

АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОГО ФОНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

В.РАМИРХАНИЯН

Поступила 15 февраля 2000

Принята к печати 20 апреля 2000

Учитывая, что внегалактические радиоисточники распределены по небесной сфере равномерно, использовано накопление экспериментальных данных в области пространственных частот. Автору не удалось объяснить невязки экспериментальных и модельных спектров ошибками расчета и эксперимента. Возможное объяснение - присутствие в космическом фоновом радиоизлучении Галактических флуктуаций.

1. *Спектр пространственных частот на выходе радиотелескопа.* Как показал тридцатилетний опыт поиска гипотетических неоднородностей космического фонового радиоизлучения, разделение самого излучения и вклада радиоисточников оказалось самой сложной проблемой. И она усложняется с повышением чувствительности приемных систем. В наземных наблюдениях к проблеме фоновых радиоисточников добавляется проблема атмосферы. Решение подсказывает теорема Кемпбелла [1], которая связывает временные и частотные параметры дробового шума. Она гласит: если временной ряд $X(t)$ есть сумма большого числа импульсов одинаковой формы $A(t)$ и амплитудой S_k

$$X(t) = \sum_{k=1}^n S_k A(t - t_k), \quad (1)$$

в то время как амплитуда импульса S_k есть случайная функция с конечной дисперсией, а моменты прохождения импульсов t_k распределены по закону Пуассона со средней скоростью α , то спектр мощности $X(t)$ есть:

$$F(f) = \alpha \overline{S^2} |V(f)|^2, \quad (2)$$

где $\overline{S^2}$ - средний квадрат S_k , $|V(f)|^2$ - спектр мощности $A(t)$. При этом, процесс $X(t)$ стационарен и эргодичен.

Процесс на выходе радиотелескопа, через поле зрения которого проходят компактные радиоисточники, вполне удовлетворяет условиям теоремы Кемпбелла: радиоисточники распределены по небесной сфере весьма равномерно, а их средний угловой размер, для потоков меньше 100-200 mJy, меньше 10" [2]. При достаточно широкой диаграмме направленности антенны реакция

телескопа на прохождение радиоисточников будет иметь одинаковую форму. Отклик на прохождение одиночного радиоисточника (аппаратная функция) зависит не только от диаграммы направленности, но и от режима работы телескопа.

Согласно (2), спектр мощности на выходе телескопа повторяет спектр мощности аппаратной функции. Учитывая, что аппаратная функция радиотелескопа функция двумерная, а дифференциальная статистика радиоисточников определяется как

$$dn = n(S) dS, \quad (3)$$

запишем (2) для наблюдений в режиме сканирования по прямому восхождению

$$F(f) = T \int_{-\pi}^{\pi} |V(f, \delta - \delta_0)|^2 \int_0^{S_1(\delta - \delta_0)} S^2 n(S) dS d\delta, \quad (4)$$

где δ_0 - наблюдаемое склонение, f - пространственная частота, $|V(f, \delta - \delta_0)|^2$ - спектр мощности аппаратной функции на сечении $\delta - \delta_0$, $S_1(\delta - \delta_0)$ - порог обнаружения на сечении $\delta - \delta_0$, T - размер участка небесной сферы по прямому восхождению. Уравнение (4) показывает - если аппаратная функция не зависит от положения телескопа или наблюдения ведутся на неподвижной антенне, то спектры мощности любых двух наблюдаемых участков неба подобны. Если же участки неба одинакового размера, то их спектры равны с точностью до статистики радиоисточников.

Таким образом, мы имеем возможность накапливать информацию не только в пространственной, но и в частотной области, суммируя спектры мощности различных участков небесной сферы. Например, можно разделить временной ряд наблюдений на N отрезков одинаковой длины и сложить их спектры мощности. Тем самым, мы улучшим оценку спектра мощности всех радиоисточников на одном отрезке в $\sqrt{N}$ раз.

Что дает знание спектра мощности радиоисточников?

Во-первых, мы имеем возможность исследовать поведение статистики радиоисточников на уровне ниже порога обнаружения. Глубина анализа зависит от ошибок полученного спектра. Во-вторых, мы можем провести статистический поиск протяженных объектов, размеры которых согласуются с частотной характеристикой аппаратной функции телескопа. Присутствие таких объектов в фоновом радиоизлучении неизбежно внесет искажения в идеальный спектр, определяемый компактными радиоисточниками. Сравнивая экспериментальный и расчетный спектры, можно оценить значимость искажений, их амплитуду и угловой масштаб. Здесь нет необходимости "вычищать" из записей радиоисточники, как мешающий фактор. Напротив, их спектр есть тот НОЛЬ, от которого мы отсчитываем искомые искажения спектра.

И, в-третьих, не исключено, что параметры фонового радиоизлучения флуктуируют в пространстве и во времени. И тогда при временном или пространственном накоплении, которое предполагает замороженность неоднородностей фона, обнаружить их будет затруднительно. Накопление мгновенных спектров позволяет решить эту проблему непринужденно.

Характер искажений зависит не только от размеров неоднородностей, но и от их распределения по небосклону. Если они располагаются регулярно, то на соответствующей пространственной частоте мы должны увидеть спектральную линию. И это наиболее простой и наименее реальный случай. Если же они разбросаны случайным образом, то согласно той же теореме Кемпбелла, их спектр определяется из (2). Это значит, что при стандартных предположениях о форме этих образований (Гаусс, Баттерворд или простой цилиндр), их спектр мощности достигает максимума на нулевой частоте. Процесс наблюдений и обработки неизбежно сопровождается "вырезанием" нулевой и близких к ней частот. Следовательно, судить о масштабах неоднородностей мы сможем только по "хвосту" их спектра. Естественно, что последнее утверждение справедливо не только в частотной, но и пространственной области.

Для того, чтобы получить спектр мощности радиоисточников в рафинированном виде, необходимо соответствующим образом провести наблюдения и обработку информации.

Выходной сигнал реальной приемной системы содержит две компоненты, коррелированную и некоррелированную, каждая из которых имеет несколько ингредиентов. Коррелированная - это источники космического радиоизлучения, параметры которого для подавляющего числа объектов за период наблюдений изменяются незначительно. Некоррелированная - собственные шумы системы, шумы атмосферы, антенны и окружающей среды - изменяется в масштабах от секунд до часов. Нас интересует коррелированная составляющая. Чтобы ее выделить, естественно использовать известный метод сумм и разностей. Суммы содержат информацию о двух составляющих - коррелированной и некоррелированной. Разности - только о некоррелированной. Соответственно и спектры мощности этих массивов содержат ту же информацию.

Обозначим спектры мощности сумм и разностей $F^+(f)$ и $F^-(f)$ соответственно. Их разность есть искомый спектр.

$$F(f) = F^+(f) - F^-(f) \quad (5)$$

Если усреднено N спектров, то ошибка $F(f)$

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{(F^+(f))^2 + (F^-(f))^2}{N}} \quad (6)$$

Используем равенство Персеваля и свяжем чувствительность приемной системы с выходным спектром. Выражение записано в дискретной форме

$$\frac{\sigma^2 L}{M} = \frac{2R^2}{L} \sum_{k=1}^{L/2} |F^*(f_k)|^2, \quad (7)$$

где σ - чувствительность системы в единичном наблюдении, L - число точек в отрезке, M - число наблюдений отрезка, R - амплитуда калибровочного сигнала в Кельвинах или Янских.

В этом равенстве все параметры известны. Оно полезно, так как позволяет проверить насколько хорошо "увязываются" экспериментальные и расчетные параметры.

Если в (7) использовать спектр разностей, то σ будет соответствовать идеальному случаю, когда источники радиоизлучения отсутствуют.

2. Постановка эксперимента. Для максимальной стабильности диаграммы направленности желательно проводить наблюдения в транзитном режиме.

Для того, чтобы максимально разнести частотные характеристики атмосферы и аппаратной функции, желательно не проводить наблюдения близко к полюсу. Выигрывая в $\sqrt{1/\cos\delta}$ за счет накопления, мы столько же проигрываем за счет уменьшения обзораемой площади и в конечном результате выигрыша не получим. В то же время спектр аппаратной функции смещается вниз по частоте, что увеличивает вклад атмосферы в шумы системы в $(\cos\delta)^{-2.5}$ раз [3].

В каком режиме должен работать телескоп: в однорупорном или с диаграммным сканированием. Спектр мощности одиночной диаграммы это гладкая, падающая от нулевых частот, функция, позволяющая принять весь спектр искомых неоднородностей. В режиме сканирования эта функция умножается на $\sin^2(2\pi/d)$ (d - половина диапазона сканирования), что превращает ее в гребенчатый фильтр и ограничивает спектр анализируемых пространственных частот. Основное достоинство и недостаток этой схемы - подавление низкочастотной части спектра, где предположительно содержится максимум информации. Однако однорупорная приемная система, имеющая несимметричную схему, сильно зависит от атмосферных условий наблюдения и в большей степени, чем двухрупорная, реагирует на изменение собственных параметров. Кроме того, в двухрупорном режиме протяженные области двух разнесенных диаграмм перекрываются и вычитаются друг из друга, снижая тем самым вклад вынесенных по склонению источников. Этот эффект особенно сильно заметен, если антенная система образована сектором РАТАН-600, диаграмма направленности которого быстро расширяется к периферии [4]. Влияние далеких радиоисточников в однорупорном режиме осложняет и без того непростую задачу проведения нуля. Эта процедура необходима и для построения оптимального алгоритма поиска радиоисточников и для дальнейшего спектрального анализа. Становится практически невозможно отличить реальный дрейф от прохождения вынесенного по склонению объекта. Эти результаты получены в модели программы "Холод" [5] и

подтверждены в работе [6]. Любая процедура проведения нулевого уровня будет заваливать низкочастотную область спектра однорупорной аппаратной функции. Учесть этот завал в модели наблюдений с необходимой точностью сложно, так как не ясно, как получить из эксперимента частотную характеристику дрейфа. В двухрупорном режиме проблемы нуля нет и расчетный спектр хорошо совпадает с экспериментом. Заметим, что при однорупорном приеме неизбежно приходится использовать режим модуляции. Это приводит к потере чувствительности в $\sqrt{2}$ по сравнению с двухрупорным приемом.

3. *Эксперимент.* Первые спектры, на которых проявились “следы” радиоисточников, были получены в дипломной работе Мусиной [7] в 1987г. Для исследования стабильности радиометра 4 см диапазона (третий облучатель РАТАН-600, аппаратура ГАИШ) она провела многочасовые наблюдения и получила несколько реализаций выходного спектра мощности радиометра (рис.1). Кроме спектра шума, повторяющего частотную характеристику выходного RC- фильтра радиометра и вклада атмосферы на низких частотах, видны детали (отмечены стрелками), форма которых совпадала со спектром мощности аппаратной функции телескопа. В наблюдениях, проводимых для выяснения природы этих деталей, входной переключатель рупоров (модулятор) был остановлен в одном положении, в то время как выходной синхронный детектор продолжал работать. Эксперимент позволил получить выходной спектр идеально сбалансированного двухрупорного приемника, исключить вклад от внешнего сигнала и сохранить при этом частотные и шумовые параметры системы. На рис.1 этот спектр не имеет загадочных деталей и низкочастотного подъема. Эксперимент убедил нас, что искажения спектра не связаны с работой аппаратуры, а определяются внешним радиоизлучением.

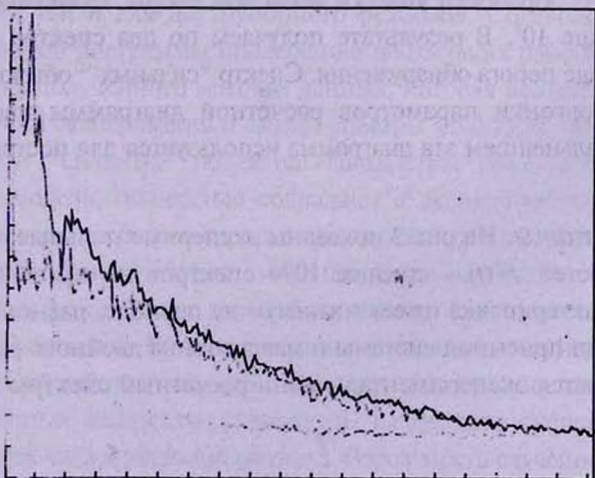


Рис.1. Первый спектр, на котором виден вклад радиоисточников.

Сделаем небольшое, но полезное отступление. Последний эксперимент позволяет, кроме исследования идеально сбалансированного радиометра, непринужденно получить спектр неоднородностей атмосферы. Достаточно из спектра разностей вычесть спектр идеально сбалансированного приемника и учесть частотную характеристику аппаратной функции.

Для проверки вышеприведенных рассуждений и отработки методики автор использовал обзор, выполненный на третьем облучателе РАТАН-600 лабораторией ГАИШ на 3.9 и 7.6 см [8]. Наблюдались три склонения, разнесенные на 7° , по 6-8 раз каждое в диапазоне прямых восхождений $6^h - 16^h$. Центральное склонение - 5° . Телескоп работал в меридиане в транзитном режиме. Использовались модуляционные приемники с диаграммным сканированием. Чувствительность приемной системы на 7.6 см при постоянной времени $\tau = 1$ с около $\sigma = 0.012$ К. На 3.9 см, где использовался приемник, охлаждаемый до температуры жидкого гелия [9] $\sigma = 0.008$ К. Считывание информации с выхода приемников велось через $\Delta t = 0.32$ с при $\tau = 0.32$ с на 3.9 см и $\Delta t = 0.64$ с при $\tau = 0.64$ с на 7.6 см. Ширина диаграммы направленности по уровню половины мощности $36'' \times 25'$ и $70'' \times 50'$ на 3.9 см и 7.6 см соответственно. Расстояние между рупорами 2.5' и 5.6'.

Спектр мощности строился следующим образом. Первоначально информация сводилась в двумерные массивы сумм и разностей размером 3×2048 . Массивы сумм пропускались через двумерный оптимальный фильтр и составлялся список обнаруженных объектов. Далее массивы разбивались на равные по прямому восхождению участки размером 3×64 (3.9 см) и 3×128 (7.6 см).

Спектры мощности сумм и разностей всех участков суммируются в два массива. Если на участок попадал объект с потоком более 10σ (σ - среднеквадратичное отклонение шумов после оптимальной фильтрации), его спектры суммировались в два других массива. Если на записи обнаружен неопознанный объект, этот интервал выкидывался из анализа. Также исключались из обработки участки небесной сферы, галактическая широта которых меньше 10° . В результате получаем по два спектра для объектов меньше и больше порога обнаружения. Спектр "сильных" объектов необходим для тонкой подгонки параметров расчетной диаграммы направленности телескопа. В дальнейшем эта диаграмма используется для построения модели обзора.

4. *Результаты.* На рис.2 показаны экспериментальные спектры сумм $F^+(f)$ и разностей $F^-(f)$ - среднее 1094 спектров на длине волны 7.6 см. Частотная характеристика имеет минимум на периоде, равном расстоянию между рупорами приемной системы и максимум на двойном расстоянии. На рис.3 сравниваются экспериментальный и расчетный спектры мощности на той же частоте.

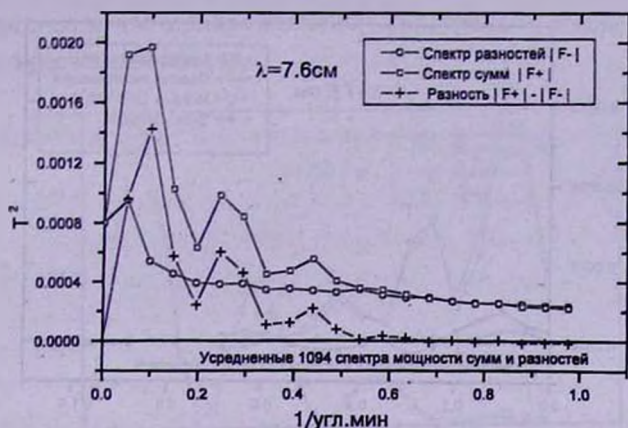


Рис.2. Спектры мощности сумм и разностей, а также спектр радиоисточников.

Расчетный спектр получался двумя путями. Во-первых, это вычисления по формуле (4). Во-вторых — модель обзора. Автор использовал два метода расчета, дабы уменьшить вероятность идеологических и программных ошибок. Программа моделирования выполняет следующие функции:

1. Генерация модели двумерного участка небесной сферы с радиоисточниками и неоднородностями. Плотность, размеры и амплитуда последних задаются. Статистика радиоисточников взята из работы [10]. К ней добавлена статистика для потоков меньше 1 мЯн из [11]. Предусмотрена генерация угловых размеров радиоисточников согласно заданному распределению и с учетом равновероятной ориентации их позиционного угла.

2. Моделирование процесса наблюдений, а именно, свертка модели неба с двумерной аппаратной функцией телескопа. Как и в работе [5], использовалась авторская программа расчета двумерной диаграммы направленности. Расчет ведется для любого сектора РАТАН-600, как для однорупорного, так и для двухрупорного режимов. Согласие расчетной и экспериментальной диаграммы проверено в нескольких работах [12,13].

3. Обработка полученного массива данных, которая полностью повторяет процесс обработки эксперимента и выдает спектры мощности сумм и разностей для “слабых” и “сильных” объектов. Параметры приемной аппаратуры, заложенные в модель, полностью совпадают с экспериментом. Два метода получения расчетных спектров хорошо согласуются между собой. Вычисления сделаны для идеального случая: точечные радиоисточники и отсутствие неоднородностей фона. Чтобы уменьшить ошибки модельного спектра было усреднено 30000 спектров. В предположении, что разница экспериментального и расчетного спектров носит шумовой характер, они совмещены по минимуму суммы взвешенных квадратов отклонений. Сравнение экспериментальных ошибок и невязок также показано на рис.3. Вероятность случайной реализации меньше 0.005.

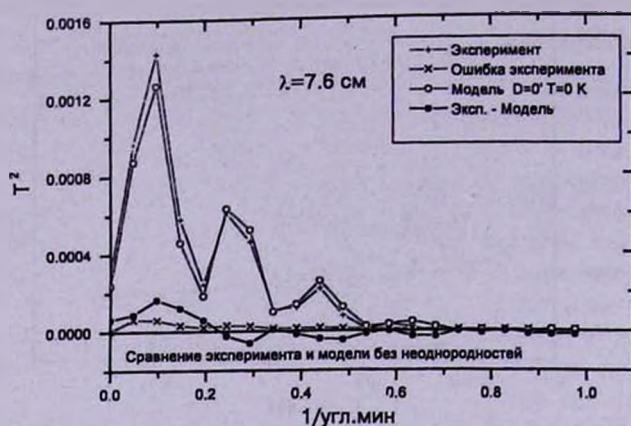


Рис.3. Сравнение эксперимента и расчета. Расчет учитывает только вклад радионсточников.

На рис.4 показаны экспериментальный спектр (сумма 3103 спектров) и модельные расчеты на волне 3.9 см. На этой длине волны значимость разницы между экспериментом и нулевой моделью существенно ниже (вероятность случайной реализации 0.15), чем на 7.6 см. Однако одинаковый частотный ход невязок между экспериментальным спектром и нулевой моделью на двух длинах волн, вселяет надежду, что эффект не случаен.

С чем могут быть связаны отличия расчетных и экспериментальных спектров?

1. Плохое согласие расчетной и экспериментальной аппаратных функций телескопа. На рис.5 показан результат подгонки параметров расчетной диаграммы направленности по экспериментальному "сильному" спектру. Здесь для тщательной подгонки спектральное разрешение повышено в два раза по сравнению с рис.3. Хорошее согласие двух методов расчета с экспериментом

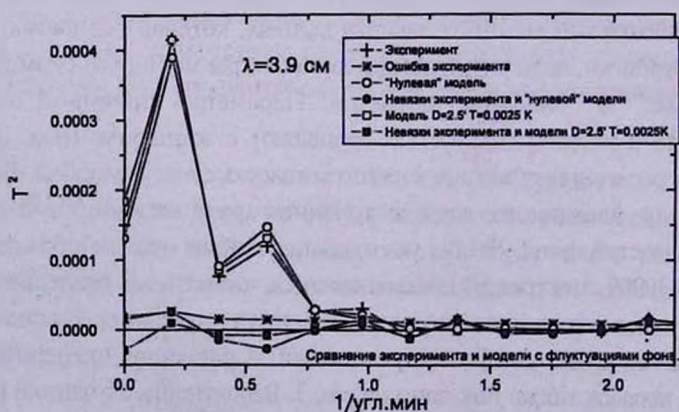


Рис.4. Сравнение эксперимента и различных моделей на длине волны 3.9 см.

вселяет уверенность, что ошибка расчетной диаграммы не вносит наблюдаемых искажений в расчетный спектр.

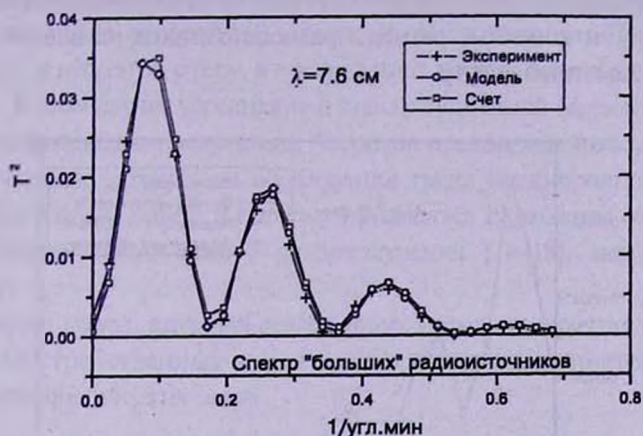


Рис.5. Расчетный и экспериментальный спектры "сильных" радиоисточников.

2. Это может быть одна из случайных реализаций. Однако ни одна из ста моделей обзора не повторила экспериментальный спектр.

3. Возможны суточные изменения параметров антенны и ошибки переустановки. Расчеты показали, что необходимы совершенно нереальные изменения угла облучения и расстояния между рупорами, чтобы объяснить наблюдаемый спектр.

4. Возможна асимметрия диаграмм направленности рупоров. Однако необходимо довести отношение амплитуд и ширин диаграмм до 0.7, чтобы получить качественное согласие с экспериментом. В реальном эксперименте это отношение не менее 0.95.

5. Можно предположить слабые *регулярные* неоднородности самой диаграммы направленности телескопа, которые очень сложно зафиксировать экспериментально. Действительно, на 3.9 см можно получить прекрасное согласие с экспериментом для "слабых" объектов, если в диаграмму направленности добавить гармоническую составляющую с периодом $4'$ и амплитудой 0.01 от максимума. Однако для "сильных" объектов модель с такой же диаграммой дает сильнейшее отличие от эксперимента.

Нельзя исключить, что регулярные неоднородности покрывают не всю диаграмму направленности, а нарастают к ее периферии. К сожалению, таких экспериментальных данных нет.

6. Возможно влияние угловых размеров радиоисточников. Для проверки этой версии в расчет модели были добавлены генерация углового размера радиоисточника и позиционного угла структуры. Функция распределения угловых размеров получена из [14]. В этой работе приведены результаты

исследования на VLA структуры около 1000 радиоисточников MG- каталога, который получен в диапазоне склонений $-0.5 - +19.5^\circ$.

Функция распределения позиционного угла предполагалась равномерной. Но даже на 3.9 см конечные размеры радиоисточников не внесли значимых изменений в расчетный спектр.

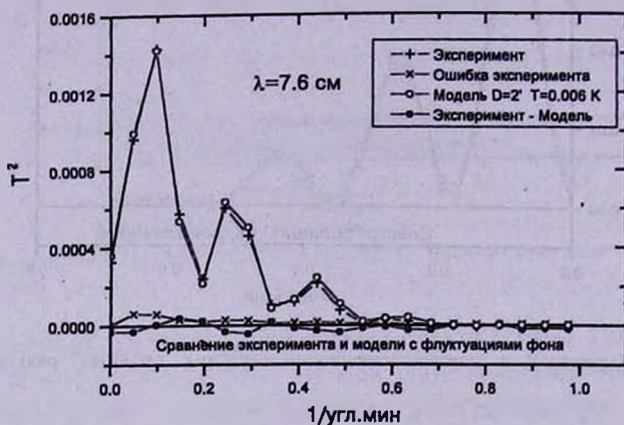


Рис.6. Сравнение эксперимента и расчета на длине волны 7.6 см. Модель рассчитана с учетом вклада неоднородностей диаметром $D = 2'$ и температурой $T = 0.006$ К.

7. Присутствие на небесной сфере случайно или регулярно разбросанных протяженных излучающих областей. Мы рассмотрим случайное распределение. Какой-либо априорной информации о распределении угловых размеров искомым неоднородностей у нас нет. Задавая их одинакового размера, автор сознательно пошел на упрощение модели. Это необходимо, чтобы убедиться в принципиальной возможности повторить экспериментальный спектр. Неоднородность моделировалась как излучающая область, имеющая форму круга заданного углового размера с одинаковой интенсивностью излучения. На рис.6 показан модельный спектр на $\lambda = 7.6$ см, рассчитанный в предположении, что неоднородности имеют размер $2'$, $T = 0.006$ К и плотность их такова, что они занимают половину площади небесной сферы. На этом же рисунке невязки расчета и эксперимента сравниваются с ошибками эксперимента. Для длины волны 3.9 см хорошее согласие получено для размеров $2.5'$ и $T = 0.0025$ К (рис.4).

Как ясно из вышеизложенного, для объяснения наблюдаемого эффекта есть три варианта.

1. Автор не смог учесть в модельных расчетах все тонкости эксперимента.
2. Диаграмма направленности телескопа имеет регулярную структуру, быстро растущую к периферии и которая не поддается расчету.
3. В космическом радиоизлучении действительно присутствуют образования размером от 2 до 6 угловых минут и температурой 0.0025 К - 0.006 К. Вызывает естественное недоверие амплитуда сигнала. Возможно,

это галактические образования (именно так интерпретируются результаты работы [15]). Если это Метагалактика, то цифры на два порядка превышают современные ограничения на неоднородности космического фона. Можно ли такое противоречие разрешить? Автор не исключает, что флуктуации не "вморожены" в небесную сферу, а претерпевают пространственные и временные изменения. В этом случае усреднение в пространственной (временной) области не даст положительного результата. Автор не предполагает обсуждать в этой работе возможные механизмы образования таких неоднородностей, однако отмечает, что данные работ, в которых приводятся параметры обнаруженных неоднородностей космического радиоизлучения [16-18], между собой не коррелируют.

И еще один вывод, который делает автор: метод накопления информации в области пространственных частот является реальным инструментом для решения астрофизических задач.

Работа выполнена при поддержке программы "Астрономия"

Специальная астрофизическая обсерватория,
Россия

AN ANALYSIS OF COSMIC BACKGROUND RADIOEMISSION IN THE COORDINATES OF SPATIAL FREQUENCIES

V.RAMIRKHANYAN

Taking into account, that the extragalactic radio sources are distributed on the celestial sphere uniformly, the accumulation of the information in the coordinates of spatial frequencies has been used. The author did not manage to explain the discrepancy of experimental and model spectra by errors of calculation and experiment. Possible explanation - presence at a space background radio-frequency radiation Galaxy's fluctuations.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике, Наука, М., 1984.
2. R.A.Windhorst, G.M. van Heerde, P.Katgert, Astron. Astrophys. Suppl. ser,

- 58, 1, 1984.
3. *A.A.Stotskii, A.B.Berlin, M.N.Kaidanovskii, V.B.Khaikin*, Preprint SAO, 20, 1, 1985.
 4. *А.В.Темцурова*, *Астрофизические исследования*, 17, 131, 1983.
 5. *V.R.Amirkhanyan*, *Сообщения САО*, 53, 96, 1987.
 6. *А.В.Чепурнов*, *Многочастотные исследования фоновых излучений на радиотелескопе РАТАН-600*, диссертация, 1996.
 7. *Д.В.Мусина*, *Разработка модулятора - балансира для радиоастрономического приемника 4 см диапазона*, дипломная работа, 1987.
 8. *В.Р.Амирханян, А.Г.Горшков, А.В.Ипатов*, *Сообщения САО*, 58, 41, 1988.
 9. *Е.Д.Баранов, А.В.Ипатов, А.А.Курбатов, В.В.Мардышкин, В.И. Суперсон*, 16 Всесоюзная конференция "Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы", 1982.
 10. *V.R.Amirkhanyan*, *Astrophys. Space Sci.*, 108, 125, 1985.
 11. *J.J.Condon, W.D.Cotton, E.W.Greisen, Q.F.Yin, R.A.Perley, G.B.Taylor, J.J.Broderick*, *Astron. J.*, 115, 1693, 1998.
 12. *В.Р.Амирханян*, *Астрофиз. исслед.*, 29, 129, 1990.
 13. *Y.Y.Kovalev, N.A.Nizhelsky, Yu.A.Kovalev, A.B.Berlin, G.V.Zhekanis, M.G.Mingaliev, A.V.Bogdantsov*, *Astron. Astrophys. Suppl. ser.*, 139, 545, 1999.
 14. *C.R.Lawrence, C.L.Bennett, J.H.Hewitt, G.I.Langston, S.E.Klotz, B.F.Burke, K.C.Turner*, *Astrophys J., Suppl. ser.*, 61, 105, 1986.
 15. *F.M.Leitch, A.C.S.Readhead, T.J.Pearson, S.T.Myers*, *Astrophys. J. lett.*, 486, L23, 1997.
 16. *S.Hancock, R.D.Davis, A.N.Lasenby, C.M.Gutierrez de la Cruz, R.A.Watson, R.Rebolo, J.E.Beckman*, *Nature*, 367, 333, 1994.
 17. *И.А.Струков, А.А.Брюханов, Д.П.Скулачев, М.В.Сажин*, *Письма в Астрон. ж.*, 18, 287, 1992.
 18. *G.F.Smoor, C.L.Bennett, A.Kogut*, *Astrophys. J., lett.*, 396, L1, 1992.