

## Уголково́е антенные решетки бегущей волны с центральным возбуждением

Н. Н. Горобец, Ю. Н. Горобец, В. М. Дахов

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 9 февраля 2001 г.*

Исследованы антенные решетки бегущей волны с центральным возбуждением и непараллельным расположением подрешеток – уголково́е антенные решетки. При соответствующем выборе расстояния между излучателями главный максимум диаграммы направленности антенны ориентирован в направлении биссектрисы угла между подрешетками и эта ориентация сохраняется в широком диапазоне частот. На примере волноводно-щелевых антенн изучено влияние угла между подрешетками на диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, ширину главного лепестка, коэффициент рассеяния и другие характеристики антенны, связанные с ними.

Досліджено антенні решітки біжучої хвилі з центральним збудженням і непаралельним розташуванням підрешіток – кутові антенні решітки. При відповідному виборі відстані між випромінювачами головний максимум діаграми спрямованості буде орієнтовано у напрямку бісектриси кута між підрешітками і ця орієнтація зберігається в широкій смузі частот. На прикладі хвилеводно-щілинних антен вивчено вплив кута між підрешітками на діаграму спрямованості, коефіцієнт напрямленої дії, ширину головної пелюстки, коефіцієнт розсіювання та інші характеристики антени, які пов'язані з ними.

Задача обеспечения максимального усиления микроволновых антенн в широком диапазоне частот при заданном уровне боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) является актуальной и важной [1]. Остронаправленные антенные решетки, возбуждаемые бегущей в линии передачи электромагнитной волной, широко применяются на практике как альтернатива остронаправленным зеркальным, линзовым и рупорным антеннам в тех случаях, когда необходимо обеспечить электрическое управление положением луча фазированных антенных решеток. Вопросам теории и техники фазированных антенных решеток в настоящее время уделяется первостепенное внимание из-за возможности обеспечивать “мгновенное” сканирование ДН. В последнее

время в связи с развитием техники космических телекоммуникаций возродился интерес к нефазированным антенным решеткам, поскольку они занимают значительно меньший объем по сравнению с апертурными антеннами при тех же характеристиках направленности. Важно также, что при использовании микроразомкнутых или волноводно-щелевых излучателей можно реализовать плоские или конформные антенны малой толщины.

Широкому распространению подобных антенн препятствует не только сложность их конструкции по сравнению с апертурными антеннами (особенно при высокой направленности, когда в решетках используется огромное количество излучающих элементов), но и особенности принципиального характера. Первая

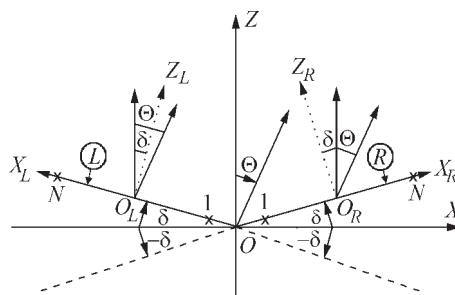
из них связана с тем, что решетки бегущей волны обеспечивают требуемые характеристики и неизменную ориентацию главного максимума диаграммы направленности лишь в узкой полосе частот. Вторая особенность связана с так называемым “эффектом нормали”, т. е. со значительным возрастанием отражений от входа антенны на частоте, при которой ориентация главного максимума ДН совпадает с внешней нормалью к плоскости излучающего раскрыва решетки.

Для увеличения широкополосности линейную антенную решетку можно разделить на две части и возбуждать либо в середине, либо в крайних точках. Так, в [2] указан способ возбуждения линейной антенной решетки в центре магистрального фидера и показано, что при изменении рабочей частоты максимумы парциальных ДН от каждой из частей антенны отклоняются в разные стороны от первоначального направления. При этом суммарная ДН ориентирована по нормали к плоскости решетки в широком диапазоне частот. Такой способ возбуждения можно реализовать как частный случай двухканального возбуждения линейной антенны, исследованного в [3, 4]. В этих работах рассмотрены диапазонные свойства и характеристики направленности волноводных и микрополосковых линейных антенн с расстоянием между соседними излучателями, равным половине длины волны  $\lambda_{g0}$  в линиях передачи на центральной частоте рабочего диапазона. Однако при таком расстоянии между излучателями возникает “эффект нормали”. Наиболее простым и распространенным способом устранения этого эффекта является расположение излучателей на расстояниях, не равных  $\lambda_{g0}/2$ .

В настоящей статье рассмотрена задача обеспечения постоянного направления главного максимума ДН антенных решеток бегущей волны с центральным возбуждением и расстоянием между излучателями  $d \neq \lambda_{g0}/2$  в заданной полосе частот. Для этого используются линейные подрешетки, образующие между собой угол с вершиной в общей точке возбуждения. Значение этого угла выбирается таким, чтобы на длине волны  $\lambda_0$  в свободном пространстве направления главных максимумов

парциальных ДН каждой из подрешеток совпадали с направлением биссектрисы угла между подрешетками.

На рис. 1 показана схема рассматриваемой угловой антенной решетки, которая состоит из двух одинаковых подрешеток (каждая содержит  $N$  излучателей), составляющих угол  $\delta$  с осью  $OX$  общей системы координат  $XOZ$ . На рис. 1 подрешетки обозначены буквами  $L$  и  $R$ , а их локальные системы координат имеют соответствующие индексы. Угол  $\delta$  может быть как положительным, когда между подрешетками образуется своего рода желоб, так и отрицательным, когда между ними образуется ребро. Подводимая к угловой антенной решетке СВЧ-мощность  $P_0$  в общей для каждой из подрешеток точке делится пополам, так что  $P_L = P_R = P_0/2$ . Рассмотренная в [4] линейная антенна с центральным возбуждением является частным случаем угловой антенной решетки при  $\delta = 0$ .



**Рис. 1.** Геометрия и системы координат желобковой (сплошная линия) и коньковой (пунктирная линия) угловых антенн

Рассмотрим основные расчетные соотношения, которые должны выполняться для угловой антенной решетки. Определим расстояние между излучателями решетки, необходимое для обеспечения направления главных максимумов парциальных ДН подрешеток  $L$  и  $R$  вдоль оси  $OZ$  общей системы координат. Из рис. 1 видно, что в локальных системах координат максимумы ДН подрешеток должны быть ориентированы под углом  $\delta$  к осям

$O_L Z_L$  и  $O_R Z_R$ . Направление главного максимума зависит как от пространственного расположения источников излучения, так и от условий их возбуждения. В этом направлении сдвиг фаз полей от соседних излучателей равен нулю. Для антенны бегущей волны с переменнo-фазно связанными с волной возбуждения излучателями это условие имеет вид:

$$\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sin \delta - \left( \frac{2\pi d}{\lambda_{g0}} - \pi \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_{g0}$  – длины волн в свободном пространстве и в линии передачи соответственно,  $d$  – расстояние между излучателями. Из (1) находим требуемое расстояние между излучателями:

$$d = \frac{\lambda_0 \lambda_{g0}}{2(\lambda_0 - \lambda_{g0} \sin \delta)}. \quad (2)$$

В дальнейшем ограничимся рассмотрением уголковоy антенной решетки на основе прямоугольных волноводов, работающих на основном типе волны. В этом случае

$\lambda_{g0} = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2}$  и (2) принимает вид:

$$d = \frac{\lambda_0}{2} \left( \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2} - \sin \delta \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\lambda_c = 2a$  – критическая длина волны в волноводе,  $a$  – размер его широкой стенки. Из (3) можно получить ограничения, налагаемые на величину угла  $\delta$ . Первое ограничение связано с выполнением очевидного условия  $d > 0$ . Второе получаем из требования существования единственного главного максимума парциальных ДН подрешеток в диапазоне углов наблюдения  $-90^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$ :  $d < \lambda_0$ . На рис. 2 показаны зависимости максимально возможных углов  $\delta_{\max}$  от величины  $\lambda_0 / \lambda_c$  при

выполнении этих условий. Видно, что более жестким является условие  $d < \lambda_0$ , которое и используется ниже.

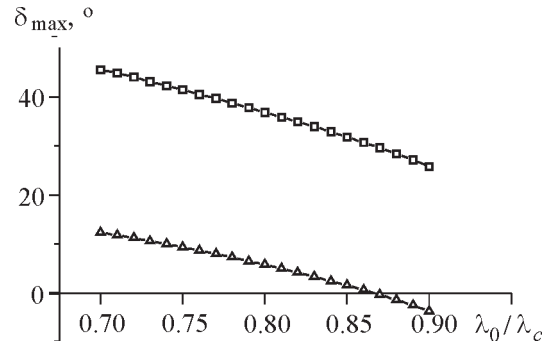


Рис. 2. Максимальные значения углов  $\delta$  при  $d > 0$  (—□—) и  $d < \lambda_0$  (—Δ—)

ДН уголковоy антенной решетки представим в виде суммы парциальных ДН каждой из ее подрешеток. За начало отсчета фазы примем середину уголковоy антенной решетки (точка  $O$  на рис. 1), а нумерацию излучателей в каждой из подрешеток будем вести от этой точки, как показано на рис. 1. Координаты  $x_n$   $n$ -х излучателей в каждой подрешетке определяются соотношением  $x_n = \Delta_1 + (n-1)d$ , где  $\Delta_1$  – расстояние от начала координат до первого излучателя. Комплексные парциальные ДН подрешеток на длине волны  $\lambda$  без учета взаимодействия между отдельными излучателями представим в виде:

$$\dot{f}_L(\Theta, \lambda, \delta) = \dot{f}_1(\delta - \Theta) \sum_{n=1}^N A_n e^{-ikx_n \sin(\delta - \Theta) - in\beta}, \quad (4a)$$

$$\dot{f}_R(\Theta, \lambda, \delta) = \dot{f}_1(\delta + \Theta) \sum_{n=1}^N A_n e^{-ikx_n \sin(\delta + \Theta) - in\beta}, \quad (4б)$$

где  $\dot{f}_1$  – комплексная ДН одиночного излучателя,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $A_n$  – амплитуда возбуждения  $n$ -го излучателя,  $\beta$  – разность фаз между соседними излучателями в систе-

ме возбуждения. Тогда ДН уголкового антенной решетки имеет вид:

$$\dot{f}(\Theta, \lambda, \delta) = \dot{f}_L(\Theta, \lambda, \delta) + \dot{f}_R(\Theta, \lambda, \delta). \quad (5)$$

Для щелевых излучателей в прямоугольном волноводе, связанных с полем волны возбуждения переменного-фазно,  $\beta = 2\pi d/\lambda_g - \pi$ . В дальнейшем будем рассматривать только случай постоянного амплитудного распределения  $A_n \equiv 1$ , а ДН излучателя в плоскости, проходящей через линию расположения излучателей, определим по формуле для продольной щели в бесконечном

$$\text{экране: } \dot{f}_1(\delta \pm \Theta) = \frac{\cos(\pi/2 \sin(\delta \pm \Theta))}{\cos(\delta \pm \Theta)}, \text{ в диа-}$$

пазоне углов  $(-90^\circ \pm |\delta|) \leq \Theta \leq (90^\circ \pm |\delta|)$

и  $\dot{f}_1(\delta \pm \Theta) \equiv 0$  вне этого диапазона.

Отметим, что расстояние  $d$  между излучателями в уголкового антенной решетке, рассчитанное по соотношениям (2)-(3), зависит от двух параметров: угла  $\delta$  и отношения  $\lambda_0/\lambda_c$ . Это позволяет при заданном значении  $\lambda_0/\lambda_c$  получать различную геометрию уголкового антенной решетки с требуемыми параметрами. Угол  $\delta$  в дальнейшем ограничим диапазоном  $|\delta| \leq 15^\circ$ . Это ограничение при данной постановке задачи позволяет не учитывать затенение подрешетками друг друга при больших углах наблюдения.

На основе приведенных выше соотношений посредством компьютерного моделирования для уголкового антенной решетки были получены и проанализированы следующие ее характеристики: ДН, ширина  $2\Delta\Theta$  ДН по уровню  $-3$ дБ, парциальный коэффициент направленного действия (КНД)  $D$  в  $H$ -плоскости. Были также рассчитаны парциальный коэффициент рассеяния  $\beta_3$  по уровню  $-3$ дБ (определяемый как отношение мощности, излучаемой антенной через главный лепесток вне сектора углов, соответствующего ширине главного максимума ДН по уровню  $-3$ дБ, и через боковые и задние лепестки, ко всей

излучаемой антенной мощности) и связанные с ним коэффициенты качества антенны в виде отношений  $Q_1 = D/\beta_3$  и  $Q_2 = D/(2\Delta\Theta\beta_3)$ .

На рис. 3 приведены ДН уголкового и линейных антенных решеток с числом щелей в подрешетках  $N = 5$  при различных значениях отношения  $\lambda_0/\lambda_c$  и угла  $\delta$ . В расчетах расстояние  $d$  между излучателями при изменении угла  $\delta$  определялось из (3), а расстояние от начала координат до первых щелей в подрешетках было принято равным  $d/2$ . Расчеты были проведены для волновода 3-см диапазона стандартного сечения  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Видно, что при одинаковых абсолютных значениях угла  $\delta$  ДН желобковой ( $\delta > 0$ ) и коньковой ( $\delta < 0$ ) антенн отличаются. Это объясняется тем, что при ориентации главного максимума в направлении биссектрисы угла между подрешетками в желобковой антенне расстояние между излучателями больше, чем в коньковой. В результате главный лепесток ДН желобковой антенны уже, а боковые лепестки, особенно дальние, выше. При увеличении угла  $\delta$  эти эффекты усиливаются вплоть до появления дифракционных максимумов высших порядков. Интересно, что уровень ближних боковых лепестков практически не зависит от угла  $\delta$  (при  $|\delta| \leq 15^\circ$ ).

ДН исследуемых волноводно-щелевых уголкового антенных решеток весьма сложным образом зависят от отношения рабочей длины волны к критической длине волны волновода. В частности, при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.9$ , когда дисперсионная характеристика волновода имеет большую крутизну, в ДН линейной антенны в диапазоне углов наблюдения появляется дифракционный лепесток. В желобковой антенне этот эффект из-за большего расстояния между излучателями усиливается и дифракционные лепестки наблюдаются при меньших углах и отношениях  $\lambda_0/\lambda_c$ . В коньковой антенне дифракционные лепестки подавляются за счет уменьшения расстояния между излучателями при увеличении угла  $\delta$ . Однако следует иметь в виду, что ширина главного лепестка ДН в этом случае увеличивается.

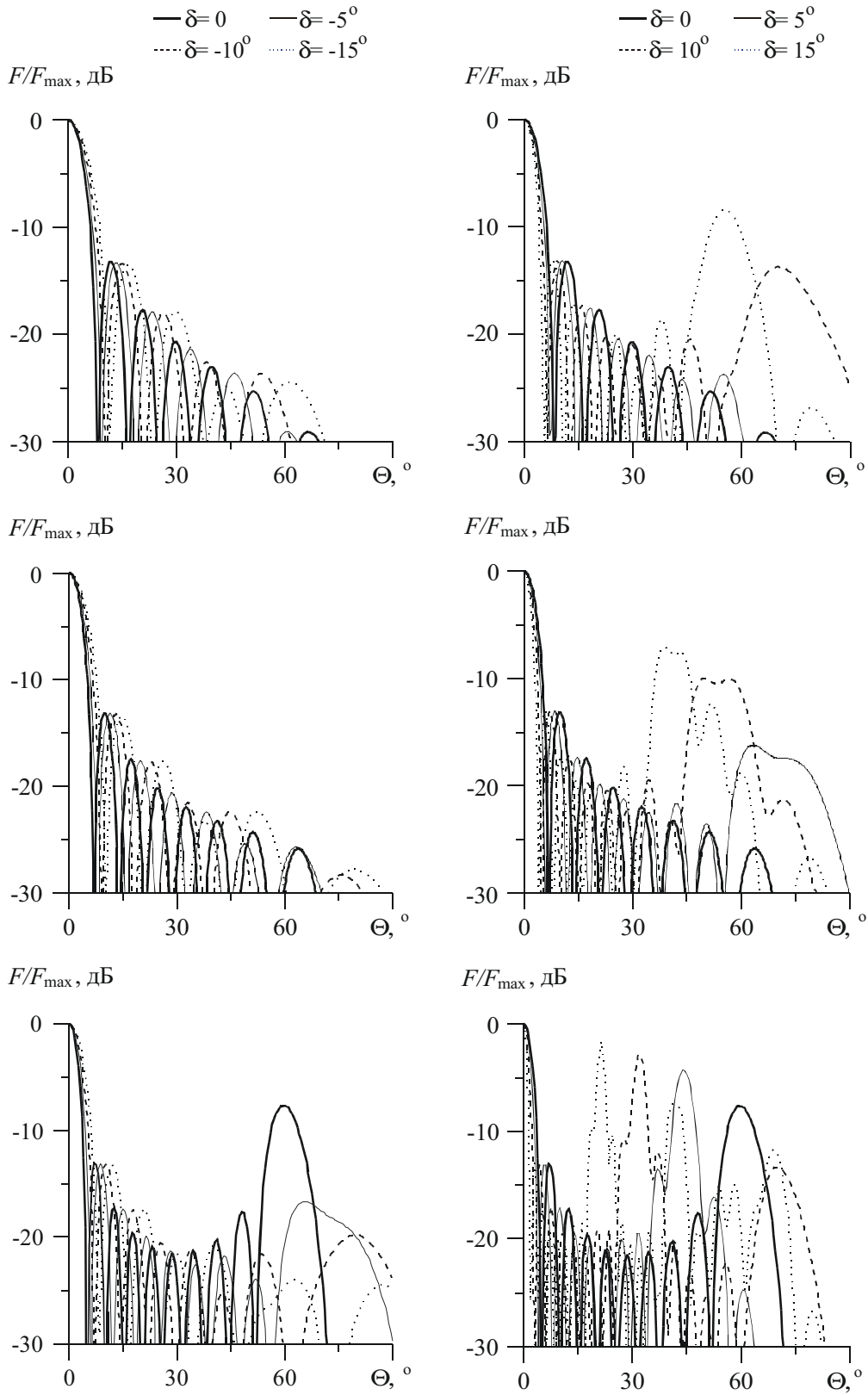


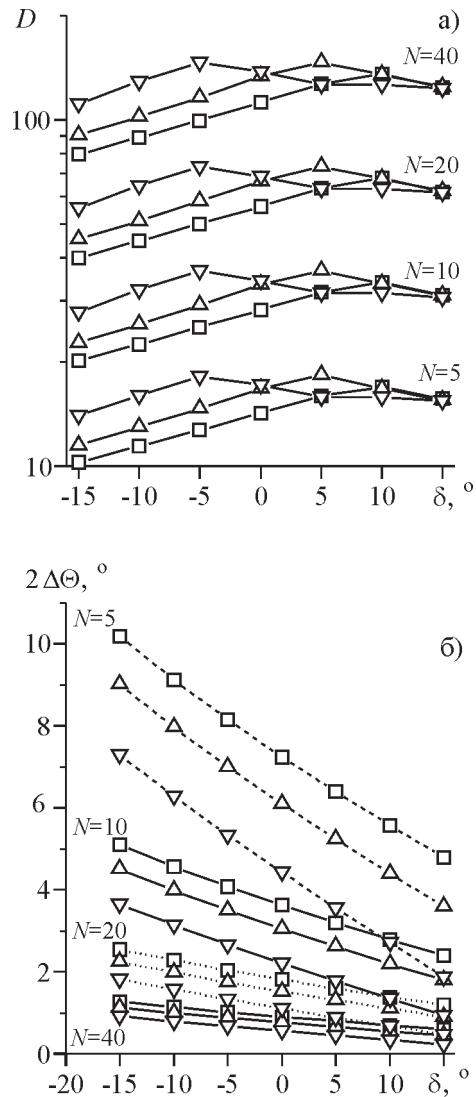
Рис. 3. Диаграммы направленности уголкового антенного решетки

Фазовые ДН угловых антенных решеток в пределах главного лепестка ДН до уровня  $-15 \div -20$  дБ практически постоянны и слабо зависят от угла  $\delta$ . Отсюда следует, что такие антенные решетки можно с успехом использовать в качестве облучателей остронаправленных зеркальных антенн.

Из проведенного компьютерного анализа ДН исследуемой угловой волноводно-щелевой решетки следует, что ее КНД  $D$  при одном и том же числе излучателей зависит от угла между подрешетками. Приведенные на рис. 4, а зависимости  $D$  от  $\delta$ , рассчитанные для числа излучателей  $2N = 10, 20, 40, 80$  при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.7, 0.8, 0.9$  и постоянном амплитудном распределении источников поля, подтверждают это предположение. Видно, что в коротковолновой части рабочего диапазона частот волновода максимум КНД обеспечивается желобковой антенной, причем при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.7$  оптимальный угол  $\delta_{\text{opt}} = 10^\circ$ , при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.8$  угол  $\delta_{\text{opt}} = 5^\circ$ . В длинноволновой части диапазона волновода максимум КНД обеспечивается коньковой антенной (при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.9$  угол  $\delta_{\text{opt}} = -5^\circ$ ). Оптимальные значения угла между подрешетками не зависят от числа излучателей.

На рис. 4, б приведены зависимости ширины главного лепестка ДН по половинной мощности угловой волноводно-щелевой антенны от угла  $\delta$ . Анализ этих данных показал, что зависимость углового разрешения антенны от ее электрической длины  $2L/\lambda$  хорошо описывается выражением, полученным для линейной антенны:  $2\Delta\Theta^\circ = 51/(2L/\lambda)$ , где  $L = \Delta_1 + (N-1)d$  ( $\Delta_1$  – расстояние от начала координат до первой щели;  $d$  – расстояние между щелями, которое для заданного значения угла  $\delta$  находится из соотношения (3)). Из рис. 4, б видно, что ширина главного лепестка тем меньше, чем больше отношение рабочей длины волны к критической длине волновода.

Зависимости коэффициента направленного действия и ширины главного лепестка ДН угловых антенных решеток от числа излучателей определяются отношением  $\lambda_0/\lambda_c$  и при  $\delta = \text{const}$  качественно такие же, как



**Рис. 4.** Коэффициент направленного действия  $D$  (а) и ширина главного лепестка  $2\Delta\Theta$  (б) угловых антенных решеток при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.7$  ( $\square$ ),  $\lambda_0/\lambda_c = 0.8$  ( $\triangle$ ),  $\lambda_0/\lambda_c = 0.9$  ( $\nabla$ )

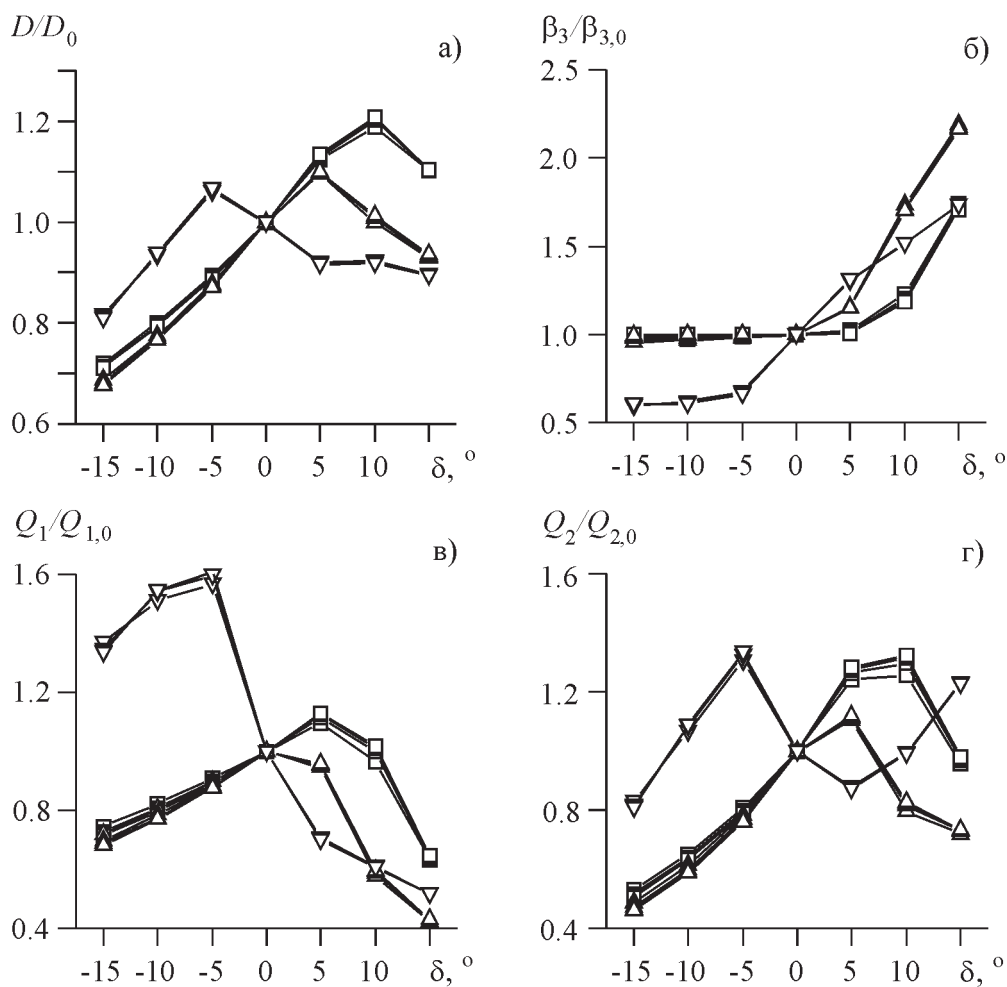
и для линейной антенны с центральным возбуждением [3].

Рассмотрим более подробно влияние угла между подрешетками на КНД и парциальный коэффициент рассеяния  $\beta_3$  угловой волноводно-щелевой антенны, а также на коэффициенты качества:  $Q_1$  – отношение КНД к парциальному коэффициенту рассеяния и  $Q_2$  – отношение КНД к произведению парциального коэффициента рассеяния на ширину

главного лепестка. Для удобства анализа и наглядности все эти параметры рассчитывались по отношению к их значениям для линейной антенны ( $\beta_{3,0}$ ,  $Q_{1,0}$  и  $Q_{2,0}$ ). Результаты расчетов представлены на рис. 5, а-г. Каждая серия кривых для конкретного отношения  $\lambda_0/\lambda_c$  содержит зависимости для антенных решеток с числом излучателей  $2N = 10, 20, 40, 80$ . Из рис. 5 видно, что за счет расположения щелевых подрешеток под

оптимальным углом можно повысить КНД на 20 % в желобковой антенне и на 10 % в коньковой. Коэффициент рассеяния меньше в коньковой, причем с ростом  $\lambda_0/\lambda_c$  это различие увеличивается. Коэффициенты качества также выше для коньковых антенн.

Таким образом, уголкового антенные решетки при оптимальных углах между подрешетками обеспечивают лучшие характеристики направленности по сравнению с линейными решетками.



**Рис. 5.** Относительные значения коэффициента направленного действия  $D/D_0$ , парциального коэффициента рассеяния  $\beta_3/\beta_{3,0}$ , показателей качества  $Q_1/Q_{1,0}$  и  $Q_2/Q_{2,0}$  при  $\lambda_0/\lambda_c = 0.7$  (—□—),  $\lambda_0/\lambda_c = 0.8$  (—△—),  $\lambda_0/\lambda_c = 0.9$  (—▽—)

### Литература

1. Проблемы антенной техники. Под ред. Л. Д. Бахраха, Д. И. Воскресенского. Москва, Радио и связь, 1989, 368 с.
2. Антенны и устройства СВЧ (Проектирование фазированных антенных решеток). Под ред. Д. И. Воскресенского. Москва, Радио и связь, 1981, 432 с.
3. Н. Н. Горобец, Ю. Н. Горобец, В. М. Дахов. Радиофизика и радиоастрономия. 1998, **3**, №1, с. 87-91.
4. Н. Н. Горобец, Ю. Н. Горобец, В. М. Дахов. Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Украина, 14-17 сентября 1998 г., **2**, с. 476-478.

### Angle Antenna Arrays of Travelling Wave with Central Excitation

**N. N. Gorobets, Yu. N. Gorobets,  
V. M. Dakhov**

The travelling wave antenna arrays with the central excitation and nonparallel arrangement of linear subarrays (angle arrays) are investigated. Under the appropriate choice of distance between radiators the main maximum of the pattern is oriented in the direction of bisector of the angle between subarrays and its orientation is kept in wide frequency range. On an example of waveguide-slot array the influence of the angle between subarrays on the pattern, directivity coefficient, main lobe width, scattering coefficient, and other related antenna's parameters is examined.