

УДК 524.827-14(084)

СВОЙСТВА ОДНОМЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ КАРТ WMAP НА СКЛОНЕНИИ $\delta=41^\circ$

© 2008 М. Л. Хабибуллина, О. В. Верходанов, Ю. Н. Парийский

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 ноября 2007 г.; принята в печать 20 ноября 2007 г.

Рассматриваются одномерные сечения карт WMAP: ILC и фоновых компонент (синхротронного, свободно-свободного излучения и излучения пыли) и исследуются их корреляционные свойства на различных угловых масштабах. Обнаружены значимые корреляции сечений карты ILC и карт галактических фоновых компонент на склонении обзора, проводимого на РАТАН-600, $\delta = 41^\circ$. Уровень достоверности обнаруженных корреляций оценивался в случайных реализациях гауссова процесса, описывающего микроволновый фон. Предлагается метод выделения одномерных коррелированных интервалов из карт на сфере в зависимости от углового масштаба. Метод может быть использован при поиске негауссовых особенностей (пятен), обнаруженных в распределении микроволнового излучения и радиисточников в одних координатных площадках. Описываемый подход в дальнейшем можно использовать в наблюдательных программах на РАТАН-600 для поиска подобных негауссовых источников.

1. ВВЕДЕНИЕ

Космическая миссия WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) посвящена исследованию реликтового излучения (СМВ — Cosmic Microwave Background). Спутник обращается вокруг точки Лагранжа L2 и измеряет распределение температуры микроволнового фона на небесной сфере. К настоящему времени команда WMAP предоставила для астрономического сообщества исходные данные и результаты годичного и трехгодичного циклов измерения температуры СМВ [1–5]. Для восстановления сигнала СМВ из многочастотных наблюдений в этих работах применялся метод внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент, в результате использования которого была получена карта реликтового излучения, называемая также картой ILC и используемая для анализа низких гармоник с номерами мультиполей $\ell \leq 100$. Для построения карты ILC брались данные, полученные в пяти наблюдательных каналах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

Как было отмечено в ряде работ, посвященных анализу карты ILC и изучению статистики сигнала в ней [6–8], имеются серьезные аргументы, говорящие о том, что в данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад фоновых компонент, который, в частности, и дает обнаруживаемую негауссовость.

Этот вклад может проявляться и в обнаруженной ранее связи между очищенной картой микроволнового фона и галактическими компонентами излучения в квадруполье [9–11]. Однако карта ILC является единственной картой микроволнового фона с разрешением до $\ell \leq 100$, причем восстановленной из многочастотных наблюдений в пяти диапазонах на полной сфере. Карты фоновых компонент излучений (синхротронного, свободно-свободного и пыли) для всех наблюдательных полос, полученные в результате разделения, находятся в свободном доступе на сайте миссии WMAP (<http://lambda.gsfc.nasa.gov>).

Карта ILC позволяет исследовать свойства распределения микроволнового фона на больших угловых масштабах. В частности, можно изучить свойства микроволнового фона на склонении проводимого на радиотелескопе РАТАН-600 ($\delta \sim 41^\circ$) обзора RZF (RATAN-600 Zenith Field) [12]. В процессе этого обзора исследуются как распределение яркости неба в сантиметровом диапазоне длин волн, так и статистические свойства радиисточников [13].

Кроме того, интересно посмотреть, проявляется ли вклад фоновых компонент в одномерных сечениях карты ILC и если проявляется, то на каком уровне значимости это происходит. Это позволит оценить границы применимости метода разделения компонент при анализе одномерных векторов данных. Область RZF-обзора на карте синхротронного излучения в галактических координатах ограничена белой кольцевой линией (рис. 1).

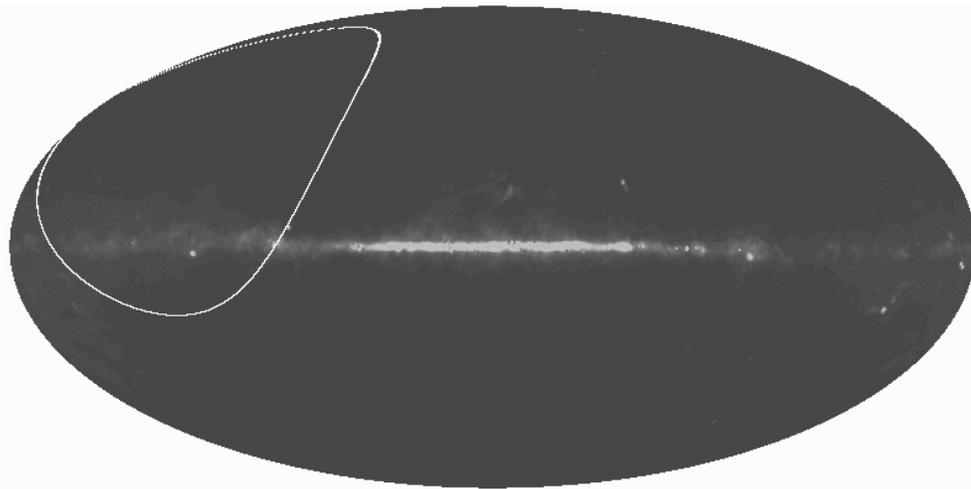


Рис. 1. Область RZF-обзора на карте синхротронного излучения в галактических координатах ограничена белой кольцевой линией.

В данной заметке мы исследуем в одномерных сечениях на склонениях RZF-обзора корреляционные свойства карт СМВ и фоновых компонент излучений (синхротронного, свободно-свободного и пыли), полученных командой WMAP. Мы также сравним эти сечения с данными случайных гауссовых полей, сгенерированных на полной небесной сфере для космологической модели Λ CDM, чтобы определить уровень достоверности и допустимых вариаций корреляционных коэффициентов.

2. КРОСС-КОРРЕЛЯЦИЯ ОДНОМЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ

Для исследования свойств карт фоновых компонент мы использовали данные распределения синхротронного излучения и излучения пыли в полосах, где соответствующее излучение дает максимальный вклад, а именно: K-канал — для синхротрона, W — для пыли. Для оценки вклада свободно-свободного излучения мы брали данные соответствующих карт в полосе V.

Корреляционные коэффициенты k_t для одномерных сечений вычислялись стандартным методом:

$$k_t = \frac{\text{cov}(x_{ILC,t}, x_{fgd,t})}{\sigma_{ILC,t}\sigma_{fgd,t}}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,ILC,t} - \overline{x_{ILC,t}})(x_{i,fgd,t} - \overline{x_{fgd,t}})}{\sigma_{ILC,t}\sigma_{fgd,t}},$$

где $x_{i,ILC,t}$ — i -ый элемент одномерного сечения карты ILC, записанный в виде вектора $x_{ILC,t}$ для заданного координатного интервала t ; $x_{i,fgd,t}$ — аналогичная предыдущей величина, где для построения вектора $x_{fgd,t}$ вместо карты ILC использовалась карта фоновой компоненты; $\overline{x_{ILC,t}}$ и $\overline{x_{fgd,t}}$

— соответственно средние значения векторов данных сечений карт ILC и фоновой компоненты, а $\sigma_{ILC,t}$ и $\sigma_{fgd,t}$ — их дисперсии.

Мы исследовали коррелированный сигнал на интервалах длительностью 6 мин и 1 час по прямому восхождению на склонении обзора RZF, $\delta = 41^\circ$ (рис. 1). Размеры интервалов выбирались, исходя из длительности сетов наблюдений точечных источников и длительности проведения обзоров на РАТАН-600. На рис. 2 показаны соответствующие корреляционные коэффициенты, рассчитанные для сечений карт ILC, излучения пыли, свободно-свободного и синхротронного излучений для интервалов длительностью 1 час. На рис. 3 показаны аналогичные коэффициенты, но с длительностью интервала разбиения 6 минут. Из рисунков видно, что существуют значимые корреляции и антикорреляции сечений карты ILC и карт галактических фоновых компонент, т.е. в одномерных сканах, выделенных из карты ILC, наблюдается остаточный сигнал от других фоновых компонент излучения: синхротронного, пыли и свободно-свободного. Для определения значимости уровня корреляций мы провели моделирование 100 реализаций случайного гауссового поля в космологической модели Λ CDM. Выбор числа модельных реализаций гауссового процесса был достаточно субъективным, хотя уже первые оценки для 40 и 50 моделей фона показали, что уровень вариаций коэффициента корреляции практически не меняется с ростом числа моделей. Тем не менее, в данной работе мы удвоили число реализаций для оценки допустимого уровня вариаций. Для полученных случайных карт были сделаны одномерные сечения в тех же координатах, что и в карте ILC, и проведена аналогичная процедура вычисления корреляции с картами фоновых компонент. По

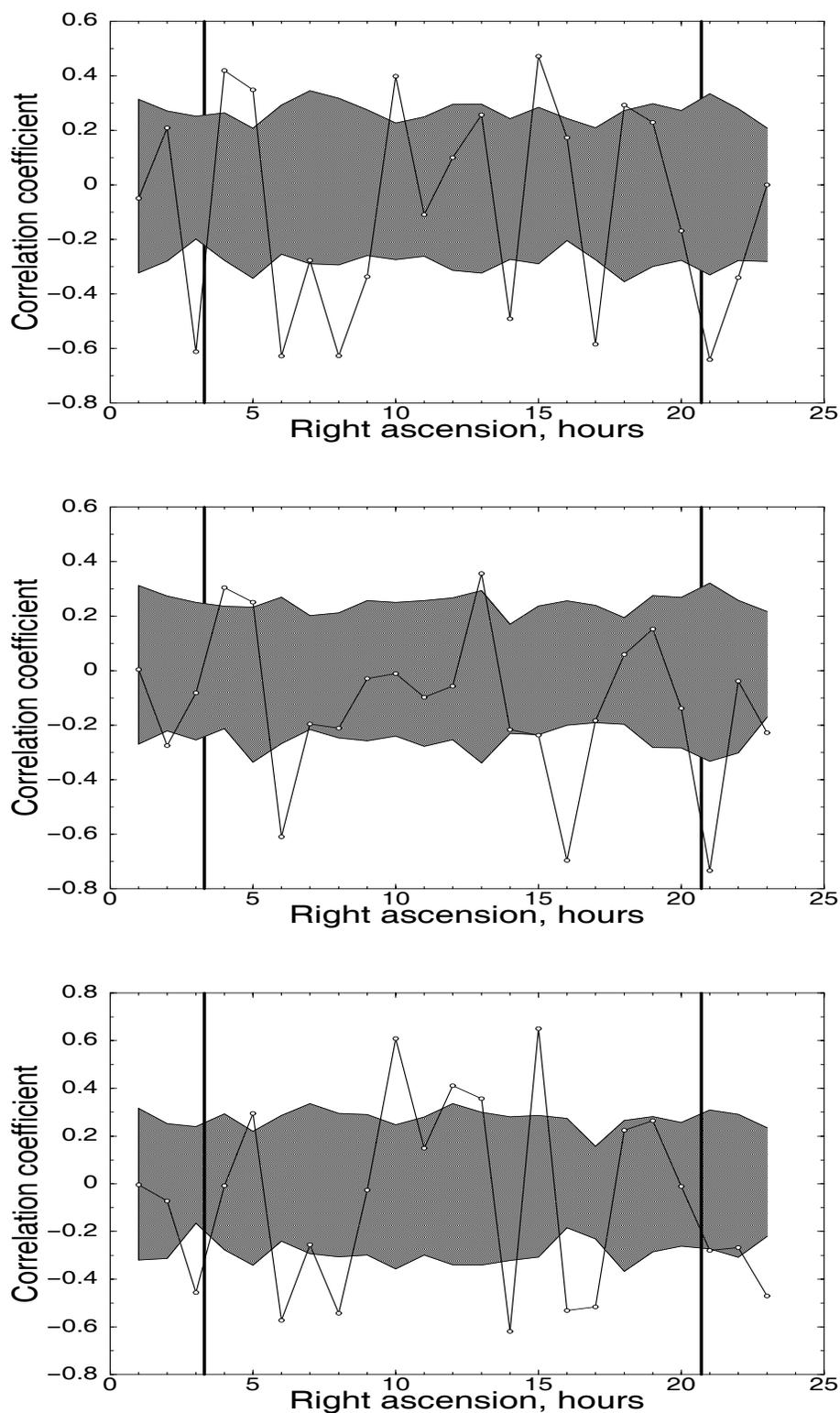


Рис. 2. Корреляционные коэффициенты для излучения (сверху вниз) синхротронного, пыли и свободно-свободного для интервалов разбиения длительностью 1 час. Жирная вертикальная линия показывает пересечение области Галактики. Сплошная линия показывает величину корреляции между ILC и соответствующей фоновой компонентой. Заштрихованная область отмечает возможный уровень вариации коэффициентов, определенный в 100 реализациях случайного гауссового поля.

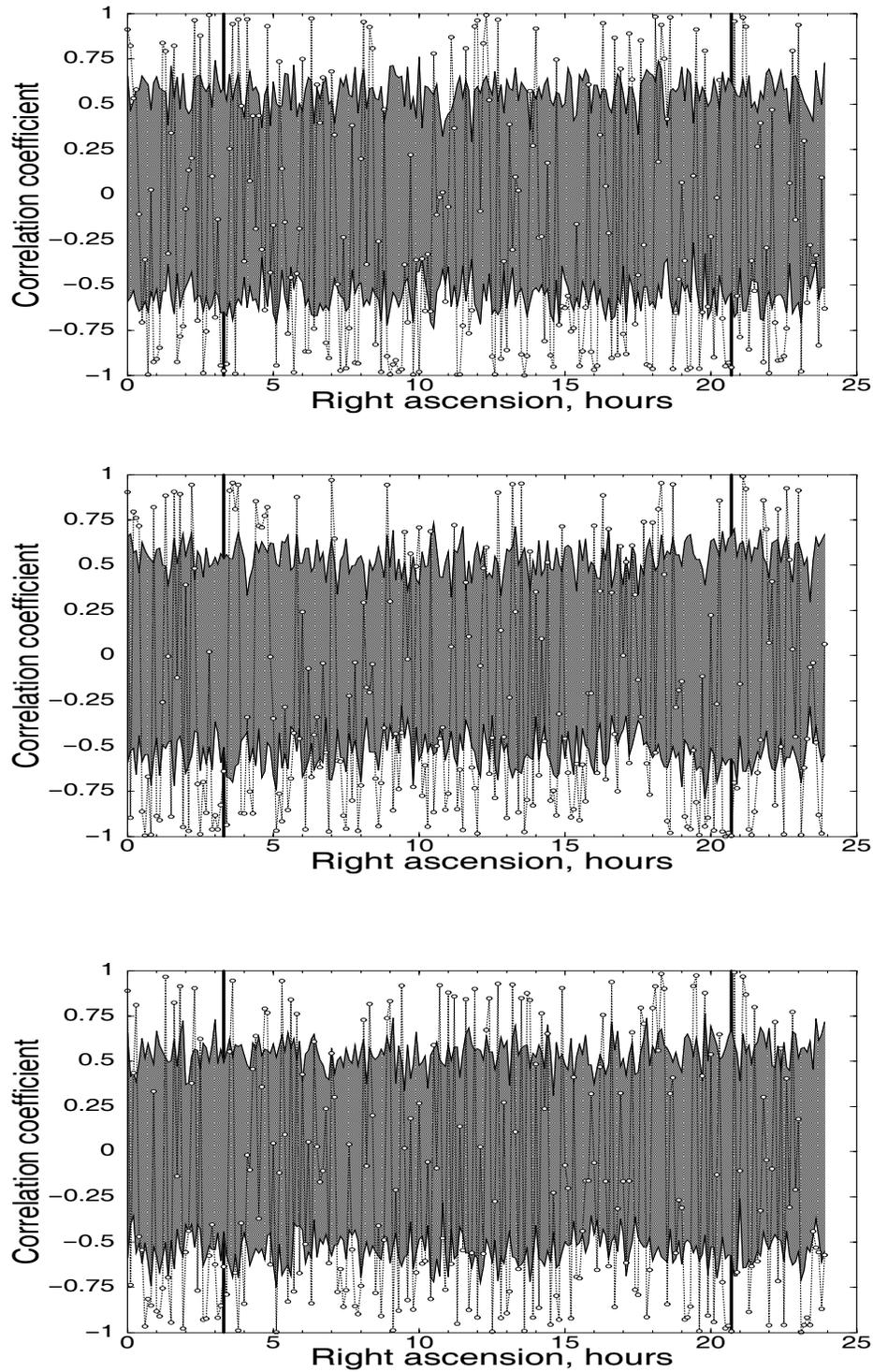


Рис. 3. Корреляционные коэффициенты для излучения (сверху вниз) синхротронного, пыли и свободно-свободного для интервалов разбиения длительностью 6 мин. Жирная вертикальная линия показывает пересечение области Галактики. Сплошная линия показывает величину корреляции между ICS и соответствующей фоновой компонентой. Заштрихованная область отмечает возможный уровень вариации коэффициентов, определенный в 100 реализациях случайного гауссового поля.

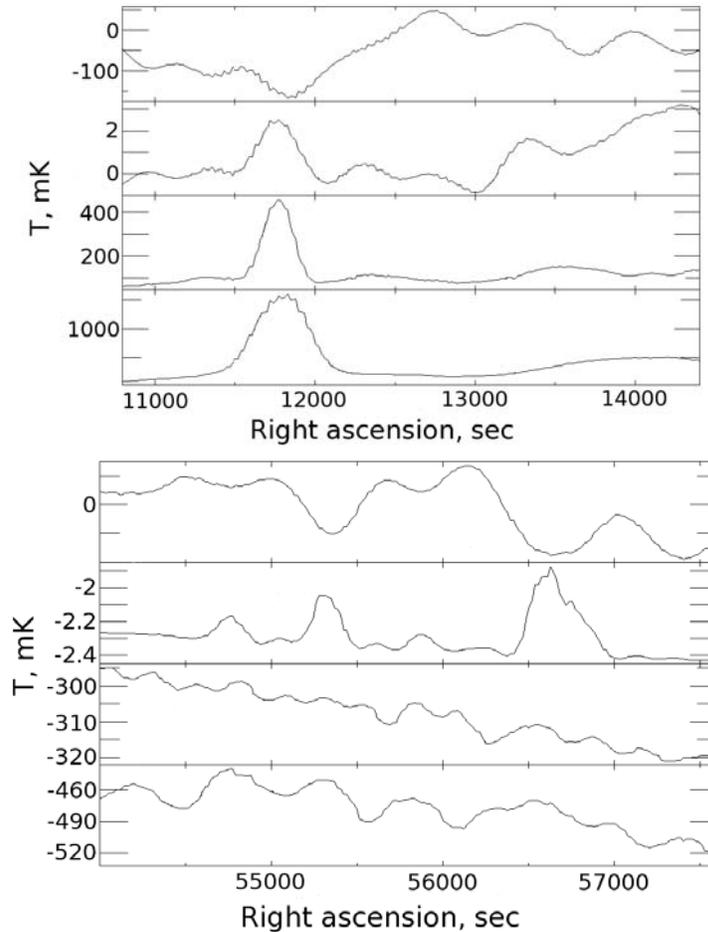


Рис. 4. Сечения областей, находящихся в плоскости Галактики (верхняя картинка: максимальный пик на трех нижних рисунках) и вне ее плоскости (нижняя картинка) в картах излучений (сверху вниз): ILC, пыли, свободно-свободного и синхротронного.

вариациям коэффициентов для случайных данных мы определили допустимый диапазон изменения значений случайной величины, приблизительно от $-2/3$ до $2/3$. На рис. 2 и 3 этот интервал показан серым цветом. Пример сечений областей, находящихся в плоскости и вне плоскости Галактики, на картах ILC и трех компонент показан на рис. 4.

Далее мы провели оценку числа превышений допустимого уровня корреляций в процентом представлении в зависимости от длительности интервала разбиения по прямому восхождению. На рис. 5 для различных фоновых компонент показаны зависимости относительного числа значений корреляционного коэффициента, выходящих за область допустимого уровня вариации, от длительности интервала разбиения. Номера мультиполя ℓ , приведенные на графиках, оценивались по соответствующему характерному масштабу сферической гармоники, пересекающей пиксел со стороны заданного углового размера на данном склонении. Т.е. размер пиксела θ_a^2 , где $\theta_a = 15 \times \cos(\delta)\theta_t$ —

размер в угловых минутах, соответствующий интервалу по прямому восхождению θ_t на заданном склонении δ , который пересчитывался в номер максимальной гармоники, определяемой на сфере, покрытой пикселями такого размера. Для получения характерного номера мультиполя по заданному размеру пиксела использовалась процедура *ntot* пакета GLESP [14]. На приведенном рисунке наблюдаемый максимум числа высоких корреляций на малых интервалах, близких к размеру диаграммы направленности, может быть связан с проблемами качества разделения компонент в предельном случае, пики на масштабах 20–50 мин по прямому восхождению — с усилением влияния излучения Галактики и неочевидности правильного удаления его фоновых компонент. Зависимости на масштабах больше 80 мин по прямому восхождению не отражают реальное распределение отсчетов, а приведены для демонстрации ограничения метода по угловому размеру: движение по круговому сечению не дает новой информации при увеличении интервала расчета корреляций.

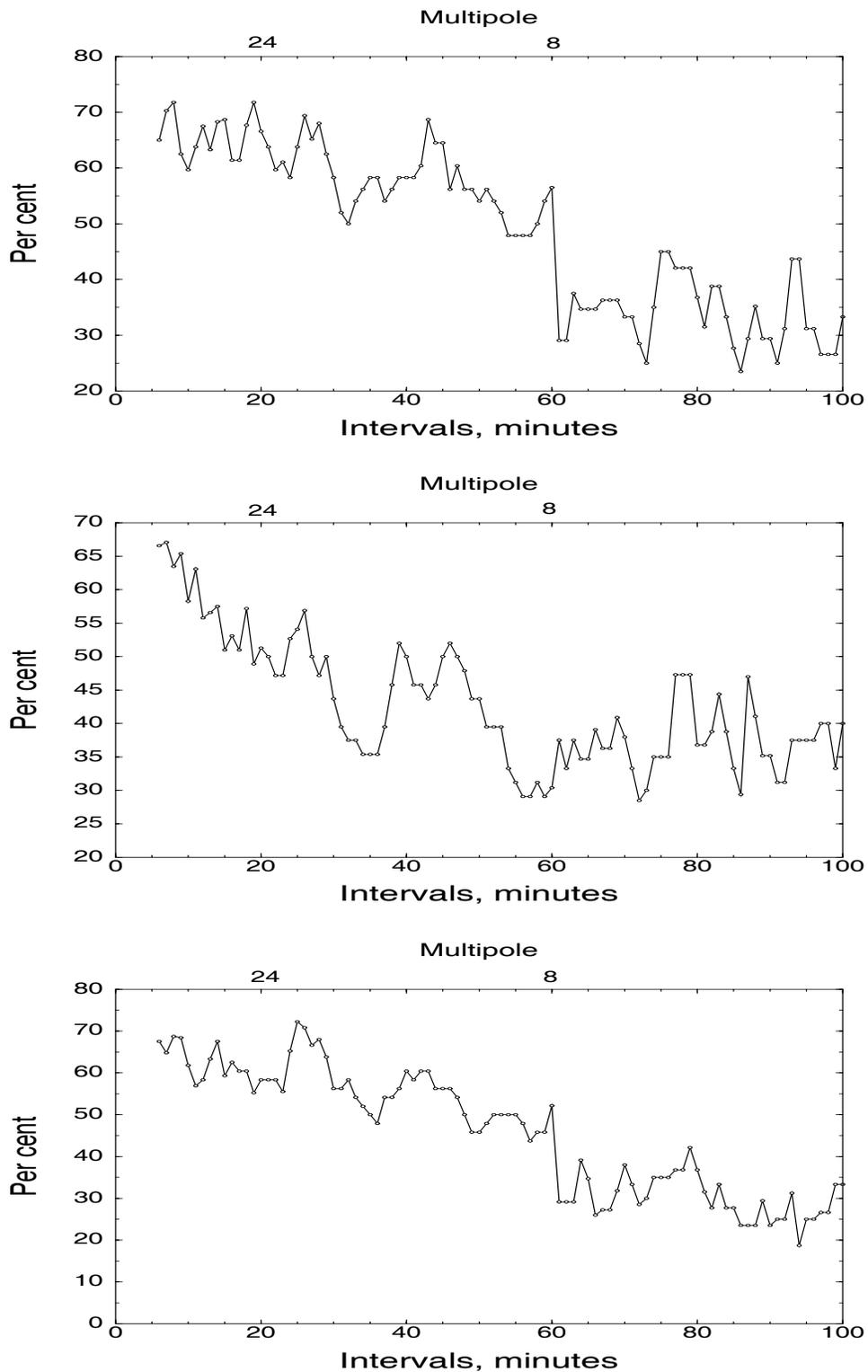


Рис. 5. Зависимость числа превышений в процентах над допустимым уровнем вариаций от длительности интервала разбиения для излучения (сверху вниз) пыли, свободно-свободного и синхротронного. По верхней горизонтальной оси графиков отмечены номера мультиполей ℓ , соответствующих угловому размеру. Наблюдаемый максимум числа высоких корреляций на малых интервалах, близких к размеру диаграммы направленности, может быть связан с проблемами качества разделения компонент в предельном случае, пики на масштабах 20–50 мин по прямому восхождению — с усилением влияния Галактики и неполного удаления ее фоновых компонент. Зависимости на масштабах больше 80 мин по RA не отражают реальное распределение отсчетов, а приведены для демонстрации ограничения метода по угловому размеру: движение по круговому сечению не дает новой информации при увеличении интервала расчета корреляций.

3. ВЫВОДЫ

Мы впервые применили метод поиска корреляций в одномерных сечениях карт фоновых излучений миссии WMAP и определили, в частности, что в сечениях карт WMAP на склонении $\delta = 41^\circ$ присутствует сигнал, коррелированный и антикоррелированный с данными разделяемых компонент. Этот факт соответствует обнаруженному ранее [7, 8] проявлениям неучтенного вклада всех трех распределенных мешающих компонент и может осложнить сравнение данных микроволнового фона, полученных к настоящему времени в эксперименте WMAP и на РАТАН-600, на масштабах до 6 минут по прямому восхождению на склонении $\delta \sim 41^\circ$. Полученные результаты подтверждают гипотезу о негауссовости карты ILC в одномерных сканах [7, 8]. Кроме того, на угловых масштабах, характерных для плоскости Галактики ($\ell = 10 - 20$), обнаружены значимые корреляции с галактическими компонентами фона. Это уже было показано в упомянутых работах, но с помощью метода кластерного анализа. В данной работе впервые показано, что корреляции также присутствуют и на масштабах $\ell \sim 100$. Это говорит о возможных проявлениях остаточных невязок при выделении сигнала на масштабах диаграммы направленности антенны WMAP в полосе К.

В работе продемонстрировано, что простым и малозатратным по вычислительным ресурсам методом поиска корреляций, варьируя лишь угловой масштаб поиска, можно в одномерном случае качественно проверить карту выделяемого сигнала. Этот подход, ранее не применявшийся, является мощным дополнением к методу анализа негауссовости с помощью Фурье-коэффициентов одномерных кольцевых сечений, используемому в работе [15].

Этот метод может быть использован не только для оценки уровня корреляций на заданных сечениях карт на сфере, но и для поиска коррелированных положительных и отрицательных пиков у распределений различных фоновых излучений и источников на сфере, например, таких как негауссовое коррелированное отрицательное пятно в данных WMAP и каталога источников NVSS [16, 17].

Для оценки значимости уровня негауссовости мы смоделировали 100 реализаций чистого гауссового сигнала на небесной сфере. Для этих случайных карт была проведена такая же процедура поиска корреляций, как и для исследуемого сигнала СМВ. По уровню корреляции на различных угловых масштабах был оценен доверительный интервал, выход за пределы которого интерпретируется нами как локальное проявление негауссовости на данном склонении. Если заменить известные распределения яркости фона на небе на

распределение дисперсии плотности потока радиоисточников (например каталога NVSS) в заданном скользящем поисковом боксе, то аналогичной процедурой поиска корреляций с варьированием углового масштаба можно будет обнаружить совпадения положения пятен различного размера как с одинаковым, так и с противоположным знаком в картах СМВ и в картах распределения радиоисточников. Результаты применения этого метода будут опубликованы в следующей работе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность за использование доступного архива NASA (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. В работе использован пакет анализа данных СМВ на сфере GLESP¹ [14, 18] и система обработки одномерных данных FADPS² [19]. Данная работа была поддержана грантом РФФИ No. 05-07-90139 и грантом “Ведущие научные школы России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
4. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J.* **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
5. D. N. Spergel, R. Bean, O. Doré, et al., *Astrophys. J.* **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
6. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way *Astrophys. J.* **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
7. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. J.* **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
8. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
9. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Int. J. Mod. Phys. D*, submitted (2006), astro-ph/0609409.
10. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophys. Bull.* **62**, 218 (2007).
11. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, arXiv:0707.1484 (2007).
12. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., *Gravitation & Cosmology* **10**, 139 (2005), astro-ph/0508065.

¹<http://www.glesp.nbi.dk>

²http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

13. N. N. Bursov, Yu. N. Pariiskii, E. K. Maiorova, et al., *Astron. Rep.* **51**, 197 (2007).
14. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. SAO* **58**, 40 (2005).
15. L.-Y. Chiang and P. D. Naselsky, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **380L**, 71 (2007), arXiv:0705.1626.
16. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, arXiv:0704.0908 (2007).
17. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., arXiv:0710.5737 (2007).
18. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
19. O. V. Verkhodanov, in *Proceedings of the International Meeting on Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, Charlottesville, USA*, Eds. G. Hunt, H. E. Payne, (ASP Conf. Ser., **125**, 1997) p.46.

PROPERTIES OF ONE-DIMENSIONAL SECTIONS OF WMAP MAPS AT THE DECLINATION OF $\delta = 41^\circ$

M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, Yu. N. Pariiskij

One-dimensional sections of WMAP maps—ILC and background components (synchrotron, free-free radiation and dust emission) are investigated and their correlation properties on various angular scales are analyzed. Sections of the ILC map are found to correlate significantly with the maps of Galactic background components at the $\delta = 41^\circ$ declination of RATAN-600 survey. The confidence level of the correlations found is estimated by analyzing random realizations of the Gaussian process that describes the microwave background. A method for identifying correlated intervals from maps on the sphere as a function of angular scale is proposed. This method can be used to search for non-Gaussian features (spots) found in the distribution of microwave background and radio sources in the same coordinate areas. The approach described can also be used to search for such non-Gaussian sources in observational programs performed on RATAN-600 radio telescope.