Расчет характеристик РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп"

Е.К Майорова, В.Б.Хайкин

Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, Nizhnij Arkhyz 369167, Russia

Аннотация. Приводятся результаты расчетов характеристик радиотелескопа РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп". Плоский отражатель и круговое зеркало антенны рассчитываются как двухзеркальная апланатическая система с планоидным зеркалом, которое осуществляет "шмидтовскую"коррекцию волнового фронта волны, падающей под произвольным углом к горизонту. Выведены формулы и создан комплекс программ для расчета конфигураций зеркал антенной системы и оптимизированы ее основные параметры. Расчитаны фазовые распределения поля на апертуре и ДН радиотелескопа для различных углов формирования антенны и высот наблюдаемого источника. Показана возможность длительного сопровождения источников (вплодь до 1 часа) на волнах, длиннее 4 см при апертуре антенны 150 м.

Проблема длительного сопровождения космических источников на радиотелескопе РАТАН-600 в настоящее время является одной из центральных. Ее решение позволит на порядки увеличить чувствительность телескопа и существенно расширить круг астрофизических задач, решаемых на РАТАН-600. Режим длительного сопровождения особенно важен для спектральных исследований, для изучения быстропеременных космических объектов, таких как пульсары, для исследования динамики солнечных процессов и мерцаний радиоисточников.

Наиболее эффективным является метод длительного сопровождения источников с использованием плоского перископического отражателя, установленного в южной части радиотелескопа РАТАН-600 (Хайкин и др., 1972), (Шиврис, 1980). Плоское зеркало вместе с южным сектором главного зеркала ("Юг+Плоский") и облучателем, выполненным в виде параболического цилиндра с горизонтальной образующей, представляют собой систему, подобную системе Крауса в Нансе (рис.1). Между плоским зеркалом и южным сектором главного зеркала проложен дуговой рельсовый путь, по которому может перемещается облучатель (вторичное зеркало). Длительное слежение за источником требует соответствующего изменения угла наклона элементов плоского зеркала, движения облучателя по дуговым рельсам и непрерывной перестановки элементов главного зеркала по азимуту и радиусу, так, чтобы его поверхность представляла параболический цилиндр

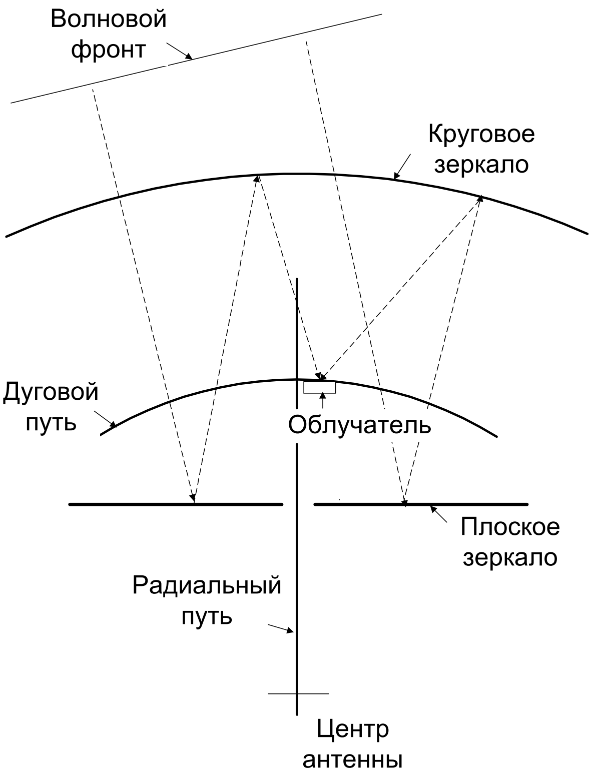


Рис. 1:

с вертикальной образующей, установленный в соответствии с азимутом отраженного от перископа фронта волны. Реализация этого наиболее мощного режима (режим "бегущей параболы") позволит сопровождать источники 3–4 часа с полной апертурой антенны, однако потребует существенного усовершенствования АСУ радиотелескопа РАТАН-600.

Длительное слежение за источником без сокращения апертуры или с незначительным ее сокращением возможно также с помощью режимов, предложенных в работах Н.Л. Кайдановского и др. авторов. Среди них режим с главным зеркалом в форме кругового цилиндра и специальным облучателем двойной кривизны, "круговой телескоп"и др. Однако, пока эти режимы остаются нереализоваными из-за конструктивных сложностей, т.к. предполагают создание специального корректируещего зеркала сложной формы (Вавилова, 1969), использование фазированной антенной решетки на фокальной линии вторичного зеркала (Кайдановский, 1980), прокладки дополнительных рельсовых путей (Кайдановский, 1975).

В настоящее время сопровождение источников на РАТАН-600 осуществляется с помощью методов "скольжения"(Мингалиев и др., 1985) и "эстафеты"(Голубчина, 1986). Разработан и опробован режим "быстрых перестановок"главного зеркала (Хайкин и др.,1997). Режим "эстафеты"позволяет следить за источником 6–10 часов, но в 5–6 раз сужает апертуру антенны или полосу принимаемых частот при "зонировании"главного зеркала. Два других метода работают с полной апертурой антенны, но время экспозиции источника невелико ($1 \div 10$ минут).

Метод, исследование которого предлагается в настоящей работе, и который получил название "радио-Шмидт телескоп"использует антенную систему "Юг+Плоский". Для слежения за источником, как и в режиме "бегущей параболы", используется движущийся по дуговому пути облучатель и осуществляется изменение угла наклона плоского зеркала в небольших пределах. Отличительной особенностью этого метода является то, что форма главного зеркала в виде кругового цилиндра не меняется в процессе сопровождения источника.

В основе метода лежит идея создания на базе плоского и кругового отражателей предфокальной апланатической двухзеркальной системы с широким полем зрения, свободной от сферической аберрации и комы. Напомним, что в оптике предфокальными называются системы, в которых лучи света, падающие на первое зеркало, отражаются от него и попадают на второе зеркало, не пересекая оптическую ось системы.

В оптике к таким системам относятся системы Шварцшильда, Ричи– Кретьена, "зеркальный Шмидт"и "зеркальный Райт". Две последние являются частным случаем двухзеркальных апланатических систем – системами с планоидным зеркалом. У планоидов кривизна поверхности при вершине равна нулю, так что фокусное рассояние всей системы приблизительно равно фокусному расстоянию второго зеркала. В случае антенной системы "Юг+Плоский"планоидом является плоское зеркало , второе зеркало – круговой отражатель РАТАН-600. Отметим, что впервые идея "шмидтовской"коррекции волнового фронта для радиотелескопа с неподвижным круговым главным зеркалом была выдвинута Арсаком и осуществлена на системе Крауса в Нансе (Arsac, 1960), (Biraud, 1969).

1 Расчет антенной системы при $H_a = 0°$.

В оптике теория предфокальных апланатических систем из двух зеркал была разработана К.Швардшильдом, Кретьеном, Д.Д.Максутовым. В 30-х годах Райт предложил и рассчитал конструкцию укороченного Шмидт-телескопа. Одно из существенных неудобств системы Шмидта – необходимость размещать корректирующее зеркало на двойном расстоянии от фокуса сферического зеркала в центре его кривизны, был устранен заменой сферического зеркала на сплюснутый сфероид и помещением корректирующего зеркала на расстоянии, близком к фокальному. Система Райта представляет собой апланатическую систему, где наряду со сферической аберрацией устраняется и кома, однако с меньшим, чем у системы Шмидта полем зрения (в 1.5 – 2 раза).

Поскольку формулы, выведенные Райтом (Wright, 1946), никак не ограничены габаритами телескопа и могут быть применены для расчетов систем любых размеров, они были использованы нами для предварительного моделирования формы кругового и плоского зеркал антенной системы "Юг+Плоский"в режиме "радио-Шмидт телескоп". На рис.2 показано как меняется форма плоского и кругового отражателей при изменении параметра $(F' - M)$, где F' – параксиальное фокусное расстояние всей системы, M – расстояние от вершины кругового отражателя до фокуса , где помещается облучатель. $\Delta x = x(y) - x(0)$ – изменение продольной координаты плоского зеркала, r - радиальная координата кругового зеркала (рис.3).

Предварительные расчеты показалили, во-первых, принципиальную возможность построения на базе системы "Юг + Плоский"апланатической системы, подобной системам Шмидта или Райта, во-вторых, продемонстрировали необходимость оптимизации ее параметров для получения наиболее эффективной работы телескопа. В дальнейшем

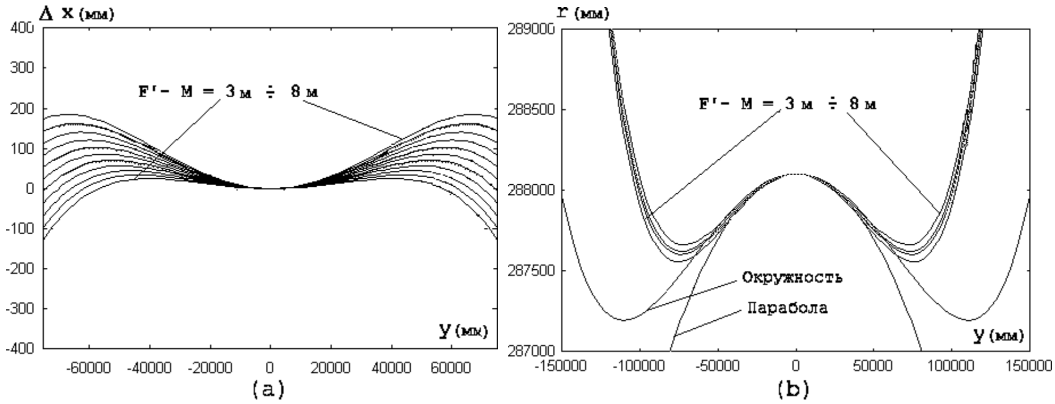


Рис. 2: Изменение формы плоского (a) и кругового (b) отражателей при различных значениях параметра $F' - M$.

для расчета двухзеркальной апланатической системы, мы использовали методику, предложенную Г.М.Поповым (1974), которая основана на исследовании дифференциальных уравнений, решение которых позволяет найти точные выражения для поверхностей зеркал, являющихся поверхностями вращения и имеющих общую ось симметрии. Вывод формул, полученных в работах (Попов, 1974), (Попов и др., 1976) и приводимых ниже, основывался на условии получения исправленного от сферических аберраций изображения на оси (принцип Ферма) и условии апланатизма (условии синусов Аббе).

Хотя плоский и круговой отражатели радиотелескопа РАТАН-600 не являются поверхностями вращения, выражения, полученные в вышеназванных работах, могут быть использованы для расчета кривых, по которым должны выставляться элементы зеркал, когда угол места фронта падающей волны равен нулю. Это связано с особенностями фокусировки лучей в антенной системе "Юг+Плоский". При высотах, равных нулю, в приближении геометрической оптики ход лучей в горизонтальных сечениях такой системы полностью совпадает с ходом лучей в меридиональном сечении зеркал, имеющих ось вращения, что объясняется распространением цилиндрической волны и фокусировкой лучей лишь в горизонтальной плоскости. Геометрические размеры антенной системы "Юг+Плоский"показаны на рис.3(a). D – расстояние между вершинами зеркал составляет 184 м, Q – расстояние между облучателем, находящемся на дуговом рельсовом пути, и вершиной плоского зеркала равно 52 м, M – расстояние от мнимого фокуса облучателя до вершики кругового отражателя или фокусное расстояние кругового отражателя равно 132 м.

Приведем выражения для зеркал, полученные в работе (Попов и др., 1976). Параксиальное фокусное расстояние системы f' при выводе формул принималось равным 1.

Координаты плоского зеркала (x, y) и радиус-вектор кругового отражателя (ρ) находятся по формулам:

$$x = \frac{\xi(1-\xi)}{d} - d + \frac{d+q}{d^{(2d-1)/(d-1)}}(1-\xi)^{1/(1-d)}(d-\xi)^{(2d-1)/(d-1)} \quad , \tag{1}$$

$$y = 2\sqrt{\xi(1-\xi)} \quad , \tag{2}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\xi}{d} + \frac{d^{1/(d-1)}}{d+q} \frac{(1-\xi)^{d/(d-1)}}{(d-\xi)^{1/(d-1)}} \quad , \tag{3}$$

где $\xi = \sin^2(\psi/2)$.

Начало декартовой системы координат (x, y) и полюс полярной системы (ρ, ψ) помещаются в фокусе F (рис.3(b)), вынос фокуса за вершину первого по ходу луча зеркала q положителен, если фокус системы располагается справа и q – отрицателен, если фокус системы располагается слева от первого по ходу луча (в нашем случае плоского) зеркала. Величина d всегда положительна. $d = D/F'$, $q = Q/F'$, $m = M/F'$. При $F' = M$: $d = 1.34$, $q = -0.34$, $m = f' = 1$.

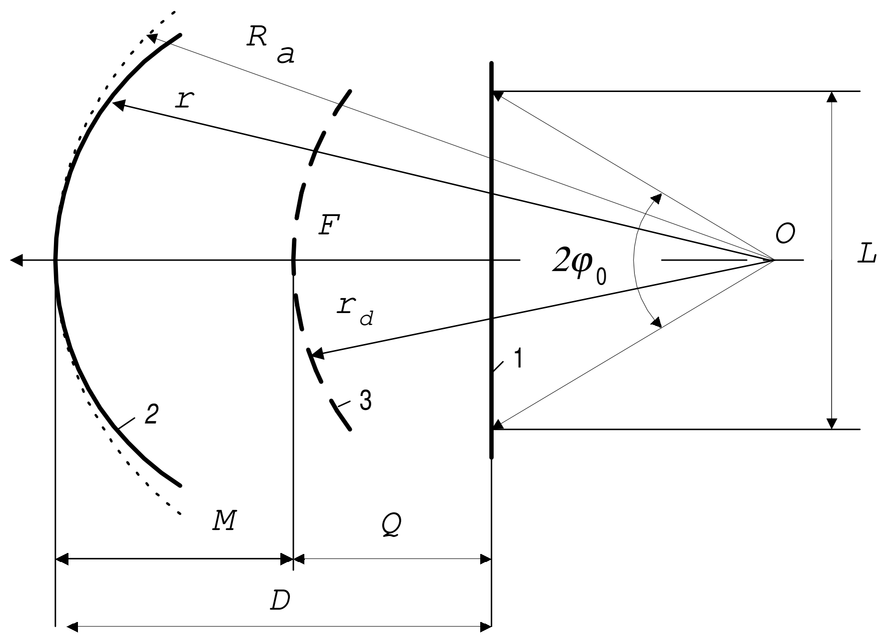
Круговой отражатель радиотелескопа РАТАН-600 состоит из отдельных элементов с размерами 11м x 2м, которые могут перемещаться в радиальном направлении в пределах $\pm$ 0.5 м от основной окружности радиуса R=288 м; диапазон перемещений элементов по азимуту составляет $\pm 6°$, по углу места - $0° \div 50°$. Элементы плоского зеркала (8м x 3м) в штатном режиме перемещаются только по углу места $(0° \div 50°)$, изменение их положения в продольном (меридиональном) направлении и по азимуту можно осуществить лишь с помощью специальных юстировочных приспособлений и не более чем на 200 мм по продольной координате и на $2°$ по азимуту.

Основным критерием при расчете было получение таких конфигураций зеркал, при которых выставляется максимальное число элементов плоского и кругового отражателей, т.е. получение антенной системы с максимальной эффективной площадью при наибольшем времени слежения за источником. При этом величина эффективной площади определяется прежде всего количеством выставляемых элементов плоского зеркала, а время слежения – количеством установленных элементов кругового отражатеря. При фиксированных значениях D, Q и M антенной системы "Юг+Плоский", это можно сделать, варьируя величину параксиального фокуса всей системы F'. Из условия планоидности системы следует, что значения F' не должны сильно отличаться от фокусного расстояния кругового зеркала M.

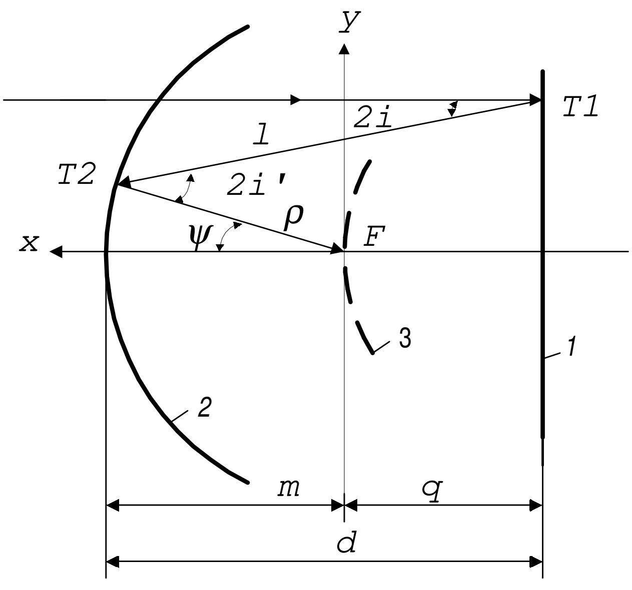
Были расчитаны семейства кривых $x = f(y)$ и $\rho = f(\psi)$ при различных горизонтальных размерах плоского зеркала $L = 2R_a \mathrm{tg}(\varphi_\circ)$, показывающие, как меняется форма плоского и кругового отражателей в горизонтальной плоскости при изменении значений параксиального фокуса F'. ($2\varphi_\circ$ – угол, под которым виден раскрыв плоского зеркала из центра антенны). Методом последовательных приближений для различных значений $\varphi_\circ$ находился оптимальный параксиальный фокус F'_{opt}, при котором изменения координаты x – минимальны, т.е. минимальны продольные перемещения элементов плоского зеркала.

На рис.4 приведены зависимости $\Delta x_{max} = f(\varphi_\circ)$ и $\Delta r_{max} = f(\varphi_\circ)$, полученные при оптимальных значениях параксиального фокуса. Δx_{max} – максимальное смещение элементов плоского зеркала по продольной координате, $\Delta r_{max} = (R - r)$ – максимальное радиальное смещение элементов кругового отражателя при заданном значении угла $\varphi_\circ$

Используя зависимости, приведенные на рис.4, можно найти максимальный горизонтальный размер плоского зеркала, при котором продольные смещения его элементов не выходят за допустимые пределы их перемещений. Размер этот составляет 150 м $\div$ 170 м $(\varphi_\circ = 15° \div 17°)$. Максимальный раскрыв кругового отражателя, при котором радиальные смещения его элементов не выходят за допустимые границы, составляет $\varphi_\circ \cong 20°$, что соответствует $\sim$ 200 м горизонтальной апертуры.



(a)



(b)

Рис. 3:

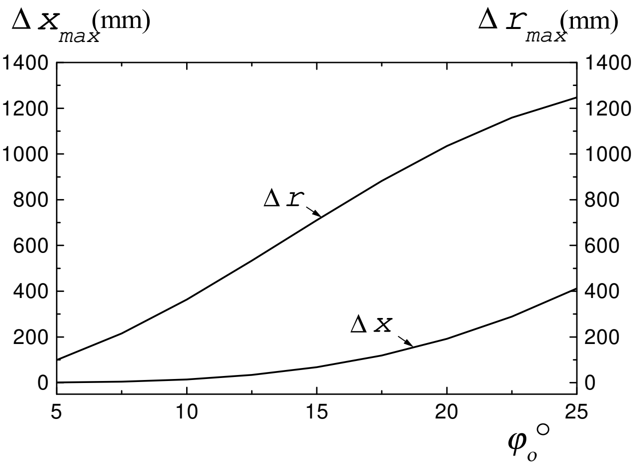


Рис. 4: Максимальное смещение элементов плоского зеркала по продольной координате Δx_{max} и максимальное радиальное смещение элементов кругового отражателя Δr_{max} в зависимости от угла $\varphi_\circ$

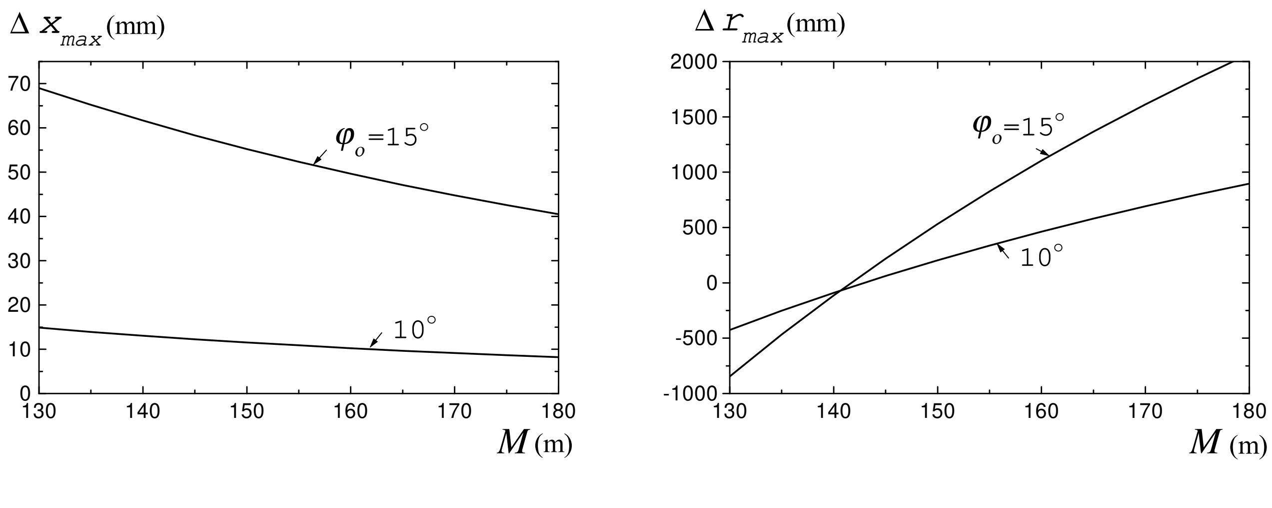


Рис. 5: Максимальное смещение элементов плоского зеркала по продольной координате Δx_{max} и максимальное радиальное смещение элементов кругового отражателя Δr_{max} в зависимости от фокусного расстояния кругового зеркала M.

Проведенные расчеты относятся к случаю, когда облучатель находится между плоским и круговым зеркалами на расстоянии $M = 132$ м от вершины последнего и может перемещаться по дуговому рельсовому пути, радиус которого из центра антенны составляет $r_d = 156$ м.

Используя формулы $(1-3)$ были расчитаны также конфигурации зеркал при изменении величины M, т.е. при изменении положения облучателя между вершинами плоского и кругового отражателей. Расстояние между зеркалами не менялось. На рис.5 приведены зависимости $\Delta x_{max} = f(M)$, $\Delta r_{max} = f(M)$ для $\varphi_\circ = 10°$ и $15°$.

Расчеты показали, что величина максимального смещения элементов плоского зеркала по продольной координате уменьшается по мере приближения облучателя к плоскому зеркалу ($M = 184$ м), величина же максимального радиального смещения элементов кругового отражателя минимамальна при $M = 144$ м. Таким образом, радиус дугового рельсового пути, который мы имеем в настоящее время не оптимален. Оптимальным с точки зрения наибольшего времени слежения за источником является дуга окружности с радиусом 144 м.

2 Расчет фазового распределения поля в апертуре и ДН антенной системы "Юг+Плоский"при наблюдениях в азимутах при $H_a = 0°$.

В дальнейшем будем полагать, что поверхности зеркал составлены из бесконечного числа элементов, горизонтальные размеры которых стремятся к нулю. Основные параметры системы "Юг+Плоский": $D = 184$ м, $M = 132$ м, $r_d = 156$ м. Форма поверхности зеркал описывается выражениями (1 – 3). Последние были выведены для случая, когда плоский фронт волны, падающий на первое зеркало, составляет с горизонтом угол $H_a = 0°$ и с осью антеной системы азимутальный угол $\alpha = 0°$ (прохождение источника через меридиан). В этом случае сумма оптических путей от фокуса до любой плоскости, перпендикулярной к оптической оси, постоянна и мы имеем синфазное распределение поля в апертуре, при условии, что элементы зеркал выставлены строго по расчитанным кривым.

Рассчитаем, каково будет фазовое распределение поля на апертуре, когда фронт волны падает под углом α, отличным от нуля, а облучатель смещен по дуговому пути от оси системы. В этом случае положение нового фокуса F_d в полярной системе координат, центр которой O' располагается на оси системы на расстоянии p от центра круга O, задается координатами (r_d, α) (рис.6). Сумма оптических путей S от нового фокуса F_d до плоскости , перпендикулярной фронту распространяющейся волны и проходящей через вершину плоского зеркала равна:

$$S = t + l + \rho' \quad , \tag{4}$$

t – расстояние от плоскости до точки T_1 на плоском зеркале, l – расстояние между точками T_1 и T_2 на поверхности плоского и кругового отражателей, ρ' – расстояние от точки T_2 на поверхности кругового отражателя до фокуса F_d или радиус-вектор точки T_2 в полярной системе координат (ρ', ψ').

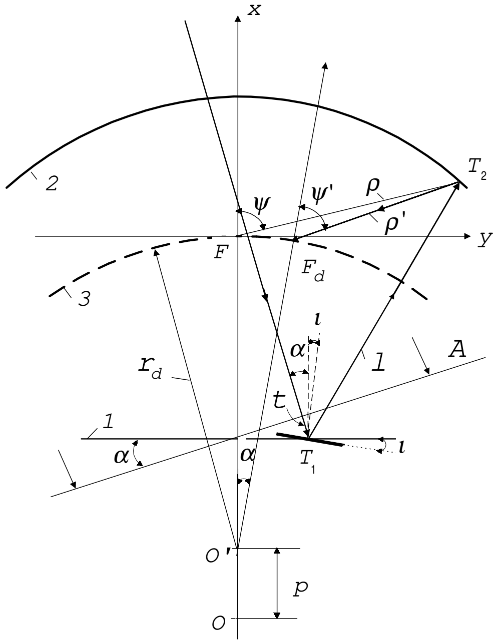


Рис. 6:

Рассчитаем фазовое распределение поля на апертуре, выраженное в линейной мере, $\Delta S(\psi') = S(\psi')$ - $S(0)$.

$$t = y_1 \sin\alpha - x_1 \cos\alpha \quad . \tag{5}$$

Координаты x_1, y_1 точки T_1 рассчитывались по формулам (1, 2).

l описывается уравнением прямой, проходящей через точку T_1 с координатами (x_1, y_1) и углом наклона $(\alpha - 2i)$ к оси y:

$$y_1 - y = (x_1 - x)\,\mathrm{tg}(\alpha - 2i) \quad , \tag{6}$$

i –угол между касательной к кривой, по которой выставляются элементы плоского зеркала, и осью .

$$i = i' - \psi/2, \quad \mathrm{tg}\, i' = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\psi} \quad .$$

Отраженный от плоского зеркала луч пересекает круговое зеркало в точке T_2 с координатами ($x_2 = \rho\cos\psi$, $y_2 = \rho\sin\psi$). Для нахождения координат точки T_2 и расстояния l численными методами решалось трансцендентное уравнение относительно угла ψ:

$$y_1 - \rho\sin\psi = (x_1 - \rho\cos\psi)\,\mathrm{tg}(\alpha - 2i) \quad , \tag{7}$$

где ρ задается выражением (3).

Зная положение точки T_2 в системе координат (ρ, ψ) и положение фокуса F_d на дуге – (r_d, α), путем несложных преобразований находится радиус - вектор точки T_2 в системе координат (ρ', ψ').

Рассчитанные таким образом распределения фазы поля в апертуре использовались для расчета диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа . Отметим, что распределение фазы имеет как линейную составляющую, так и составляющие более высокого порядка, в частности кубическую. От величины последней будет зависеть уровень боковых лепестков и величина максимума ДН антенны. Как показали расчеты, фазовые искажения возрастают по мере увеличения значений азимутального угла.

На рис.7,8 приведены ДН радиотелескопа на волне 6 см в режиме "радио-Шмидт телескоп"при наблюдениях в азимутах $0°, 3°$ и $5°$ при $\varphi_\circ = 10°$ и $15°$ ($L = 100$ и 150 м). Высота наблюдаемого источника равна нулю. Раскрыв кругового отражателя при расчетах принимался равным $2\varphi_{r\circ} = 30°$ и 40^0 соответственно. ($2\varphi_{r\circ}$ – угол, под которым виден раскрыв кругового отражателя из центра антенны).

ДН расчитывались по стандартной программе, учитывающей все особенности геометрии антенной системы РАТАН-600, исходя из ДН первичного облучателя (рупора). Частично алгоритмы этой программы приводятся в работе (Коржавин, 1979). Методом последовательных приближений находилось такое значение параметра p, при котором изменение фазы на раскрыве минимально при заданном азимутальном угле. Этот параметр задает положение фокуса F_d на дуге.

Расчеты проводились для двух случаев. В первом, при формировании поверхности плоского зеркала его элементы выставляются строго по кривым, описанным выражениями (1, 2). В этом случае элементы плоского зеркала смещаются по продольной координате и разворачиваются по азимуту. Назовем этот режим "точный радио-Шмидт".

Второй случай, названный "приближенным радио-Шмидтом", предполагает смещение элементов плоского зеркала только по продольной координате, угол разворота элементов по азимуту равен нулю. Аналогичным образом осуществляется "шмидтовская"коррекция на радиотелескопе в Нансе.

Приведенные на рис.7, 8 кривые показывают, что при наблюдениях с сокращенной апертурой ($L = 100$ м) ДН искажаются незначительно с изменением азимутального угла, причем искажения ДН меньше для режима "приближенный радио-Шмидт". При наблюдениях с апертурой 150 м в этом режиме имеем сформированную ДН в диапазоне азимутальных углов от $-5°$ до $5°$, что соответствует примерно часовому сопровождению источника, однако максимум ДН при этом снижается почти на 40%. Наблюдения в режиме "точный радио- Шмидт"дают ДН с более высоким максимумом, но в меньших азимутальных пределах (от $-3°$ до $3°$). Отметим, что $\alpha = -3° \div 3°$ соответствует времени слежения в пределах получаса на низких высотах.

ДН, показанные на рис.7(a,b) и 8(a,b), получены для случая, когда облучатель перемещается по дуговому пути, реально существующему на РАТАН-600. Это дуга окружности радиусом 156 м из центра антенны. Искажения ДН с изменением азимутального угла указывают на то, что форма дуги не является оптимальной. Варьируя параметр r_d при фиксированном значении α, были найдены значения оптимальных радиусов кривизны дуги r_d^{opt}, при которых искажения ДН минимальны (рис.9). Как показали расчеты, форма кривой, по которой должен перемещаться облучатель, различна в режимах "точный"и "приближенный радио-Шмидт". Кроме того при работе в режиме "приближенный радио-Шмидт"форма оптимальной дуги меняется с изменением размеров апертуры (100 м и 150 м). Как видно из графиков на рис.9 оптимальная дуга должна быть более "распрямленной"по сравнению с реальной.

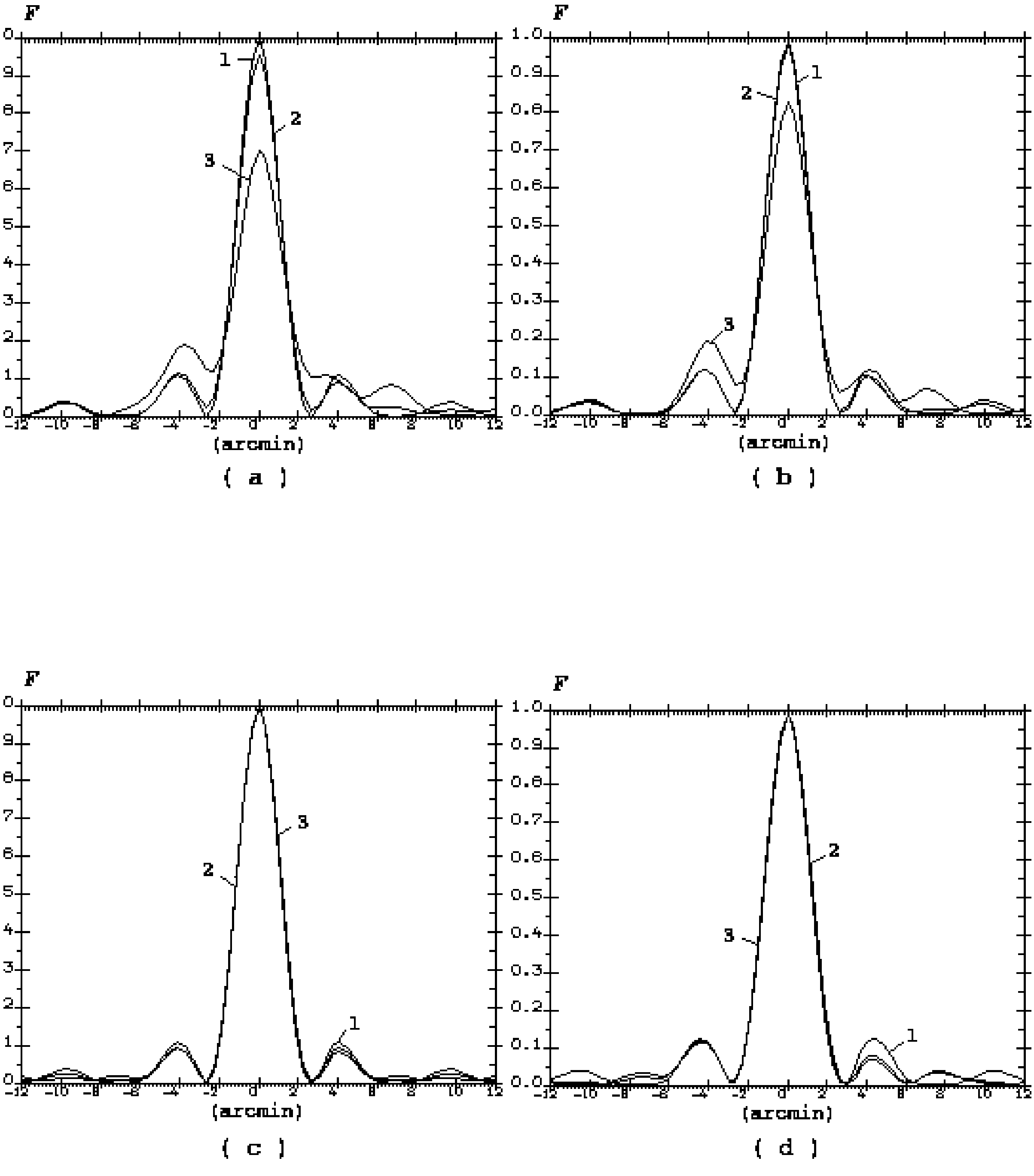


Рис. 7: ДН РАТАН-600 на волне 6 см в режиме "радио-Шмидт телескоп"при наблюдениях в азимутах: $\alpha = 0°$ – (1), $\alpha = 3°$ – (2), $\alpha = 5°$ – (3).
(a), (c) – "точный радио-Шмидт", (b), (d) – "приближенный радио-Шмидт"
(a), (b) – реальный дуговой путь , (c), (d) – оптимальный дуговой путь.
Горизонтальный размер плоского зеркала L=100 м ($\varphi_\circ = 10°$).
Угол формирования антенны $H_a = 0°$.

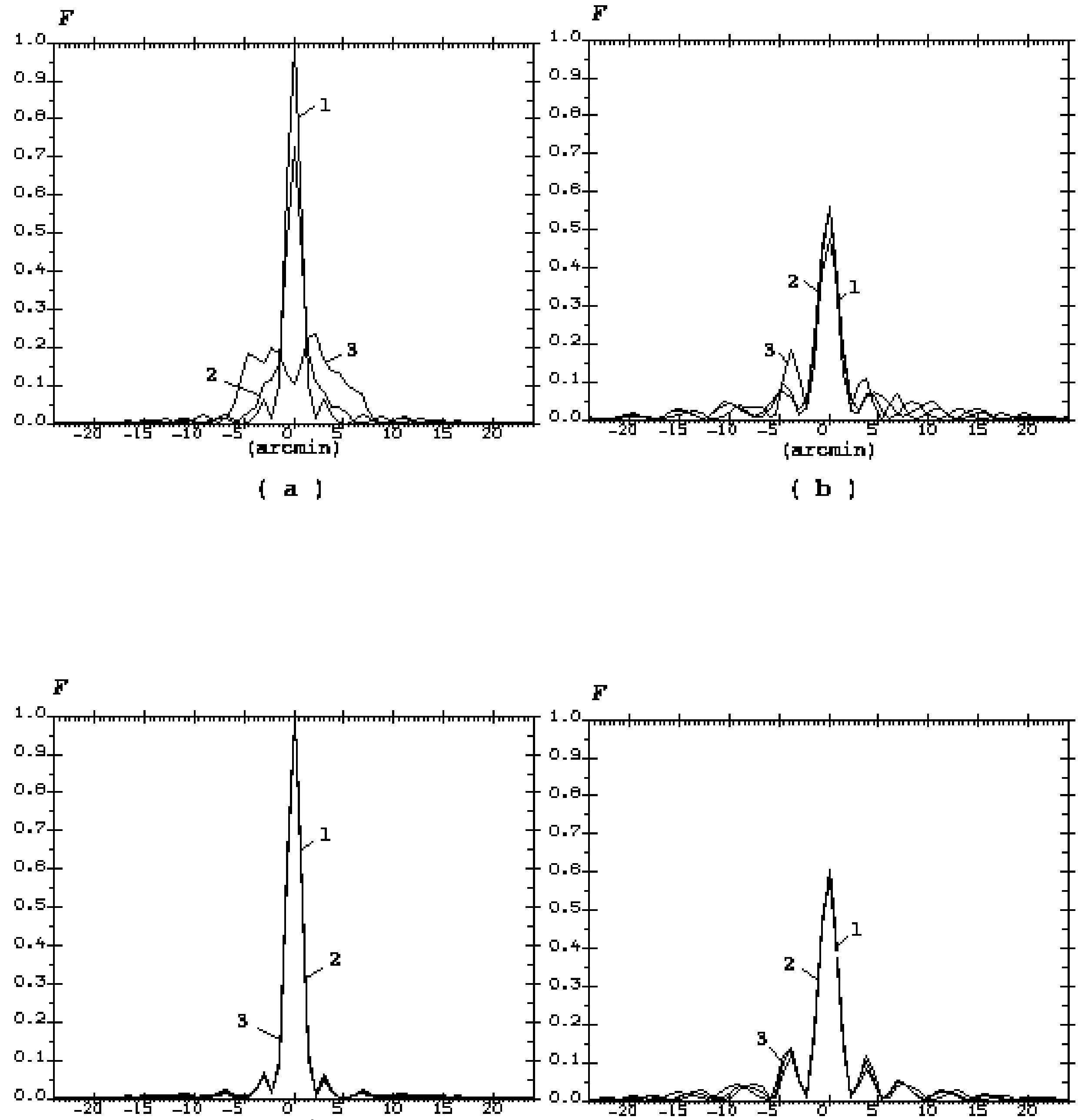


Рис. 8: ДН РАТАН-600 на волне 6 см в режиме "радио-Шмидт телескоп"при наблюдениях в азимутах: $\alpha = 0°$ – (1), $\alpha = 3°$ – (2), $\alpha = 5°$ – (3).
(a), (c) – "точный радио-Шмидт", (b), (d) – "приближенный радио-Шмидт"
(a), (b) – реальный дуговой путь , (c), (d) – оптимальный дуговой путь.
Горизонтальный размер плоского зеркала L=150 м ($\varphi_\circ = 15°$).
Угол формирования антенны $H_a = 0°$.

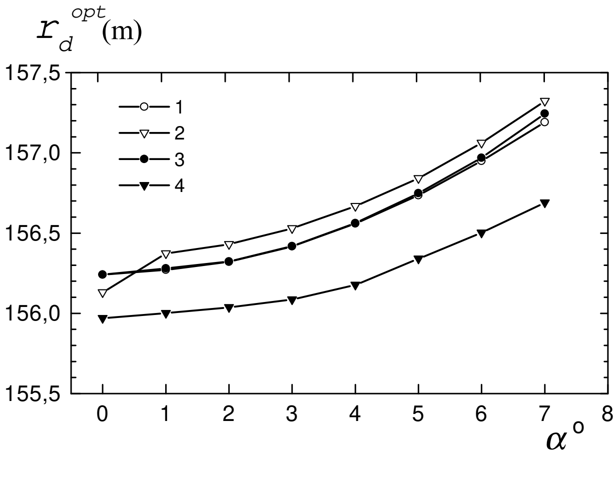


Рис. 9: Зависимости оптимального радиуса кривизны r_d^{opt} дугового пути от угла α . "Точный радио-Шмидт (1,3), "приближенный радио-Шмидт - (2,4), L=100 м - (1,2), L=150 м - (3,4)

На рис.7(c,d) и 8(c,d) приведены ДН телескопа на волне 6 см при перемещении первичного облучателя по оптимальной дуге. Видно, что в режиме "точный радио-Шмидт"оптимальная дуга позволит осуществлять слежение за источником в течении часа практически без искажения ДН, как с апертурой 100 м, так и с апертурой 150 м. В режиме "приближенный радио-Шмидт"такой эффект от оптимальной дуги будет иметь место только при сокращенной апертуре антенны ($L = 100$ м), при $L = 150$ м ДН имеет значительно больший уровень боковых лепестков ($12 \div 14\%$) и меньшее значение максимума, чем в режиме "точный радио-Шмидт", однако ее форма остается практически неизменной. Для сравнения, на радиотелескопе в Нансе в процессе часового сопровождения источника в режиме "приближенный радио- Шмидт"на волне 11 см при апертуре антенны 200 м боковой лепесток возрастает до 12% (Maghoo, 1990).

Еще раз отметим, что проведенные расчеты делались в предположении, что фронт падающей волны составляет с горизонтом угол, равный нулю, а следовательно, фазовое распределение и ДН телескопа, приведенные выше, будут иметь место лишь при наблюдениях источников с нулевой высотой. При наблюдениях источников, с высотами, отличными от нуля, фазовое распределение в раскрыве и ДН радиотелескопа будут иными. Как велики будут эти отличия и до каких высот применимы полученные здесь результаты можно оценить, лишь проведя расчет системы для произвольного угла падения фронта волны.

3 Расчет антенной системы при $H_a \neq 0°$.

Чтобы получить полную картину работы антенной системы РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп"проведем расчет конфигурации зеркал, позволяющих осуществлять фокусировку лучей, падающих под произвольным углом к горизонту. Азимутальный угол фронта волны равен нулю. В этом случае условие отсутствия сферической аберрации задается выражением :

$$\rho + l - x\cos H_a = 2d + q(1-\cos H_a) \quad , \tag{8}$$

которое описывает тот факт, что сумма оптических путей от плоскости фронта волны, падающей под углом к горизонту, до фокуса системы одинакова. ρ – расстояние от точки пересечения луча с круговым зеркалом до фокуса F, l – расстояние между точками пересечения луча с зеркалами, $x\cos H_a$ – расстояние от плоскости фронта падающей волны до плоского зеркала, d – расстояние между вершинами зеркал, q – расстояние между вершиной плоского зеркала и фокусом F. Условие синусов Аббе при отсутствии комы:

$$y = \sin\psi \quad . \tag{9}$$

Учитывая геометрические соотношения в фокусирующей системе:

$$\begin{aligned} x &= \rho\cos\psi - l\cos 2i \quad , \\ y &= \rho\sin\psi + l\sin 2i \quad , \\ \psi &= 2i' - 2i \quad , \\ \mathrm{tg}\, i' &= \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\psi} \quad , \end{aligned}$$

а также выражения (8, 9) приходим к следующимему дифференциальному уравнению:

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\psi} = \frac{\mathrm{tg}\,\psi/2 - G}{1 + G\mathrm{tg}\,\psi/2} \quad , \tag{10}$$

где

$$G = \frac{T - \sqrt{T^2 - B^2(1-\cos^2 H_a)}}{B(1-\cos H_a)} \quad ,$$

$$T = 2d + q(1-\cos H_a) - \rho(1-\cos\psi\cos H_a) \quad ,$$

$$B = (1+\rho)\sin\psi \quad .$$

Решение этого дифференциального уравнения проводилось численным методом Рунге–Кутта с помощью ЭВМ. Создан комплекс программ, позволяющих рассчитывать параметры фокусирующей системы: x, y, ρ, l, i в зависимости от фокусного расстояния системы F', размеров плоского зеркала L (соответственно $2\varphi_\circ$), угла падения фронта волны . Угол H_a, на который рассчитывалась система, будем называть углом формирования антенны. Приведем выражения для x, l, i :

$$l = \frac{T}{1 + \cos H_a(1-G^2)/(1+G^2)} \quad , \tag{11}$$

$$i = \mathrm{arctg}\, G \quad , \tag{12}$$

$$x = \rho\cos\psi - \frac{T}{\cos H_a + (1+G^2)/(1-G^2)} \quad . \tag{13}$$

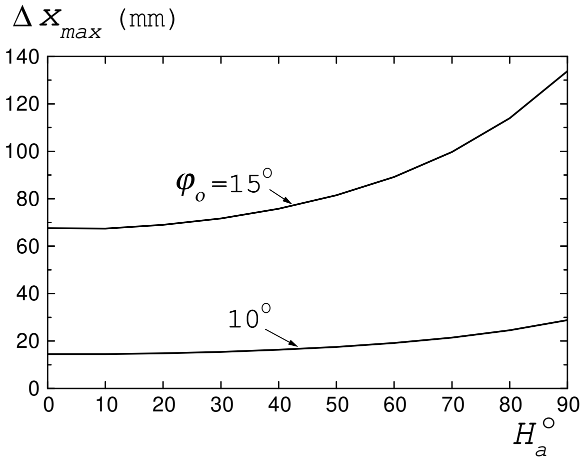


Рис. 10: Максимальное смещение элементов плоского зеркала по продольной координате Δx_{max} в зависимости от угла формирования антенны H_a

На рис.10 показано, как меняется максимальное изменение продольной координаты плоского зеркала $\Delta x_{max} = x(y) - x(0)$ при изменении угла H_a от 0^0 до $90°$ для $\varphi_\circ = 10°, 15°$. Форма кругового отражателя не меняется с изменением H_a и с высокой степенью точности для нее сохраняется зависимость $\rho(\psi)$ при $H_a = 0°$. Следует отметить, что как и для случая $H_a = 0°$, при расчете формы зеркал находились оптимальные значения параксиального фокуса системы, такие, при которых продольные смещения плоского зеркала минимальны. Отметим, что значения оптимального фокуса F'_{opt} системы для $\varphi_\circ = 10°$ и $\varphi_\circ = 15°$ различны.

4 Расчет фазового распределения поля в апертуре и ДН радиотелескопа при наблюдениях в азимутах при $H_a \neq H_i$

Рассчитаем фазовое распределение поля в раскрыве антенны, когда наблюдается источник, высота которого H_i не равна углу формирования антенны H_a и азимут источника $\alpha \neq 0°$. Элементы плоского и кругового отражателей устанавливаются по кривым, заданным выражениями (9, 10, 12, 13). Последние были выведены для случая, когда плоский фронт волны, падающий на первое зеркало, составляет с горизонтом угол H_a и с осью антеной системы азимутальный угол $\alpha = 0°$ (прохождение источника через меридиан).

Элементы кругового отражателя выставляются строго вертикально и образуют квази-круговой цилиндр с вертикальной образующей. Элементы плоского зеркала наклоняются относительно горизонта на угол $H_u/2$. В случае, когда азимут источника α не равен нулю, углы H_u и H_i связаны соотношением:

$$\operatorname{tg} H_u = \frac{\operatorname{tg} H_i}{\cos\alpha} \tag{14}$$

Облучатель смещен по дуговому пути от оси системы и положение нового фокуса F_d в полярной системе координат, центр которой O' располагается на оси системы на расстоянии p от центра круга O, задается координатами (r_d, α) (рис.6). Сумма оптических путей S от фокуса F_d до плоскости AA, перпендикулярной фронту волны, падающей под углом H_i к горизонту, равна:

$$S = t_h + l + \rho' \quad , \tag{15}$$

t_h – расстояние от плоскости , проходящей через вершину плоского зеркала, до точки T_1 на плоском зеркале, l – расстояние между точками T_1 и T_2 на поверхности плоского и кругового отражателей, ρ' – расстояние от точки T_2 на поверхности кругового отражателя до фокуса F_d или радиус-вектор точки T_2 в полярной системе координат (ρ', ψ'). Прямой A на рис.6 показана линия пересечения плоскости AA с горизонтальной плоскостью.

Рассчитаем фазовое распределение поля на апертуре, выраженное в линейной мере, $\Delta S(\psi') = S(\psi')$ - $S(0)$.

$$t_h = t \cos H_i = (y_1 \sin\alpha - x_1 \cos\alpha) \cos H_i \quad . \tag{16}$$

Координаты x_1, y_1 плоского зеркала и угол i между касательной к кривой в точке T_1 и осью y рассчитывались по формулам (9, 10, 12, 13) для угла формирования антенны H_a . Для нахождения координаты точки T_2, в которой луч пересекает круговой отражатель, и величины l решалось трансцендентное уравнение относительно угла ψ:

$$y_1 - \rho \sin\psi = (x_1 - \rho\cos\psi)\,\mathrm{tg}(\alpha_0 - i) \quad , \tag{17}$$

где α_0 – азимутальный угол отраженного луча

$$\sin\alpha_0 = \sin(\alpha - i)\cos H_i \quad . \tag{18}$$

При решении этого уравнения для ρ использовалось выражение (3), полученное при $H_a = 0°$, поскольку, как уже отмечалось выше, зависимость $\rho(\psi)$ не зависит от .

Зная положение точки T_2 в системе координат (ρ, ψ) и положение фокуса F_d на дуге – (r_d, α), путем несложных преобразований находится радиус - вектор точки T_2 в системе координат (ρ', ψ').

На рис.11 и 12 показаны результаты расчетов фазы поля в апертуре антенны для режимов "точный"и "приближенный радио-Шмидт"при $\varphi_\circ = 10°, 15°$, $\alpha = 0°, 3°, 5°$ и различных H_a. По оси ординат отложены значения максимального набега фазы на апертуре ΔS_{max} в мм, по оси абсцисс – высота наблюдаемого источника H_i. Линейная составляющая фазы предварительно вычиталась, поскольку она не приводит к искажению ДН, а только к ее развороту. Таким образом по этим кривым можно оценить, какова будет максимальная фазовая ошибка при наблюдениях источника с высотой H_i, когда антенна установлена на угол $H_a \neq H_i$.

Из рассмотрения семейств кривых, представленных на рис.11,12 можно сделать следующие выводы.

Как и следовало ожидать, синфазное распределение поля в раскрыве антенны (ΔS = 0) (или близкое к синфазному - в случае "приближенного радио-Шмидта") реализуется при наблюдении источников, высота которых равна углу формирования антенны и $\alpha = 0°$, а также при азимутальных углах, отличных от нуля, для $H_a > 70°$. Для антенной системы, расчитанной на низкие и средние углы, максимальная фазовая ошибка возрастает с увеличением азимутального угла.

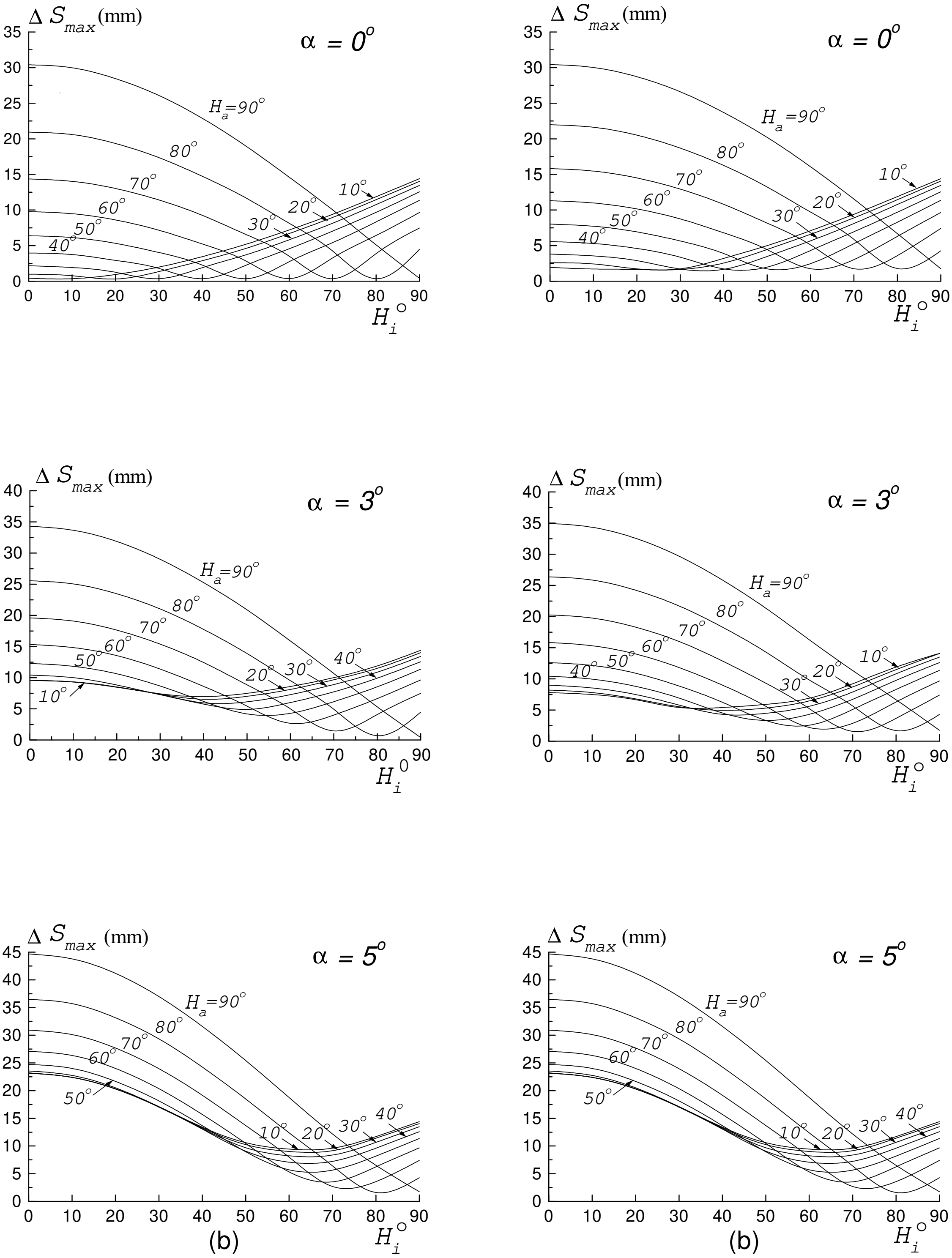


Рис. 11: Максимальный набег фазы в апертуре ΔS_{max} в зависимости от высоты наблюдаемого источника H_i при $\alpha = 0°$, $3°$, $5°$ и различных углах формирования антенны H_a. Горизонтальный размер плоского зеркала $L = 100$ м ($\varphi_\circ = 10°$).
(a) - "точный радио-Шмидт", (b) - "приближенный радио-Шмидт"

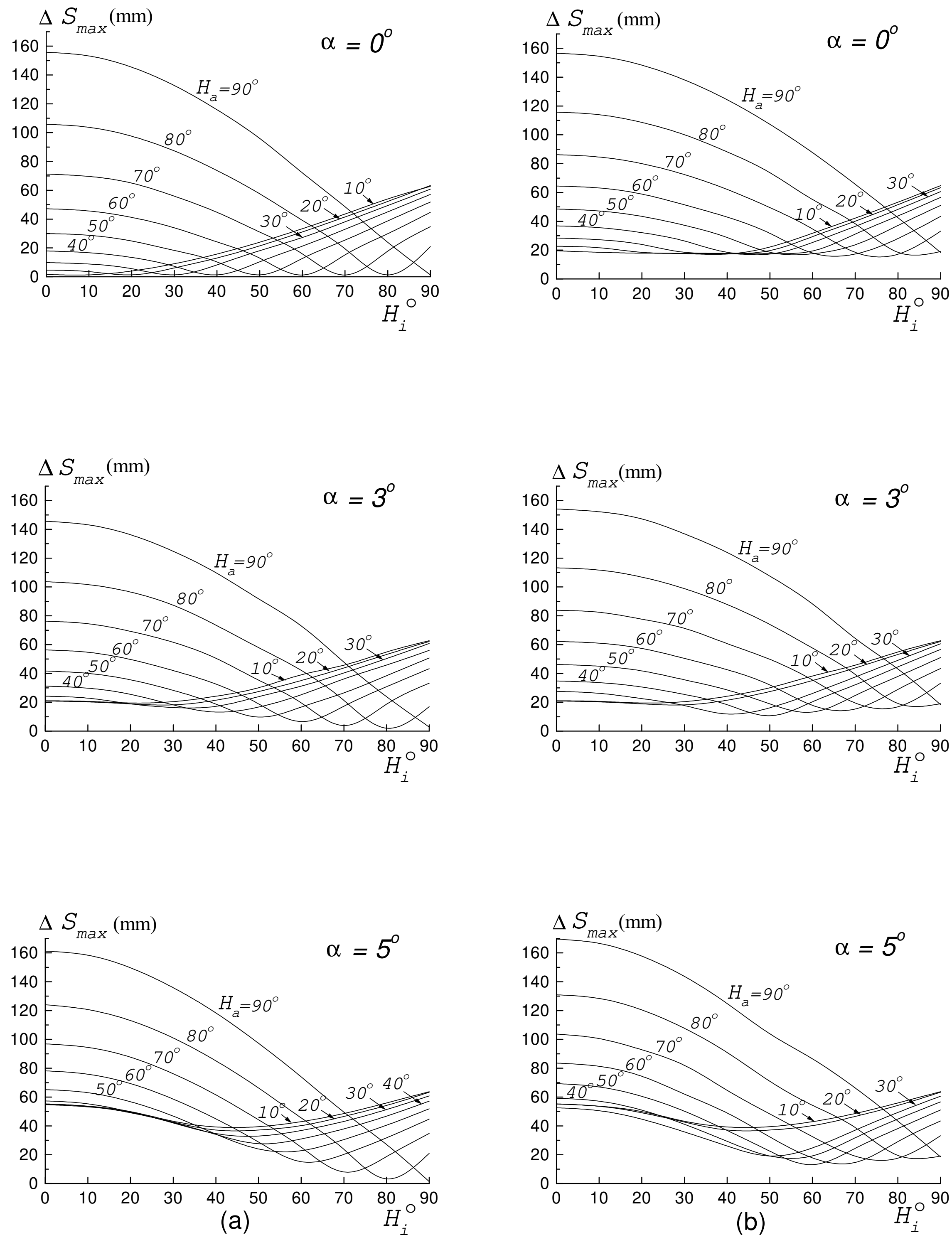


Рис. 12: Максимальный набег фазы в апертуре ΔS_{max} в зависимости от высоты наблюдаемого источника H_i при $\alpha = 0°$, $3°$, $5°$ и различных углах формирования антенны H_a. Горизонтальный размер плоского зеркала $L = 150$ м ($\varphi_\circ = 15°$).
(a) - "точный радио-Шмидт", (b) - "приближенный радио-Шмидт"

В диапазоне H_a от 0° до 20° зависимости $\Delta S_{max}(H_i)$ отличаются незначительно, так что с антенной, рассчитанной на угол $H_a = 0^\circ$, возможно наблюдение источников, высота которых не превышает 20° .

Сравнивая зависимости $\Delta S_{max}(H_i)$ при $\varphi = 10^\circ$ и 15°, можно констатировать, что характер их сохраняется с изменением размеров апертуры, меняется лишь абсолютное значение максимального набега фазы в апертуре.

И, наконец, в режиме "приближенный радио-Шмидт"при азимутальных углах $3^\circ \div 5^\circ$ и укороченной апертуре ($\varphi_\circ = 10^\circ$) максимальные фазовые ошибки меньше или равны ΔS_{max} в режиме "точный радио-Шмидт". Такое же утверждение можно сделать и для апертуры 150 м ($\varphi_\circ = 15^\circ$) для углов , не выше 60° . Поэтому далее при расчете ДН радиотелескопа основное внимание было уделено режиму "приближенный радио-Шмидт".

Для более детального исследования были расчитаны ДН радиотелескопа РАТАН-600 на волнах 1 см, 2 см, 4 см, 8 см, 12 см, 16 см и 32 см для апертур 100 м и 150 м (соответственно $\varphi_\circ = 10^\circ, 15^\circ$).

На рис.13,14 приводятся зависимости максимума ДН от высоты наблюдаемого источника H_i для трех значений угла формирования антенны $H_a = 0^\circ$, 30°, 45° . Кривыми (1, 2, 3) показаны зависимости в режиме "приближенный радио-Шмидт", (4) – "точный радио-Шмидта"при $H_a = 30^\circ$.

Примеры ДН радиотелескопа в режиме "приближенный радио-Шмидт"на волнах 2 см, 4 см, 8 см, 16 см и 32 см при наблюдении источников с высотами $H_i = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ даны на рис.15,16. Угол формирования антенны $H_a = 30^\circ$. Расчеты проводились для существующего дугового рельсового пути.

Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать, что с помощью антенной системы "Юг+Плоский"можно построить фокусирующую систему, так называемый "радио-Шмидт телескоп", который позволит осуществлять длительное сопровождение источника (от получаса до часа) без существенных искажений ДН в широком диапазоне длин волн и высот наблюдаемого источника. Причем режим "приближенный радио-Шмидт"является более универсальным, чем режим "точный радио-Шмидт". Последний имеет преимущество лишь на коротких волнах ($\lambda \cong 1$ см при $\varphi_\circ = 10^\circ$, $\lambda \cong 2$ см при $\varphi_\circ = 15^\circ$), а также при наблюдениях в азимутах, близких к нулевым.

Что касается выбора угла формирования антенны, наиболее оптимальным нам представляется диапазон углов H_a от 0° до 30° . При таких углах диапазон высот, на которых можно наблюдать источники с сопровождением при допустимых потерях (за критерий можно взять снижение максимума ДН на 20-30%), максимален. Однако, окончательный выбор угла формирования необходимо делать, исходя из конкретной астрофизической задачи.

Приведенные зависимости показывают, что более коротковолновым является режим с укороченной апертурой ($L = 100$ м). Режим с апертурой 150 м даст большую эффективную площадь, но использовать его можно на волнах, не короче 4 см.

Для задач, не требующих длительного сопровождения источника, а лишь накопления сигнала на одном склонении можно использовать режим "точный радио-Шмидт"с апертурой антенны до 170 - 200 м, расчитанный на заданную высоту $H_a = H_i$. Широкое поле зрения достигается за счет помещения на фокальной линии облучателя многоэлементной антенной решетки. Этот режим предполагается рассмотреть в отдельной статье.

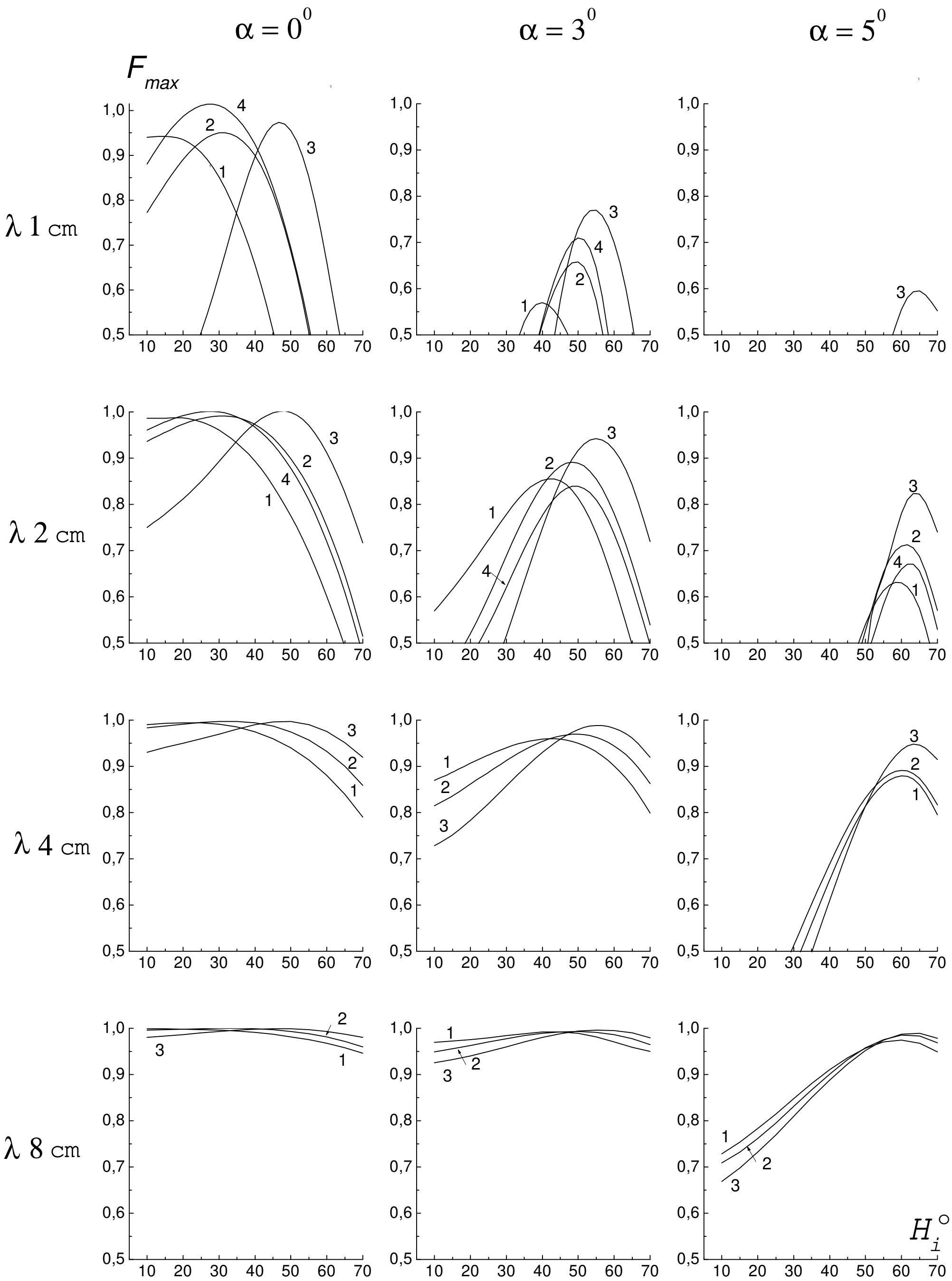


Рис. 13: Зависимости максимума ДН РАТАН-600 от высоты наблюдаемого источника H_i при углах формирования антенны $H_a = 0°$ - (1), 30° - (2,4), 45° - (3). "Приближенный радио-Шмидт - (1,2,3), "точный радио-Шмидт (4). Размер плоского зеркала L=100 м ($\varphi_\circ = 10°$).

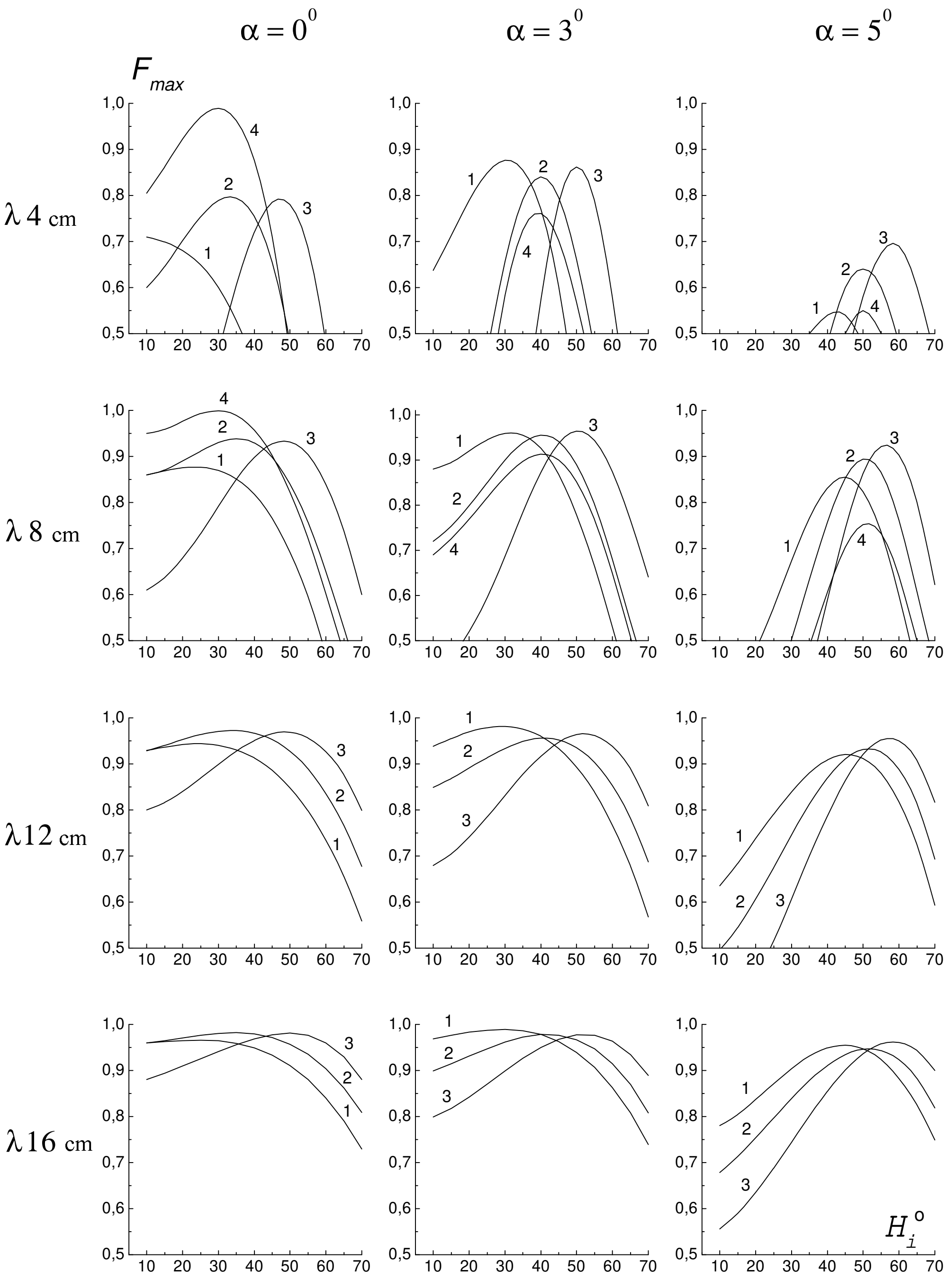


Рис. 14: Зависимости максимума ДН РАТАН-600 от высоты наблюдаемого источника H_i при углах формирования антенны $H_a = 0°$ - (1), 30° - (2,4), 45° - (3). "Приближенный радио-Шмидт - (1,2,3), "точный радио-Шмидт (4). Размер плоского зеркала L=150 м ($\varphi_\circ = 15°$).

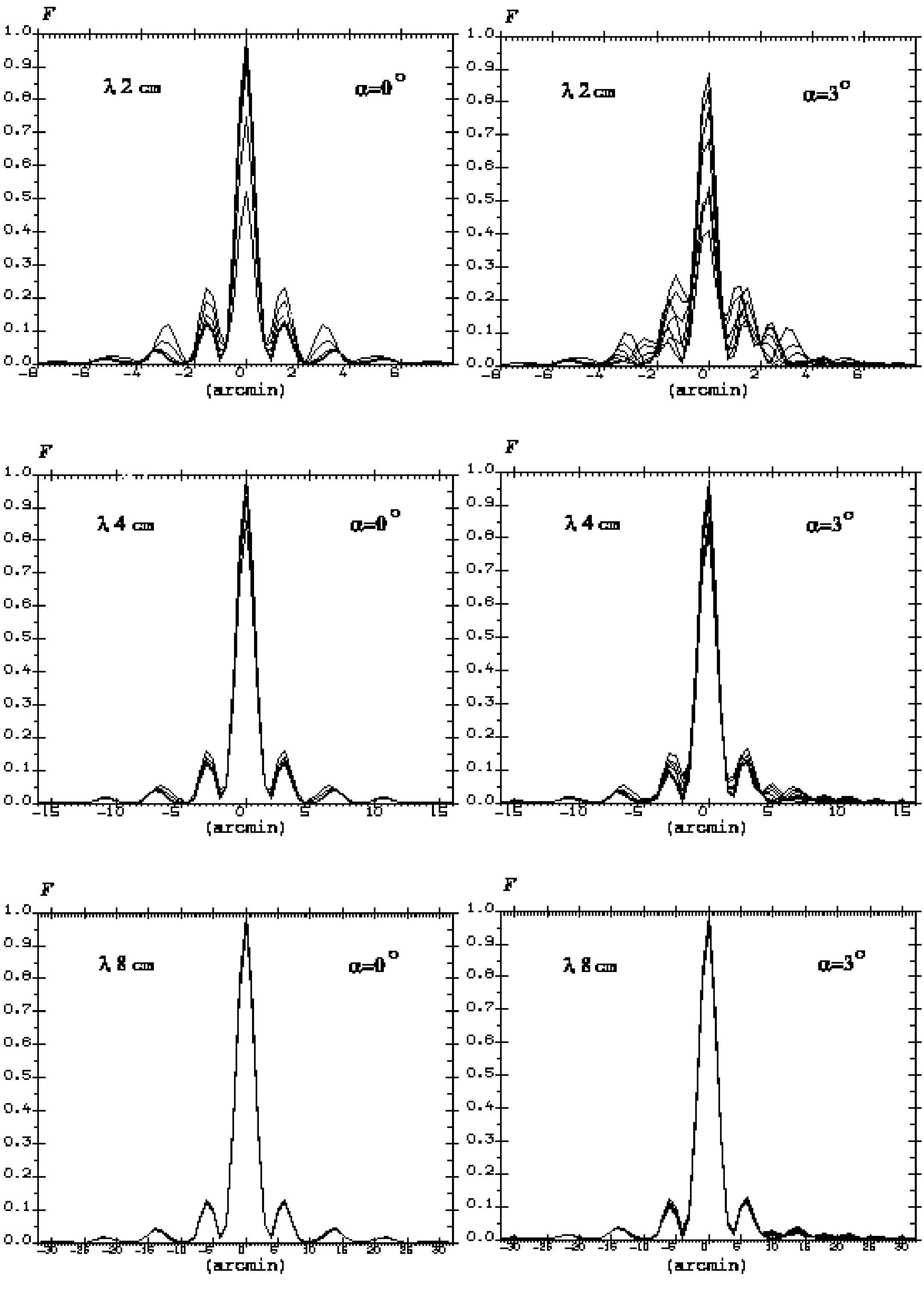


Рис. 15: ДН РАТАН-600 в режиме "приближенный радио-Шмидт"на волнах $\lambda = 2$ см, 4 см, 8 см при высотах источника $H_i = 10°$, $20°$, $30°$, $40°$, $50°$, $60°$, $70°$ и $\alpha = 0°$, $3°$. Угол формирования антенны $H_a = 30°$. Размер плоского зеркала L=100 м ($\varphi_\circ = 10°$).

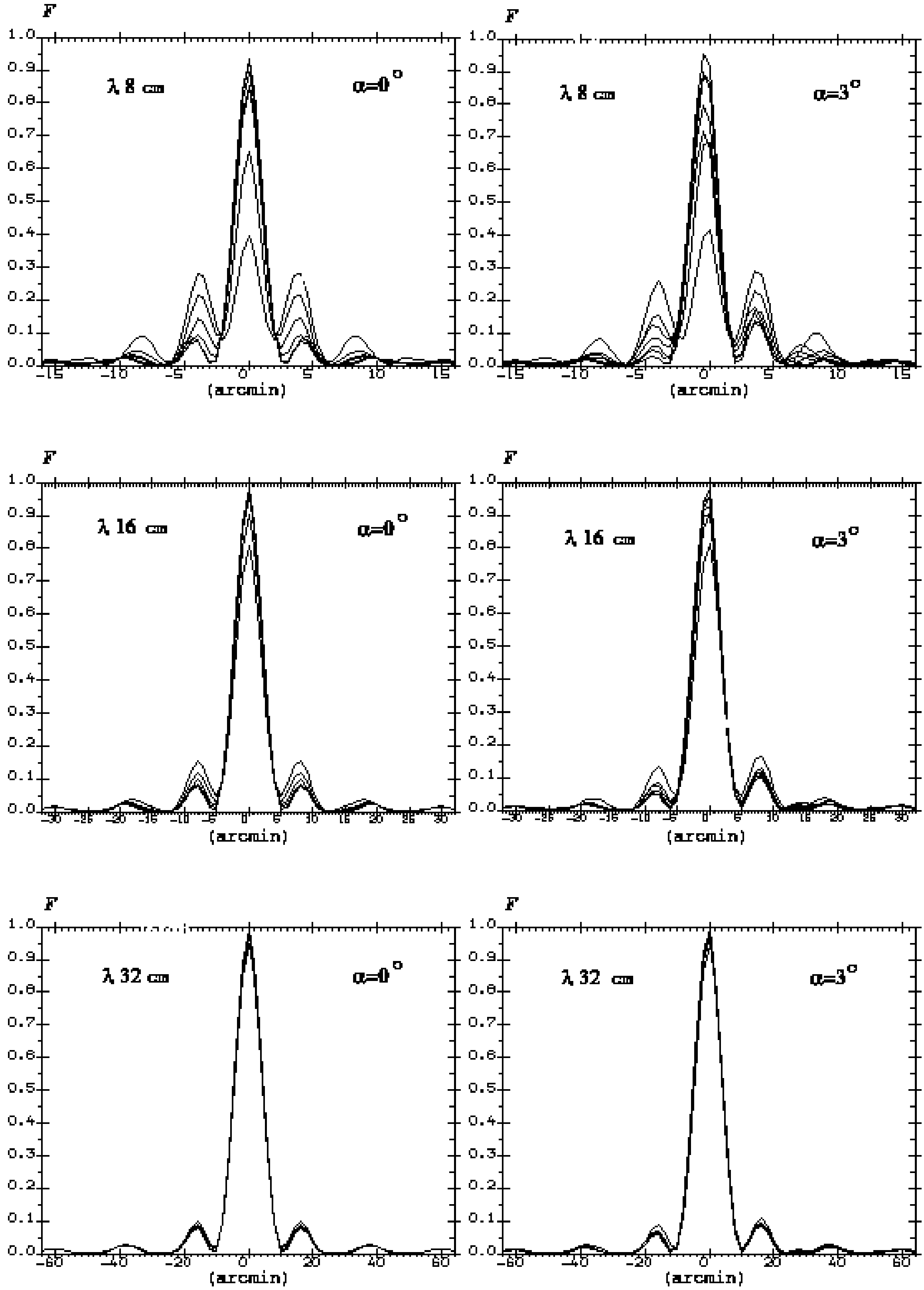


Рис. 16: ДН РАТАН-600 в режиме "приближенный радио-Шмидт"на волнах $\lambda = 8$ см, 16 см, 32 см при высотах источника $H_i = 10°$, $20°$, $30°$, $40°$, $50°$, $60°$, $70°$ и $\alpha = 0°$, $3°$. Угол формирования антенны $H_a = 30°$. Размер плоского зеркала L=150 м ($\varphi_\circ = 15°$).

5 Выводы.

В результате проведенных исследований выведены формулы и создан комплекс программ для рассчета поверхностей плоского и кругового отражателей радиотелескопа РАТАН-600 в режиме двухзеркальной апланатической системы, так называемый "радио-Шмидт телескоп".

Расчитаны фазовые распределения поля на апертуре и ДН радиотелескопа в режимах "точный"и "приближенный радио-Шмидт телескоп"для случая нулевого угла формирования антенны и случая, когда этот угол не равен нулю и не совпадает с высотой наблюдаемого источника.

Проведенные расчеты позволили оптимизировать параметры рассматривоемой системы, в частности параксиальное фокусное расстояние телескопа, кривизну дугового рельсового пути, по которому перемещается облучатель, диапазоны углов формирования антенны и углов наблюдений источников.

Расчеты, проведенные в широком диапазоне углов и длин волн, позволили получить материал, на базе которого можно выбрать тот или иной режим работы "радио-Шмидт телескопа"в зависимости от поставленной астрофизической задачи.

Было показано, что в режиме "приближенный радио-Шмидт"при существующем дуговом пути возможно сопровождение источников в течении часа с апертурой 150 м на волнах, длиннее 4 см. Оптимизация рельсового пути позволит проводить длительные наблюдения на волнах вплоть до 1 см.

Авторы выражают признательность Ю.К.Парийскому за внимание к работе, Н.Л.Кайдановскому и А.Н.Коржавину за полезные обсуждения проблемы.

Список литературы

Arsac J.: 1960, Report interne, Radioastronomie, Obs. de Meudon.
Biraud F.: 1969, Jhese de doctorat d'etat es sciences., Nancay
Вавилова И.В.: 1969, В кн.: Антенны. Вып.5.М., <Связь>, 72.
Голубчина О.А.: 1986, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 21,75.
Кайдановский Н.Л.: 1980, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 12, 103.
Кайдановский Н.Л.: 1975, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 7, 214.
Коржавин А.Н.: 1979, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 11, 170.
Maghoo M.: 1990, Rapport de state de D.E.A.
Мингалиев М.Г. и др.: 1985, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 19,76.
Попов Г.М.: 1974, Изв.КрАО, 50, 200.
Попов Г.М., Попова М.Б.: 1976, Изв.КрАО, 54, 272.
Wright F.: 1946, Amateur telescope making advanced.: Munn and Co.inc.
Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н., Есепкина Н.А.: 1972, Изв. ГАО, 188, 3.
Хайкин В.Б., Майорова Е.К., Чухлебов М.И.: 1997, XXVII радиоастрон. конференция, СПб ИПА РАН, 3, 56.
Шиврис О.Н.: 1980, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 12, 134.