

УДК 524.827-77

О ТРЕБОВАНИЯХ К МЕТОДАМ “ПРОСВЕТЛЕНИЯ” АТМОСФЕРЫ ПРИ НАЗЕМНЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ ФОНОВЫХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ ВСЕЛЕННОЙ

© 2009 Т. А. Семенова, Ю. Н. Парийский, П. Г. Цыбулев

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 октября 2008 г.; принята в печать 1 апреля 2009 г.

В работе представлены результаты обработки массива данных, полученных на РАТАН-600 в рамках проекта “Генетический Код Вселенной”, для оценки вклада атмосферного шума при наблюдениях фоновых излучений Галактики. Атмосферный шум является доминирующим на временных масштабах более 10–100 секунд. Показана эффективность предварительной селекции данных с малым атмосферным шумом на интересующих наблюдателя временных масштабах. С учетом реального атмосферного шума, оценены возможности проекта “Генетический Код Вселенной” при различных временах накопления исследуемой области неба.

Ключевые слова: *радиостанции*

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный шум доминирует над белым шумом радиометров при наземных исследованиях протяженных объектов на коротких волнах. РАТАН-600 имеет ряд преимуществ, связанных с его большим линейным размером [1–15]. Действительно, фильтрация “апертурой” значительно снижает атмосферный шум, но чем выше чувствительность радиометров, тем сильнее роль атмосферного шума. Их чувствительность за последние годы была значительно повышена, и это приводит к необходимости поиска новых эффективных методов борьбы с атмосферным шумом на РАТАН-600. Проблема оказалась особенно острой при исследовании флуктуаций реликтового фона, где исследуются угловые масштабы порядка градуса. Время прохождения таких масштабов через диаграмму РАТАН-600, как правило, больше времени $t = D/v$, (отношения размера апертуры D к скорости ветра v), и “апертурная” фильтрация становится менее эффективной. Многочастотная фильтрация атмосферной компоненты шума оказалась полезной, но малоэффективной при малом атмосферном шуме. Основой для учета влияния атмосферного шума в предыдущих исследованиях было использование волны вблизи линии водяного пара (1.35 см) как индикатора атмосферного шума. Такой подход кажется эффективным для устранения атмосферного шума в исследованиях на больших длинах волн фонового излучения Галактики: яркость синхротронной и свободно-свободной компоненты шума резко падает с

уменьшением длины волны. При исследованиях реликтового фона все оказывается сложнее, т.к. именно на коротких сантиметровых волнах излучение фона максимально, и процедура его очищения от атмосферного шума значительно усложняется. До ее освоения мы предлагаем простой вариант селекции или весового осреднения данных с использованием разных методов, включая Вейвлет-анализ. Эффективность этих методов продемонстрирована на примере данных RZF-обзора. По аналогии с принятой в международной практике терминологии “окна прозрачности” Вселенной (<http://lambda.gsfc.nasa.gov>, <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>, “Bluebook”), мы попытались оценить “окно прозрачности” атмосферы в диапазоне волн, доступных РАТАН-600, с учетом экспериментально исследованных отклонений флуктуаций радиоизлучения от белого шума.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ШУМЕ АТМОСФЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА РАТАН-600

Атмосфера Земли фильтрует излучение, падающее на радиотелескоп, поглощая его часть. Даже в окне прозрачности поглощение на коротких сантиметровых волнах составляет около 10%, и эти потери необходимо учитывать. Однако значительно сложнее учитывать вариации собственного излучения атмосферы, которые ухудшают чувствительность эксперимента в десятки, сотни и даже

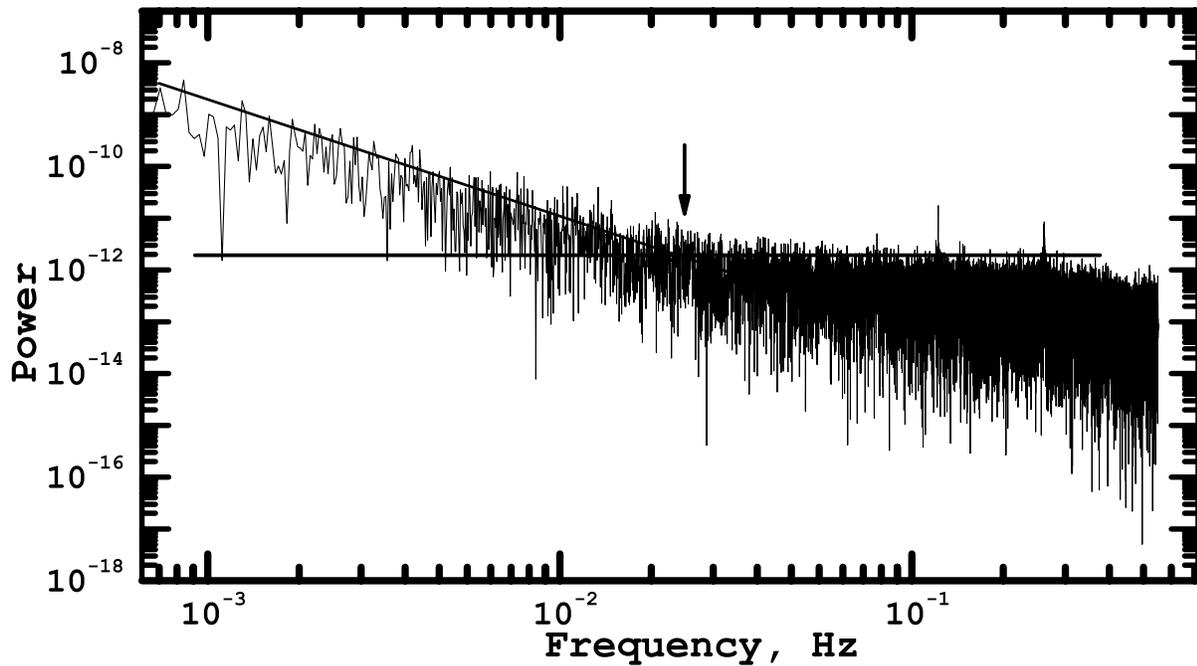


Рис. 1. Пример среднего спектра мощности для усредненного за 90 дней атмосферного шума на волне 1.38 см. Положение излома указано стрелкой.

тысячи раз. На исследуемых временных масштабах (порядка 5 минут) температурные вариации атмосферы достигают 1 К, что примерно на 60 дБ выше исследуемых флуктуаций микроволнового фона и примерно на 20 дБ выше шума радиометра на этих же временных масштабах.

Методы борьбы с атмосферным шумом на РАТАН-600 изложены в [1–16].

В данной работе мы приведем сведения о влиянии атмосферного шума по данным RZF-обзора, где уже накоплены сотни суточных многочастотных сканов. Чувствительность радиометров в этом обзоре была на порядок выше, чем в атмосферных исследованиях 70-х годов. Начнем с наиболее подверженной атмосферному шуму волны длиной 1.38 см, близкой к линии водяного пара 1.35 см. Турбулентный характер флуктуаций в атмосфере приводит к росту мощности в пространственном спектре радиоизлучения атмосферы [2, 3], имеющий вид $1/f^\alpha$ (f — частота) при увеличении угловых масштабов. Проще всего роль этого шума оценивать по положению излома в пространственном спектре сигнала на выходе радиометра f_{knee} . На частотах выше f_{knee} доминирует белый шум радиометра, а на частотах ниже доминирует шум атмосферы. На Рис. 1 показан пример среднего спектра мощности для усредненного за 90 дней атмосферного шума. При наблюдениях на всех волнах, доступных РАТАН-600, излом смещается левее относительно 1.38 см (при близкой чувствительности радиометров для разных длин волн) в

соответствии со спектром радиоизлучения атмосферы в сантиметровом диапазоне [8].

Мощность атмосферного шума зависит от состояния атмосферы и может сильно меняться со временем. Это видно по статистике данных о дисперсии шума. Ее можно проводить по любым интересующим наблюдателя временным масштабам. В качестве примера изменения атмосферного шума со временем на Рис. 2 показано перемещение положения излома в пространственном спектре сигнала на выходе радиометра для области RZF-обзора $0h < RA < 24h$ в различные дни наблюдений. Около 20% записей имеют положение излома в более высокочастотной области, чем в среднем по всем записям.

Большой разброс положения излома спектра f_{knee} приводит к необходимости селекции сканов по их качеству. Наблюдатели знают, что простое среднее многих сканов может дать результат хуже, чем одиночная запись с малым атмосферным шумом.

Опыт показал, что спектр мощности атмосферного шума можно характеризовать двумя параметрами — положением излома спектра на шкале частот и наклоном его на низких частотах (малых l). По данным РАТАН-600 медианный наклон атмосферного спектра (в дважды-логарифмическом масштабе) близок к спектру Колмогоровской турбулентности [8]. Это позволяет оценивать роль атмосферного шума на любых длинах волн приемно-измерительного комплекса РАТАН-600

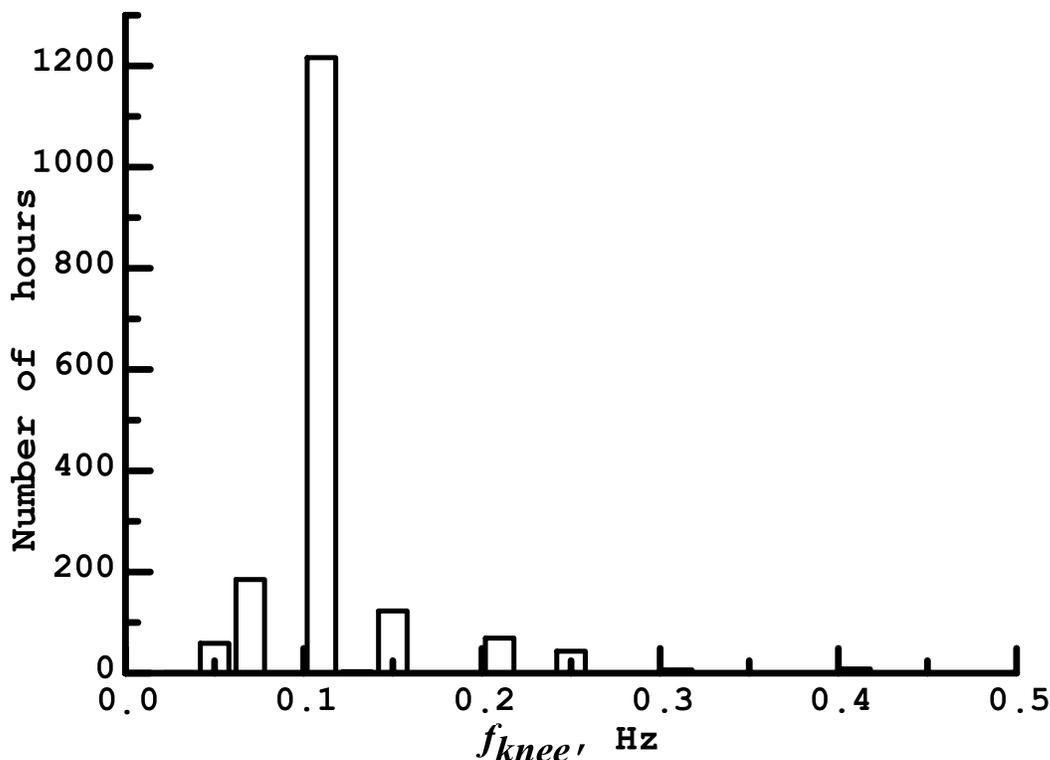


Рис. 2. Распределение числа часовых записей с определенным положением частоты излома спектра f_{knee} для области RZF-обзора $0h < RA < 24h$ в различные дни наблюдений на волне 1.38 см. Использовано временное окно 600 секунд ($l > 50$, l — номер мультиполя в разложении яркостной температуры неба по сферическим гармоникам).

по измерениям на волне 1.38 см. Ожидалось, что на волне 1 см (матричный радиометрический комплекс МАРС-3) среднее положение излома спектра мощности переместится к частоте 0.03 Гц. Предварительные результаты прямых измерений подтвердили эти оценки.

3. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ШУМА

В данной работе мы рассмотрим только некоторые методы чистки атмосферного шума: метод Вейвлет-анализ (частотно-временная чистка) и “медианный” метод.

Глубина чистки данных определяется процентом реально используемых сканов в обработке.

Способ двумерной чистки демонстрируется на Рис. 3. На нем одиночный 24-часовой скан разложен по l . На плоскости (RA, l) хорошо видны области аномального шума. При удалении этих областей из массива данных можно ощутимо повысить отношение сигнал/шум.

Для высоты RZF-обзора ($0h < RA < 24h$, $\delta = 41^\circ 30'$) имеем $l = 115200/t$, где t выражено в секундах времени, $l = 2\pi/\theta$, $v_\omega = 2\pi/86400 \cos \delta$ (рад/сек) — угловая скорость источника для заданного склонения, $\theta = v_\omega t$, тогда $l = 86400/t \cos \delta$.

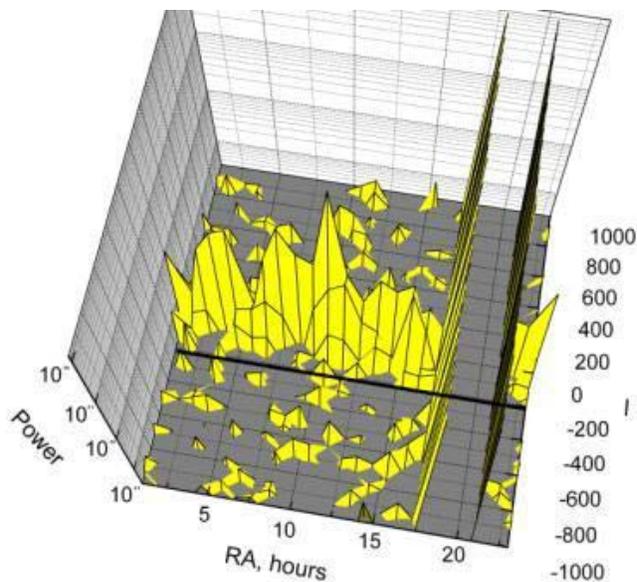


Рис. 3. Области аномального шума атмосферы для одиночного скана на малых значениях l ($l < 100$) и его проникновение на более высокие пространственные частоты, до $l=1000$ и более. Удаление части данных должно привести к более качественной оценке средних характеристик шума Вселенной.

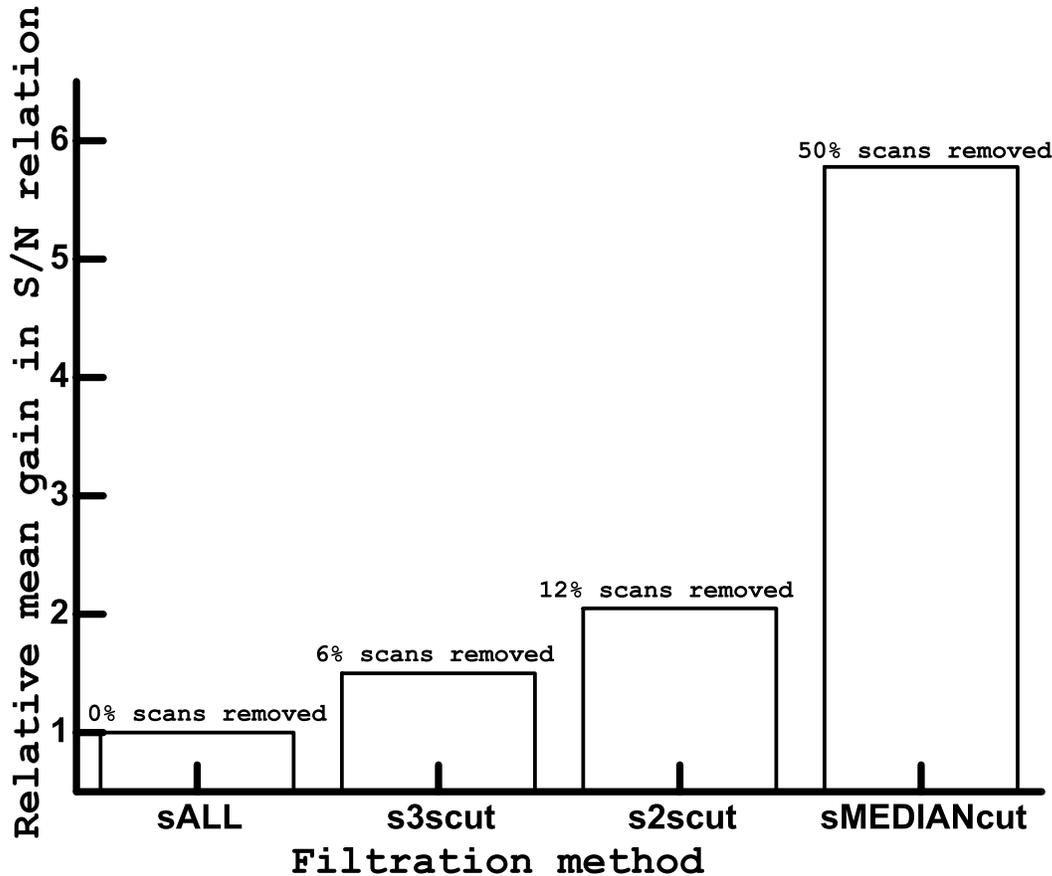


Рис. 4. Эффективность различных условий чистки атмосферного шума на волне 1.38 см. Здесь sALL — использован весь массив без исключения, отношение S/N принято за единицу; s3scut — увеличение отношения S/N при исключении записей с шумами более 3σ ; s2scut — 2σ . sMEDIANcut — выигрыш в отношении S/N при удалении 50% записей, после их сортировки по уровню шума.

На Рис. 4 показана эффективность чистки атмосферного шума.

Видно, что чистка дает ощутимый выигрыш в отношении S/N при сравнительно небольших потерях данных.

На Рис. 5 представлены суммарные сканы, полученные на РАТАН-600, до и после чистки атмосферного шума.

Далее мы используем полученные результаты при оценке возможностей исследования реликтового фона на РАТАН-600 по программе “Генетический Код Вселенной” (<http://brown.nord.nw.ru/projects.htm>).

4. АТМОСФЕРНЫЙ ШУМ И АНИЗОТРОПИЯ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Все основные эксперименты по реликтовому излучению Вселенной связаны с поиском статистических свойств реликтового шума, которые оцениваются по спектру мощности в Фурье-образе

карт неба (для малых областей) или по квадрату коэффициентов разложения в полиномы Лежандра для больших областей, где необходимо учитывать сферичность неба.

Для внеатмосферных экспериментов основными ограничениями точности оценок спектра мощности являются достигнутая чувствительность на элемент размером $1/l$, ширина антенного фильтра, определяемого размерами радиотелескопов, и числом элементов размером $1/l$ в исследуемой области неба.

Это приводит к формулам аналогичным приведенным в “Bluebook” (<http://lambda.gsfc.nasa.gov>, <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>). Далее мы будем пользоваться обозначениями, принятыми консорциумом PLANCK Surveyor mission 2008. Если измеряется гармоника с номером l в спектре мощности, то ее точность измерения оказывается равной

$$(\Delta C_l)^2 = 1/[(2l + 1)\Delta\Omega_{sky}] \times [(C_l + w^{-1}W^{-2})^2],$$

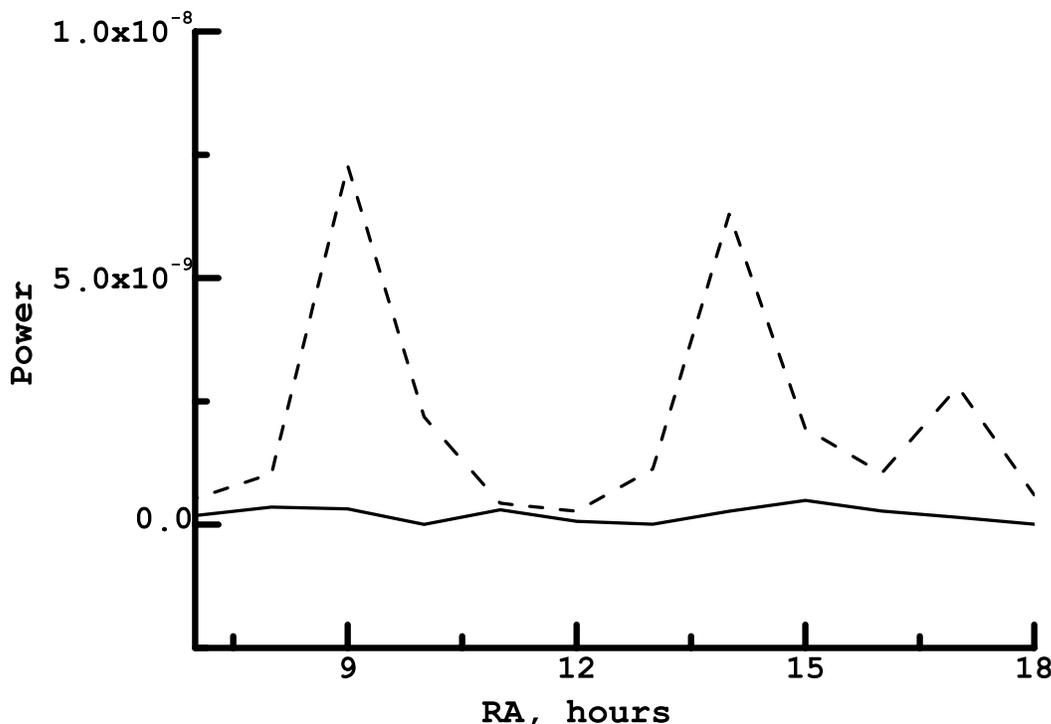


Рис. 5. Суммарные сканы до (прерывистая линия) и после (сплошная линия) чистки атмосферного шума методом Вейвлет-анализа на масштабах $l = 40$. Целесообразность такой чистки кажется очевидной. Удаление 30% плохих данных на плоскости (l, RA) Рис. 3 привело к снижению мощности атмосферного шума более чем на порядок.

где $\Delta\Omega_{sky}$ — исследуемая доля небесной сферы;

$$w = (s_{pix} \Theta_{FWHM})^{-2};$$

$s_{pix} = NET/\tau_{pix}$ — шум на элемент разрешения при наблюдении с радиометром, имеющим чувствительность NET (Noise Equivalent Temperature) при накоплении 1 сек;

$\tau_{pix} = T/N_{pix}$, T — полное время эксперимента;

$N_{pix} = \Omega/\omega$, Ω — область обзора (телесный угол);

ω — элемент разрешения;

Θ_{FWHM} — полная ширина диаграммы радиотелескопа на уровне половинной мощности;

$$W = \exp[-l(l+1)/2l_{beam}^2],$$

$l_{beam} = (8 \ln 2)^{(1/2)} \times (\Theta_{FWHM})^{-1}$ (для диаграммы с гауссовой формой).

Для идеального эксперимента член $w^{-1}W^{-2}$ исчезает, и точность эксперимента определяется размером области неба, $\Delta\Omega_{sky}$ (шумом COSMIC VARIANCE).

Для наземного эксперимента полезно формализовать роль атмосферного шума в той же терминологии, введя дополнительный “атмосферный” фильтр, уменьшающий чувствительность эксперимента в исследованиях спектра мощности фонового излучения неба по-разному на различных l . Если антенный фильтр снижает чувствительность

эксперимента к большим l , то атмосферный шум снижает чувствительность к малым l . Если спектр мощности белого шума не зависит от частоты (на высоких частотах шум эквивалентен белому шуму радиометра, на низких частотах может доминировать шум атмосферы, при $f_{knee} \gg f$), можно ввести понятие “эффективного” шума радиотелескопа, заменив в Фурье-области спектр этого шума, $\lg P(f)$, на $\lg P(f)_{eff} = \lg P(1 + \lg f_{knee}^2 / \lg f^2)$. Теперь можно оценить реальные возможности RZF-эксперимента в исследовании анизотропии реликтового фона с учетом роли основного источника шума на малых l и накопленного на РАТАН-600 опыта.

Все эксперименты с одинаковым разрешением можно сравнивать по параметру $4\pi\Delta\Omega_{sky} \times NET_{eff}^2/T$. Для космических экспериментов $NET_{eff} = NET$, а для наземных экспериментов надо учесть роль атмосферного шума, различного для разных угловых масштабов.

Шум атмосферы искажает результаты эксперимента. Оценки по приведенным формулам показывают, что флуктуационная чувствительность радиометров РАТАН-600 может быть реализована только на достаточно больших l ($l > 1000$), если не использовать никаких методов борьбы с атмосферным шумом. Для $l > 1000$ ожидаемая

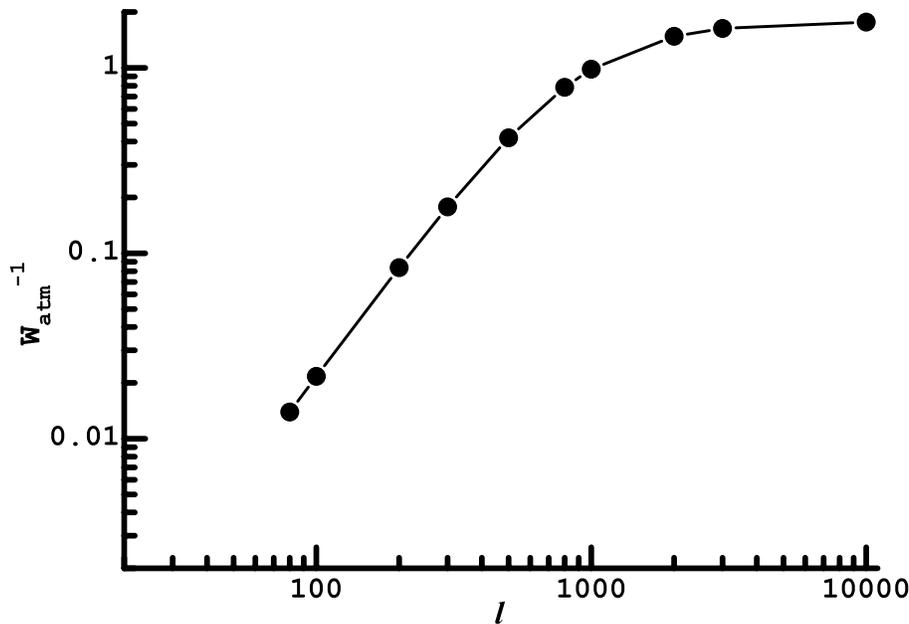


Рис. 6. Область пространственных частот, пропускаемых атмосферным фильтром на волне 1 см без применения методов чистки.

чувствительность проекта “Генетический Код Вселенной” сопоставима с проектной чувствительностью эксперимента PLANCK в 2011 году и должна значительно превосходить результаты WMAP. При исследовании более крупных масштабов потерю чувствительности следует либо компенсировать увеличением полного времени эксперимента, либо реализовать обсуждавшиеся в проекте “Генетический Код Вселенной” и в текущей литературе методы подавления флуктуаций теплового излучения атмосферы. Накопленный на РАТАН-600 сегодня материал по шуму атмосферы в сантиметровом диапазоне волн позволяет назвать количественные требования к глубине фильтрации атмосферного шума в зависимости от интересующего пользователя углового масштаба (или l). Так, для $l = 800, 500, 220$ глубина подавления должна составлять 1.5, 2.05 и 4 раза соответственно для экспериментов с матричной радиометрической системой МАРС-3 на волне 1 см.

Чем больше элементов в матрице, тем менее выгодно идти по пути увеличения времени эксперимента, так как атмосфера “когерентна” на всех элементах матрицы, и при усреднении шумов радиометров относительная роль атмосферного шума будет расти. Поэтому мы считаем, что основой должны быть методы тщательной селекции данных (например, Вейвлет-анализ) и методы фильтрации остаточного атмосферного шума с использованием многочастотности приемно-измерительного комплекса или с помощью “широкого сканирования” [8]. Возможно, для малых l окажется эффек-

тивной чистка с использованием нового комплекса регистрации метеоданных, созданного специально для этой цели в фокусе РАТАН-600.

Увеличение шума с понижением l эквивалентно введению фильтра, понижающего чувствительность к низким мультиполям. Зная f_{knee} , легко построить частотную характеристику этого “атмосферного” фильтра W_{atm} в пространстве спектра мощности (Рис. 6).

Атмосферный фильтр ухудшает отношение S/N в области низких пространственных частот (малых l), в противоположность антенному фильтру, который подавляет высокие частоты вплоть до полного обрезания на частоте D/λ . На высоких частотах шум растет из-за малой величины постоянной времени, а на низких — из-за атмосферы. Появляется понятие “оптимальной частоты” или оптимального временного масштаба $1/f$.

Мы считаем, что приведенные выше оценки влияния шума атмосферы достаточно осторожны, так как не учитываются возможности многочастотных атмосферных чисток, использующих различия в спектральных свойствах атмосферного шума и шума эпохи рекомбинации водорода. Не завершены и исследования метода фильтрации атмосферного шума сканированием на углы более $1/l$.

Одно из основных назначений крупной матричной радиометрической системы МАРС-3 — исследование поляризации реликтового излучения. Каждый радиометр матрицы регистрирует разность сигналов между ортогонально поляризованными компонентами входного сигнала в близких

точках на небе. Атмосферный шум практически не поляризован, но многочисленные инструментальные причины не позволяют разностный сигнал свести к нулю даже при неполяризованном фоне неба. Этот сигнал может быть разным для каждого из 16 каналов. Легко убедиться, что мощный неполяризованный атмосферный шум, проникающий через апертуру РАТАН-600 в радиометры матрицы, может быть использован для устранения различий в каналах матрицы практически до нуля еще до операции взятия разности между парой каналов, и эта возможность уже реализуется. Для этого вначале производится выравнивание атмосферного вклада в каждой паре каналов одного радиометра, и только после этого производится их вычитание. В результате такого выравнивания вкладов атмосферы, разностные сигналы отдельных радиометров практически тождественны. Чем больше число элементов в матрице, тем для меньших l можно применять такую чистку от шума атмосферы. Напомним, что $l \cong F/L$, где F — фокусное расстояние радиотелескопа, а L — размер матрицы в фокальной плоскости. Полный проект “Генетический Код Вселенной” предусматривает использование 128 усилителей и 256 рупорных излучателей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемые в работе методы селекции данных и чистки атмосферного фона дают ощутимый выигрыш в чувствительности при сравнительно небольших потерях. Приведенные оценки показывают возможность начала регулярных наблюдений на матричной радиометрической системе МАРС-3, по крайней мере, для исследования по основной задаче — мелкомасштабная анизотропия реликтового фона и его поляризация на этих масштабах. Для $l > 1000$ это утверждение сделано с учетом реальных свойств атмосферного шума на РАТАН-600. Для $l < 1000$ мы надеемся, что уже освоенные простые методы селекции данных и предложенные здесь методы чистки атмосферного шума окажутся достаточными для достижения чувствительности выше достигнутой в эксперименте WMAP на всех угловых масштабах “Сахаровских Осцилляций”.

Пробные наблюдения на комплексе МАРС-3 показали эффективность глубокой чистки поляризационных данных от проникновения атмосферного шума из-за неравенства свойств каналов с ортогональными модами с помощью неполяризованного низкочастотного атмосферного шума. С другой стороны, следует иметь в виду, что матричный комплекс из любого числа элементов чувствует атмосферный шум так же, как и один ее элемент. Если шум радиометров независим, то атмосферный шум оказывается когерентным и не усредняется.

Для его уменьшения необходимы только многосубточные наблюдения.

Если нас интересуют не слишком малые l , можно использовать дифференциальный метод широкого сканирования, и ограничением на l здесь будут размеры вторичного зеркала ($l > F/L$, где L — размер фокальной линии вторичного зеркала, F — фокусное расстояние). Напомним, что вся атмосфера в ближней зоне не подвержена аберрациям. Для чистки первого максимума “Сахаровских Осцилляций” ($l = 220$) необходим дополнительный радиометр на расстоянии 1–2 м от основной матричной радиометрической системы МАРС-3.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента “Поддержка научных школ” и Российского Фонда Фундаментальных Исследований грант 07-02-12055-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Hoerner, Publ. NRAO **1**, 1 (1961).
2. H. E. Jorgensen, E. V. Kotok, I. P. Naselsky, et al., e-Print: arXiv: astro-ph/9910295v1 (1999).
3. P. D. Naselsky, I. D. Novikov, Yu. N. Parijskij, and P. G. Tcibulev International Journal of Modern Physics D **8**, 581 (1999).
4. T. Orhang, Publ. NRAO **14**, 1 (1962).
5. G. Pooley and M. Ryle, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **139**, 515 (1968).
6. Н. И. Ананов, А. Е. Башаринов, К. П. Кирдяшев и Б. Г. Кутуза, Радиотехника и электроника **10**, 1941 (1965).
7. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский *Радиотелескопы и радиометры* (“Наука”, Москва, 1973), 416.
8. Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, Известия ВУЗов, радиофизика **12**, 1773 (1968).
9. К. П. Кирдяшев, Радиотехника и электроника **12**, 2099 (1967).
10. Д. Краус, *Радиоастрономия* (“Советское радио”, Москва, 1973), 456.
11. Б. Р. Левин, *Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике* (“Советское радио”, Москва, 1957).
12. Ю. Н. Парийский, С. Э. Хайкин, Изв. ГАО АН СССР **164**, 27 (1960).
13. Т. А. Семенова, Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Астрон. ж. **84**, 291 (2007).
14. А. А. Стоцкий, Радиотехника и электроника **14**, 387 (1969).
15. А. А. Стоцкий, Н. Д. Умарбаева, Радиотехника и электроника **9**, 1787 (1970).
16. В. И. Татарский, *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (“Наука”, Москва, 1967).

THE REQUIREMENTS TOWARD THE METHODS OF “CLEARING” THE ATMOSPHERE IN GROUND-BASED RADIO-ASTRONOMICAL OBSERVATIONS OF BACKGROUND EMISSIONS OF THE ATMOSPHERE**T. A. Semenova, Yu. N. Parijskij, P. G. Tsybulev**

The results of a reduction of the dataset obtained with the RATAN-600 within the framework of the “Cosmological Gene” project are reported. The project was performed in order to estimate the contribution of atmospheric noise in observations of Galactic background radiation. Atmospheric noise prevails on time scales exceeded 10–100 seconds. The efficiency of preselecting the data with low atmospheric noise on the time scales of interest is demonstrated. The potential of the “Cosmological Gene” project for different accumulation times in the sky area studied are assessed with the effect of real atmospheric noise taken into account.

Key words: *radiosources*