

УДК 520.272.28

О ВОССТАНОВЛЕНИИ ФОРМЫ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ С ПОМОЩЬЮ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПЛАНЕТ

© 2007 П. Д. Насельский^{1,2*}, О. В. Верховданов^{3**}, П. Р. Кристенсен^{1***}, Л. -И Чианг^{1****}

¹Институт Нильса Бора, Копенгаген, Дания

²Южный федеральный государственный университет, Ростов-на-Дону, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 декабря 2006; принята в печать 17 января 2007

Контроль формы диаграммы направленности антенны во время выполнения космической миссии Planck и оценка возможной деградации диаграммы являются одной из задач, от решения которых зависит успех предстоящей миссии. Мы рассматриваем несколько факторов, которые могли бы значимо влиять на точность определения формы диаграммы направленности в период полета: переменность потока от Юпитера, вариации наклона оси вращения спутника и пропуск Юпитера при наведении антенны. Мы оцениваем влияние этих факторов на контроль диаграммы и вычисляем пределы точности измерений главного и далеких боковых лепестков, используя наблюдения Юпитера и Сатурна. Также мы обсуждаем возможное изменение поверхности зеркала и определяем соответствующие параметры, которые могут помочь проверить эти эффекты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Научный спутник Европейского космического агентства (ESA) Planck¹⁾ предназначен для картографирования распределения микроволнового фонового космического излучения (СМВ) на всем небе с рекордными чувствительностью ($\Delta T/T \sim \sim 2 \times 10^{-6}$) и угловым разрешением (до 5') на 9 частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц. Наблюдения будут выполнены на низкочастотном (LFI) [1] и высокочастотном (HFI) [2] инструментах.

Чтобы достичь такой чувствительности и разрешения, необходимо при анализе данных тщательно учитывать все возможные систематические эффекты [3]. Один из таких эффектов — возможное изменение формы диаграммы направленности и ее восстановление в полете. Кроме необходимости сопровождения объектов диаграммой направленности, контроль ее формы в полете является одним из ключевых моментов для достижения научных целей миссии Planck. Эта проблема рассматривалась различными группами консорциума Planck [4–7] и отражена в недавних исследованиях [8, 9].

На точность оценки спектра анизотропии СМВ C_ℓ может повлиять, кроме других параметров эксперимента, форма диаграммы направленности антенны в полете на уровне далеких боковых лепестков и возможная деградация поверхности зеркала. При сканировании диаграмма антенны движется по небу, что позволяет рассматривать ее положение как функцию времени. После преобразования временных рядов в карту положение каждого пиксела на пикселизированной карте напрямую становится связанным с набором точек данных из приходящего потока информации. Поэтому необходимо отслеживать все параметры описания формы диаграммы направленности (ДН) в полете, ее наклон и положение центра диаграммы относительно каждого пиксела.

Чтобы проработать эту задачу, авторы [6] предложили метод, в котором используется прохождение планеты для восстановления формы ДН в полете. Наблюдение прохождения планет через ДН позволит исследовать и учесть форму ДН вплоть до $-25 \div 32.5$ дБ на 30 ГГц. Авторы также показали, что главный лепесток диаграммы может быть аппроксимирован двумерной гауссовой функцией. Недавно был предложен [7] еще один метод для оценки формы ДН, основанный на взаимодействии амплитуд и фаз сигнала неба и инструментального шума. Этот метод полезен при определении формы ДН до уровня $-7 \div 10$ дБ и не нуждается в контроле формы по сильным радиоисточникам. Эти методы были положены в основу определения как формы

*E-mail: naselsky@nbi.dk

**E-mail: vo@sao.ru

***E-mail: perrex@nbi.dk

****E-mail: chiang@nbi.dk

¹⁾<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

ДН во время полета, так и ее изменений во время наблюдений.

Целью этой работы является проверка деталей предложенного подхода восстановления формы ДН во время полета при наблюдении прохождения планет [6]. Это позволит оценить наши методы анализа формы ДН при измерении возможных эффектов и последствий деградации. Подход, основанный на наблюдениях Юпитера и Сатурна, имеет некоторые тонкости, связанные с такими явлениями как временная и частотная переменность потока Юпитера, а также прохождение планет через диаграмму направленности.

Данная работа организована следующим образом. В разделе 2 мы описываем скан-стратегию миссии Planck с учетом наблюдений планет и определения формы диаграммы. В разделе 3 мы обсуждаем проверку формы ДН в полете с использованием прохождения планет. Мы останавливаемся на влиянии эффектов возможной переменности потока Юпитера при калибровке диаграммы в разделе 4. В разделе 5 мы обсуждаем вариации потока, возникающие из-за изменения расстояния до планет и особенностей скан-стратегии. Выводы приведены в разделе 6.

2. СКАН-СТРАТЕГИЯ И ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Предложенная для миссии Planck скан-стратегия [4] предусматривает сканирование всего неба спутником, обращающимся вокруг точки Лагранжа L2 в системе Земля—Солнце с периодом ~ 180 дней (рис. 1). Ось вращения будет установлена в направлении анти—Солнце и будет иметь вероятный наклон к эклиптике 10° . Оптическая ось телескопа составит угол 85° с осью вращения. Телескоп будет сканировать одно и то же кольцевое сечение неба 60 раз, вращаясь вокруг оси с частотой 1 об./мин. В течение всей миссии (приблизительно 15 месяцев) каждый час ось вращения будет сдвигаться вдоль эклиптической плоскости на угол $2'5$.

2.1. Наблюдения планет

Согласно текущему расписанию, запуск спутника планируется 30 июня 2008 г. и полет до точки L2 займет приблизительно 6 месяцев. Чтобы построить орбиту спутника вокруг L2 и определить положения Земли, Юпитера и Сатурна, обращающихся вокруг Солнца, мы использовали процедуры расчета эфемерид XEphem.3.7.2 [10] (см. рис. 1).

Как уже упоминалось, предполагается, что угол сканирования будет равен 85° . После запуска миссии 30 июня 2008 г. в течение 15 месяцев Юпитер пересечет ДН 3 раза примерно 30.09.2008,

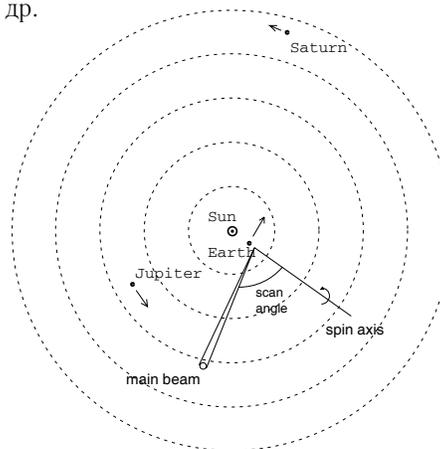


Рис. 1. Положение Юпитера и Сатурна в начале миссии Planck (ноябрь, 2008). Разность радиусов соседних концентрических кругов 2 а. е.

и 22.05.2009 и 03.11.2009 (в 2010 г. — 27.01.2010 и 09.12.2010) с точностью ± 1.5 дня в связи с условиями старта; Сатурн пересечет главный лепесток диаграммы 3 раза примерно 17.12.2008, 31.05.2009 и 30.12.2009 (в 2010 г. — 11.06.2010 г.) (рис. 2).

Как видно из рис. 2, калибровка формы диаграммы направленности антенны с помощью Юпитера и Сатурна возможна только 6 (3+3) раз в течение 1.5 лет миссии и с несколькими временными интервалами между прохождениями планет. Эти “окна” дают нам возможность оценить деградацию формы ДН на разных временных интервалах: от длинных (до 15 месяцев) до коротких (около 10 дней).²⁾ Для продолжительной калибровки главного лепестка ДН необходимо использовать метод, предложенный в работе [7], чтобы проверить ее эллиптичность и ориентацию во время анализа данных. Одной из интересных дат при наблюдении планет является 03.11.2009, когда в один день можно будет наблюдать Юпитер и Марс. К сожалению, непредсказуемость из-за атмосферных бурь спектра Марса в миллиметровом диапазоне волн [11] не позволяет использовать его для калибровки далеких лепестков, тем не менее для изучения самой планеты миссия сможет предоставить интересные данные [22].

2.2. Наклон орбит планет к эклиптической плоскости

Наши оценки потоков от планет сделаны в предположении их прохождения через ДН в плоскости

²⁾Интересна точка между треками прохождений Юпитера и Сатурна 26.05.2009. Это сближение можно было бы обсуждать с точки зрения одновременных наблюдений планет в одном скане. Но для таких наблюдений необходим скан-угол около 80° . Однако эти прохождения могут быть использованы для контроля далеких лепестков.

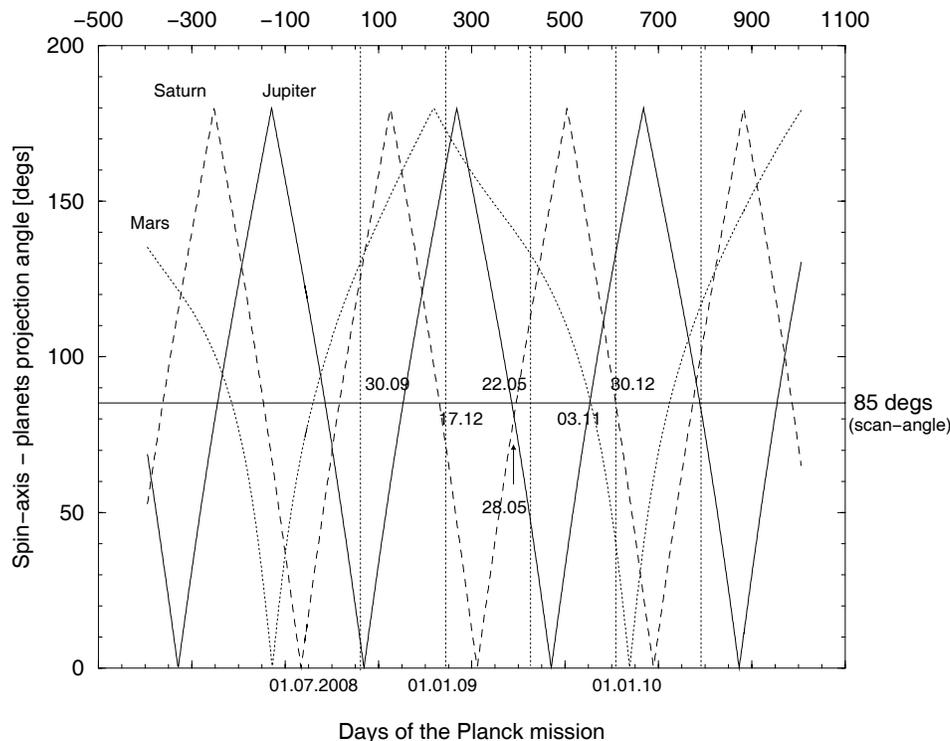


Рис. 2. Прохождение Сатурна, Юпитера и Марса через ДН при угле сканирования 85° . Штриховые, сплошные и пунктирные линии показывают, соответственно, треки Сатурна, Юпитера и Марса. Сплошная горизонтальная линия показывает угол сканирования 85° . Даты возле горизонтальной линии соответствуют пересечениям Юпитером и Сатурном направления угла сканирования 85° .

эклиптики. Однако планеты имеют эклиптическую широту, отличную от нуля. Максимальный наклон для Юпитера составляет $\sim 1^\circ$, для Сатурна $\sim 2^\circ$ (детальные расчеты для каждой планеты см. в табл. 1). Здесь мы отметим, что проблема отклонения в нашем случае не является существенной, но похожа на проблему наклона проекции, обсуждаемую ниже.

Согласно предложениям по скан-стратегии, ось вращения спутника будет иметь наклон к плоскости эклиптики около 10° . Это означает, что обычная эклиптическая проекция скан-угла будет уже и мы будем наблюдать Юпитер с другой антенной температурой. Проекция ψ скан-угла ξ для наклона ϕ может быть рассчитана как

$$\tan \psi = \tan \phi \cos \xi, \quad (1)$$

что дает $\psi = 84.92^\circ$, для $\xi = 85^\circ$ и $\phi = 10^\circ$. Эта разность находится в пределах $5'$, так что проекции планетных траекторий и наклона оси не повредят нашим оценкам.

2.3. Описание диаграммы и ее вариации из-за деградации зеркала

При рассмотрении диаграммы направленности телескопа миссии Planck обычно используют опи-

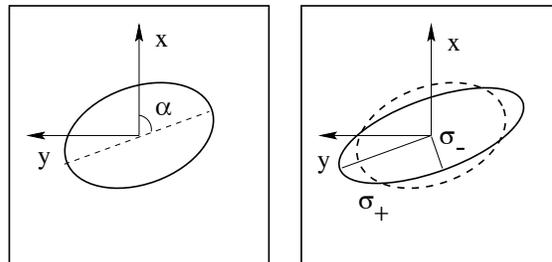


Рис. 3. Параметры деградации диаграммы направленности. На левой панели показан угол ориентации диаграммы, а на правой панели показаны σ_- и σ_+ , малая и большая полуоси эллиптического главного лепестка ДН.

сание физической модели отклика антенны, результаты ее контрольной проверки на Земле до полета, а также описание ДН в течение космических наблюдений как диаграммы, восстановленной во время полета, что является ключевым моментом при оценке возможной деградации ДН. "Полетная" диаграмма направленности играет существенную роль как при оценке C_ℓ , так и при выделении внегалактических точечных источников [12].

Расчеты в области физической оптики показали, что основной лепесток ДН антенны миссии Planck является практически эллиптическим [6, 13]. Таким

Таблица 1. Положение планет в моменты их пересечения диаграммой Planck в эклиптической плоскости и антенные температуры ($T_a = \Omega_{\text{планет}}/\Omega_{\text{beam}} \cdot T_b$) при прохождении через угол 85°

Планета	Дата при 85°	Размер (arcsec)	T_a (mK)			Эклиптич. широта	Эклиптич. долгота
			30 33'	100 10'	545 5'		
Сатурн	16.05.2008	18.1	7.704	88.94	297.7	+1:46.1	151:43.3
Юпитер	30.09.2008	39.7	42.35	525.0	1614	-0:19.5	283:12.0
Сатурн	17.12.2008	17.9	7.534	86.98	291.2	+1:59.0	171:27.2
Юпитер	22.05.2009	40.4	43.86	556.3	1672	-0:45.6	325:59.8
Сатурн	31.05.2009	17.9	7.534	86.98	291.2	+2:07.8	164:57.5
Юпитер	03.11.2009	40.9	44.40	563.2	1693	-1:01.2	317:46.9
Сатурн	30.12.2009	17.7	7.450	86.01	287.9	+2:16.9	184:19.6
Сатурн	17.06.2010	17.5	7.366	85.04	284.7	+2:21.9	177:57.1
Юпитер	27.06.2010	40.4	43.86	556.3	1672	-1:16:03	2:10:53

образом, мы можем аппроксимировать ДН двумерной гауссовой функцией. Геометрические свойства диаграммы в пространстве координат, зависящих от времени, можно описать следующим образом. Обозначим как x_0 и y_0 положение ДН в координатной системе с началом в точке расположения детектора, с осью x в направлении сканирования, и осью y , перпендикулярной оси x и оси диаграммы. Тогда форма ДН может быть описана как

$$B_t(\vec{x} - \vec{x}_t) = \exp \left[-\frac{1}{2}(\mathbf{RU})^T \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{RU}) \right], \quad (2)$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

\mathbf{R} — матрица вращения, которая описывает наклон эллиптической диаграммы к плоскости эклиптики

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (4)$$

α — угол между осью x и главной осью эллипса. Матрица \mathbf{D} обозначает ширину ДН вдоль большой оси эллипса и может быть выражена как

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \sigma_+^2 & 0 \\ 0 & \sigma_-^2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Если во время наблюдений поверхность зеркала претерпевает небольшие деформации, то необходимо провести детальное исследование соответствующего изменения формы ДН, отнаблюдая прохождение ярких планет Юпитера и Сатурна [6].³⁾ В общем случае деградация диаграммы может быть описана тремя параметрами (см. рис. 3).

1. Ширина ДН представляется как функция времени:

$$\frac{1}{2}(\sigma_-^2 + \sigma_+^2) \equiv \sigma^2 = \sigma^2(t), \quad (6)$$

где σ_- и σ_+ — малая и большая оси эллиптического главного лепестка.

2. Угол ориентации α между направлением сканирования и большой осью главного лепестка тоже может быть функцией времени, т. е.

$$\alpha \equiv \alpha(t). \quad (7)$$

3. Также меняется эллиптичность ДН, т. е. отношение

$$\frac{\sigma_+}{\sigma_-} = \rho \equiv \rho(t). \quad (8)$$

Мы можем использовать эти три параметра как индикаторы степени деградации диаграммы антенны в полете.

³⁾Как мы увидим в следующем разделе, флуктуации потока Юпитера могут быть приняты за эффект деградации диаграммы.

3. ПРОХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ И ПРОСТРАНСТВО ПИКСЕЛОВ

Следуя работе [6], мы можем определить форму ДН в полете спутника Planck, используя Юпитер как “стандартную свечу” для калибровки. Для всех частотных диапазонов Planck (как LFI, так и HFI) мы можем промоделировать вклад Юпитера в результирующую величину флуктуаций температуры $\Delta T(\mathbf{r})$ в направлении на \mathbf{r} как

$$\Delta T_J(\mathbf{r}) = \frac{S_J(\nu, t)}{2k} \left(\frac{hc}{kT_{\text{СМВ}}} \right)^2 \left[\frac{2 \sinh(\eta/2)}{\eta^2} \right]^2 \delta(\mathbf{r}_J, \mathbf{r}), \quad (9)$$

где \mathbf{r} и \mathbf{r}_J — единичные векторы соответствующего направления на небе и направления на Юпитер в заданной координатной системе соответственно, $\delta(\mathbf{r}_J, \mathbf{r})$ — δ -функция Дирака, S_J — поток от Юпитера, $T_{\text{СМВ}}$ (в К), h , k и c — температура СМВ, постоянная Планка, постоянная Больцмана и скорость света соответственно, а $\eta = h\nu/kT_{\text{СМВ}}$.

Каждый наблюдаемый субскан временного ряда m_t^i , который включает прохождение Юпитера, соотносится с $\Delta T_J(\mathbf{r})$ с помощью уравнения (9) посредством свертки с ДН антенны $B(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ (см. [7])

$$y_t^i = d_t^i + n_t^i, \quad (10)$$

где

$$d_t^i = \Delta T_J[\mathbf{r}(t)] \otimes B[\mathbf{r}(t^i), \vec{r}(t)], \quad (11)$$

где \otimes — символ свертки и n_t^i — сигнал СМВ, не очищенный от инструментального шума и всех фоновых сигналов.

Индекс i отмечает i -тый субскан с текущей ориентацией оси вращения спутника.

Используя все i -субсканы ($i \in [1, N]$, где N — полное число субсканов), мы можем определить циркулярный скан как некоторое линейное преобразование для d_t^i :

$$d_t = \mathbf{A} d^i, \quad (12)$$

где $d^i = \{d_t^i\}$ — вектор данных, а \mathbf{A} — матрица преобразования. Уравнение (12) дает нам соотношение для единичного циркулярного скана при фиксированной ориентации оси вращения. Для простого суммирования субсканов мы получаем $d_t = (1/N) \sum_i d_t^i$. Далее мы будем использовать круговой скан как базовый элемент для алгоритма создания карты (map-making) из временного ряда. Вариации инструментального шума для такого скана ожидаются в $\sim N^{-1/2}$ раз меньше, чем для субскана, если инструментальный шум — чистый белый шум. Для каждого скана мы можем определить вектор временного ряда $\mathbf{y} = \mathbf{M} \mathbf{s} + \mathbf{n}$, где \mathbf{M} — соответствующая матрица для map-making, \mathbf{s}

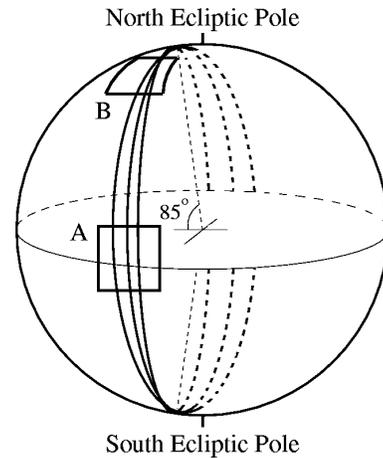


Рис. 4. Скан-стратегия миссии Planck. Площадка A расположена в области параллельного скана, где могут наблюдаться планеты; площадка B — в области пересечения с кольцевыми сканами.

обозначает пикселизованную карту, \mathbf{n} — вектор для описания шума [14]. Следует заметить, что для восстановления формы ДН в полете с помощью изображения Юпитера и Сатурна у нас нет необходимости строить карту всего неба, потому что форма ДН на уровне -40 dB, ожидаемом для миссии Planck, соответствует угловому масштабу $\theta_{\text{fs}} \sim 5^\circ$ для 30 ГГц LFI,⁴⁾ и мы можем использовать приближение плоского неба с центром в точке положения Юпитера (рис. 4) и применить метод из оценки формы ДН из работы [7]. Далее, это предположение позволяет нам применить линейный алгоритм map-making (см. [14]), который похож, например, на пикселизационную схему COBE.⁵⁾

Тогда сигнал в каждом пикселе карты \mathbf{s} будет [14]:

$$\mathbf{s} = \mathbf{W} \mathbf{y}, \quad (13)$$

где \mathbf{W} — соответствующая матрица, выбор которой зависит от скан-стратегии эксперимента Planck. Например, для простейшей пикселизации COBE мы можем использовать $\mathbf{W} = [\mathbf{M}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{M}]^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{N}^{-1}$, где $\mathbf{N} = \langle \mathbf{n} \mathbf{n}^T \rangle$ — ковариационная матрица шума.⁶⁾

Вернемся к рассмотрению единичного циркулярного скана. Как видно из уравнений (9) и (11),

⁴⁾Для диапазона частот LFI+HFI этот масштаб соответствует минимуму.

⁵⁾Заметим, что для оценок искажений диаграммы в полете по уровню шума $1/f$, вклада фоновых компонент и им подобных авторы [6] вынуждены наблюдать все небо для удаления шума $1/f$.

⁶⁾Заметим, что мы можем применить любой вид пикселизации без потери информации, например, GLESP [15, 16] или HEALPix [17].

для простого осреднения субсканов ($A \rightarrow 1/N \sum_i$) форма изображения Юпитера при свертке с ДН в циркулярном скане задается выражением

$$d_t = \frac{1}{2kN} \left[\frac{2 \sinh(\eta/2) hc}{kT_{\text{СМВ}} \eta^2} \right]^2 \sum_i \sum_{t'_i} S_J(\nu, t'_i) B_t(\theta_i), \quad (14)$$

где $\theta_i = \mathbf{r}'(t'_i) - \mathbf{r}(t_{J,i})$, $t_{J,i}$ — положение Юпитера в i -ом субскане, а B_t обозначает форму ДН в каждом субскане. Как можно видеть из уравнений (13) и (14), в пикселизированной карте пиксели, содержащие изображение Юпитера, относятся к B_t и $S_J(\nu, t'_i)$ и могут быть описаны следующим образом:

$$s \propto W S_J(\nu, t'_i) B_t(\theta_i). \quad (15)$$

Укажем на некоторые возможные источники невязок из уравнения (15) при определении формы ДН антенны в пиксельном пространстве мы можем.

До того, как в следующих двух разделах мы рассмотрим два эффекта, приводящие к переменности при калибровке диаграммы, кратко упомянем о неопределенностях, связанных с положением Юпитера. Среднее положение планеты определяется как

$$\mathbf{r}(t_{J,i}) = \bar{\mathbf{r}}(t_{J,i}) + \Delta \mathbf{r}(t_{J,i}) = \bar{\mathbf{r}}(t_{J,i})(1 + \delta_r), \quad (16)$$

$\Delta \mathbf{r}(t_{J,i})$ соответствует изменению положения Юпитера. Вообще говоря, этот калибратор используется в эксперименте Planck для проверки точности наведения эксперимента. Естественно предположить, что $\langle \Delta \mathbf{r}(t_{J,i}) \rangle = 0$, но $\langle |\Delta \mathbf{r}(t_{J,i})|^2 \rangle \neq 0$.

4. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПОТОКА ЮПИТЕРА ПРИ КАЛИБРОВКЕ ДИАГРАММЫ

Уровень флуктуации потока Юпитера может стать решающим в схеме восстановления формы ДН. Временные вариации потока Юпитера могут быть описаны как сумма постоянной составляющей потока $\bar{S}_J(\nu)$ и его флуктуирующей части $\Delta S_J(\nu, t)$,

$$S_J(\nu, t) = \bar{S}_J(\nu) + \Delta S_J(\nu, t) = \bar{S}_J(\nu)[1 + \delta_S(t)]. \quad (17)$$

Возвращаясь к уравнениям (13) и (14), чтобы определить параметры описания формы ДН в пиксельном пространстве, мы примем $\langle \Delta \mathbf{r}(t_{J,i}) \rangle = 0$ (тогда в уравнении (16) $\delta_r = 0$). Пикселизированная диаграмма может быть получена из субсканов,

включающих изображение Юпитера, как в работе [20]:

$$B_p(\gamma) = \sum_{t \in p} \sum_i \sum_{t'_i} W[1 + \delta_S(\nu, t'_i)] B_t(\theta_i), \quad (18)$$

где γ — угол между положением пиксела, который соответствует положению Юпитера на карте, и положением любого другого пиксела. Возможные изменения потока Юпитера внесут дополнительную погрешность в определение формы пикселизированной диаграммы, пропорциональную $1 + \delta_S(t)$.

4.1. Характерные временные шкалы

Есть 3 характерные временные шкалы, задаваемые скан-стратегией миссии Planck. Для каждого субскана (1 оборот в мин) временная шкала будет $T_{\text{sub}} \simeq 1$ мин. Следующая временная шкала для циркулярного скана, $T_{\text{cir}} = 60$ мин, является временем, в течение которого происходит сбор данных на протяжении одного циркулярного скана с фиксированной ориентацией оси вращения. Масштаб T_{cir} может быть использован для оценки характерной временной шкалы при изменении сигнала в одном пикселе вокруг площадки главного лепестка ДН. Другая временная шкала связана с масштабом далеких лепестков $T_{\text{FS}} \simeq \theta_{\text{FS}}/1^\circ$ (в днях), где θ_{FS} — угловое измерение области, стягивающей телесный угол далеких лепестков диаграммы. Например, для канала 30 ГГц LFI область с порогом -30 дБ стягивает угол $\theta_{\text{FS}} \simeq 1.5^\circ$ [6], отсюда $T_{\text{FS}} \simeq 1.5$ дня. Высоочастотные флуктуации потока Юпитера, которые соответствуют временным масштабам T_{sub} , T_{cir} и T_{FS} , являются, таким образом, очень важными для восстановления формы ДН в полете и может потребоваться их более тщательное исследование, например на наземных телескопах. Эти временные шкалы также показывают, что все неоднородности потока Юпитера при $T \geq T_{\text{FS}}$ соответствуют долговременным изменениям и могут маскироваться под эффект деградации формы ДН.

К сожалению, мы не знаем точно свойств флуктуаций потока Юпитера в частотном диапазоне приемников Planck (30–857 ГГц). По доступной из литературы информации о переменности потока Юпитера на ближайшей к диапазону LFI частоте 2.3 ГГц, эта переменность связана с синхротронным излучением магнитных поясов Юпитера. Изменение потока синхротронного излучения на этой частоте показано на рис. 5, воспроизведенном из работы [19]. Интервал измерений — один день. Таким образом, флуктуации короче 1 дня не могут быть измерены по этим данным. На рис. 6 мы показали спектр мощности, который получен с использованием линейной интерполяции в тех интервалах, где данные недоступны.

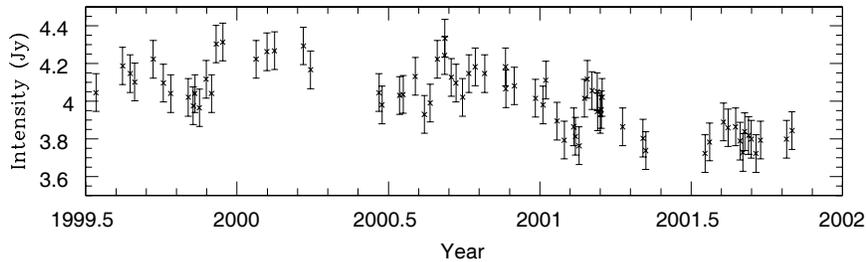


Рис. 5. Переменность интенсивности (плотности потока) синхротронного излучения Юпитера, отнесенного на 4.04 а.е., на длине волны 13 см (2.3 ГГц) (рис. воспроизведен из [19]).

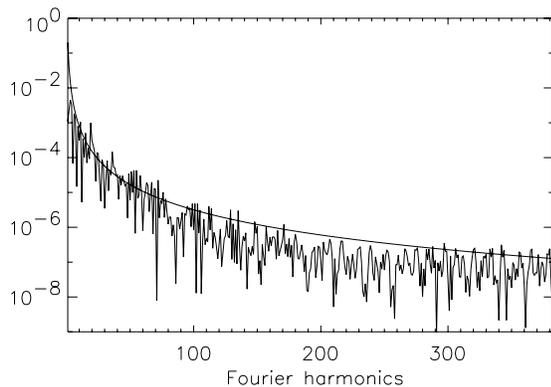


Рис. 6. Спектр мощности вариаций плотности потока от Юпитера на длине волны 13 см, который получен с использованием линейной интерполяции для тех интервалов рис. 5, где данные отсутствуют. Аппроксимационная кривая соответствует степенной функции $P(k) \propto k^{-2.4}$.

Временные вариации, которые могут значительно исказить восстановление ДН для канала 30 ГГц, лежат в интервале от 2.4 часа до 1.5 дней, когда Planck делает сечения по Юпитеру. Период изменений потока Юпитера короче 2.4 часа может быть “размазан” после пикселизации в этом канале из-за особенностей скан-стратегии и формы диаграммы. Для периода вариаций больше 1.5 дней искажения будут значительно меньше.

На рис. 7 мы показываем модельную реконструкцию диаграммы направленности канала LFI 30 ГГц при возможных вариациях потока Юпитера. Согласно уравнению (17), если флуктуации мощности $\delta_S(t)$ являются случайным процессом, то в области Фурье-частот эта величина может быть охарактеризована спектром мощности. Предположим, что для излучения атмосферы Юпитера флуктуации мощности $\delta_S(t)$ должны иметь вид $P(\omega) \simeq a\omega^{-n} + b$, где a и b — константы. Для иллюстра-

ции мы будем использовать те же значения параметров a и b , что и для синхротронного излучения, обсуждавшегося выше (рис. 6). Пологость спектра мощности на высоких частотах Фурье (рис. 6) позволяет нам предположить, что амплитуда вариаций для других периодов такая же. Картинка (a) показывает восстановленное изображение без вариаций потока Юпитера, (b), (c) и (d) — при флуктуациях потока с различными периодами, равными 4.8 часа, 10 часов и 1.5 дня соответственно. Период 10 часов соответствует времени полного обращения Юпитера вокруг своей оси. Амплитуда вариаций предполагается на уровне 20%. Ясно видно, что изменение ориентации главного лепестка может происходить из-за флуктуаций потока Юпитера.

4.2. Миллиметровые спектры планет и их вариации на различных частотах

Чтобы оценить влияние вариаций плотности потока планет на точность измерения формы ДН, необходимо сначала посмотреть на их радиоспектры. Полный радиоспектр Юпитера состоит из двух компонент [21]: низкочастотной части ($\nu \leq 10$ ГГц), которая связана с синхротронным излучением энергичных электронов, обращающихся вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера, и высокочастотной части ($\nu \geq 30$ ГГц), которая соответствует тепловому излучению атмосферы.

Опишем сначала вклад синхротронного излучения и его переменность параметром $\delta_S(t_J)$ для канала LFI 30 ГГц. Сравнительно недавно были проведены одновременные наблюдения Юпитера с помощью космических аппаратов Кассини и Галлилей и радиотелескопа VLA в сантиметровом диапазоне длин волн [18, 19]. Как было показано [18], есть сильное влияние солнечного ветра на магнитосферу Юпитера. Когда межпланетные ударные волны распространяются от Солнца и достигают Юпитера, они сжимают и изменяют конфигурацию его магнитосферы, создавая мощное магнитное поле и ускоряя электроны. Вариация потока Юпитера

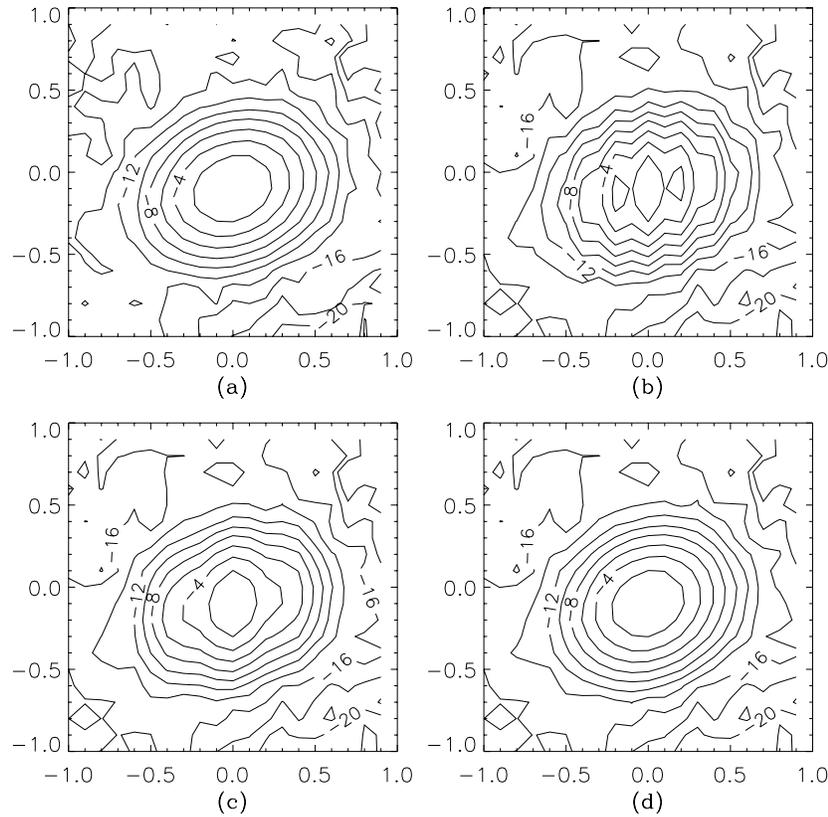


Рис. 7. Моделирование восстановления диаграммы с вариациями потока Юпитера. Мы моделируем канал LFI 30 ГГц (FWHM = 33' с эллиптичностью = 1.3) с $\sigma_{\text{СМВ}}$ и пиксельным шумом σ_{pix} , равными 3×10^{-5} и 8×10^{-6} соответственно. Картинка (a) — без вариаций потока Юпитера, (b) — с вариациями потока Юпитера с периодом 4.8 часа, (c) — 10 часов (период вращения Юпитера) и (d) — 1.5 дня, что соответствует времени пересечения Юпитера ДН миссии Planck. Контурные линии обозначают равные мощности в дБ.

на уровне $\sim 10\%$ с переменностью около 0.5 Jy в месяц на длине волны 13 см, зарегистрированная экспериментально [19] и показанная на рис. 5, наиболее вероятно обусловлена солнечным ветром. Эта величина может быть использована как верхний предел наших оценок. Для восстановления формы ДН во время миссии Planck нам необходимо знать, как показано выше, переменность потока Юпитера на временной шкале $T_{\text{cir}} \sim 1 \div 2$ дня, чтобы получить нижний предел переменности для частотного диапазона Planck 0–857 ГГц. Очевидно, что синхротронное излучение является важным только для канала 30 ГГц, и оно определяет нижний предел переменности Юпитера, если излучение атмосферы не даст дополнительных флуктуаций потока в полосе канала 30 ГГц. На рис. 6 мы приводим спектр мощности переменности синхротронного потока на длине волны 13 см. Из этого спектра находим нижний предел $\Delta_{\text{synch}} \sim 10\%$ в день.

Если бы мы могли показать, что синхротрон-

ное излучение на длине волны 1 см может иметь такую же амплитуду, и использовать эту величину в наших моделях, то можно было бы определить нижний предел вариаций потока, обусловленных синхротронным излучением на частоте 30 ГГц: $\delta_{\text{synch}} \sim (T_b^{\text{synch}}/T_b)\Delta_{\text{synch}} \simeq 10^{-3}$, где T_b — яркостная температура, соответствующая полному потоку планеты, а T_b^{synch} — соответствующая синхротронному излучению. Таким образом, мы можем сделать вывод, что изменение потока синхротронного излучения на частоте $\nu = 30$ ГГц не является важным для определения формы ДН в интересующем нас диапазоне (≥ -60 дБ). Тем не менее, необходимо получить дополнительные наблюдательные данные об излучении атмосферы планеты.

Детальное изучение [11] миллиметрового и субмиллиметрового спектров Юпитера и Сатурна показало (см. рис. 8), что в этом диапазоне частот есть особенности. Два модельных спектра, показанные на рис. 8, построены в [23] с использованием раз-

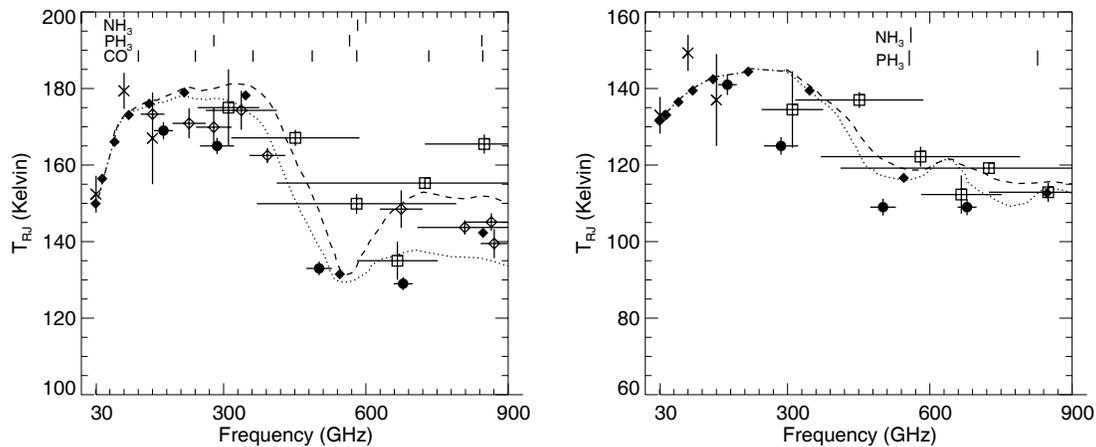


Рис. 8. Миллиметровый и субмиллиметровый спектр Юпитера (слева) и Сатурна (справа) (воспроизведено из работы [11]). Заполненные ромбики показывают потоки, используемые, согласно этой модели спектра, в данной работе на девяти наблюдательных частотах эксперимента Planck. Первый глубокий провал в спектре попадает на канал 545 ГГц миссии Planck. Для построения спектра использовались работы [11] (черные кружки), [23] (ромбики), [24] (квадраты), [25] (крестики).

Таблица 2. Яркостная температура Юпитера и Сатурна на частотах миссии Planck (точность около 10%)

ν (ГГц)	λ (мм)	размер ДН (мин дуги)	T_{Jupiter} (К)	T_{Saturn} (К)
30	10.00	33.0	152	133
44	6.82	24.0	158	135
70	4.29	14.0	167	138
100	3.00	10/9.2	173	141
143	2.10	7.1	176	144
217	1.38	5.0	179	146
353	0.85	5.0	178	141
545	0.55	5.0	133	118
857	0.35	5.0	145	114

личных физических параметров, таких как размер NH_3 кластеров (клочков) и отношение масштабов высот слоев частиц и газа. Температура Юпитера и Сатурна, оцененная на наблюдательных частотах приемников миссии Planck, показана заполненными ромбиками на рис. 8. Положение первого глубокого провала на обоих спектрах почти совпадает с наблюдательной частотой 545 ГГц (возле 570 GHz NH_3 и PH_3 резонансов). Оценки яркостных температур с точностью до $\sim 10\%$ приведены в табл. 2 (см. также табл. 1).

К сожалению, у нас нет информации о пере-

менности потоков Юпитера и Сатурна в диапазоне частот от 30 до 857 ГГц, которая определила бы точность восстановления формы ДН. Возможная переменность в частотном диапазоне, интересном для Planck, могла бы быть связана с наблюдаемыми отклонениями температуры Юпитера и Сатурна от чернотельного закона $T(\nu)=\text{const}$ на уровне 20%. Для Юпитера это 20%-ое отклонение позволяет предположить, что процессы, приводящие к таким вариациям, могут изменяться со временем на таком же уровне на характерной шкале, близкой к периоду вращения Юпитера (т. е. ≈ 10 часов). Эта проблема требует дополнительного и более детального исследования с использованием больших наземных радиотелескопов, чтобы измерить возможные вариации потоков Юпитера и Сатурна в частотном диапазоне миссии Planck. Недавние исследования Юпитера на РАТАН-600 показали стабильность потока (на уровне 0.1%) излучения на частоте 30 ГГц в течение 34 дней наблюдений [26]. Подобные наблюдения будут необходимы в процессе калибровки диаграммы миссии Planck в полете.

4.3. Ожидаемая поляризация потока

Одна из основных целей миссии Planck — поляризационные измерения СМВ. Сначала мы хотели бы показать, каков нижний предел уровня поляризации потока Юпитера на частоте 30 ГГц в случае синхротронного излучения.

Согласно [27], уровень поляризации Π синхротронного излучения связан со спектральным ин-

дексом $\beta (T_{\text{synch}} \propto \nu^\beta)$ как

$$\Pi = \frac{3\beta + 3}{3\beta + 1}, \quad (19)$$

что дает $\sim 10 \div 75\%$ для различных величин β . Полный поляризованный поток от Юпитера и Сатурна $\sim T_{\text{planet}} \Pi$. Это дает нам возможность калибровать форму ДН по поляризационным наблюдениям этих планет.

Используя величину $\beta = -1.26$ для $\nu > 13.6$ ГГц для спектрального индекса синхротронного потока Юпитера [19], можно получить величину $\Pi_{\text{Jupiter}} = 28\%$, показывающую, что поляризованная часть полного потока может достигать 0.3% на длине волны 1 см.

5. ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ СО СТРАТЕГИЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

5.1. Вариации антенных температур в зависимости от расстояния до планет

Для моментов пересечения скан-угла планетами можно рассчитать соответствующее расстояние и, следовательно, угловые размеры планет. Когда размер объекта значительно меньше телесного угла диаграммы, антенная температура T_a планеты вычисляется с помощью соотношения

$$T_a = T_b \frac{\Omega_{\text{planet}}}{\Omega_{\text{beam}}}, \quad (20)$$

где T_b — яркостная температура планеты (табл. 2), Ω_{planet} — телесный угол изображения планеты во время наблюдений (в стерadianах), а Ω_{beam} — телесный угол диаграммы, рассчитанный в простейшем приближении гауссовой формы

$$B = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right), \quad (21)$$

где $\sigma \equiv \sqrt{(\sigma_-^2 + \sigma_+^2)/2} = \theta_b/2.355$ и θ_b — FWHM главного лепестка ДН. Результаты расчета антенных температур для трех частот 30, 100 и 545 ГГц с соответствующими размерами полуширины ДН 33, 10 и 5 мин дуги даны в табл. 1.

5.2. Скан-стратегия и особенности восстановления ДН для HFI-диапазона в полете

В этом разделе мы хотим остановиться на обсуждаемой скан-стратегии миссии Planck и ее влиянии на восстановление формы ДН в полете с использованием прохождения Юпитера и Сатурна. Размеры полуширины ДН антенны миссии Planck для 10 каналов LFI+HFI приведены в табл. 2. Обсудим форму диаграммы на уровне выше -30 dB для всех каналов LFI + HFI.

Согласно скан-стратегии (см. рис.4), ориентация оси вращения телескопа в течение одного часа наблюдений (т. е. 1 оборот/мин для 60 субсканов) должна быть стабильной, т. е. ориентация 60-го субскана такая же, как и 1-ого субскана в момент t_0 , когда в данном циркулярном скане были начаты измерения. В конце 60-го субскана ось вращения (и оптическая ось) должна сместиться на $2'5$ в эклиптической плоскости (перенаведение). Таким образом, в течение прохождения Юпитера и Сатурна наиболее высокое разрешение, с которым могут быть получены их изображения в пикселизированной карте, — $2'5$ по одной стороне (т. к. размер обеих планет меньше $1'$).

Применяя схему пикселизации, мы сталкиваемся при прохождении планет с двумя ситуациями для высокочастотных каналов: хорошей и плохой. Хорошая ситуация — когда планеты попадают на максимальный отклик диаграммы направленности после перенаведения антенны и дают максимальный сигнал на циркулярном скане. Вероятность такого события мала. Плохая ситуация — когда планеты обходят максимум ДН, так что максимум потока планеты пропускается соседними циркулярными сканами. В рамках алгоритма taping это означает, что точка максимума потока Юпитера формально сдвинута относительно центра соответствующего пикселя и сигнал в окружающих пикселях может быть асимметричным. Такая асимметрия может быть ослаблена при ожидаемой точности наведения $10''$, если нет существенных вариаций потока Юпитера или деградации зеркала.

Таким образом, алгоритм построения карты должен учесть скан-стратегию и изменения положения Юпитера и Сатурна (см. рис.1 и 4). Принимая пороговый уровень -30 dB, мы можем оценить число пикселей, что поможет выявить форму диаграммы на карте в каждом частотном канале. Для простой гауссовой аппроксимации (см. уравнение (21)) мы имеем

$$N_{\text{pix}}(\nu) \simeq 9 \left(\frac{\text{FWHM}(\nu)}{2'5} \right)^2. \quad (22)$$

Как можно видеть из уравнения (22), $N \approx 1570$ пикселей для частотного канала 30 ГГц (FWHM $\simeq 33'$), тогда как $N \approx 36$ пикселей только для каналов 217 ГГц и выше (FWHM $\simeq 5'$). Этого, очевидно, недостаточно, чтобы точно определить эллиптичность формы этих диаграмм, если эллиптичность больше, чем 1.2.

6. ВЫВОДЫ

В заключение обсуждения проблемы использования прохождения планет, таких как Юпитер

и Сатурн, для контроля формы диаграммы направленности антенны во время полета, мы можем сказать следующее:

- Высокая точность оценки спектра мощности C_ℓ в эксперименте Planck потребует знания формы главного лепестка ДН с ошибкой не хуже 1%, то есть возможности измерения вариации потока Юпитера $\delta B/B = \delta_S$ на том же уровне.
- Для наблюдений в диапазоне частот LFI, т.е. $30 \div 100$ ГГц, известен предел возможных вариаций потока Юпитера ≤ 0.1 на пороговом уровне -30 дБ измерения диаграммы. Дополнительно необходимо измерить вариации потока Юпитера с помощью наземных радиотелескопов.
- При наблюдениях на высоких частотах ($217 \div 857$ GHz) могут появиться проблемы с наблюдением планет, такие как пропуск цели из-за узкой диаграммы.
- Во время миссии (~ 15 месяцев) мы можем протестировать ДН 3 раза до уровня -23.5 дБ, используя потоки Юпитера, и 3 раза — используя Сатурн. Это означает, что, оценивая деградацию ДН на интервалах короче 3 месяцев, мы должны применять метод [7].
- Близкое по времени прохождение планет даст возможность проверить деградацию ДН на высоких частотах.
- Использование планет (и Юпитера, и Сатурна) не позволяет измерить далекие лепестки ДН.
- Возможный эффект деградации может быть важен на том же уровне изменения ширины диаграммы, что дает вариация потока Юпитера, $\sim 1 \div 10\%$.
- На низких частотах (30 ГГц) стабильность потока Юпитера можно будет контролировать на радиотелескопе РАТАН-600. Это было показано при исследовании радиопотока планеты, оказавшегося стабильным на уровне 0.1% в течение месяца (Парийский и др., 2004).

Также отметим, что калибровка по Юпитеру и Сатурну вместе с методом [7] позволит восстановить форму пикселизированной ДН для карты анизотропии фона ΔT , которая отличается от реальной формы диаграммы в фокальной плоскости.

В общем случае переход от пикселизированной диаграммы к реальной в фокальной плоскости потребует знания свойств шума [7].

БЛАГОДАРНОСТИ

ОВВ благодарит за частичную поддержку данной работы РФФИ (грант No 05-07-90139).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Mandolesi, C. R. Laurence, M. Bersanelli, et al., *Planck Low Frequency Instrument, A Proposal to ESA* (1998).
2. J. L. Puget, G. Efstathiou, J. M. Lamarre, et al., *High Frequency Instrument for the Planck Mission, A Proposal to ESA* (1998).
3. M. Bersanelli and J. -M. Lamarre, *Planck Systematic Effects Working Group: Objectives and Organisation*, Tech. Rep. ESA (2001).
4. P. De Maagt, A. M. Polegre, G. Crone, *Planck - Straylight Evaluation of the Carrier Configuration*, Tech. Rep. ESA PT-TN-05967, 1/0 (1998).
5. C. Burigana, M. Makaspina, N. Mandolesi, et al., Internal report ITESRE 198 (1997), astro-ph/9906360.
6. C. Burigana, P. Natoli P., N. Vittorio, et al., *Experim. Astron.* **12**, 87 (2001).
7. L.-Y. Chiang, P. R. Christensen, H. E. Jørgensen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **392**, 369 (2002).
8. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, P. R. Christensen, and L.-Y. Chiang, *On the PLANCK in-flight antenna beam shape reconstruction using planet transit*, astro-ph/0211093v2 (2002).
9. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, P. R. Christensen, and L.-Y. Chiang, *The Planck Newsletter* 8, Iss. 5, ESA, (2003), (www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Newsletters/PlanckNewsletter5.pdf).
10. E. C. Downey, XEphem Version 3.5.2, <http://www.clearskyinstitute.com/xephem/xephem.html> (2002).
11. A. B. Goldin, M. S. Kowitt, E. S. Cheng, et al., *Astrophys. J.* **488**, L161 (1997).
12. L.-Y. Chiang, H. E. Jørgensen, I. P. Naselsky, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **335**, 1054 (2002).
13. N. Mandolesi, M. Bersanelli, C. Burigana, and F. Villa, *Astro. Lett. Comm.* **37**, 151 (2000).
14. M. Tegmark, *Astrophys. J.* **470**, 81 (1996).
15. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D.* **14**, 275 (2005). (astro-ph/0305537)
16. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
17. K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005). (astro-ph/0409513)

18. D. A. Gurnett, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, et al., *Nature* **415**, 985 (2002).
19. S. J. Bolton, M. Janssen, R. Thorne, et al., *Nature* **415**, 987 (2002).
20. J. H. P. Wu, A. Babbi, J. Borrill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **132**, 1 (2001).
21. B. F. Burke and K. L. Franklin, *J. Geophys. Res.* **60**, 213 (1955).
22. *The Scientific Programme of Planck*, astro-ph/0604069 (<http://www.rssd.esa.int/Planck>).
23. M. J. Griffin, P. A. R. Ade, G. S. Orton, et al., *Icarus* **65**, 244 (1986).
24. R. H. Hildebrand, R. F. Loewenstein, D. A. Harper, et al., *Icarus* **64**, 64 (1981).
25. B. L. Ulich, *Astronom. J.* **86**, 1619 (1981).
26. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., *Astron. Lett.* **30**, 276 (2004).
27. S. Cortiglioni and T. A. T. Spoelstra, *Astronom. and Astrophys.* **302**, 1 (1995).

ON THE PLANCK IN-FLIGHT ANTENNA BEAM SHAPE RECONSTRUCTION USING PLANET TRANSIT

P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, P. R. Christensen, L. -Y. Chiang

The calibration of the in-flight antenna beam shape and possible beam degradation is one of the most crucial tasks for the upcoming Planck mission. We examine several effects which could significantly act on the in-flight main beam calibration using planet transit: the problems of the variability of Jupiter flux, the antenna temperature and passing of the planets through the main beam. We estimate these effects on the antenna beam shape calibration and calculate the limits on the main beam and far sidelobe measurements, using Jupiter and Saturn. We also discuss possible effects of degradation of the mirror surfaces and specify corresponding parameters which can help us to determine this effect.