

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ

Представлены результаты обнаружения в эффектах дисперсионных искажений сложных декаметровых сигналов составляющих, связанных с перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). На основе анализа обнаруженных эффектов создан новый радиофизический метод определения их основных характеристик. Приведены данные о ПИВ, полученные этим методом и использованные для зондирования ионосферы сверхширокополосных сигналов (СШПС) с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Введение

Ионосфера Земли, являющаяся примером плазменного состояния вещества в ближнем космосе, оказывает существенное влияние на жизнедеятельность человека. Поэтому состояние ионосферы и протекающие в ней процессы вызывают постоянный интерес. Особое внимание в этой связи представляют акустико-гравитационные волны (Гершман, 1974), активно участвующие в переносе энергии в атмосфере Земли на большие расстояния и проявляющиеся в ионизированной компоненте атмосферного газа в виде ПИВ.

В последнее время возник интерес к вопросам распространения в ионосфере подверженных дисперсионным искажениям декаметровых сложных радиосигналов (Арманд, Иванов, 2005; Иванов и др., 2001; 2003). Это стимулировало разработку новых радиофизических методов измерения характеристик как самой ионосферной плазмы, так и протекающих в ней процессов (Иванов, Иванов, 2004).

Цель работы — создание методики определения характеристик ПИВ на основе экспериментальных данных о дисперсионных искажениях ЛЧМ сигналов и проведение исследований перемещающихся ионосферных возмущений.

1. Распространение в дисперсионной ионосфере широкополосных ЛЧМ сигналов

ЛЧМ сигнал $a_T(t)$ и его спектр $S_T(f)$ можно представить в комплексной форме в виде (Кук, Бернфельд, 1971):

$$a_T(t) = \exp(i(2\pi f_1 t + \pi f_1^2 t^2)),$$

$$S_T(f) \approx \frac{1}{\sqrt{f}} \exp\left(i\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi(f - f_1)^2}{f}\right)\right), \quad (1)$$

где \dot{f} — скорость изменения частоты.

На выходе из ионосферы сигнал имеет вид:

$$a_R(t) \approx \sum_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{(1 + \dot{f} s_j(f_p))}} H_{oj}(f_p) \cdot \exp(i\Phi(f_p)) \approx$$

$$\approx \sum_{j=1}^m H_{oj}(f_p) \cdot \exp\left[i\left(\pi \dot{f} t^2 - \pi \dot{f} \tau_j^2(f_p) + 2\pi \dot{f} t - \varphi_j(f_p)\right)\right]. \quad (2)$$

где $H_{oj}(f) \exp(-i\varphi(f))$ — частотная характеристика j -ого тракта распространения; t_j — время группового запаздывания сигнала; s_j — наклон ионограммы; m — число модов (трактов) распространения.

В приемнике принимаемый широкополосный сигнал $a_R(t)$ умножается на сигнал гетеродина, сопряженный излучаемому сигналу $a_T^*(t)$, выделяется узкополосный сигнал разностной частоты $A(t)$ и для каждого последовательного элемента определяется модуль его спектра:

$$|S(F)| = \sum_{j=1}^m |S_j(F)| = \frac{1}{\dot{f}} \sum_{j=1}^m \left| h_j\left(\frac{F}{\dot{f}}\right) \right| = \frac{1}{\dot{f}} \sum_{j=1}^m |h_j(\tau)|, \quad (3)$$

где

$$h_j(\tau) = \int_{f_p}^{f_p + \Delta f} H_{oj}(f) \exp(-i\varphi_j(f)) \exp(2\pi i f \tau) df, \quad (4)$$

— импульсная характеристика (ИХ) тракта с полосой пропускания Δf , $\tau = F/\dot{f}$ — время группового запаздывания.

Для каналов с $\Delta f \ll f_p$ функцию $\varphi_j(f)$ в интеграле (4) можно разложить в ряд Тейлора:

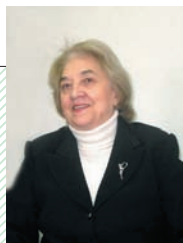
$$\varphi_j(f) = \varphi_j(f_0) + 2\pi \cdot \tau_j(f_p) \cdot (f - f_p) + \pi s_j(f_p) \cdot (f - f_p)^2 \quad (5)$$

Нелинейное слагаемое в (5) описывает фазовую дисперсию, пренебрегая им, получим неискаженную дисперсию ИХ радиоканала:

Окончание статьи Р.П. Готтих, Б.И. Писоцкий «К вопросу...»

Неручев С.Г. Глобальные геохимические аномалии на рубежах активных изменений органического мира. *Геология и геофизика*. № 6. 1986. 25-32.

Римма Павловна Готтих
Доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института геологических, геофизических и геохимических информационных систем (ВНИИГеоСИСТЕМ).



Тэйлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора ее состав и эволюция*. М. Мир. 1988.

Evensen N.H., Hamilton P.J., O'Nions R.K. *Geochim. Cosmochim. Acta*. v. 42. 1978. 1199-1212.

McArthur J.M., and Howarth R.J. *Strontium isotope stratigraphy*. (Eds. F. Gradstein, J. Ogg, A.G. Smith) *A geologic time scale*. Cambridge Univ. Press. 2004. 96-105.

Богдан Иванович Писоцкий
Доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник Института проблем нефти и газа РАН (ИПНГ).



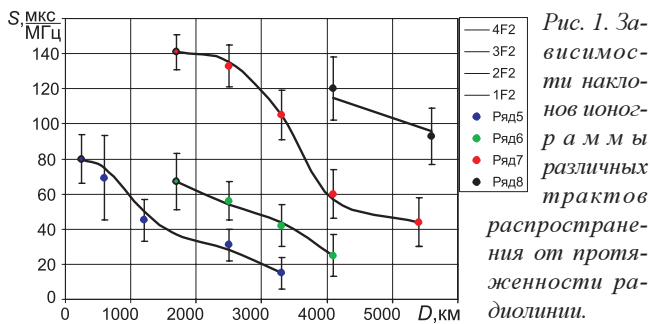


Рис. 1. Зависимости наклона ионограммы от длины радиотракта различных трактов распространения от протяженности радиотракта.

$$|h_j(\tau)| = |S_T(f_p)| \cdot \left| H_{oj} \Delta f \cdot \frac{\sin \pi \Delta f (\tau - \tau_j(f_p))}{\pi \Delta f (\tau - \tau_j(f_p))} \right| \quad (6)$$

Учитывая нелинейное слагаемое в (5), получим искаженную ИХ:

$$|h_j(\tau)| = \frac{|S_T(f_p)| H_{oj}}{\sqrt{2s_j}} \left[\{C(z_2) - C(z_1)\}^2 + \{S(z_2) - S(z_1)\}^2 \right]^{0.5}, \quad (7)$$

где $C(z)$, $S(z)$ – интегралы Френеля,

$$z_1 = \sqrt{\frac{2}{s_j}} (\tau - \tau_j(f_p)) - \sqrt{2s_j} \Delta f \quad \text{и} \quad z_2 = \sqrt{\frac{2}{s_j}} (\tau - \tau_j(f_p)).$$

Видно, что дисперсионные искажения увеличиваются с ростом наклона s_j ионограммы и полосы сигнала Δf . В этой связи нами с 2000 по 2006 гг. были проведены исследования их на радиотрактах различной протяженности.

На рисунке 1 представлены полученные зависимости наклонов ионограммы от длины радиотракта D и тракта распространения. Видно, что с ростом D наклоны уменьшаются. Они растут с увеличением номера тракта.

Аддитивный характер сигнала разностной частоты относительно модов распространения позволяет путем умножения его на корректирующий множитель, относящийся к выделенному моду, корректировать частотную характеристику выделенного тракта распространения. Можно показать, что коррекция будет полной, только если сигнал разностной частоты является комплексным $A_q(t) = A_{qc}(t) + iA_{qs}(t)$. Поскольку на практике он является действительным $A_{qc}(t)$, то необходимо синтезировать вторую квадратурную компоненту в виде

$$A_{qs}(t) = H_{oq}(t) \cdot \sin [\varphi_{qл}(t) + \varphi_{qн}(t)].$$

Корректирующий множитель в этом случае можно представить в виде $G_q(t) = G_{oq}(t) \cdot \exp[i\varphi_{qн}(t)]$. Умножая далее комплексный сигнал разностной частоты $A(t)$ на функцию $G(t)$, получим сигнал $B(t)$, независимый от нелинейной составляющей фазы, т.е скорректированный сигнал:

$$B(t) = A(t)G(t) = (A_{qc}G_{qc} - A_{qs}G_{qs}) + i(A_{qs}G_{qc} - A_{qc}G_{qs}) = H_{oq}(t) \cdot \exp[-i\varphi_{qл}(t)]. \quad (8)$$

Корректирующий амплитудный множитель $G_{oq}(f)$ может быть выбран в виде одной из формул (Регу, 1982):

$$G_{oq}(f) = \frac{1}{H_{oq}(f)}, \quad G_{oq}(f) = \frac{H_{oq}(f)}{N(f)},$$

$$G_{oq}(f) = \frac{H_{oq}(f)}{H_{oq}^2(f) + T \cdot N(f) / |S_T(f)|^2}, \quad (9)$$

где $N(f)$ – спектральная плотность мощности шума и помех,

T – длительность излучаемого широкополосного сигнала.

Первая формула представляет алгоритм обратной фильтрации, вторая – согласованной, а третья – винеровской.

В натурных экспериментах эффективность коррекции оценивалась коэффициентом $\eta = 20 \lg(|\hat{h}_1|/|\hat{h}_2|)$ (где $|\hat{h}_1|$ – максимальное значение $|h(t)|$ после коррекции, $|\hat{h}_2|$ – до коррекции), названным выигрышем от коррекции. Ее результаты для трасс с приемниками в Йошкар-Оле (1), а передатчиками в Йошкар-

Трасса	1-1	2-1	3-1	4-1
Выигрыш	9.81	8.6	3.43	2.55

Табл. Зависимость выигрыша при коррекции от протяженности трассы.

Оле (1), Нижнем Новгороде (2), Инскипе (3), Иркутске (5) и радиоканала

лов с полосой 1 МГц приведены в таблице. Полученные данные указывают на рост дисперсности ионосферных каналов с уменьшением длины радиотракта.

2. Методика и результаты определения характеристик ПИВ

Канал, для которого скорректированы дисперсионные искажения, имеет ИХ в виде (6). Вариации характеристик ионосферы будут приводить к тому, что ионограмма тракта распространения становится «медленной» функцией времени. Если при этом корректирующий множитель не меняется, то форма ИХ стремится к виду (7) при уменьшении ее амплитуды. Оценим изменения амплитуды ИХ, предполагая, что в результате трансформации разность между истинной нелинейной составляющей ионограммы и ее корректирующим слагаемым в виде многочлена $P_n(f)$ на полосе канала можно представить в виде разложения в ряд Тейлора:

$$\Delta \tau(f, t) - P_n(f) = \gamma(t) \cdot (f - f_p) + \dots \quad (10)$$

Нетрудно показать, что в этом случае искаженная ИХ имеет вид, аналогичный (7):

$$|h_j(\tau, t)|_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{|H_{oj}|}{\sqrt{\gamma(t)}} \left[\{C(X_2) + C(X_1)\}^2 + \{S(X_2) + S(X_1)\}^2 \right]^{0.5}, \quad (11)$$

где
$$X_{1,2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi \sqrt{\gamma(t)}} [\pi \Delta f \gamma(t) \mp (\tau - \tau_j(f_p))].$$

Найдем максимальные значения для ИХ, искаженной (13) ПИВ и не искаженной (6) им. В результате несложных выкладок для отношения максимальных значений ИХ получим:

$$\frac{|h_j(\tau_j)|_2}{|h_j(\tau_j)|_1} = 10^{\frac{g(t)}{20}} = \sqrt{\frac{C^2(x) + S^2(x)}{x^2}},$$

откуда

$$g(t) = 10 \lg \frac{C^2(x) + S^2(x)}{x^2}, \quad (12)$$

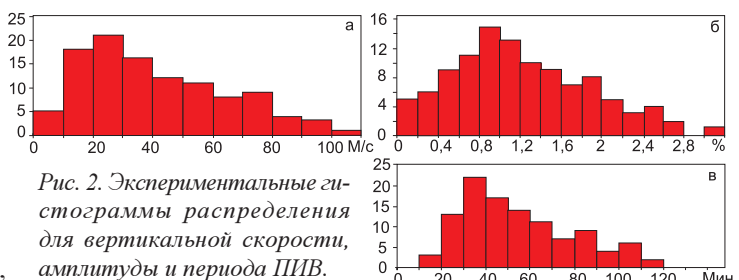


Рис. 2. Экспериментальные гистограммы распределения для вертикальной скорости, амплитуды и периода ПИВ.

где $x = \sqrt{2\gamma(t)\Delta f}$, $g(t)$ – коэффициент потерь.

В случае, когда причиной искажений является ПИВ, функцию $\gamma(t)$ можно представить в виде:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \cos[\Omega(t - k \frac{f_p}{V})], \quad (13)$$

где $k = hf_p$ – коэффициент, связывающий высоту отражения с рабочей частотой зондирующей волны, $\Omega = 2\pi/T$ – частота ПИВ, T – период, V – вертикальная фазовая скорость возмущения.

Коэффициент потерь тогда испытывает периодические изменения вслед за изменениями $\gamma(t)$. Измеряя их период и разность фаз $\Delta\phi$ между изменениями на двух рабочих частотах, можно оценить вертикальную скорость перемещающегося возмущения и его масштаб:

$$V = \frac{\Omega \cdot k(f_{p2} - f_{p1})}{\Delta\phi} \quad \text{и} \quad L = \frac{2\pi V}{\Omega} = VT. \quad (14)$$

Амплитуду ПИВ, равную $\delta N = \Delta N/N$, можно оценить по вариациям МПЧ радиолинии $\delta f_m = \Delta f_m/f_m$ в соответствии с формулой:

$$\delta N \approx 2\delta f_m. \quad (15)$$

На рисунке 2 представлены основные характеристики ПИВ, полученные с использованием данной методики в непрерывном месячном эксперименте, по ЛЧМ зондированию радиолиний Кипр – Йошкар-Ола и Иркутск – Йошкар-Ола, проведенном в сентябре 2005 г. Возмущения регистрировались в основном в переходное время суток, что подтверждает наблюдавшийся авторами (Иванов и др., 2006) «восходно-заходный эффект» и свидетельствуют о том, что основным источником их генерации является терминатор. Полученные данные не противоречат существующим представлениям о среднемасштабных ПИВ (Гершман, 1974; Аффраймович, 1982). Они существенно дополняют сведения о малоизученных вертикальных характеристиках перемещающихся возмущений.

Заключение

Предложен новый метод экспериментального исследования среднемасштабных ПИВ, основанный на эффекте дисперсионных искажений сложных широкополосных сигналов. Экспериментально получены малоизученные вертикальные характеристики перемещающихся возмущений.

Литература

- Аффраймович Э.Л. *Интерференционные методы радиозондирования ионосферы*. М. Наука. 1982.
- Арманд Н.А., Иванов В.А. Коррекция дисперсионных искажений широкополосных сигналов. *XXI Всероссийская конференция по распространению радиоволн*. Йошкар-Ола. т. 1. 2005. 10-18.
- Гершман Б.Н. *Динамика ионосферной плазмы*. М. Наука. 1974.
- Иванов В.А., Иванов Д.В., Колчев А.А. Исследования особенностей дисперсионных характеристик радиоканалов с помощью ЛЧМ – ионозонда. *Изв. вузов. Радиофизика*. т. XLIV. № 3. 2001. 241-253.
- Иванов В.А., Льюнг Л.В., Насыров А.М., Рябова Н.В. Моделирование ионограмм для исследования перемещающихся ионосферных возмущений и их влияние на суточные ходы максимально наблюдаемых частот. *Георесурсы*. Казань. № 2(19). 2006. 2-5.
- Иванов Д.В., Иванов В.А. Исследования эффектов нерегулярной дисперсии в широкополосных ионосферных радиоканалах. *Радиотехника и электроника*. т. 49. № 3. 2004. 273-282.
- Иванов Д.В., Иванов В.А., Колчев А.А. Коррекция широкополосных коротковолновых ионосферных радиоканалов. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 6. 688-697.
- Кук Ч., Бернфельд М. *Радиолокационные сигналы*. М. Соврадио. 1971.
- Perry B.D. Megahertz bandwidth HF skywave communications techniques. *IEE Conf. Publ.* 206. 1982. 91-95.

Международная конференция
Казань, КГУ, 12 - 16 ноября 2007 г.

**ИЗМЕНЯЮЩАЯСЯ
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ
СРЕДА:
ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННЫЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭНДОГЕННЫХ
И ЭКЗОГЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ**

Тематика конференции:
Геологический отклик осадочного чехла, геофизические временные реперы в геологической истории Земли, возраст геофизических аномалий; напряженное состояние, его проявление в структуре и физических свойствах геологической среды; неотектоника, современная геодинамика и нефтегазоносность; техногенез крупных промышленных объектов и городских агломераций, минерально-сырьевых объектов; пространственно-временные изменения и эволюция геологических, геофизических, геохимических и флюидодинамических процессов; структурные и динамические предвестники опасных геологических эндогенных и экзогенных процессов и др.

Планируется проведение школы-семинара «Современные технологии прогнозирования и поисков залежей нефти и газа».

Пред. оргкомитета: проф. Нурғалиев Д.К.,
e-mail: danis.nourgaliev@ksu.ru, тел. (843)2315375

Казань: Изд-во «Фэн», 2006. - 328 с.

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Тектоническое и нефтегеологическое районирование территории Татарстана

Р.С. Хисамов, Е.Д. Войтович, В.Б. Либерман, Н.С. Гатиятуллин, С.Е. Войтович

В монографии освещаются тектоника, основные этапы геологического развития и особенности пространственного размещения залежей нефти на территории Татарстана. Значительное внимание уделено классификации структур, контролирующей нефтяные месторождения. Изложены принципы тектонического и нефтегеологического районирования, основанные на структурных признаках, охарактеризованы типы месторождений и залежей нефти. В соответствии с представлениями о тектонике осадочного чехла разработана схема качественного нефтегеологического районирования территории Татарстана. В результате углубленного тектонического и нефтегеологического районирования авторами намечены основные направления поисков нефти в Татарстане. Работа представляет интерес для геологов - нефтяников производственных и научно-исследовательских организаций, а также студентов нефтяных ВУЗов.

ISBN 5-9690-0053-1