

УДК 551.51

ИОНОСФЕРНЫЕ И АППАРАТНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ ПРИ РАДИОЗАТМЕННОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ COSMIC

Г. И. Еськин

Институт физики атмосферы РАН им. А. М. Обухова, г. Москва, Россия

Ионосферные и аппаратные флуктуации оптических путей являются наиболее существенными источниками ошибок определения параметров нейтральной атмосферы радиозатменным методом на высотах более 8 км. В работе выполнен спектральный анализ флуктуаций оптического пути в радиозатменных измерениях в двух каналах системы GPS для высот перигеев зондирующих лучей в диапазоне 80÷100 км, где вклад нейтральной атмосферы пренебрежимо мал. Для анализа был выбран массив из 300 сеансов измерений, выполненных в эксперименте COSMIC. Спектральный анализ выявил максимальную кросскорреляцию флуктуаций в двух каналах на пространственной частоте 2,5 рад/км. Убывание корреляции для более низких пространственных частот объясняется аппаратными шумами. Убывание корреляции для более высоких пространственных частот объясняется эффектами дифракции на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях.

ВВЕДЕНИЕ

Радиозатменное зондирование основано на просвечивании атмосферы радиоволнами, излучаемыми высокостабильными передатчиками, расположенными на спутниках навигационной системы GPS, и принимаемыми приёмником, расположенным на низколетящем спутнике [1–3]. В настоящей работе мы пользуемся данными объединённой научной программы США и Тайваня для изучения погоды, климата, космической погоды и геодезии COSMIC (Constellation for Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) [4]. Эта программа стартовала 14 апреля 2006 года, когда на орбиту высотой около 720 км были выведены шесть спутников, оснащённых GPS-приёмниками. До 2010 года система COSMIC проводила в среднем около 3 000 сеансов измерений в день. В настоящее время проводится в среднем около 1 000 сеансов измерений в день, т. к. аппаратура уже почти выработала свой ресурс. Полученные данные передаются в Центр анализа и хранения данных COSMIC (COSMIC Data Analysis and Archival Center) и после обработки поступают в открытый доступ с задержкой около трёх часов.

Восстановление параметров нейтральной атмосферы выполняется по измеренным фазам (оптическим путям) [5] и амплитудам радиосигналов, прошедших через атмосферу [6]. Ионосфера занимает область высот от 70 до 600÷1 000 км. Любой луч с высотой перигея ниже верхней границы ионосферы проходит через неё и подвержен воздействию её неоднородностей. Неоднородности приводят к пространственным и, как следствие, временным флуктуациям фазы и амплитуды измеряемого радиосигнала. Для удаления ионосферного вклада с целью восстановления параметров нейтральной атмосферы используется частотная зависимость ионосферного показателя преломления, отличие которого от единицы обратно пропорционально квадрату частоты.

Аналогичное дисперсионное соотношение имеется и между ионосферными составляющими оптических путей в двух частотных каналах системы GPS [7]. Однако оно основано на приближении геометрической оптики и линеаризации оптического пути как функционала от пространственного распределения показателя преломления. Для применимости геометрической оптики необходимо, чтобы характерный пространственный масштаб неоднородностей показателя преломления был не

Г. И. Еськин

195

меньше размера зоны Френеля. Характерный размер зоны Френеля в отсутствие сильной рефракции равен $\sqrt{\lambda L}$, где L — расстояние наблюдения, λ — длина волны. Радиосигналы принимаются на спутнике с высотой орбиты около 700 км, что соответствует расстоянию от спутника до лимба планеты около 3 000 км. Таким образом, размер зоны Френеля составляет около 800 м. Для применимости линеаризации необходимо, чтобы изменения показателя преломления на расстоянии между двумя лучами, соответствующими разным частотным каналам, были малы. Эти предположения выполняются лишь для ионосферных неоднородностей с масштабами более 1 км [8]. Мелкомасштабные флуктуации электронной концентрации в ионосфере приводят к остаточной ошибке ионосферной коррекции. Дополнительная ошибка возникает вследствие аппаратных шумов.

В данной работе мы провели спектральный анализ флуктуаций оптических путей в двух каналах на материале экспериментальных данных COSMIC. Для анализа был выбран массив из 300 сеансов, который мы разделили на три группы по 100 сеансов: с высоким, средним и низким уровнем шумов. Исследовались измерения оптического пути в интервале высот перигеев лучей от 80 до 100 км над поверхностью Земли. Выбор этого интервала высот был обусловлен тем, что выше 80 км вклад нейтральной атмосферы пренебрежимо мал, при этом верхняя граница измерений в большинстве случаев лежит не ниже 100 км.

Исследование флуктуаций на этих высотах позволяет определить статистические свойства ионосферных и аппаратных флуктуаций. В предположении, что эти свойства мало меняются с высотой, т. е. стационарности флуктуаций как случайного процесса, их знание позволит в дальнейшем оценивать ошибки восстановления параметров нейтральной атмосферы выше 8 км. Ниже 8 км становятся существенными другие факторы, включающие многолучевое распространение, сильные флуктуации амплитуды и фазы, сильные вертикальные и горизонтальные градиенты [9–11]. Проведённый анализ выявил низкочастотные спектральные компоненты, связанные с аппаратным шумом, и дифракционные эффекты на высоких пространственных частотах.

1. МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ДАННЫХ В ДВУХ КАНАЛАХ

Данные COSMIC находятся на сайте в открытом доступе [12] и включают различные типы выходных данных (data products). В данной работе мы использовали тип данных atmPhs, который содержит, в частности, орбитальные данные спутников, измерения амплитуд $A_\alpha(t)$ и атмосферных набегов оптического пути (phase excess) $S_\alpha(t)$ ($\alpha = 1, 2$) в двух частотных каналах L_1 (частота канала $f_1 = 1,57542$ ГГц) и L_2 ($f_2 = 1,22760$ ГГц) как функции времени t . Принимаемое волновое поле выражается через эти величины следующим образом:

$$u_\alpha(t) = A_\alpha(t) \exp(ik_\alpha [S_0(t) + S_\alpha(t)] - 2\pi i f_\alpha t), \quad (1)$$

где $\alpha = 1, 2$, $S_0(t)$ — расстояние между приёмником и передатчиком, вычисляемое из орбитальных данных, $k_\alpha = 2\pi f_\alpha / c = 2\pi / \lambda_\alpha$ — волновые числа для каналов L_α , c — скорость света, λ_α — длины волн ($\lambda_1 = 0,190425$ м, $\lambda_2 = 0,244379$ м). В геометрикооптическом приближении полный оптический путь $S_0(t) + S_\alpha(t)$ равен интегралу от показателя преломления вдоль лучей, которые ввиду дисперсии ионосферного показателя преломления будут разными для каналов L_1 и L_2 . Величина $S_0(t)$ равна вакуумному оптическому пути, который наблюдался бы в отсутствие атмосферы, а величина $S_\alpha(t)$ равна возмущению оптического пути, вносимому атмосферой за счёт отличия показателя преломления от единицы и искривления лучевой траектории. В дальнейшем для простоты оптическим путём будем называть $S_\alpha(t)$.

В данной работе исследуются флуктуации оптических путей S_α , полученных в 300 из 1 177 сеансов измерения, проведённых 31 октября 2009 года. Представим данные измерений как функции

высоты перигея прямого луча h , соединяющего передатчик и приёмник, которая для каждого момента времени рассчитывается по орбитальным данным. В исследуемом диапазоне высот $80 \div 100$ км вклад неоднородностей нейтральной атмосферы пренебрежимо мал, поэтому флуктуации определяются только ионосферными неоднородностями и аппаратными шумами. Для двух ионосферных оптических путей, пользуясь приближением геометрической оптики и пренебрегая разностью двух лучевых траекторий, можно записать следующее дисперсионное соотношение [13]:

$$S_1 f_1^2 = S_2 f_2^2. \quad (2)$$

Будем рассматривать перенормированный оптический путь канала L_2

$$\bar{S}_2 = S_2 (f_2/f_1)^2. \quad (3)$$

Перенормировка эквивалентна тому, что длина волны канала L_2 считается равной

$$\bar{\lambda}_2 = \lambda_2 (f_2/f_1)^2 = 0,148383 \text{ м}. \quad (4)$$

Канал L_2 существенно более зашумлён по сравнению с каналом L_1 . Это объясняется различием модуляции сигнала GPS в этих каналах (грубый код с частотой 1 МГц в канале L_1 и точный код с частотой 10 МГц в канале L_2). Сигналы спутника содержат навигационные сообщения, которые передаются со скоростью 50 бит/с, при помощи дополнительной фазовой модуляции сигнала. Модуляция заключается в умножении отрезков сигнала с длиной $1/50$ с на $+1$ или -1 . GPS-приёмник в режиме фазовой автоподстройки нечувствителен к знаку сигнала, т. е. к изменению оптического пути на целое число половин длин волн. Это позволяет автоматически удалять навигационные сообщения.

Полный оптический путь с точностью до константы можно восстановить при условии, что между выборками сигнала оптический путь меняется не более, чем на четверть длины волны. Для радиозатменных измерений на высотах более 8 км это условие выполнено. В частности, ионосферные вариации оптического пути между

выборками сигнала заведомо существенно меньше половины длины волны. Причиной наблюдаемой разницы между перенормированными оптическими путями в двух каналах на исследуемых высотах служит аппаратный шум и дифракционные эффекты.

Константа в оптическом пути незначительна, поскольку при восстановлении метеорологических параметров используется угол рефракции, определяемый производной оптического пути вдоль луча. Вычтем из \bar{S}_2 константу $\Delta \bar{S}_{12}$, определяемую как разность $\bar{S}_2 - S_1$, усреднённая по интервалу высот $80 \div 100$ км. Поскольку приёмник измеряет фазу с точностью до целого числа полувольт, изменим оптический путь канала L_2 на целое число полувольт в каждой точке высотной сетки так, чтобы минимизировать разность перенормированных оптических путей. Сигнал канала L_1 , в котором уровень шума ниже, используется при этом как опорный. Это позволяет

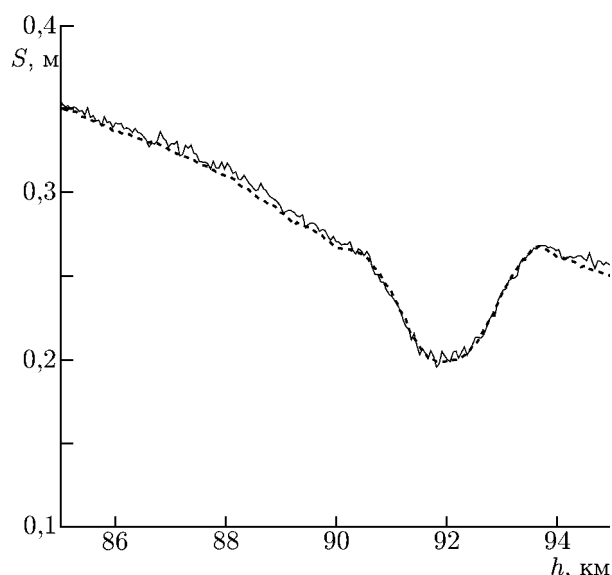


Рис. 1. Оптический путь канала L_1 (пунктирная линия) и канала L_2 (после умножения на $(F_2/F_1)^2$, вычитания константы и целого числа полувольт, сплошная линия) на исследуемых высотах

удалить скачки оптического пути канала L_2 на половину длины волны, возникающие вследствие шумов при накоплении фазы. Количество половин длин волн, соответствующее разности между двумя каналами на уровне h_i высотной сетки, равно

$$d_i = \left[\frac{\bar{S}_2(h_i) - S_1(h_i) - \Delta\bar{S}_{12}}{\bar{\lambda}_2/2} \right] + 1, \quad (5)$$

где квадратные скобки обозначают целую частоту числа. В результате оптический путь $\bar{S}_2(h_i)$ будет изменён на следующую величину:

$$\Delta\bar{S}_2(h_i) = -d_i\bar{\lambda}_2/2 - \Delta\bar{S}_{12}. \quad (6)$$

Для простоты сохраним обозначение \bar{S}_2 для $\bar{S}_2 + \Delta\bar{S}_2$.

Вычитание константы и целого числа полуволин в канале L_2 на высотах 85÷95 км проиллюстрировано на рис. 1.

2. ОЦЕНКА ШУМА

Для спектрального анализа из данных обоих каналов удалялся тренд. Общий для обоих каналов низкочастотный тренд S_F определялся как фильтрованные флуктуации оптического пути в канале L_1 . Для фильтрации использовалась скользящая полиномиальная регрессия с кубическим полиномом. Ширина окна фильтра составляла 3 км. Дальнейший анализ выполнялся для оптических путей с удалённым трендом:

$$T_1 = S_1 - S_F, \quad (7)$$

$$T_2 = \bar{S}_2 - S_F, \quad (8)$$

линейно интерполированных на равномерную высотную сетку x_j . Число узлов в сетке $N = 1024$ достаточно для того, чтобы её шаг Δx был не больше шага исходной сетки. Необходимость интерполяции связана с тем, что исходная сетка высот перигеев лучей не является равномерной, тогда как алгоритмы быстрого преобразования Фурье строятся в расчёте на равномерную сетку. Триста выбранных сеансов измерений были разделены на 3 группы по 100 сеансов: это группы низкого, среднего и высокого шума. Для разделения радиозаходов на группы исследовалась дисперсия разности $T_2 - T_1$. В группу низкого шума попадали те радиотрассы, дисперсия разности оптических путей которых была порядка 0,1 мм. Для группы среднего шума эта величина была порядка 1 мм. Группа высокого шума характеризовалась невязкой порядка 1 см и более. Это разделение иллюстрируется рис. 2, где показаны наиболее характерные примеры флуктуаций оптических путей.

3. ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРОВ ПО ТРЁМ АНСАМБЛЯМ ДАННЫХ

Для оптических путей с удалённым трендом в обоих каналах выполнялось дискретное преобразование Фурье:

$$\tilde{T}_m^\alpha = \sum_{j=1}^N T_\alpha(x_j) \exp\left(-\frac{2\pi i j m}{N}\right), \quad (9)$$

где $\alpha = 1, 2$, m -я фурье-компонента соответствует пространственной частоте

$$\omega_m = \frac{2\pi m}{N \Delta x}, \quad m = 0, \dots, N/2 - 1. \quad (10)$$

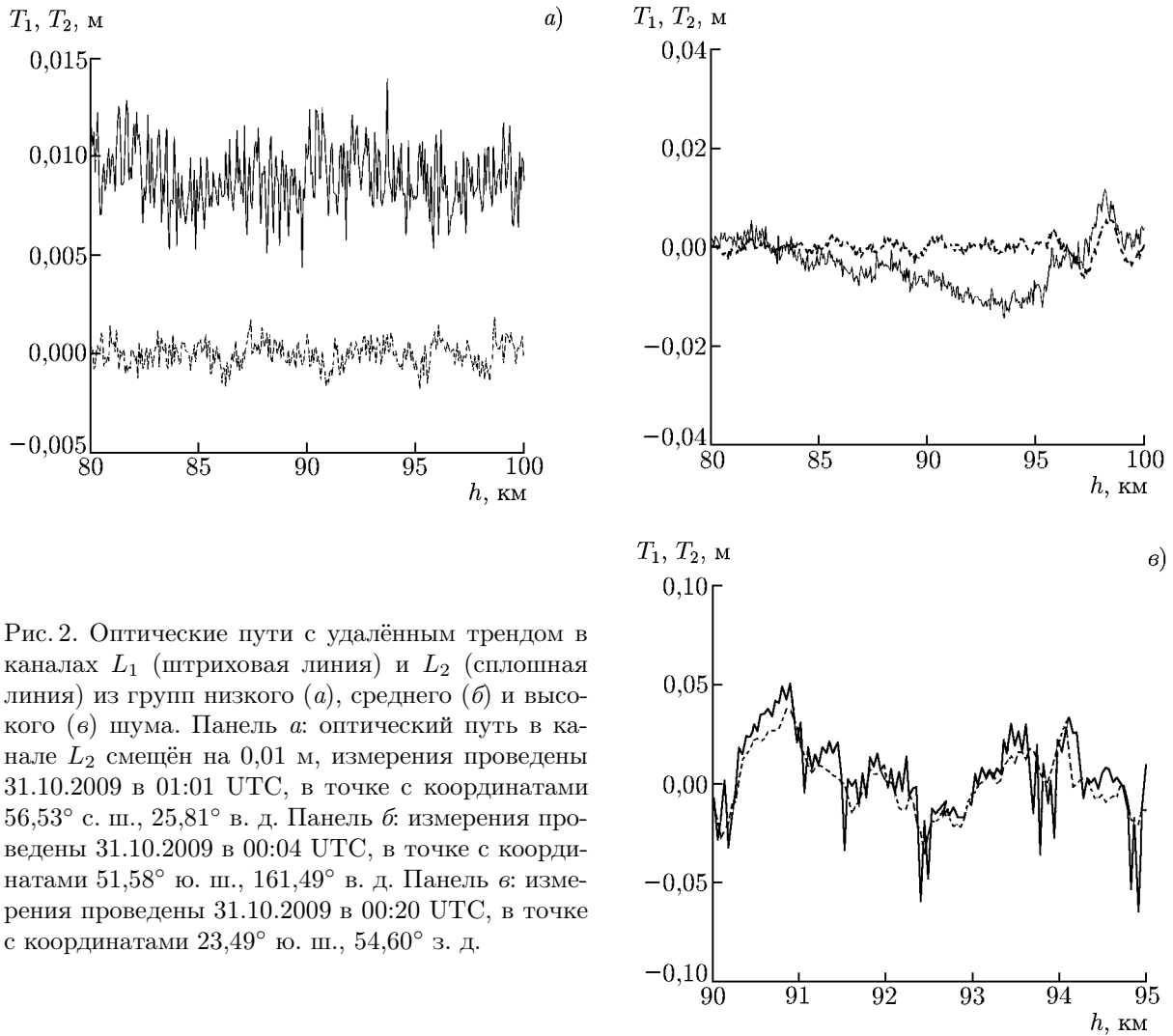


Рис. 2. Оптические пути с удалённым трендом в каналах L_1 (штриховая линия) и L_2 (сплошная линия) из групп низкого (а), среднего (б) и высокого (в) шума. Панель а: оптический путь в канале L_2 смещён на 0,01 м, измерения проведены 31.10.2009 в 01:01 UTC, в точке с координатами $56,53^\circ$ с. ш., $25,81^\circ$ в. д. Панель б: измерения проведены 31.10.2009 в 00:04 UTC, в точке с координатами $51,58^\circ$ ю. ш., $161,49^\circ$ в. д. Панель в: измерения проведены 31.10.2009 в 00:20 UTC, в точке с координатами $23,49^\circ$ ю. ш., $54,60^\circ$ з. д.

Усредняя по каждому из трёх ансамблей реализаций (группы низкого, среднего и высокого уровней шума), мы получали оценки автокорреляционного спектра для каналов L_1 и L_2 и кросскорреляционного спектра:

$$F_m^{11} = \langle \tilde{T}_m^1 (\tilde{T}_m^1)^* \rangle = \langle |\tilde{T}_m^1|^2 \rangle; \quad F_m^{22} = \langle \tilde{T}_m^2 (\tilde{T}_m^2)^* \rangle = \langle |\tilde{T}_m^2|^2 \rangle, \quad (11)$$

$$F_m^{12} = \langle \tilde{T}_m^1 (\tilde{T}_m^2)^* \rangle. \quad (12)$$

Здесь знак звёздочка означает комплексное сопряжение. В предположении, что среднее значение мнимой части смешанного произведения в кросскорреляционном спектре равно нулю (т. е. отсутствует систематический сдвиг), имеет место следующее соотношение:

$$F_m^{12} = \text{Re} \langle \tilde{T}_m^1 (\tilde{T}_m^2)^* \rangle. \quad (13)$$

Помимо этого, вычислялись спектры когерентности (коэффициенты кросскорреляции спектральных компонент), определяемые следующим образом:

$$C_m^{12} = \frac{F_m^{12}}{\sqrt{F_m^{11} F_m^{22}}}. \quad (14)$$

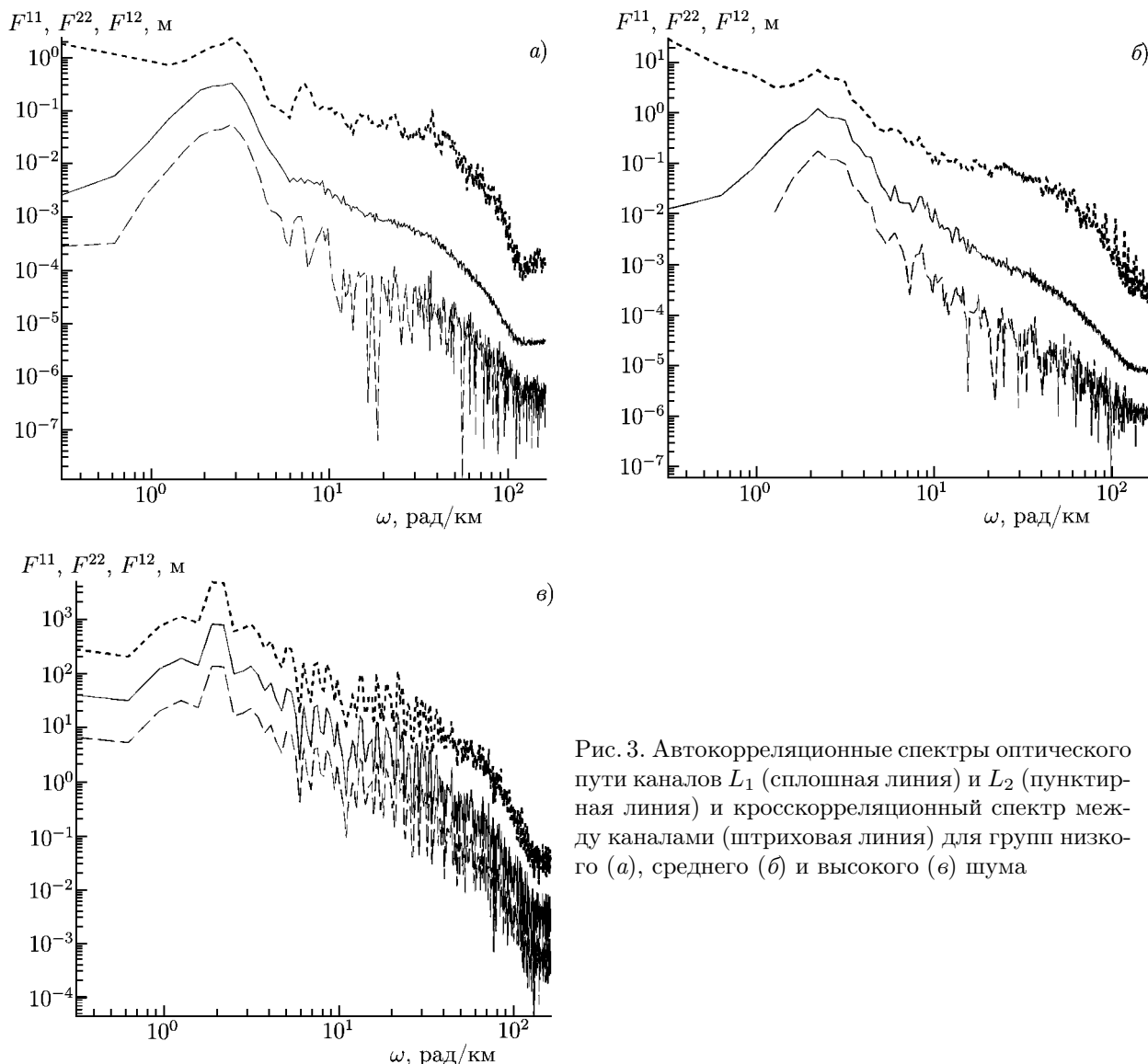


Рис. 3. Автокорреляционные спектры оптического пути каналов L_1 (сплошная линия) и L_2 (пунктирная линия) и кросскорреляционный спектр между каналами (штриховая линия) для групп низкого (а), среднего (б) и высокого (в) шума

Автокорреляционные и кросскорреляционные спектры, вычисленные по трём группам сеансов измерений, представлены на рис. 3. На рис. 4 приведены соответствующие спектры когерентности.

Для спектров групп низкого и среднего шума характерны одни и те же особенности. В области низких частот наблюдается низкая кросскорреляция, что является следствием низкочастотного аппаратного шума в канале L_2 . На пространственной частоте около 2,5 рад/км имеется максимум корреляции, достигающей здесь величины около 0,9. На участке частот от 10 до 100 рад/км спектральная плотность флуктуаций в обоих каналах убывает, а на пространственной частоте около 100 рад/км выходит на постоянный уровень порядка 10^{-5} м, соответствующий некоррелированной (белой) компоненте аппаратного шума. Поведение спектров на высокочастотном участке согласуются с результатами [8]. Кросскорреляция в этом диапазоне пространственных частот очень низкая (менее 0,2). На частотах выше 100 рад/км наблюдается рост корреляции, который вызван компонентой аппаратного шума, общей для обоих каналов.

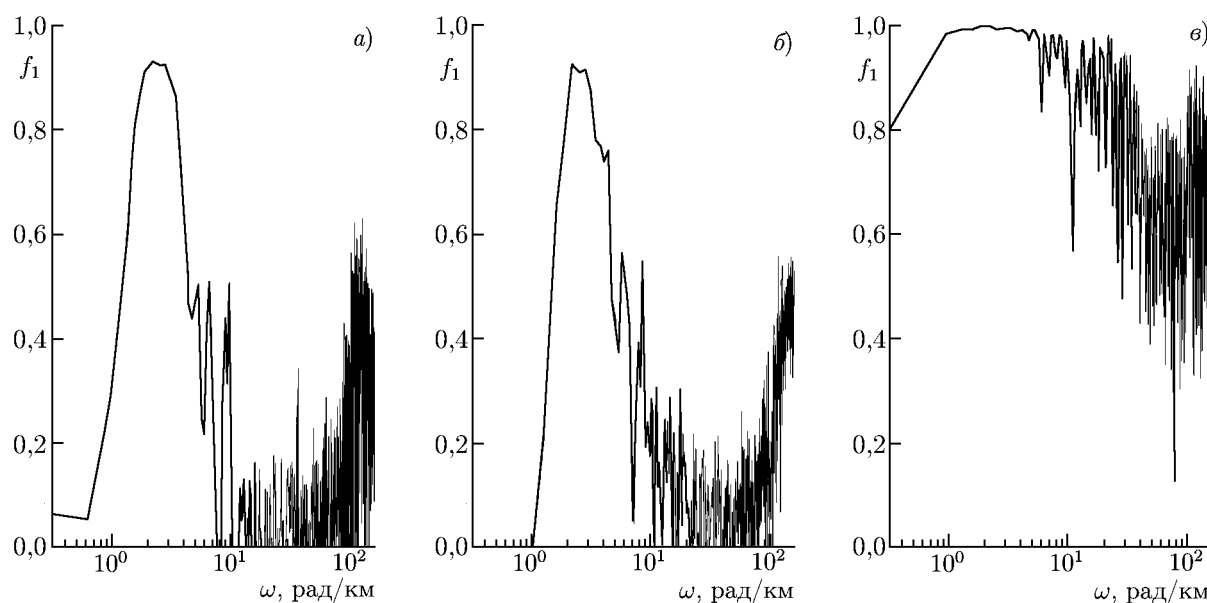


Рис. 4. Коэффициент корреляции оптических путей в каналах L_1 и L_2 в группах низкого (а), среднего (б) и высокого (в) шума

ВЫВОДЫ

В данной работе мы провели спектральный анализ флуктуаций радиозатменных измерений, полученных в эксперименте COSMIC на высотах 80÷100 км. Были проанализированы 300 сеансов измерений, которые мы разделили на три группы в соответствии с уровнем шума, и построены автокорреляционные спектры, кросскорреляционные спектры и спектры когерентности. В низкочастотной области пространственных частот наблюдается низкая корреляция, что является следствием низкочастотной компоненты шума в канале L_2 . Поведение спектра на высоких пространственных частотах согласуется с ранее полученными данными [8], кроме участка самых высоких частот, где наблюдается рост коэффициента корреляции, причиной которого является аппаратный шум, общий для обоих каналов. Высокая корреляция (около 0,9) соответствует небольшому диапазону пространственных частот в районе 2,5 рад/км.

Результаты данной работы могут послужить основой для построения оптимального фильтра, позволяющего выделять нейтральную компоненту измерений оптического пути и минимизировать ошибки восстановления параметров нейтральной атмосферы.

Автор выражает благодарность Тайваньскому национальному космическому агентству (Taiwan's National Space Organization) и Университетской корпорации по исследованиям атмосферы (University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA) за предоставление данных эксперимента COSMIC. Автор выражает глубокую признательность М. Е. Горбунову за помощь в написании статьи: постановку задачи, обсуждение результатов и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-05-001800-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rocken C., Kuo Y.-H., Schreiner W. S., et al. // COSMIC System Description, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science. 2000. V. 11, No. 1. P. 21.

2. Wickert J., Reigber C., Beyerle G., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, No. 17. P. 3263.
3. Von Engel A., Healy S., Marquardt C., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. Art. no. L17809.
4. <http://www.cosmic.ucar.edu>.
5. Ware R., Exner M., Feng D., et al. // *Bull. Amer. Meteorological Soc.* 1996. V. 77, No. 1. P. 19.
6. Gorbunov M. E., Lauritsen K. // *Radio Sci.* 2004. V. 39, No. 4. Art. no. RS4010.
7. Воробьёв В. В., Красильникова Т. Г. // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1993. Т. 29, № 5. С. 626.
8. Воробьёв В. В., Кан В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. 42, № 6. С. 511.
9. Sokolovskiy S., Rocken C., Schreiner W., Hunt D. // *J. Geophys. Res. Atmospheres.* 2010. V. 115. Art. no. D22111.
10. Gorbunov M. E., Shmakov A. V., Leroy S. S., Lauritsen K. B. // *J. Atmos. Oceanic Techn.* 2011. V. 28, No. 6. P. 737.
11. Gorbunov M. E., Lauritsen K. B., Leroy S. S. // *Radio Sci.* 2010. V. 45. Art. no. RS6011.
12. <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac>.
13. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере.* М.: Мир, 1975.

Поступила в редакцию 1 июля 2011 г.; принята в печать 27 марта 2012 г.

IONOSPHERIC AND HARDWARE FLUCTUATIONS OF THE OPTICAL PATH DURING RADIO OCCULTATION PROBING OF THE EARTH'S ATMOSPHERE IN THE COSMIC EXPERIMENT

G. I. Es'kin

Ionospheric and hardware fluctuations of optical paths are the most significant sources of errors in determination of the parameters of neutral atmosphere using the radio occultation method at altitudes over 8 km. The paper presents a spectral analysis of the fluctuations in the optical path during radio occultation measurements in two channels of the GPS system for the perigee altitudes of probing beams in the range from 80 to 100 km, where the contribution of the neutral atmosphere is negligibly small. For analysis, a data array of 300 measurements made during the COSMIC experiment were used. The spectral analysis revealed the maximum cross-correlation of the fluctuations in two channels at a spatial frequency of 2. rad/km. Weaker correlation for lower spatial frequencies is determined by hardware noises. Stronger correlation for higher spatial frequencies is determined by the effects of diffraction from small-scale ionospheric irregularities.