

УДК 621.396.677.71

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

М.В. СНАСТИН, М.С. БЕБКО

Статья представлена доктором технических наук, профессором Воскресенским Д.И.

Проведены измерения ближнего поля волноводно-щелевой антенной решетки (ВЩАР) в безэховой камере (БЭК) с дальнейшим пересчетом в поле дальней зоны и сравнение с результатами численного расчета и моделирования. Для получения энергетических характеристик антенны (коэффициента усиления) был выбран метод замещения.

**Ключевые слова:** измерения, ближнее поле, моделирование.

### Введение

Неотъемлемой частью разработки антенной техники и антенн, в частности, является проверка соответствия фактических параметров заданным в процессе проектирования. Данная процедура требует наличия измерительного стенда, оснащенного необходимым оборудованием и помещения или полигона для измерений. Для уверенности в достоверности экспериментальных данных необходимо калибровать измерительное оборудование и тракт передачи сигнала.

Поставим задачу спроектировать бортовую волноводно-щелевую антенную решетку с параметрами, указанными в табл. 1.

**Таблица 1**

Характеристики ВЩАР

Параметр	Значение
Полоса частот, $\Delta f$ [МГц]	660
Центральная частота, $f_0$ [ГГц]	34
Уровень боковых лепестков (УБЛ) [дБ], не более	-20
Ширина ДН на уровне половинной мощности [°]: в горизонтальной плоскости, $\theta$	1.2
в вертикальной плоскости, $\varphi$	6.5
Тип поляризации	горизонтальная
Тип сканирования	механическое

На основании инженерного расчета была создана трехмерная модель антенной решетки. Она состоит из четырех симметричных квадрантов, возбуждаемых по последовательно-параллельной схеме для реализации моноимпульсного режима работы. Возбуждение секторов осуществляется распределителем мощности, выполненным на гибридных делителях по параллельной схеме, а возбуждение щелей в излучающих и магистральных линейках - по последовательной схеме.

Для построения суммарной диаграммы направленности (ДН) было достаточно создать модель одной из четвертей (рис. 1) и расставить на ее границах условия симметрии, а для обеспечения разностных ДН – всего двух четвертей, симметричных относительно азимутальной плоскости (для разностной угломестной ДН) либо симметричных относительно угломестной плоскости (для разностной азимутальной ДН).

В случае построения разностных ДН моделируемые квадранты возбуждались противофазно, на месте среза квадрантов решетки были выставлены условия симметрии. Используемые упрощения модели позволили существенно сократить время расчета.

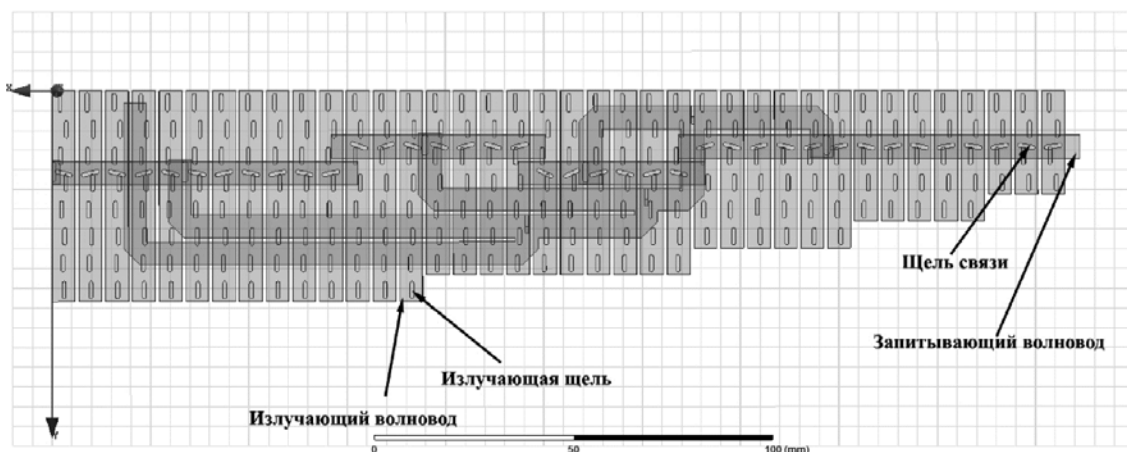


Рис. 1. Квадрант ВЦАР

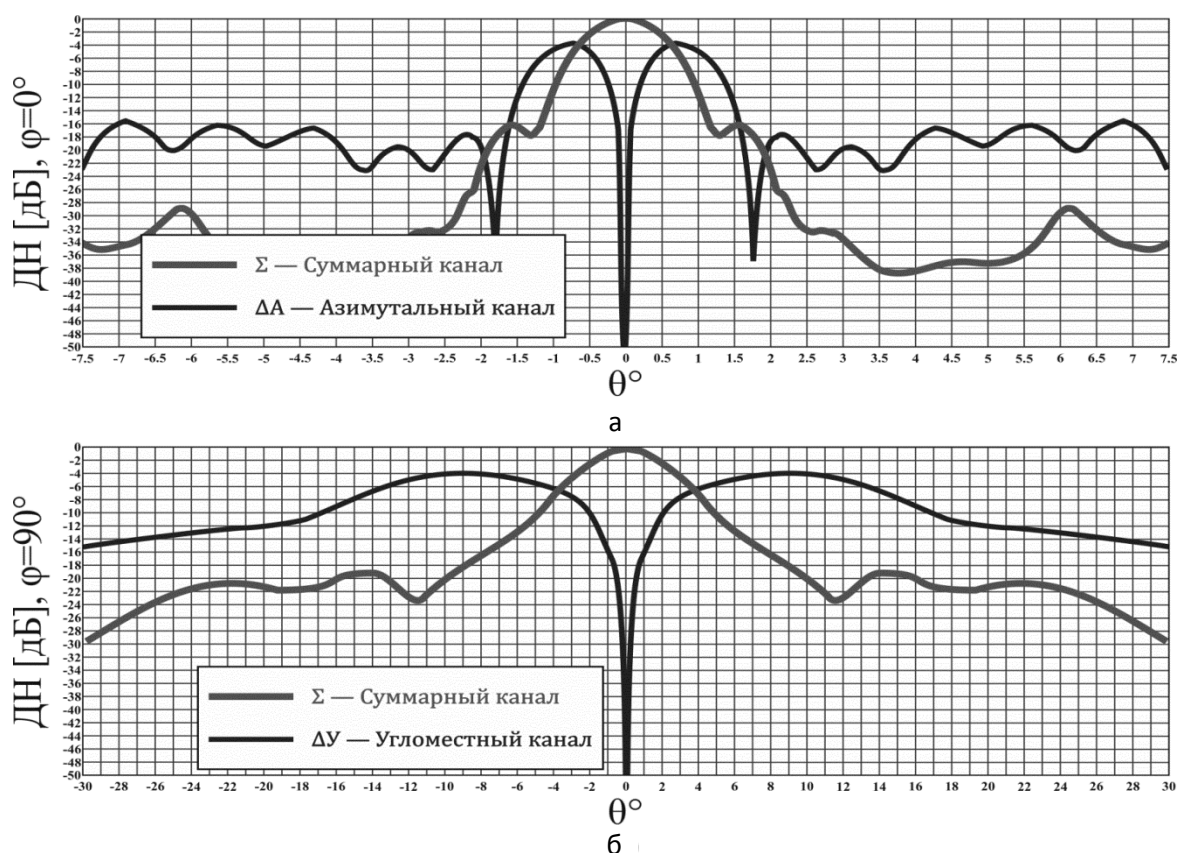


Рис. 2. Результаты моделирования характеристик направленности: а - суммарный и азимутальный каналы в Е-плоскости; б - суммарный и угломестный каналы в Н-плоскости

Создание электродинамической модели позволило менять амплитудное и фазовое распределение поля и следить за изменением направленных свойств антенны. В результате были рассчитаны уточненные суммарная и разностные ДН в горизонтальной (азимутальной) и вертикальной (угломестной) плоскостях. Были оптимизированы размеры и местоположение щелей для получения заданных характеристик ВЦАР. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Измерения характеристик ВЦАР проводились в автоматизированном антенно-вычислительном комплексе (АИВК) на базе БЭК научно-производственного центра факультета «Радиоэлектроники ЛА» Московского авиационного института. Основные параметры используемой БЭК приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики БЭК

Параметр	Значение
Полоса частот, $\Delta f$ [ГГц]	0.8÷40
Габариты, ДхШхВ [м]	8.28х5.5х3.0
Уровень экранирования, не более [дБ]	-90
Коэффициент безэховости, не более [дБ]:	
– 1÷40 ГГц	-30
– 0.8÷1 ГГц	-20
Нагрузочная способность пола [кг/м <sup>2</sup> ]	400

Так как габариты БЭК не позволяют снять характеристики направленности ВЩАР в дальней зоне ( $2D^2/\lambda \geq 57.7 \dots 61.2$  м, где  $D$  – максимальный размер апертуры;  $\lambda$  – длина волны), было принято решение измерить антенное полотно в ближней зоне планарным сканированием.

**Основные расчетные соотношения**

Для экспериментального получения ДН антенны необходимо провести измерения в ближнем поле зондами с ортогональными поляризациями. В частном случае это один зонд с линейной поляризацией, а измерения проводятся с поворотом в плоскости сканирования на  $90^\circ$ . Приведем некоторые известные соотношения.

Спектры плоских волн [1]

$$S_{m,o}(\vec{K}) = \delta_x \delta_y \sum_i B'_{m,o}(\vec{P}_i) \exp(-j\vec{K} \cdot \vec{P}_i), \quad (1)$$

где индексы  $m$  и  $o$  соответствуют ортогональным поляризациям (основной и крессовой);  $\vec{K}$  – пространственный вектор, в направлении которого восстанавливается диаграмма направленности (ДН);  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – шаги по осям  $x$  и  $y$  при измерении на плоскости;  $B'_{m,o}(\vec{P}_i)$  – нормированные данные ближнего поля в точке, определяемой вектором  $\vec{P}_i$ ;  $j$  – мнимая единица.

Для сферической системы координат «азимут-угол места»

$$\vec{K} \cdot \vec{P} = k_x x + k_y y = k \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi).$$

Домножая (1) на коэффициент, учитывающий расстояние от антенны до зонда при измерении, можно получить составляющие вектора напряженности электрического поля антенны в дальней зоне [1]:

$$\begin{aligned} f_\theta(\vec{K}) &= Ak_z S_m(\vec{K}); \\ f_\varphi(\vec{K}) &= Ak_z S_o(\vec{K}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k_z = k \cos \theta$  – проекция вектора, характеризующего направление распространения плоской волны, на ось  $z$ ;  $A = \frac{j}{\lambda R_0} \exp(-jkR_0)$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $R_0$  – расстояние от испытуемой антенны до точки наблюдения.

Для нахождения коэффициента усиления (КУ) испытуемой антенны существуют три основных метода [2]: прямого расчета; сравнения с эталоном (замещения) и метод трех антенн. Воспользуемся методом замещения, так как он является в своем роде компромиссом между количеством требуемой априорной информации и количеством требуемых измерений (а следовательно, и затраченным временем). Для этого, помимо имеющегося измерения антенны зондом, необходимо провести дополнительное измерение эталона тем же зондом. Используем уравнения Фрисса для случая измерений в ближнем поле [2; 3]:

$$G_a(\vec{K}) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 M_{ap} \frac{|f_a(\vec{K})|^2}{|a'_a|^2 G_p(\vec{K})}; \quad (3)$$

$$G_p(\vec{K}) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 M_{sp} \frac{|f_s(\vec{K})|^2}{|a'_{s}|^2 G_s(\vec{K})};$$

$$M_{ap,sp} = \frac{|1-\Gamma_l\Gamma_p|^2 |1-\Gamma_g\Gamma_{a,s}|^2}{|1-\Gamma_g\Gamma_l|^2 (1-|\Gamma_{a,s}|^2)(1-|\Gamma_p|^2)},$$

где  $G_{a,p,s}(\vec{K})$  – КУ исследуемой антенны, зонда и эталона соответственно;  $M_{ap,sp}$  – фактор расогласования измерительного тракта выводится из анализа коэффициента передачи измерительного тракта при рассмотрении его как расогласованного многополюсника;  $\Gamma_{l,g,p,a,s}$  – комплексные коэффициенты отражения от кабелей, подключенных к приемнику и генератору сигнала векторного анализатора цепей (ВАЦ), зонда, испытываемой антенны и эталона соответственно;  $a'_{a,s}$  – нормированные потери в тракте измерения при прямом подключении кабелей друг к другу. В частном случае  $a'_a = a'_s$ .

Откуда КУ испытываемой антенны

$$G_a(\vec{K}) = \frac{|1-\Gamma_g\Gamma_a|^2 (1-|\Gamma_s|^2) |a'_{s}|^2 |f_a(\vec{K})|^2}{|1-\Gamma_g\Gamma_s|^2 (1-|\Gamma_a|^2) |a'_{a}|^2 |f_s(\vec{K})|^2} G_s(\vec{K}). \quad (4)$$

Приведенные соотношения позволяют получить характеристики направленности исследуемой антенны в дальней зоне по результатам планарного сканирования в ближней зоне. Точность приведенного метода восстановления подробно рассмотрена в [1] и [3].

### Схема измерительного стенда

В схему измерительного стенда (рис. 3, 4) входит сканер ближнего поля, штатив для установки тестируемой антенны перед сканером и векторный анализатор цепей (ВАЦ). В процессе измерений используются несколько антенн: зонд для сканера и две тестируемых - исследуемая и эталон. ВАЦ подключается к тестируемой антенне и зонду через коаксиальный кабельный тракт. Для измерений в качестве зонда и эталона применялись калиброванные линейно-поляризованные широкополосные рупоры с известными характеристиками.

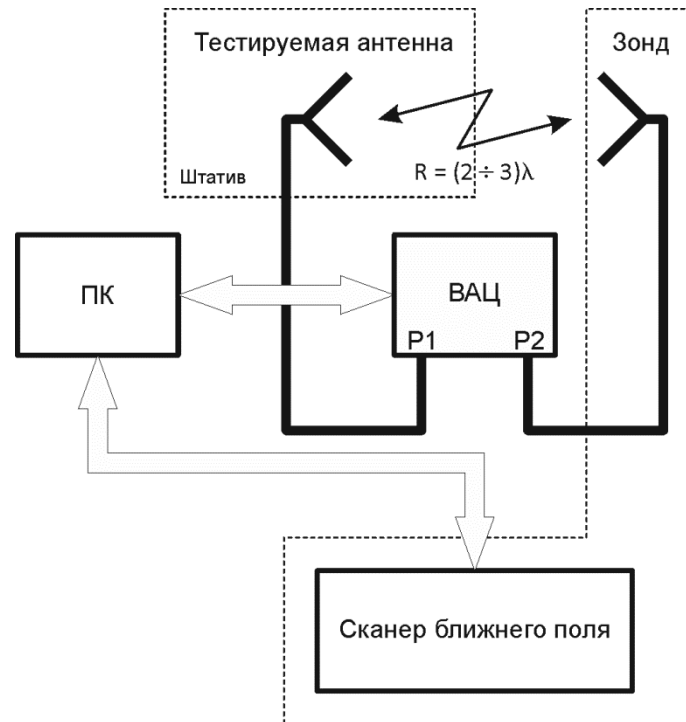


Рис. 3. Схема измерительной установки в ближней зоне

До измерений проводится калибровка измерительного тракта с целью снижения систематической погрешности определения S-параметров и мощности генератора и приемника ВАЦ для снижения инструментальной погрешности в полосе частот. После чего измеряются потери в этом тракте  $a'_a$ ,  $a'_s$  и коэффициент отражения  $\Gamma_g$ . В процессе сканирования измеряются данные  $V'_{m,o}(\vec{P})$  для тестируемой антенны и эталона, а также коэффициенты отражения зонда, эталона и антенны  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_s$  и  $\Gamma_a$ . Далее следует определить спектры плоских волн по (1), ДН антенны и эталона из (2) и рассчитать КУ антенны по (4).



Рис. 4. Измерительная установка планарного сканирования в БЭК

### Результаты измерений

Для пересчета поля ближней зоны в поле дальней зоны и получения необходимых характеристик направленности была написана программа в среде Mathcad. Полученные в результате обработки измерений ближнего поля с помощью данной программы ДН исследуемой ВЦАР представлены на рис. 5.

Видно, что ширина ДН на центральной частоте составила  $1.26^\circ$  и  $7.85^\circ$  в Е- и Н-плоскости соответственно. УБЛ принимает значения -22 дБ в Е-плоскости и -19 дБ в Н-плоскости. КУ ВЦАР составил 30.1 дБ. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами моделирования (КУ 30.5 дБ, УБЛ -20 дБ в обеих плоскостях).

### Заключение

Таким образом, измерения в ближней зоне позволяют решить различные задачи измерения антенной техники, в том числе и восстановление с высокой точностью ДН остронаправленных антенн. Удобство данных измерений заключается в том, что размеры БЭК могут значительно уступать размерам полигона за приемлемое время, отведенное на измерения.

В данной работе была спроектирована бортовая ВЦАР с последующим измерением опытного образца в ближней зоне.

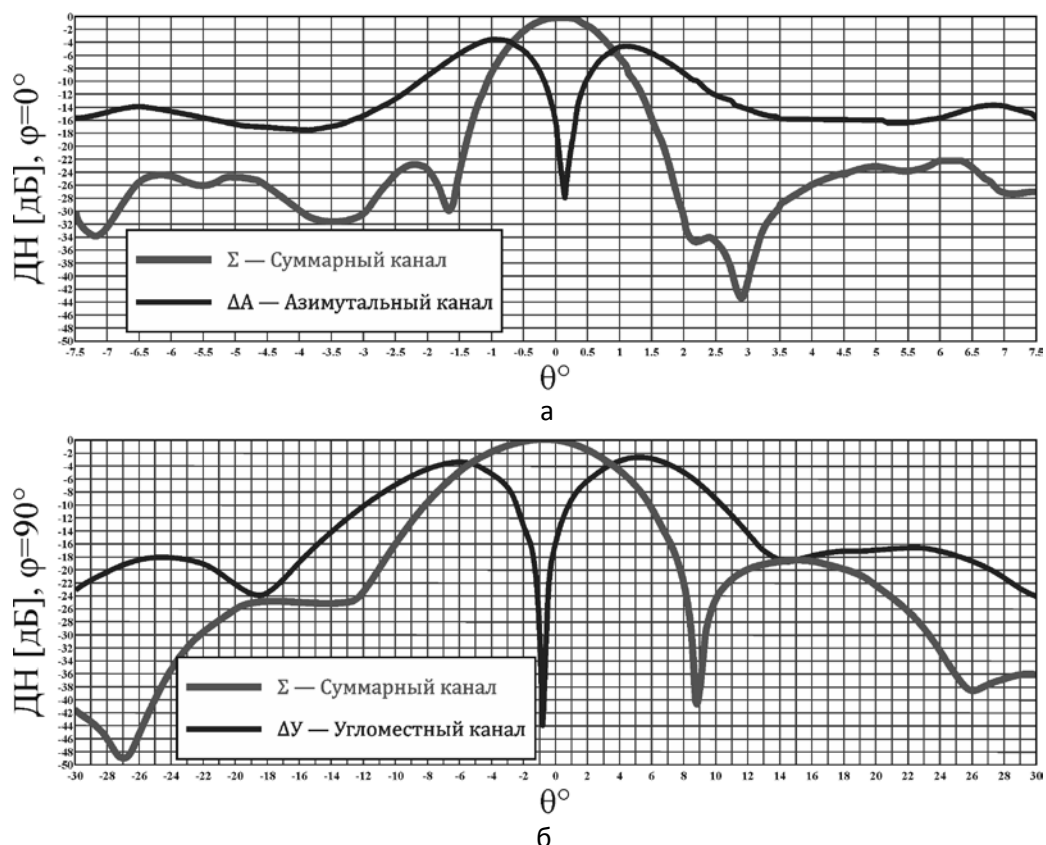


Рис. 5. Экспериментальные характеристики направленности: а - суммарный и азимутальный каналы в Е-плоскости; б - суммарный и угломестный каналы в Н-плоскости

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.Н. Курочкин [и др.]. - Л.: Наука, 1985.
2. Allen C. Newell, Robert D. Ward, Edward J. McFarlane. Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques // IEEE Trans. On Antennas And Propagation., June 1988, vol. 36, P. 792-803.
3. Allen C. Newell, Chaitanya B. Ravipati, Piewwe Arsenault, Planar near-field gain measurements to verify calibration of probes and gain standards // AMTA Symposium, 2001.

#### MEASUREMENT OF SLOTTED WAVEGUIDE ANTENNA ARRAY DIRECTIVITY PATTERNS

Snastin M.V., Bebko M.S.

The waveguide-slotted antenna array (SWAA) near-field measurements were carried out in an anechoic chamber (AEC) with further far field conversion and the comparison with the results of numerical calculations and modeling were made. To obtain the antenna power parameters (gain) gain comparison method was chosen.

**Keywords:** measurements, near field, modeling.

#### Сведения об авторах

**Снастин Михаил Владимирович**, 1990 г.р., окончил МАИ (2013), инженер научно-производственного центра радиоинформационной метрологии (НПЦ РИМ) МАИ, автор 2 научных работ, область научных интересов – измерение параметров антенн, математическое моделирование СВЧ устройств.

**Бибко Мария Сергеевна**, студентка МАИ, область научных интересов – математическое моделирование СВЧ-устройств.