

ISSN 2413-1806

# ВЕСТНИК МЕТРОЛОГА

№ 1  
2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕТРОЛОГИЯ  
В ЭКОЛОГИИ



АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ  
МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИЙ, СИМПОЗИУМОВ

НОВИНКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

# ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ МЕТОДОМ ТРЕХ АНТЕНН В ПЛАНАРНЫХ СКАНЕРАХ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

## THREE-ANTENNA GAIN MEASUREMENT WITH PLANAR NEAR-FIELD SCANNER

Ю.Н.Калинин<sup>1</sup>, М.А.Чавдар<sup>2</sup>

ООО «Научно-производственное предприятие «ТРИМ Сверхширокополосные измерительные системы»»

1.kalinin@trimcom.ru , 2. maxim@trimcom.ru

Y.N.Kalinin, M.A.Chavdar

TRIM UltraWideBand Measurements systems Ltd Research and Production Enterprise

1.kalinin@trimcom.ru , 2. maxim@trimcom.ru

Рассмотрен метод трех антенн для измерения коэффициента усиления антенны в ближней зоне с помощью планарного сканера. Получены соотношения для расчета коэффициента усиления. Разработана методика измерений. Приведены результаты экспериментальных измерений двух типов антенн: стандартной рупорной антенны диапазона 7.05...10.0 ГГц и фазированной антенной решетки X-диапазона. Средняя относительная погрешность измерения коэффициента усиления в рабочей полосе частот не превышает 0.2 дБ. Разработанный метод измерения реализован в программно-алгоритмическом обеспечении автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (АИВК), выпускаемых научно-производственным предприятием «ТРИМ» (г. Санкт-Петербург).

*The paper reviews three-antenna gain measurement with planar near-field scanner, contains the equations for calculating the gain, description of measurement procedure and results of experimental measurements of two antenna types: standard antenna horn with frequency range 7.05...10.0 GHz and X-range phased-array antenna. Average gain measurement error in the working frequency band does not exceed 0.2 dB. The developed measurement method is implemented in algorithmic software of the automated measurement facilities produced by TRIM UltraWideBand Measurements systems Ltd (Saint Petersburg).*

**Ключевые слова:** антenna, ближнее поле, планарный сканер, коэффициент усиления, метод трех антенн.  
**Key words:** Antenna, Near Field, Planar Scanner, Gain, Three-Antenna.

**Введение.** Традиционным методом измерения коэффициента усиления (КУ) в ближней зоне является метод сравнения [1-4], предполагающий использование эталонной антенны. Этот метод требует дополнительного измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) ближнего поля эталонной антенны, а также материальных и временных затрат на ее калибровку.

Прямой метод измерения КУ позволяет сократить время измерения более чем в два раза, поскольку вместо эталонной антенны используется калибранный зонд, участвующий в процессе измерения. Значение КУ рассчитывается непосредственно путем математической обработки измеренного АФР [3-6].

Наряду с прямым методом и методом сравнения, в практических измерени-

О возможности применения метода трех антенн в планарных сканерах упоминалось в [4]. В этой статье предлагалось в комплекте из трех антенн использовать два слабонаправленных зонда и исследуемую антенну (ИА). При этом отмечалось, что метод редко применяется на практике из-за больших ошибок, возникающих при измерении в комбинации «зонд-зонд». Действительно, использование в данной комбинации слабонаправленного зонда в качестве ИА не соответствует условиям измерений в планарном сканере.

В [7] приводятся результаты измерения КУ с помощью набора из трех антенн, состоящего из открытого конца волновода и двух рупорных антенн, одна из которых используется в качестве зонда, а вторая – в качестве ИА. Однако детали, важные для практического применения метода, не рассматриваются.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности измерения КУ методом трех антенн в планарном сканере.

**Алгоритм обработки измерений.** На основе соотношения для расчета КУ прямым методом [4,5], для каждой комбинации  $m, n$  зонда и ИА можно записать:

$$G_m(\vec{K}_0)G_n(\vec{K}_0) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 \frac{\left|\Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j}\right|^2}{L}, \quad (1)$$

$m, n = 1, 2, 3$  где:  $m \neq n$ ;

$$G_m(\vec{K}_0)G_n(\vec{K}_0) \equiv G_n(\vec{K}_0)G_m(\vec{K}_0);$$

$\lambda$  – длина волны;

$\Delta$  – шаг сканирования;

$G_m(\vec{K}_0) G_n(\vec{K}_0)$  – КУ зонда и ИА в направлении максимума диаграммы направленности, заданного вектором;

$\vec{K}_0$ ;  $S(\vec{P}_j)$  – комплексный коэффициент передачи, измеренный на плоскости в  $j$ -й точке, заданной вектором;

Конфигурация измерений в ближнем поле, соответствующая (4), показана в таблице 1:

Решая систему уравнений (1), с учетом (2) и (3), получим выражения для расчета КУ:

$$G_{1[db]} = 0.5(M_{12} + M_{13} - M_{23}) + R;$$

$$G_{2[db]} = 0.5(M_{12} + M_{23} - M_{13}) + R;$$

$$G_{3[db]} = 0.5(M_{13} + M_{23} - M_{12}) + R, \quad (4)$$

где  $R = 10 \lg \left( \frac{4\pi}{\lambda^2} \right)$ .

Таблица 1

№ измерения	Зонд	ИА	Уравнение передачи
1	Антenna-1	Антenna-2	$M_{12} = F_{12} - L = G_1 + G_2 - R$
2	Антenna-1	Антenna-3	$M_{13} = F_{13} - L = G_1 + G_3 - R$
3	Антenna-2	Антenna-3	$M_{23} = F_{23} - L = G_2 + G_3 - R$

$\vec{P}_j$ ;  $L$  – затухание в приемо-передающем тракте, измеренное при прямом соединении входа зонда и выхода ИА.

Выражение в числителе (1) представляет собой максимум эквивалентного сигнала дальней зоны, в логарифмическом масштабе:

$$F_{mn} = 10 \lg \left| \Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j} \right|^2_{mn}. \quad (2)$$

С учетом потерь в тракте, величина максимума

$$M_{mn} = F_{mn} - L_{[db]}, \quad (3)$$

**Экспериментальные измерения.** Для экспериментальных исследований был взят следующий набор антенн:

1) Антenna-1 – открытый конец волновода WR-112;

2) Антenna-2 – эталонный рупор ТРИМ с раскрытием 9 см × 13.5 см, широкополосным коаксиально-волноводным переходом, с нижней частотой ~7.5 ГГц;

3) Антenna-3 – стандартный рупор *Penn Engineering* диапазона 7.05...10.0 ГГц.

Измерения №1 и №2 (таблица 1) являются обычными измерениями в плоском сканере. В качестве зонда в

них используется слабонаправленная антенна в виде открытого конца волновода с расстоянием дальней зоны порядка 2-3 длин волн. В измерении №3 в качестве зонда используется рупорная антенна с КУ 18-20 дБ, выраженным боковыми лепестками и расстоянием дальней зоны порядка 1.2 м, сходная с ИА. Таким образом, при стандартном рекомендуемом расстоянии от плоскости сканирования до апертуры ИА  $(3\dots5)\lambda$  [2,3] измерение АФР ближнего поля ИА происходит в ближнем поле зондовой антенны.

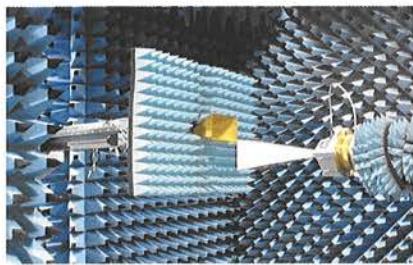


Рисунок 1. Измерение №3: исследуемая антенна – стандартный рупор Penn Engineering диапазона 7.05...10 Гц (Антенна-3), зонд – рупор ТРИМ (Антенна-2).

Успех применения метода трех антенн в ближней зоне определяется тем, насколько измерение №3 (рисунок 1) адекватно решаемой задаче. Прежде всего, необходимо выяснить, насколько критичным в этом случае является выбор расстояния между плоскостью сканирования и апертурой ИА. Для этого была выполнена серия измерений АФР при изменении этого расстояния от  $r=0.12$  м, соответствующего  $(3\dots4)\lambda$ , до  $r=1.02$  м, близко-

го к дальней зоне зондовой антенны, с шагом 0.1 м. Размер области сканирования увеличивался пропорционально увеличению расстояния  $r$  от  $0.35 \text{ м} \times 0.5 \text{ м}$  до  $2.8 \text{ м} \times 2.4 \text{ м}$ .

Зависимость максимума эквивалентного сигнала дальней зоны F от расстояния  $r$  показана на рисунок 2.

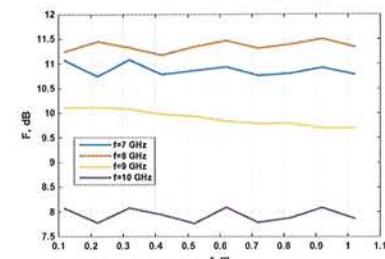


Рисунок 2. Относительный максимум диаграммы направленности в дальней зоне F в зависимости от расстояния между плоскостью сканирования и апертурой  $r$  (измерение №3).

Разброс величины F в наилучшем случае не превышает 0.1 дБ на частоте 7.5 ГГц, в наихудшем случае – 0.4 дБ на частоте 9 ГГц, что может быть вызвано эффектами переотражения и влиянием боковых лепестков зонда. Следовательно, измерение №3 можно выполнять на обычном для измерений в ближней зоне расстоянии  $(3\dots5)\lambda$ .

Далее, в соответствии с табл.1 были выполнены измерения АФР и согласно (1-4) рассчитаны значения КУ всех трех антенн. Полученные значения КУ показаны на рисунках 3-5 в сравнении с референсными («эталон-

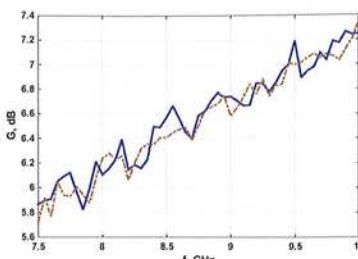


Рисунок 3. КУ открытого конца волновода WR-112 (Антенна-1) (- метод 3-х антенн в ближней зоне, - метод двух антенн).

ными») значениями. В качестве последних приняты: для Антенны-1 – КУ, измеренный методом двух антенн, для Антенны-2 – КУ, измеренный методом трех антенн в дальней зоне, для Антенны-3 – характеристика, представленная производителем. Максимальные  $\Delta_{max}$  и средние относительные  $\Delta f$  погрешности измерений в полосе частот представлены в таблице 2. Средняя погрешность измерения в полосе частот  $\delta f$  рассчитывалась, как

$$\delta f = 10 \lg \left( 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left| 10^{\hat{G}_i / 10} - 10^{G_{0i} / 10} \right|}{10^{G_{0i} / 10}} \right), \quad (5)$$

где  $n$  – количество частотных точек,  $G_0$  – референсные значения КУ.

Таблица 2

	Антенна 1	Антенна 2	Антенна 3
$\delta f$ , дБ	0.09	0.17	0.1
$\Delta_{max}$ , дБ	0.23	0.36	0.27

Заметим, что диаграмма направленности рупора Penn Engineering (Антенна-3), полученная в измерении №3 (на любом расстоянии  $r$  из интервала 0.12...1.02 м), существенно отличается от истинной. Из

Таблица 3

№ измерения	F, дБ	L, дБ	M, дБ	№ антенны	G, дБ	G <sub>0</sub> , дБ	D
1	-76.20	-19.87	-56.33	1	5.66	5.82	0.16
2	-58.37		-38.50	2	19.22	19.11	0.11
3	-44.81		-24.94	3	37.04	36.92 36.82	0.12 0.22

этого можно сделать вывод, что данный способ измерения применим для антенн с не отклоненным положением главного максимума.

Одним из наиболее распространенных типов антенн, измеряемых с помощью планарных сканеров, являются фазированные антенные решетки (ФАР). Для оценки применимости рассмотренного метода для измерения КУ ФАР был проведен еще один эксперимент, в котором в качестве Антенны-3 была использована ФАР X-диапазона диаметром ~0.9 м на частоте 9.07 ГГц. В качестве Антенны-1 использовался открытый конец волновода WR-90. Расчет КУ иллюстрируется таблицей 3.

Для получения референсных значений G<sub>0</sub> КУ ФАР

был измерен в ближней зоне двумя методами:

– методом сравнения при использовании в качестве эталонной антенны рупора Penn Engineering;

– прямым методом с помощью калиброванного зонда – открытого конца волновода WR-90.

Значения КУ ФАР на частоте 9.07 ГГц, измеренные в ближней зоне тремя различными методами, вместе с рассчитанным коэффициентом направленного действия (КНД) приведены в таблице 4.

Таблица 4

	Метод сравнения	Прямой метод	Метод 3-х антенн
КУ	36.82	36.92	37.04
КНД		37.72	

Погрешность КУ, полученного методом трех антенн, не содержит составляющей, обусловленной погрешностью КУ эталонной антенны или эталонного зонда. Это значение является наиболее точным.

**Заключение.** Рассмотренный метод измерения является в полтора раза более затратным по времени по сравнению с методом сравнения, и в три раза – по сравнению с прямым методом. Его целесообразно использовать при отсутствии в составе АИВК эталонной антенны или калиброванного зонда требуемого частотного диапазона, а также в тех случаях, когда измерения КУ требуется выполнить с максимально возможной точностью. Этот способ измерения применим для антенн с не отклоненным положением главного максимума. Разработанный метод измерения реализован в программно-алгоритмическом обеспечении АИВК, выпускаемых научно-производственным предприятием «ТРИМ».

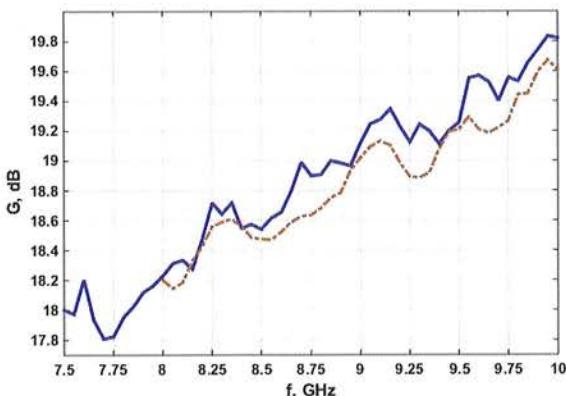


Рисунок 4. КУ рупора ТРИМ (Антенна-2) (- метод 3-х антенн в ближней зоне, - метод 3-х антенн в дальней зоне).

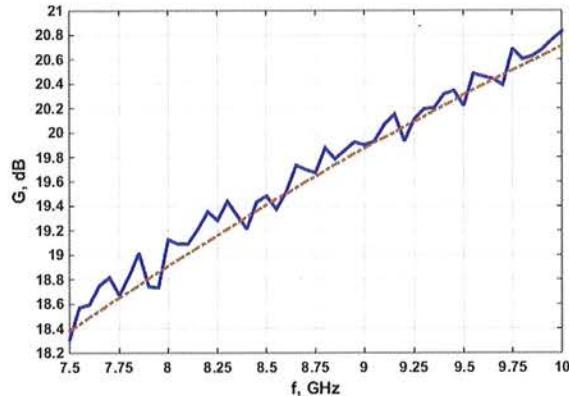


Рисунок 5. КУ рупора Penn Engineering (Антенна-3) (- метод 3-х антенн в ближней зоне, - данные производителя).

**Литература**

1. Parini C., Gregson S., McCormic J., Daniel J. *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements* (Electromagnetic waves series, v.55).
- Institution of Engineering and Technology, London, 2015.
2. Gregson S., McCormic J., Parini C. *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements* (Electromagnetic waves series, v.53). -Institution of Engineering and Technology, London, 2007.
3. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements.
- Antenna Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society, IEEE Std 1720™2012.
4. Newell A., Ward R., McFarlane J. *Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques*. - IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.36, № 6, 1988.
5. Newell A. *Planar near-field gain measurements to verify calibration of probes and gain standards*. - 23th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2001), Denver, Colorado, October 21-26, 2001.
6. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Прямое измерение коэффициента усиления и эквивалентной изотропной излучаемой мощности антенны в сферических сканерах ближнего поля//Антенные, 2016, №11, с.56-61.
7. Masters G., Pelland P. *Selection criteria for near-field gain techniques*. - 35th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2013), Columbus, Ohio, October 6-11, 2013.

## ЭТАЛОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОДНОЙ СРЕДЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 5 ДО 10000 ГЦ

## REFERENCE INSTALLATIONS FOR PROCREATION AND TRANSFER OF UNIT OF OSCILLATING SPEED OF THE AQUEOUS MEDIUM IN THE FREQUENCY RANGE FROM 5 TO 10000 Hz

**А.Е. Исаев, д.т.н., Матвеев А.Н., к.т.н., Некрич Г.С., Сильвестров С.В., к.т.н., ФГУП «ВНИИФТРИ»**

**A. E. Isaev, Dr.Sci.Tech., Matveev A. N., Candidate of Technical Sciences, Nekrich G. S., Silvestrov S. V., Candidate of Technical Sciences, FGUP «VNIIFTRI»**

В статье приводятся данные о созданных в ФГУП «ВНИИФТРИ» эталонных установках для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды. Рассмотрены принципы действия установок для измерений в звуковых полях плоской стоячей и бегущей сферической волн, приводятся метрологические характеристики установок, результаты исследований и сличений.

In article are cited data about the reference installations created in FGUP «VNIIFTRI» for procreation and transfer of unit of oscillating speed of an aqueous medium. The principles of action of installations for measurements in sound fields flat the standing and running spherical waves are considered, metrological characteristics of installations, results of researches and checkings are provided.

**Ключевые слова:** колебательная скорость водной среды, векторный приемник, калибровка в акустической камере, абсолютная калибровка по свободному полю.

**Keywords:** oscillating speed of an aqueous medium, the vector receiver, calibration in an acoustic camera, absolute calibration on the free field.

### Введение

Колебательная скорость водной среды (далее коле-

бательная скорость) связана давлением. При этом, достаточно простыми со- скольку колебательная ско- отношениями со звуковым рость – величина векторная,