Многоэлементная фокальная решетка в фокусе радиотелескопа

Е.К Майорова, В.Б.Хайкин

Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, Nizhnij Arkhyz 357147, Russia

Аннотация. В настоящей работе исследуются характеристики радиотелескопов с многоэлементной фокальной решеткой. Рассматривается вопрос оптимизации конструкции решетки, элементами которой являются горизонтально ориентированные полосковые излучатели, применительно к РАТАН-600 и параболоиду вращения. Проводится расчет диаграмм направленности этих радиотелескопов в режиме многолучевого приема с использованием различных модификаций фокальных решеток. Предлагается "террасная" конструкция фокальной решетки для облучения несимметричного вторичного зеркала РАТАН-600 и симметричных зеркал (параболоидов вращения).

1. Введение.

Многолучевой режим работы радиотелескопа можно осуществить, расположив в его фокальной плоскости матрицу первичных облучателей. Такая многоэлементная приемная решетка в фокусе рефлекторного радиотелескопа позволяет существенно расширить его поле зрения, повысить интегральную чувствительность, ускорить процесс формирования изображений протяженных источников, снизить влияние атмосферы.

Приемные решетки в виде матричных радиометров применялись на 12- и 90-м радиотелескопах в NRAO (Payne,1988),(Sutton, 1984). На 64-м радиотелескопе в Parkes успешно работает 9-ти лучевая приемная решетка на волну 21 см (Bird, 1994). 32-х элементная фокальная решетка в диапазоне 85-115 GHz используется на 14-м радиотелескопе в FCRAO (Erickson et al., 1992). В работе (Pinchuk et al., 1995) рассмотрена возможность создания фазированной антенной решетки в фокусе РАТАН-600. Один из вариантов построения приемной решетки в виде матричного радиометра на волну 1 см для РАТАН-600 предложен в работе (Berlin et al., 2000).

В указанных работах в качестве элементов фокальной решетки используются волноводные рупора с заданным уровнем облучения зеркал. Однако, возможно создание фокальной антенной решетки и с использованием полосковых излучателей, как это было предложено в работах (Khaikin et al., 1998), (Smits F.M.,Smolders A.B., 1998).

В проекте SKA для создания фазированной антенной решетки площадью 1 км^2 используются полосковые излучатели с вертикальной ориентацией в пространстве (Smits F.M.,Smolders A.B., 1998). В работе (Khaikin et al., 1998) нами предложено использовать горизонтально ориентированные полосковые излучатели, как наиболее технологичные и допускающие наибольшую плотность размещения элементов. Оптимальное расположение таких излучателей в фокальной области радиотелескопа позволит существенно увеличить число приемных элементов решетки.

В настоящей работе расматривается вопрос оптимизации конструкции многоэлементной фокальной решетки с горизонтально ориентированными полосковыми излучателями применительно к РАТАН-600 и параболоиду вращения, проводится расчет диаграмм направленности (ДН) этих радиотелескопов в режиме многолучевого приема с использованием различных модификаций фокальных решеток.

2. Число элементов и шаг приемной решетки в фокальной области радиотелескопа.

Вопрос об оптимальном количестве приемных элементов в фокусе радиотелескопа зависит от конкретной астрофизической задачи. Так для быстрого построения изображения области неба размером L_1xL_2 число элементов решетки должно равняться N_1xN_2, где $N_1 = L_1/\Delta L_1$, $N_2 = L_2/\Delta L_2$, ΔL_1, ΔL_2 - интервалы решетки, равные полуширинам мощностной диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа в дальней зоне во взаимно перпендикулярных плоскостях. Для радиотелескопов с достаточно большим отношением $f/D \geq 1$ диаграмма направленности радиотелескопа в дальней зоне соответствует распределению поля в фокусе. В соответствии с теоремой отсчетов для мощностного сигнала имеем: $\Delta L = 0.5\,\lambda\, f/D$, где f - фокусное расстояние, D - диаметр апертуры, λ - длина волны. Практически размер L_1xL_2 и поле зрения радиотелескопа ограничиваются размером безаберрационной зоны L_a в фокальной области, что определяет допустимое N в случае симметричного радиотелескопа как $N = (L_a/\Delta L)^2$.

В случае, когда с помощью многолучевого режима решается задача повышения интегральной чувствительности радиотелескопа, стремятся достичь как можно большего числа независимых приемных элементов за счет более плотного их расположения вплоть до $\Delta L = \lambda_s/2$, где λ_s - длина волны в подложке полоскового элемента, обратно пропорциональная $\sqrt{\varepsilon}$ ($\varepsilon > 1$), ε - диэлектрическая проницаемость материала подложки. Однако, более плотное расположение элементов приводит к снижению чувствительности каждого элемента. Кроме того шум в соседних приемных каналах становится частично коррелированным. По этим двум причинам достичь желаемого фактора $\sqrt{N_{max}} = \sqrt{(2\,\Delta L/\lambda_s)}$ не удается. Поэтому шаг решетки ограничивается обычно сверху теоремой отсчетов, а снизу - геометрической конструкцией излучателей и допустимой взаимной связью между ними (обычно стремятся достичь развязки между элементами не менее -30 дБ).

Хорошо известно, что двухлучевое сканирование снижает влияние атмосферы на работу радиотелескопа. Вычитание выходных сигналов разнесенных элементов приемной решетки также может быть достаточно эффективным для борьбы с атмосферными флуктуациями. Пары элементов с максимальным разнесением в фокальной области $N\Delta L/2$ дадут наибольший угловой масштаб S подавляемых атмосферных флуктуаций:

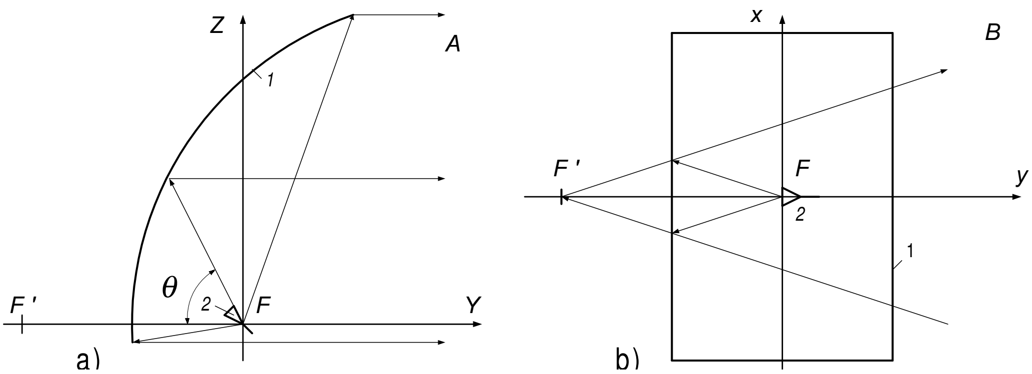

Рис. 1. Сечения вторичного зеркала в вертикальной (a) и горизонтальной (b) плоскостях. 1 - параболическое зеркало, 2 - первичный облучатель.

$S = 0.5\,N\,\Delta L/f$.

Отметим достоинство многолучевого режима работы радиотелескопа для борьбы с атмосферными флуктуациями по сравнению с двухлучевым. В многолучевом режиме остаточные атмосферные флуктуации в соседних парах лучей коррелированы и могут быть устранены.

3. Одномерная решетка в фокусе РАТАН-600.

Антенна радиотелескопа РАТАН-600 в зависимости от режима наблюдений представляет собой двух- или трехзеркальную фокусирующую систему (Хайкин, 1972). В режиме двухзеркальной фокусирующей системы плоская волна от космического источника, попадая на раскрыв главного зеркала (кругового отражателя), преобразуется им в цилиндрическую волну. Отражающие элементы главного зеркала формируют фокусирующую поверхность, представляющую собой вырезку из эллиптического конуса, в фокусе которого располагается вторичное зеркало, преобразующее цилиндрическую волну в сферическую. Последняя принимается приемным рупором (первичным облучателем), расположенными в фокусе вторичного зеркала (рис.1). По такой схеме работают Северный и Западный сектора РАТАН-600. Наблюдения осуществляются в режиме прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности (ДН) радиотелескопа. Фокусировка луча ДН в заданном направлении осуществляется путем изменения формы отражающей поверхности главного зеркала и изменения положения вторичного зеркала на рельсовых путях.

Южный сектор кругового отражателя РАТАН-600 в сочетании с плоским перископическим зеркалом образуют трехзеркальную фокусирующую систему, подобную системе Крауса в Нансе. С помощью плоского зеркала происходит изменение направления плоской падающей волны от источника, которая после отражения направляется на главное зеркало. Далее фокусировка лучей осуществляется как в двухзеркальной системе. В трехзеркальной фокусирующей системе форма главного зеркала, представляющего собой параболический цилиндр с вертикальной образующей, не меняется с изменением высоты источника. Управление лучем диаграммы направленности осуществляется путем изменения угла наклона элементов плоского отражателя.

В качестве вторичного зеркала используется несимметричный параболический ци-

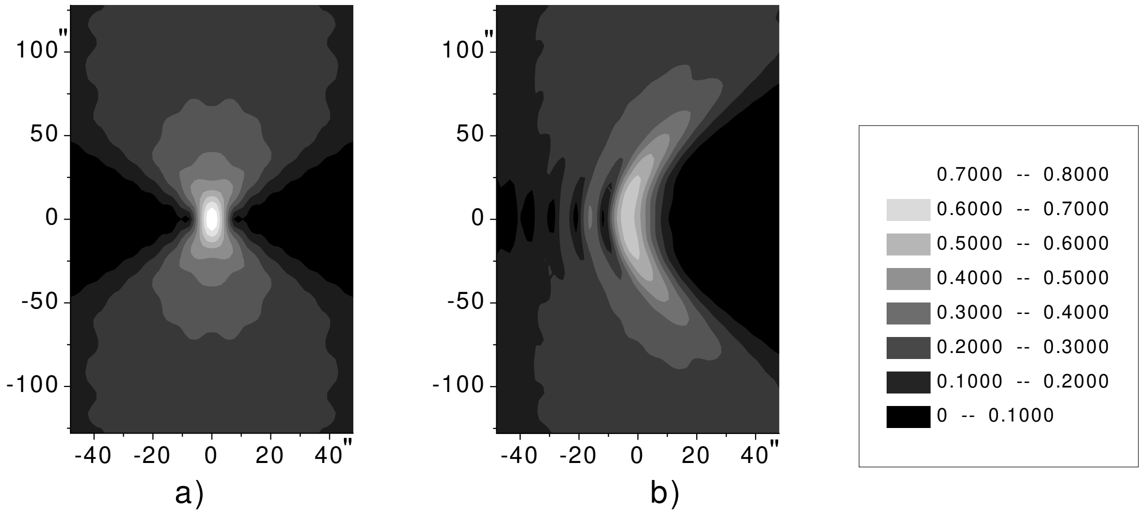

Рис. 2. Двухмерная мощностная ДН РАТАН-600 (основная поляризация) на волне 10 мм при $H = 85°$. (a) - $\Delta x = 0$ мм, (b) - $\Delta x = 1000$ мм

линдр с горизонтальной образующей, на фокальной линии которого (ось X на рис. 1(b)) располагаются первичные облучатели, что позволяет проводить наблюдения одновременно на нескольких длинах волн. Такая конструкция вторичного зеркала удобна и для осуществления многолучевого режима работы радиотелескопа с одномерной решеткой (Кайдановский, 1980).

Количество элементов в решетке определяется размерами безаберрационной зоны радиотелескопа, которая в режиме двухзеркальной фокусирующей системы РАТАН-600 зависит от высоты наблюдаемого источника. В работах (Коржавин, 1979), (Есепкина и др., 1980), (Есепкина и др., 1982) достаточно подробно рассмотрены аберрации, возникающие при выносе первичного облучателя из фокуса, выведены формулы расчета ДН, а также проведено исследование поляризационных характеристик РАТАН-600 с учетом аберраций. Опираясь на эти работы и используя программы, любезно предоставленные Коржавиным А.Н., были расчитаны ДН радиотелескопа РАТАН-600 для основной и паразитных поляризаций при различных выносах первичного облучателя из фокуса вдоль оси X и построены аберрационные кривые радиотелескопа в режиме двухзеркальной фокусирующей системы. Аберрационными кривыми мы называем зависимости максимума диаграммы направленности телескопа F_{max} от величины выноса первичного облучателя из фокуса.

Примеры двухмерной мощностной ДН РАТАН-600 на волне 10 мм для сфокусированной антенны (a) и при выносе первичного облучателя вдоль оси X на 1000 мм (b) для высоты источника $H = 85°$ показаны на рис.2. На рис.3 и 4 приведены ДН круговой и линейной паразитных поляризаций при приеме неполяризованного излучения, характеризующиеся элементами матрицами Мюллера M41 и M32 соответственно ((a) - при $\Delta x = 0$ мм, (b) - при $\Delta x = 1000$ мм). Аберрационные кривые для основной $F_{max}(\Delta x)$ - (a) и паразитных $M41_{max}(\Delta x)$, $M32_{max}(\Delta x)$ - (b) поляризаций приведены на рис.5, 6.

Как видно из рис.5, 6 использование одномерной решетки, расположенной на фокальной линии вторичного зеркала, дает наибольший эффект при наблюдениях источников с

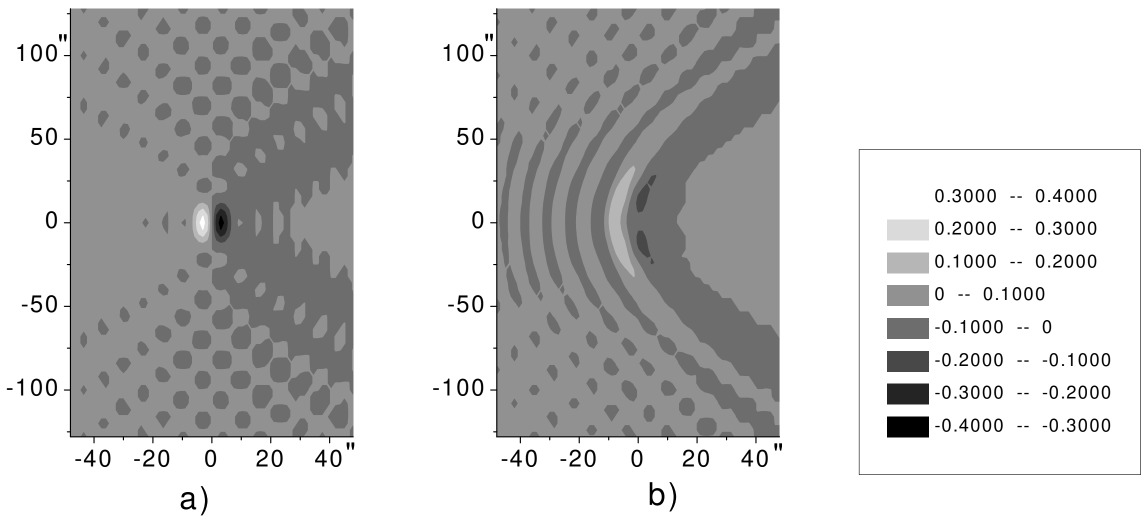

Рис. 3. ДН круговой паразитной поляризации (элемент матрицы Мюллера M41) на волне 10 мм при $H = 85°$. (a) - $\Delta x = 0$ мм, (b) - $\Delta x = 1000$ мм

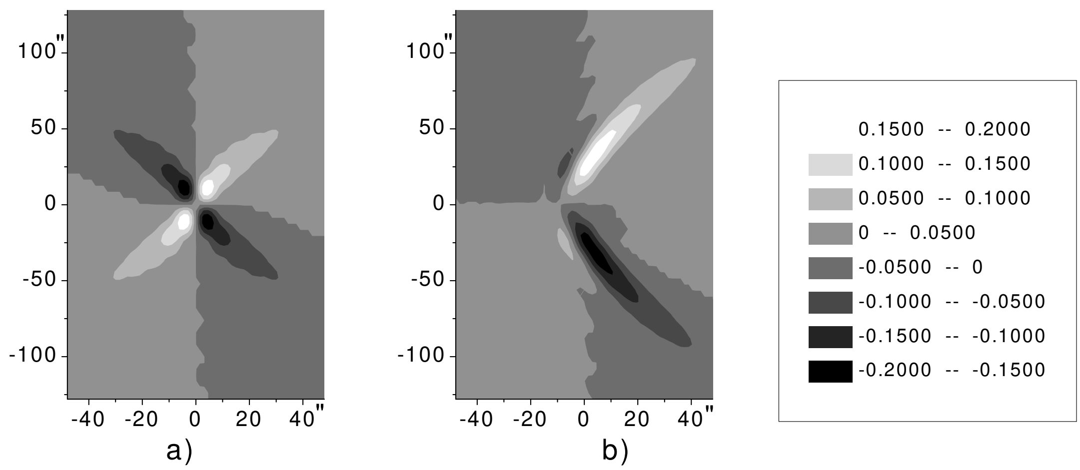

Рис. 4. ДН линейной паразитной поляризации (элемент матрицы Мюллера M32) на волне 10 мм при $H = 85°$. (a) - $\Delta x = 0$ мм, (b) - $\Delta x = 1000$ мм

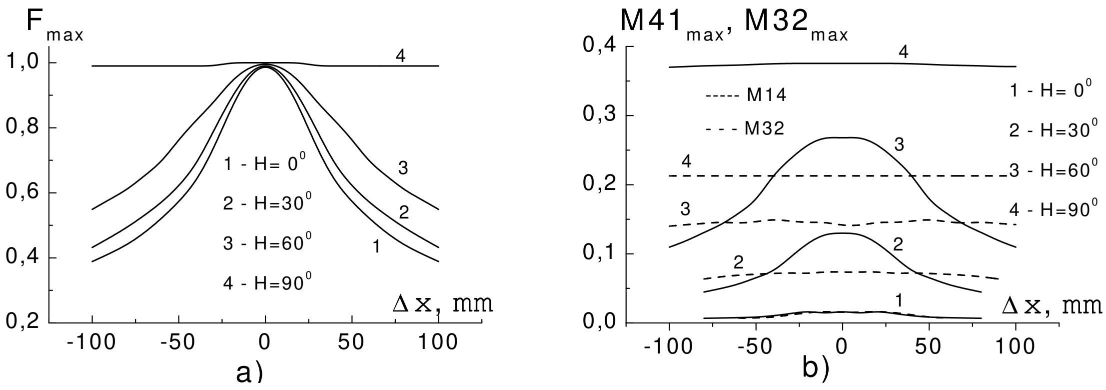

Рис. 5. Аберрационные кривые на волне 10 мм при выносе первичного облучателя вдоль фокальной линии вторичного зеркала (ось X). Режим двухзеркальной фокусирующей системы с полной апертурой.

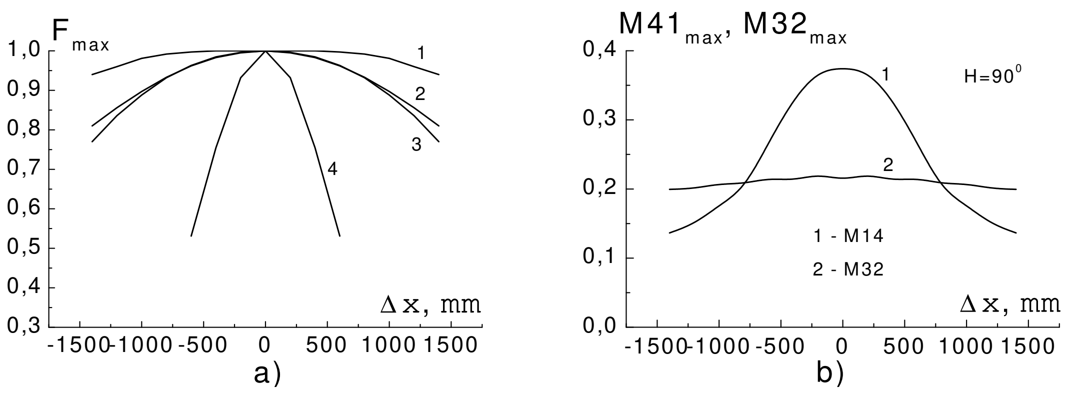

Рис. 6. Аберрационные кривые на волне 10 мм при выносе первичного облучателя вдоль фокальной линии вторичного зеркала. 1 - $H = 90°$, 2 - $H = 89°$, 3 - режим "радио-Шмидт телескоп", 4 - $H = 0°$; 1, 2 - полная апертура, 3, 4 - укороченная апертура.

высотами, близкими к 90°, поскольку в этом режиме безаберрационная зона РАТАН-600 максимальна. С уменьшением высоты источника безаберрационная зона быстро сужается. Размер безаберрационной зоны на волне 10 мм вблизи зенита составляет порядка 3 м (кривые 1 и 2 на рис.6(а)), в то время как для высоты $H = 0°$ падение сигнала в основной поляризации не более,чем на 20% может быть обеспечено лишь при выносах первичного облучателя из фокуса на $\Delta x = \pm 25$ мм (кривая 1 на рис.5(а)). Таким образом, количество полосковых излучателей в одномерной фокальной решетке на волну 10 мм при наблюдениях околозенитных источников может составить 500 элементов, в то время как для эффективного приема излучения от низких источников их число не должно превышать 10.

Что касается составляющих паразитной поляризации, то их величина минимальна на высотах, близких к нулевым, и монотонно возрастает с увеличением высоты источника. Поэтому при поляризационных измерениях предпочтительнее оказывается режим трехзеркальной фокусирующей системы РАТАН-600 с перископическим плоским зеркалом (режим "Юг+Плоский"), при котором круговое зеркало устанавливается вертикально на высоту $H = 0°$.

На рис.6(а) приведена также аберрационная кривая (3) радиотелескопа РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп" для некоторой фиксированной высоты источника, на которую рассчитывалась данная система, и горизонтального размера апертуры 100 м. Вид аберрационной кривой в этом режиме сохраняется с изменением высоты источника в диапазоне углов $0° \div 90°$, при условии, что высота наблюдаемого источника и высота, на которую произведена фокусировка антенны, совпадают.

Режим "радио-Шмидт телескоп" может быть осуществлен с помощью придания перископическому зеркалу необходимой кривизны для коррекции волнового фронта (Majorova, Khaikin, 1999). Наибольший размер безаберрационной зоны и наименьшая кривизна поля в фокальной плоскости достигается в частном случае "радио-Шмидт телескопа", когда фокус системы располагается вблизи корректирующего зеркала. Такая система в оптике носит название укороченный Шмидт-телескоп или телескоп Райта. На РАТАН-600 этот режим реализуется при помещении вторичного зеркала вблизи перископического отражателя, осуществляющего коррекцию волнового фронта.

Как видно из рис.6(а), аберрационная кривая в режиме "радио-Шмидт телескоп" практически совпадает с аберрационными кривыми в режиме двухзеркальной фокусирующей системы на высоких углах, поэтому максимальное число элементов решетки в этом режиме на волне 10 мм так же может достигать 500 элементов. Преимуществом "радио-Шмидт телескопа" является то, что он позволяет использовать широкую безаберрационную зону не только вблизи зенита , но и на любом другом угле в диапазоне углов $0° \div 90°$. Недостатком является сокращение апертуры и ограниченность диапазона углов наблюдений при заданной фокусировке антенны. (Majorova, Khaikin, 1999).

Следует отметить, что сокращение апертуры приводит к увеличению безаберрационной зоны и в обычном режиме работы радиотелескопа, что особенно важно на низких углах, но не так значительно как в режиме "радио-Шмидт телескоп". Для сравнения на рис.6(а) показана аберрационная кривая в режиме двухзеркальной фокусирующей системы на волне 10 мм для апертуры 100 м и $H = 0°$ (кривая 4). Видно, что при одинаковом размере апертур и углов наблюдений безаберрационная зона в этом режиме значительно уже, чем в режиме "радио-Шмидт телескоп".

4. Двух- и трехмерные решетки в фокусе РАТАН-600.

Остановимся на некоторых особенностях формирования диаграммы направленности РАТАН-600 в режиме двухзеркальной фокусирующей системы. Отметим, что приведенные на рис. 2, 3, 4 ДН рассчитывались в приближении бесконечно малого вертикального размера отражающего элемента главного зеркала (щита). Его влияние при рассматриваемых поперечных выносах первичного облучателя из фокуса на высотах, близких к 90^{circ}, незначительно. В работе (Есепкина и др., 1961) показано, что с учетом конечного вертикального размера отражающего элемента, ДН РАТАН-600 можно представить как произведение двух диаграмм: ДН фокусирующей системы в виде бесконечно тонкой дуги в плоскости раскрыва и ДН отдельного щита. Иначе, диаграмма направленности РАТАН-600 есть ДН фокусирующей системы, на которую наложена огибающая щита. Ширина главного лепестка вертикальной ДН фокусирующей системы определяется размером стрелки хорды, стягивающей концы горизонтального раскрыва кругового отражателя, ширина огибающей - вертикальным размером щита с учетом его облучения в вертикальной плоскости. На высотах, близких к 90°, полуширина главного лепестка вертикальной ДН фокусирующей системы на порядок меньше полуширины ДН щита. По мере уменьшения высоты источника, ширина ДН фокусирующей системы увеличивается, приближаясь на низких углах к ДН щита. При $H = 0°$ вертикальная ДН радиотелескопа совпадает с вертикальной ДН отражающего элемента.

В режиме трехзеркальной фокусирующей системы "Юг+Плоский" вертикальная диаграмма направленности РАТАН-600 совпадает с вертикальной ДН щита для любых высот наблюдаемого источника в диапазоне $0° \div 90°$.

Для оценки возможности использования двух- и трехмерных решеток в фокальной области РАТАН-600 были проведены рассчеты вертикальной ДН отражающего элемента при произвольном выносе первичного облучателя из фокуса F в плоскости А (рис.1(a)). При расчетах были использованы программы А.Н.Коржавина, которые учитывают все геометрические особенности вторичного зеркала и позволяют рассчитывать распределение поля на его раскрыве, исходя из ДН первичного облучателя (Коржавин, 1979).

Кривыми $1 \div 9$ на рис.7(a) показаны вертикальные ДН щита на волне 10 мм при выносе первичного облучателя из фокуса на $\Delta f = 5$ мм и помещении его в точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 (рис.7(b)). Точки 2 и 6 соответствуют выносам облучателя вдоль направления $\theta = 50°$, точки 4 и 8 - выносам, перпендикулярным этому направлению. При расчете задавались ДН первичных облучателей и реальные размеры фокусирующей системы РАТАН-600. Предполагалось, что в каждом из рассматриваемых положений максимум ДН первичного облучателя составляет с горизонтом угол $\theta = 50°$. В этом случае обеспечивается оптимальное облучение вторичного зеркала.

Кривые $1 \div 9$ на рис.7(a) являются огибающими ДН радиотелескопа в режиме двухзеркальной фокусирующей системы при Н $\neq 0°$. Там же жирной линией (0) показана вертикальная ДН фокусирующей системы при $H = 85°$. Очевидно, что, если максимумы ДН щита и ДН фокусирующей системы сильно разнесены, будет иметь место резкое падение сигнала. Чтобы этого не происходило, расположение элементов двухмерной решетки в вертикальной плоскости необходимо осуществлять вдоль направления $\theta = 50°$ (точки 2, 1, 6 на рис.7(b)). Но именно этот случай практически нереализуем из-за затенения облучателей друг другом в направлении облучения. Поэтому в режиме двухзеркальной фокусирующей системы при Н $\neq 0°$ использование двухмерной решетки не представляется возможным. В дальнейшем при исследовании конфигурации и размеров

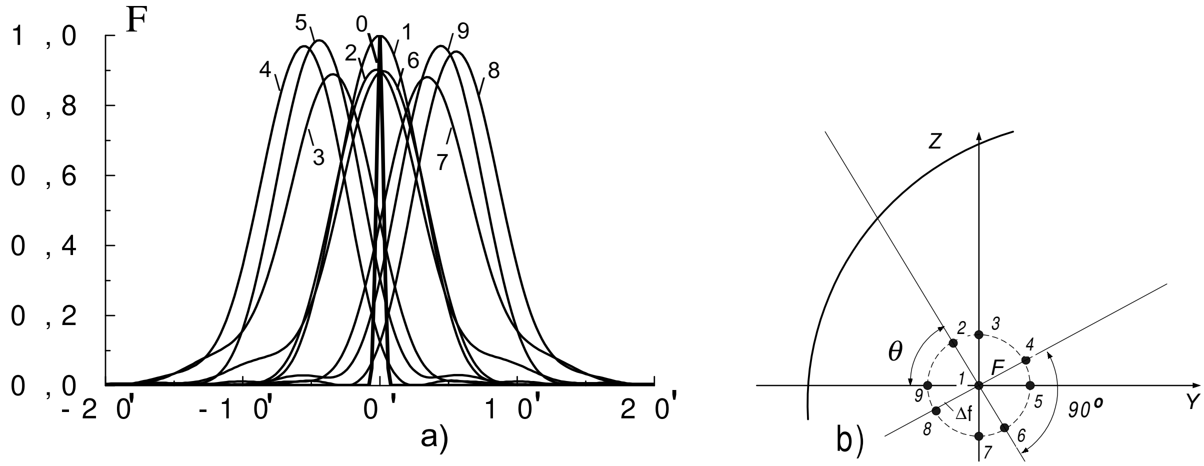

Рис. 7. Вертикальные ДН щита ($1 \div 9$) на волне 10 мм при расположении первичного облучателя на фиксированном расстоянии от фокуса и ДН фокусирующей системы (0) для $H = 85°$ - (a). Схема расположения облучателей в вертикальном сечении вторичного зеркала в точках $1 \div 9$ (b).

двухмерной решетки мы будем рассматривать режим трехзеркальной антенной системы РАТАН-600, для которого вертикальная ДН фокусирующей системы совпадает с ДН щита.

Из кривых, приведенных на рис.7(a), видно, что с точки зрения получения максимального сигнала предпочтительным является расположение элементов решетки вдоль оси Y или вдоль направления, перпендикулярного направлению $\theta = 50°$. При этом максимум излучения отдельных элементов решетки должен составлять с горизонтом 50°. В случае, когда первичными излучателями являются рупора или открытые концы волноводов задать это направление не составляет труда в обоих указанных выше случаях. Для плоской решетки, представляющей собой матрицу горизонтально ориентированных полосковых облучателей, максимумы излучения которых перпендикулярны плоскости решетки, расположение элементов вдоль оси Y не предствляется возможным, так как практически вся энергия в этом случае будет уходить мимо поверхности вторичного зеркала. Наиболее оптимальным для такой решетки является расположение излучателей в плоскости, перпендикулярной направлению $\theta = 50°$. Как показали расчеты, отклонение от этого направления не должно превышать $\pm 5°$.

Следующим шагом наших исследований было рассмотрение трехмерной решетки, составленной из линеек полосковых излучателей. Эти линейки параллельны фокальной линии вторичного зеркала и сдвинуты друг относительно друга в вертикальной плоскости на величину h, расстояние между излучателями в линейках задается параметром l (рис.8). Назовем такую конструкцию "террасной".

Рассчитаем зависимости максимума ДН антенны F_{max} в режиме "Юг+Плоский" от расстояний h и l. Они показывают (рис.9), что для каждого из рассматриваемых значений параметра l существует оптимальное значение параметра h_{opt}, при котором $F_{max}(h)$ имеет максимальное значение. h_{opt} не равно нулю и, следовательно, расположение излучателей в одной плоскости не является оптимальным. Как видно из рис.9, для практически реализуемых расстояний между элементами решетки $l = 0.6 \div 0.7\lambda$ (6-7

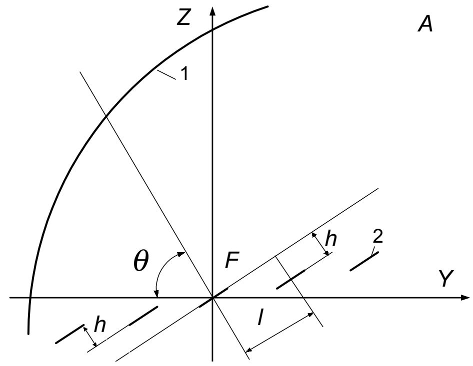

Рис. 8. Схема "террасного" расположения первичных излучателей в фокальной области вторичного зеркала РАТАН-600 (вертикальное сечение). 1 - параболическое зеркало, 2 - линейки первичных излучателей.

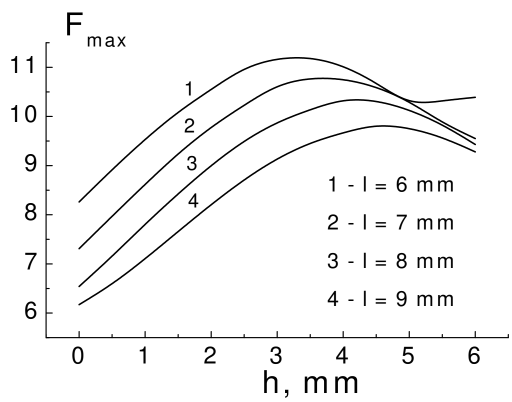

Рис. 9. Зависимости максимума ДН радиотелескопа РАТАН-600 в режиме "Юг+Плоский" с "террасной" решеткой в его фокальной области от параметров решетки l и h.

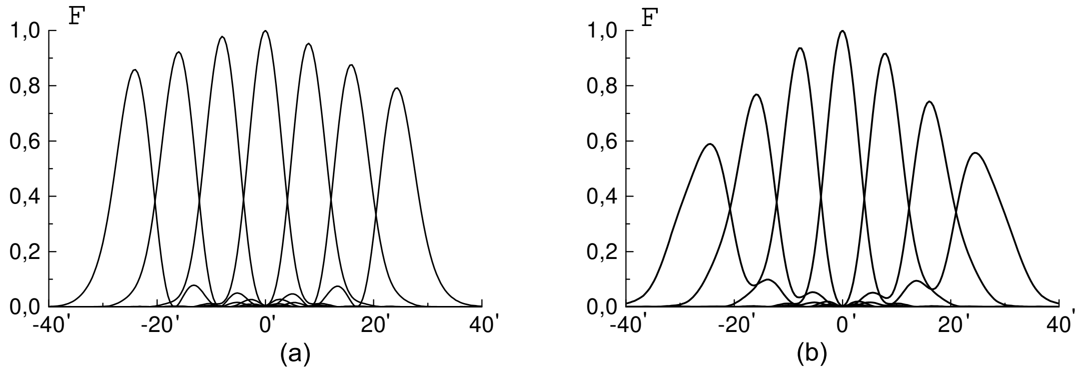

Рис. 10. Вертикальные ДН радиотелескопа РАТАН-600 в режиме "Юг+Плоский" на волне 10 мм при размещении в его фокальной области приемной решетки "террасной" (a) и плоской (b) конструкции.

мм для волны 10 мм) оптимальный сдвиг линеек в решетке равен $h = 0.3 \div 0.4\lambda$ (3-4 мм). Далее при расчетах мы будем полагать h=3 мм, как наиболее оптимальный, однако практически пока удается реализовать сдвиг между линейками 4-5 мм при расстояниях между элементами 7-8 мм (Khaikin et al.,2000).

На рис.10 приведены вертикальные ДН радиотелескопа РАТАН-600 в режиме "Юг+Плоский" в центральном сечении на волне 10 мм при размещении в его фокальной области приемной решетки "террасной" конструкции с параметрами (l = 7 мм, h = 3 мм) - (a) и при использовании плоской конструкции решетки (l=7 мм, h=0 мм) - (b). Плоскость последней располагается перпендикулярно направлению $\theta = 50°$. Хорошо видно, что при использовании "террасной" конструкции снижение максимумов ДН отдельных лучей меньше, чем в плоской конструкции. При одних и тех же расстояниях между элементами и их количестве ($N = 7$) падение сигнала в крайних элементах решетки составляет в случае плоской конструкции около 40%, в то време как для "террасной" решетки - не более 15% .

Примеры "террасной" конструкции приемной решетки с микрополосковыми излучателями и приемниками на микрочипах (MMIC) показаны на рис.11. Такая конструкция не только проще в реализации, но и оказывается более оптимальной по энергетическим характеристикам. Взаимное влияние элементов в "террасной" конструкции снижается по сравнению с плоской решеткой (Khaikin et al., 2000).

Оптимальное число линеек в приемной решетке "террасной" конструкции для РАТАН- 600 составляет 7-8. В режиме трехзеркальной фокусрующей системы независимо от высоты источника и в режиме двухзеркальной фокусиующей системы на высотах, близких к 0° , с учетом аберрационной кривой 1 на рис.5, вдоль фокальной линии РАТАН-600 в каждой из линеек можно разместить не более 10 элементов. Таким образом в этих режимах работы радиотелескопа можно осуществить многолучевой режим наблюдений с двумерной решеткой "террасной" конструкции с общим числом приемных элементов около 70.

В режиме "радио-Шмидт телескоп", где безаберрационная зона существенно больше (кривая 3 на рис.6), количество элементов в двухмерной решетке может достигать 3000. Наблюдения можно проводить на любой фиксированной высоте источника, при условии, что она совпадает с высотой, на которую расчитан "радио-Шмидт", при размере

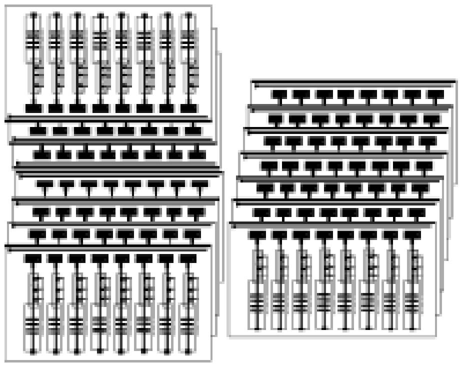

Рис. 11. Примеры "террасной" конструкции многоэлементной приемной решетки с микрополосковыми излучателями.

апертуры антенны не более 150 м.

Реализация системы сбора для решетки с таким количеством элементов представляется достаточно сложной, но выполнимой задачей. Один из вариантов 16-ти канальной системы сбора на сигнальном процессоре для многоэлементной решетки предложен в работе (Esepkina et al.,2000).

В заключении отметим, что результаты, полученные для РАТАН-600, могут быть распространены на более общий случай радиотелескопов с несимметричным облучением, для которых "террасная" конструкция фокальной решетки также будет предпочтительнее.

5. Многоэлементная решетка в фокусе параболоида.

Рассмотрим теперь случай параболического радиотелескопа с симметричным облучением. Для создания многолучевого режима работы параболического радиотелескопа в его фокальной плоскости размещают матрицу первичных облучателей. Из фокусирующих свойств параболоида вращения следует, что оптимальным является такое размещение первичных облучателей, при котором их фазовые центры лежат в одной плоскости. Однако, построение плоской полосковой решетки сопряжено с конструктивными сложностями (Khaikin et al., 2000). Поэтому рассмотрим возможность "террасного" построения приемной полосковой решетки применительно к параболоидам.

Рассчитаем ДН параболической антенны при произвольном выносе первичного облучателя из фокуса $\Delta f = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ (рис.12).

Выражение для ДН имеет вид:

$$F(\theta, \delta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} E(R/R_0) e^{j\beta R \sin\theta \cos(\delta - \varphi) + j\beta\Phi} \, R \, dR \, d\varphi \tag{1}$$

где $\Phi = \rho_{cm} - \rho = \sqrt{(\rho\cos\psi + \Delta y)^2 + (\rho\sin\psi - \Delta x)^2}$, θ, δ - координаты точки приема, Δx - вынос из фокуса по оси X, Δy - вынос из фокуса по оси Y, $E(R/R_0)$ - распределение поля на апертуре антенны.

Учитывая осевую симметрию параболоида, ограничимся рассмотрением ДН в одном из его радиальных сечений $X0Y$, при $\delta = 0$. Расчет ДН проводился методом численного интегрирования. Распределение поля в раскрыве задавалось законом $E(R/R_0) = 1 -$

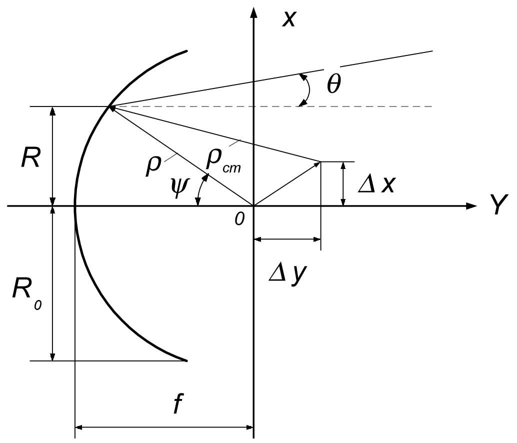

Рис. 12. Схема параболоида.

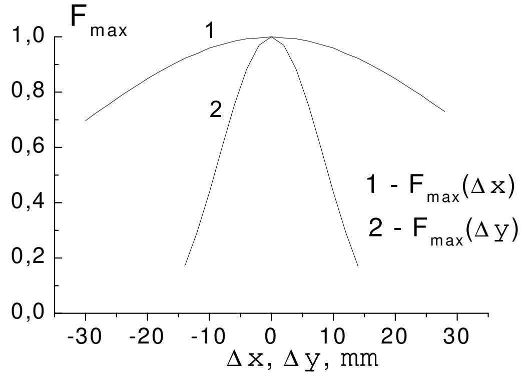

Рис. 13. Аберрационные кривые для параболоида вращения с f/D=0.4 на волне 10 мм при выносе первичного облучателя из фокуса в поперечном (1) и продольном (2) направлениях.

$(R/R_0)^2$. Отношение f/D =0.4, λ =10 мм.

На рис.13 показаны аберрационные кривые для параболоида вращения при выносе первичного облучателя из фокуса в продольном (по оси Y) и в поперечном (по оси X) направлениях. Кривые характеризуют появление квадратичной и кубической ошибок при выносах облучателя в направления Y и X соответственно.

На рис.14 приведены примеры "террасного" построения решетки, которые учитывают осевую симметрию параболоида (круговой вариант). Показано расположение излучателей в одном из радиальных сечений параболоида (a) - плоскости, проходящей через радиус круга, каковым является раскрыв параболоида и его ось симметрии и в фронтальном сечении - плоскости, перпендикулярной оси параболоида (b). При такой конструкции излучатели располагаются по кольцам, сдвинутым друг относительно друга в глубину на величину h. Показано расположение как четного, так и нечетного количества излучателей в радиальном сечении параболоида.

На рис.15 показаны ДН параболической антенны, в фокальной области которой размещены полосковые излучатели, образующие "террасную" решетку в ее круговом варианте (рис.14). N - число элементов решетки в каждом из радиальых сечений. Диаграммы направленности рассчитывались для размеров h=3.1 мм и l=5.3 мм, являющихся наибо-

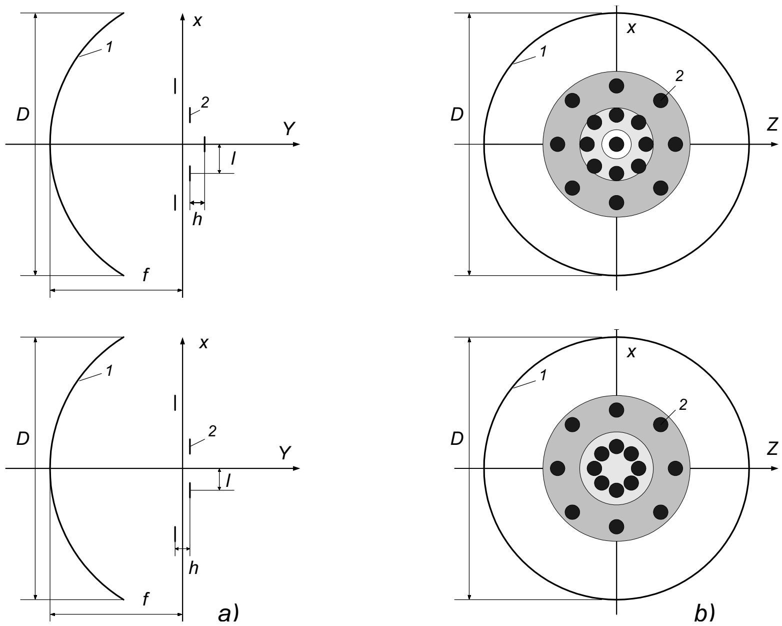

Рис. 14. Схема "террасного" построения решетки в фокальной области параболоида (круговой вариант) a) - в радиальном сечении, b) - в фронтальном сечении. 1 - параболоид, 2 - первичные излучатели.

лее оптимальными. Положение решетки как жесткой конструкции относительно фокуса параболоида оптимизировалось в каждом из рассматриваемых случаев таким образом, чтобы аберрации были минимальны при заданных h и l.

Как видно из рисунков, использование "террасной" конструкции при создании решетки не только возможно, но для случаев $N{=}3,4$ позволяет получить некоторые преимущества перед обычной плоской конструкцией. При N=3, 4 достигается одинаковый уровень сигнала во всех лучах диаграммы направленности параболоида, чего нельзя добиться при плоской конструкции решетки. При использовании последней изменение максимумов отдельных лучей ДН будет происходить в соответствии с аберрационной кривой 1 на рис.13.

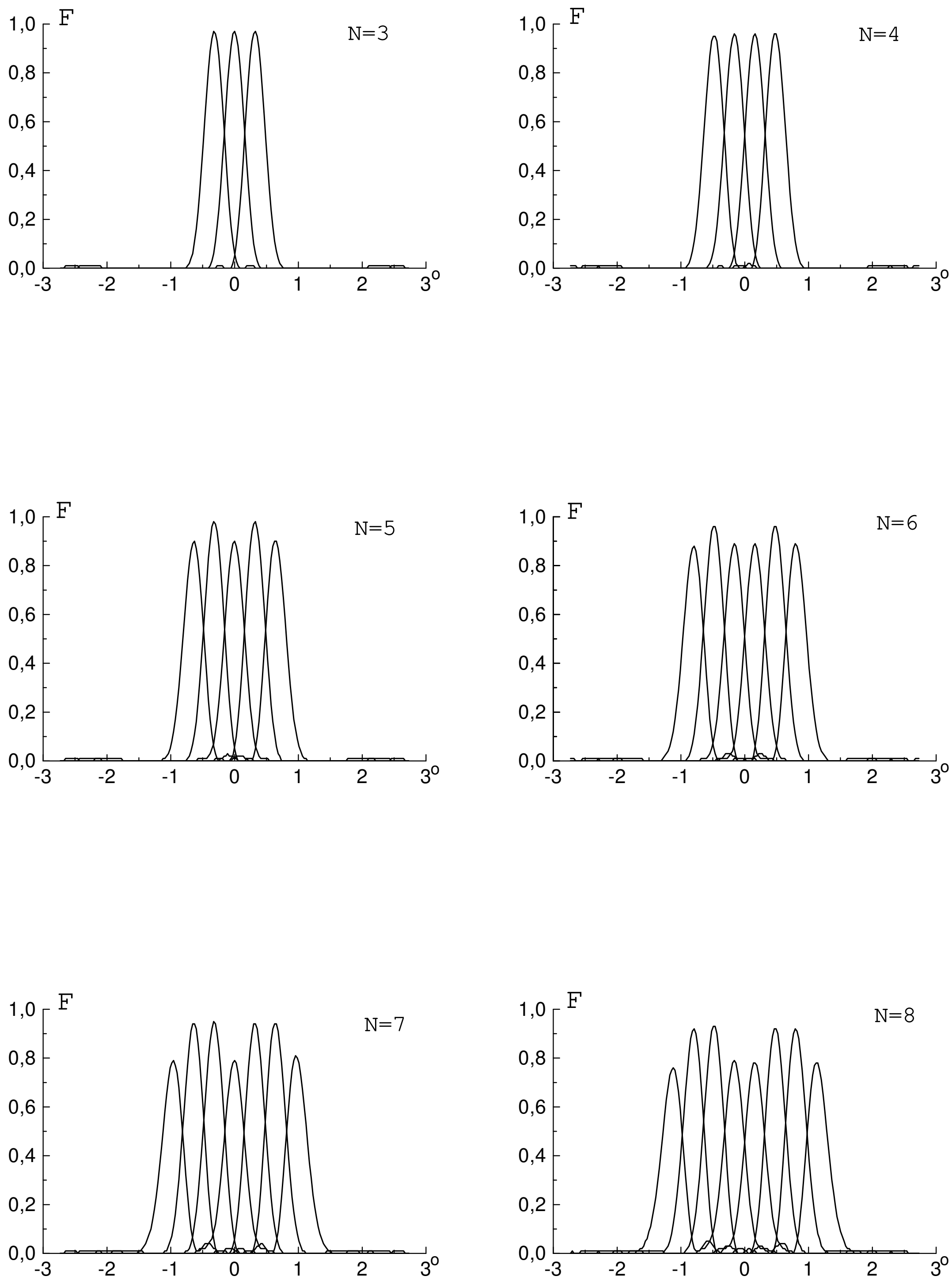

Рис. 15. ДН параболического радиотелескопа на волне 10 мм при расположении в его фокальной области решетки "террасной" конструкции (круговой вариант) N - число элементов в радиальном сечении.

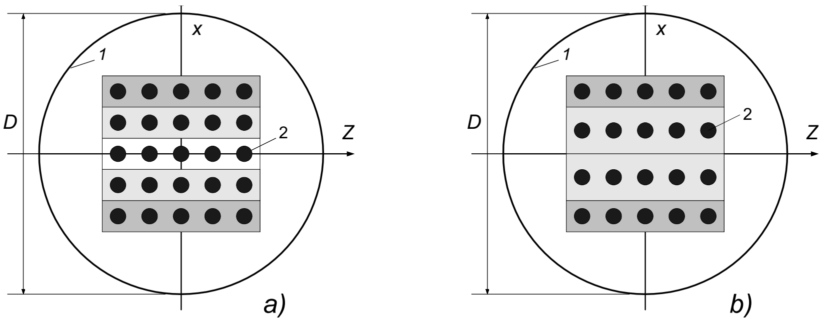

Рис. 16. Схема "террасного" построения решетки в фокальной области параболоида (прямоугольные варианты). 1 - параболоид, 2 - первичные излучатели.

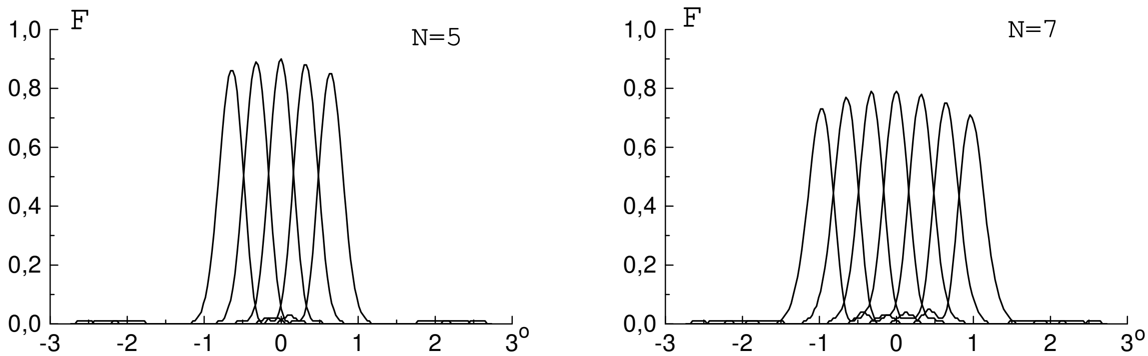

Рис. 17. ДН параболического радиотелескопа на волне 10 мм в плоскости $Y0Z$ при расположении в его фокальной области решетки "террасной" конструкции (прямоугольный вариант).

Кроме осесимметричного построения решетки, возможны конструкции, показанные на рис.16 (прямоугольный вариант). В плоскости $X0Y$ линейки излучателей сдвинуты на величину h, и положение излучателей в этой плоскости такое же, как на рис.14(а). ДН в этом сечении будут совпадать с диаграммами осесимметричной рашетки в ее радиальном сечении (рис.15): для нечетного количества элементов N - полностью, для четного - с точностью до нескольких процентов. В плоскости (YOZ) вид многолучевой ДН параболоида изменится (рис.17). Максимумы ДН отдельных лучей будут монотонно уменьшаться по мере удаления излучателей от фокуса радиотелескопа.

Таким образом "террасная" конструкция решетки вполне применима для параболоидов и в некоторых случаях даже имеет определенные преимущества перед плоской решеткой. Осесимметричные круговые конструкции с числом элементов 7х7 или 8х8, показанные на рис.14, могут быть использованы в фокальной области параболических зеркал в диапазоне до 30 Ггц.

6. Некоторые радиоастрономические применения многоэлементной фокальной решетки.

Многоэлементная решетка в фокусе радиотелескопа может быть использована для широкого круга радиоастрономических задач. Применение фокальных решеток является неизбежным для существующих и будущих радиотелескопов при высокочувствительных или высокоскоростных обзорах(Parijskij et al., 1998).

На РАТАН-600 таким способом можно существенно увеличить интегральную чувствительность, расширить поле зрения и эффективно бороться с атмосферными флуктуациями при исследовании анизотропии микроволнового фона на субградусных масштабах. Эффективность использования фокальной решетки для снижения влияния атмосферы в фоновых задачах достигается как значительно возрастающим объемом регистрируемой информации в периоды "хорошей" атмосферы, так и дополнительными возможностями чистки атмосферных помех в периоды "плохой" атмосферы.

Поиск эффекта Сюняева-Зельдовича с высоким пространственным разрешением и высокой чувствительностью по яркостной температуре возможен на РАТАН-600 в многолучевом режиме даже при сокращенной апертуре антенны. В случае реализации средней флуктуационной чувствительности одного приемного канала на уровне 5-10 МК (что достижимо сегодня с "теплыми" малошумящими усилителями на базе MMIC технологий) интегральная чувствительность радиотелескопа с многоэлементной фокальной решеткой возрастет более, чем на порядок.

Использование многоэлементной приемной фокальной решетки существенно повысит эффективность РАТАН-600 и других радиотелескопов при исследовании быстропеременных космических обьектов таких как пульсары и Солнце. На рис.18 показано Солнце с короной в поле зрения РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп" на волне 1 см с фокальной решеткой 7x170 элементов (слева) и в поле зрения 12-м параболического зеркала с решеткой 8x8 элементов на волне 2 см (справа). Столь широкое поле зрения с высоким пространственным и временным разрешением даст принципиально новые возможности при исследовании вспышек, микровсплесков и других быстрых, но достаточно редких событий на Солнце.

Пространственное разрешение, достигаемое при использовании фокальной решетки, может быть больше HPBW как за счет повышения отношения сигнал/шум, так и за счет одновременного анализа сигнала от источника в различных каналах. Соответствующая методика для наблюдений вспышек на Солнце была разработана в работе (Herrmann R. et al., 1992).

Еще одно возможное применение фокальных решеток - голографический контроль поверхности радиотелескопа. Так 8x8 элементная приемная решетка значительно сократит время, необходимое для измерения и последующей голографической коррекции ошибок поверхности по сильному космическому источнику или сигналу спутника.Это даст мощный толчок развитию методов "адаптивной оптики" на радиотелескопе РАТАН-600, включая коррекцию волнового фронта.

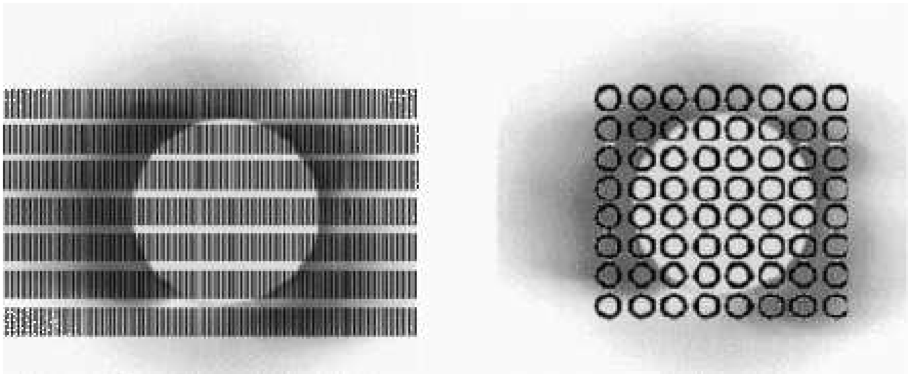

Рис. 18. Солнце с короной в поле зрения РАТАН-600 в режиме "радио-Шмидт телескоп" на волне 1 см с фокальной решеткой 7x170 элементов (слева) и в поле зрения 12-м параболического зеркала с решеткой 8x8 элементов на волне 2 см (справа).

7. Заключение.

Проведенные исследования показали, что решетки с микрополосковыми излучателями могут эффективно использоваться для реализации многолучевого режима работы радиотелескопов различной конструкции.

Для радиотелескопа РАТАН-600 возможно использование как одномерной, так и двух- и трехмерных фокальных решеток. Первый вариант, в виде линейки полосковых излучателей, расположенных вдоль фокальной линии вторичного зеркала, наиболее эффективен при наблюдениях околозенитных источников, а также в режиме "радио-Шмидт телескоп" (при произвольной фиксированной высоте наблюдаемого источника). Число элементов такой решетки на волне 10 мм может достигать 500 элементов.

Двух- и трехмерный варианты решеток могут быть реализованы в режиме трехзеркальной фокусирующей системы РАТАН-600 (режим "Юг+Плоский") на высотах от 0° до 90° и в режиме двухзеркальной фокусирующей системы при $H = 0°$. Максимальное число элементов в такой решетке на волне 10 мм может достигать 70. Использование двухмерной решетки в режиме "радио-Шмидт телескоп" позволит увеличить количество элементов до 3000, но при сокращенной горизонтальной апертуре антенны.

Рассмотрена возможность неплоского расположения полосковых излучателей в фокальной области радиотелескопа. Предложена "террасная " конструкция фокальной решетки для облучения вторичного зеркала РАТАН-600 и оптимизированы ее параметры. Расчеты показали, что использование решеток "террасной" конструкции в фокальной области несимметричных облучателей, каковым является вторичное зеркало РАТАН-600, более эффективно по энергетическим характеристикам, кроме того они проще в реализации по сравнению с плоскими конструкциями, когда в качестве элементов решетки используются горизонтально ориентированные полосковые излучатели.

Результаты расчетов, выполненных в настоящей работе, были использованы при проектировании и изготовлении действующего макета "террасной" решетки (Khaikin et al., 2000). Такие многоэлементные приемные решетки могут быть применены и на других радиотелескопах с несимметричным облучением.

Для радиотелескопов, представляющих собой параболоиды вращения, решетки "террасной" конструкции также применимы. Осесимметричные конструкции таких решеток с числом элементов 8x8 могут быть использованы в фокальной области параболических зеркал в диапазоне до 30 Ггц. При числе элементов 3х3 и 4х4 они имеют некоторое преимущество перед решетками, все элементы которых располагаются в одной плоскости, поскольку "террасное" расположение элементов позволяет получить многолучевую ДН с одинаковым уровнем сигнала во всех лучах.

Список литературы

Payne J.M., 1988, Rec.sci.instrum, 59, 9, 1911

Sutton E.C.,1984, Astrophys.J.Lett.,283, 2, 41.

Bird T., 1994, IEEE Antennas & Propagation Society Symp., Seattle, June, 1994.

Erickson N.K., Goldsmith P.F., Novak G.,Viscuso P.J. Erickson R.B. and Predmore, 1992, IEEE Trans., Microwave Theory Tech., MTT-40, 1.

Pinchuk G.A., Majorova E.K. and et al., 1995, Proceedings of NRAO workshop, A.S.P. conference series,v.75

Berlin A.B. et al., 2000, Transaction of A&Ap., in press

Khaikin V.B., Majorova E.K., Shifman R.G., Parnes M.D. et al., 1998, Proceedings of 2-nd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, Espoo, Finland, 1998,

Smits F.M., Smolders A.B., 1998, Proceedings of XXI Antenna Workshop on Antenna Array technologies, ESA IESTEC, Noordwijn.

Хайкин С.э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н., Есепкина Н.А., 1972, Изв.САО, 1988, 3.

Кайдановский Н.Л., 1980, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 12, 103.

Коржавин А.Н., 1979, Астрофиз. Исслед. (Изв САО), 11, 170.

Есепкина Н.А., Бахвалов Н.С., Васильев Б.А., Васильева Л.Г., Водоватов И.А., Темирова А.В., 1980, Астрофиз. Исслед. (Изв САО) 12, 106.

Есепкина Н.А., Бахвалов Н.С., Васильев Б.А., Васильева Л.Г., Темирова А.В., 1982, Астрофиз. Исслед. (Изв САО) 15, 151.

Majorova E.K., Khaikin V.B., 1999, Astrofiz. Issled. (Izv.SAO), 48, 133.

Есепкина Н.А., Кайдановский Н.Л,, Кузнецов Б.Г., Кузнецова Г.В., Хайкин С.Э. 1961, Радиотехника и электроника, т.VI, 12, 1947.

Khaikin V.B., Majorova E.K., Parijskij Yu.N., Parnes M.D. et al., 2000, Proceedings of international conference "Perspective on radioastronomy: technologies for large antenna arrays", Dwingeloo, the Netherlands, April,1999, in press

Esepkina N.A., Kruglov S.K. et al., 2000, Transaction of A&Ap., in press

Parijskij Yu.N. et al., 1998, "Park Ages" of the Universe. NATO ASI series, 511, 433.

Herrmann R., Magun A., Costa J.,Correia E., Kaufman P., 1992, Solar Physics, 142, 157.