

Эффективность зеркальных антенн субмиллиметровых радиотелескопов на основе зеркальных систем оптических телескопов

И. И. Еру

Радиоастрономический институт НАН Украины
61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 10 июня 1999 г.

Рассмотрены возможности и особенности использования зеркальных систем больших оптических телескопов в качестве антенных систем радиотелескопов субмиллиметрового диапазона. Главным достоинством таких оптических зеркальных систем в антенных приложениях является высокая оптическая точность выполнения их отражающей поверхности. Определены условия оптимального облучения таких зеркальных систем, обеспечивающие их высокую апертурную эффективность в антенных приложениях в субмиллиметровом диапазоне.

Розглянуто можливості та особливості використання дзеркальних систем великих оптичних телескопів як антенних систем радіотелескопів субміліметрового діапазону. Позитивною відзнакою таких оптичних систем як дзеркальних антен субміліметрового діапазону є висока оптична якість відбиваючої поверхні цих дзеркал. Визначено умови оптимального опромінювання таких дзеркальних систем, що забезпечують їх високу апертурну ефективність як антенних систем субміліметрового діапазону.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития современной радиоастрономии является исследование до сих пор практически неизученного интервала длин волн, расположенного между миллиметровым краем СВЧ диапазона и инфракрасным началом оптического диапазона. Для этого интервала длин волн ($1 \div 0.01$ мм) уже созданы и успешно испытаны высокочувствительные гетеродинные системы когерентного приема [1,2]. Ключевая проблема, ожидающая своего решения, состоит в создании для этого интервала частот больших высокоточных зеркальных антенн (большими зеркальными антеннами принято считать зеркала с диаметром раскрытия не меньше $D=10^4\lambda$). От успешного решения этой задачи в значительной степени зависят возможности дальнейшего развития радиоастрономических исследований в рассматриваемом частотном интервале.

Известно, что форма отражающей поверхности зеркальной антенны должна быть такой, чтобы в ее раскрытии формировалось синфазное распределение поля. От степени синфазности этого распределения существенным образом зависят параметры таких антенн (направленность, коэффициент использования площади антенны (КИП), усиление, угловое разрешение и другие).

В связи с этим очень существенным становится вопрос о точности соответствия отражающей поверхности реальной зеркальной антенны ее расчетной форме. Если отклонения профиля зеркальной антенны от расчетной формы (и связанные с ними фазовые ошибки, нарушающие синфазность распределения поля в раскрытии этой антенны) малы по сравнению с длиной волны, вызываемое этим уменьшение направленности антенны D_a , при достаточно малом радиусе корреляции r_k этих отклонений ($r_k \leq 0.3\lambda$), можно оценить с помощью выражения:

$$\frac{D_a}{D_{a0}} = 1 - \frac{3\pi^2}{4} \frac{r_k^2 \sigma^2}{\lambda^2},$$

где D_{a0} – направленность антенны при идеальной правильной форме отражающей поверхности зеркала; σ^2 – дисперсия фазовых ошибок, обусловленных отклонениями от идеальной формы зеркала [3]. Если же отклонения профиля отражающей поверхности зеркальной антенны от расчетной формы никак не коррелированы между собой и имеют нормальный закон распределения по всей поверхности зеркала, то обусловленное ими снижение направленности такой зеркальной антенны составит:

$$\frac{D_a}{D_{a0}} = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\Delta\rho}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где $\Delta\rho$ – среднеквадратичное отклонение профиля зеркала от расчетной формы [3].

Очевидно, что практически невозможно изготовить отражающую поверхность зеркальной антенны в полном соответствии с расчетом и сохранить ее в процессе эксплуатации. В связи с этим возникает вопрос о допустимых отклонениях формы поверхности от расчетной, какого бы происхождения не были эти отклонения.

Анализ показывает, что для случая параболического зеркала локальное отклонение $\Delta\rho$ его отражающей поверхности от идеальной формы и вызываемое им отклонение фазовой поверхности от плоскости $\Delta\varphi$ в раскрыве этого зеркала связаны соотношением

$$\Delta\rho = \Delta\varphi \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{1 + \cos\psi},$$

где ψ – угол между осью зеркала и направлением из фокуса зеркала в рассматриваемую точку на его поверхности. Максимально допустимое значение $\Delta\varphi$, при котором еще можно говорить о синфазности распределения поля в раскрыве зеркальной антенны и о диаграмме направленности, принято считать равным $\pm\pi/4$ [4]. Следовательно, локальные отклонения поверхности зеркальной антенны от расчетной формы не должны превышать максимально допустимого значения

$$\Delta\rho_{\max} = \frac{\lambda}{8(1 + \cos\psi)}.$$

Таким образом, в центре зеркала на его оси, где $\psi=0$,

$$\Delta\rho_{\max} = \frac{\lambda}{16},$$

что и определяет требуемую точность выполнения отражающей поверхности зеркальной антенны. Из приведенных выражений видно, что при удалении от оси такой антенны предельно допустимая погрешность формы отражающей поверхности будет возрастать. Однако, очевидно, что для длиннофокусных систем (например, системы Кассегрена) это увеличение $\Delta\rho_{\max}$ на краях зеркала будет очень незначительным.

В качестве параметра, характеризующего точность выполнения отражающей поверхности зеркальной антенны, наиболее часто используется величина

$$R = \frac{D}{\Delta\rho}.$$

В дециметровом, сантиметровом диапазонах и даже в длинно- и средневолновой частях миллиметрового диапазона современная технология зеркальных антенн [5,6] позволяет создавать такие антенны с параметром $R \leq 5 \cdot 10^4$. В коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазонах значения этого параметра еще выше – до $4 \cdot 10^5$ (при диаметрах антенн до 15 м) [7,8,9]. Однако при этом следует иметь в виду, что даже совершенная технология не дает возможность снизить абсолютный уровень погрешности выполнения отражающей поверхности зеркальных антенн ниже $40 \div 50$ мкм. Вследствие этого у таких зеркальных антенн на коротковолновом крае миллиметрового диапазона коэффициент использования их площади (как и остальные параметры) снижается и при переходе в субмиллиметровый диапазон быстро падает до нуля.

Кроме того, все большие зеркальные антенны радиотелескопов в процессе эксплуатации подвергаются существенному деформирующему воздействию их собственного веса (от нескольких сотен до тысячи тонн), ветровых нагрузок и колебаний температуры. При этом предельно допустимый уровень этих деформаций также не должен превышать $\Delta\rho_{\max} = \lambda/16$.

Таким образом, проблема создания больших высокоточных зеркальных антенн для радиотелескопов субмиллиметрового диапазона на базе существующих технологий представляет собой очень сложную и пока практически нерешаемую задачу.

В данной ситуации несомненно интересно проанализировать возможности и особенности использования в качестве зеркальных антенн радиотелескопов субмиллиметрового диапазона зеркальных систем больших оптических телескопов.

Современная технология изготовления оптических зеркал большого диаметра позволяет уже сегодня создавать даже в оптическом диапазоне высококачественные и высокоточные зеркала диаметром до 10 м. Оптическая точность выполнения отражающей поверхности таких больших оптических зеркал открывает реальный путь к идеальному (по точности и качеству отражающих поверхностей) решению проблемы высокоточных зеркальных антенн для радиотелескопов субмиллиметрового диапазона. К тому же такие зеркала по своему

конструктивному решению практически нечувствительны к деформирующему воздействию ветровых нагрузок, собственного веса и колебаний температуры. И наконец, важно, что уже сегодня на территории СНГ находится в эксплуатации несколько больших оптических телескопов с диаметром зеркал до 6 м, которые могли бы быть успешно использованы в качестве антенных систем для проведения радиоастрономических исследований в субмиллиметровом диапазоне.

Однако, рассматривая такую возможность, необходимо иметь в виду, что условия и особенности работы больших оптических зеркальных систем в антенных приложениях (а именно, в качестве зеркальных антенн субмиллиметровых радиотелескопов) будут существенно отличаться от условий работы в оптических телескопах. Эти особенности необходимо четко представлять, чтобы правильно их учитывать при создании антенных систем субмиллиметровых радиотелескопов на основе зеркальных систем оптических телескопов, обеспечивая тем самым их максимальную эффективность. Вот об этих особенностях и возможностях радиоастрономического использования зеркальных систем больших оптических телескопов в субмиллиметровом диапазоне и пойдет речь в настоящей работе.

Эффективность оптических зеркальных систем в антенных приложениях

Мы ограничимся здесь рассмотрением двухзеркальной системы Кассегрена – системы, нашедшей широкое применение как в оптических системах телескопов, так и в коротковолновых СВЧ антенных системах радиотелескопов. Она состоит из главного большого вогнутого параболического зеркала (диаметром D) и небольшого вспомогательного выпуклого гиперболического зеркала – субрефлектора (диаметром d), расположенного между главным зеркалом и его фокусом. Окуляр, светоприемник или приемное СВЧ-устройство располагают во вторичном фокусе этой системы – фокусе субрефлектора (фокусе Кассегрена).

Интерес, проявляемый к использованию этих систем как в оптике, так и в антенной технике, обусловлен несколькими причинами. Прежде всего необходимо отметить, что эффективный фокальный параметр такой двухзеркальной системы F_{eq}/D существенно превышает фокальный параметр одного главного зеркала F_0/D . В рамках представлений геометрической оптики [10] нетрудно показать, что

$$F_{eq} = F_0 \frac{c+1}{c-1},$$

где $c > 1$ – эксцентриситет гиперболы субрефлектора. Из этого выражения видно, что с помощью двухзеркальной схемы Кассегрена нетрудно увеличить фокальный параметр двухзеркальной системы (по сравнению с этим параметром главного зеркала) на порядок и более, сохраняя при этом относительно небольшую осевую протяженность системы. Возможность существенно повысить длиннофокусность оптической системы представляет особый интерес для создателей оптических телескопов, поскольку разрешение таких устройств пропорционально значению фокального параметра объектива. В современных оптических телескопах с оптической зеркальной системой Кассегрена эффективное значение фокального параметра объективов достигает значений 30–40 единиц и более. Кроме того, необходимо отметить еще одно достоинство длиннофокусных телескопических систем – существенное снижение уровня искажений изображения наблюдаемого объекта вследствие аберраций, вызываемых комой.

В радиоастрономии также, как и в оптической астрономии, двухзеркальные антенные системы Кассегрена [11] позволяют заметно увеличить по сравнению с однозеркальной схемой эффективный фокальный параметр. Однако по ряду технических причин зеркала антенных систем, в том числе и главные зеркала систем Кассегрена, выполняются в отличие от оптических зеркал, как правило, короткофокусными – их фокальные параметры обычно не превышают единицы ($0.3 \div 0.8$). Поэтому хотя использование схемы Кассегрена в зеркальных антенных системах позволяет существенно повысить значения их фокальных параметров, они все же ниже, чем в оптических системах, и обычно не превышают $10 \div 15$. Однако и такая длиннофокусность антенных систем Кассегрена способствует улучшению их параметров. Например, становится возможным применить в антенных системах облучатели с существенно большими размерами апертур, что повышает их широкополосность. В то же время антенные системы Кассегрена, как уже отмечалось, имеют сравнительно небольшие осевые размеры. Кроме того, увеличение фокального параметра зеркальной антенной системы приводит к снижению в ней поляризационных потерь, обусловленных эффектом кросс-поляризации [12]. Наконец, следует отметить, что длиннофокусные зеркальные антенные системы позволяют размещать в фокусе несколько слегка смещенных относительно оси зеркала облучателей с приемниками без заметного ухудшения их параметров. А это обстоятельство становится особенно существенным при реализации многолучевого режима работы радиотелескопа, представляющего большой интерес [13].

Наличие в любой двухзеркальной системе небольшого вспомогательного зеркала, расположенного перед главным зеркалом, (а также поддерживающих его элементов), неизбежно ведет к частичному затенению (блокировке) центральной части поверхности главного зеркала. Однако значение и влияние этого эффекта в оптических и в антенных системах совершенно разное. В двухзеркальных системах оптических телескопов, работающих с засветкой зеркала в многомодовом режиме и с практически равномерным распределением поля в его раскрыве, степень блокировки главного зеркала субрефлектором сравнительно невелика. Поэтому двухзеркальные оптические телескопы работают фактически в режиме кольцевой входной апертуры с субрефлекторами относительно больших размеров – параметр d/D может достигать значения 0.5. Это позволяет практически устранить в таких телескопах дифракционные потери в оптической системе.

Иначе обстоит дело в двухзеркальных антенных системах радиотелескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Основной областью радиоастрономических исследований в этих диапазонах является спектроскопия высокого разрешения. Поэтому в таких радиотелескопах, как правило, используют гетеродинные системы когерентного приема. В этих системах антенный облучатель работает в одномодовом режиме и формирует диаграмму направленности с существенно неравномерным распределением поля в радиальном направлении и с максимумом поля на оси системы. Кроме того, в таких антенных системах поле формируемого облучателем пучка излучения на краях облучаемого им зеркала должно быть обрезано на некотором конечном уровне. В результате условия оптимального облучения зеркал антенных систем радиотелескопов оказываются существенно отличными от условий засветки зеркал оптических телескопов. В связи с этим очень важным в антенных системах Кассегрена является правильный выбор условий облучения антенного зеркала и особенно уровня обрезания поля на краях (чего вообще нет в оптических телескопах). Уменьшение этого уровня ведет к росту потерь из-за того, что часть энергии уходит за края зеркала, и к соответствующему росту уровня боковых лепестков. А увеличение – к усилению эффекта блокировки главного зеркала субрефлектором и к уменьшению эффективной рабочей площади зеркала, что снижает соответственно направленность и усиление антенной системы. Таким образом, каждая зеркальная антенная система должна иметь свой оптимальный уровень обрезания поля облучателя на краях раскрыва антенны. В современных однозеркальных антенных системах радиотеле-

скопов, где степень блокировки зеркала определяется только размерами облучателя и элементами его крепления и поэтому очень мала, обрезание поля осуществляется обычно на уровне 13÷15 дБ. Однако в случае двухзеркальных антенных систем Кассегрена на основе оптических систем эти значения должны быть иными.

В связи с этим обратимся непосредственно к вопросу об эффективности использования зеркальных систем Кассегрена оптических телескопов в качестве антенных систем радиотелескопов субмиллиметрового диапазона.

Эффективность антенных систем с заполненной апертурой, к которым относятся и зеркальные антенны, принято характеризовать коэффициентом использования площади антенной апертуры k_{an} . Именно величина этого коэффициента, в общем случае зависящая от частоты, определяет эффективную площадь антенной апертуры на данной частоте

$$S_{eff} = k_{an} S_{\phi},$$

где S_{ϕ} – физическая площадь апертуры; направленность антенны

$$D_a = \frac{4\pi}{\lambda^2} k_{an} S_{\phi}$$

и ее угловое разрешение

$$\Omega_m = \frac{\lambda^2}{k_{an} S_{\phi}}, \quad \vartheta_{0.5} = \frac{\lambda}{D \sqrt{k_{an}}},$$

где Ω_m – телесный угол главного лепестка диаграммы направленности антенной системы, $\vartheta_{0.5}$ – угловая ширина ее главного лепестка по уровню 0.5.

Выражение для полного значения коэффициента использования площади апертуры антенной системы (зеркало с облучателем) записывается в общем случае в виде произведения нескольких парциальных коэффициентов, каждый из которых характеризует влияние одного из механизмов, определяющих в целом значение полного коэффициента использования:

$$k_{an} = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6.$$

Здесь k_1 – парциальный коэффициент, связывающий коэффициент использования площади зеркальной антенны с неравномерностью распределения поля в ее раскрыве; k_2 – описывает влияние эффекта блокировки главного зеркала субрефлектором; k_3 – учитывает влияние поляризационных потерь, обусловленных

эффектом кросс-поляризации; k_4 – связан с конечным уровнем обрезания поля антенного облучателя на краях раскрыва облучаемого зеркала; k_5 – учитывает роль различных фазовых ошибок в распределении поля в раскрыве зеркала, в том числе и за счет случайных локальных отклонений его отражающей поверхности от расчетной формы; k_6 – парциальный коэффициент, учитывающий омические потери на зеркале.

При анализе этого выражения для рассматриваемого случая отметим прежде всего то обстоятельство, что омические потери в рассматриваемых нами оптических зеркальных системах при использовании их в субмиллиметровом диапазоне, очевидно, достаточно малы, и можно считать $k_6=1$. Затем напомним, что зеркальные системы Кассегрена, особенно оптические, являются длиннофокусными. Это дает основания полагать, что в таких системах углы падения пучка на зеркало будут очень близки к нормальному, и поэтому поляризационными потерями в них за счет эффекта кросс-поляризации можно пренебречь и считать $k_3=1$.

Поскольку ниже будет рассмотрен вопрос об эффективности использования в качестве зеркальных антенн субмиллиметрового диапазона высокоточных оптических систем зеркальных телескопов, особый интерес представляет поведение парциального коэффициента k_5 , который связывает коэффициент использования площади апертуры зеркальной антенны с точностью выполнения ее отражающей поверхности. Проведенный нами анализ показал, что зависимость величины коэффициента k_5 от длины волны (частоты) при различных значениях среднеквадратичного отклонения поверхности зеркала от расчетной формы описывается семейством кривых, приведенных на рис. 1. Из этого рисунка видно, что при выполнении поверхности зеркальной антенны с точностью, характерной для современной технологии ($\Delta\rho \geq 40 \div 50$ мкм) [8,9], значение k_5 для такой антенны в субмиллиметровом диапазоне быстро уменьшается до 0 с укорочением длины волны. В случае же использования в зеркальных антеннах оптических зеркал, выполненных с точностью не более 0.1 мкм, этот коэффициент во всем указанном диапазоне остается практически равным единице.

Таким образом, для рассматриваемых нами высокоточных зеркальных антенн субмиллиметрового диапазона на основе оптических зеркальных систем общее выражение для коэффициента использования площади апертуры таких антенн может быть записано в виде

$$k_{ан} \equiv k_1 k_2 k_4.$$

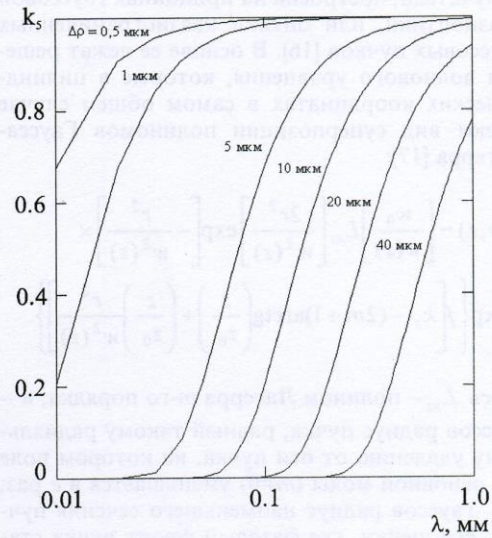


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования площади зеркальной антенны от рабочей длины волны при различных размерах "шероховатостей" поверхности зеркала

В этом приближении согласно принятым представлениям [14,15]

$$k_{ан} = \left| \int_0^a \int_0^b E(x,y) dx dy \right|^2 / \int_0^a \int_0^b |E(x,y)|^2 dx dy.$$

Для случая осесимметричной антенной системы и аксиальносимметричного распределения поля в ее раскрыве

$$k_{ан} = \left| \int_0^{D/2} E(r) r dr \right|^2 / \int_0^{D/2} |E(r)|^2 r dr.$$

Для двухзеркальных систем Кассегрена, в которых главное зеркало частично блокируется субрефлектором, это выражение должно быть переписано следующим образом:

$$k_{ан} = \left| \int_{d/2}^{D/2} E(r) r dr \right|^2 / \int_0^{D/2} |E(r)|^2 r dr.$$

Воспользуемся теперь этим выражением для анализа апертурной эффективности рассматриваемых зеркальных антенн субмиллиметрового диапазона.

Вся элементная база субмиллиметрового диапазона, включая антенные системы и их

облучатели, построена на принципах гауссовой квазиоптики, или оптики квазиограниченных гауссовых пучков [16]. В основе ее лежат решения волнового уравнения, которые в цилиндрических координатах в самом общем случае имеют вид суперпозиции полиномов Гаусса-Лагерра [17]:

$$\psi(r, z) \sim \left[\frac{w_0}{w(z)} \right] L_m \left[\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[-\frac{r^2}{w^2(z)} \right] \times \\ \times \exp \left\{ j \left[k_z - (2m+1) \arctg \left(\frac{z}{z_0} \right) + \left(\frac{z}{z_0} \right) \frac{r^2}{w^2(z)} \right] \right\}.$$

Здесь L_m – полином Лагерра m -го порядка; w – гауссов радиус пучка, равный такому радиальному удалению от оси пучка, на котором поле его основной моды ($m=0$) уменьшается в e раз; w_0 – гауссов радиус наименьшего сечения пучка – его шейки, где фазовый фронт пучка становится плоским; z_0 – расстояние вдоль оси пучка (ось z) от шейки до точки, где достигается максимальная кривизна фазового фронта пучка, то есть минимальное значение радиуса кривизны этого фронта

$$R(z) = z \left[1 + \left(z_0/z \right)^2 \right] \\ \min R(z) = 2z_0, \quad z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}.$$

Большая длиннофокусность оптических зеркальных систем Кассегрена позволяет вести анализ в приближении малых углов падения пучка на зеркало, то есть в парааксиальном приближении. Это дает нам основание при описании распространения гауссова пучка в таких системах пользоваться для простоты (но с достаточной для практических задач точностью) приближением одной основной моды ($m=0$). При этом предполагается, что диаграмма направленности облучателя такова, что уровень обрезания поля формируемого пучка на краях раскрыва облучаемого зеркала составляет

$$T = 8.686 \left[D/2w_a \right]^2,$$

где w_a – гауссов радиус пучка в плоскости раскрыва зеркала.

Для основной моды гауссова пучка $L_0=1$, и поэтому

$$E(r) \sim \exp \left[-\frac{r^2}{w^2(z)} \right].$$

Подстановка такого вида радиальной зависимости поля пучка в приведенное выше выражение для полного коэффициента используемой площади двухзеркальной антенной системы Кассегрена и интегрирование его дает следующий результат:

$$k_{an} = \frac{1}{1-B} \frac{2}{t} \left[\exp(-Bt) - \exp(-t) \right]^2.$$

Здесь $B = (d/D)^2$ – параметр блокировки и $t = T/8.686$.

На рис. 2 приведено построенное с помощью этого выражения семейство кривых, описывающих зависимость полного коэффициента используемой площади двухзеркальной антенной системы Кассегрена от уровня обрезания пучка T в этой системе при различных значениях относительного размера субрефлектора (d/D). Из этого рисунка видно, что при относительно малых размерах субрефлектора ($d/D \leq 0.1$), характерных для сравнительно длинноволновых радиоастрономических зеркальных антенных систем, работающих на частотах не выше 100 ГГц, оптимальный уровень обрезания поля, при котором КИП таких антенн достигает максимума, составляет $10 \div 12$ дБ. При этом эффективно работающая площадь раскрыва главного зеркала составляет не менее $65 \div 70$ % физической площади раскрыва.

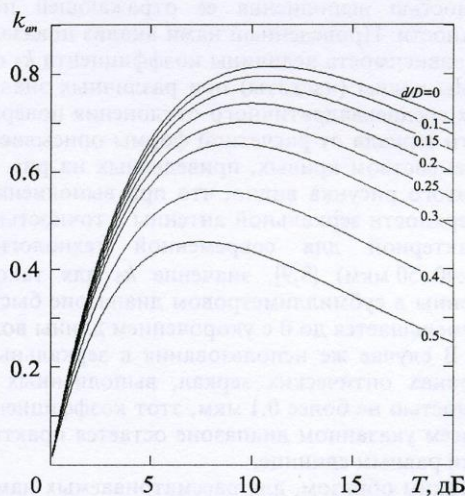


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования площади двухзеркальной антенной системы Кассегрена от уровня обрезания поля на краях ее раскрыва при различных относительных размерах субрефлектора

Однако при увеличении относительных размеров субрефлектора, что характерно для антенных систем субмиллиметрового диапазо-

на и особенно для оптических зеркальных систем, оптимальный уровень обрезания пучка уменьшается и при $d/D=0.5$ не превышает 7 дБ. При такой значительной блокировке субрефлектором главного зеркала его КИП заметно снижается. Тем не менее даже в этих условиях оптимизация уровня обрезания поля пучка позволяет сохранить достаточно высокое значение КИП антенны. Даже при $d/D=0.4$ ее уровень составляет не менее 50 % во всем субмиллиметровом диапазоне.

Приведенное семейство кривых позволяет определиться с выбором оптимального уровня обрезания поля пучка в каждой конкретной рассматриваемой антенной системе, в частности, в антенной системе радиотелескопа субмиллиметрового диапазона на основе зеркальной системы Кассегрена оптического телескопа. Необходимо лишь определить тип и параметры облучателя, позволяющего реализовать требуемый оптимальный уровень обрезания поля пучка на зеркале антенны. Облучатель двухзеркальной антенной системы Кассегрена располагается во вторичном ее фокусе – фокусе Кассегрена. Это дает основание считать, что рассматриваемый облучатель расположен в фокусе эквивалентной длиннофокусной однозеркальной параболической антенны с тем же диаметром раскрытия, что и у главного зеркала данной системы Кассегрена [11]. Поэтому можно полагать, что облучаемое зеркало удалено от облучателя на расстояние, равное значению фокусного расстояния эквивалентного параболоида. Далее, согласно представлениям гауссовой квазиоптики радиальный размер гауссова пучка (его гауссов радиус) однозначно определяется при заданной длине волны радиусом шейки пучка и расстоянием от нее до точки отсчета. Шейка пучка, формируемого квазиоптическим облучателем, располагается в его фазовом центре. Положение самого облучателя нами уже оговорено. Таким образом, при заданных длине волны и величине эквивалентного фокального параметра антенной системы радиус шейки пучка будет однозначно определять радиальный размер пучка в раскрытии облучаемого им зеркала, а значит и уровень обрезания поля этого пучка на краях раскрытия зеркала. Этой информации достаточно для того, чтобы можно было приступить к конструированию облучателя, оптимального для данной антенной системы. Вопрос о конструировании квазиоптического излучателя, формирующего гауссов пучок с заданным размером шейки, рассмотрен в литературе достаточно подробно [18-24].

В рамках представлений гауссовой квазиоптики можно показать, что для реализации в рассматриваемой антенной системе заданного уровня обрезания пучка T при данном значе-

нии эквивалентного фокального параметра F_{eq}/D приведенный размер шейки этого пучка должен удовлетворять соотношению

$$\frac{w_0}{\lambda} = 0.22\sqrt{T}(F_{eq}/D).$$

На рис. 3 изображено построенное с помощью полученного выражения семейство кривых, описывающее зависимость приведенного размера шейки пучка в фазовом центре облучателя от уровня обрезания пучка в двухзеркальной антенной системе Кассегрена при различных значениях ее эффективного фокального параметра. С помощью этих кривых можно легко определить для каждой конкретной зеркальной антенной системы размер шейки пучка в облучателе, требуемый для реализации оптимальных условий облучения зеркала и достижения максимального КИП такой антенной системы.

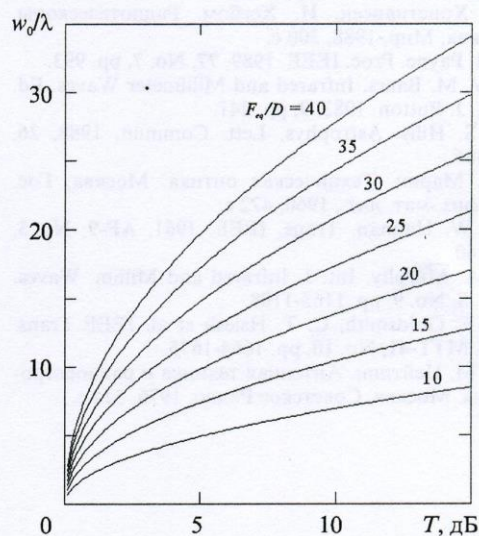


Рис. 3. Зависимость приведенного размера шейки гауссова пучка от требуемого уровня обрезания поля этого пучка на краях раскрытия антенной системы Кассегрена при различных значениях ее эквивалентного фокального параметра

Заключение

В работе рассмотрена проблема создания больших высокоточных зеркальных антенн для радиотелескопов субмиллиметрового диапазона и изучены возможности и особенности эффективного использования двухзеркальных систем Кассегрена больших оптических телескопов в качестве зеркальных антенн. Проанализированы возможности достижения опти-

мального режима облучения таких антенных систем, обеспечивающих в данных условиях максимальный коэффициент использования площади их апертур. Показано, что предлагаемый вариант представляет собой реальный путь для создания больших высокоточных зеркальных антенн для субмиллиметровых радиотелескопов с коэффициентом использования площади их апертур на уровне не менее 50 % во всем указанном диапазоне длин волн.

Литература

1. R. Blundel, C.-Y. E. Tong. Proc. IEEE. 1992, **80**, No. 11, pp. 1702.
2. C. H. Townes, M. Bester, W. C. Danchi et al. Infrared Phys. Technol. 1994, **35**, No. 2/3, pp. 503.
3. Антенны. (Современное состояние и проблемы). Под редакцией Л. Д. Бахраха. Москва, Советское Радио, 1979.
4. А. З. Фрадин. Антенны сверхвысоких частот. Москва, Советское Радио, 1957, 636 с.
5. J. Ruze. Antenna Tolerance Theory – A Review. Proc. IEEE, 1966, **54**, No. 4, pp. 633.
6. У. Христиансен, И. Хегбом. Радиотелескопы, Москва, Мир, 1988, 300 с.
7. J. M. Payne. Proc. IEEE. 1989, **77**, No. 7, pp. 993.
8. J. W. M. Vaars. Infrared and Millimeter Waves. Ed. by K. J. Button. 1983, **9**, pp. 241.
9. R. S. Hills. Astrophys. Lett. Commun. 1988, **26**, pp. 305.
10. Л. Марин. Техническая оптика. Москва, Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960, 422 с.
11. P. W. Hannan. Trans. IEEE. 1961, **AP-9**, No. 3, pp. 140.
12. J. A. Murphy. Int. J. Infrared and Millim. Waves. 1987, **8**, No. 9, pp. 1165-1188.
13. P. F. Goldsmith, C. T. Hsieh et al. IEEE Trans. 1993, **MTT-41**, No. 10, pp. 1664-1675.
14. Н. М. Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия. Москва, Советское Радио, 1976, 324 с.
15. R. E. Collin. Trans. IEEE. 1984, **AP-32**, No. 9, pp. 991.
16. D. H. Martin, J. C. G. Lesurf. Infrared Phys. 1978, **18**, No. 5/6, pp. 405.
17. H. Kogelnik, T. Li. Laser Beams and Resonators. Proc. IEEE. 1966, **54**, No. 10, pp. 1312-1328.
18. R. J. Wylde. Proc. IEE. 1984, **131H**, No. 3, pp. 258-263.
19. H. M. Pickett, J. C. Hardy, J. Farhoodmand. Trans. IEEE. 1984, **MTT-32**, No. 8, pp. 936-937.
20. G. L. Eddis. Proc. IEEE. 1985, **132H**, No. 3, pp. 215-221.
21. B. M. Thomas. Trans. IEEE. 1978, **AP-26**, No. 2, pp. 367-372.
22. R. J. Wylde, D. H. Martin. Trans. IEEE. 1993, **MTT-41**, No. 10, pp. 1691-1699.
23. Isao Othara, Hiroshi Ujii. Trans. IEEE. 1975, **AP-23**, No. 6, pp. 858-859.
24. E. N. Grossma. Infrared Phys. 1989, **29**, No. 5, pp. 875-886.

Efficiency of Mirror Systems of Large Optical Telescopes as a Reflector Antennas of Submillimeter Radiotelescopes

I. I. Eru

Submillimeter receivers can be mounted on large optical telescopes. Finding the optimum submillimeter wave illumination for these telescopes is simplified by their effectively perfect optical surfaces and long focal lengths, but is complicated by telescope optics which have been optimized for non-tapered light beams. In order to determine the effects of changing illumination edge taper, we calculated submillimeter aperture efficiencies for optical telescopes, which are used as antenna systems of submillimeter radiotelescopes.