

Матричные системы многолучевого приема электромагнитных волн субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов (современное состояние и тенденции развития)

И. И. Еру

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: eru@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 23 июня 2006 г.

Проведен анализ современного состояния и тенденций развития малошумящих приемных матричных систем, предназначенных для использования в режиме многолучевого приема на длинах волн $1 \text{ мм} \div 1 \text{ мкм}$, и рассмотрены их основные особенности.

Введение

В последнее время при создании приемных систем, работающих на длинах волн короче 1 мм , а особенно короче 100 мкм , все больший интерес проявляется к системам, предназначенным для работы в режиме многолучевого приема [1]. Это новое направление наиболее перспективно применительно к радиоастрономическим системам, предназначенным для получения изображений, карт радиоизотопов очень слабых протяженных источников космического излучения с угловыми размерами до нескольких градусов. В то же время дифракционные пределы углового разрешения зеркальных антенных систем современных радиотелескопов средних размеров даже в миллиметровом диапазоне (не говоря о более коротких волнах) не превышают нескольких десятков угловых секунд.

При радиоастрономических исследованиях требуемое время наблюдения космического источника излучения (время накопления принимаемого от него сигнала) определяется уровнем чувствительности радиотелескопа и пропорционально эквивалентной температуре шумов. Последние складываются из шумов излучения атмосферы,

шумов антенной системы радиотелескопа, включая прием антенным облучателем излучения, минующего зеркало антенны, различных диссипативных потерь и, наконец, шумов собственно приемника. У современных радиотелескопов вклад последней компоненты достаточно мал благодаря достигнутому высокому уровню чувствительности используемых в них приемников (особенно СИС-приемников). В этих условиях картографирование слабых протяженных источников космического излучения путем последовательного сканирования по всей их площади одним очень узким лучом значительно ограничивает возможности сколь-нибудь заметного ускорения такого сканирования посредством сокращения времени накопления принимаемого сигнала. А это неизбежно приводит к неприемлемо длительному времени наблюдения протяженных источников для получения их изображения. В то же время искусственное расширение “угла зрения” антенной системы радиотелескопа ведет к ухудшению ее углового разрешения и снижению качества получаемого изображения источника. В связи с настоятельной необходимостью найти приемлемое решение задачи получения изображений очень

слабых протяженных источников космического излучения в разумно короткое время возникла идея многолучевого приема.

Основные особенности систем многолучевого приема

Суть предложенной идеи заключается в следующем. В фокальной плоскости зеркальной антенной системы радиотелескопа располагается не один приемник, как это делалось до сих пор, а целая матрица (одномерная или, в подавляющем большинстве случаев, двумерная), содержащая n отдельных приемников того или иного типа, каждый со своим антенным облучателем. При этом предполагается, что полное “поле зрения” такой матричной приемной системы с общей зеркальной антенной перекрывает всю площадь исследуемого протяженного источника излучения. Как нетрудно понять, у такой матричной структуры каждому отдельному направлению в пределах ее полного “поля зрения” однозначно соответствует “свой” луч одного из составляющих ее приемных элементов. Этот луч и фиксирует уровень излучения данного участка наблюдаемого протяженного источника излучения. Таким образом, в рассматриваемой схеме осуществляется одновременное измерение излучения, приходящего к отдельным приемникам матрицы, и последующий синтез общей картины. В этих условиях, очевидно, открывается возможность сокращения, соответственно в n раз по сравнению с обычной однолучевой сканирующей структурой, времени получения изображения такого протяженного источника. При этом, что очень важно, удается сохранить неизменным время накопления сигнала каждым отдельным приемным элементом матрицы. Тем самым обеспечивается сохранение неизменной чувствительности всей матричной приемной системы.

Рассмотрим фундаментальные особенности антенной оптики многолучевых приемных систем [2-5].

Сравнительный анализ основных вариантов современной антенной оптики – зеркального парабооида, кассегреновской системы (зеркальный парабоид с контррефлектором) и диэлектрической линзы – позволяет утверждать, что наиболее перспективным из них для реализации многолучевого приема представляется кассегреновская система. И основные ее преимущества с этой точки зрения заключаются в следующем.

1. Кассегреновский фокус антенной системы расположен позади главного зеркала (рис. 1). Такое расположение фокуса позволяет с успехом использовать для выполнения многих функций (поляризационное дуплексирование, ввод излучения гетеродина и т. п.) не обязательно малогабаритные квазиоптические структуры, что особенно важно в длинноволновой части рассматриваемого интервала длин волн, и легко размещать в этом фокусе сами приемные матрицы. К тому же такое расположение кассегреновского фокуса позволяет размещать в нем (не затеняя при этом само главное зеркало) достаточно крупногабаритные криогенно-охлаждаемые приемные системы, что открывает возможность значительного повышения их чувствительности. Здесь возможно также использовать сразу несколько приемных систем, перекрывающих раз-

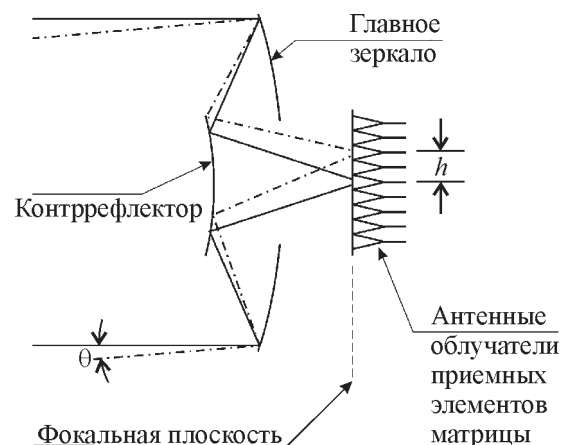


Рис. 1. Принципиальная схема системы многолучевого приема

ные интервалы длин волн, и затем включать в работу, по необходимости, нужные из них с помощью простого переключающего плоского зеркала.

2. Использование кассегреневской схемы позволяет заметно снизить общую шумовую температуру радиотелескопа. Подобная оптическая система рассчитывается обычно таким образом, чтобы лучи, отраженные от периферии вторичного зеркала (контррефлектора), попадали на периферию главного зеркала. Поэтому излучение, проходящее мимо главного зеркала, никак не может попасть в приемник, находящийся в фокусе контррефлектора. Если антенный облучатель приемника сместить в сторону от фокуса контррефлектора (из вторичного, кассегреневского фокуса) картина облучения главного зеркала изменится. В этих условиях становится возможным попадание в смещенный приемник (минуя контррефлектор) некоторой части потока “побочного” излучения. Но при этом в приемник будет поступать излучение от “холодного” неба, а не от заметно нагретой земной поверхности, как это было бы с приемником, расположенным в первичном фокусе главного зеркала. Для приемников с очень низким уровнем собственных шумов это обстоятельство может оказаться весьма существенным.

Однако наиболее существенной, если не самой важной, особенностью кассегреневской антенной системы при ее использовании в радиотелескопах, работающих в режиме многолучевого приема, является следующее [6-10]. В любой такой системе формирование многолучевой диаграммы направленности требует, как уже говорилось, размещения в фокальной плоскости общей зеркальной антенны (там, где собственно и формируется изображение источника излучения) не одного, а целой матрицы приемников. Следовательно, антенные облучатели всех этих приемников (кроме одного, расположенного на оптической оси антенной системы) неизбежно оказываются смещенными в поперечном направлении

на некоторое расстояние h относительно оси антенной системы. Это обстоятельство неизбежно ведет к ряду негативных последствий:

1) Усиливается отрицательная роль различных аберраций. Это нарушает апертурную эффективность облучения смещенным облучателем главного зеркала антенны, что ведет к снижению чувствительности и разрешающей способности всей системы. При этом даже в кассегреневской системе, свободной от сферической аберрации, смещение антенного облучателя на величину h от оси вызывает некоторое усиление комы ($\sim h^1$), астигматизма ($\sim h^2$), кривизны поля ($\sim h^2$), дисторсии ($\sim h^3$).

2) Поперечное смещение антенных облучателей относительно оси антенной системы нарушает ее осевую симметрию. В этих условиях гауссов пучок, формируемый смещенным антенным облучателем, будет падать наклонно на антенное зеркало (что, собственно, и требуется в данном случае). Однако при таком падении гауссового пучка на криволинейную отражающую поверхность в отраженном пучке возникает дисторсия – нарушение круговой осесимметрии структуры поля этого пучка. Анализ этого явления [4] показал, что при этом происходит частичная трансформация падающего осесимметричного пучка в высшие неосесимметричные моды. Суммарный уровень связанных с этим потерь составляет [4]

$$L = 0.375 \operatorname{tg}^2 \theta \left(\frac{w_m}{f} \right)^2,$$

где θ – угол падения гауссового пучка относительно нормали к отражающей поверхности, w_m – радиус гауссова пучка на зеркале, а f – фокусное расстояние отражающего зеркала.

Эти потери ведут к соответствующему снижению коэффициента усиления всей

зеркальной антенной системы. Но здесь следует отметить, что, как видно из приведенных выражений, потери тем ниже, чем больше фокусное расстояние системы.

3) При этом возрастает и общий уровень шума всей антенной системы вследствие увеличения вклада излучения, попадающего в смещенные антенные облучатели, минуя антенные зеркала.

Все вышесказанное обуславливает необходимость очень осторожного и внимательного отношения к вопросу о предельно допустимом поперечном смещении антенных облучателей матричных приемных систем относительно оси симметрии их общей зеркальной антенны [11-13]. Это обстоятельство существенно ограничивает размеры матрицы и, соответственно, предельно допустимое число отдельных приемников в ней.

Таким образом, главным достоинством касегреновской системы является следующая ее особенность. При прочих равных условиях уровень негативного влияния различных aberrаций любой зеркальной антенной системы тем ниже, чем больше значение параметра f/D (f – фокусное расстояние, D – диаметр главного зеркала). У касегреновской системы так называемое эффективное фокусное расстояние $f_{\text{эф}}$ оказывается значительно больше, чем у того же зеркала, но с облучателем в первичном его фокусе. Если у обычной параболической антенны $f/D \cong 0.3 \div 0.4$ то у касегреновской системы значения этого параметра выше, чем на порядок. Это дает возможность существенно снизить уровень различных aberrаций и потерь, поперечные размеры приемной матрицы и, соответственно, число приемных элементов в ней.

Несколько слов об особенностях матричных систем многолучевого приема, прежде всего, об антенных облучателях приемных элементов матрицы.

На самом длинноволновом краю рассматриваемого диапазона (1000 ÷ 300 мкм) в качестве антенных облучателей на входе

приемных элементов матрицы обычно используются различного рода рупоры – двухмодовый, скалярный, диагональный и гладкий конический [14-16]. Наиболее простым в изготовлении является гладкий конический рупор. Однако для него характерно наличие сравнительно больших боковых лепестков в E -плоскости поля излучения. Прекрасными характеристиками обладает скалярный рупор. Но очень сложная в изготовлении ребристая внутренняя поверхность его конической части практически исключает возможность его использования на длинах волн короче 1 мм. Наиболее удачным и по технологии изготовления, и по параметрам излучения представляется двухмодовый рупор, который широко используется сейчас в субмиллиметровом диапазоне. Что касается диагонального рупора, то характеристики его заметно хуже, чем у двухмодового, но его технологически удобно выполнять прямо в корпусе смесителя заодно с волноводным каналом последнего.

Для матриц, составленных из приемных элементов с рупорными облучателями, естественным ограничением на минимальный период приемной решетки становится диаметр раскрытия рупора. Он должен быть таким, чтобы, с одной стороны, обеспечивать достаточно высокую апертурную эффективность облучения всей поверхности главного зеркала антенной системы, а с другой – сохранять при этом достаточно низкий уровень боковых лепестков диаграммы направленности. При этом угловое расстояние между двумя соседними лучами отдельных приемников, составляющих приемную матрицу, обычно сохраняют на уровне не менее двух угловых ширин диаграммы направленности отдельного облучателя. И именно это условие фундаментально ограничивает минимально возможный период расположения элементов в таких матрицах (если, конечно, не учитывать реальный апертурный раскрыт самих облучателей).

На более коротких длинах волн (менее $200 \div 100$ мкм) используют, как правило, различного рода микрополосковые антенные облучатели планарного типа [17-20]. В решетках, составленных из приемников с такими, уже существенно более малогабаритными антенными облучателями, удастся реализовать значительно более плотную их “упаковку”. Минимальный период приемных элементов в таких матрицах ограничивается обычно (при уровне эффективности апертурного облучения антенного зеркала близком к оптимальному) величиной разрешения порядка двух–трех релеевских дифракционных пределов ($1.22\lambda f/D$).

Что касается максимально допустимых поперечных размеров приемной матрицы в целом, то в качестве критерия принято считать такое поперечное смещение крайнего ее облучателя относительно оси антенной системы, при котором обусловленное этим падение эффективного усиления антенной системы не превышает 10 % [21].

Однако здесь необходимо учитывать еще один момент. В обычной касегреновской антенной системе относительно небольшие размеры вторичного зеркала (конструктора) будут ограничивать возможность увеличения поперечных размеров приемной матрицы еще до достижения ими указанного выше предела. Необходимость соответствующего увеличения размеров вторичного зеркала будет вести к росту степени затенения им первичного, главного зеркала. А это, в свою очередь, будет вызывать снижение эффективности облучения апертуры и усиления всей такой антенной системы. В связи с этим сейчас изучаются возможности использования в касегреновских антенных системах с матрицами многолучевого приема внеосевого их варианта, когда “луч зрения” антенной системы оказывается смещенным относительно ее оси и вынесен вообще за пределы контррефлектора. В такой геометрии эффект затенения главного зеркала полностью отсутствует, и поэтому такое направление в разработке систем многолучевого приема может стать очень перспективным.

Основные особенности реализации многолучевых приемных систем

Среди основных особенностей современных методов структурной реализации систем многолучевого приема отметим следующие.

В самой длинноволновой части рассматриваемого диапазона (на длинах волн не короче $300 \div 100$ мкм) матричные приемные системы стремятся реализовать на базе систем когерентного приема. Такие приемные матрицы представляют собой одномерные или двумерные решетки, составленные из небольшого числа (от $3 \div 4$ до $25 \div 30$) приемников гетеродинного типа. Столь относительно небольшое число приемных элементов в матрице ограничивается на этих длинах волн поперечными размерами входных узлов приемников – апертурами антенных облучателей рупорного типа. В подавляющем большинстве случаев такие матрицы формируются из СИС-приемников, обладающих сегодня на этих длинах волн рекордно высокой чувствительностью и очень низким уровнем требуемой гетеродинной мощности [22-25].

Очень важным конструктивным элементом многолучевых систем когерентного приема гетеродинного типа является необходимая здесь специальная дуплексирующая система. Она обеспечивает независимый подвод к каждому отдельному смесителю приемной матрицы, помимо сигнала, принятого соответствующим лучом антенной системы, еще и излучения гетеродина с режекцией его шумов в полосах приема. Последнее особенно существенно при использовании ДБШ-приемников, требующих достаточно высокого уровня мощности гетеродина (порядка 1 мВт).

Для этого в случае ДБШ-матриц используется общая для всей матрицы специальная квазиоптическая дуплексирующая структура (она же осуществляет и режекцию шумов гетеродина), построенная на основе двухлучевого или многолучевого

го интерферометра. С ее помощью излучение от единого, в этом варианте, гетеродина вводится в общий луч (совокупность всех лучей элементов приемной матрицы), идущий от антенны к матрице, и затем доводится до каждого ее приемного элемента – отдельного смесителя [26].

Если приемная матрица выполняется на основе СИС-приемников (требуемая мощность гетеродина у которых на три порядка ниже, чем у ДБШ-приемников), то в этом случае узел дуплексирования может быть конструктивно существенно упрощен. Например, это может быть просто плоское 45° наклонное полупрозрачное зеркало на основе очень тонкой диэлектрической пленки. С помощью такого зеркала гауссов луч от общего гетеродина вводится под прямым углом во всю многолучевую совокупность, принятую общей антенной от отдельных участков протяженного космического источника, и доводится затем до отдельных приемников (смесителей) матрицы. В СИС-варианте при низком уровне требуемой мощности гетеродина режекция шумов гетеродина не нужна.

Сейчас прорабатываются некоторые иные варианты решения этой задачи. Возможно, например, применение специальной квазиоптической мультиплексирующей структуры. В такой структуре при облучении на входе единым гауссовым пучком излучения гетеродина на выходе формируется двумерная решетка (с необходимым числом элементов и соответствующим периодом) из пучков – “изображений” этого входного пучка, при практически неизменной их общей мощности [27]. Сформированная таким образом решетка пучков гетеродинного излучения вводится в матричную решетку смесителей со стороны, противоположной по отношению к пучкам, несущим на входы этих смесителей входные сигналы, принятые антенной системой. Другой рассматриваемой сейчас возможностью решения этой задачи является использование специально сформированной соответствующей активной решетки из от-

дельных источников гетеродинного излучения [28-30]. В этом варианте излучение всех источников вводится в соответствующую матричную решетку смесителей точно так же, как и в предыдущем случае – с “обратной” ее стороны.

Наряду с многолучевыми системами когерентного приема даже на самом краю рассматриваемого диапазона ($\lambda \leq 1$ мм) все шире начинают использоваться многолучевые приемные системы с матрицами, составленными из элементов некогерентного приема (в основном болометрических термоприемников) [31-35]. На длинах волн короче $300 \div 100$ мкм и вплоть до нескольких микрон такие матричные системы некогерентного приема являются сейчас единственным вариантом приемных систем вообще и работающих в режиме многолучевого приема в частности. Болометрические термоприемники на этих длинах волн заметно уступают по своей чувствительности фотоприемным системам. При этом особо следует подчеркнуть, что переход приемных систем на многолучевой режим некогерентного приема происходит тем более интенсивно, чем короче длина волны. Это обусловлено тем, что, как уже говорилось, гетеродинные системы когерентного приема просто не удается реализовать на длинах волн короче $20 \div 15$ мкм. Но особенно существенно здесь то, что поперечные размеры входных узлов (front – end) всех элементов когерентного приема, составляющих матрицу, даже на этих длинах волн все еще недостаточно малы, чтобы обеспечить плотную их “упаковку”. В то же время современная микроэлектронная технология позволяет уже сегодня значительно сократить размеры микрополосковых планарных антенных облучателей чувствительных элементов некогерентного приема и их стоимость. И это открывает широкие возможности для увеличения числа таких элементов в составленных из них приемных матрицах (до 10^6 и даже выше).

Современное состояние разработок многолучевых приемных систем

В целом, ситуация с разработкой матричных систем многолучевого приема для интервала длин волн $1\text{ мм} \div 1\text{ мкм}$ выглядит сегодня следующим образом.

На длинноволновом краю диапазона ($1000 \div 300\text{ мкм}$) уже работают многолучевые системы когерентного приема. При этом в литературе имеются публикации, описывающие разработки ДБШ-приемников, которые позволяют, в принципе, на этой основе формировать матрицы для многолучевого приема с относительно небольшим числом элементов. Так, в работе [36] описан приемник со специальными планарной ДБШ-структурой и рупорным облучателем антенны, который при мощности гетеродина 2.5 мВт и рабочей температуре 300 К обладал в полосе частот $230 \div 280\text{ ГГц}$ шумовой температурой в режиме DSB порядка 1300 К .

На длинноволновом краю рассматриваемого интервала длин волн уже созданы матричные приемные системы на основе приемников некогерентного типа. Так, в работе [37] описана матричная приемная система, содержащая семь болометров, помещенных каждый в свою накопительную камеру, которая на частотах 2-мм диапазона при рабочей температуре 0.3 К обладала эквивалентной мощностью шумов (ЭМШ), не превышающей $1.3 \cdot 10^{-16}\text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$.

Однако в подавляющем большинстве случаев многолучевые приемные системы когерентного приема реализуются сегодня на основе матриц, составленных из СИС-приемников. В качестве примера такой многолучевой приемной системы можно привести структуру, описанную в работе [38]. Конструктивно она оформлена следующим образом. На общей кварцевой подложке толщиной 60 мкм методами микроэлектронной технологии выполнена линейная решетка из 7 планарных СИС-модулей когерентного приема. На входе каждого из них сформирован двумерный

аналог скалярного рупора, формирующего свою диаграмму направленности в E -плоскости. Такая подложка помещается между двумя металлическими пластинами, образующими на входе общий для всех СИС-приемников линейный двумерный рупор, формирующий их диаграмму направленности в H -плоскости. Сложенные вместе 4 такие линейные приемные решетки образуют двумерную приемную 4×7 -матрицу. Эта многолучевая приемная система при гелиевой рабочей температуре на длине волны 860 мкм обладает в DSB-режиме шумовой температурой не выше 220 К . В этом же интервале длин волн (500 мкм) уже работает многолучевая система некогерентного приема с линейной приемной матрицей из 6 термоприемников. Термоприемники выполнены на основе германиевых болометров, помещенных каждый в свою накопительную камеру с согласующим зеркальным конусом Уитстона на входе. При рабочей температуре ниже 1 К ЭМШ этих термоприемников не превышает $10^{-16}\text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$.

На более коротких длинах волн ($200 \div 40\text{ мкм}$) приемные матрицы начинают формировать на основе фотоприемных систем некогерентного приема. В качестве иллюстрации достигнутого здесь уровня можно указать на квадратную 5×5 -матрицу из фотоприемников с накопительными камерами и согласующими конусами Уитстона на входе, которая на длине волны 158 мкм имела ЭМШ порядка $3 \cdot 10^{-15}\text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, а на длине волны 88 мкм значение ЭМШ составляло $7 \cdot 10^{-15}\text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ [31].

В средневолновой части инфракрасного диапазона ($40 \div 5\text{ мкм}$) подготовлена к опробованию матричная решетка, содержащая 256×256 фотоприемников с планарными антенными облучателями.

В ближнем инфракрасном диапазоне ($5 \div 1\text{ мкм}$) уже готовятся к опробованию решетки фотоприемников из 512×512 и 640×640 элементов, в разработке находится матричная система из 1024×1024 фотоприемников.

Если говорить о тенденциях в этой области в целом, то следует отметить, что главное – это быстрый рост (на порядки) числа элементов в приемных матрицах (рис. 2) и одновременное быстрое повышение чувствительности (снижение уровня собственных шумов) таких матричных систем многолучевого приема (рис. 3).

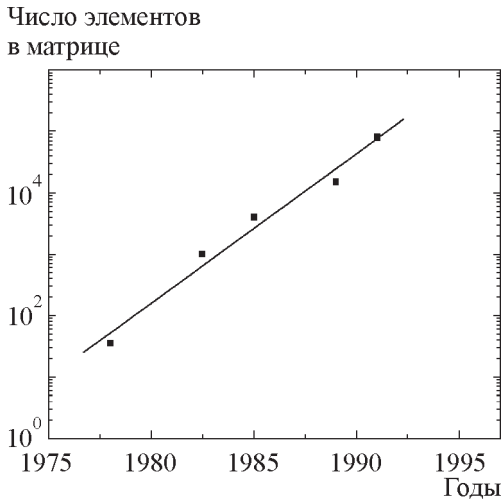


Рис. 2. Темпы роста числа элементов в матричных системах многолучевого приема

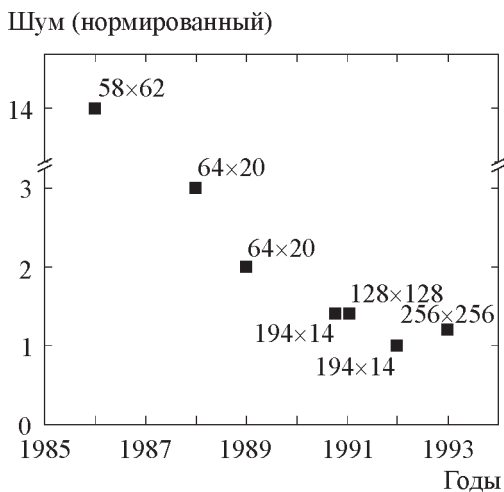


Рис. 3. Темпы роста чувствительности (снижения уровня шумов) матричных систем многолучевого приема. Цифры на рисунке – число приемных элементов в двумерных матрицах

Таким образом, результаты этого краткого анализа достаточно наглядно свидетельствуют о том, что будущее приемных систем в рассматриваемом интервале длин волн (1 мм ÷ 1 мкм), и особенно в коротковолновой его части, будет в значительной мере связано с матричными системами многолучевого, скорее всего некогерентного, приема. В первую очередь это будет касаться радиоастрономии, а также систем радиовидения.

Заключение

В проведенном обзоре кратко проанализирована очень важная особенность современного периода развития малозумящих приемных систем на длинах волн короче 1 мм и вплоть до оптического диапазона. Все шире, особенно в радиоастрономии, начинают применяться системы, работающие в режиме многолучевого приема. Для его реализации в фокальной плоскости общей зеркальной антенной системы (в подавляющем большинстве случаев касегреновского типа) размещаются линейные или, чаще всего, двумерные матрицы приемников как когерентного (пока они реализованы лишь на длинах волн не короче 300 мкм), так и некогерентного типа (практически на всех длинах волн до 1 мкм). Сформированная таким образом многолучевая диаграмма направленности антенной системы открывает возможность реализации режима одновременного приема с различных направлений в пределах общего “угла зрения” такой системы. А это существенно ускоряет (без потери чувствительности!) получение информации о форме и структуре протяженных источников излучения. Сейчас такие многолучевые приемные системы с числом отдельных лучей (приемников) до 10⁶ и даже выше уже успешно опробованы и работают практически во всем рассмотренном интервале длин волн, причем процесс их дальнейшего совершенствования непрерывно продолжается. Очевидно, что переход к таким многоэлементным матричным системам многолучевого приема,

обеспечивающим, без потери их чувствительности, повышенную скорость получения достаточно детальной информации об изображении слабого протяженного источника излучения, свидетельствует о появлении совершенно нового поколения приемных систем.

Литература

1. A. van Ardene. Design considerations for multi-beam receiver millimeter wave radioastronomy // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1987. – Vol. 8, No. 2. – P. 107-118.
2. Fazio G. G. Infrared array detectors in astrophysics // *Infrared Phys. Technol.* – 1994. – Vol. 38, No. 2/3. – P. 107-117.
3. Hannan P. W. Microwave antennas derived from Cassegrain telescope // *IEEE Trans.* – 1961. – Vol. AP-9, No. 3. – P. 140-153.
4. Murphy J. A. Distorsion of simple gaussian beam on reflection from of-axis ellipsoidal mirrors // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1987. – Vol. 8, No. 9. – P. 1165-1188.
5. Murphy J. A., Padman R. Focal-plane and aperture-plane heterodyne array receivers for millimeter wave radioastronomy // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1988. – Vol. 9, No. 8. – P. 667-704.
6. Murphy J. A., Padman R. Radiation pattern of few-moded horns and condensing lightpipes // *Infrared Phys.* – 1991. – Vol. 31, No. 3. – P. 291-300.
7. Payne J. M. Multibeam receiver for millimeter-wave radioastronomy // *Rev. Sci. Instrum.* – 1988. – Vol. 59, No 9. – P. 1911-1919.
8. Lo T. Y. On the beam deviation factor of a parabolic reflector // *IEEE Trans.* – 1960. – Vol. AP-8, No. 4. – P. 347-349.
9. Ruze J. Lateral-feed displacement in a paraboloid // *IEEE Trans.* – 1965. – Vol. AP-13, No. 5. – P. 660-665.
10. Pandm R. Optical fundamentals of array feeds // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 3-26.
11. Serabyn E. Wide-field imaging optics for submm arrays // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 74-81.
12. Yngvesson K. N., Johansson J. F. et al. Realizable feed-element patterns and aperture efficiency in multibeam antenna system // *IEEE Trans.* – 1988. – Vol. AP-36, No. 11. – P. 1637-1640.
13. Rahmat-Smit V., Gramer P. et al. Realizable feed-element patterns for multibeam reflector antennas analysis // *IEEE Trans.* – 1981. – Vol. AP-29, No 6. – P. 961-963.
14. Rutledge D. B., Muhe S. Imaging antenna arrays // *IEEE Trans.* – 1982. – Vol. AP-30, No. 4. – P. 538-540.
15. Johansson J. F. A comparison of some feed types // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 82-89.
16. Haas R. W. Further development of MMW plated feed horn arrays // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 99-105.
17. Haas R. W., Brest D. et al. Fabrication and performance of MMW and SMMW plated horn arrays // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 11. – P. 2289-2293.
18. Tong P. P., Deikirk D. P. et al. Tracking antenna arrays for near millimeter waves // *IEEE Trans.* – 1983. – Vol. AP-31, No. 3. – P. 512-514.
19. Yngvesson K. S., Johansson J. F. et al. A new integrated slot element feed array for multibeam systems // *IEEE Trans.* – 1986. – Vol. AP-34, No. 11. – P. 1372-1376.
20. Kim V. S., Yngvesson K. S. Characterization of tapered slot antenna feeds and feed arrays // *IEEE Trans.* – 1990. – Vol. AP-38, No. 10. – P. 1559-1564.
21. Rebeitz G. M., Kasilingam D. P. et al. Monolithic millimeter wave two-dimensional horn imaging arrays // *IEEE Trans.* – 1990. – Vol. AP-38, No. 9. – P. 1473-1482.
22. Johanson J. F. Fundamental limits for focal-plane array efficiency // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 34-41.
23. Legg T. H., Bell M. B. et al. Design and results for 345 GHz SIS focal plane array using planar technology // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1996. – Vol. 17, No. 1. – P. 79-90.
24. Simson P. A., Dengler R. J. et al. A planar quasi-optical SIS receiver // *IEEE Trans.* – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 609-615.
25. Sunada K., Noguchi et al. A focal planar array receiver for the NRO 45 - m telescope // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 230-237.
26. Erickson N. R., Goldsmith P. F. et al. A 15-element focal array for 100 GHz // *IEEE Trans.* – 1992. – Vol. MTT-40, No. 1. – P. 1-11.
27. Murphy J. A., Withington S. et al. Dammann gratings for local oscillator beam multiplexing // *In: Multi-Feed Systems for Radio Telescopes.* – ASP Conf. Series. – 1995. – Vol. 75. – P. 238-244.
28. Law W. W., Jou C. F. et al. Diode grids for electronic beam steering and frequency multiplication // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1986. – Vol. 7, No. 1. – P. 27-42.

29. Sjorgen L. R., Liu H. L. et al. Electronic and electromagnetic devices for millimeter-wave beam controller array // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 6. – P. 1201-1216.
30. Sjorgen L. R., Liu H. L. et al. Control techniques for millimeter-wave active arrays // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 6. – P. 1175-1189.
31. Stacey G. J., Becman J. W. et al. Stressed and unstressed Ge:Ga detector arrays for airborne astronomy // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1992. – Vol. 13, No. 11. – P. 1689-1707.
32. Uehara K., Miyashita K. et al. Lens-coupled imaging arrays for millimeter and submillimeter region // *IEEE Trans.* – 1992. – Vol. MTT-40, No. 5. – P. 806-811.
33. Kono N., Matsuo H. et al. Seven matched bolometers for millimeter wave observations // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 4. – P. 749-762.
34. Chem S., Yi X. et al. Hybrid integration between long focus microlens array and IR detector array // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2001. – Vol. 22, No. 3. – P. 393-398.
35. Olmi L. Optical designs for large detector arrays on spherical-primary orbital/suborbital telescopes // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2001. – Vol. 22, No. 6. – P. 791-812.
36. Ali-Ahmad W. Y., Bishop W. L. et al. A 250 GHz planar low-noise Schottky receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 4. – P. 737-748.
37. Kuno N., Matsuo H. et al. Seven matched bolometers for millimeter wave observations // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 4. – P. 749-762.
38. Legg T. H., Bell M. B. et al. Designs and results for 345 GHz SIS focal plane array using planar technology // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1996. – Vol. 17, No. 1. – P. 79-90.

Матричні системи багатопроменевого приймання електромагнітних хвиль субміліметрового та інфрачервоного діапазонів (сучасний стан та тенденції розвитку)

I. I. Єру

Проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку малощумлячих приймальних систем, призначених до використання у режимі багатопроменевого приймання на довжинах хвиль 1 мм ÷ 1 мкм, та розглянуто їх головні особливості.

Matrix Multibeam Reception of Submillimeter and Infrared Electromagnetic Waves (the State-of-the-Art and Trends)

I. I. Eru

The state-of-the-art and trends of the low-noise matrix receivers for wavelengths 1 mm ÷ 1 μm are analyzed, their principal features considered.