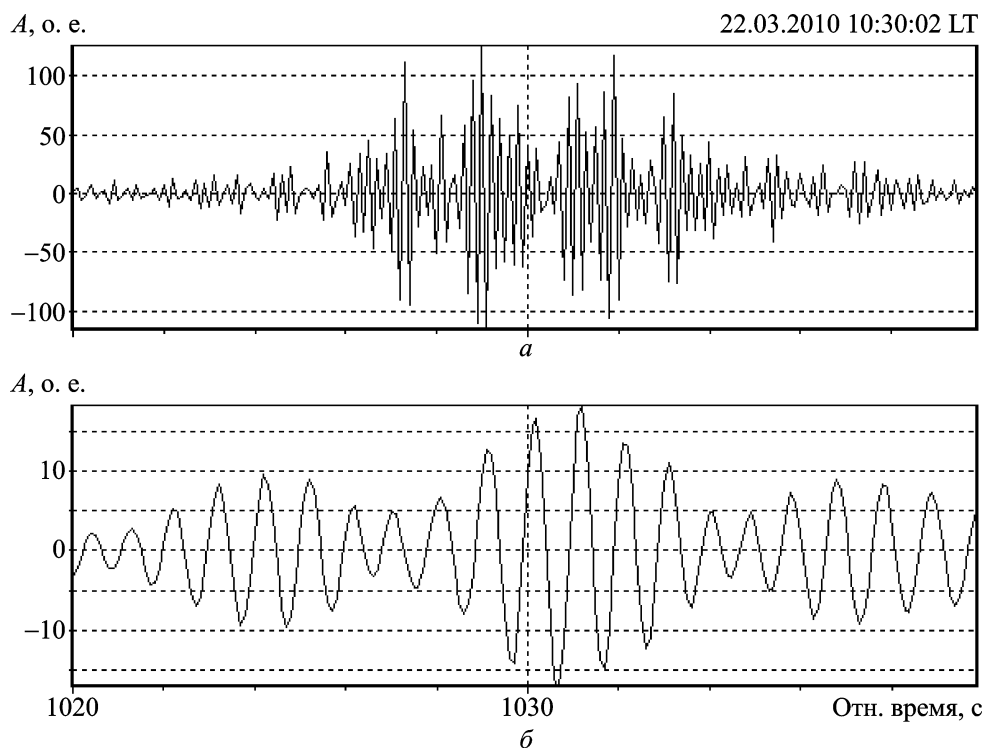
где  $\omega_{LF}$  – круговая частота УНЧ волны,  $\Omega_i$  – гирочастота ионов. Для ионосферы  $\Omega_i = 100 \div 300$  с<sup>-1</sup>. Соответствующая частота  $F_i = 16 \div 48$  Гц.

Частота колебаний в 1.5 Гц соответствует частоте пульсаций магнитного поля  $Pc1$ , регистрируемых на поверхности Земли [6]. Такие пульсации вызываются магнитогидродинамическими волнами, распространяющимися через ионосферу. Для объяснения пульсаций  $Pc1$  привлекается механизм гирорезонансной (циклотронной) неустойчивости [6, 11].

УНЧ волны в ионосфере могут иметь и акустическую природу. Волны с периодами  $1 \div 100$  с генерируются погодными фронтами, молниями, землетрясениями и т. д. Для их диагностики также применяется доплеровское радиозондирование с полосовой фильтрацией (см., например, [12, 13]).

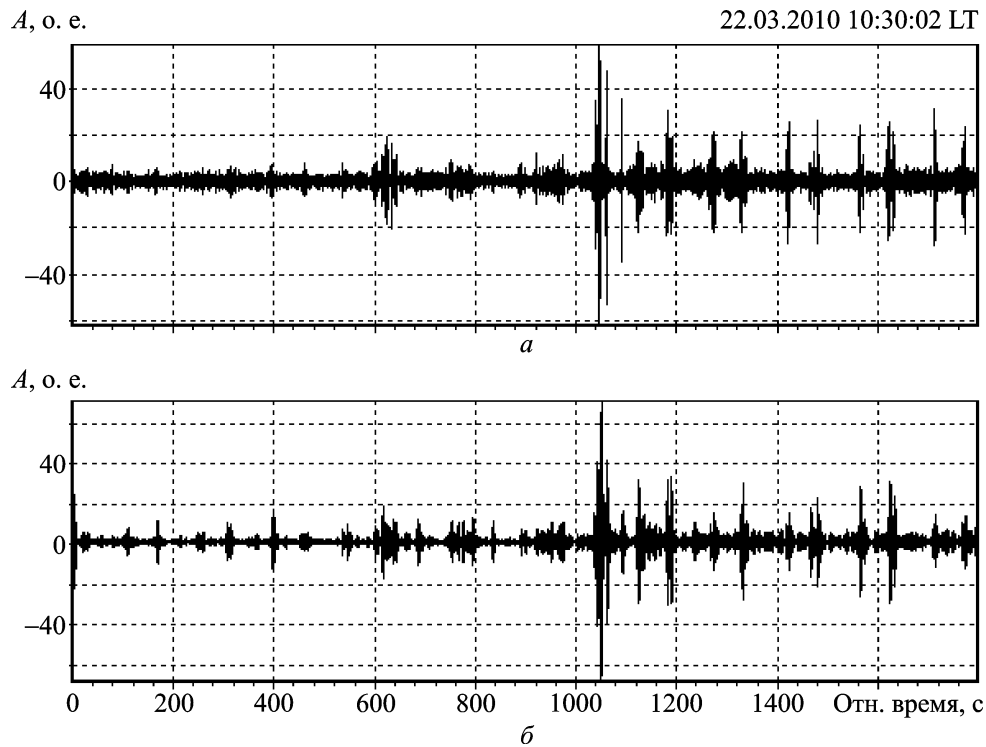


**Рис. 4.** Биения сигнала после полосовой фильтрации (частота сигнала – 4.2 МГц): *a* – центральная частота полосового фильтра составляет 4 Гц, ширина полосы – 0.8 Гц; *б* – центральная частота полосового фильтра составляет 1 Гц, ширина полосы – 0.2 Гц



**Рис. 5.** Биения сигнала после полосовой фильтрации (частота сигнала – 4.2 МГц): *a* – центральная частота полосового фильтра равна 4 Гц, ширина полосы – 0.8 Гц; *б* – центральная частота полосового фильтра равна 1 Гц, ширина полосы – 0.2 Гц





**Рис. 6.** Биения сигнала после полосовой фильтрации (частота сигнала – 3.2 МГц): *а* – центральная частота полосового фильтра равна 4 Гц, ширина полосы – 0.8 Гц; *б* – центральная частота полосового фильтра равна 1 Гц, ширина полосы – 0.2 Гц

## 6. Выводы

Моделирование биений опорного и ВЧ сигналов, а также сравнение модельных и экспериментальных спектров показало следующее.

1. Для медленных изменений фазы биений оценки спектра с ДСЧ  $f_d \sim 0.1$  Гц устойчивы при среднеквадратическом отклонении случайной составляющей фазы  $\sigma \leq 1.5$ .

2. Уменьшая интервал оценки доплеровских спектров до 20 с, при медленных изменениях фазы биений можно оценить период колебаний акустических волн от значения  $10^2$  с и более.

3. Для быстрых изменений фазы биений можно оценить частоту УНЧ волн в ионосферной плазме в диапазоне частот  $0 \div 12.5$  Гц (периоды 0.1 с и более).

Авторы благодарны А. П. Николаенко за доброжелательную критику рукописи статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 198 с.
2. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 255 с.
3. Davies K. Ionospheric radio. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. – 590 p.
4. Schunk R. W. and Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Atmospheric and Space Science Series. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 554 p.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 683 с.
6. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. – М.: Мир, 1980. – 390 с.
7. Alperovich L. S. and Fedorov E. N. Hydromagnetic Waves in Magnetosphere and Ionosphere, Series: Astrophysics and Space Science Library, Vol. 353. – Springer Netherlands, 2007. – 418 p.
8. Горелик Г. С. Колебания и волны. – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.
9. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 1, № 42. – С. 3–25.
10. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
11. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
12. Artru J., Farges T., and Longnonné Ph. Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding ob-

- servations and normal-mode modeling // *Geophys. J. Int.* – 2004. – Vol. 158. – P. 1067–1077.
13. *Liu J. Y., Tsai Y. B., Chen S. W., Lee C. P., Chen Y. C., Yen H. Y., and Chang W. Y.* Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004 // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – Vol. 33, Is. 2. – id. L02103.

*В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор*

Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна,  
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ БИТТІВ  
ОПОРНОГО СИГНАЛУ ТА ВІДБИТОГО  
ВІД ІОНОСФЕРИ ВЧ СИГНАЛА

Актуальність роботи обумовлена необхідністю дослідження фізичних ефектів, що супроводжують процеси в магнітосфері та іоносфері. Для спостережень використовувався доплерівський ВЧ радар вертикального зондування. Для обробки даних застосовувався спектральний аналіз біттів в режимі доплерівської фільтрації для виявлення акустичних хвиль. Спектральний аналіз використовувався також для виділення коливань у діапазоні частот  $1 \div 12$  Гц (елек-

тромагнітні УНЧ хвилі). Методика обробки перевірялась шляхом числового експерименту. Експериментально встановлено, що в денний час спостерігаються УНЧ хвилі з частотою 1.5 Гц.

*V. F. Pushin and L. F. Chernogor*

V. Kazarin National University of Kharkiv  
4, Svoboda Sq, Kharkiv, 61022, Ukraine

SPECTRAL ANALYSIS OF REFERENCE SIGNAL  
AND OF HF SIGNAL REFLECTED  
FROM THE IONOSPHERE BEATS

Topicality of this work is due to the necessity of studying the physical effects associated with the processes in the magnetosphere and the ionosphere. The HF Doppler radar of vertical sounding is used for observations. The spectral analysis of the beat mode for detecting the Doppler filtering of acoustic waves is used for data processing. Spectral analysis is also used to select oscillations in the frequency range of 1–12 Hz (ULF electromagnetic waves). Processing technique was verified by the numerical experiment. ULF waves are experimentally established to be observed in the daytime with a frequency of 1.5 Hz.

*Стаття постуила в редакцію 14.01.2014*