

УДК 520.2.01, 520.272

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИЛЛИМЕТРОВОЛНОВОГО ИЗОБРАЖАЮЩЕГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

В.Б. Хайкин^{1,2}, М. К. Лебедев^{1,2}

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН

² НПФ “Айсберг-НТ”

Статья поступила в редакцию 25 мая 2016 г.

Аннотация. В настоящей работе описаны способы и результаты моделирования и оптимизации характеристик 12-метрового миллиметрового изображающего радиотелескопа системы Кассегрена для решения солнечных задач. С этой целью предложено использовать двухрядную приемную матрицу, развернутую по одной координате, и сканирование по другой координате, что позволяет достичь наибольшего числа пикселей и наилучшего качества изображения при минимальном размере и весе приемной решетки. Для решения задачи применяются как традиционные методы антенной техники и радиоастрономии, так и приемы радиовидения. Рассмотрены оптические схемы сканирования луча радиотелескопа с использованием вторичной и третичной оптики. Оптическая схема с третичной оптикой рассмотрена в двух вариантах: с эллиптическим и гиперболическим зеркалами для случая увеличения системы $M = 10$, в ней сканирование луча выполняется плоским зеркалом. В схеме с вторичной оптикой сканирование луча выполняется контррефлектором, рассмотрен случай $M = 3$. Делается вывод о предпочтительности использования вторичной оптики для сканирования лучом радиотелескопа диска Солнца. В работе представлены результаты лучевого трассирования оптики и модельные многолучевые диаграммы направленности 12-метрового радиотелескопа Кассегрена на волне 8 мм и 3 мм с диаметром контррефлектора 1.5 м.

Ключевые слова: солнечная радиоастрономия, многолучевой радиотелескоп, вторичная и третичная оптика, трассировка лучей, моделирование многолу-

чевых диаграмм направленности.

Abstract. In the present paper we describe the methods and results of the modeling and performance optimization of the imaging millimeter wave Cassegrain radiotelescope for solar research. We propose to use the 2-row densely packed array feed as a receiver, aligned with one image coordinate, and active beam scanning along the other one in order to maximize the number of pixels and achieve the best image quality with a feed of minimal size and weight. To solve the problem, conventional methods of antenna engineering and radioastronomy, as well as millimeter-wave imaging approaches were employed. Beam scanning optical systems with tertiary and secondary optics were considered. Two kinds of systems using tertiary mirror were studied, with an elliptic tertiary, and with a hyperbolic one, for the case of a magnification $M = 10$. The auxiliary swinging flat mirror is used for the beam scanning in those systems. In the system with a secondary optics, the beam is scanned using the subreflector, the case of $M = 3$ is considered. An optical design using secondary optics is shown to be more appropriate for the beam scanning.

Key words: solar radioastronomy, multibeam radiotelescope, secondary and tertiary optics, ray tracing, multibeam pattern modeling.

Введение

В радиотелескопах мм и субмм диапазона может быть реализован многолучевой режим работы, позволяющий быстро получать изображения протяженных космических объектов. Объектами наблюдений могут быть как быстродинамичное Солнце, когда достигается высокое отношение сигнал/шум, но требуется высокое временное разрешение и широкий динамический диапазон, так и относительно холодные и квазистационарные области, такие как галактические области звездообразования, когда необходимо длительное накопление сигнала для проявления тонкой структуры облаков газа и пыли. Для реализации многолучевого режима работы необходимо, чтобы радиотелескоп обладал большой безабберационной фокальной зоной. В этом случае становится возможным применение многоэлементных приемных матриц

одного или нескольких диапазонов. Примером продвинутого изображающего мм и субмм радиотелескопа является Atacama Pathfinder Experiment (APEX) в Чили с 295-элементной приемной матрицей (камерой) LABOCA [1].

Моделирование характеристик изображающего радиотелескопа требует выбора оптической схемы и предварительного расчета его фокальной оптики, точного расчета оптической системы в целом, расчета многолучевых диаграмм в дальней зоне в режиме работы антенны на передачу и фокального поля в режиме работы антенны на прием. Все это необходимо для оценки качества изображения, размеров фокального пятна, потерь энергии от оси к периферии, выбора шага приемной решетки. Оптимизация включает в себя получение оптимальных характеристик и параметров многолучевого радиотелескопа, достижение приемлемой антенной эффективности в широком поле зрения, оптимизацию размеров облучателей приемной решетки, выполнение требований к развязке и взаимному влиянию соседних облучателей, допустимому затенению контррефлектора (КР).

В настоящей работе описаны способы и результаты моделирования и оптимизации характеристик 12-метрового миллиметрового изображающего радиотелескопа системы Кассегрена для решения солнечных задач. С этой целью предложено использовать двухрядную приемную матрицу, развернутую по одной координате, и сканирование по другой координате, что позволяет достичь наибольшего числа пикселей и наилучшего качества изображения при минимальном размере и весе приемной решетки. Для решения задачи использованы как традиционные методы антенной техники и радиоастрономии, так и приемы радиовидения, где получение быстрого изображения протяженного статического и динамического объекта необходимо для решения различных прикладных задач [2]. Задача рассматривается с точки зрения характеристик и режимов работы рефлекторного радиотелескопа, который имеет возможность приема сигнала любой поляризации, включая круговые (L, R). В данной работе не рассматривались вопросы частотного анализа сигнала такого радиотелескопа и характеристики радиотелескопа в широкой полосе с

учетом достижимого качества его поверхности. Это не вызывает каких-либо сложностей в процессе моделирования, но требует решения ряда непростых технических задач для реализации приема широкополосного приема сигнала линейной или круговой поляризации. С этой целью необходимо использовать многоканальные матричные приемники с первичными облучателями линейной или круговой поляризации. Задача построения многоканального солнечного приемника круговой поляризации с разделением каналов по радиочастоте рассмотрена в [3,4].

Выбор оптической схемы и геометрии приемной матрицы многолучевого солнечного радиотелескопа

В современных исследованиях Солнца одновременно требуются высокое пространственное, частотное и временное разрешение, возможность быстрого получения изображения области размером более $\pm 15'$, широкий частотный диапазон и наличие большого числа каналов, возможность выполнения поляризационных измерений. Для калибровки солнечных данных необходимо также обеспечить возможность наблюдений дискретных калибровочных источников, потоки которых в мм диапазоне, как правило, меньше 1 Ян. Это требует высокой антенной эффективности радиотелескопа и его облучателей, высокой чувствительности приемников и в то же время большого динамического диапазона, необходимого для наблюдения активного Солнца. Для получения качественной карты Солнца необходима оптимизация оптики и максимально плотная упаковка приемной решетки.

Указанные выше требования противоречат друг другу и в процессе моделирования приходится искать компромиссное решение. Наилучшим с точки зрения качества изображения является применение двухрядной приемной матрицы с шагом d и смещением $d/2$ двух рядов матрицы с числом элементов N . Такой прием широко используется в радиовидении [2]. В результате число элементов в направлении развертки матрицы составит $2N$ с шагом $d/2$. В направлении, перпендикулярном развертке матрицы, необходимо обеспечить

сканирование с помощью главного зеркала радиотелескопа или вторичной (третичной) оптики. Последнее решение позволяет достичь большей частоты обновления изображения, разделить и упростить процессы сопровождения и сканирования космического объекта.

Для матричных применений целесообразно рассмотреть два варианта оптики радиотелескопа: длиннофокусный (увеличение $M \gg 3$) и среднефокусный ($M \sim 3$). Короткофокусный радиотелескоп с $M < 1$ не подходит для работы с матричными приемниками из-за значительного уровня внеосевых aberrаций. На рис. 1 представлена геометрия двухзеркального радиотелескопа Кассегрена с наклоняемым КР.

Расстояние между первичным и вторичным фокусами f_s выражается через другие параметры [5] (обозначения см. на рис. 1):

$$f_s = \frac{d(M+1)(16f^2M - D^2)}{16MDf}.$$

где M — увеличение антенной системы, которое определяется эксцентриситетом КР e :

$$M = \frac{e+1}{e-1}, \quad M = \frac{\operatorname{tg}(\theta_p/2)}{\operatorname{tg}(\theta_s/2)}.$$

Глубина параболоида:

$$\Delta = \frac{D^2}{16f} = f \left(\frac{D}{4f} \right)^2 = \operatorname{tg}^2 \frac{\theta_p}{2};$$

$$\theta_p = 2 \operatorname{arctg} \frac{D}{4f}, \quad \theta_s = 2 \operatorname{arctg} \frac{D}{4fM};$$

$$z_f = f_s - f.$$

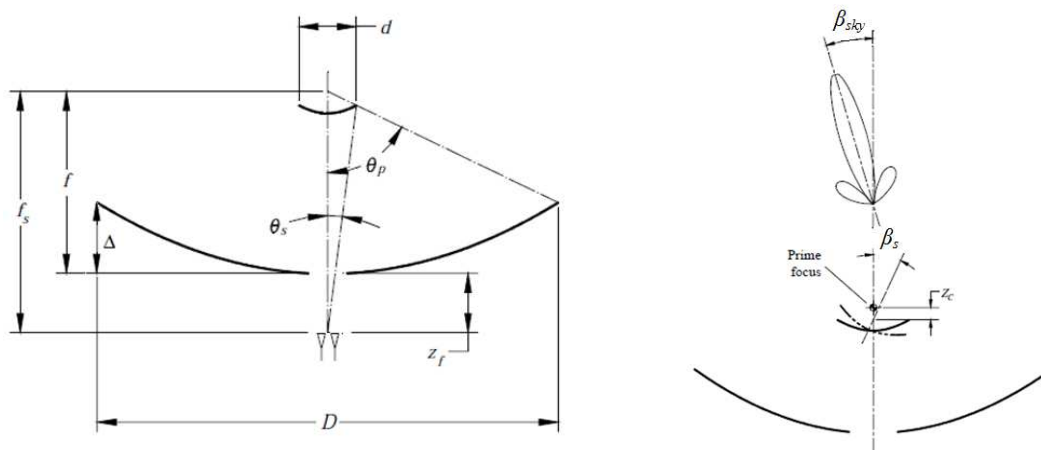


Рис. 1. Геометрия радиотелескопа системы Кассегрена с наклоняемым КР

Соотношение углов наклона луча радиотелескопа и КР:

$$\beta = \frac{\beta_{\text{sky}}}{\beta_s} = - \left(\frac{z_c}{f} - \frac{f_s - z_c}{Mf} \right).$$

При совпадении оси вращения КР с первичным фокусом ($z_c = 0$):

$$\beta = \frac{f_s}{Mf}.$$

Угол θ_s в длиннофокусных системах слишком мал для построения матричных устройств, поскольку требует применения облучателей значительного поперечного сечения и длины. Поэтому в случае длиннофокусного радиотелескопа целесообразно применить третичную фокальную оптику, состоящую из плоского и вогнутого зеркал с поверхностью второго порядка. Сканирование выполняется плоским зеркалом в направлении, перпендикулярном направлению развертки матрицы. Такие схемы позволяют многократно уменьшить размеры облучающих устройств и обеспечить достаточное поле зрения для картографирования Солнца. Ниже рассмотрен также вариант среднефокусного радиотелескопа Кассегрена со сканирующей вторичной оптикой.

Оценка абберационных потерь

В изображающем (сканирующем) радиотелескопе важно оценить потери на краях поля зрения или области сканирования. Основные потери возникают

при боковом и осевом выносе облучателя, боковом и осевом смещении и наклоне КР. Согласно теории допусков Рузе [6],

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \overline{\delta^2} + \overline{\delta^2};$$

$$\overline{\delta^2} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) \delta^2(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) r dr d\varphi};$$

$$\overline{\delta^2} = \left(\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) \delta(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) r dr d\varphi} \right)^2,$$

где $f(r, \varphi)$ — функция освещения апертуры, которую в случае круговой симметрии апертурного поля можно аппроксимировать квадратичной функцией радиуса вида:

$$f(r) = \tau + (1 - \tau) \left[1 - (r / r_0)^2 \right] = 1 - (1 - \tau)(r / r_0)^2,$$

где τ — уровень поля на краю апертуры (0..1), p — разность хода лучей из фокуса к апертуре из-за линейного смещения или наклона облучателя или КР, $\delta(r, \varphi) = 2\pi p / \lambda$ — фазовая ошибка, соответствующая данной разности хода.

Выражения для фазовой ошибки, возникающей при различных выносах и наклонах облучателя и КР в радиотелескопе Кассегрена [6, 7], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип ошибки	Фазовая ошибка $\delta(r, \varphi) = 2\pi p / \lambda$
Осевое смещение облучателя Δz_f	$-2\pi p_1 / \lambda$, где $p_1 = \Delta z_f \cos \theta_s$
Боковое смещение облучателя Δr_f	$-2\pi p_2 / \lambda$, $p_2 = \Delta r_f \sin \theta_s \cos \varphi$
Осевое смещение КР Δz_s	$-2\pi p_3 / \lambda$, $p_3 = \Delta z_s (\cos \theta_p + \cos \theta_s)$
Боковое смещение КР Δr_s	$-2\pi p_4 / \lambda$, $p_4 = \Delta r_s (\sin \theta_p - \sin \theta_s) \cos \varphi$
Наклон КР $\Delta \alpha$	$-2\pi p_5 / \lambda$, $p_5 = \Delta \alpha (c - a)(\sin \theta_p + M \sin \theta_s) \cos \varphi$

На рис. 2 представлены результаты расчетов разности хода лучей в 12-метровом радиотелескопе Кассегрена для бокового выноса облучателя Δr_f ($p_2(r, \Delta r_f, M)$) и наклона КР $\Delta\alpha$ ($p_5(r, \Delta\alpha, c - a, M)$); здесь $(c - a)$ — расстояние от вершины КР до первичного фокуса.

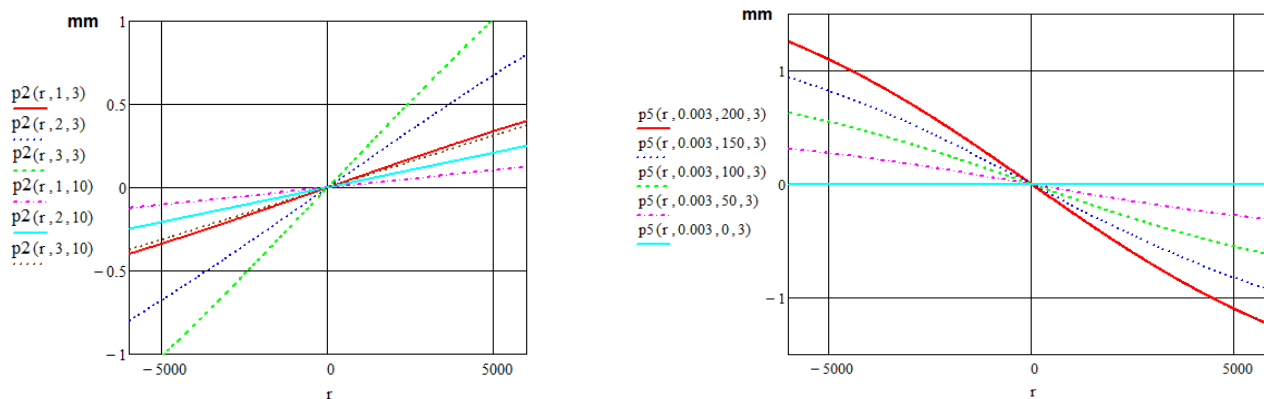


Рис. 2. Разность хода лучей для бокового выноса облучателя (слева) и наклона КР (справа).

При одновременном боковом смещении луча и источника в противоположных направлениях, как это происходит при сканировании протяженного объекта наблюдения смещением облучателя или наклоном КР, необходимо, согласно Рузе, учесть девиацию луча, вследствие которой положение максимума ДН отличается от рассчитанного методом геометрической оптики, а потери коэффициента усиления уменьшаются. Согласно [6], фактор девиации луча (beam deviation factor, BDF)

$$BDF = \frac{\int_0^1 \frac{f(r)r^3}{1 + [r / (2fM)]^2} dr}{\int_0^1 f(r)r^3 dr}.$$

Результат расчета BDF приведен в табл. 2. В табл. 3, 4 приводятся результаты расчета потерь коэффициента усиления при боковом смещении облучателя и наклоне КР; величины, для которых расчет произведен с учетом девиации луча, выделены жирным шрифтом.

Таблица 2

τ	BDF	
	$M = 10$	$M = 3$
0.3	0.998	0.975
0.45	0.997	0.974

Таблица 3

Δr_f	$G/G_0 (\lambda=8 \text{ мм}), \tau = 0.3$	
	$M = 10$	$M = 3$
2 мм	1	0.991
5 мм	0.999	0.942
10 мм	0.998	0.975
100 мм	0.998	0.948

Таблица 4

$\Delta\alpha,$ arcmin	$G/G_0 (\lambda = 8 \text{ мм}),$ $\tau = 0.3, c - a = 200 \text{ мм}$	
	$M = 10$	$M = 3$
1	0.974/> 0.99	0.974/> 0.99
2	0.895/> 0.99	0.897/> 0.99

Моделирование оптики миллиметрового радиотелескопа

Выполнено оптическое моделирование и оптимизация предложенных оптических схем: 1) с использованием третичной оптики для сканирования и согласования углов облучения; 2) классического радиотелескопа Кассегрена с наклоном КР. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Оптическая схема с третичной оптикой рассмотрена в двух вариантах: с эллиптическим (рис. 3, а) и гиперболическим (рис. 3, б) зеркалами для $M = 10$, сканирование КР рассмотрено для случая $M = 3$. Как видно из рис. 3, требуемый размер эллиптического зеркала в несколько раз больше размера гиперболического. По результатам моделирования потери энергии в оптическом фокальном пятне (ФП) при отклонении центрального луча на $15'$ составляют 12%

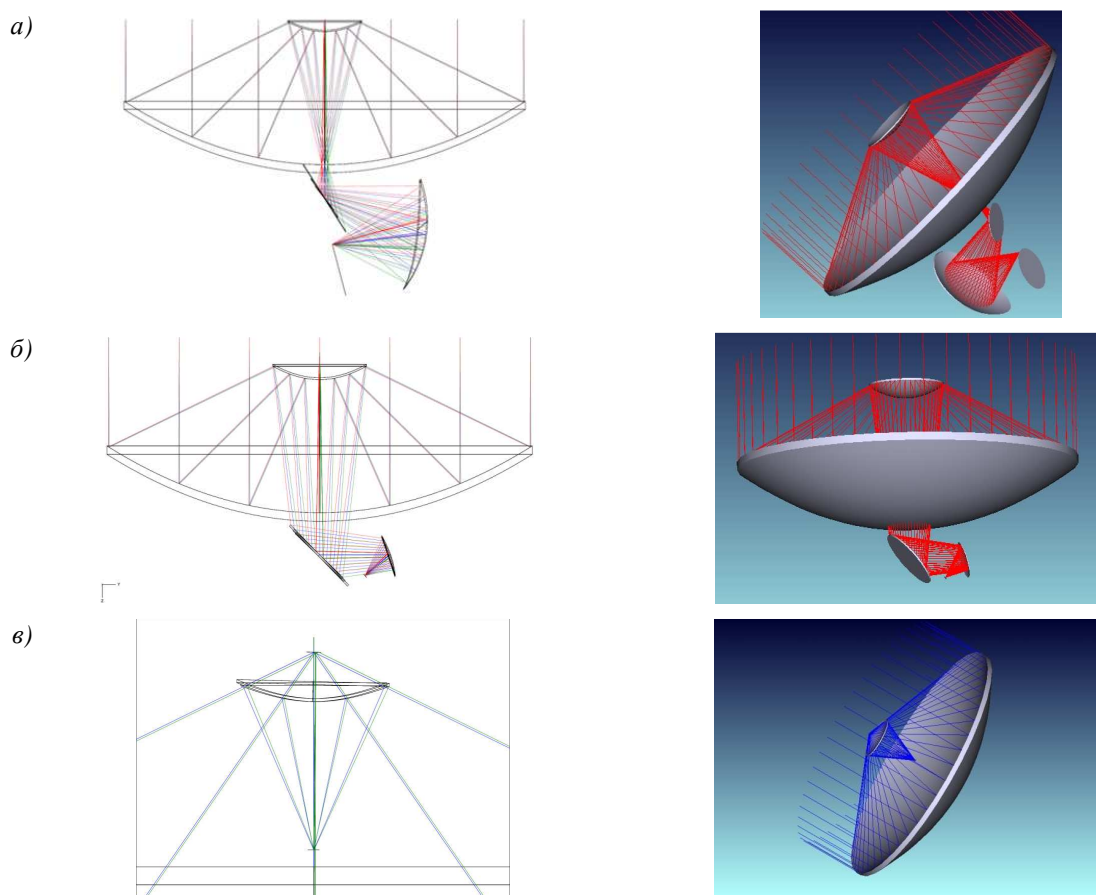


Рис. 3. Трассировка лучей в оптической схеме сканирующего радиотелескопа с третичной (а, б) и вторичной (в) оптикой

и 6% соответственно. В случае сканирования КР и отклонении луча на угол $15'$ потери энергии в ФП составят 1–2%, при этом наклон КР равен 1.45° . Таким образом, из двух вариантов третичной оптики предпочтителен второй, а из рассмотренных трех вариантов сканирования наиболее эффективен и предпочтителен третий. Как показывает динамическое моделирование, частота сканирования Солнца с вторичной оптикой может быть доведена до 2 Гц, с третичной — до 5 Гц.

Расчет многолучевых диаграмм направленности

Расчет диаграмм направленности (ДН) изображающего миллиметрового радиотелескопа выполнялся апертурным методом [8]. Для расчета поля в раскрыве антенны применялся метод трассировки лучей: рассматривалось

семейство лучей, направленных под различными углами из фазового центра первичного облучателя с известной (измеренной) ДН в H - и E -плоскостях. Для каждого луча из данного семейства методами геометрической оптики определялись точка его пересечения с плоскостью апертуры и оптическая длина пути. Поле в дальней зоне вычислялось путем применения к полученному двумерному массиву значений поля в апертуре двумерного преобразования Фурье. Предложенный метод обеспечивает приемлемую точность расчета ДН при малых углах отклонения от оси для сравнительно коротких длин волн, при этом, в отличие от более точных методов, не требует значительной вычислительной мощности.

На рис. 4 представлены модельные многолучевые ДН двухзеркального радиотелескопа Кассегрена на волне 8 мм с диаметром главного зеркала и КР 12 м и 1.5 м соответственно при отклонении луча на $0'$ и $21'$ с помощью наклона КР. На рис. 5 представлены ДН осевого и периферийного лучей радиотелескопа без наклона (a) и с наклоном КР на угол 1.75° (b), что соответствует отклонению луча на $21'$. Из рис. 5 видно, что сканирование луча на $\pm 21'$ с помощью наклона КР уменьшает эффективность осевого и периферийного лучей всего на 2-3% на волне 8 мм. На рис. 6, a представлены модельные многолучевые ДН на волне 3 мм при выносе облучателя из фокуса на 0–160 мм с шагом 20 мм; максимальный вынос соответствует смещению луча на небе на угол около $40'$. При выносе облучателя из фокуса на 60 мм (смещение луча на небе на угол $\sim 15'$) эффективность падает не более чем на 10%. При одновременном наклоне КР на угол 1.75° (смещение луча не зависит от длины волны и составляет, как и в предыдущем случае, $21'$), падение эффективности лучей составит 20% (рис. 6, b). В результате эффективность осевых и периферийных лучей в результате сканирования Солнца КР на волне 3 мм составит более 80% и 70%.

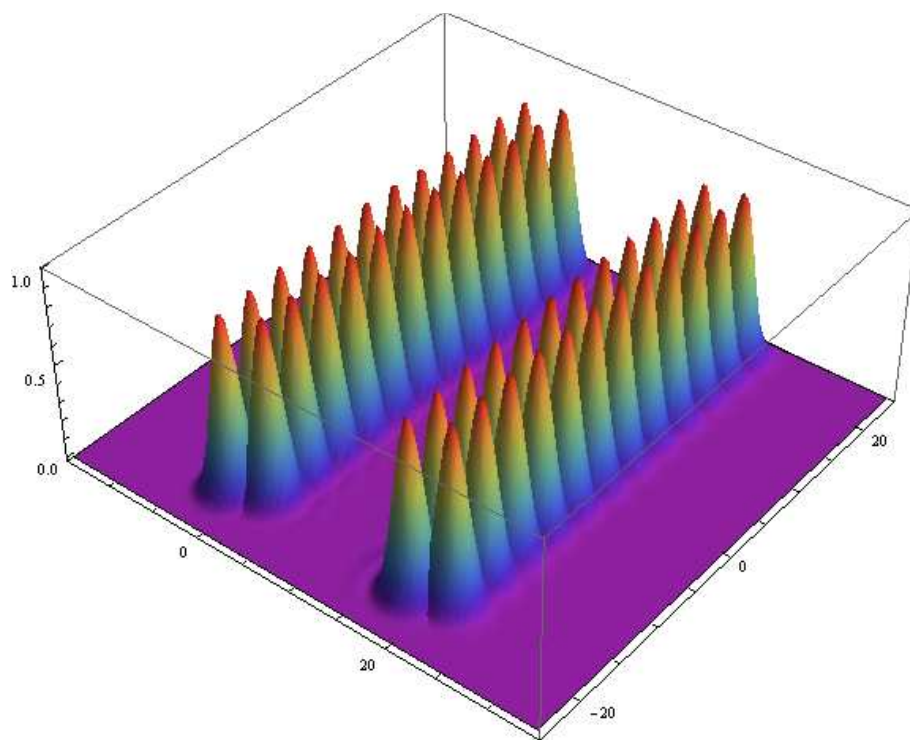


Рис. 4. Многолучевая диаграмма направленности сканирующего радиотелескопа на волне 8 мм

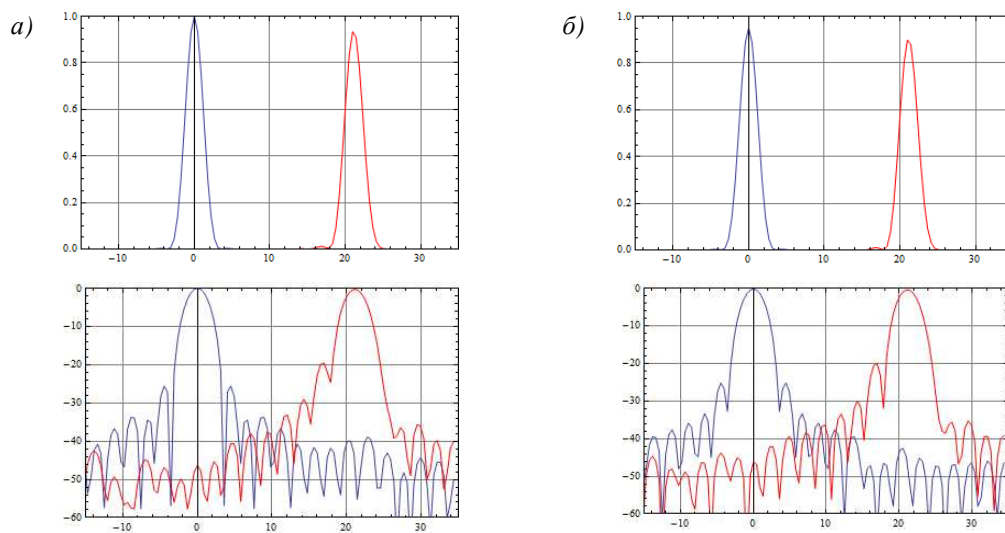


Рис. 5. Осевой и периферийный лучи двухзеркального сканирующего радиотелескопа на волне 8 мм без наклона (а) и с наклоном КР на угол 1.75° (б)

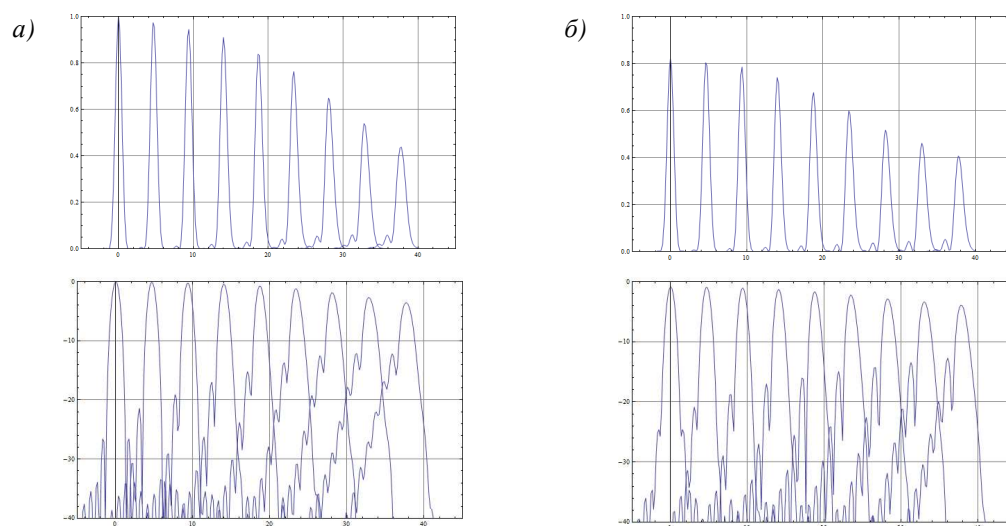


Рис. 6. Многолучевые диаграммы направленности при выносе облучателя из фокуса (а) и при наклоне КР на угол 1.75° (б) на волне 3 мм

Таким образом, в работе показано, что оптическая схема со сканированием луча наклоном КР радиотелескопа Кассегрена дает наибольшую эффективность, не требует дополнительной (третичной) оптики и потому предпочтительна для реализации изображающего миллиметрового солнечного радиотелескопа. Применение двухрядной матрицы вместо квадратной позволяет многократно уменьшить размер, вес и стоимость приемной решетки и при использовании легкого КР достичь частоты обновления изображения несколько герц.

Литература

1. G. Siringo et al. The Large APEX BOlometer CAmera LABOCA // A&A T. 497. С. 945–962 (2009).
2. В. Б. Хайкин, А. А. Стороженко, М. К. Лебедев, В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин, С. В. Шлензин. Многоэлементная приемная матричная система 8 мм диапазона для задач пассивного радиовидения // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. № 2, 2014. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/4/text.pdf>.

3. В. Б. Хайкин, В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин, С. В. Шлензин, В. М. Богод. Многоканальный приемник 8 ММ диапазона с разделением каналов по радио частоте / Тр. ВРК-2014, Пушино, сентябрь 2014.

4. В. Б. Хайкин, В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин. Радиоастрономические приемники миллиметрового диапазона с разделением спектральных каналов по радио частоте. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. № 12, 2015. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/2/text.pdf>.

5. J. W. Lamb, A. D. Olver. Gain loss and noise temperature degradation due to subreflector rotations in a Cassegrain antenna / Proc. ICAP 85, Coventry, England, April 1985.

6. J. Ruze. Small Displacements in Parabolic Reflectors. MIT Lincoln Laboratory, Feb. 1969.

7. J. Lamb. OVRO/Caltech report. May 2001.

8. М. К. Лебедев, В. В. Хаикин, А. Боаг, С. Летру. Optical and diffraction simulation techniques for large multibeam reflector / Proceed. of MSMW 2010, Kharkov, Ukraine, June 21–26, 2010.

References

1. Siringo G. et al. The Large APEX BOlometer CAmera LABOCA. *A&A*, 2009, Vol. 497, No. 3, pp. 945–962. DOI: 10.1051/0004-6361/200811454.

2. Khaikin V. B., Storozhenko A. A., Lebedev M. K., Radzikhovsky V. N., Kuzmin S. E., Shlenzin S. V. 8-mm range multielement array feed receiver for passive millimeter wave imaging. *Zhurnal Radioelektroniki — Journal of Radio Electronics*, 2014, No. 2. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/4/text.pdf>.

3. Khaikin V. B., Radzikhovsky V. N., Kuzmin S. E., Shlenzin S. V., Bogod V. M. Multichannel 8-mm range receiver with radio frequency channel separation. *Trudy VRK-2014* [Proc. VRK-2014]. Pushchino, Russia, Sep. 2014.

4. Khaikin V. B., Radzikhovsky V. N., Kuzmin S. E.. Millimeter wave radioastronomy receivers with radio frequency spectral channel separation. *Zhurnal*

Radioelektroniki — *Journal of Radio Electronics*, 2015, No. 12. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/2/text.pdf>.

5. Lamb J. W., Olver A. D. Gain loss and noise temperature degradation due to subreflector rotations in a Cassegrain antenna. *Proc. ICAP 85*, Coventry, England, 1985 pp. 575-579. A86-31851 14-32, IEEE.

6. Ruze J. *Small Displacements in Parabolic Reflectors*. MIT Lincoln Laboratory, Feb. 1969.

7. Lamb J. OVRO/Caltech report. May 2001.

8. Lebedev M. K., Khaikin V. B., Boag A., Letrou C. Optical and diffraction simulation techniques for large multibeam reflector. *Proc. of MSMW 2010*, Kharkov, Ukraine, Jun. 21–26, 2010. DOI: 10.1109/MSMW.2010.5546098.