

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СРЕДНЕШИРОТНЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ GPS В ГФО «МИХНЕВО»

И.Х. Ковалева, А.Н. Ляхов, И.А. Ряховский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

В работе анализируются разбросы (ошибки) в оценке на основе экспериментальных данных по трём частотам показателей степени флуктуационного спектра. Расхождения в оценках по парам частот объясняются различными путями прохождения ионосферы сигналами на разных частотах. Временные зависимости этих разбросов отражают пространственно-временные неоднородности флуктуаций, не описываемые степенными спектрами турбулентности. Проведённый фрактальный анализ данных ошибок позволяет выявить характерные масштабы и ориентацию тех структур, которые формируют ионосферный спектр флуктуаций, генерирующих ошибки GPS связи.

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС [Tsui, 2000]. используются не только для решения навигационных задач, но и как достаточно мощный инструмент исследования свойств ионосферы Земли [Демьянов и др., 2014]. Наиболее широко распространено использование данных по полному электронному содержанию в ионосфере (интеграл электронной концентрации по направлению на спутник), позволяющее вести мониторинг крупномасштабных процессов в ионосфере и верификацию теоретических и экспериментальных моделей. В последние годы возникло новое направление анализа данных ГНСС, ориентированное на изучение мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере [Демьянов и др., 2014]. Принципиальная схема такого подхода заключается в применении математического аппарата статистической радиофизики [Wheelon, 2003], в рамках которого, реальная ионосфера заменяется бесконечно тонким слоем («фазовым экраном»), что позволяет получить аналитические выражения, связывающие параметры неоднородностей электронной концентрации с измеряемыми параметрами сигнала. Принимается, что в этом слое ионосфера содержит неоднородности электронной концентрации (и соответственно диэлектрической проницаемости) вызывающие возмущения амплитуды и фазы радиосигнала ГНСС.

Для практических приложений такие возмущения, называемые амплитудными и фазовыми сцинтилляциями, соответственно, могут, при превышении некоторого критического порога, прервать прием информации со спутника, при формально удовлетворительном отношении сигнал/шум. Такие геофизические ситуации мо-

гут привести к невозможности использования ГНСС даже при наличии в зоне видимости требуемого числа спутников (более 4-х).

С другой стороны, анализ сцинтилляций позволяет исследовать как морфологические характеристики мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, так и верифицировать теоретические модели турбулентных процессов в ионосфере. Общепринятый на сегодня подход содержит следующие шаги. Принимается гипотеза о степенном характере пространственного спектра неоднородностей электронной концентрации; экспериментальные данные по амплитудным или фазовым сцинтилляциям сравниваются с аналитическими выражениями, полученными в рамках статистической радиофизики; производится подбор параметров спектра неоднородностей. В некоторых случаях выполняется прямое численное моделирование временной эволюции сцинтилляций, возникающих в ионосфере с неоднородностями заданного спектра.

Традиционно спутники ГНСС GPS работали на двух частотах ($L1 = 1575.41$ и $L2 = 1227.60$ МГц). Из данных наблюдений на двух частотах можно определить показатель спектра ионосферной турбулентности [Wheelon, 2003]. Новое поколение спутников GPS излучает сигнал на частоте $L5 = 1176.45$ МГц. Появление третьей частоты (прием на частотах $L3 = 1381.05$ и $L4 = 1379.913$ МГц гражданской аппаратурой невозможен) позволил сформулировать новую задачу – восстановить параметры спектра ионосферных неоднородностей, используя разные пары частот $L1-L2$, $L1-L5$ и $L2-L5$. Если существующие представления об ионосферной турбулентности и распространении радиосигналов GPS верны, то мы должны получить совпадающие значения.

Источником экспериментальных данных являются записи сигналов GPS, полученные в среднеширотной геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН приемником Javad Sigma в январе 2016 года. Анализ экспериментальных результатов выполнен по классической схеме частотных корреляций [Wheelon, 2003]. Результат использования трех частот, вместо двух, привел, как показано ниже, к расхождениям в показателях спектра ионосферных неоднородностей, полученных по каждой паре частот. Поскольку пути распространения сигналов на частотах $L1$, $L2$, $L5$ различаются из-за частотной зависимости показателя преломления ионосферы, обнаруженные различия можно использовать для описания изменения флуктуаций электронной концентрации в пространстве. В данной статье предпринята первая попытка рассмотреть временные ряды спектров неоднородностей как фрактальные множества, получая на выходе диапазоны пространственных масштабов, для которых справедливо рассмотрение сигнала как множества самоподобных волновых флуктуаций. Поскольку для спутниковых данных понятие пространства и времени жестко связано и определяется параметрами орбитального движения, изменение этих масштабов при наблюдении созвездия GPS под различными азимутами и углами возвышения позволяет оценить ориентацию неоднородных структур в ионосфере и их размеры.

Метод анализа и предварительные результаты

Предполагается, что ионосферные неоднородности (флуктуации электронной концентрации) представляют собой набор ориентированных, относительно геомагнитного поля, волновых пакетов (длина волны порядка метра), связанных со сгустками или разрежениями плотности плазмы (размерами от километра до 10 км)

[Kovaleva, 2012; Ковалева, 2013]. Используемая в ГФО «Михнево» частота получения данных GPS в 1 Гц, и выбранный нами размер временного окна для метода частотной корреляции (5 минут) позволяют анализировать неоднородности с размером более 500 метров.

Использовалась классическая модель степенного спектра флуктуаций электронной концентрации [Wheelon, 2003]:

$$\Phi(\kappa) \sim \frac{\langle \delta N_e^2 \rangle \kappa_0^{\nu-3}}{\kappa^\nu [1 + (A^2 - 1) \cos^2 \Theta]^{\nu/2}}$$

где A – степень вытянутости неоднородностей вдоль геомагнитного поля, Θ – угол между направлением распространения электромагнитной волны и геомагнитным полем (нормировочные константы опущены), $\langle \delta N_e^2 \rangle$ – среднеквадратичная вариация электронной концентрации, κ , κ_0 – волновой вектор, волновое число для Фурье-представления неоднородной электронной концентрации. Нормированный коэффициент корреляции амплитуд двух сигналов на разных частотах дается выражением [Wheelon, 2003]:

$$R(k_1, k_2) = \frac{1}{r^{(\nu-2)/4}} \left[\left(\frac{r+1}{2} \right)^{\nu/2-1} - \left(\frac{r-1}{2} \right)^{\nu/2-1} \right]$$

где $r = k_2/k_1$, k_1, k_2 – волновые числа, ν – спектральный индекс.

При этом данные отражают флуктуации, связанные со сгустками и разрежениями километрового размера. Пример временной зависимости полученных по трём частотам показателей степени спектра приведён на рис. 1. Показатели степени по каждой паре частот постоянно флуктуируют и эти флуктуации для каждой пары частот различны, так как являются результатом анализа сигнала прошедшего по различным траекториям.

Для дальнейшего анализа перейдем от временных рядов к зависимостям от пути, пройденного лучом через тонкий фазовый экран на высоте 300 км. Такой подход позволяет исключить угол, под которым виден спутник. Выдвинем гипотезу, что расхождения в оценках ν по разным парам частот явились результатом того, что сигнал на одной частоте проходит через ионосферную неоднородную структуру, в то время как сигнал на другой частоте проходит в промежутке между структурами. Этот процесс повторяется в процессе движения спутника – происходит «переключение» между сигналами разных частот в части их прохождения через неоднородную ионосферу.

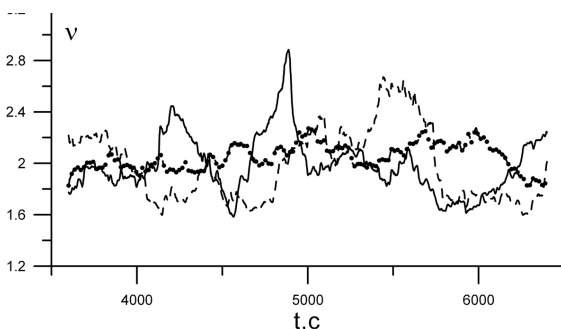


Рис. 1. Временная зависимость показателя степенного спектра при оценке по сигналу на двух из трёх частот

Далее оценим параметры ионосферы по методу [Higuchi, 1988; Higuchi, 1990], впервые использованному для оценки параметров электромагнитной турбулентности магнитосферной плазмы. Электромагнитный сигнал рассматривается как фрактальное множество. Имея конечный набор данных $X(1), X(2), X(3)...X(N)$ конструируем наборы данных:

$$X(m), X(m+k), X(m+2k)...X\left(m+\left[\frac{N-m}{k}\right] \cdot k\right)$$

где $m = 1, 2, ...k$; m – начальное время, k – интервал времени.

Так называемая фрактальная длина кривой каждого множества рассчитывается по формуле:

$$L_m(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)|}{k} \cdot \frac{N-1}{\left(\left[\frac{N-m}{k}\right] k\right)}$$

Для временного интервала k

$$\langle L(k) \rangle = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k L_m(k)$$

Типичная зависимость $\langle L(k) \rangle \sim k^{-D}$, где D – фрактальная размерность.

Применение вышеописанного метода к показателям спектра ионосферных неоднородностей приводит к зависимости, представленной на рис. 2. Согласно современным теоретическим моделям, изменение наклона кривой в логарифмическом масштабе говорит о мультифрактальном характере сигнала. Точка перегиба кривой даёт оценку граничного размера самоподобных структур [Higuchi, 1990]. Положение этой точки пересчитывается в максимальный линейный размер неоднородности в ионосфере.

Анализируя максимальные пространственные размеры структур, полученные при разных азимутах и углах возвышения, можно определить видимый размер ионосферной неоднородности в зависимости от угла возвышения α (рис. 3). Представленная на рис. 3 зависимость подтверждает уже высказывавшееся в ряде работ утверждение [Афраймович и др., 2010а,б; Afraimovich et al., 2011a,b], что волновые структуры ориентированы (вытянуты) вдоль геомагнитного поля. В нашем случае при прохождении луча примерно вдоль поля (угол с вертикалью 60 градусов) наблюдаются наименьшие размеры структур. Можно также предположить, что в используемых условиях наблюдений ионосферные неоднородности ориентированы под небольшим углом (порядка 7 градусов) к геомагнитному полю. На рис. 4 приведены распределения по видимым размерам ионосферных неоднородностей при разделении условий наблюдений на две группы: а) – угол возвышения менее 40 градусов, б) – угол возвышения более 40 градусов.

Данное распределение получено для утренних часов по UT, что соответствует местным дневным условиям в ГФО «Михнево». Хорошо видно, что для $\alpha > 40^\circ$ видимые размеры структур гораздо меньше. Это позволяет выдвинуть гипотезу о форме структур – вытянутые почти вдоль геомагнитного поля слои (листы). В этом случае при пересечении тонких граней видимый размер структур будет малым, а при прохождении протяжённого бокового размера скользящим лучом размер будет значительно больше.

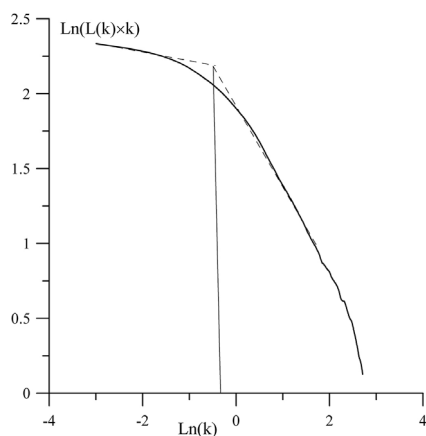


Рис. 2. Зависимость фрактальной длины от k в мультифрактальном процессе

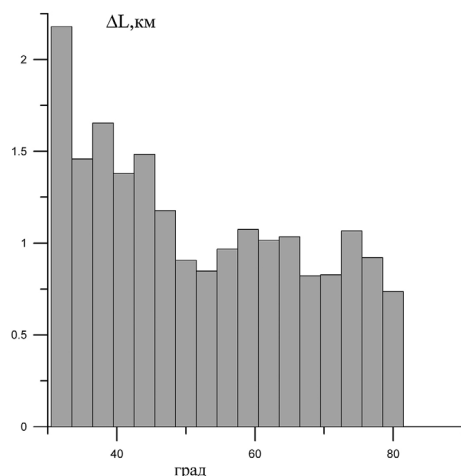


Рис. 3. Зависимость видимого пространственного размера ионосферной неоднородности от угла возвышения

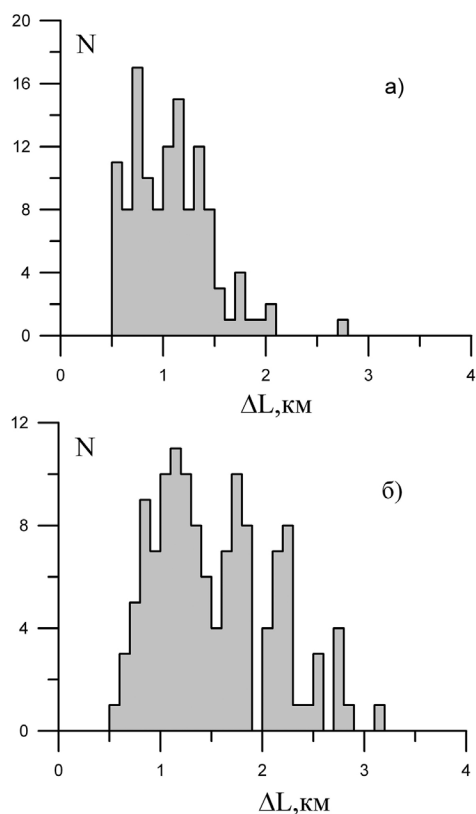


Рис. 4. Распределения по размерам ионосферных неоднородностей: а – $>40^\circ$; б – $<40^\circ$

Выводы

Предложенная в работе методика анализа данных регистрации сигналов трех-частотных ГНСС GPS методом частотной корреляции позволяет выявить асимметрию ионосферных неоднородностей, особенности их ориентации в пространстве в зависимости от сезона, времени суток, геофизической обстановки и оценить максимальные размеры множества самоподобных структур электронной концентрации, формирующих в ионосфере турбулентный слой, ответственный за амплитудные сцинтилляции радиосигнала ГНСС. В дальнейшем необходимо проанализировать зависимость параметров ионосферных неоднородностей от геофизических условий наблюдений. Также целесообразно выполнить аналогичный анализ данных на трех частотах с использованием методов фазовой и амплитудно-фазовой корреля-

ции. Дополнительная информация может быть получена с использованием данных второго приемника GPS Javad Prego, расположенного в ГФО «Михнево» на расстоянии 200 метров от Javad Sigma.

Исследования проводились в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0014).

Литература

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Косогоров Е.А., Ясюкевич Ю.В. Проявление магнито-ориентированных ионосферных плазменных возмущений на средних широтах // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: V Междунар. конф., с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г.: сб. докладов. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 252–255.

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Ишин А.Б., Косогоров Е.А., Ясюкевич Ю.В. Среднеширотные магнитоориентированные ионосферные плазменные образования и их влияние на работу систем дифференциальной навигации GPS и радиоинтерферометров с большой базой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. тр. М. : ООО «До Мира», 2010. Т. 7, № 1. С. 159–172.

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем // Солнечно-земная физика. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. – 349 с.

Ковалева И.Х. Диссипативные ионно-циклотронные солитоны с чирпом в плазме нижней ионосферы Земли, содержащей несколько видов ионов // Физика плазмы Т. 39, № 3, с. 1–11, 2013.

Afraimovich E.L., Ishin A.B., Tinin M.V., Yasukevich Yu.V., Jin S. First evidence of anisotropy of GPS phase slips caused by the mid-latitude field-aligned ionospheric irregularities // Adv. Space Research. 2011a. Vol. 47, № 10. P. 1674–1680.

Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Kosogorov E.A., Yasukevich Yu.V. The mid-latitude field-aligned disturbances and their effect on differential GPS and VLBI // Adv. Space Research. 2011b. Vol. 47, № 10. P. 1804–1813.

Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory // Physica D. 1988. 31, p. 277–283.

Higuchi T. Relationship between the fractal dimension and the power-law index for a time series: a numerical investigation // Physica D. 1990. 46. P. 254–264.

James Bao-Yen Tsui, Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. 2000. John Wiley & Sons, Inc. – 255 p.

Kovaleva I. Kh. Dissipative ion-cyclotron oscillitons in a form of solitons with chirp in Earth's low-altitude ionosphere // Phys. Plasmas. 19, 102905 (2012), doi: 10.1063/1.4763561.

Wheelon A.D. Electromagnetic Scintillation. Cambridge University Press. 2003. – 462 p.