

УДК 621.396.67

МИКРОПОЛОСКОВАЯ СФЕРИЧЕСКАЯ АКТИВНАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С ЭЛЕКТРОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ПУТЕМ ПЕРЕКОММУТАЦИИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В. Н. Красюк,

доктор техн. наук, профессор

А. Р. Бестугин,

канд. техн. наук, доцент

М. Б. Рыжиков,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрен способ реализации электронного кругового обзора в сферической активной фазированной антенной решетке с одинаковым угловым расстоянием излучателями. Предложена методика поиска амплитудно-фазового распределения, позволяющего синтезировать диаграмму направленности при заданном уровне боковых лепестков. Представлены результаты сравнения характеристик излучения данной антенны и эквивалентной плоской антенной решетки.

В настоящее время представляют интерес исследования по созданию активных фазированных антенных решеток (АФАР), расположенных на выпуклых поверхностях [1]. В качестве излучателей для таких конформных антенн перспективно использовать микрополосковые антенны. Вследствие своей малой толщины микрополосковая антенная решетка (АР), образуя конформную антенну, позволяет использовать большую часть внутреннего пространства внутри сферической АФАР для размещения твердотельных приемопередающих модулей.

Цель настоящей работы — анализ возможности реализации электронного кругового обзора в микрополосковой сферической АР посредством перекоммутации излучателей при условии синтеза диаграммы направленности (ДН) с заданным уровнем боковых лепестков (УБЛ).

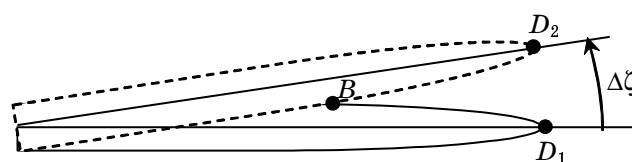
Для ускорения вычислительного процесса при расчете ДН в сферической АФАР с заданными требованиями по характеристикам излучения взята сфера небольшого размера с малым количеством излучателей. В качестве примера решена задача синтеза ДН типа острый луч при заданной ширине в обеих плоскостях порядка 15° и требуемом УБЛ в минус 30 дБ.

Удовлетворить требованиям по реализации остронаправленного излучения в конформной АФАР можно, создав соответствующее амплитудно-фа-

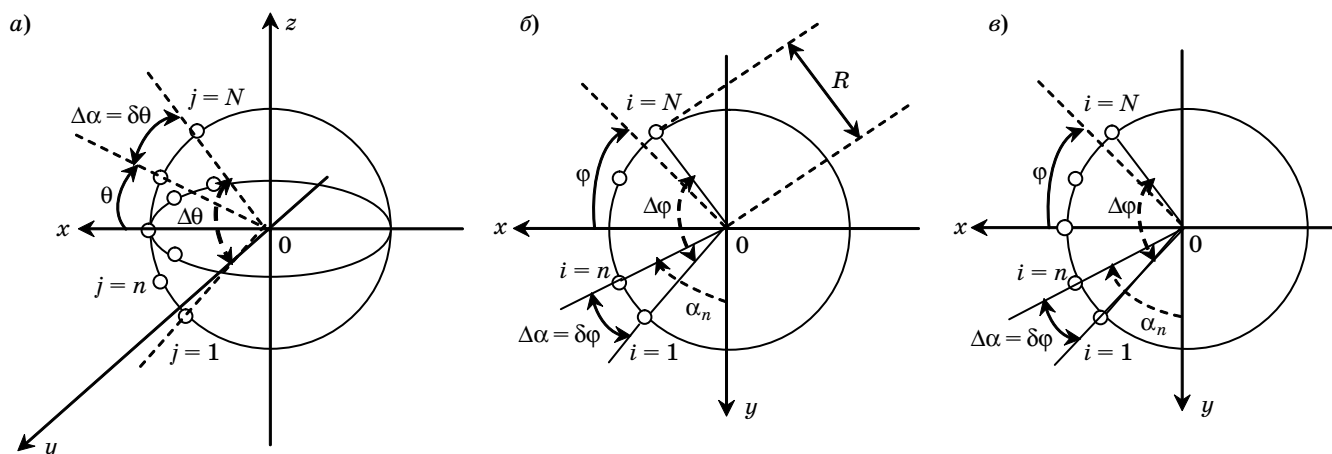
зовое распределение на формирующем раскрыве, т. е. на той части поверхности сферической решетки, которая задается углом раскрыва и создает ДН [2]. Электронное сканирование в АР осуществляется посредством перекоммутации излучателей. При этом происходит последовательный поворот ДН антенны на угол $\Delta\zeta$ (рис. 1) в результате чего максимум ДН перемещается из точки D_1 в точку D_2 .

Это приводит к неравномерности обзора пространства, которую можно характеризовать коэффициентом равномерности, определяемым по значению нормированной на максимум ДН в точке B , которая соответствует пересечению двух последовательно формируемых диаграмм.

Рассмотрим сферическую АФАР (рис. 2, а), излучатели которой расположены друг относительно друга с угловым шагом $\Delta\alpha = \delta\varphi = \delta\theta = 8^\circ$. Выбор шага должен быть таким, чтобы $N_{\max} = 360^\circ / \Delta\alpha$ —



■ Рис. 1. Принцип реализации сканирования путем перекоммутации



■ Рис. 2. Сферическая АФАР: а — общий вид; б — N — четное; в — N — нечетное

число излучателей в экваториальном сечении (yOx) АФАР было целым. При расстоянии между микрополосковыми излучателями, большем $\lambda/2$, появляются дифракционные максимумы. При меньшем расстоянии коэффициент развязки может уменьшиться настолько, что придется учитывать взаимное влияние излучателей по поверхностным и пространственным волнам (например, при построении такой АФАР из вибраторных излучателей).

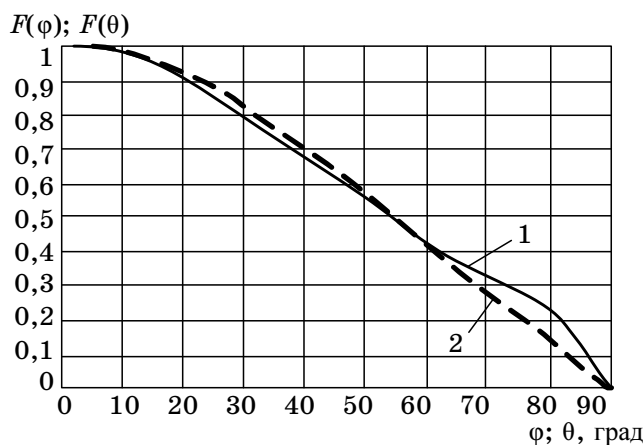
При указанном расположении излучателей за счет перекоммутации можно реализовать последовательный поворот ДН на угол $\Delta\zeta = \Delta\alpha/2$. Для этого необходимо синтезировать ДН в двух случаях. В первом максимум ДН направляется между излучателями, а угол раскрытия выбирается таким, чтобы он охватывал четное количество излучателей (рис. 2, б). Во втором случае максимум ДН проходит через центр симметрии излучателя, а угол раскрытия охватывает нечетное количество излучателей (рис. 2, в). В процессе перекоммутации при ориентировании ДН в заданном угловом направлении для упрощения вычислений фазового распределения система координат поворачивается так, чтобы направление максимума излучения соответствовало в сферической системе координат углом $\varphi = \theta = 0^\circ$.

Для расчета характеристик ДН для второго случая (см. рис. 2, в) были выбраны следующие параметры АФАР: угол формирующего раскрытия $\Delta\varphi = \Delta\theta = 72^\circ$, радиус сферической АР $R = 0,105$ м. Площадь формирующего раскрытия АР составила $S = \pi R^2 \sin(\Delta\varphi/2)$, а соответствующий радиус эквивалентного круглого раскрытия $R_0 = \text{root}(S/\pi) = 0,08$ м (здесь и далее root — функция взятия квадратного корня).

Диаграммы направленности одиночных микрополосковых дисковых антенн рассчитываются по формулам, приведенным в работе [3]. Множитель решетки в силу полной симметрии сферической АФАР одинаков для меридиональной и экватори-

альной плоскостей. Различия между итоговыми ДН в главных плоскостях появятся только, если ДН одиночного излучателя будет несимметричной. Известно [3], что в общем случае ДН двумерных микрополосковых излучателей несимметричны, но для дисковых микрополосковых антенн можно найти такое сочетание толщины диэлектрического покрытия, радиуса антенны и диэлектрической проницаемости, которые при заданной длине волны позволяют получить практически симметричную ДН. На рис. 3 представлены соответствующие ДН одиночной дисковой микрополосковой антенны в экваториальной 1 и меридиональной 2 плоскостях с максимальным различием функции направленности не более 10% при следующих параметрах: длина волны $\lambda = 3$ см, радиус излучателя $r_n = 0,7$ см, толщина подложки $d = 0,24$ см, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1,5$.

В случае, когда ДН оказываются несимметричными, требуется проводить анализ характеристик ДН не только для главных плоскостей антенны, но и для остальных плоскостей для проверки со-



■ Рис. 3. ДН дискового микрополоскового излучателя

хранения заданного для антенны допустимого УБЛ. Проектирование АФАР из излучателей с несимметричной ДН требует существенно больших вычислительных затрат при необходимости изменения ее конструктивных параметров. Кроме того, увеличивается и сложность математического аппарата.

В заданной на рис. 2 системе координат соблюдаются следующие соотношения: $x = R \cos \theta \cos \varphi$, $y = -R \cos \theta \sin \varphi$, $z = R \sin \theta$. Рассмотрим условия формирования остронаправленной ДН в сферической АФАР. Для обоих случаев угловые направления на излучатели АР определяются по соотношениям

$$\varphi_i = \left(\frac{-N-1}{2} + i \right) \Delta \alpha;$$

$$\theta_j = \left(\frac{-N-1}{2} + j \right) \Delta \alpha,$$

в которых $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, N$, а N — ближайшее целое к $N^* \approx \Delta \varphi / \Delta \alpha$.

Координаты излучателей в декартовой системе координат: $x_{ij} = R \cos \theta_j \cos \varphi_i$, $y_{ij} = -R \cos \theta_j \times \sin \varphi_i$, $z_j = R \sin \theta_j$.

Чтобы максимум ДН был ориентирован в направлении $\varphi = \theta = 0^\circ$, необходимо создать следующее фазовое распределение на излучателях:

$$\psi_{ij} = \psi(\theta_j, \varphi_i) = -\frac{2\pi}{\lambda} R \sin |\theta_j| |\sin \varphi_i|,$$

где λ — длина волны излучения.

Требования по формированию ДН с заданными характеристиками излучения: шириной диаграммы, УБЛ — могут быть удовлетворены посредством выбора размера формирующего раскрыва и создания на нем соответствующего амплитудного распределения. В плоских АР для решения указанной задачи используется распределение Дольфа—Чебышева, которое гарантирует самую малую ширину основного луча при заданном УБЛ [4].

В настоящей работе предлагается простая методика коррекции амплитудного распределения Дольфа—Чебышева, учитывающая тот факт, что излучатели в АФАР располагаются на сферической поверхности. Данная методика позволяет по заданному УБЛ формировать в сферической АФАР ДН типа острый луч.

Амплитудное распределение Дольфа—Чебышева в плоской решетке задается при условии равенства расстояний между излучателями. В рассматриваемой сферической АФАР на эквивалентном формирующем раскрыве, расположенном с учетом заданного фазового распределения в плоскости yOz , расстояния между спроецированными на данную плоскость излучателями неодинаковы.

Будем использовать следующую методику для получения значения амплитуд излучателей. Прежде всего рассчитывается расстояние от начала координат до точки проекции излучателя на эквивалентный формирующий раскрыв $r_{ij}^* = \text{root}[(z_{ij})^2 + (y_{ij})^2]$.

Затем считается максимальное значение $R_{\max} = r_{ij}^*$ при $i = j = N$. Далее считается количество фиктивных излучателей, т. е. ближайшее целое к $Z^* = 2R_{\max} / \Delta r_{\text{ф.и}}$, где $\Delta r_{\text{ф.и}} = \lambda / 2$ — расстояние между излучателями.

Потом по соотношениям, представленным в работе [4], рассчитываются амплитуды фиктивных излучателей с распределением Дольфа—Чебышева, гарантирующим получение заданного УБЛ в минус 30 дБ в экваториальной плоскости. Затем проводится квадратичная интерполяция полученного амплитудного распределения, результатом которой представляется в виде функции $\text{Ampl}(r)$, где r — радиальная координата, отсчитываемая от центра эквивалентного раскрыва в плоскости yOz . Далее для каждого излучателя вычисляется его амплитуда $I_{ij} = \text{Ampl}(r_{ij}^*)$.

Из исследований сферических АР с одинаковым расстоянием между излучателями на формирующем раскрыве [2] известно, что их УБЛ может быть выше, чем у плоских АР с аналогичным амплитудным распределением. В случае, если полученный в итоге УБЛ превышает заданный по требованиям, необходимо увеличить величину заданного уровня для перерасчета амплитудного распределения на фиктивных излучателях. Так, для реализации требуемого УБЛ в минус 30 дБ заданный УБЛ для фиктивных излучателей сферической АФАР в рассматриваемом случае составил 35 дБ.

Для расчета ДН сферической АФАР в экваториальной плоскости необходимо учесть разность фаз, возникающую между излучателями за счет разности хода лучей в заданном направлении φ, θ . Будем вычислять ДН в экваториальной плоскости аналогично тому, как это было сделано для цилиндрической АФАР [1], представив ее в следующем виде:

$$F_{\text{с.р}}(\theta, \varphi) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}(\theta, \varphi) I_{ij} \text{Mn}_{ij}(\theta, \varphi) \right|,$$

где $F_{ij}(\theta, \varphi)$ — значение ДН одиночного микрополоскового излучателя в направлении φ, θ ; $\text{Mn}_{ij}(\theta, \varphi)$ — множитель, учитывающий влияние фазовых соотношений в экваториальной плоскости сферической АФАР. Данный множитель для сферической АФАР можно рассчитать по соотношению

$$\text{Mn}_{ij}(\theta, \varphi) = \exp^{-j \frac{2\pi}{\lambda} R [\sin \varphi \cos \alpha_{ij} + (1 - \cos \varphi) \sin \alpha_{ij}]},$$

где $j^* = \text{root}(-1)$; $\alpha_{ij} = \arctg(x_{ij}/y_{ij})$ при условии $y_{ij} > 0$, $\alpha_{ij} = 180^\circ + \arctg(x_{ij}/y_{ij})$ при $y_{ij} < 0$, $\alpha_{ij} = 90^\circ$ при $y_{ij} = 0$.

Учитывая симметричность ДН микрополоскового дискового излучателя, величину $F_{ij}(\theta, \varphi)$ можно рассчитать по соотношению $F_{ij}(\theta, \varphi) = F_{ij}(\beta)$, в котором

$$\beta = \arccos \left(\frac{x_{ij} \cos \varphi \cos \theta - y_{ij} \sin \varphi \cos \theta + z_{ij} \sin \varphi}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} \sqrt{(\cos \varphi \cos \theta)^2 + (\sin \varphi \cos \theta)^2 + (\sin \varphi)^2}} \right),$$

$$F_{ij}(\beta) = 2 \frac{J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda} r_u \sin \beta \right)}{\frac{2\pi}{\lambda} r_u \sin \beta} \frac{1}{\frac{2\pi}{\lambda} d j^* \cos \beta + \sqrt{\varepsilon - (\sin \beta)^2} \cot \left(\sqrt{\varepsilon - (\sin \beta)^2} \frac{2\pi}{\lambda} \right)} \cos \beta.$$

В последнем соотношении: J_1 — функция Бесселя первого порядка, \cot — функция котангенса. На рис. 4, а представлена ДН сферической АФАР 1, полученная в результате применения рассчитанного по указанным выше соотношениям амплитудно-фазового распределения, и ДН плоской АР 2 с распределением Дольфа — Чебышева, составленная из аналогичных микрополосковых излучателей.

Аналогичные ДН для случая, показанного на рис. 2, а, когда в АФАР выбран угол $\Delta\varphi = \Delta\theta = 80^\circ$, представлены на рис. 4, б. Выбор данного угла приводит к соответствующему увеличению формирующего раскрыва и незначительному уменьшению ширины ДН. Включение в полотно сферической АФАР излучателей на угловых позициях $\pm 40^\circ$ приводит к соответствующему росту УБЛ в области от 70 до 90° . Из рис. 4, а и б отчетливо виден общий недостаток всех сферических АР — более высокий уровень бокового излучения для дальних боковых лепестков. Коэффициент равномерности при сканировании путем перекоммутации составил $0,8$.

Избежать неравномерности при сканировании можно совмещением сканирования путем перекоммутации с электронным сканированием за счет создания линейного набега фаз на формирующем раскрыве для поворота основного лепестка в пределах углов θ и φ от 0 до $\Delta\alpha/2 = 4^\circ$.

Поворот луча на столь незначительный угол потребует создания фазового распределения с достаточно плавным изменением фазы на излучателях. Однако столь малое изменение фазовых соотношений не должно привести к ухудшению характеристик излучения сферической АФАР.

Для реализации поворота ДН на угол φ и угол θ необходимо задать соответствующее начальное фазовое распределение в виде

$$\varphi_i = \left(\frac{-N-1}{2} + i \right) \Delta\alpha - \left(\frac{-N-1}{2} + i \right) \frac{\varphi}{2(N-1)};$$

$$\theta_j = \left(\frac{-N-1}{2} + j \right) \Delta\alpha - \left(\frac{-N-1}{2} + j \right) \frac{\theta}{2(N-1)}.$$

Плоская решетка, формирующая ДН, представленную на рис. 4, а и б, имеет размеры 15×15 см, что на 30% меньше, чем размеры раскрыва АФАР. Для реализации электронного кругового обзора пространства необходимо три таких плоских АР [1]. Следовательно, общий требуемый объем внутреннего пространства на борту летательного аппарата для сферической АФАР меньше.

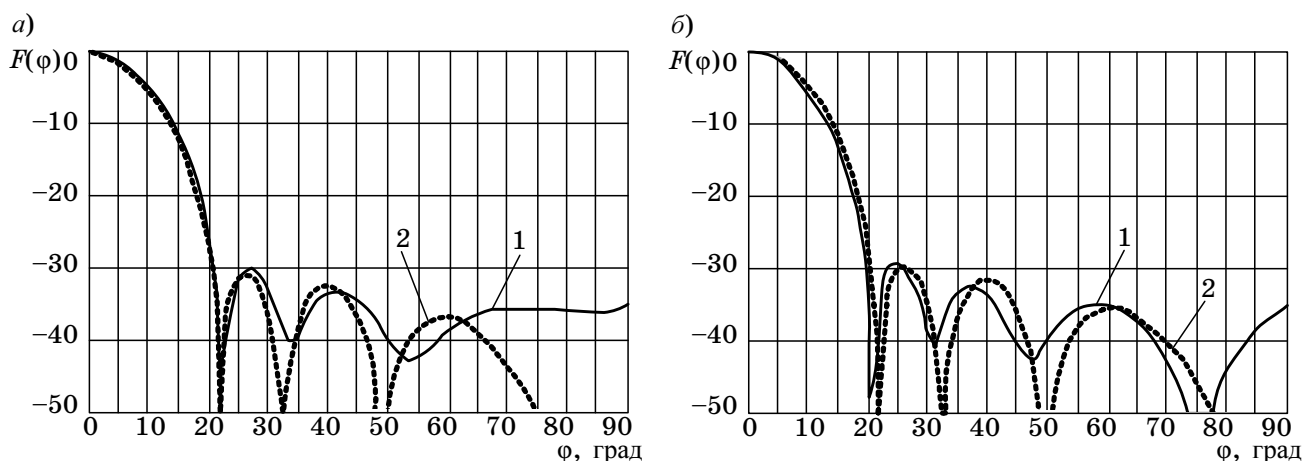
Таким образом, предложенный метод расчета амплитудно-фазового распределения с последующей корректировкой заданного УБЛ позволяет синтезировать сферическую АФАР с электронным обзором пространства при заданных требованиях по боковому излучению. При этом надо учесть то, что у сферической АФАР по сравнению с плоской АР в целом мощность бокового излучения выше, по-

скольку боковые лепестки не спадают так быстро, как у плоской АР. В пределах углового сектора от 50 до 90° средний уровень бокового излучения существенно выше, что может привести к большим помехам по боковым лепесткам при полетах на малой высоте над поверхностью Земли. Подавить это боковое излучение можно, используя свободную от формирования излучения часть раскрыва сферической АФАР, аналогично тому, как это показано в работе [1], путем создания противофазного излучения для боковых лепестков, имеющих неприемлемо большой уровень излучения. При этом главный лепесток, создаваемый на оставшейся части раскрыва, сам должен иметь ширину ДН, соответствующую ширине подавляемого лепестка, и столь малый УБЛ, который бы не приводил к появлению нежелательного излучения в других угловых направлениях.

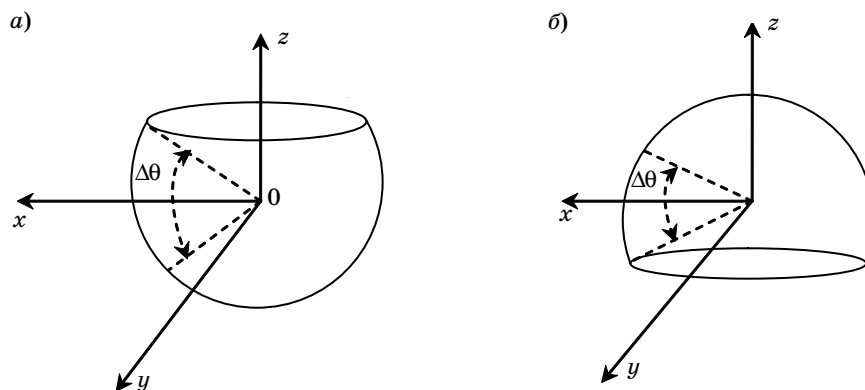
На практике бортовая сферическая АФАР может быть усечена или сверху (рис. 5, а), если ведется обзор нижней части пространства, а антенна располагается в обтекателе под фюзеляжем летательного аппарата. Для рассмотренного выше случая это означает, что электронное сканирование по углу места ведется в секторе углов $-180^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$. Или снизу (рис. 5, б), если ведется обзор верхней части пространства, а антенный отсек расположен над фюзеляжем. При этом электронное сканирование по углу места ведется в секторе углов $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

Совместное использование двух подобных антенн позволяет осуществлять электронный обзор всего пространства вокруг летательного аппарата.

Таким образом, по предложенной в работе методике можно проводить поиск такого амплитудного распределения, которое гарантирует достижение заданного УБЛ в сферической АФАР с равным угловым расстоянием между излучателями. Наряду с существенным преиму-



■ Рис. 4. ДН плоской решетки и сферической АФАР: а — при нечетном количестве излучателей; б — при четном количестве излучателей



■ Рис. 5. Усеченные сферические АФАР: а — сверху; б — снизу

ществом — возможностью электронного обзора пространства — имеются и недостатки. Среди них стоит выделить следующие: по сравнению с эквивалентной плоской АР УБЛ несколько выше в области последних боковых лепестков, сканирование только посредством перекоммутации приводит к неравномерности, поэтому дополнительно следует управлять максимумом ДН за счет перестройки фазового распределения. Гарантия формирования заданного

УБЛ потребовала применения излучателей с симметричной ДН. Кроме того, использование микрополосковых антенн в сферической АФАР позволяет достичь такого уровня развязки, которое не требует учета их взаимного влияния. В то же время построение сферической АФАР с электронным обзором, в качестве излучателей которой могут выступать другие антенны, требует дополнительного анализа указанных факторов на характеристики излучения.

Литература

1. Красюк В. Н., Рыжиков М. Б. Микрополосковая цилиндрическая антенная решетка с уменьшенным числом излучателей и активным подавлением боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. 2008. № 1.
2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004.
3. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986.
4. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967.