

**СЛАБОСВЕРХНАПРАВЛЕННАЯ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ
АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ОСЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ****Введение**

Широкое применение радиоэлектронных средств, используемых в процессах излучения и приема радиоволн, постоянно стимулирует научный интерес к практической реализации антенн с улучшенными свойствами направленности. Такими свойствами, наряду с другими положительными качествами, обладают многоэлементные антенные решетки (АР).

За многие годы развития антенной науки и техники, наряду с иными конструкциям АР, было предложено и нашло практическое применение множество конструктивных вариантов антенных решеток волноводно-щелевого типа. Их свойства и характеристики достаточно подробно исследованы и описаны в литературе, например в [1 – 3]. Основной особенностью этих АР является функционирование их в режиме нормального либо наклонного излучения. При этом свойства направленности линейной волноводно-щелевой АР напрямую зависят от количества щелей и ее продольных размеров.

При увеличении числа щелей и, как следствие, длины такой АР происходит сужение главного лепестка диаграммы направленности (ДН) лишь в одной из главных плоскостей. Однако в плоскости ортогональной по отношению к продольной оси волновода АР направленные свойства весьма слабо выражены и не зависят от продольных размеров такой решетки. Большая ширина главного лепестка ДН в этой плоскости объясняется тем, что поперечные размеры излучающей области решетки малы.

Поэтому для улучшения свойств направленности путем сужения главного лепестка в поперечной плоскости часто применяют систему, состоящую из нескольких параллельно расположенных в одной плоскости таких волноводно-щелевых АР, что заметно усложняет и удорожает всю конструкцию.

Известный [1 – 3] и широко распространенный на практике конструктивный вариант нерезонансной волноводно-щелевой АР представляет собой короткозамкнутый металлический волновод прямоугольного сечения с распространяющимся в нем основным типом волны и поглотителем, помещенным в конце волновода, который служит для устранения отражений от короткозамкнутого конца волновода (рис. 1, а).

В такой конструкции в одной из широких стенок волновода (по обе стороны от его продольной оси) прорезаны узкие продольные щели длиной, примерно равной $\lambda_0/2$ (λ_0 – длина волны во внешнем пространстве, соответствующая расчетной частоте) с шагом $d \cong \lambda_B/2$ (λ_B – длина волны в волноводе на той же частоте).

Для более равномерного возбуждения щели обычно располагаются относительно продольной оси на расстоянии, постепенно увеличивающемся по линейному закону от начала решетки к ее концу.

В такой конструкции щели возбуждаются синфазно, тем самым реализуется режим нормального излучения АР. Как уже упоминалось, главным недостатком такой решетки является широкий главный лепесток ДН в плоскости перпендикулярной оси волновода, что ограничивает коэффициент направленного действия (КНД) такой решетки.

Рассматриваемое в данной статье новое конструктивное решение (рис. 1, б, в), заключается в том, что узкие прямоугольные поперечные щели размещены не на одной, а на обеих широких стенках волновода симметрично относительно его оси с шагом d близким к $\lambda_0/4$.

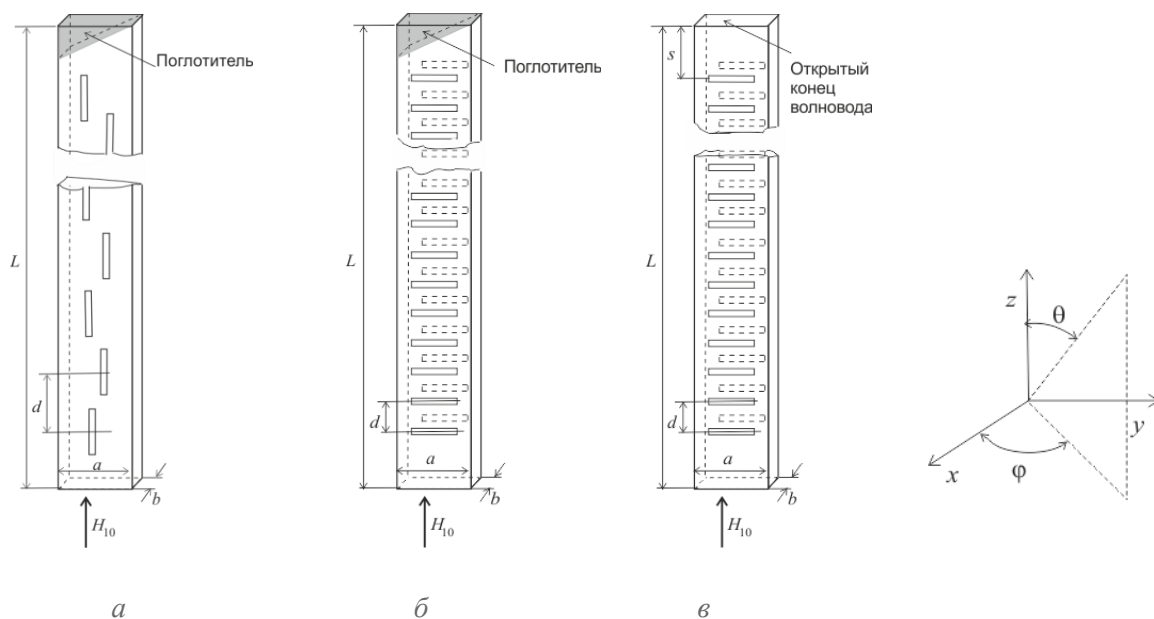


Рис. 1

Для того чтобы обеспечить в данной решетке необходимые для возбуждения щелей фазовые соотношения, соответствующие осевому излучению, волновод заполняется однородным диэлектриком с такой диэлектрической проницаемостью, которая обеспечит требуемую фазовую скорость волны основного типа, распространяющейся по волноводу.

Обеспечивая условия, при которых фазовая скорость несколько меньше скорости волны в свободном пространстве, можно добиться режима осевого излучения и осевой симметрии главного лепестка ДН. Такая решетка, обладающая улучшенными свойствами направленности, может быть использована в устройствах различного назначения сантиметрового и более высокочастотных диапазонов волн, в том числе в составе сложных антенных систем.

Цель статьи состоит в анализе характеристик направленности описанной выше волноводно-щелевой АР, поскольку из имеющихся в научной литературе (а также в Интернете) сведений можно установить, что конструкция такой волноводно-щелевой АР нигде не рассмотрена, а ее характеристики не исследованы.

Для определения преимуществ такой АР и сопоставления ее свойств с характеристиками волноводно-щелевой АР нормального излучения (рис. 1, а) был проведен ряд исследований, основанных на численном моделировании характеристик нескольких конструктивных вариантов волноводно-щелевых АР в среде компьютерного комплекса программ *FEKO* [4], результаты которых приведены в данной статье

Конструктивные особенности исследуемых антенн

В двух (рассматриваемых далее) конструктивных вариантах исследуемая антенная решетка образована волноводом прямоугольного сечения $(23 \times 10) \text{ мм}^2$, выполненного из хорошо проводящего материала толщиной заполненного однородным диэлектриком без потерь с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,15$. На каждой из двух широких стенок этого волновода имеются узкие полуволновые щели (рис. 1, б) ориентированные симметрично относительно его оси и размещенные с шагом равным $d = 0,25\lambda_0$. Возбуждение волны основного типа в волноводу осуществляется, как обычно, с помощью штыря, расположенного на расстоянии $d \cong \lambda_B / 4$ от короткозамкнутой торцевой стенки волновода.

Для обеспечения в такой АР режима осевого излучения и достижения при этом высокого КНД разность фаз полей в соседних щелях должна составлять $(1,03 - 1,06)k_0d$. (здесь $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число свободного пространства).

Равномерность амплитудного распределения полей вдоль АР может быть несколько улучшена за счет хорошо известных конструктивных решений (например, путем последовательного увеличения ширины щелей). Так, в рассматриваемой модели ширина t_s щелей увеличивается по линейному закону от начала к концу решетки ($0,25 \text{ мм} \leq t_s \leq 2,75 \text{ мм}$), что несколько улучшает равномерность амплитудного распределения в щелях вдоль решетки.

Один вариант (рис. 1, б) модели волноводно-щелевой АР осевого излучения (обозначим его как АР №2) – это заполненный диэлектриком волновод длиной $L = 6\lambda_0$ в котором на каждой широкой стенке имеется 21 поперечная щель, а на дальнем от источника короткозамкнутом конце волновода расположен поглощающий элемент из материала с параметрами:

- относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1,2$,
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,5$.

Второй вариант (рис. 1, в) модели волноводно-щелевой АР решетки осевого излучения (обозначим его как АР №1) отличается тем, что волновод имеет длину $L = 5,75\lambda_0$ и незамкнутый конец, при этом не содержит поглощающего элемента. Параметры диэлектрика, число и ориентация щелей в этой модели полностью соответствуют АР №2, а продольное расстояние от крайних щелей до конца волновода примерно равно $0,25\lambda_0$.

Для сравнения аналогичный численный анализ выполнялся и для волноводно-щелевой решетки (рис. 1, а) нормального излучения (обозначим ее как АР №3), причем ее внешние габаритные размеры полностью соответствуют аналогичным параметрам АР №1.

В этом варианте короткозамкнутый волновод с воздушным заполнением также имеет на конце поглощающий элемент. Однако в этом варианте излучающая область решетки образована восемью щелями, ориентированными вдоль осевой линии на одной широкой стенке волновода с шагом $d = \lambda_B / 2$. Для увеличения равномерности амплитудного распределения щелей расстояние от осевой линии для каждой из них изменяется, увеличиваясь от начала к концу решетки по линейному закону.

Для выявления преимуществ описанных выше моделей АР осевого излучения проведено компьютерное моделирование, основанное на численном анализе характеристик направленности.

Методика исследования

Характеристики направленности рассматриваемых моделей АР являются результатом численного моделирования в среде компьютерного пакета программ ФЕКО. В процессе расчетов волновод считался идеально проводящим с бесконечно тонкими стенками. Расчет всех характеристик исследуемых антенн выполнен на частотах, распределенных равномерно с интервалом 50 МГц, в диапазоне от 9,75 до 10,75 ГГц.

При анализе характеристик АР осевого излучения в результате нескольких пробных расчетов (путем вариации относительной диэлектрической проницаемости в незначительных пределах) находилось оптимальное значение ε для достижения лучшего КНД при данных геометрических параметрах.

В расчетном модуле программного комплекса для численного решения электродинамических задач применен базовый метод моментов [4], который предусматривает разбиение всех поверхностей как проводящих, так и диэлектрических, на треугольную сетку, и в итоге он сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений,

Обычно рекомендуется выбирать размер ребра сетки значительно меньше минимальной длины волны. Когда модель содержит диэлектрические материалы, такое же соотношение только относительно длины волны в диэлектрике должно использоваться и для сетки на поверхности диэлектрика.

В данном исследовании размер стороны треугольных сегментов принят равным $\lambda_0/30$, что обеспечило достоверность, повторяемость и электродинамическую корректность полученных результатов.

Результаты численного моделирования

На рисунках, которые приводятся ниже, проиллюстрированы, сравниваются и обсуждаются частотные зависимости характеристик направленности АР осевого излучения, обладающих слабовыраженными сверхнаправленными свойствами по сравнению с АР нормального излучения.

Свойства направленности рассматриваемых антенных решеток можно анализировать, сравнивая диаграммы (рис. 2), отображающие угловую зависимость КНД в плоскости xOz , рассчитанные и построенные для АР №1 (рис. 2, а), АР №2 (рис. 2, б) и АР №3 (рис. 2, в).

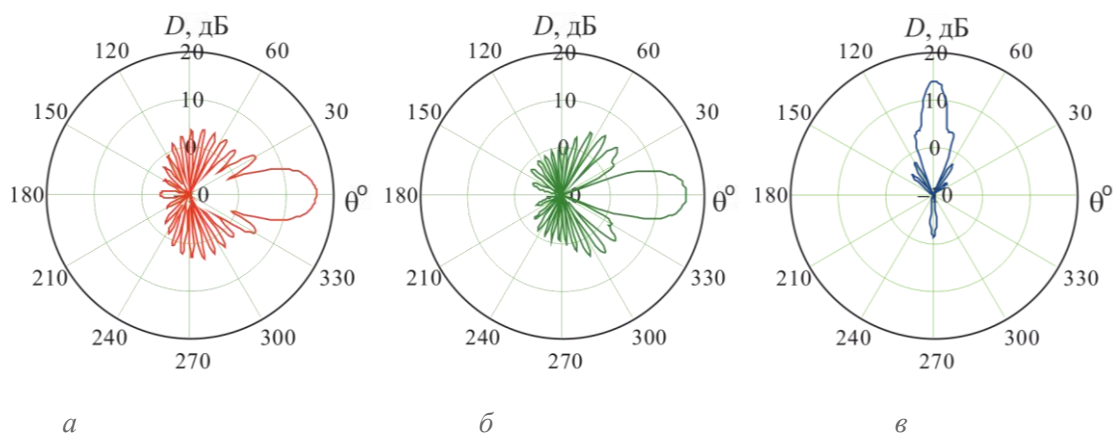


Рис. 2

Графики, изображенные на рис. 2, а, б иллюстрируют тот факт, что для моделей волноводно-щелевой АР №1 и АР №2 максимум КНД ориентирован в направлении оси волновода, т.е. реализован режим осевого излучения (направление максимума главного лепестка ДН $\theta = 0^\circ$), при котором главный лепесток ДН практически осесимметричен.

Аналогичная диаграмма, выбранная для сравнения и характеризующая КНД АР №3, иллюстрирует режим нормального излучения (рис. 2, в). Как и следовало ожидать, расчеты показали, что в этом случае главный лепесток ДН при $\theta = 90^\circ$ (плоскость xOy) значительно шире, чем в ДН АР осевого излучения. Кроме того, следует отметить заметный уровень заднего лепестка.

Для более детального сравнения были проведены аналогичные расчеты, относящиеся к двум другим моделям антенн. Одна из них – это односторонняя волноводно-щелевая АР, по всем своим параметрам аналогичная АР №1, за исключением того, что излучающие щели расположены только на одной стенке питающего волновода (обозначим ее как АР №4). Вторая представляет собой диэлектрическую стержневую антенну (ДСА) осевого излучения прямоугольного сечения, возбуждаемую отрезком волновода. Размеры поперечного сечения стержня соответствуют сечению волновода, продольный размер всей антенны и диэлектрическая проницаемость материала стержня такие же, как и у моделей АР осевого излучения, рассмотренных выше. Это позволит далее достаточно корректно сравнить характеристики всех представленных моделей антенн.

Ниже представлены диаграммы КНД АР № 4 (рис. 3, а), и ДСА (рис. 3, б). На первом из них нетрудно отметить заметную асимметрию и большую ширину главного лепестка ДН. Попытки добиться осевой симметрии главного лепестка ДН и увеличения КНД в односторонней АР путем небольшой вариации значений ϵ нужного результата не принесли.

Особенности свойств направленности для всех рассматриваемых моделей антенн можно анализировать, рассматривая кривые рис. 4, отображающие изменения максимального коэффициента направленного действия D при вариации частоты.

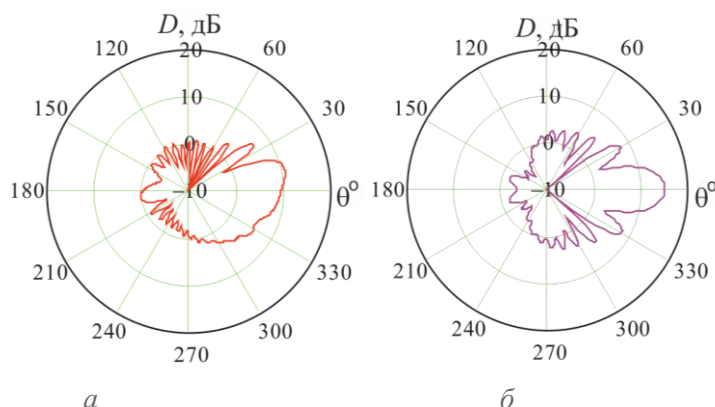


Рис. 3

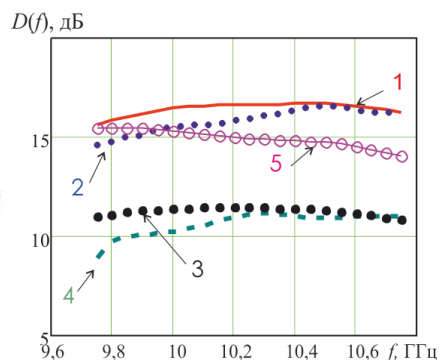


Рис. 4

Цифры на этом рисунке обозначают их принадлежность соответствующих кривых таким конструктивным вариантам антенн:

- 1 – двусторонняя АР продольного излучения (АР №2);
- 2 – двусторонняя АР продольного излучения (АР №1);
- 3 – односторонняя АР нормального излучения (АР №3);
- 4 – односторонняя АР продольного излучения (АР №4);
- 5 – диэлектрическая стержневая антенна (ДСА).

В таблице приведены результаты и параметры исследованных вариантов волноводно-щелевых АР. В ней использованы такие обозначения: n – общее количество щелей; $\Delta\theta_{0,5}^E$ ($\Delta\theta_{0,5}^H$) – ширина главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в плоскости вектора \vec{E} (или \vec{H}) на частоте f_{max} , соответствующей максимальному КНД; ξ_1 – наибольший уровень первого бокового лепестка.

Модели антенн	Геометрические параметры			Максимальный КНД, дБ	Максимальный КУ, дБ	f_{max} , ГГц	Параметры диаграммы направленности		
	L/λ_0	d/λ_0	n				$\Delta\theta_{0,5}^H$	$\Delta\theta_{0,5}^E$	ξ_1
АР №1	6	$0,25\lambda_0$	41	16,6	15,4	10,45	24,1	21,2	-11,3
АР №2	5,75	$0,25\lambda_0$	41	17,1	17,1	10,45	23,02	22,5	-10,4
АР №3	6	$0,5\lambda_0$	8	14,1	7,3	10,2	82,03	11	-10,1
АР №4	6	$0,25\lambda_0$	21	13,3	4,6	10,3	84	21	-2,84
ДСА	6	-	-	15,45	15,45	9,8	21,7	21,49	-7,0

Приводимые в таблице данные в достаточной мере иллюстрируют преимущество АР №1, которая по сравнению с АР №3 обеспечивает выигрыш по КНД в 2,5 дБ, еще больший выигрыш равный 3,0 дБ имеет АР №2. При этом в обоих конструктивных вариантах антенн осевого излучения их главный лепесток ДН обладает практически осевой симметрией.

В то же время решетка нормального излучения, выбранная для сравнения, в силу своих конструктивных особенностей и режима работы принципиально не обладает такой особенностью, что является ее существенным недостатком.

Обсуждение результатов

Исходя из данных, приведенных на рис. 2 и 3 и в таблице, можно заключить, что максимальный КНД в решетках осевого излучения существенно превышает КНД решетки в режиме нормального излучения. Причем АР №2 по сравнению с АР №1 показала дополнительный рост КНД на 0,5 дБ.

Этот эффект достигается за счет того, что АР №2 при отсутствии поглощающего элемента оканчивается открытым концом волновода и расстояние s от крайних щелей до кромки этого конца волновода выбрано примерно равным шагу решетки.

Часть энергии поля в волноводе, ранее терявшаяся в поглотителе, расходуется на излучение из открытого конца, при этом фазировка излучаемого им поля должна соответствовать излучению всей системы щелей.

Отсутствие поглощающего элемента привело к тому, что коэффициент усиления у АР №2 на 1,7 дБ больше, поскольку терявшаяся часть мощности способствует излучению в осевом направлении. Отметим, что потери в металле и диэлектрике, а также на отражение, для всех конструктивных вариантов антенн при этом не учтены. Расчеты показывают, что АР №1 имеет КПД=0,75, а КПД АР № 2 (при тех же условиях) максимален

В рассмотренных конструктивных вариантах количество щелей в АР нормального излучения гораздо меньше по сравнению с АР осевого излучения (при одинаковых габаритных размерах), поэтому излучаемая ею мощность меньше, следовательно, теряемая в поглотителе – больше, коэффициент усиления и КПД (0,21) оказываются значительно меньше.

Из этого следует, что конструктивные варианты АР осевого излучения обладают дополнительными преимуществами в сравнении с решеткой нормального излучения. Аналогичный вывод может быть сделан при сопоставлении характеристик АР осевого излучения и ДСА.

Можно предположить, что АР осевого излучения обладают слабыми сверхнаправленными свойствами, если окажется, что их КНД превышает КНД синфазного равномерно возбужденного раскрыва антенны тех же размеров.

Наличие такой особенности можно проиллюстрировать, оценив КНД антенны с равномерно возбужденной синфазной апертурой площадью S , если принять ее размеры равными размерам излучающей части волноводно-щелевой АР. Допустим, что в такой решетке имеется 21 поперечно ориентированная полуволновая щель (как в рассмотренных выше АР) и расположены они на одной широкой стенке волновода с шагом $d = 0,25 \lambda_0$, тогда площадь излучающего раскрыва

$$S \cong (N - 1)d \cdot l = 20 \cdot 0,25\lambda_0 \cdot 0,5\lambda_0 = 2,5\lambda_0^2,$$

Основываясь на этом, приближенно можно определить КНД:

$$D \cong 4\pi S / \lambda^2 = 10\pi.$$

Что составляет 15 дБ, это на 1,6 дБ меньше КНД АР №1 и на 2,1 дБ, чем КНД АР №2. Следовательно, в определенном смысле эти антенны обладают свойствами «слабой сверхнаправленности»¹, поскольку их КНД превышает КНД синфазного раскрыва той же площади. Однако нужно принять во внимание, что в формировании поля АР осевого излучения участвуют две (как в АР №1) или даже три (как в АР № 2) поверхности. И в этом случае корректнее будет сопоставлять характеристики антенн имеющих одинаковый излучающий объем.

Поэтому, сравнивая свойства решетки осевого излучения и диэлектрической стержневой антенны, отметим, что при одинаковом излучающем объеме, например, АР №2 имеет по КНД преимущество в 1,65 дБ. Можно заключить, что волноводно-щелевые антенные решетки осевого излучения обладают свойством так называемой «слабой сверхнаправленности», и это отражено в заголовке данной статьи.

¹ Термин был впервые предложен проф. И.М. Полищуком

Выводы

Результаты, приведенные в статье, базируются на корректном численном моделировании дифракционной задачи. При этом рассмотрены и проанализированы свойства направленности многощелевых АР на основе заполненного диэлектриком металлического волновода прямоугольного сечения с узкими прямоугольными щелями, прорезанными в двух широких стенках. Исследованы два варианта конструктивного исполнения такой антенны: с поглощающим элементом и без него, но с открытым излучающим концом волновода.

Наличие этих конструктивных особенностей привело (в сравнении с АР нормального излучения) к существенному сужению главного лепестка ДН в плоскости ортогональной по отношению к оси АР, и, как следствие к заметному возрастанию КНД.

Как показали расчеты, предложенные конструкции решеток осевого излучения имеют осесимметричный главный лепесток ДН и повышенный КНД в сравнении с решеткой нормального излучения и диэлектрической стержневой антенной, имеющими аналогичные габаритные размеры. Такие особенности рассмотренных выше волноводно-щелевых АР обусловлены реализацией в них режима осевого излучения при помощи двусторонней щелевой излучающей поверхности.

И здесь следует отметить, что для успешного получения заметного выигрыша по КНД шаг решетки осевого излучения не должен превышать трети длины волны в свободном пространстве. При этом конструкция такой решетки без поглощающего элемента, но с открытым излучающим концом волновода дает дополнительный прирост КНД, коэффициента полезного действия и, следовательно, коэффициента усиления.

Представленные выше данные позволяют указать на возможную перспективу исследований с целью улучшения свойств АР осевого излучения – это оптимизация амплитудно-фазового возбуждения щелей, а также исследование характеристик аналогичных конструкций волноводно-щелевых решеток на основе круглого волновода.

Перспективным направлением практического использования может оказаться, в частности, применение таких АР в качестве облучателя в двухзеркальных конструкциях параболических антенн. Здесь положительную роль сыграет осесимметричность главного лепестка ДН и возможность улучшить облучение малого зеркала, не увеличивая при этом поперечный размер облучателя. В свою очередь малые поперечные размеры такой АР поспособствуют снижению влияния эффектов затенения и реакции зеркала на облучатель (в том числе для однозеркальных параболических антенн).

Список литературы: 1. *Balanis, C. A. Modern antenna handbook.* John Wiley & Sons, Canada, 2008. – 1680 p. 2. *Жук, М.С., Молочков, Ю.Б.* Проектирование антенно-фидерных устройств. – М. ; Л.: Энергия, 1966. – 648 с. 3. *Ерохин, Г.А., Чернышев, О.В., Козырев, Н.Д., Кочержевский, Г.Н.* Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 491 с. 4. *Банков, С.Е., Курушин, А.А.* Расчет излучаемых структур с помощью. – М. : ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.

*Одесская национальная академия связи
имени О.С. Попова*

Поступила в редколлегию 12.09.2016