

УДК 621.396.67

ВЛИЯНИЕ ЗАТЕНЕНИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАСКРЫВА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ФОКАЛЬНЫМ МОДУЛЕМ НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ

Н. Н. Горобец, В. И. Кийко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 610022, Украина

E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12 апреля 2011 г.

Теоретически исследовано влияние затенения излучающего раскрыва однозеркальной параболической антенны на диаграммы направленности, КНД, ширину главного лепестка и уровни боковых лепестков при изменении отношения фокусного расстояния к диаметру зеркала в пределах от 0,5 до 1,5. Показано, что влияние затенения на все характеристики направленности тем меньше, чем более длиннофокусное зеркало. Минимальный уровень боковых лепестков имеет место в случае короткофокусных зеркал

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволны, зеркальные антенны, затенение зеркала, характеристики направленности

Теоретично досліджений вплив затінення випромінюючого розкриття однозеркальної параболической антени на діаграми спрямованості, КСД, ширину головної пелюстки й рівні бічних пелюстків при зміні відношення фокусної відстані до діаметра дзеркала в межах від 0,5 до 1,5. Показано, що вплив затінення на всі характеристики спрямованості тим менший, чим більш довгофокусне дзеркало. Мінімальний рівень бічних пелюстків має місце у випадку короткофокусних дзеркал

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвилі, дзеркальні антени, затінення дзеркала, характеристики спрямованості

The effect of shading of the radiating aperture single-reflector parabolic antenna on radiation pattern, gain, wide beamwidth and sidelobe levels while changing the focal length of the relationship to the diameter of the reflector in the range of 0.5 to 1.5 takes place was theoretically investigated. Thus, it was shown that the effect of shading on all directional characteristics is the less than the longer-focused is the reflector. The minimum level of side lobes is in the case of short-focused reflector

KEY WORDS: microwaves, reflector antennas, reflector shading, directional characteristics

Характерной особенностью развития современной радиоэлектроники является требование уменьшения бокового и заднего излучения антенных устройств. Это обусловлено повышением требований обеспечения экологической безопасности человека и вообще живой природы, а также обеспечения электромагнитной совместимости одновременно работающих в одном или нескольких диапазонах рабочих частот радиоэлектронных систем различного функционального назначения. Техническая реализация этого требования, особенно в широком диапазоне частот, неизбежно приводит к ухудшению основных энергетических характеристик антенны – коэффициентов направленного действия и использования площади раскрыва, а также к увеличению ширины главного лепестка диаграммы направленности, т. к. для уменьшения уровня бокового излучения необходимо использовать сильно спадающее к краям антенны амплитудные распределения источников поля. Поэтому оптимальное решение задачи сводится к компромиссу, в той или иной степени позволяющему удовлетворить этим противоречивым требованиям. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитных волн большие электрические размеры антенн достигаются при малых их физических размерах, поэтому открываются дополнительные возможности улучшения характеристик направленности путем использования эффекта недооблучения раскрыва антенны, т.е. при малых коэффициентах использования площади антенны.

В случае зеркальных антенн – основного типа остронаправленных антенн миллиметрового и сантиметрового диапазонов электромагнитных волн – задача их оптимизации осложняется увеличением уровня боковых лепестков диаграмм направленности за счет искажения амплитудного и фазового распределения поля в излучающем раскрыве при его экранировке фокальным модулем. Исключение затенения раскрыва путем использования несимметричных зеркальных антенн с вынесенным облучением не всегда удовлетворяет требованиям практики из-за несимметрии конструкции и, как следствия этого, несимметрии амплитудных и поляризационных диаграмм направленности.

Целью настоящей статьи является исследование влияния электрических и геометрических размеров облучателя и глубины зеркала на КНД, ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков диаграмма направленности осесимметричных параболических зеркальных антенн с учетом затенения зеркала облучателем.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Исследуем характеристики направленности однозеркальной параболической антенны с диаметром излучающего раскрыва D и фокусным расстоянием F . В качестве облучателя для определенности используем открытый конец круглого волновода или конический рупор, возбуждаемый волной основного типа H_{11} . Диаметр раскрыва облучателя равен d . Математическая модель облучателя в виде открытого конца круглого волновода, возбуждаемого волной основного типа H_{11} хорошо известна в соответствии со строгим решением задачи дифракции электромагнитных и звуковых волн на открытом конце круглого волновода [1]. Более простая физико-математическая модель излучателя в виде открытого конца круглого волновода и синфазного конического рупора известна в рамках приближенного апертурного метода [2].

$$\vec{E}(\theta, \varphi, R) = \left\{ \vec{\theta}^\circ \left[\left[\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} + \frac{\lambda_o}{\lambda_g} \cos \theta \right] \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \cos \varphi + \vec{\varphi}^\circ \left[\cos \theta + \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \frac{\lambda_o}{\lambda_g} \left| \frac{J_1'(ka \sin \theta)}{1 - \left(\frac{ka}{\delta} \sin \theta \right)^2} \right| \right] \sin \varphi \right\} \frac{e^{-ikR}}{R} \quad (1)$$

$$\vec{H}(\theta, \varphi, R) = \frac{1}{W_0} \left[\vec{Z}^\circ \vec{E} \right]$$

Здесь a - радиус раскрыва облучателя, $W_0 = 120\pi$ Ом - волновое сопротивление свободного пространства.

Программа расчета характеристик направленности зеркальных антенн разработана на основе метода физической оптики (токовый метод) и в ней не накладываются никакие ограничения на размеры зеркала, вид облучателя, его размеры, расположение и ориентацию.

Как известно, характеристику излучения зеркальной антенны можно записать в виде [3]

$$\vec{E}(\vec{p}) = \frac{i}{\lambda} \left[\vec{p}, \left[\vec{p}, \int_s \vec{j}_s e^{ik\Delta r(\vec{p})} ds \right] \right] \quad (2)$$

где \vec{j}_s - токи, наведенные на зеркале полем облучателя; \vec{p} - орт направления на точку наблюдения в дальней зоне; $\Delta r(\vec{p})$ - разность хода лучей из точки интегрирования на зеркале в точку наблюдения.

Известно также, что в общем случае интеграл в (2) в аналитическом виде не берется.

Для численного интегрирования по формуле (2) поверхность зеркала разбивается на элементарные площадки (ячейки) интегрирования размером ΔS . В случае параболической или другой, отличной от сферической, формы поверхности зеркала, разбиение ее на ячейки интегрирования удобнее проводить не на самой поверхности зеркала, а на ее проекции на фокальную плоскость, на которой отображаются все точки поверхности зеркала, или в апертуре зеркала. Очевидно, что в случае симметричного параболоида вращения апертура зеркала имеет форму круга (рис. 1).

Площадь апертуры зеркала разбивается по радиальной ρ и азимутальной ψ координатах на примерно равные ячейки интегрирования $\Delta S'$, размером $1 \times 1 \lambda$, где λ -длина волны (рис. 1). В случае параболического зеркала элемент поверхности зеркала ΔS равен

$$\Delta S = \frac{\rho}{2F} \sqrt{\rho^2 + 4F^2} \Delta \rho \Delta \psi, \quad (3)$$

где F - фокусное расстояние зеркала.

Для повышения точности вычислений внутри каждой ячейки координаты точек интегрирования определяются по методу численного интегрирования Гаусса с $n = 4$. При этом внутри каждой ячейки будет n^2 точек интегрирования.

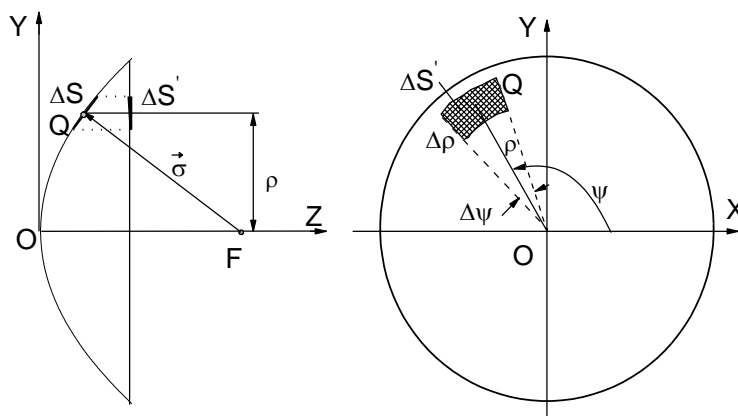


Рис. 1. Разбивка поверхности зеркала на ячейки интегрирования

Заменяв в (2) интеграл его численной формой и подставив вместо ds его значения в соответствии с (3) и расписав наведенный на зеркале ток через поле облучателя, получим конечную формулу для расчета поля излучения параболической зеркальной антенны численным методом по формуле Гаусса

$$\vec{E}(\vec{p}) = \frac{i}{\lambda} \left[\vec{p}, \left[\vec{p}, \sum_{\nu=1}^M \rho_{\nu} \sum_{i=1}^n C_i \sum_{\kappa=1}^N \psi_{\kappa} \sum_{j=1}^n C_j \left[\vec{n}^{\circ}, [\vec{\sigma}, \vec{E}_p] \right] \right] e^{ik\Delta r(\vec{p})} \frac{\rho_{ov}}{2F} \sqrt{\rho_{ov}^2 + 4F^2} \right], \quad (4)$$

где \vec{E}_p - электрический вектор падающего поля облучателя в точке интегрирования; $\vec{\sigma}$ - радиус-вектор из фазового центра облучателя на точку интегрирования; \vec{n}° - внешняя нормаль к поверхности зеркала в точке интегрирования; M - число ячеек $\Delta S'$, укладываемых на длине радиуса апертуры; N - число ячеек $\Delta S'$, укладываемых в круговом кольце радиуса ρ_{ov} в апертуре (рис. 1); $n = 4$ - порядок формулы Гаусса; C_i и C_j - весовые коэффициенты формулы Гаусса соответственно для координат по ρ и по ψ ; ρ_{ov}, ψ_{κ} - координаты точки интегрирования в ячейке $\Delta S'$.

Известно несколько способов учета затенения зеркала облучателем. В [3] затенение рассматривают как дифракцию вторичного поля на облучателе, что практически трудно осуществить. Поэтому влияние облучателя приближенно рассматривают как влияние одного лишь затенения, т. е. поле в области апертуры, которую затеняет облучатель, приравнивают нулю, оставляя его неизменным в прочих областях. Математически это можно представить в виде суммы излучения от невозмущенного поля в апертуре и противофазного излучения области, закрытой облучателем.

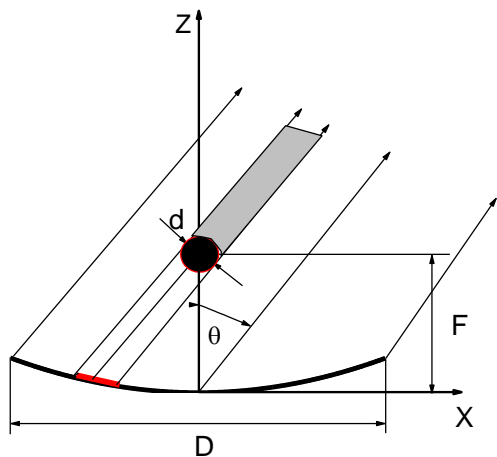


Рис. 2. К затенению зеркала облучателем

Такой способ требует довольно сложных математических вычислений, поэтому применим более простой метод учета затенения, который проводится следующим образом. На поверхности зеркала в точках интегрирования Q_i по заданной ДН облучателя определяются наведенные токи. Затем при нахождении поля излучения антенны в направлении на точку $P(\theta, \varphi)$, расположенную в дальней зоне антенны, проводится вычисление поля в этой точке, создаваемого каждой ячейкой интегрирования, и эти поля суммируются. Поэтому, если луч, исходящий из точки интегрирования на зеркале Q_i в точку наблюдения $P(\theta, \varphi)$ на своем пути пересекает блок облучателя (рис. 2), считается, что этот луч полностью поглощается (рассеяние полей излучения зеркала облучателем мы не рассматриваем). В этом случае для данного луча наведенные токи на зеркале считаем равными нулю.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются симметричные зеркальные антенны с размерами раскрыва зеркала D , равными 25, 50 и 100 длин волн, и фокусным расстоянием F , изменяющимся от $0,5D$ (глубокое зеркало) до $1,5D$ (мелкое зеркало). В расчетах для обеспечения общего характера анализа в качестве фокального модуля бралась сфера, диаметр которой равняется диаметру раскрыва облучателя (рис.2).

Рассчитывались характеристики направленности (коэффициент направленного действия, уровень боковых лепестков, ширина главного лепестка) в зависимости от диаметра раскрыва облучателя d , который изменяется от $0,5\lambda$ до 6λ .

Поскольку ширина диаграммы направленности открытого конца круглого волновода в E и H плоскостях наблюдения различается, то и уровень поля на краях зеркала в этих же плоскостях, соответствующих ортогональным плоскостям наблюдения $\varphi=0$ и 90° , также будет различным. Известно, что максимум КНД зеркальной антенны будет иметь место в случае, когда амплитуда поля облучателя на краю зеркала составляет примерно -10 дБ от его значения в вершине зеркала. Как показали расчеты, для выбранного облучателя максимум КНД достигается в случае, когда уровень облучения края зеркала, равный -10 дБ, приходится на сечение диаграммы направленности облучателя, соответствующее углу $\varphi=45^\circ$. Поэтому характеристики направленности определялись именно для этого сечения диаграммы направленности антенны.

На рис. 3 - 5 приведены соответственно зависимости значения коэффициента направленного действия G_m , ширины главного лепестка диаграммы направленности $2\Delta\theta$ по уровню -3 дБ и значений максимального уровня бокового лепестка A_m от диаметра облучателя d/λ для зеркала диаметром $D=25\lambda$ при разных значениях фокусного расстояния с учетом затенения зеркала.

Из рис.3 видно, что для каждого значения F/D существует оптимальный диаметр облучателя d_{opt} , при котором достигается максимум коэффициента направленного действия. На рис.6 показана зависимость максимального коэффициента направленного действия от F/D для антенны с учетом затенения (кривая 2) и без учета затенения (кривая 1). Видно, что в антенне без учета

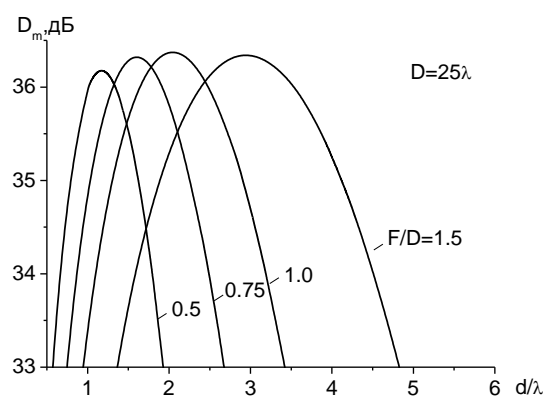


Рис. 3. Зависимость КНД от диаметра облучателя

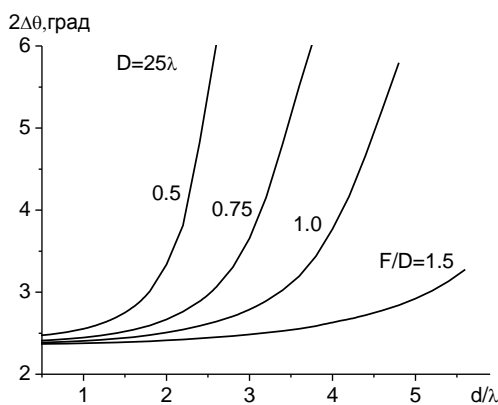


Рис. 4. Зависимость ширины главного лепестка диаграммы направленности от диаметра облучателя

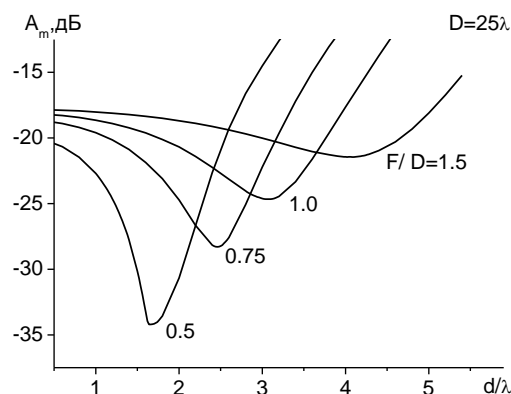


Рис. 5. Зависимость максимального уровня бокового лепестка от диаметра облучателя

затенения коэффициент направленного действия монотонно возрастает с увеличением F/D , в то время как в антенне с учетом затенения коэффициент направленного действия достигает своего максимального значения при $F/D=1.25$. Широкополосность антенны по коэффициенту направленного действия существенно увеличивается с увеличением F/D . Данные по ширине полосы значений d/λ , в которой обеспечивается КНД не хуже -3 дБ от $G_{max}(d_{opt})$, максимальное значение КНД G_{max} , максимальный уровень боковых лепестков A , ширина главного лепестка ДН $2\Delta\theta$, полученные для оптимального размера

облучателя $d_{\text{опт}}/\lambda$ в зеркальной антенне с учетом затенения в зависимости от глубины зеркала F/D приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики оптимизированной по максимуму КНД зеркальной антенны при разной глубине зеркала.

| F/D | Π , % | G_{max} , дБ | A , дБ | $2\Delta\theta$, град | $d_{\text{опт}}/\lambda$ |
|-------|-----------|-----------------------|----------|------------------------|--------------------------|
| 0,5 | 1,42 | 36,185 | -27,627 | 2,738 | 1,2 |
| 0,75 | 1,9 | 36,36 | -24,277 | 2,665 | 1,6 |
| 1,0 | 2,32 | 36,401 | -22,835 | 2,617 | 2,0 |
| 1,5 | 3,285 | 36,364 | -22,139 | 2,592 | 3,0 |

Ширина диаграммы направленности зеркальной антенны при увеличении диаметра облучателя от 0.5λ до $d_{\text{опт}}$ изменяется мало (рис.4), и очень быстро увеличивается при $d > d_{\text{опт}}$. Широкополосность антенны по этому параметру при $d = d_{\text{опт}}$ довольно большая. Ширина диаграммы направленности при $d = d_{\text{опт}}$ в случае антенны без учета затенения с увеличением F/D монотонно уменьшается. В антенне с учетом затенения наблюдается более резкое уменьшение ширины ДН при возрастании F/D до 1.25, а затем происходит небольшое увеличение ширины ДН с увеличением F/D .

Уровень максимального бокового лепестка с увеличением d/λ уменьшается (рис.5), достигая своего минимума, как показано в [4], при $(d/2\lambda) \approx F/D + 0.3$. С увеличением F/D минимальный уровень первого бокового лепестка возрастает как в антенне без учета затенения, так и в антенне с учетом затенением (рис.8). Однако затенение приводит к более быстрому росту уровня бокового лепестка с увеличением F/D .

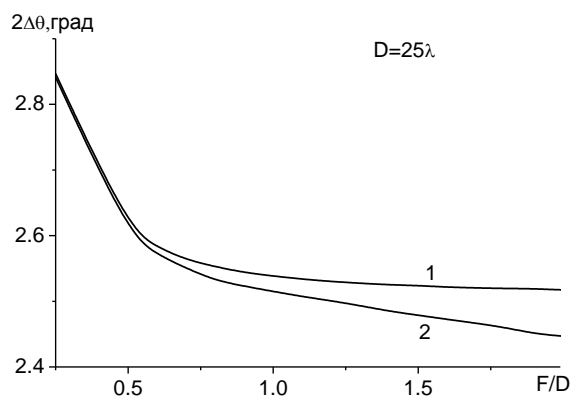


Рис. 7. Зависимость ширина главного лепестка ДН по уровню 0,5 дБ с учетом затенения (кривая 2) и без учета затенения (кривая 1) от величины фокусного расстояния

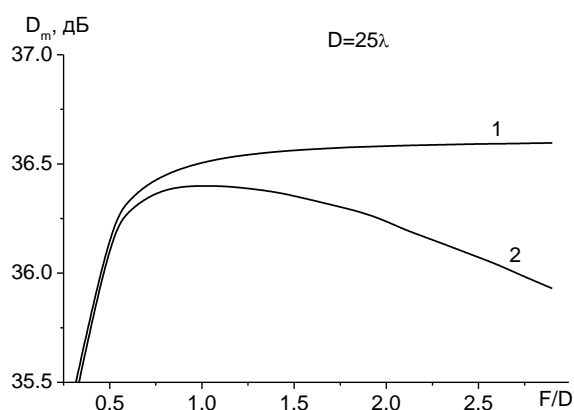


Рис. 6. Зависимость максимального КУ антенны с учетом затенения (кривая 2) и без учета затенения (кривая 1) от величины фокусного расстояния

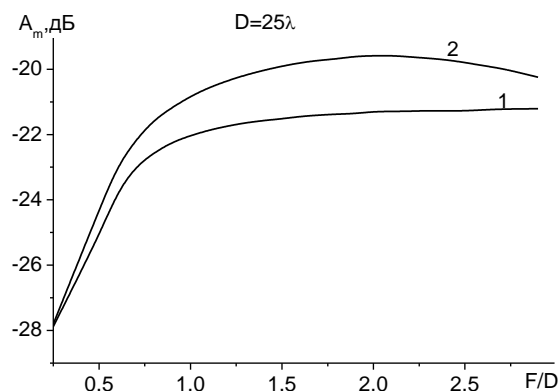


Рис. 8. Зависимость максимального уровня бокового лепестка с учетом затенения (кривая 2) и без учета затенения (кривая 1) от величины фокусного расстояния

Отметим также, что, как следует из рис.5 и данных в табл. 1, диаметры облучателя, при которых обеспечивается максимум КНД и минимум бокового лепестка, не совпадают. Это обстоятельство, связанное со сложным характером влияния затенения на характеристики излучения зеркальной антенны, необходимо учитывать на практике. Диаграммы направленности антенны с предельно низким уровнем бокового лепестка для разных F/D в антенне с затенением приведены на рис. 9. Видно, что для глубоких зеркал уровень нескольких ближних лепестков практически одинаковый. Такой вид диаграммы направленности характерен для антенных решеток, оптимальных в смысле Дольфа - Чебышева, и в технике зеркальных антенн встречается редко.

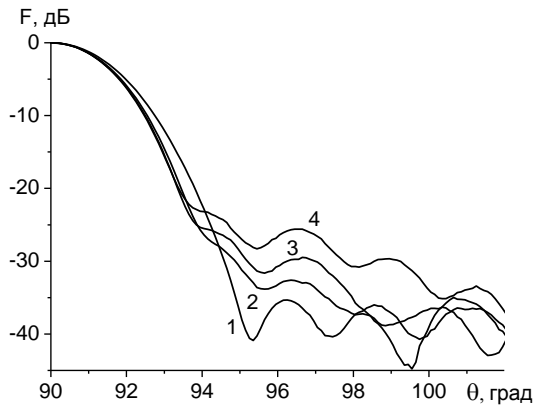


Рис.9. Диаграммы направленности с предельно низким уровнем боковых лепестков зеркальных антенн с разными фокусными расстояниями и оптимальными размерами облучателей: 1) - $F/D=0.5$; $d/\lambda=1.55$; 2) - $F/D=0.75$; $d/\lambda=2.0$; 3) - $F/D=1.0$; $d/\lambda=2.55$; 4) - $F/D=1.5$; $d/\lambda=3.8$

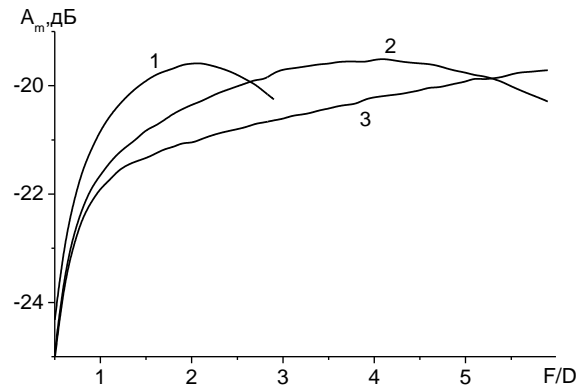


Рис. 10. Зависимость максимального уровня бокового лепестка с учетом затенения для зеркал размером $D=25\lambda$ (кривая 1), $D=50\lambda$ (кривая 2) и $D=100\lambda$ (кривая 3) от величины фокусного расстояния

С увеличением размеров зеркала D/λ зависимости основных параметров антенны (КНД, максимального уровня бокового лепестка, ширина ДН) от F/D сохраняется, однако оптимальные значения этих характеристик смещаются в сторону увеличения F/D . На рис 10 приведены зависимости максимального уровня боковых лепестков в оптимизированной по максимуму КНД зеркальной антенне от величины F/D и при диаметрах зеркала, равных 25, 50 и 100λ . Видно, что максимум боковых лепестков наблюдается при значениях $F/\lambda = 0.08(D/\lambda)^2$, т.е. при больших фокусных расстояниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численный анализ характеристик направленности зеркальных антенн с большими диаметрами излучающего раскрыва и различными фокусными расстояниями приводит к следующим важным для практики выводам:

- длиннофокусные зеркальные антенны более широкополосны по коэффициенту направленного действия и ширине главного лепестка диаграммы направленности, чем короткофокусные;
- чем больше F/D , тем меньше относительное влияние затенения на коэффициент направленного действия и ширину главного лепестка;
- чем больше F/D , тем больший уровень максимального бокового лепестка (как минимальный, так и средний для любого d/λ);
- чем больше F/D , тем уже главный лепесток диаграммы направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. – М.: Сов. радио, 1966. – 430с.
2. Шубарин Ю.В. Антенны сверхвысоких частот. Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1960, –284с.
3. Кюн Р. Микроволновые антенны. - М.: Судостроение, 1967. – 518 с
4. Горобец Н. Н., Вязьмитинова С. С. Численные исследования основных параметров однозеркальной антенны с осесимметричным рефлектором. // Вестник Харьковского университета - № 405 – «Радиофизика и электроника», 1998, -с.15-19