

УДК 520.272.2

РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАТАН-600 С УЧЕТОМ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В РЕЖИМЕ “ЮЖНЫЙ СЕКТОР С ПЛОСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ”

© 2011 Е. К. Майорова

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 2 марта 2010 г.; принята в печать 11 мая 2010 г.

В работе приведены результаты расчета диаграммы направленности (ДН) РАТАН-600 при наблюдениях на Южном секторе с плоским отражателем (“Юг+плоский”) во всем рабочем диапазоне длин волн радиотелескопа с учетом дифракционных эффектов в пространстве между вторичным, главным и плоским зеркалами, а также с учетом конечных вертикальных размеров зеркал. Рассчитаны амплитудно-фазовые распределения поля на поверхности зеркал в режиме “Юг+плоский” и при наблюдениях с одним сектором радиотелескопа на высотах, близких к горизонту.

Показано, что с увеличением длины волны происходит сужение диаграммы направленности в вертикальной плоскости и смещение максимума диаграммы в сторону меньших высот. В режиме “Юг+плоский” эти изменения диаграммы направленности происходят, начиная с более коротких волн, чем в режиме работы с одним сектором. Показано, что смещение максимума ДН зависит от высоты установки антенны.

Расчеты диаграммы направленности проводились как для сфокусированной антенны, так и при выносах первичного облучателя из фокуса. Проведены сравнения результатов расчета ДН, полученных в приближении дифракции Френеля, с результатами расчетов, выполненных в приближении геометрической оптики [1], а также с имеющимися экспериментальными данными [2]. Рассчитанные по данной методике диаграммы направленности показали хорошее согласие с измеренными диаграммами.

Ключевые слова: *радиотелескопы, диаграммы направленности*

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчеты диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600 в режиме работы с одним сектором кругового отражателя с учетом дифракционных эффектов в пространстве между вторичным и главным зеркалами, а также с учетом конечных вертикальных размеров отражающих элементов главного зеркала были выполнены в работе [3]. Учет дифракционных эффектов позволил получить более точные данные о ДН в большом телесном угле во всем рабочем диапазоне длин волн. Работа опиралась на более ранние работы, посвященные исследованию диаграммы направленности РАТАН-600 [4–10] и явилась их логическим продолжением.

Диаграмма направленности, рассчитанная с учетом дифракционных эффектов, показала хорошее согласие с экспериментальной диаграммой [11] вплоть до уровня 0.5–3% от максимума ДН во всем диапазоне длин волн радиотелескопа. Исследования [3, 11] были выполнены для режима работы с Северным сектором РАТАН-600.

В настоящей работе мы остановимся на расчете диаграммы направленности в режиме работы “Южный сектор с плоским отражателем”. При этом будут учтены дифракционные эффекты не только в пространстве между главным и вторичным зеркалами, но и в пространстве между главным и плоским зеркалом, а также конечные вертикальные размеры зеркал.

Кроме того, мы вернемся к диаграмме направленности в режиме работы с одним сектором на высотах, близких к нулю, т.е. при наблюдениях радиотелескопа на горизонте, и сравним эти режимы наблюдений с точки зрения диаграмм направленности.

2. РАСЧЕТ ДН В РЕЖИМЕ “ЮГ+ПЛОСКИЙ” С УЧЕТОМ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

В режиме работы Южного сектора с плоским отражателем (перископическим зеркалом) [12] главное зеркало радиотелескопа сфокусировано на высоту (угол места над горизонтом) $H = 0^\circ$ и представляет собой параболический цилиндр с

вертикальной образующей. В процессе наблюдений космических источников фокусировка главного зеркала не меняется, изменяется только угол наклона плоского отражателя относительно горизонта в соответствии с высотой наблюдаемого источника. Остается неизменным и расстояние между вторичным и главным зеркалами. Главное зеркало — это часть кругового отражателя, один сектор которого состоит из 225 щитов, имеющих три степени свободы (по углу места, азимуту и радиусу) [13].

Расчеты диаграммы направленности РАТАН-600 в режиме «Юг+плоский» были выполнены в работе [1]. Авторами рассчитаны элементы матрицы Мюллера M_{11} и M_{32} при наличии аберраций в антенне и без них. Элемент M_{11} является ДН по мощности для неполяризованного источника радиоизлучения, элемент M_{32} характеризует изменение позиционного угла линейно поляризованного излучения.

Напомним, что матрица Мюллера или приборный оператор связывает параметры Стокса принимаемого космического радиоизлучения на входе и выходе антенной системы и определяет поляризационные характеристики антенны для точечного источника.

Расчеты, представленные в работе [1], проводились апертурным методом [4] для волны 4 см. Составляющие полей в раскрывах вторичного и главного зеркал находились в приближении геометрической оптики с использованием матричного метода. Облучение главного зеркала задавалось спадающим к краям по косинусоидальному закону.

В настоящей работе для расчета ДН в режиме «Юг+плоский» нами также использовался матричный метод, который удобен при расчете многозеркальных антенн. Рассчитывались элементы матрицы Мюллера M_{11} , M_{14} , M_{32} . Здесь мы подробно остановимся на результатах расчета элемента M_{11} или мощностной диаграммы направленности. Поляризационные характеристики радиотелескопа будут рассмотрены в отдельной работе.

Для расчета M_{11} использовалась формула из [5]:

$$M_{11} = [(f_{xx}f_{xx}^* + f_{yx}f_{yx}^*) + (f_{xy}f_{xy}^* + f_{yy}f_{yy}^*)]/2, \quad (1)$$

где f_{xx} и f_{xy} — диаграммы направленности для основной и кросс-поляризации при вертикальной поляризации поля облучателя, f_{yy} и f_{yx} — ДН для основной и кросс-поляризации при горизонтальной поляризации поля облучателя.

Учитывая, что компоненты основных и кросс-поляризационных составляющих электрического поля в апертуре антенны являются комплексными величинами, выражения для диаграмм направленности основных и кросс-поляризаций можно представить в следующем виде:

$$f_{xx}(\theta, \psi) = \frac{1}{f_{xx}(0, 0)}$$

$$\int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \int_{-u_0}^{u_0} (F_{xx}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{xx}(\varepsilon, u)} \cos \varepsilon - F_{xy}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{xy}(\varepsilon, u)} \sin \varepsilon) e^{j\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi)} dud\varepsilon, \quad (2)$$

$$f_{xy}(\theta, \psi) = \frac{1}{f_{xx}(0, 0)}$$

$$\int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \int_{-u_0}^{u_0} (F_{xx}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{xx}(\varepsilon, u)} \sin \varepsilon + F_{xy}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{xy}(\varepsilon, u)} \cos \varepsilon) e^{j\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi)} dud\varepsilon, \quad (3)$$

$$f_{yy}(\theta, \psi) = \frac{1}{f_{yy}(0, 0)}$$

$$\int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \int_{-u_0}^{u_0} (F_{yy}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{yy}(\varepsilon, u)} \sin \varepsilon + F_{yx}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{yx}(\varepsilon, u)} \cos \varepsilon) e^{j\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi)} dud\varepsilon, \quad (4)$$

$$f_{yx}(\theta, \psi) = \frac{1}{f_{yy}(0, 0)}$$

$$\int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \int_{-u_0}^{u_0} (F_{yy}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{yy}(\varepsilon, u)} \cos \varepsilon - F_{yx}(\varepsilon, u) e^{j\phi_{yx}(\varepsilon, u)} \sin \varepsilon) e^{j\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi)} dud\varepsilon, \quad (5)$$

здесь F_{xx} , F_{yy} — амплитуды основных и F_{xy} , F_{yx} — кросс-составляющих электрического поля в апертуре антенны; ϕ_{xx} , ϕ_{yy} — фазы основных и ϕ_{xy} , ϕ_{yx} — кросс-составляющих электрического поля в апертуре.

Фаза $\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi)$ вычислялась по формуле, предложенной в работе [3] для расчетов ДН радиотелескопа в режиме работы с одним сектором:

$$\Phi(\varepsilon, u, \theta, \psi) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{P}{\sin H} (X \sin \varepsilon + Y \cos \varepsilon) + u(X \sin \varepsilon + Y) \right], \quad (6)$$

$X = \sin \theta \sin \psi$, $Y = \sin \theta \cos \psi$, где θ , ψ — угловые сферические координаты точки наблюдения, H — высота наблюдаемого источника, u и ε — полярные координаты в апертуре (плоскости раскрыва) антенны радиотелескопа, λ — длина волны, P — параметр антенны, равный 300 м.

Формула (6) несколько отличается от приведенной в работах [1, 8], однако позволяет более точно рассчитывать ДН на низких высотах, вплоть до нулевых.

В полярных координатах (u, ε) апертура антенны представляет собой часть кольца шириной $2u_0$ и угловым размером $2\varepsilon_0$.

$2u_0 = h \cos(H/2)$. В режиме работы радиотелескопа с одним сектором $h = h_c$, где $h_c = 11.0$ м — высота отражающего элемента главного зеркала, в режиме “Юг+плоский” $h = h_p$, где $h_p = 8.5$ м — высота отражающего элемента плоского отражателя (перископического зеркала).

$2\varepsilon_0$ определяется количеством выставленных щитов и характером облучения главного зеркала.

Геометрия антенной системы РАТАН-600 такова [14], что приближение геометрической оптики при расчетах полей можно использовать лишь в горизонтальной плоскости. В вертикальном сечении антенны в пространстве между вторичным и главным, а также в пространстве между главным и перископическим зеркалами приближение геометрической оптики выполняется лишь на достаточно коротких волнах.

Поэтому расчет распределений поля в вертикальных раскрывах главного зеркала и плоского отражателя проводился в дифракционном приближении, как это делалось в работах [3, 14–16].

Для расчета ортогональных комплексных компонент электрического поля \hat{F}_{ij} в вертикальном раскрыве плоского зеркала в режиме “Юг+плоский” использовалась формула:

$$\hat{F}_{ij}(\varepsilon, u) = F_{ij} e^{j\phi_{ij}(\varepsilon, u)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda\rho_1(\varepsilon)}} \int_{-h_c/2}^{h_c/2} E_{ij}(\varepsilon, z) e^{\frac{-j\pi(u-z)^2}{\lambda\rho_1(\varepsilon)}} dz, \quad (7)$$

где F_{ij} — амплитуды компонент основной (F_{xx} , F_{yy}) и кросс-поляризации (F_{xy} , F_{yx}) электрического вектора в вертикальном раскрыве плоского зеркала, $\phi_{ij}(\varepsilon, u)$ — фазы компонент электрического вектора в апертуре плоского зеркала, E_{ij} — амплитуды компонент основной (E_{xx} , E_{yy}) и кросс-поляризации (E_{xy} , E_{yx}) электрического вектора в вертикальном раскрыве главного зеркала, ρ_1 — расстояние между элементами главного зеркала и плоского отражателя.

Ортогональные комплексные компоненты электрического поля \hat{E}_{ij} в вертикальном раскрыве главного зеркала вычислялись по формуле:

$$\hat{E}_{ij}(\varepsilon, z) = E_{ij} e^{j\nu_{ij}(\varepsilon, z)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda\rho_2(\varepsilon)}} \int_{-b/2}^{b/2} A_{ij}(\varepsilon, t) e^{\frac{-j\pi(z-t)^2}{\lambda\rho_2(\varepsilon)}} dt, \quad (8)$$

где $\nu_{ij}(\varepsilon, z)$ — фазы компонент основной и кросс-поляризации электрического вектора в апертуре главного зеркала, A_{ij} — компоненты основной и кросс-поляризации электрического вектора в вертикальном раскрыве вторичного зеркала, b —

вертикальный размер вторичного зеркала, ρ_2 — расстояние от фокуса антенны до элементов главного зеркала в горизонтальной плоскости.

Компоненты электрического вектора основной и кросс-поляризации в раскрыве вторичного зеркала рассчитывались, исходя из диаграммы направленности первичного облучателя, “скалярного” рупора, расположенного в фокусе вторичного зеркала. Для этого была использована программа А. Н. Коржавина, написанная с использованием формул работы [10]. Формулы получены в приближении геометрической оптики.

Ширина мощностной ДН первичного облучателя по уровню 0.1 при расчете менялась в пределах $\theta_{0.1} = 80^\circ - 110^\circ$. Отметим, что диаграммы направленности “скалярных” рупоров в Е- и Н-плоскостях симметричны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В АПЕРТУРАХ ЗЕРКАЛ

Остановимся на результатах расчета распределений электрического вектора поля в раскрывах зеркал.

Вторичное зеркало радиотелескопа представляет собой несимметричный параболический цилиндр с горизонтальной образующей. Сферическая волна, излучаемая рупорами, преобразуется им в цилиндрическую волну.

На Рис.1 приведено распределение амплитуды поля основной поляризации (слева) и кросс-поляризации (справа) на раскрыве вторичного зеркала. Синфазным раскрывом вторичного зеркала является цилиндр с вертикальной образующей. ψ — азимутальный угол в горизонтальной плоскости, проходящей через фокус антенны, Z — вертикальная ось, проходящая через фокус антенны, перпендикулярно горизонтальной плоскости. Вертикальный размер вторичного зеркала составляет 5.5 м.

На правом рисунке темным цветом показаны отрицательные значения поля кросс-поляризации, светлым — положительные. Из-за несимметричности вторичного зеркала в вертикальной плоскости, распределение поля на его раскрыве оказывается несимметричным относительно оси $Z=0$. Кроме того, имеет место недооблучение верхних краев зеркала [10].

На Рис.2 приведено амплитудное распределение поля основной поляризации в апертуре главного зеркала E_{xx} (одного его сектора) при установке антенны на горизонт на длинах волн: $\lambda = 2$ см, 4 см, 8 см, 16 см, 32 см и 48 см (справа налево и сверху вниз). Распределение поля рассчитывалось по формуле (8) и нормировалось к максимальному значению.

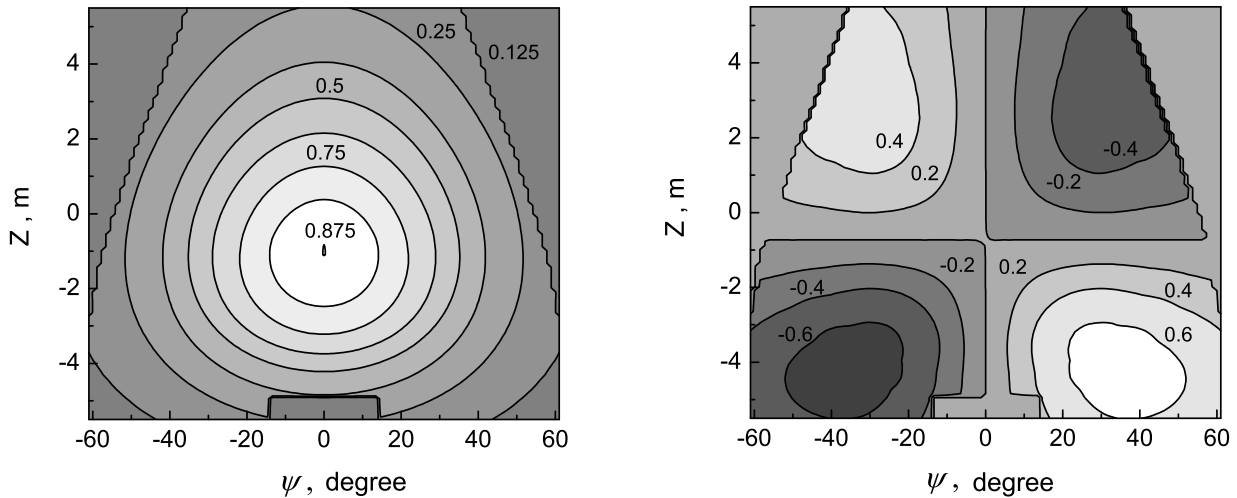


Рис. 1. Амплитудное распределение поля основной поляризации (слева) и кросс- поляризации (справа) на раскрыве вторичного зеркала. Нормировка осуществлялась к максимуму амплитудного распределения.

На высотах $H \sim 0^\circ$ апертура антенны в прямоугольной системе координат (X_a, Y_a) представляет собой прямоугольник с вертикальными размерами 11.0 м и горизонтальными — $\sim \pm 154$ м. Ось абсцисс X_a проводится в плоскости раскрыва через его середину, параллельно горизонту, ось ординат Y_a — перпендикулярно горизонту.

Как уже отмечалось, в режиме “Юг+плоский” главное зеркало выставлено на высоту $H = 0^\circ$, поэтому графики, представленные на Рис.2, дают представление об амплитудном распределении поля в раскрыве главного зеркала как в режиме наблюдений с одним сектором на горизонте, так и в режиме “Юг+плоский”.

На Рис.3 приведено распределение поля основной поляризации в апертуре плоского отражателя F_{xx} при наблюдениях на горизонте на волнах: $\lambda = 2$ см, 4 см, 8 см, 16 см, 32 см и 48 см (справа налево и сверху вниз). Распределение поля рассчитывалось по формуле (7) и нормировалось к максимальному значению. В центральной части плоского отражателя отсутствуют три элемента, что отражено в распределениях поля.

Учет дифракционных эффектов приводит к существенному отличию амплитудных распределений поля в апертурах главного и плоского зеркал на фиксированной длине волны при одинаковом синфазном распределении поля в раскрыве вторичного зеркала, а также к изменению распределений поля с изменением длины волны. Этот эффект уже рассматривался в работах [15, 17] при расчете эффективной площади РАТАН-600.

Основные изменения в распределении поля с изменением длины волны происходят в вертикальной плоскости. На коротких волнах ($\lambda < 2$ см) эле-

менты кругового отражателя находятся в ближней зоне облучателя (вторичного зеркала). По мере увеличения длины волны происходит переход в зону Френеля и на волнах $\lambda > 40$ см — в дальнюю зону, где ДН облучателя уже практически сформирована.

Элементы плоского отражателя оказываются в зоне Френеля в диапазоне длин волн $1 \text{ см} \leq \lambda < 20 \text{ см}$ и в дальней зоне — на волнах длиннее 20 см. При наблюдениях в режиме “Юг+плоский” волна, отражаясь от главного зеркала, проходит путь почти в два раза длиннее, чем в режиме работы с одним сектором.

На Рис.4 приведены амплитудные распределения поля основной поляризации на разных λ в центральном вертикальном сечении апертуры главного зеркала $E_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 1), плоского отражателя $F_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 2) и вторичного зеркала $A_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 3).

Из этих графиков видно, что на волнах $\lambda \leq 4$ см амплитудное распределение поля $E_{xx}(0, Y_a)$ в вертикальном раскрыве главного зеркала достаточно хорошо совпадает с распределением поля в вертикальном раскрыве вторичного зеркала $A_{xx}(0, Y_a)$. Амплитудное распределение поля в раскрыве плоского отражателя имеет небольшие отличия от распределения $A_{xx}(0, Y_a)$ уже на волне $\lambda 2$ см. С увеличением длины волны амплитудные распределения постепенно уплощаются, приближаясь к равномерному.

На Рис.5 показаны фазовые распределения поля основной поляризации на разных λ в центральном вертикальном сечении апертуры главного зеркала $\nu_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 1) и плоского отражателя $\phi_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 2).

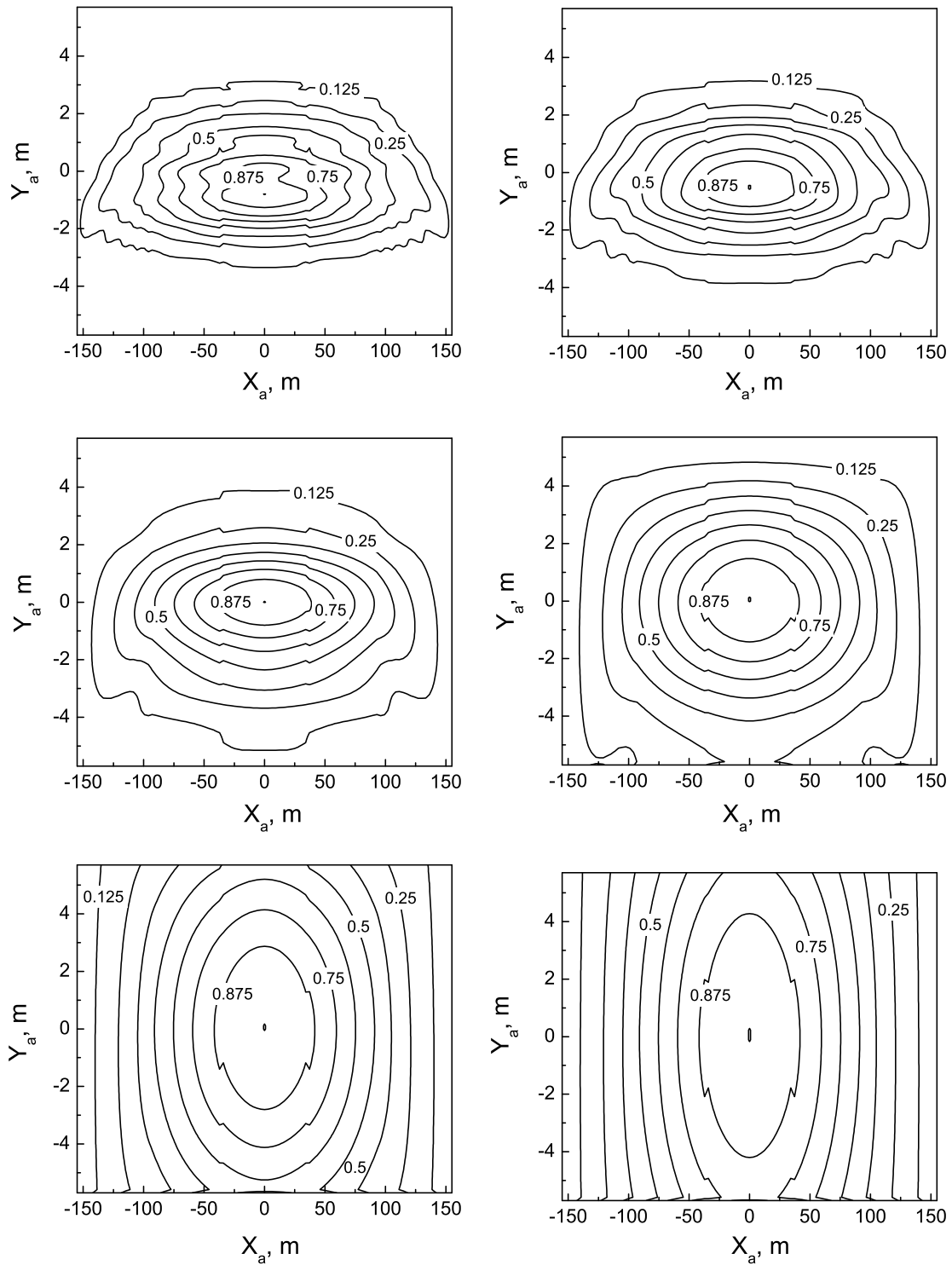


Рис. 2. Амплитудные распределения поля основной поляризации в апертуре главного зеркала E_{xx} при установке антенны на горизонт на длинах волн: $\lambda = 2$ см, 4 см, 8 см, 16 см, 32 см и 48 см (справа налево и сверху вниз). Распределения поля нормированы к максимальному значению.

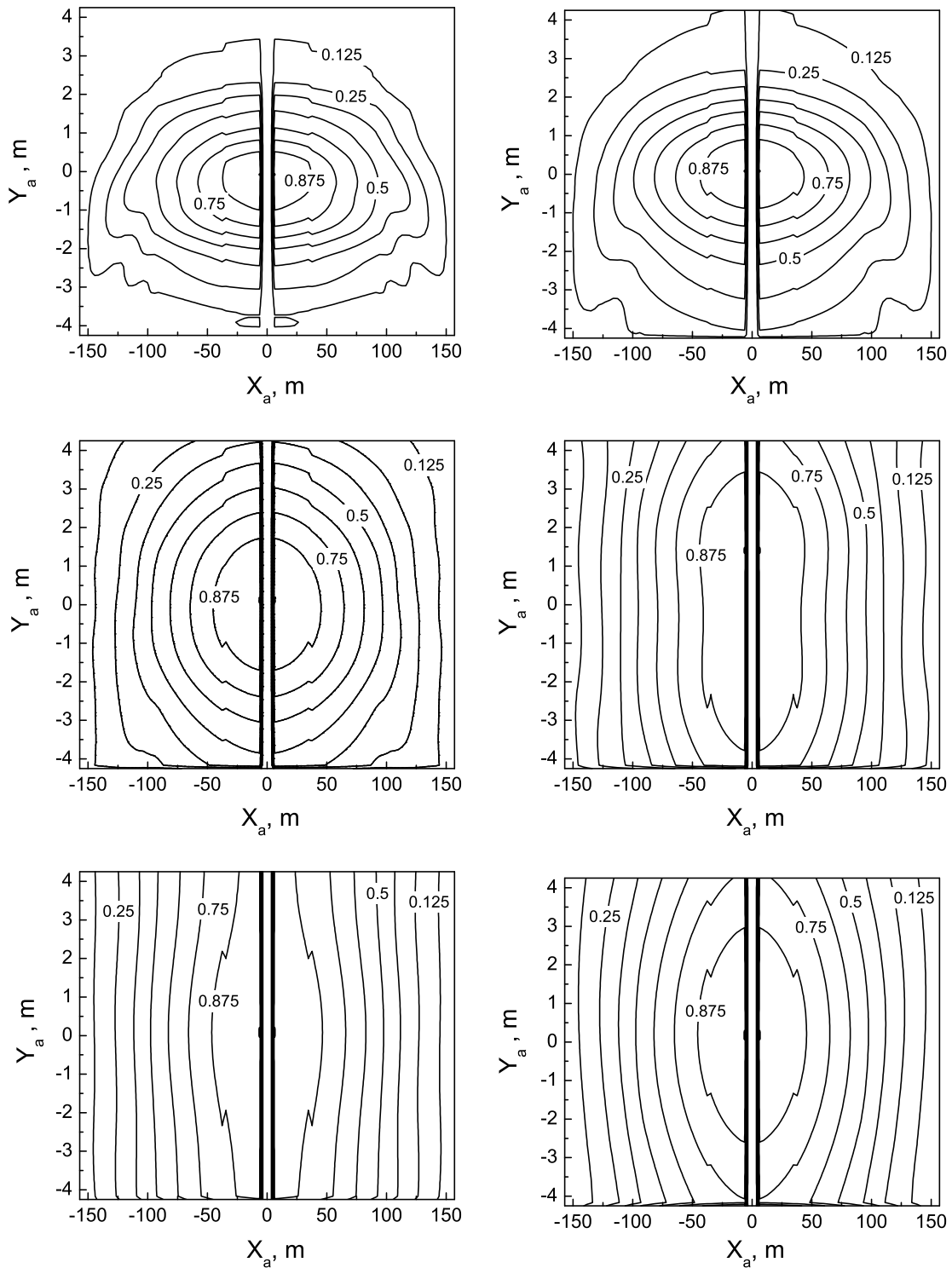


Рис. 3. Амплитудные распределения поля основной поляризации в апертуре плоского отражателя F_{xx} , выставленного на горизонт в режиме “Юг+плоский” на волнах: $\lambda = 2$ см, 4 см, 8 см, 16 см, 32 см и 48 см (справа налево и сверху вниз). Распределения поля нормированы к максимальному значению.

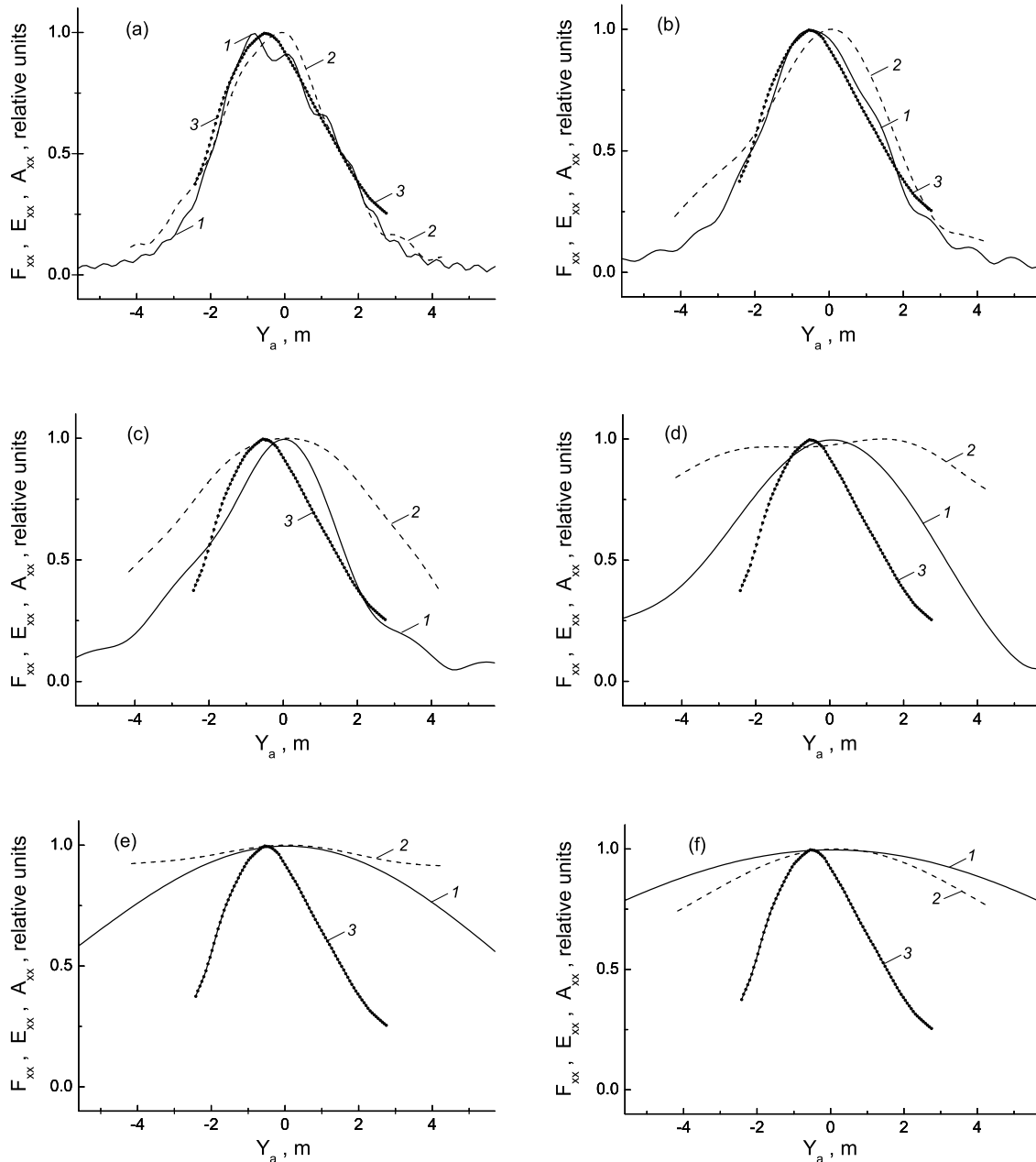


Рис. 4. Амплитудные распределения поля основной поляризации в центральном вертикальном сечении апертуры главного зеркала $E_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 1), плоского отражателя $F_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 2) и вторичного зеркала $A_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 3) на волнах: $\lambda = 2$ см (а), 4 см (б), 8 см (в), 16 см (д), 32 см (е) и 48 см (ф). Распределения полей нормированы к максимальному значению.

Фазовые распределения поля в апертурах главного и плоского зеркал близки к синфазному на волнах $\lambda \leq 2$ см (в пределах вертикального размера вторичного зеркала ± 2.75 м), а также на волнах $\lambda \geq 32$ см в режиме наблюдений “Юг+плоский”. На всех остальных волнах синфазность нарушается.

Таким образом, использовать приближение геометрической оптики для расчета двумерной и вер-

тикальной диаграмм направленности радиотелескопа, как это делалось в более ранних работах, можно только на волнах, не длиннее 4 см, в режиме работы радиотелескопа с одним сектором и на волнах $\lambda \leq 2$ см — в режиме “Юг+плоский”.¹

¹Для расчета центрального горизонтального сечения ДН вполне достаточно приближения геометрической оптики во всем рабочем диапазоне длин волн.

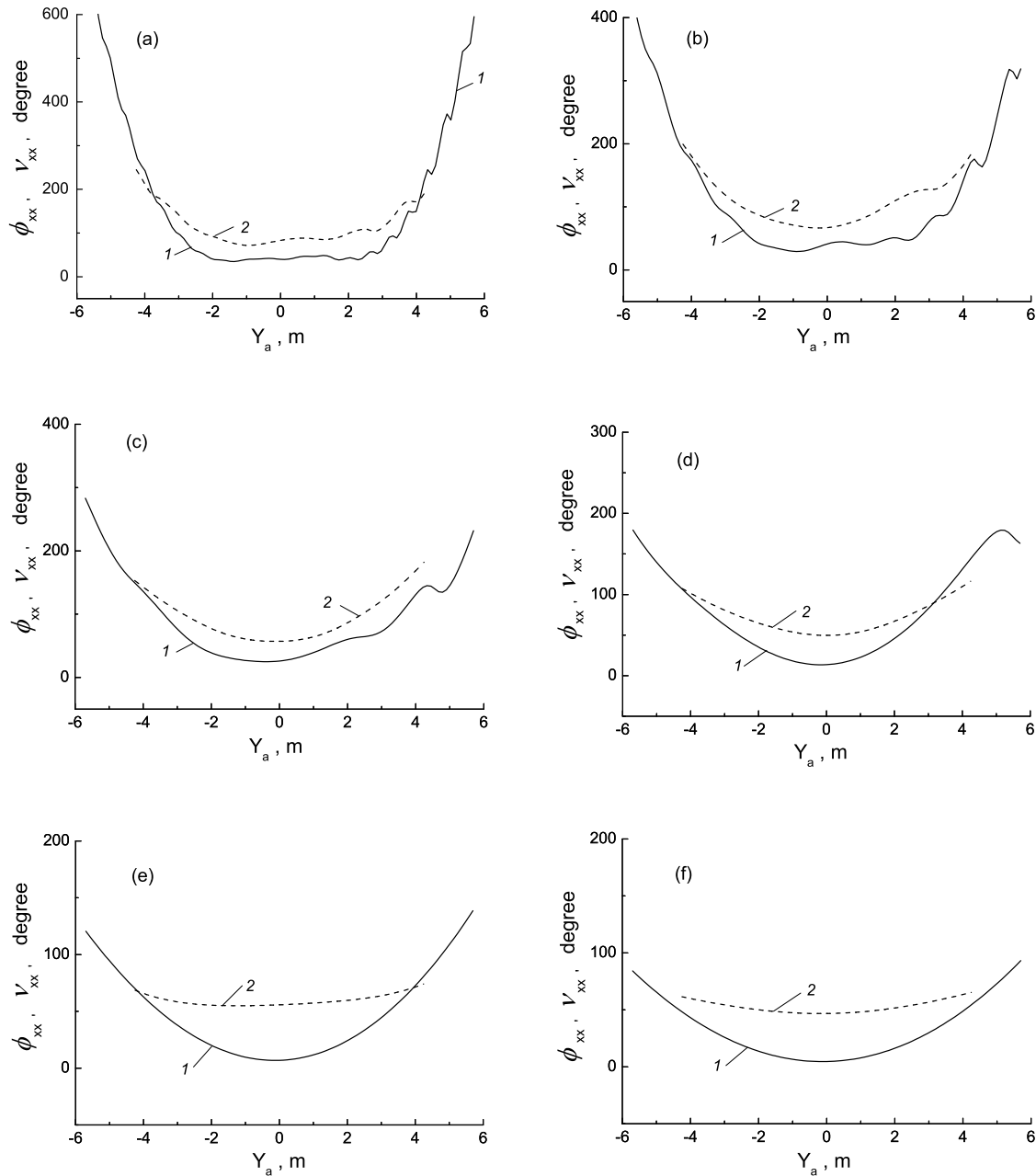


Рис. 5. Фазовые распределения поля основной поляризации в центральном вертикальном сечении апертуры главного зеркала $\nu_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 1) и плоского отражателя $\phi_{xx}(0, Y_a)$ (кривая 2) на волнах: $\lambda = 2$ см (а), 4 см (б), 8 см (в), 16 см (д), 32 см (е) и 48 см (ф).

Обращает на себя внимание смещение максимумов амплитудных распределений в раскрывах плоского и главного зеркал относительно положения максимума в распределении поля в апертуре вторичного зеркала (Рис.4), а также некоторый разворот фазового фронта на длинных волнах в режиме “Юг+плоский” (Рис.5). Эти эффекты напрямую связаны с асимметрией вторичного зеркала.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Используя приведенные выше формулы, были рассчитаны двумерные диаграммы направленности по мощности (элемент матрицы Мюллера M_{11}) в режиме работы “Юг+плоский”. Параллельно, для сравнения, рассчитывались двумерные ДН РАТАН-600 при наблюдениях с одним сектором главного зеркала на горизонте.

Результаты расчетов приведены на Рис.6, 7: (a) — $\lambda 2$ см, (b) — $\lambda 4$ см, (c) — $\lambda 8$ см, (d) — $\lambda 16$ см, (e) — $\lambda 32$ см, (f) — $\lambda 48$ см. На Рис.6 представлены двумерные ДН в режиме работы с одним сектором на горизонте, на Рис.7 — в режиме “Юг+плоский”. Диаграммы нормированы к максимальному значению. Изофоты на графиках проведены с шагом 0.1, начиная с уровня 0.01.

На Рис.8 показаны центральные вертикальные сечения диаграмм направленности (так называемые вертикальные ДН F_V) в режиме работы с одним сектором при наблюдениях на горизонте (кривая 1) и в режиме “Юг+плоский” (кривая 2) на волнах: $\lambda 2$ см — (a), $\lambda 4$ см — (b), $\lambda 8$ см — (c), $\lambda 16$ см — (d), $\lambda 32$ см — (e), $\lambda 48$ см — (f).

Размеры площадок, в пределах которых рассчитывались диаграммы направленности, представленные на Рис.6–8, выбраны следующим образом. По обеим координатам они пропорциональны длинам волн, на которых проводился расчет. Таким образом, если бы выполнялось соотношение $HPBW \sim \lambda/d$, где $HPBW$ — полуширина ДН, а d — размер апертуры, диаграммы на рисунках (a)–(f) выглядели бы одинаково. В действительности это соотношение выполняется лишь для центрального горизонтального сечения ДН.

В вертикальном сечении размеры диаграммы направленности уменьшаются с увеличением длины волны. Причем сужение вертикальных ДН в режиме “Юг+плоский” происходит быстрее и начинается на более коротких волнах, чем в режиме работы радиотелескопа с одним сектором. Это наглядно демонстрируют кривые на Рис.8.

Такие изменения диаграммы направленности с изменением длины волны связаны с изменениями эффективного вертикального размера апертуры главного и плоского зеркал. В горизонтальной плоскости радиотелескопа выполняется приближение геометрической оптики и эффективный горизонтальный размер апертуры постоянен во всем рабочем диапазоне длин волн.

На Рис.9 (слева) показаны зависимости эффективного вертикального размера главного (кривая 1) и плоского (кривая 2) зеркал h_{eff} от длины волны. Справа на этом же рисунке приводятся зависимости коэффициента использования поверхности зеркал KIP от λ . Зависимости построены для центрального вертикального сечения антенны. h_{eff} связано с коэффициентом использования соотношением: $h_{eff} = KIP * h$, где h — вертикальный размер отражающих элементов плоского и кругового отражателей. Зависимости $h_{eff}(\lambda)$ и $KIP(\lambda)$ рассчитывались, исходя из амплитудно-фазового распределения поля в вертикальном сечении зеркала.

Поскольку с увеличением длины волны амплитудное распределение становится более равномерным (Рис.2–4), увеличивается коэффициент использования KIP и эффективный вертикальный размер h_{eff} , что приводит к сужению диаграмм направленности. На волнах $\lambda \sim 48$ см (наблюдения с круговым отражателем) и на $\lambda = 16–48$ см (режим “Юг+плоский”) в вертикальном сечении ДН появляется лепестковая структура, характерная для равномерного облучения апертуры антенны.

На Рис.10 показана зависимость полуширины $HPBW_V$ вертикальной диаграммы направленности от длины волны (кривая 1) для режима “Юг+плоский”. На этом же рисунке кривая 2 демонстрирует, как менялась бы полуширина $HPBW_V$ на разных длинах волн, если бы эффективный размер h_{eff} был постоянен.

Диаграммы, приведенные выше, были рассчитаны для антенны, сфокусированной на горизонт. Рассмотрим, как будет меняться вертикальная ДН РАТАН-600 в режиме “Юг+плоский” при наблюдениях на высотах $H > 0^\circ$.

На Рис.11 (слева) приведены зависимости $HPBW_V/HPBW_V(0)$ от угла H на волнах: $\lambda 2$ см (кривая 1), $\lambda 4$ см (кривая 2), $\lambda 8$ см (кривая 3), $\lambda 16$ см (кривая 4), $\lambda 32$ см (кривая 5) и $\lambda 48$ см (кривая 6). $HPBW_V(0)$ — полуширина вертикальной ДН при наблюдениях на горизонте для данной длины волны (Рис.10, кривая 1).

Практически на всех волнах происходит изменение вертикальной ДН с увеличением угла места наблюдаемого источника. На коротких волнах (2–4 см) расширение ДН с ростом H невелико: для высот $H < 90^\circ$ не более, чем на 10% по сравнению с $HPBW_V(0)$, для азимутных источников ($H > 90^\circ$) — не более, чем на 20%.

С увеличением длины волны ($\lambda \geq 8$ см) расширение ДН начинается на более низких углах, а ход зависимостей $HPBW_V/HPBW_V(0)$ от H становится более крутым, чем на коротких волнах. На волнах $\lambda \geq 16$ см максимальное значение полуширины ДН на высоких углах может в полтора раза превысить величину $HPBW_V$ на горизонте.

Учет дифракционных эффектов позволяет выявить еще одну особенность ДН в режиме “Юг+плоский” — это смещение максимума ДН в вертикальной плоскости в сторону отрицательных значений Y (в сторону меньших высот).

Объясняется этот эффект появлением линейной составляющей в фазовом распределении поля в раскрыве главного и плоского зеркал (иначе разворотом фазового фронта), когда эти зеркала находятся в зоне Френеля вторичного зеркала, вследствие несимметричного распределения поля в раскрыве последнего.

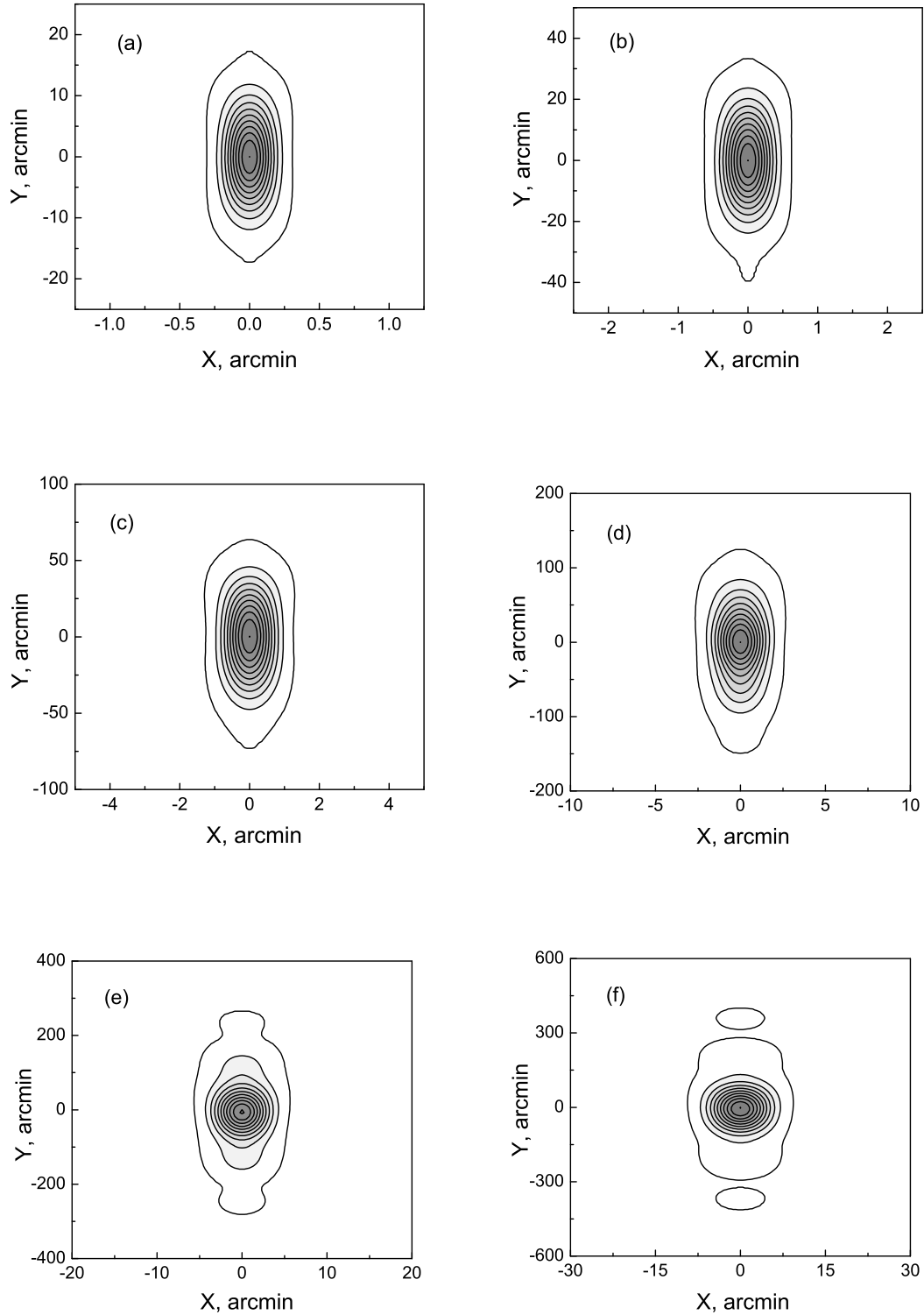


Рис. 6. Мощностные двумерные ДН в режиме работы радиотелескопа с одним сектором при наблюдениях на горизонте на волнах: $\lambda = 2$ см (а), 4 см (b), 8 см (c), 16 см (d), 32 см (e) и 48 см (f). ДН нормированы к максимальному значению. Изофоты проведены с шагом 0.1, начиная с уровня 0.01 (внешний).

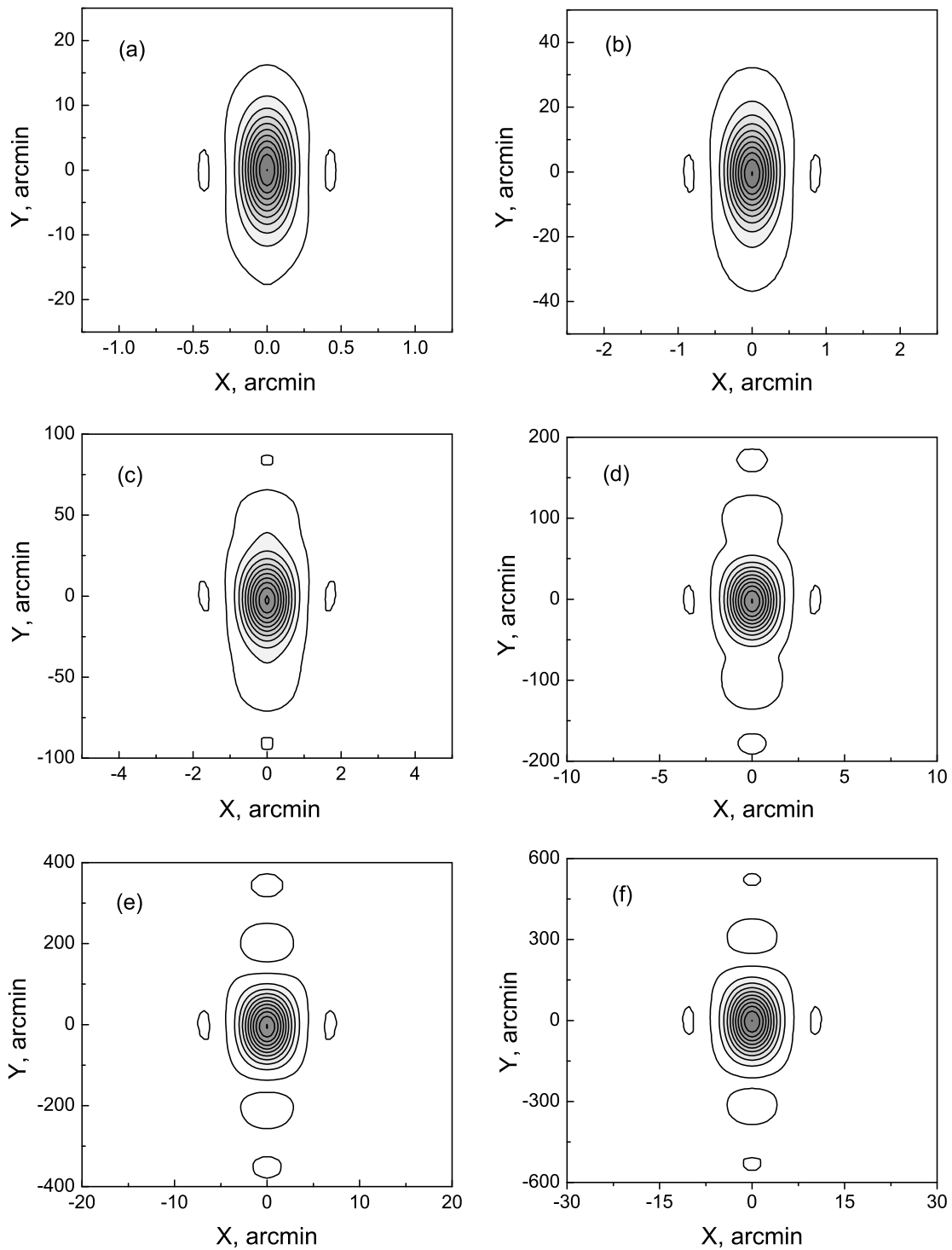


Рис. 7. То же, что на рис.6, для режима работы “Южный сектор с плоским отражателем” при наблюдениях на горизонте.

На Рис.11 (справа) приводятся зависимости величины смещения максимума вертикальной ДН Δ_{max} от высоты наблюдаемого источника H в режиме “Юг+плоский”. Нумерация кривых, соот-

ветствующих разным длинам волн, та же, что и на левом рисунке.

Величина смещений Δ_{max} зависит как от длины волны, так и от угла места наблюдаемого источника, увеличиваясь с ростом λ и H . Наибольших зна-

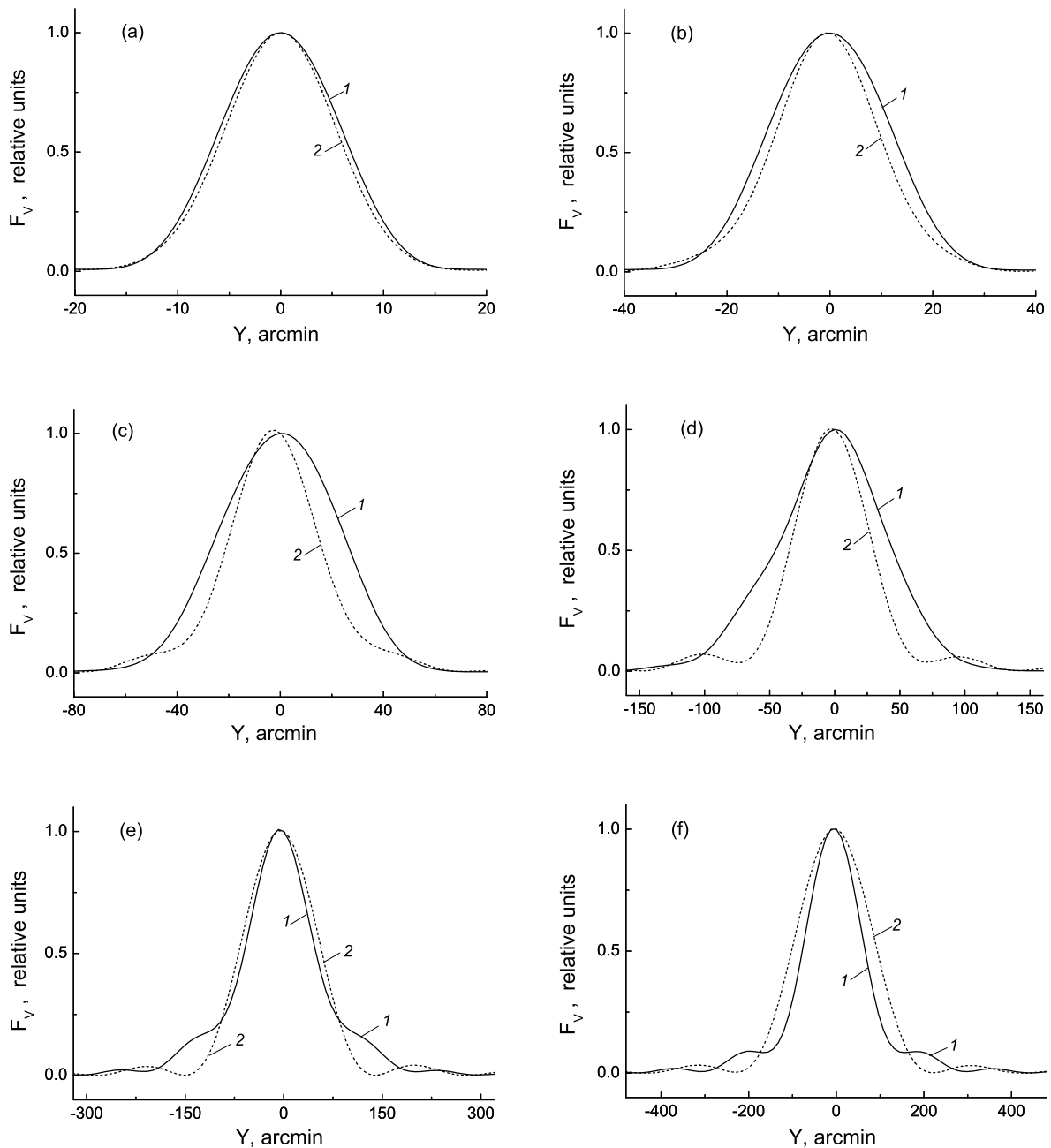


Рис. 8. Центральные вертикальные сечения диаграмм направленности (вертикальные ДН F_V) в режиме работы с одним сектором (кривая 1) и в режиме “Юг+плоский” (кривая 2) при наблюдениях на горизонте: (а) — λ 2 см, (б) — λ 4 см, (с) — λ 8 см, (д) — λ 16 см, (е) — λ 32 см, (ф) — λ 48 см. ДН нормированы к максимальному значению.

чений смещения достигают на волне 32 см ($\sim -5'$) и 48 см ($-4.5' \div -3'$). На волнах 8 и 16 см значения Δ_{max} составляют $-2.5' \div -3'$ и $-2' \div -2.5'$ соответственно. В этом режиме работы радиотелескопа незначительные смещения максимума ДН в вертикальной плоскости есть даже на коротких волнах при наблюдениях источников, близких к зениту и

зенитных источников. В диапазоне $0 \leq H < 50^\circ$ величина Δ_{max} практически не меняется.

Отметим, что подобные смещения наблюдаются также и при работе радиотелескопа с одним сектором вблизи горизонта [3]. Смещение максимума ДН на волне $\lambda 20$ см при наблюдениях с одним (Северным) сектором составляет $\Delta_{max} = -3'$, на

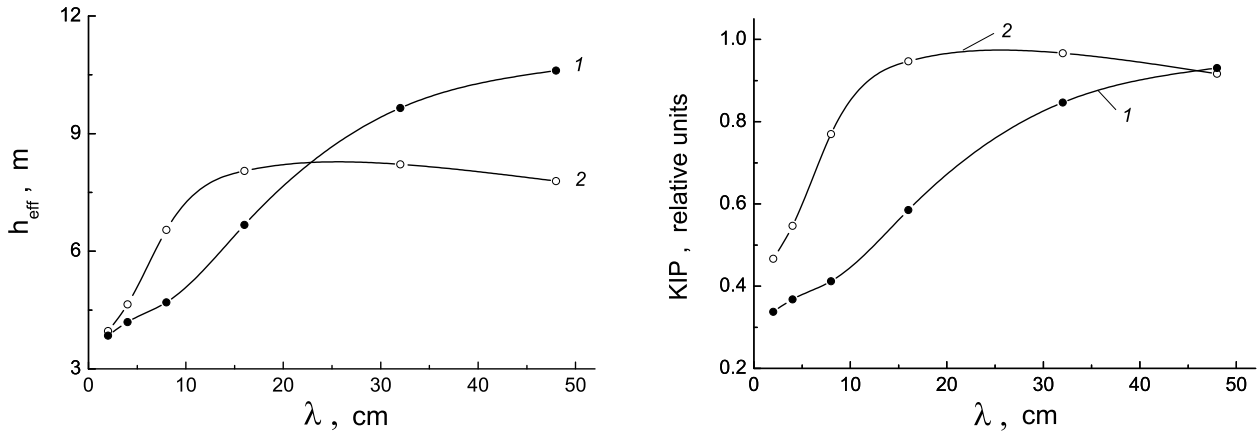


Рис. 9. Зависимости эффективного вертикального размера главного (кривая 1) и плоского (кривая 2) зеркал h_{eff} от длины волны (слева). Зависимости коэффициента использования поверхности зеркал KIP от λ (справа). Зависимости построены для центрального вертикального сечения антенны.

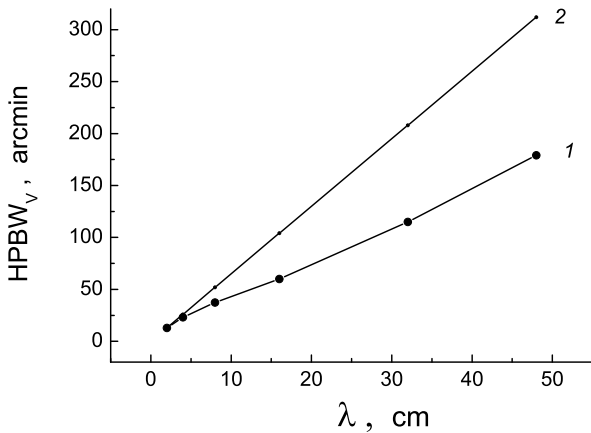


Рис. 10. Зависимость полуширины вертикальной ДН $HPBW_V$ от длины волны (кривая 1) для режима “Юг+плоский”. На этом же рисунке кривая 2 демонстрирует, как менялась бы полуширина $HPBW_V$ на разных длинах волн, если бы эффективный размер h_{eff} был постоянен.

волне λ_{32} см — $\Delta_{max} = -5.8'$. На волне λ_{16} см смещение максимума равно нулю.

Таким образом, учет дифракционных эффектов в пространстве между вторичным, главным и плоским зеркалами, а также учет конечных вертикальных размеров зеркал существенно меняет наши представления о вертикальной диаграмме направленности РАТАН-600 на длинных волнах как в режиме работы с одним сектором, так и в режиме “Юг+плоский”. Точные данные о диаграмме в вертикальной плоскости, особенно при больших выносах от центрального сечения, важны при обработке

проводимых обзоров, а также при наблюдениях протяженных космических источников.

5. ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ АБЕРРАЦИИ ДН В РЕЖИМЕ “ЮГ+ПЛОСКИЙ”

Для полноты картины рассмотрим, как меняется ДН в режиме “Юг+плоский” при поперечном и продольном выносах первичного облучателя из фокуса.

В прямоугольной системе координат ось x направим перпендикулярно фокальной оси радиотелескопа, ось y — вдоль фокальной оси, начало координат поместим в фокусе антенны.

На Рис.12 приведены двумерные ДН в режиме работы с плоским отражателем на волне λ_{2} см (слева) и λ_{32} см (справа) при поперечных выносах рупора из фокуса: $\Delta x = 2\lambda, 3\lambda$ и 4λ (соответственно, сверху вниз). Диаграммы нормированы к максимуму ДН при сфокусированной антенне. Изофоты проведены с шагом 0.1, начиная с уровня 0.01.

Как видно из приведенных графиков, в горизонтальном сечении ДН возникают искажения, типичные для комы: диаграмма становится асимметричной, происходит уменьшение главного лепестка и его смещение относительно центральной оси, появляются большие боковые лепестки. Эти искажения возрастают по мере увеличения поперечного выноса облучателя из фокуса.

В вертикальной плоскости наблюдается та же тенденция к сужению диаграммы направленности с увеличением длины волны, что и при сфокусированной антенне. Сохраняется лепестковая структура в вертикальном сечении ДН на длинных волнах.

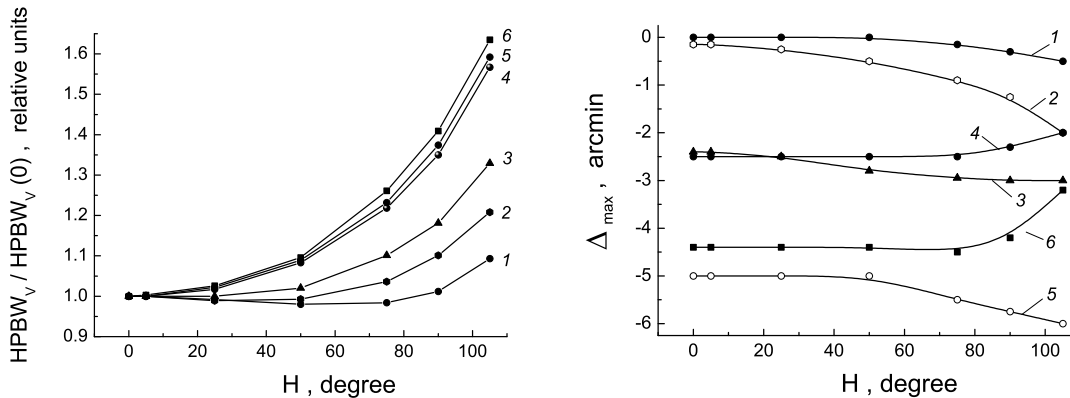


Рис. 11. Слева — зависимости $HPBW_V/HPBW_V(0)$ от угла H на волнах: $\lambda 2$ см (кривая 1), 4 см (кривая 2), 8 см (кривая 3), 16 см (кривая 4), 32 см (кривая 5) и 48 см (кривая 6). $HPBW_V(0)$ — полуширина вертикальной ДН при наблюдениях на горизонте для данной длины волны. Справа — зависимости величины смещения максимума вертикальной ДН Δ_{max} от высоты наблюдаемого источника. Нумерация кривых та же, что и на левом рисунке.

На Рис.13 показаны горизонтальные F_g диаграммы направленности² при поперечных выносах облучателя из фокуса на волне 1 см в режиме работы с одним сектором главного зеркала (слева) и в режиме “Юг+плоский” (справа). Кривая 1 соответствует нулевому поперечному выносу, кривая 2 — $\Delta x = 2\lambda$, кривая 3 — $\Delta x = 4\lambda$ и кривая 4 — $\Delta x = 6\lambda$. Диаграммы нормированы на величину максимума ДН при сфокусированной антенне.

Первые боковые лепестки ДН в режиме “Юг+плоский” имеют более высокий уровень, чем при наблюдениях с одним сектором на горизонте при одинаковых выносах облучателя. Если при работе с одним сектором главного зеркала боковые лепестки ДН спадают равномерно, то в режиме “Юг+плоский” имеется характерная особенность: 3-й и 4-й боковые лепестки по величине практически совпадают (кривые 4 на Рис.13).

На Рис.14 (слева) приведены абберационные кривые, справа — зависимости величины первого бокового лепестка ДН в центральном горизонтальном сечении от Δx . Абберационные кривые показывают, как меняется величина максимума ДН в зависимости от величины выноса облучателя из фокуса. Расчеты проведены для волны $\lambda 1$ см. Однако полученные зависимости верны и для более длинных волн, поскольку в горизонтальной плоскости антенны выполняется приближение геометрической оптики.

Кривые 1 и 2 рассчитаны для режима “Юг+плоский”, кривые 3 и 4 — при работе с одним сектором при наблюдениях на горизонте. При расчете этих кривых использовались ДН первичного

облучателя шириной $\theta_{0,1} = 110^\circ$ (кривые 1 и 3) и $\theta_{0,1} = 80^\circ$ (кривые 2 и 4).

В диапазоне $\Delta x \sim \pm 1.5\lambda$ абберационные кривые практически совпадают. Для выносов $\Delta x > 2\lambda$ абберационные кривые в режиме работы с плоским отражателем проходят выше абберационных кривых в режиме работы с одним сектором на низких углах (при одинаковых диаграммах направленности первичного облучателя). Сужение ДН первичного облучателя приводит к уменьшению поперечных аббераций: увеличивается уровень главного лепестка и уменьшается уровень боковых лепестков.

В режиме наблюдений “Юг+плоский” безабберационная зона (область изменения Δx , где падение сигнала по мощности не превышает 20%) составляет $\sim \pm 2.5\lambda$. С точностью до характера облучения такие же размеры безабберационная зона имеет и при наблюдениях с одним сектором главного зеркала в диапазоне высот $H \leq 10^\circ$. Последнее было проверено экспериментально в работе [11] и представлено в [18].

Поскольку для расчета ДН в центральном горизонтальном сечении достаточно приближения геометрической оптики, кривые, приведенные на Рис.14 можно сравнить с полученными ранее в работе [1]. С точностью до характера облучения (ширины и формы ДН рупора) эти кривые согласуются с результатами последней.

Двумерные диаграммы направленности при продольных выносах облучателя из фокуса в режиме “Юг+плоский” показаны на Рис.15: слева — на волне $\lambda 2$ см, справа — $\lambda 32$ см. Диаграммы направленности, рассчитанные при продольных выносах $\Delta y = 0.5\lambda, 1\lambda$ и 1.5λ , расположены сверху

²Горизонтальной ДН мы называем центральное горизонтальное сечение диаграммы направленности ($Y = 0$).

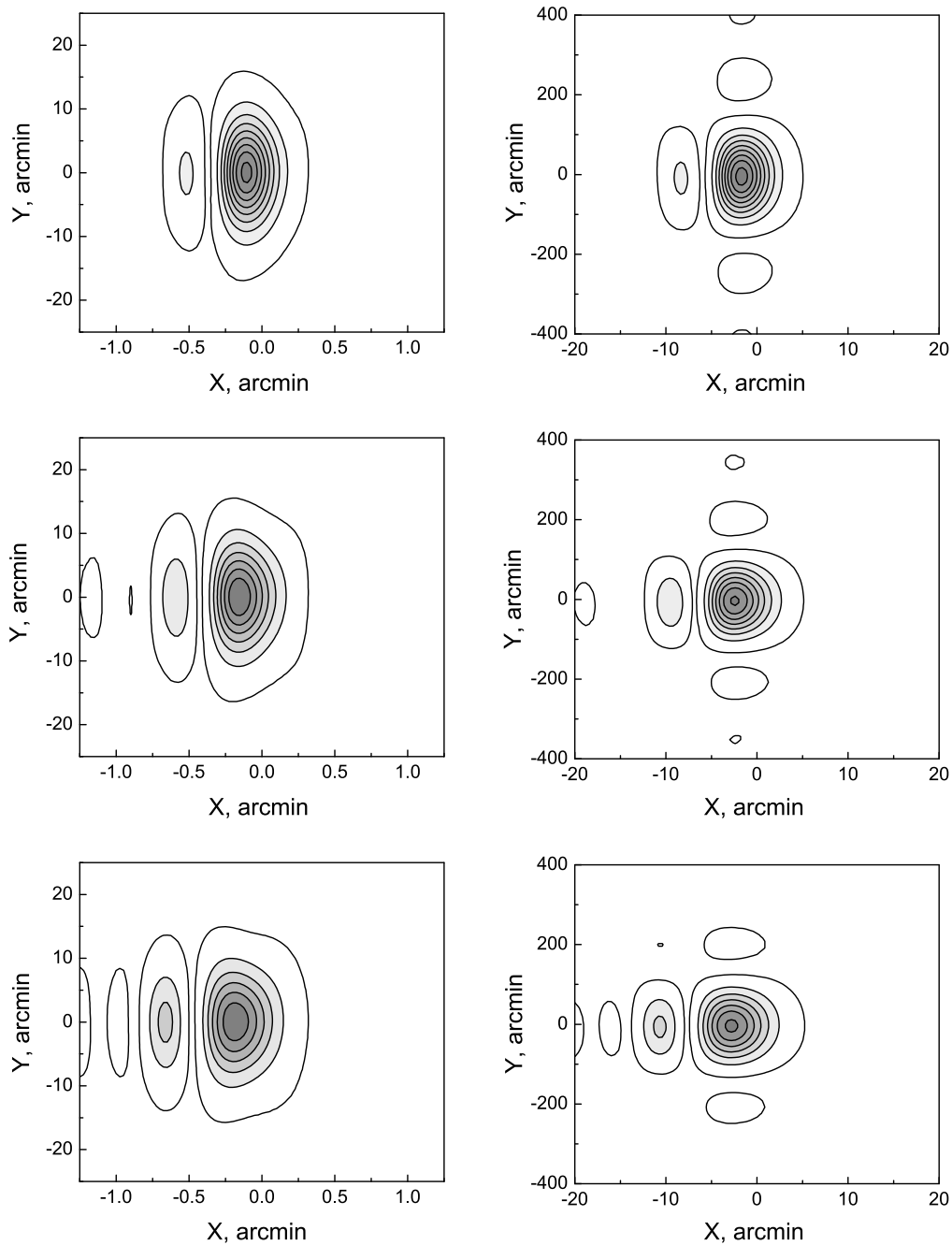


Рис. 12. Мощностные двумерные ДН в режиме работы с плоским отражателем на волне $\lambda 2$ см (слева) и $\lambda 32$ см (справа) при поперечных выносах рупора из фокуса: $\Delta x = 2\lambda, 3\lambda$ и 4λ (сверху вниз). Диаграммы нормированы к максимуму ДН при сфокусированной антенне. Изофоты проведены с шагом 0.1, начиная с уровня 0.01 (внешний).

вниз. Нормировка диаграмм и проведение изофот такие же, как и на Рис.12.

На Рис.16 приведены вертикальные ДН на волнах $\lambda 2$ см (а) и $\lambda 32$ см (b) при $\Delta y = 0$ (кривая 1), 0.5λ (кривая 2), λ (кривая 3) и 1.5λ (кривая 4), горизонтальные ДН на волне $\lambda 2$ см при тех же выносах (с) и абберационная кривая (d).

При продольных выносах облучателя из фокуса

происходит падение усиления в главном лепестке и расширение ДН в горизонтальном сечении ($Y = 0$). В вертикальном сечении ($X = 0$) расширения ДН по нулевому уровню с увеличением Δy не происходит. Вертикальные диаграммы направленности с изменением длины волны сужаются подобно тому, как это происходит для сфокусированной антенны. Безабберационная зона при продольных выносах

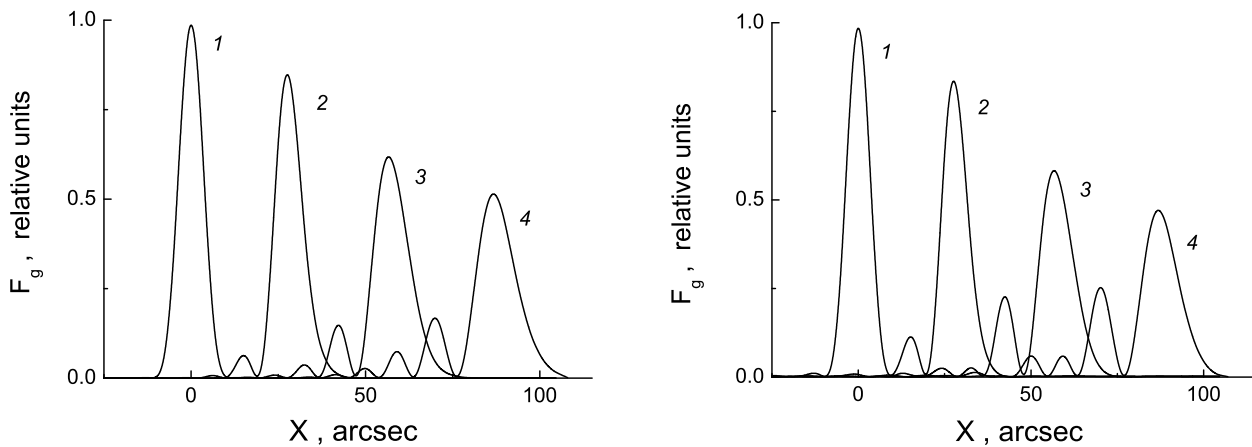


Рис. 13. Центральные горизонтальные сечения диаграммы направленности (горизонтальные диаграммы направленности F_g) при поперечных выносах облучателя из фокуса на волне $\lambda 1$ см в режиме работы с одним сектором главного зеркала (слева) и “Юг+плоский” (справа). Кривая 1 соответствует нулевому поперечному выносу, кривая 2 — $\Delta x = 2\lambda$, кривая 3 — $\Delta x = 4\lambda$ и кривая 4 — $\Delta x = 6\lambda$. Диаграммы нормированы на величину максимума ДН при сфокусированной антенне.

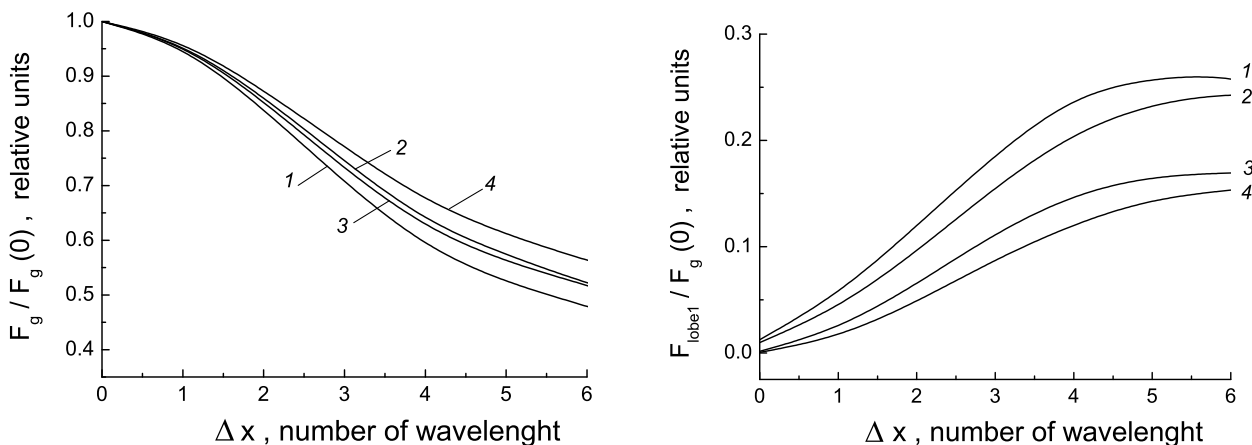


Рис. 14. Аберрационные кривые (слева) и зависимости величины первого бокового лепестка ДН в центральном горизонтальном сечении от величины поперечного выноса облучателя из фокуса Δx (справа) в режиме “Юг+плоский” (кривые 1 и 2) и в режиме наблюдений с одним сектором на горизонте (кривые 3 и 4). Кривые 1 и 3 соответствуют ДН первичного облучателя с шириной $\theta_{0.1} = 110^\circ$, кривые 2 и 4 — $\theta_{0.1} = 80^\circ$.

существенно меньше, чем при поперечных, и составляет порядка 0.75λ .

Кроме падения усиления и расширения главного лепестка продольный вынос облучателя приводит к смещению максимума вертикальной ДН. При положительном выносе $\Delta y = \lambda$ на волне $\lambda 2$ см смещение максимума ДН составляет $1.2'$, на волне $\lambda 32$ см — $4.5'$, при $\Delta y = 1.5\lambda$ — $0.8'$ и $5.5'$ соответственно. Таким образом положительный продольный вынос облучателя из фокуса может уменьшить или даже полностью скомпенсировать отрицатель-

ный сдвиг диаграммы направленности в вертикальной плоскости на длинных волнах (Рис.16).

В отличие от горизонтальной ДН, которая зависит от характера облучения вторичного зеркала, вертикальная диаграмма в режиме “Юг+плоский” практически не меняется с изменением ширины ДН первичного облучателя.

6. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ДН С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

В заключение сравним результаты расчета ДН с имеющимися экспериментальными данными.

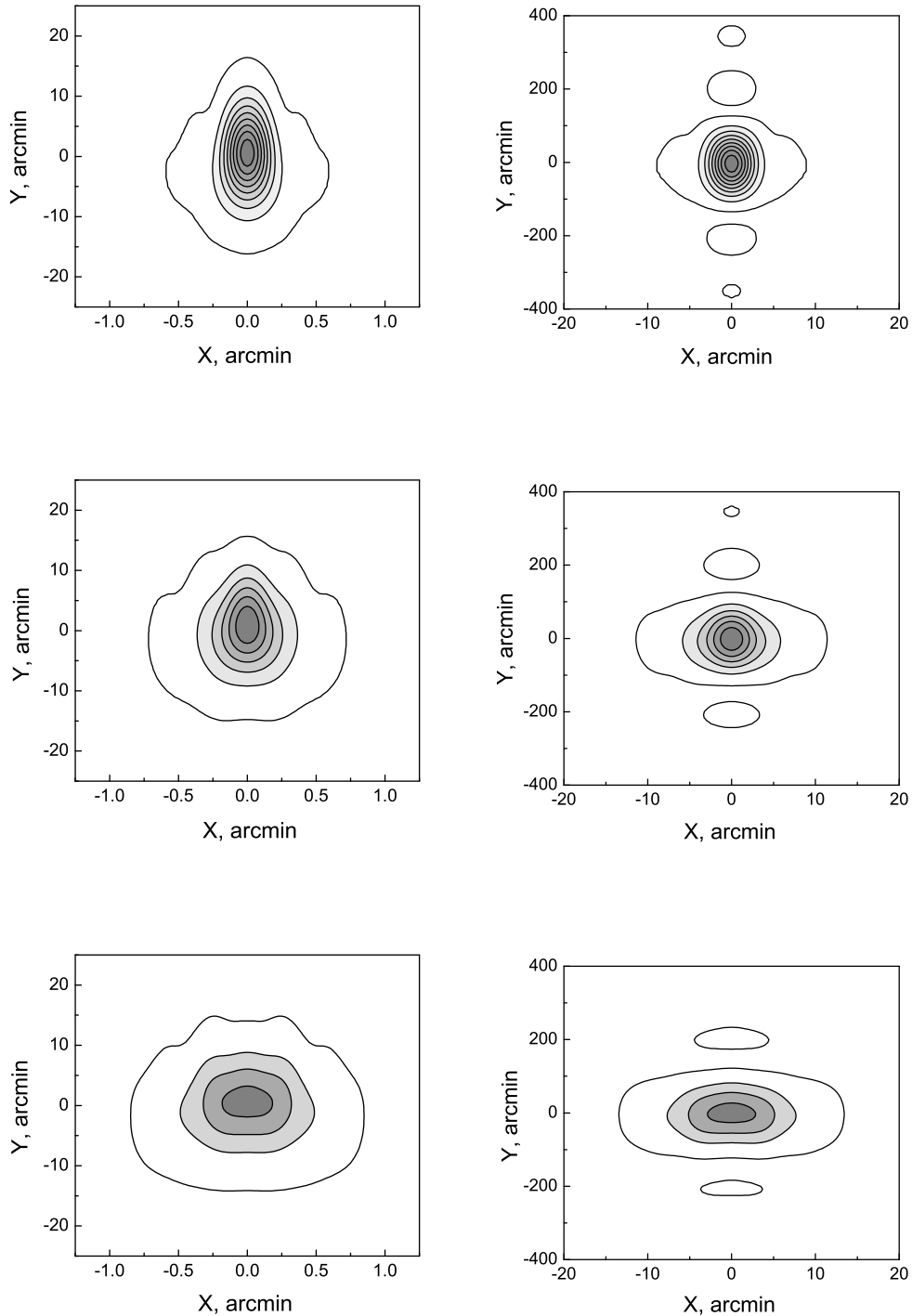


Рис. 15. Мощностные двумерные диаграммы направленности при продольных выносах облучателя из фокуса в режиме “Юг+плоский” на волне $\lambda 2$ см (слева) и $\lambda 32$ см (справа). ДН рассчитаны при продольных выносах $\Delta y = 0.5\lambda, 1\lambda$ и 1.5λ (соответственно сверху вниз). Нормировка диаграмм и проведение изофот такие же, как на Рис.12.

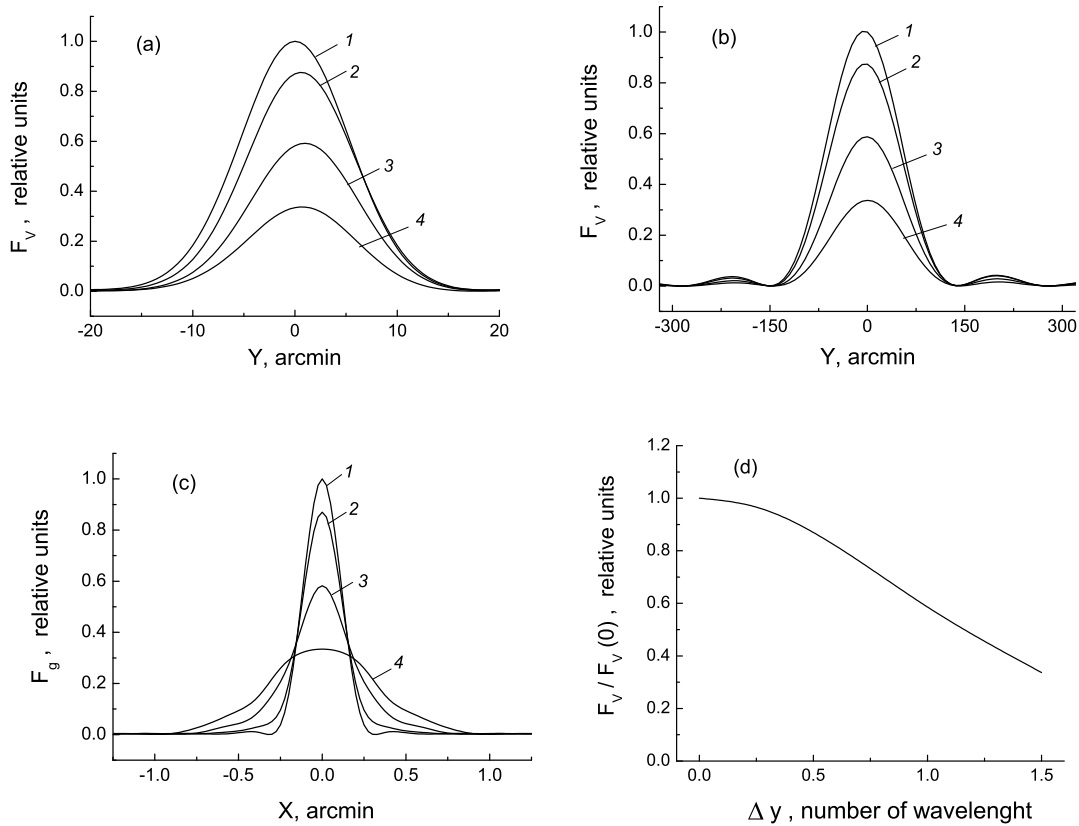


Рис. 16. Вертикальные ДН на волнах $\lambda 2$ см (а) и $\lambda 32$ см (б) при продольных выносах облучателя из фокуса: $\Delta y = 0$ (кривая 1), 0.5λ (кривая 2), λ (кривая 3) и 1.5λ (кривая 4). Горизонтальные ДН на волне $\lambda 2$ см при тех же продольных выносах облучателя (с) и абберационная кривая (d).

Экспериментальные исследования диаграммы направленности в режиме “Юг+плоский” проводились в 1979 г. путем наблюдений ярких “точечных” радиоисточников. Результаты этих исследований представлены в работе [2]. Это единственная работа по измерению ДН в достаточно большом телесном угле и на разных длинах волн в режиме “Юг+плоский”.

На Рис.17 приведены вертикальные диаграммы направленности, полученные в работе [2] на волне $\lambda 8.2$ см, и диаграммы, рассчитанные на ту же волну и для тех же высот источника, что и в эксперименте. Вертикальный размер элементов кругового отражателя в тот период составлял $h_c = 7.4$ м, что было учтено при расчетах.

На Рис.17 (а) незаполненными кружками показаны экспериментальные значения диаграммы направленности, измеренной для высоты $H = 25^\circ$, заполненными — для $H = 48^\circ$. Диаграмма направленности, рассчитанная на высоту $H = 25^\circ$, показана сплошной линией, на высоту $H = 48^\circ$ — пунктирной. Поскольку на этих высотах вертикальные диаграммы направленности практически

совпадают, значения экспериментальных ДН из [2] мы приводим на одном графике.

На Рис.17 (b,c) показаны экспериментальные значения ДН для высот $H = 87^\circ$ — (b) и 102° — (c) (заполненные кружки). Сплошные линии — расчетные ДН.

Как видно из приведенных на Рис.17 графиков, диаграммы направленности, рассчитанные по данной методике, хорошо согласуются с экспериментальными ДН, особенно на высоких углах места (87° и 102°). Некоторый разброс данных на высотах 25° и 48° , возможно, связан с недостаточной точностью установки антенны или измерений.

В процессе измерений было обнаружено, что наблюдается смещение максимума вертикальной диаграммы направленности в сторону низких высот: на волне $\lambda 8.2$ см примерно на $3'$. Смещения максимума вертикальной ДН, полученные расчетным путем, составили на этой волне $2.7' - 3'$ в диапазоне высот $50^\circ < H < 105^\circ$ (Рис.11 (справа)). То есть расчетные и экспериментальные данные хорошо совпали.

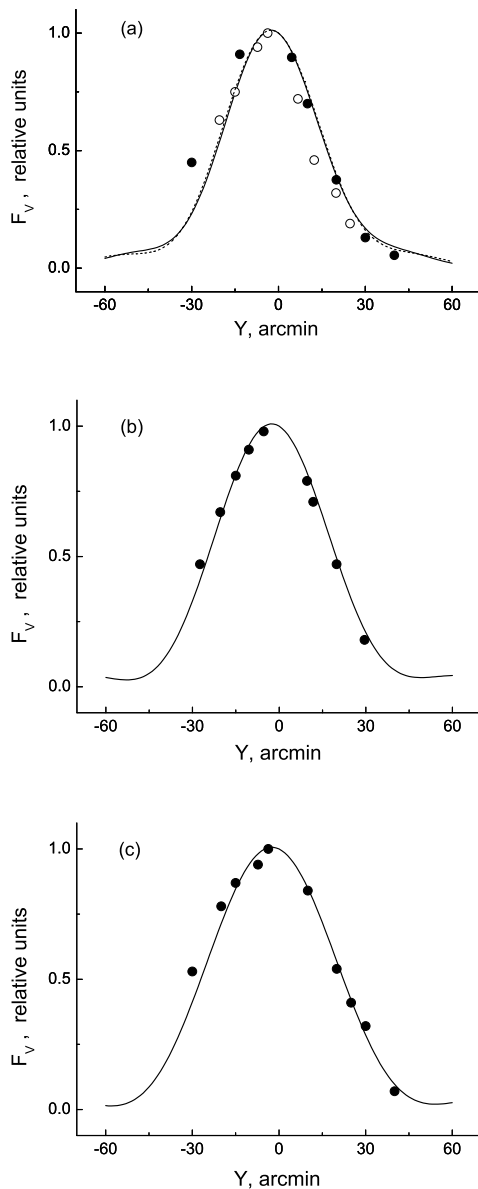


Рис. 17. Измеренные в работе [2] вертикальные диаграммы направленности на волне $\lambda 8.2$ см (кружки) и диаграммы, рассчитанные нами для той же волны и для тех же высот источников, что и в эксперименте (сплошные и пунктирная линии). (a) — $H = 25^\circ$ (незаполненные кружки — экспериментальная ДН, сплошная линия — расчетная ДН) и $H = 48^\circ$ (заполненные кружки — экспериментальная ДН, пунктирная линия — расчетная ДН), (b) — $H = 87^\circ$, (c) — $H = 102^\circ$.

С точностью до единиц процентов совпали полуширины расчетных и экспериментальных горизонтальных ДН на волнах $\lambda 2.08$, $\lambda 3.4$ и $\lambda 8.2$ см. Расчеты на этих волнах проводились для высоты $H = 87^\circ$. Последняя соответствует высоте опорного источника ЗС84.

Полуширина измеренной вертикальной ДН по половинной мощности на волне $\lambda 3.4$ см составила

$22'$, на волне $\lambda 8.2$ см — $40'$. Если бы полуширины были пропорциональны длинам волн, то полуширина на волне $\lambda 8.2$ см равнялась бы $51.5'$. То есть наблюдается сужение вертикальной ДН с увеличением длины волны. Это же сужение мы видим и по результатам расчета диаграммы направленности в режиме “Юг+плоский” (Рис.8,10).

С точностью до характера облучения вторичного зеркала совпали величины первого бокового лепестка расчетной и экспериментальной диаграмм направленности при сфокусированной антенне и при поперечном выносе облучателя из фокуса в диапазоне $\Delta x \leq 4\lambda$.

И, наконец, на приведенных в работе [2] записях прохождения источника хорошо видна особенность лепестковой структуры ДН при поперечных аберрациях в режиме “Юг+плоский”. А именно, первый боковой лепесток ДН существенно превышает второй и третий лепестки, которые близки по амплитуде. Эта особенность наблюдается и у рассчитанных диаграмм направленности при поперечных выносах облучателя из фокуса (Рис.13 (справа)).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет дифракционных эффектов в пространстве между вторичным, главным и плоским зеркалами при расчете диаграммы направленности в режиме “Юг+плоский”, а также учет конечных вертикальных размеров зеркал, позволяет выявить некоторые особенности ДН в вертикальной плоскости.

Прежде всего это сужение вертикальной диаграммы с увеличением длины волны. Во вторых — смещение максимума вертикальной ДН в сторону меньших высот. Это смещение есть практически на всех волнах длиннее $\lambda 2$ см и его величина зависит от высоты установки антенны.

Отметим, что сужение диаграммы направленности на длинных волнах ($\lambda \sim 32$ см) наблюдается также и в режиме работы радиотелескопа с одним сектором (на низких высотах).

Изменения диаграммы направленности с увеличением длины волны связаны с тем, что главное и плоское зеркала оказываются в зоне Френеля вторичного зеркала. При этом переход в зону Френеля в режиме “Юг+плоский” происходит на более коротких волнах, чем в режиме работы с одним сектором.

С увеличением длины волны амплитудное распределение поля в вертикальном раскрытии плоского зеркала из спадающего к краям постепенно становится равномерным, что приводит на длинных волнах к образованию лепестковой структуры в вертикальном сечении ДН.

В горизонтальном сечении антенны выполняется приближение геометрической оптики. Горизонтальное сечение диаграммы направленности, рассчитанной с помощью описанного выше алгоритма, совпало с результатами расчетов, выполненных в работе [1] в приближении геометрической оптики. Это относится как к диаграмме направленности сфокусированной антенны, так и к ДН с поперечными аберрациями. Близки также результаты расчетов вертикальной ДН на коротких волнах ($\lambda \leq 4$ см).

При продольных выносах облучателя из фокуса учет дифракционных эффектов приводит к более сильному падению величины максимума ДН, чем это дает приближение геометрической оптики, и к некоторому смещению его в вертикальной плоскости относительно центральной оси. На длинных волнах смещение максимума ДН, связанное с продольным выносом, может компенсировать смещение, вызванное несимметрией амплитудно-фазового распределения в раскрыве плоского отражателя.

Сравнение результатов расчета диаграммы направленности с имеющимися экспериментальными данными о ДН в режиме “Юг+плоский” [2] показало их хорошее совпадение. С точностью до процентов совпали расчетные и измеренные полуширины вертикальных и горизонтальных диаграмм направленности. На волне $\lambda 8.2$ см экспериментальные значения вертикальных ДН очень хорошо легли на расчетные кривые, особенно на высотах $H = 87^\circ$ и 102° . На высотах $H = 25^\circ$ и 48° разброс экспериментальных данных оказался несколько выше.

На волне $\lambda 8.2$ см подтверждено смещение максимума ДН в вертикальной плоскости, а также сужение ДН с увеличением длины волны. Совпали экспериментальные и расчетные аберрационные кривые и уровень первых боковых лепестков при поперечном выносе облучателя из фокуса, а также лепестковая структура в целом.

Отметим, что поперечные аберрации в режиме “Юг+плоский” превышают аберрации в режиме наблюдений с одним сектором (при $H < 10^\circ$) очень незначительно. Безаберрационная зона для обоих режимов близка к $\pm 2.5\lambda$. Аберрационная кривая, рассчитанная для режима “Юг+плоский” совпала в пределах ошибок измерений с аберрационной кривой, измеренной для Северного сектора на низких углах места [11].

Все вышеизложенное позволяет использовать предложенный алгоритм для более точного расчета диаграммы направленности в режиме наблюдений с плоским отражателем. Более точные данные о ДН, особенно на больших расстояниях от ее центрального сечения в вертикальной плоскости,

важны как при обработке проводимых на РАТАН-600 обзоров, так и при наблюдениях протяженных космических объектов, в частности Солнца, исследования которого постоянно проводятся на РАТАН-600 в режиме “Юг+плоский”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 08-02-00486а и 09-07-00320а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **15**, 151 (1982).
2. А. В. Темирова, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **19**, 101 (1985).
3. E. K. Majorova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 78 (2002).
4. Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. В. Кузнецов и др., *Радиотехника и электроника* **6**, 1947 (1961).
5. Н. А. Есепкина, Б. А. Васильев, И. А. Водоватов и др., *Радиотехника и электроника* **22**, 1484 (1977).
6. Н. А. Есепкина, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **4**, 157 (1972).
7. Н. С. Бахвалов, Л. Г. Васильева, Н. А. Есепкина и др., *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **5**, 135 (1973).
8. Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др., *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **11**, 182 (1979).
9. А. Н. Коржавин, *Астрофиз. Исслед.* (Изв. САО) **9**, 71 (1977).
10. А. Н. Коржавин, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **11**, 170 (1979).
11. E. K. Majorova and S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 89 (2002).
12. О. Н. Шиврис, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **12**, 134 (1980).
13. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский и Н. А. Есепкина, *Изв. ГАО* **188**, 3 (1972).
14. Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский и др., *Изв. ГАО* **188**, 40 (1972).
15. Е. К. Майорова и А. А. Стоцкий, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **13**, 117 (1981).
16. Е. К. Майорова и А. А. Стоцкий, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **15**, 117 (1982).
17. Е. К. Майорова, *Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук* (САО РАН, Н. Архыз, 1986).
18. http://www.sao.ru/hq/len/di_eks.htm

COMPUTATION OF THE POWER BEAM PATTERN OF RATAN-600 RADIO TELESCOPE WITH THE ALLOWANCE FOR DIFFRACTION EFFECTS WHEN OPERATED IN THE SOUTHERN-SECTOR-WITH-FLAT-REFLECTOR MODE**E.K. Majorova**

We report the results of the computation of the power beam pattern (PBP) of RATAN-600 radio telescope operating in the Southern-sector-with-flat-reflector (“South+flat”) mode throughout the entire operating frequency range of the radio telescope with the allowance for diffraction effects in the space between the secondary, primary, and flat mirrors. We also computed the gain-phase field distributions at the mirror surfaces when operating in the “South+flat” mode and in single-sector observations at close-to horizon elevations. The width of the power beam pattern in the vertical direction is shown to decrease and the maximum of the diagram to shift toward lower elevations with increasing wavelength. When the radio telescope is operated in the “South+flat” mode the above two changes in the power beam pattern begin to show up at shorter wavelengths compared to the case of single-sector operation. The shift of the maximum of the power beam pattern is shown to depend on the height at which the antenna is mounted. The power beam pattern was computed both for the case of a focused antenna and for the case of off-focus primary emitter. We report the results of the computation of the PBP made in terms of the Fresnel diffraction and geometrical optics approximations and also based on available experimental data. The diagrams computed using this technique agree well with the measured diagrams.

Key words: *techniques: radar astronomy*