

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

РАДИОТЕХНИКА  
И  
ЭЛЕКТРОНИКА

Том XXVII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

8

---

МОСКВА · 1982

УДК 621.396.67.01

## О НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВАХ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

*Азюкин А. В., Классен В. И.*

Представлены результаты численного анализа диаграмм направленности и коэффициента направленного действия раскрывающихся параболических антенн зонтичного типа при вариации их геометрии, выполненного для модели антенны в виде набора клиновидных вырезов из параболического цилиндра. Определено наилучшее положение облучателя в таких антеннах как для осевого излучения, так и для отклоненных лучей. Приведено сравнение численных и экспериментальных результатов, полученных на макетах зонтичных антенн, даны рекомендации к выбору геометрии таких антенн.

### ВВЕДЕНИЕ

Зонтичные варианты одно- и двухзеркальных раскрывающихся антенн давно применяются в системах связи. Эти антенны сочетают простоту и легкость конструкции, сравнительно малую стоимость с приемлемыми электродинамическими характеристиками [1, 2]. При проектировании таких антенн возникает вопрос о выборе геометрии (числа секций  $N$ , отношения фокусного расстояния  $F$  к диаметру антенны  $D$  и электрического размера антенны  $D/\lambda$ ), которая несущественно ухудшает диаграмму направленности (ДН) и коэффициент направленного действия (КНД) по сравнению с параболоидом вращения тех же размеров. Важно также выяснить степень ухудшения ДН и КНД при отклонении главного луча антенны от осевого направления и смещении облучателя. Некоторые зависимости ДН и КНД от геометрии зонтичной антенны приводятся в работе [2], однако эти данные не позволяют ответить на поставленные выше вопросы.

### 1. ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим однозеркальную зонтичную антенну (рис. 1, а), состоящую из  $N$  одинаковых отражающих секций, образованных в результате сечения параболического цилиндра плоскостями  $P$  и  $Q$  (на рис. 1, б секция заштрихована). Эти сечения проводятся через вершину  $O''$  образующей параболы под углами  $\pm\pi/N$  к плоскости  $R$ , также проходящей через  $O''$  и перпендикулярной к фокальной оси  $NN'$  параболического цилиндра с фокусным расстоянием  $F_1$ . При этом фокусное расстояние парабол, образующихся в плоскостях  $P$  и  $Q$ , равно  $F_0 = F_1/\cos^2(\pi/N)$ . Эти параболы являются местом расположения ребер жесткости зонтичной антенны. Видно, что сама зонтичная антенна может быть вписана в параболоид вращения с фокусным расстоянием  $F_0$ , а в нее может быть вписан параболоид вращения с фокусным расстоянием  $F_1$ , причем  $F_0 - F_1 = F_0 \sin^2(\pi/N)$  (рис. 1, а). Вершины вписанного и описанного параболоидов совпадают. При увеличении числа секций  $N$  вписанный параболоид вращения стремится к описанному и  $F_1 \rightarrow F_0$ .

Произвольное сечение поверхности зонтичной антенны плоскостью, проходящей через ось  $O''Z''$  (рис. 1, а, б) есть парабола с фокусным расстоянием

$$f(\xi) = F_0 \cos^2 \frac{\pi}{N} / \cos^2 \left( \xi - \frac{\pi}{N} \right),$$

где  $\xi$  — азимутальный угол,  $\xi \in [0, 2\pi/N]$  внутри секции. Выберем систему координат  $F_0XYZ$  так, как показано на рис. 1, в. Тогда уравнение поверхности произвольной секции зонтичной антенны может быть записано в виде

$$(1) \quad r(\psi, \xi) = 2F_0 \left( \cos \psi + \sqrt{\cos^2 \psi + \frac{\cos^2 \left( \xi - \frac{\pi}{N} \right)}{\cos^2 \frac{\pi}{N}} \sin^2 \psi} \right).$$

Пусть одно из ребер антенны расположено в плоскости  $F_0XZ$ , а поле в апертуре облучателя линейно поляризовано ( $\vec{E} \parallel \vec{X}$ ).

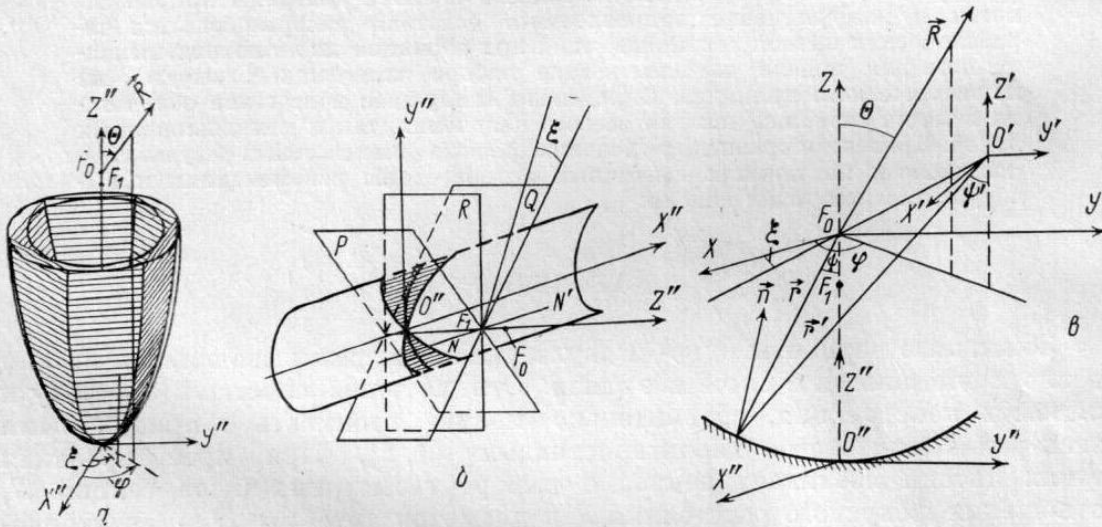


Рис. 1. Геометрия зеркальной зонтичной антенны: а — общий вид зонтичной антенны, б — секция зонтичной антенны (вырезка из параболического цилиндра), в — используемые обозначения и системы координат

Для основной поляризации поля зонтичной антенны в дальней зоне в плоскости  $\varphi=0$  справедливо выражение [3]

$$(2) \quad E_1(\Theta) = -\frac{iz_b \cos \Theta}{2\lambda R} e^{-jkR} \int_S j_{sx} e^{-ikq} dS,$$

где  $z_b$  — волновое сопротивление свободного пространства,  $R$  — расстояние от начала координат до точки наблюдения в дальней зоне (рис. 1, в),  $j_{sx}$  — составляющая поверхностного тока по основной поляризации,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $q$  — фаза элемента тока  $j_{sx}$ , пересчитанная на плоскость, перпендикулярную  $\vec{R}$  и проходящую через  $F_0$ ,

$$(3) \quad q = q(\psi, \xi, \Delta z) = r' + r \cos \Theta \cos \psi - r \sin \Theta \sin \psi \cos \left[ \xi + \frac{2\pi}{N}(n-1) - \varphi \right];$$

$$n = 1, \dots, N;$$

$$r' = \sqrt{(r \sin \psi \cos \xi + \Delta x)^2 + (r \sin \psi \sin \xi + \Delta y)^2 + (r \cos \psi + \Delta z)^2},$$

а уравнение поверхности  $r=r(\psi, \xi)$  определяется выражением (1). При расчетах полагалось, что облучатель расположен в точке  $O'$ , смещенной на  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  относительно точки  $F_0$ , и имеет ДН вида  $\cos(\alpha\psi')$ , максимум которой направлен к вершине зонта. Расчет функции тока  $j_{sx}$  проводился в соответствии с результатами работы [4].

Под ДН зонтичной антенны в дальнейшем понимается зависимость  $E_1(\Theta)$  с соответствующей нормировкой, а под КНД —  $G = E_1^2(\Theta)/E_0^2(0)$ ,

где  $E_0(0)$  — поле в дальней зоне описанного параболоида с облучателем в точке  $F_0$ . Отметим также, что наилучшее положение облучателя, обеспечивающее максимум  $G$ , даже для осевого излучения заранее неизвестно, хотя ясно, что оно находится внутри промежутка  $[F_1, F_0]$ . В дальнейшем это положение облучателя будем характеризовать величиной  $\Delta z$ , отсчитываемой от точки  $F_0$ .

При расчете двухзеркальных раскладных антенн предполагается, что они построены по схеме Кассегрена, т. е. главное зеркало — зонтичное, а контррефлектор — идеальный гиперboloид вращения, один из фокусов которого смещен на  $\Delta z$  относительно точки  $F_0$ . Будем считать (см. [4]), что отражение от контррефлектора происходит по законам геометрической оптики

$$\vec{r}_{\text{отр}} = \vec{r}_{\text{пад}} - 2(\vec{n}, \vec{r}_{\text{пад}})\vec{n},$$

а поле рефлектора задается выражением (2). Затенение учитывается при выборе области интегрирования в (2) — опускается вклад токов рефлектора, попадающих в проекцию контррефлектора.

## 2. ОПТИМАЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ НА ОСИ

Найдем такое положение облучателя на оси  $O''Z$  (величину  $\Delta z$ ), которое обеспечит максимум  $G$  в том смысле, что будем искать такое  $\Delta z$ , при котором фазовый фронт волны, исходящей от зеркала, наиболее близок к плоскому. В качестве соответствующих критериев близости выберем два: равномерный и среднеквадратичный

$$(4) \quad \min_{\Delta z} \max_{\psi, \xi} |q(\psi, \xi, \Delta z) - q_0|,$$

$$(5) \quad \min_{\Delta z} \int_0^{\psi_{\text{кр}}} \int_0^{2\pi/N} [q(\psi, \xi, \Delta z) - q_0]^2 d\psi d\xi,$$

где  $\psi_{\text{кр}}$  — краевой угол зеркала, а  $q_0$  — константа, которую можно определить в виде

$$a) \quad q_0 = 2F_0 + \Delta z,$$

$$б) \quad q_0 = \frac{N}{2\pi\psi_{\text{кр}}} \int_0^{\psi_{\text{кр}}} \int_0^{2\pi/N} q(\psi, \xi, \Delta z) d\psi d\xi.$$

Понятно, что критерии (4), (5) вкуче с условиями а), б) могут дать различные значения для  $\Delta z_{\text{опт}}$ , и окончательный выбор можно будет сделать лишь после сравнения с расчетами КНД на ЭВМ.

Для осевого излучения ( $\Theta=0$ ) выражение (3) принимает вид

$$q = \sqrt{r^2 + 2r\Delta z \cos \psi + \Delta z^2} + r \cos \psi.$$

Считая  $\Delta z \ll r$ , что справедливо при  $N \gg 1$ , получаем

$$(6) \quad q \approx r(1 + \cos \psi) + \Delta z \cos \psi.$$

Выражение (1) при  $N \gg 1$  можно записать в виде

$$(7) \quad r = \frac{F_0}{1 + \cos \psi} \left[ 2 - \frac{1 - \cos \psi}{\cos^2 \frac{\pi}{N}} \left( \cos^2 \left( \xi - \frac{\pi}{N} \right) - \cos^2 \frac{\pi}{N} \right) \right].$$

Окончательно для  $q$  с учетом (6), (7) имеем

$$(8) \quad q = 2F_0 + F_0(\cos \psi - 1) \left( \frac{\cos^2 \left( \xi - \frac{\pi}{N} \right)}{\cos^2 \frac{\pi}{N}} - 1 \right) + \Delta z \cos \psi.$$

В случае а) после несложных вычислений получаем

$$(9) \quad \frac{\Delta z}{F_0} = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{N} \sim -\frac{1}{2} \frac{\pi^2}{N^2},$$

$$\frac{\Delta z}{F_0} = 1 - \frac{1 + \sin \frac{2\pi}{N} / \frac{2\pi}{N}}{2 \cos^2 \frac{\pi}{N}} \sim -\frac{2}{3} \frac{\pi^2}{N^2}.$$

В случае б) для константы  $q_0$  получаем следующее выражение:

$$(10) \quad q_0 = q_{\text{ср}} = \Delta z \frac{\sin \psi_{\text{кр}}}{\psi_{\text{кр}}} + F_0 \left[ 2 + \left( \frac{\sin \psi_{\text{кр}}}{\psi_{\text{кр}}} - 1 \right) \left( \frac{\sin \frac{2\pi}{N} / \frac{2\pi}{N} + 1}{2 \cos^2 \frac{\pi}{N}} - 1 \right) \right]$$

и, подставляя (10) в (4), (5), имеем

$$(11) \quad \frac{\Delta z}{F_0} = -2 \frac{\sin^2 \frac{\psi_{\text{кр}}}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{N} + \left( \frac{\sin \psi_{\text{кр}}}{\psi_{\text{кр}}} - 1 \right) \left( \frac{1 + \sin^2 \frac{2\pi}{N} / \frac{2\pi}{N}}{2 \cos^2 \frac{\pi}{N}} - 1 \right)}{\frac{\sin \psi_{\text{кр}}}{\psi_{\text{кр}}} - \cos \psi_{\text{кр}}} \sim$$

$$\sim -0,82 \frac{\pi^2}{N^2},$$

$$\frac{\Delta z}{F_0} = 1 - \frac{1 + \frac{\sin \frac{2\pi}{N}}{2\pi/N}}{2 \cos^2 \frac{\pi}{N}} \sim -\frac{2}{3} \frac{\pi^2}{N^2}.$$

Таким образом, получено три различных «оптимальных» положения облучателя зонтичной антенны, причем  $\Delta z/F_0$  весьма слабо зависит от глубины зеркала  $\psi_{\text{кр}}$ , а при  $N \gg 1$  асимптотическое значение  $\Delta z/F_0$ , получаемое по критерию (5), совпадает с результатом работы [2]. Ни одно из трех оптимальных положений облучателя зонтичной антенны не совпадает с результатом работы [5]. Какое же положение облучателя наилучшее? Ответ на этот вопрос дают результаты прямых расчетов  $G(\Delta z)$ , приведенные на рис. 2 (крестики указывают на положение максимума соответствующей кривой). Видно, что при увеличении  $N$  значение  $(\Delta z/F_0)_{\text{опт}} \rightarrow -2/3 (\pi^2/N^2)$ . Это справедливо при различных уровнях облучения края зеркала и  $F_0/D$ . При уменьшении  $N$  оптимальное положение облучателя приближается к точке  $F_1$  — «фокусу» соответствующего параболического цилиндра. На практике необходимо настраивать зонтичную антенну, помещая первоначально облучатель в точку  $\Delta z = -(2/3) (\pi^2/N^2) F_0$ , и, передвигая его в сторону  $F_1$ , добиваться максимального КНД.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Большинство характерных свойств ДН зонтичных антенн можно предсказать из простых физических соображений, не прибегая к расчетам на ЭВМ. Так, при увеличении числа секций  $N$  зонтичная отражающая поверхность стремится к поверхности описанного идеального параболоида вращения. Малое количество секций, как следует из геометрических соображений, приводит к существенной несинфазности поля в апертуре и, как

следствие, к падению КНД и увеличению уровня боковых лепестков (УБЛ). В то же время увеличение отношения  $F_0/D$  уменьшает несинфазность поля (зеркало становится «более плоским»), и поэтому ДН и КНД

Рис. 2. Зависимость КНД зонтичной антенны от положения облучателя на ее фокальной оси,  $D/\lambda=300$ ;  $F_0/D=0,5$ : 1 -  $N=24$ ; 2 -  $N=36$ ; 3 -  $N=40$ ; облучение края - 10 дБ

Рис. 3. Диаграммы направленности однозеркальных зонтичных антенн,  $D/\lambda=750$ : ДН облучателя  $\cos(1,5\psi)$ ,  $F_0/D=0,6$  (1 при  $N=\infty$ ; 4 при  $N=36$ ); ДН облучателя  $\cos(\psi)$ ,  $F_0/D=0,33$  (2 при  $N=\infty$ ; 3 при  $N=36$ ; 5 при  $N=72$ )

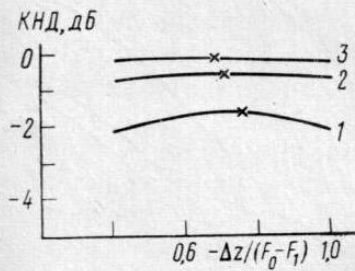


Рис. 2

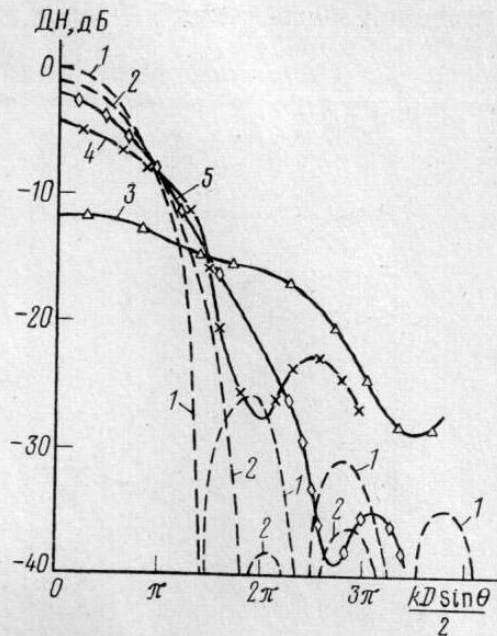


Рис. 3

(при  $N=\text{const}$ ) опять приближаются к соответствующим функциям для параболоида вращения. Если зафиксировать  $N$  и увеличивать  $D/\lambda$ , то с некоторого характерного размера антенны фазовая ошибка на периферии

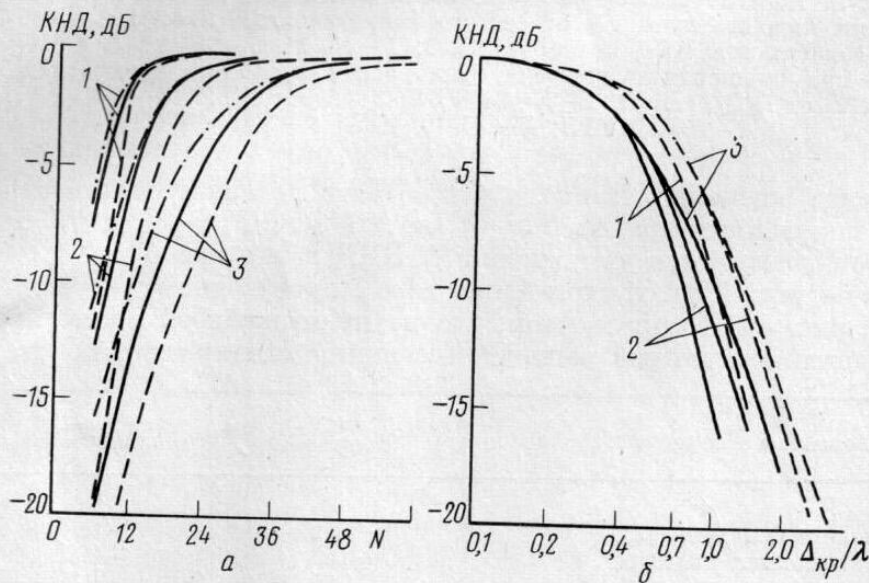


Рис. 4. Рассчитанные значения КНД однозеркальной зонтичной антенны: а - зависимости КНД от числа секций при  $F_0/D=0,46$  (1 -  $D/\lambda=30$ ; 2 -  $D/\lambda=100$ ; 3 -  $D/\lambda=300$ ), пунктир -  $\Delta z/F_0 = -2/3(\pi^2/N^2)$ ; сплошные кривые -  $\Delta z/F_0 = -(1/2) \text{tg}^2(\pi/N)$ ; штрихпунктир -  $\Delta z/F_0=0$ ; б - зависимости КНД от  $\Delta_{кр}/\lambda$  (1 -  $D/\lambda=30$ ; 2 -  $D/\lambda=60$ ; 3 -  $D/\lambda=100$ ), сплошные кривые -  $F_0/D=0,3$ ; пунктир -  $F_0/D=0,75$

зеркала становится сравнимой с длиной волны  $\lambda$ . В этом случае следует ожидать существенного ухудшения характеристик антенны.

Основные результаты расчетов ДН зонтичных антенн приведены на рис. 3. Все ДН нормированы к ДН параболоида вращения с  $F_0/D=0,6$  и освещенностью на краю - 10 дБ (кривая 1;  $g(\psi) = \cos(1,5\psi)$ ). Увеличение  $F_0/D$  от 0,33 до 0,6 (кривые 3, 4) приводит к существенному улучшению характеристик ДН - вполне сопоставимому улучшению с удвоением числа

секций (кривые 5;  $N=72$ ). Кривая 2 приведена для сравнения ДН параболоидов вращения с различными  $F_0/D$ .

На рис. 4, а, б представлены зависимости КНД ( $N$ ,  $\Delta_{кр}/\lambda$ ) зонтичных антенн, где  $\Delta_{кр}$  — максимальная геометрическая ошибка на краю. При увеличении числа секций  $N$  КНД растет (рис. 4, а), приближаясь к КНД

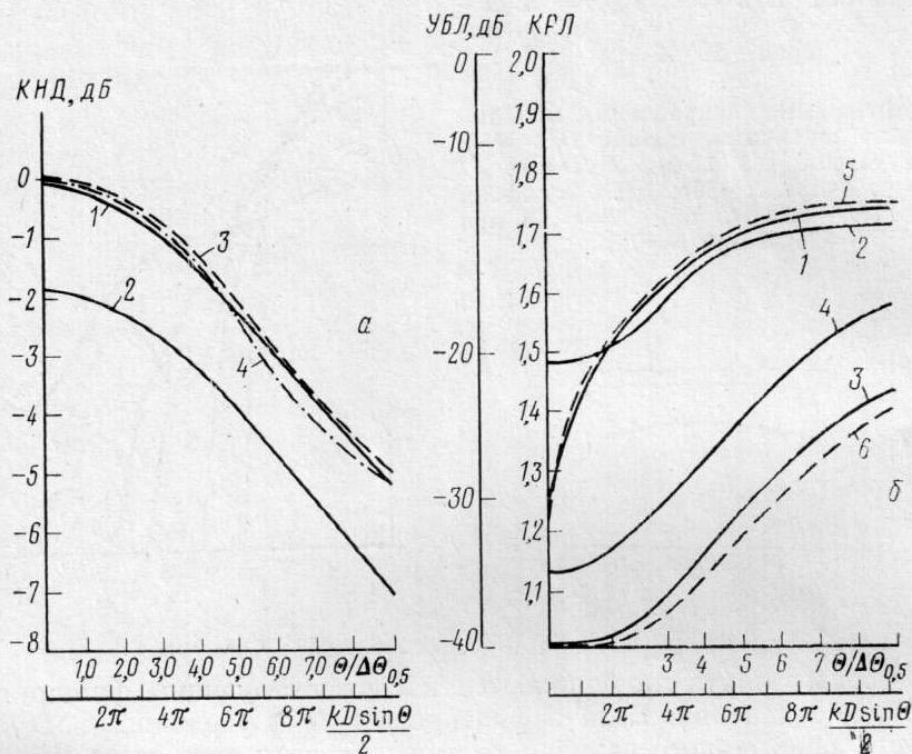


Рис. 5. Характеристики направленности зонтичных антенн при отклонении главного луча ДН от осевого направления:  $D/\lambda=30$ ;  $F_0/D=0,46$ : а — зависимости КНД от  $k(D/2) \sin \Theta$ : 1 —  $N=24$ , 2 —  $N=12$ , 3, 4 —  $N=\infty$  (4 — при смещении облучателя вдоль оси  $F_0X$ ); б — зависимости УБЛ и КРЛ от  $k(D/2) \sin \Theta$ : 1 —  $N=24$ , УБЛ; 2 —  $N=10$ , УБЛ; 3 —  $N=24$ , КРЛ; 4 —  $N=10$ , КРЛ; 5 —  $N=\infty$ , УБЛ; 6 —  $N=\infty$ , КРЛ

параболоида вращения. Видно, что в области незначительного падения  $G$  кривые, полученные при  $\Delta z/F_0 \approx -1/2 (\pi^2/N^2)$  и  $\Delta z/F_0 \approx -2/3 (\pi^2/N^2)$ , практически совпадают, а при уменьшении  $N$  КНД выше при  $\Delta z = \Delta z_{опт}$  (штрихпунктир на рис. 4, а). Характерный излом производной у функции КНД ( $\Delta_{кр}$ ) на рис. 4, б говорит о том, что на практике необходимо проводить оптимизацию параметров зонтичной антенны (например, по стоимости,

Варианты исследуемых антенн	$\Delta z/\lambda$ расчетное	$\Delta z/\lambda$ измеренное
описанный параболоид	-0,12	-0,10
12-секционная антенна	-0,46	-0,40
6-секционная антенна	-1,65	-1,60

весу) с целью достижения компромисса между числом секций  $N$  и допустимым падением КНД. Анализ рис. 4, б показывает, что при одной и той же максимальной ошибке  $\Delta_{кр}$  определяющим для КНД является отношение  $F_0/D$ , и только при больших  $\Delta_{кр}$  (сильном падении КНД) начинает проявляться и влияние  $D/\lambda$ . Хотя при увеличении  $F_0/D$  КНД зонтичных антенн возрастает, при этом возрастают и конструктивные трудности реализации таких антенн. Укажем, что для наиболее распространенных  $F_0/D=0,3-0,6$  и при условии падения КНД не более чем на 1 дБ, величина  $\Delta_{кр}$  зонтичной антенны не должна превышать  $\lambda/4$ .

Интересными характеристиками той или иной зеркальной антенны являются изменения КНД, УБЛ и коэффициента расширения луча (КРЛ)

при сканировании — выносе облучателя с фокальной оси. Эти характеристики показаны на рис. 5, а, б. Траектории выноса облучателя для различных  $\Theta_0$  (линии сканирования) определялись на ЭВМ по критерию (4), что проще в вычислительном плане по сравнению с критерием (5). Перебирались точки пространства с шагом  $\lambda/32$ , начиная от точки  $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)$ , которая определялась по кривой Петцваля [6]. Расширение области перебора осуществлялось до тех пор, пока точка минимакса (4) не оказалась строго внутри нее, что и соответствует квазиплоскому фронту волны, излучаемой в направлении  $\Theta_0$ . Для сравнения на рис. 5, а штрихпунктирной кривой построена зависимость  $G(k(D/2) \sin \Theta_0)$  при смещении облучателя вдоль оси  $F_0X$  для параболоида вращения. Из рис. 5, а, б видно, что при сканировании изменение характеристик зонтичных антенн аналогично изменению этих характеристик в идеальном параболоиде вращения с теми же ограничениями (несколько ширин главного луча), и для широкоугольного сканирования в таких антеннах следует использовать многоэлементный облучатель [7].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для подтверждения вышеприведенных результатов расчета характеристик зеркальных зонтичных антенн было проведено сравнение расчетных и измеренных ДН и КНД при различном положении облучателя на оси антенны для трех макетов: 6-секционной антенны, 12-секционной антенны (рис. 6) и параболоида вращения, являющегося описанным для рассматриваемых 6- и 12-секционных антенн. Параметры описанного параболоида:  $D/\lambda = 16,1$ ;  $F_0/D = 0,466$ . В качестве облучателя для всех трех типов антенн использовался стандартный рупор с квадратным раскрытием  $1,1 \times 1,1\lambda$ , ДН которого при расчетах аппроксимировалась следующей функцией [3]:

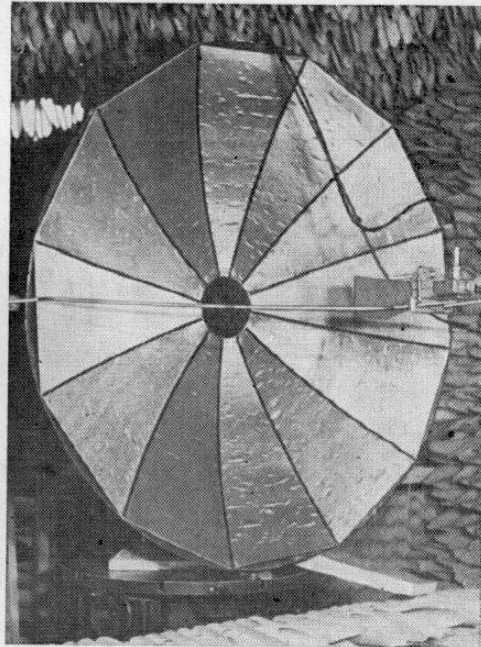


Рис. 6. Макет 12-секционной антенны

$$(12) \quad \text{ДН}_{\text{обл}} = \frac{(1 + 0,89 \cos \psi) \sin(1,1\pi \sin \psi)}{2,079\pi \sin \psi} + 0,25\psi \cos^2 \xi.$$

Данный облучатель при расположении его в фокусе параболической антенны обеспечивает облучение края антенны, меньшее, чем облучение ее центра на 20 дБ в  $E$ -плоскости и на 10 дБ в  $H$ -плоскости.

Измерение ДН и КНД антенны проводилось амплитудно-фазовым способом, т. е. измерялось амплитудно-фазовое распределение (АФР) на плоскости вблизи антенны и затем восстанавливались ее ДН и КНД при помощи ЭВМ по измеренному АФР. Среднеквадратичный разброс значений ДН не превышал  $\pm 1$  дБ в пределах  $0 \div -20$  дБ и  $\pm 3$  дБ в пределах  $-20 \div -30$  дБ, а среднеквадратичный разброс значений КНД не превышал  $\pm 1$  дБ.

Расчетный и измеренный КНД в зависимости от относительного смещения облучателя из фокуса параболоида вдоль оси антенны  $\Delta z/\lambda$  представлен на рис. 7. Измеренные и расчетные значения  $\Delta z/\lambda$ , при которых достигается максимум КНД, приведены в таблице.

Расчетные и измеренные ДН всех трех макетов приведены на рис. 8, 9. Из рис. 7—9 видно, что расчетные и измеренные данные совпадают удовлетворительно. Некоторое расхождение теории и эксперимента в области бокового излучения объясняется неучетом затеняющих свойств облуча-



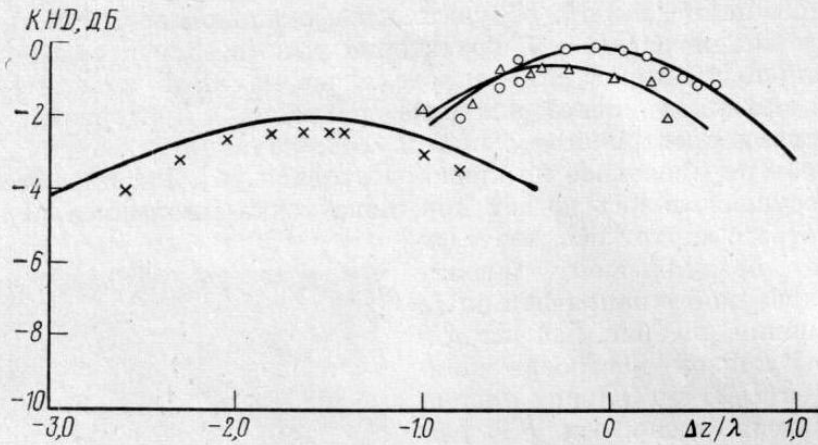


Рис. 7. Зависимости расчетного и измеренного КНД от смещения облучателя вдоль оси антенны  $\Delta z/\lambda$ ,  $D/\lambda=16,1$ ;  $F_0/D=0,466$ : сплошные кривые – расчет; крестики ( $N=6$ ), треугольники ( $N=12$ ) и точки ( $N=\infty$ ) – эксперимент

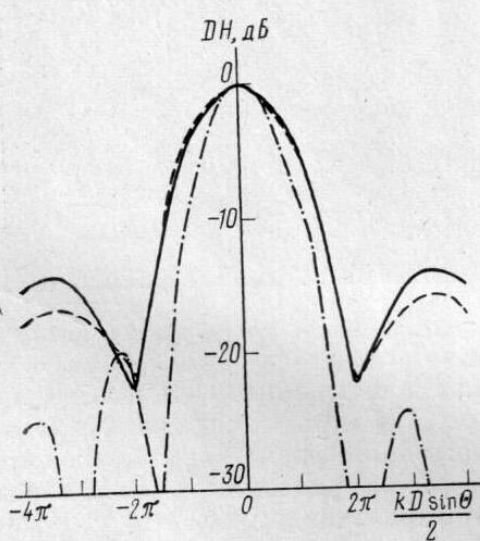


Рис. 8. Расчетная и измеренные ДН 6-секционной антенны,  $D/\lambda=16,1$ ;  $F_0/D=0,466$ : сплошная кривая – расчет; пунктир ( $N=6$ ) и штрихпунктир ( $N=\infty$ ) – эксперимент

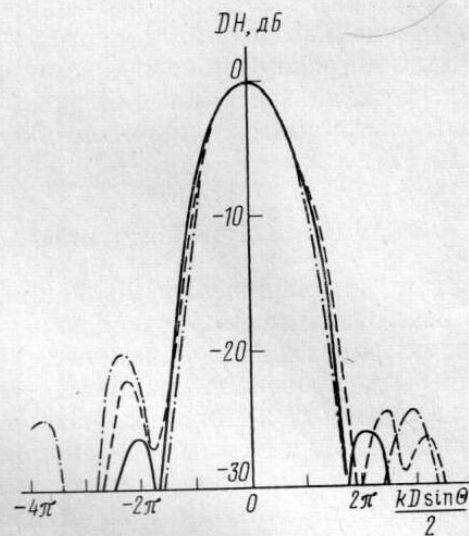


Рис. 9. Расчетная и измеренные ДН 12-секционной антенны,  $D/\lambda=16,1$ ;  $F_0/D=0,466$ : сплошная кривая – расчет; пунктир ( $N=12$ ) и штрихпунктир ( $N=\infty$ ) – эксперимент

теля и стоек его крепления. Некоторая несимметрия измеренной ДН объясняется влиянием участка земли перед антенной, не закрытого поглощающим материалом [8].

В заключение авторы выражают благодарность Кинберу Б. Е. за обсуждение статьи и полезные замечания, а также Измайловой М. М. за помощь в расчетах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ломан В. И., Гряник М. В. Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 7, с. 68–94.
2. Ingerson P. G., Wong W. C. IEEE Trans., 1972, v. AP-20, № 4, p. 409–414.
3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терёшин О. Н. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977, ч. 1.
4. Кинбер Б. Е., Тищенко В. А. Радиотехника и электроника, 1972, т. 17, № 4, с. 680–686.
5. Rao V. L. I. IEEE Trans., 1974, v. AP-22, № 4, p. 632–633.
6. Rusch W. V. T., Ludwig A. C. IEEE Trans., 1973, v. AP-21, № 2, p. 141–147.
7. Алимova Л. И., Кинбер Б. Е., Классен В. И., Шишлов А. В. Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 12, с. 2500–2510.
8. Эйдуc А. Г. Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 2, с. 267–274.

Поступила в редакцию  
25.VI.1981