

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 537.876.23:
551.510.535

В. Г. БЕЗРОДНЫЙ¹, Б. ВОТКИНС², О. В. ЧАРКИНА¹,
Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: charkina@rian.kharkov.ua

² Университет Аляски – Фэрбенкс,
505 Саут Чандалар Драйв, Фэрбенкс, США, АК 99775

МЕЖЛУЧЕВАЯ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ ДИСКРЕТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПАНОРАМНЫМИ ВЧ РИОМЕТРАМИ

Исследовано влияние флуктуаций интенсивности галактического космического фона на точность определения спектральных характеристик ионосферных мерцаний дискретных космических источников (ДКИ). Предложена оригинальная методика снижения такого влияния на результаты восстановления характеристик ионосферных мерцаний по данным наблюдений ДКИ с использованием панорамных ВЧ риометров, основанная на межлучевой корреляционной обработке. Работоспособность и эффективность предложенной методики проиллюстрирована результатами натурных измерений, выполненных с использованием 64-лучевого риометра, расположенного вблизи пос. Гакона (Аляска, США).

Ключевые слова: риометр, эффект мерцаний, космический фон, дискретный космический источник, взаимная корреляция

1. Введение

Панорамные ВЧ риометры представляют собой многолучевые антенные системы, оснащенные высокочувствительными радиометрами и предназначенные для мониторинга поглощения галактического космического фона на частоте 38.2 МГц в нижней ионосфере. Первый инструмент такого типа был установлен на Южном полюсе в конце 80-х гг. прошлого века, с его полным описанием можно ознакомиться в работе [1]. С тех пор была создана широкая сеть таких устройств, расположенных в различных регионах Северной Европы, Америки, Канады и Антарктики, их полный перечень опубликован на сайте Ланкастерского университета, Великобритания <<http://spears.lancs.ac.uk/cgi-bin/riometers>>.

В работах авторов [2, 3] предложена методика применения многолучевых риометрических комплексов для одновременных непрерывных наблю-

дений излучения наиболее мощных в северном полушарии дискретных космических источников (ДКИ) Кассиопея А, Лебедь А, Дева А. Проведены теоретические и экспериментальные исследования эффекта мерцаний излучения ДКИ на неоднородной структуре F-области ионосферы, основной вклад в которые вносят случайные неоднородности электронной концентрации с поперечными к лучу зрения размерами порядка первой зоны Френеля, $\Lambda_{fp} = \sqrt{\lambda r_0}$ [4, 5]. Здесь λ – длина радиоволны, r_0 – расстояние до рассеивающей области.

Первые измерения [2, 3] проводились с использованием 256-лучевого риометра, расположенного в обсерватории Покер Флэт (Аляска, США). В ходе статистической обработки полученных данных были определены энергетические спектры и индексы мерцаний указанных источников, оценены наклон пространственного спектра ионосферных неоднородностей и характерные скорости их движения поперек луча зрения. При

© В. Г. Безродный, Б. Воткинс, О. В. Чаркина,
Ю. М. Ямпольский, 2013

этом относительные флуктуации интенсивности излучения ДКИ, $\delta I_S(t)/\langle I_S(t) \rangle$, определялись из соотношения

$$\frac{\delta I_S(t)}{\langle I_S(t) \rangle} = \frac{\delta I(t)}{I(t) - \langle I_B(t) \rangle} - \frac{\delta I_B(t)}{G(t) \langle I_S(t) \rangle}, \quad (1)$$

где $\delta I_S(t)$, $\delta I_B(t)$, $\delta I(t)$ – флуктуации ДКИ, космического фона и их суммы соответственно; $\bar{I}(t)$ – скользящее среднее исходной временной реализации; $\langle I_S(t) \rangle$, $\langle I_B(t) \rangle$ – статистические средние значения интенсивности ДКИ и фона; $G(t)$ – диаграмма направленности (ДН) выбранного луча риометра. Поскольку наблюдавшиеся флуктуации космического фона были малы по сравнению с мерцаниями ДКИ, а регистрации проводились по уровню $G(t) > 0.5$, полагалось, что последнее слагаемое, $\delta I_B(t)/(G(t)\langle I_S(t) \rangle)$, является пренебрежимо малым по сравнению с $\delta I_S(t)/\langle I_S(t) \rangle$ и поэтому может быть отброшено. Указанная возможность обусловлена тем, что риометрический комплекс Poker Флэт имеет достаточное количество лучей для непрерывных наблюдений ДКИ при высоких уровнях ДН каждого из них. Именно в этом заключается его уникальность при сравнении с другими устройствами такого типа. Действительно, в настоящее время в мире существует семь 64- и девять 49-лучевых риометров, при использовании которых для регистрации мерцаний достаточно часто возникает необходимость наблюдений ДКИ при относительно низких уровнях ДН. Это приводит к росту второго слагаемого в выражении (1). Кроме того, ДН каждого луча этих устройств в 2 раза шире, чем в Poker Флэт. Поэтому интенсивность флуктуаций космического фона, регистрируемая таким лучом, оказывается как минимум в 4 раза выше. Таким образом, пренебрегать добавкой $\delta I_B(t)/(G(t)\langle I_S(t) \rangle)$ уже нельзя, а разделить мерцания ДКИ и синхронные флуктуации интенсивности космического фона, регистрируемые тем же лучом риометра, не представляется возможным.

В настоящей работе исследовано влияние уровня флуктуаций галактического космического фона на точность восстановления параметров энергетического спектра ионосферных мерцаний ДКИ. Предложена методика взаимной корреляционной обработки мерцаний в со-

седних лучах риометра, применяя которую можно значительно снизить вклад флуктуаций космического фона. Экспериментальная часть исследований выполнена на основе данных, полученных на 64-лучевом риометре Гакона (Аляска, США).

2. Численное моделирование влияния уровня флуктуаций космического электромагнитного фона на вид спектра мерцаний ДКИ в ионосфере

Используя алгоритм обработки риометрических наблюдений ионосферных мерцаний, описанный в работе [2, 3], удастся восстановить энергетический спектр $\hat{S}(f)$ относительных флуктуаций $\delta I_S(t)/\langle I_S(t) \rangle$ интенсивности принятого излучения. Математическую модель такого излучения, которую мы собираемся здесь исследовать, удобно представить в форме двух слагаемых:

$$\hat{S}(f) = S(f) + S_B. \quad (2)$$

Второе слагаемое в (2) имеет смысл спектральной плотности относительных флуктуаций $\delta I_B(t)/(G(t)\langle I_S(t) \rangle)$ космического электромагнитного фона (см. формулу (1)), который может моделироваться белым шумом, $S_B = \text{const}$. Первое слагаемое в (2) соответствует спектру относительных флуктуаций $\delta I_S(t)/\langle I_S(t) \rangle$ интенсивности ДКИ в ионосфере. Его традиционно будем моделировать степенной функцией (см., например, [5]):

$$S(f) = cf^{-\nu}. \quad (3)$$

где c – нормировочная константа; ν – показатель степени, принимающий значения $2.4 \div 2.5$. Частотный интервал $1/T \leq f \leq 2/\Delta t$ спектра (3) задается длительностью реализации T и частотой дискретизации записи Δt . Первая составляющая такого спектра очевидным образом имеет вид $S_1 \equiv S(1/T) = cT^\nu$, откуда для нормировочной константы и самого спектра мерцаний следуют соотношения:

$$c = S_1 T^{-\nu}, \quad S(f) = S_1 (fT)^{-\nu}.$$

С их учетом перепишем модельное выражение (2) в виде

$$\hat{S}(f) = S_1 \left[(fT)^{-\nu} + S_B/S_1 \right].$$

Заметим, что при графическом построении энергетических спектров мерцаний традиционно используется не линейный, а двойной логарифмический масштаб, поэтому в процессе численного моделирования будем рассчитывать функцию

$$\lg \hat{S}(f) = \lg \left[(fT)^{-2.4} + S_B/S_1 \right]. \quad (4)$$

При проведении моделирования будем задавать значения входящих в формулу (4) параметров, близкие к типичным условиям эксперимента: $\nu = 2.4$, $T = 60$ с, $\Delta t = 1$ с. Значения соотношения сигнал/шум выберем следующими: $S_1/S_B = 100, 10, 1.5$. Результаты указанных модельных вычислений приведены на рис. 1. Возле кривых указаны оценки наклонов ν спектров на их квазилинейном низкочастотном участке. Обращает на себя внимание резкое уменьшение наклона спектральной кривой и возрастание уровня ее высокочастотного “хвоста” при уменьшении соотношения S_1/S_B , приводящее к силь-

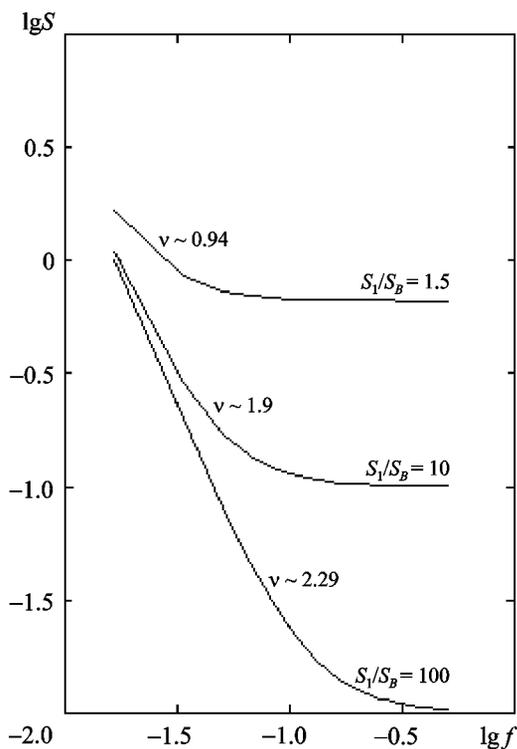


Рис. 1. Результаты численного моделирования влияния уровня флуктуаций космического электромагнитного фона на вид спектра мерцаний ДКИ в ионосфере

ному искажению истинного вида спектра мерцаний.

3. Проведение измерений

Как указывалось во Введении, для сравнения с модельными расчетами мы использовали экспериментальные данные, полученные с помощью риометрического комплекса Гакона (Аляска, США) [6, 7]. Фазированная антенная решетка (ФАР) этого риометра состоит из 8×8 пар скрещенных горизонтальных симметричных диполей. Система фазирования формирует 64-лучевую ДН, которая изображена на рис. 2 по уровню половинной мощности в горизонтальной системе небесных координат. Нумерация лучей ФАР, (m, n) , задана следующим образом. Первый индекс $m = 1, 2, \dots, 8$ соответствует номеру столбца, отсчитываемому от геомагнитного востока к западу, индекс $n = 1, 2, \dots, 8$ – номеру строки, отсчитываемому от геомагнитного севера к югу. Здесь же показаны полюс мира P, географический (NS) и магнитный (NmSm) небесные меридианы, а также суточные траектории перемещения ДКИ Кассиопея A, Лебедь A, Телец A и Дева A по лучам ДН. Точками отмечены часовые интервалы движения этих источников. Из рисунка видно, что промежутки времени наблюдений ДКИ при уровне ДН луча риометра $G(t) < 0.5$ весьма существенны и составляют от 10 до 60 мин каждые 2 ч. Поэтому исключение вклада слагаемого $\delta I_B(t) / (G(t) \langle I_S(t) \rangle)$ формулы (1) является важной задачей при обработке данных наблюдений мерцаний ДКИ на риометре такого типа.

В качестве примера восстановим средний энергетический спектр относительных флуктуаций интенсивности излучения космического электромагнитного фона $S_B(f)$ по множеству M мгновенных спектров $S_B^{(n)}(f)$. Для этого используем результаты реальных наблюдений 22 июня 2010 г., полученные с помощью панорамного риометра Гакона на временном интервале 09:30–09:45 UT. Поскольку во время “прохождения” ДКИ через ДН луча риометра выделить флуктуации космического фона не удастся, для обработки возьмем флуктуации фона $\delta I_B(t)$ из лучей (4;2) и (4;3), в которых заведомо отсутствуют излучения радиозвезд, а произведение $G(t) \langle I_S(t) \rangle$ – из соседних лучей ((3;2) и (3;3)

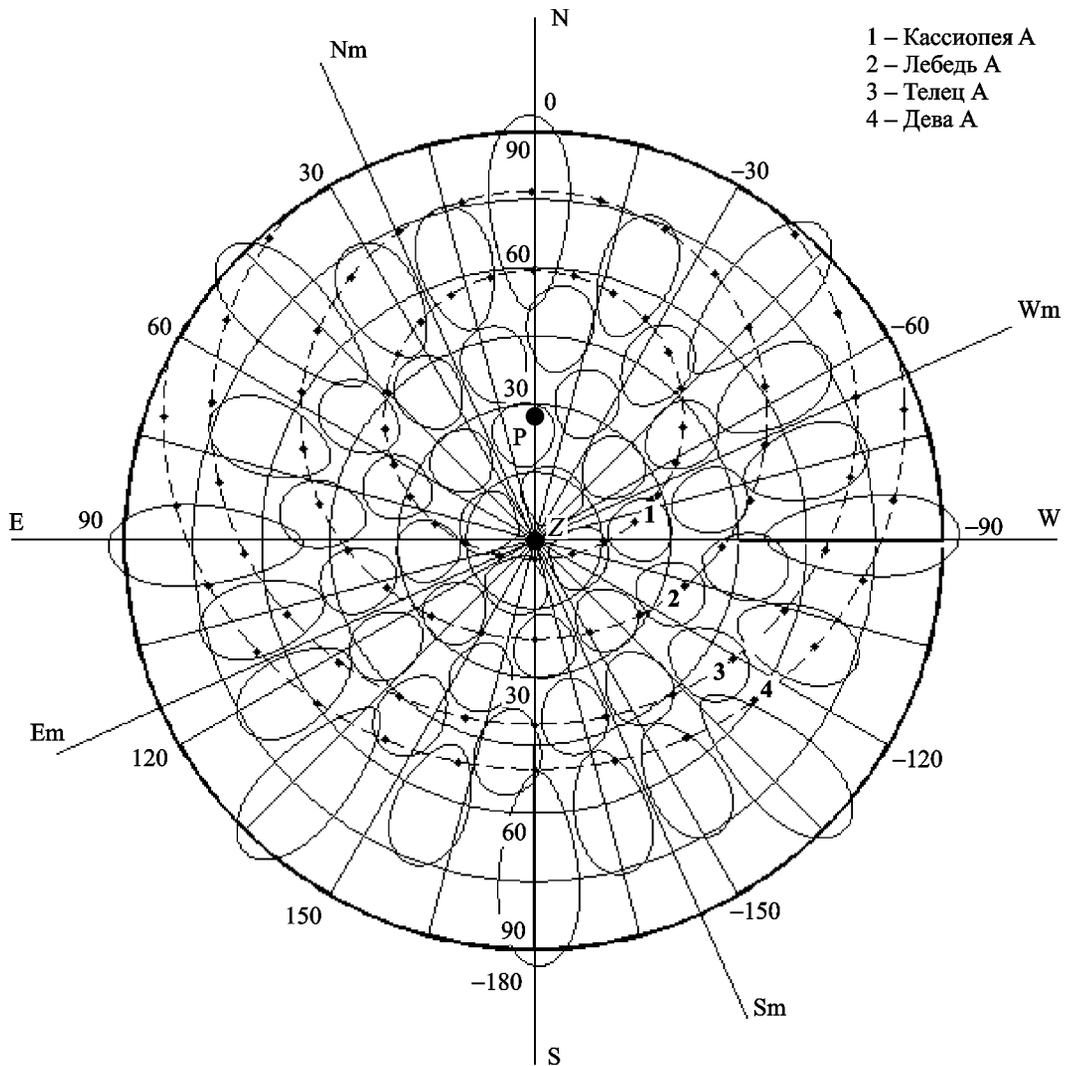


Рис. 2. ДН многолучевого риометра Гакона

соответственно) при синхронном “прохождении” через них Кассиопеи А. Тогда спектр фона может быть представлен в таком виде:

$$S_B(f) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M S_B^{(n)}(f),$$

$$S_B^{(n)}(f) = \frac{1}{T_0} \left| \int_{t_{\min} + (n-1)T_0}^{t_{\min} + nT_0} \frac{\delta I_B(t)}{G(t) \langle I_S(t) \rangle} e^{-i2\pi f t} dt \right|^2.$$

Здесь T_0 – длительность единичной реализации, t_{\min} соответствует началу рассматриваемого интервала.

Результаты такого восстановления изображены на рис. 3, а, б тонкими линиями, здесь же

приведены дисперсии σ_B^2 относительных флуктуаций космического фона. На обоих рисунках обращает на себя внимание достаточно высокая спектральная плотность исследуемого фона, которая обусловлена в значительной мере тем, что во время измерений источник Кассиопея А “проходит” по низким уровням ДН выбранных лучей (3;2) и (3;3).

Воспользуемся теперь методикой обработки первичных данных риометрических наблюдений, описанной в работах [2, 3], и восстановим средний энергетический спектр относительных флуктуаций интенсивности смеси “сигнал + шум” в тех же лучах (3;2), (3;3) и в тех же временных интервалах на основе следующего алгоритма:

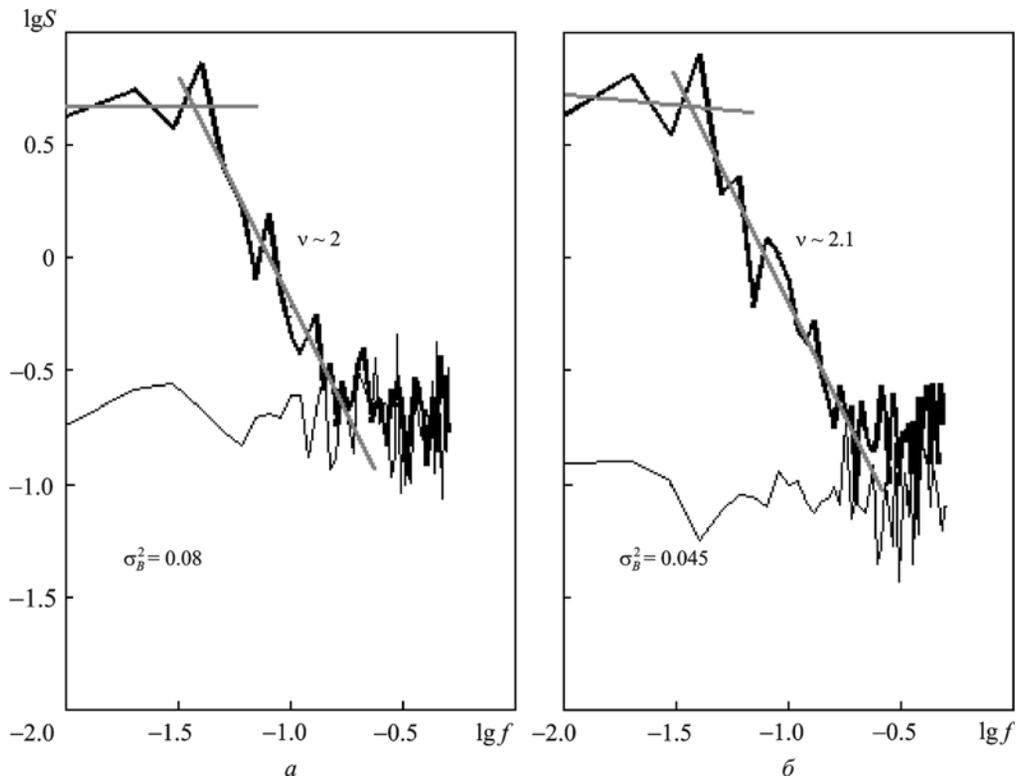


Рис. 3. Усредненные энергетические спектры флуктуаций интенсивности смеси “излучение ДКИ+космический фон” (жирная линия) и космического фона (тонкая линия) в двух лучах риометра Гакона: а – луч (3;2); б – луч (3;3)

$$S_{S+B}(f) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M S_{S+B}^{(n)}(f),$$

$$S_{S+B}^{(n)}(f) = \frac{1}{T_0} \left| \int_{t_{\min}+(n-1)T_0}^{t_{\min}+nT_0} \frac{\delta I(t)}{\overline{I(t)} \langle I_B(t) \rangle} e^{-i2\pi f t} dt \right|^2.$$

Результаты такой спектральной обработки изображены на рис. 3, а, б жирными линиями, которые в высокочастотной части хорошо накладываются на спектры мощности относительных флуктуаций интенсивности космического фона, что говорит о достаточно точном определении последнего. На рисунки нанесены также оценки наклонов спектров “мерцания + шум”, которые оказываются значительно более низкими, чем приведенные в работах [2, 3]. Это говорит о существенном вкладе относительных флуктуаций интенсивности излучения космического фона, которые искажают наклон спектра, как было показано в разделе 2. Поэтому возникает необходимость в новом алгоритме спектральной обработки риометрических данных ионосферных мерцаний, снижающем вклад излучения космического фона.

4. Межлучевая кросскорреляционная обработка данных риометрических наблюдений ионосферных мерцаний ДКИ

Мерцания ДКИ, наблюдающиеся в области пересечения двух соседних лучей риометра, по определению когерентны и полностью коррелированы. В отличие от мерцаний ДКИ корреляция космического фона в тех же лучах оценивается величиной отношения площади пересечения лучей к полной площади единичного луча. Поскольку лучи риометрического комплекса Гакона пересекаются по уровню ДН ниже 0.5 (см. раздел 3), можно ожидать, что в межлучевой корреляционной функции флуктуаций интенсивности вклад космического фона будет значительно ниже, чем в каждом отдельном луче.

Построим средний взаимный спектр $\tilde{S}_B(f)$ относительных флуктуаций интенсивности космического электромагнитного фона в лучах (4;2), (4;3), уже использовавшихся нами применительно к анализу статистических свойств фона в предыдущем разделе. Будем исходить при этом из формул:

$$\tilde{S}_B(f) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \tilde{S}_B^{(n)}(f),$$

$$\tilde{S}_B^{(n)}(f) = \frac{1}{T_0} \int_{t_{\min}+(n-1)T_0}^{t_{\min}+nT_0} \frac{\delta I_B^{(4;2)}(t)}{G^{(3;2)}(t) \langle I_S^{(3;2)}(t) \rangle} e^{-2\pi f t} dt \times$$

$$\times \left(\int_{t_{\min}+(n-1)T_0}^{t_{\min}+nT_0} \frac{\delta I_B^{(4;3)}(t)}{G^{(3;3)}(t) \langle I_S^{(3;3)}(t) \rangle} e^{-2\pi f t} dt \right)^*,$$

где символ “*” означает комплексное сопряжение. Результаты соответствующих расчетов изображены на рис. 4 тонкой линией. Как и следовало ожидать, спектральная плотность взаимного спектра космического фона оказалась значительно ниже плотностей парциальных энергетических спектров, изображенных на рис. 3, а, б. Это говорит о подавлении вклада некоррелированных флуктуаций интенсивности космического фона от непересекающихся участков соседних лучей риометрического комплекса.

Восстановим теперь взаимный спектр относительных флуктуаций интенсивности суммарного излучения источника и фона:

$$\tilde{S}_{S+B}(f) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \tilde{S}_{S+B}^{(n)}(f),$$

$$\tilde{S}_{S+B}^{(n)}(f) = \frac{1}{T_0} \left(\int_{t_{\min}+(n-1)T_0}^{t_{\min}+nT_0} \frac{\delta I(t)}{\bar{I}(t) - \langle I_B(t) \rangle} e^{-2\pi f t} dt \right)_{(3;2)} \times$$

$$\times \left(\int_{t_{\min}+(n-1)T_0}^{t_{\min}+nT_0} \frac{\delta I(t)}{\bar{I}(t) - \langle I_B(t) \rangle} e^{-2\pi f t} dt \right)_{(3;3)}^*.$$

Соответствующая кривая изображена на рис. 4 жирной линией. Сравнение с парциальными энергетическими спектрами мерцаний (см. рис. 3, а, б) показывает значительное снижение уровня высокочастотных спектральных составляющих, преобладающий вклад в которые ранее вносили флуктуации космического фона. Это, в свою очередь, приводит к более достоверному определению таких важных для задач ионосферной диагностики параметров, как наклон спектра и индекс мерцаний ДКИ. В частности, согласно данным рис. 3, а, б и рис. 4, оценка наклона спектра мерцаний на основе межлучевой корреляции повышается от парциальных значений $\nu \approx 2 \div 2.1$ до $\nu \approx 2.7$.

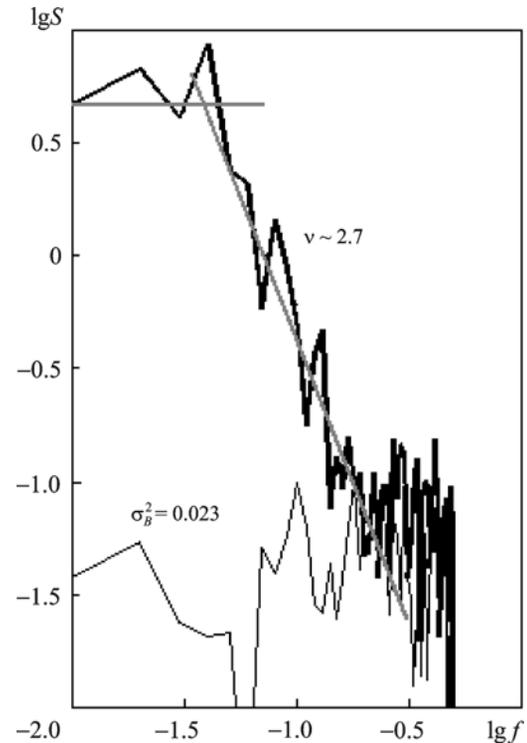


Рис. 4. Усредненные взаимные спектры флуктуаций интенсивности смеси “излучение ДКИ+ космический фон” (жирная линия) и космического фона (тонкая линия) в лучах (3; 2), (3; 3) риометра Гакона

5. Выводы

Таким образом, в результате проведенных в настоящей работе исследований удалось продемонстрировать эффект сильного влияния уровня флуктуаций космического фона на точность определения параметров энергетического спектра ионосферных мерцаний. В частности, показано, что с усилением таких флуктуаций значительно уменьшается оценка наклона спектральной кривой мерцаний за счет роста высокочастотной фоновой составляющей. Это создает особые трудности при проведении исследований ионосферных мерцаний во время “прохождения” ДКИ по низким уровням ДН лучей риометра. Поэтому предложена методика межлучевой кросскорреляционной обработки данных риометрических наблюдений, которая позволяет существенно снизить влияние уровня флуктуаций интенсивности космического фона на точность определения характеристик ионосферных мерцаний. С использованием такой методики становится возможным применение многочисленных типичных 64- и 49-лучевых риометрических комплексов для непрерывных наблю-

дений за изменениями неоднородной структуры F-слоя ионосферы. Открываются также новые возможности использования панорамных риометров для исследований искусственных ионосферных неоднородностей, стимулированных излучением мощных нагревных стенов HAARP и EISCAT, расположенных на Аляске и в Северной Скандинавии.

Авторы работы считают своим приятным долгом поблагодарить В. Г. Галушко за полезные советы при обработке экспериментальных данных.

Работа выполнена в рамках НИР “Ятаган-2” (номер госрегистрации 0111U000063) и при частичной финансовой поддержке НИР “Шпицберген-13” (номер госрегистрации 0113U002656).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Detrick D. L. and Rosenberg T. J. A phased-array radio-wave imager for studies of cosmic noise absorption // *Radio Sci.* – 1990. – Vol. 25, No. 4. – P. 325–338.
2. Безродный В. Г., Воткинс Б., Галушко В. Г., Гровс К., Кащеев А. С., Чаркина О. В., Ямпольский Ю. М. Наблюдение ионосферных мерцаний дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 242–260.
3. Bezrodny V. G., Charkina O. V., Galushko V. G., Groves K., Kashcheyev A. S., Watkins B., Yampolski Y. M., and Murayama Y. Application of an imaging HF riometer for the observation of scintillations of discrete cosmic sources // *Radio Sci.* – 2008. – Vol. 43, RS6007, doi:10.1029/2007RS0037.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. – М.: Наука, 1978. – 463 с.
5. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосферной и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
6. Безродный В. Г., Чаркина О. В., Ямпольский Ю. М., Воткинс Б., Гровс К. Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 151–163.
7. Чаркина О. В. О возможности восстановления пространственного распределения ионосферных неоднородностей с помощью панорамных риометрических систем // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 125–131.

В. Г. Безродный¹, Б. Воткинс², О. В. Чаркина¹, Ю. М. Ямпольский¹

¹Радиоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Університет Аляски – Фербенкс, 505 Саут Чандалар Драйв, Фербенкс, США, АК 99775

МІЖПРОМЕНЕВА КРОСКОРЕЛЯЦІЙНА ОБРОБКА ДАНИХ ІОНОСФЕРНИХ МЕРЕХТІНЬ ДИСКРЕТНИХ КОСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ, РЕЄСТРОВАНІХ ПАНОРАМНИМИ ВЧ РІОМЕТРАМИ

Досліджено вплив флуктуацій інтенсивності галактичного космічного фону на точність визначення спектральних характеристик іоносферних мерехтінь дискретних космічних джерел (ДКД). Запропоновано оригінальну методику зниження такого впливу на результати відтворення характеристик іоносферних мерехтінь за даними спостережень ДКД з використанням панорамних ВЧ риометрів, котра ґрунтується на міжпроменевої кореляційній обробці. Працездатність та ефективність запропонованої методики проілюстрована результатами натурних вимірювань, виконаних з використанням 64-променевого риометра, розташованого поблизу сел. Гакона (Аляска, США).

V. G. Bezrodny¹, B. Watkins², O. V. Charkina¹, and Y. M. Yampolski¹

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²University of Alaska Fairbanks, 505 South Chandalar Drive, Fairbanks, AK 99775

INTER-BEAM CROSS-CORRELATION PROCESSING OF IONOSPHERIC SCINTILLATIONS OF DISCRETE COSMIC SOURCES OBSERVED BY IMAGING HF RIOMETERS

The influence of fluctuations in the galactic cosmic background intensity on the accuracy of determining the spectral characteristics of ionospheric scintillations of discrete cosmic sources (DCS) is analyzed. A novel technique is suggested to decrease this effect on the results of recovering the characteristics of ionospheric scintillations from data of DCS observations by imaging HF riometers. The method is based on cross-correlation processing of outputs from the riometer adjacent beams. The operability and efficiency of the suggested technique are illustrated by the results of in-situ measurements made using the 64-beam riometer located near the Gakona Village (Alaska, USA).

Статья поступила в редакцию 01.08.2013