

Антенные и фидерные измерения

УДК 621.396.67.091.22

Прямое измерение коэффициента усиления и эквивалентной изотропной излучаемой мощности антенны в сферических сканерах ближнего поля

© Авторы, 2016

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2016

Ю. Н. Калинин – к.т.н., зам. ген. директора по научной работе, ООО «НПП «ТРИМ» ССП Измерительные системы» (Санкт-Петербург)

E-mail: kalinin@trimcom.ru

М. А. Чавдарь – начальник отдела испытаний, ООО «НПП «ТРИМ» ССП Измерительные системы» (Санкт-Петербург)

E-mail: maxim@trimcom.ru

Рассмотрены алгоритмы обработки, позволяющие при измерениях антенн в ближней зоне с помощью сферического сканера получить коэффициент усиления и эквивалентную изотропную излучаемую мощность антенны непосредственно по измеренному распределению ближнего поля, без использования эталонной антенны. Отмечено, что время измерения при этом сокращается более чем в два раза. Приведены результаты экспериментальных измерений стандартной рупорной антенны диапазона 5,85...8,2 ГГц. Разработанные алгоритмы реализованы в программно-алгоритмическом обеспечении автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов, выпускаемых научно-производственным предприятием «ТРИМ» (Санкт-Петербург).

Ключевые слова: ближнее поле, сферический сканер, коэффициент усиления, эквивалентная изотропная излучаемая мощность.

The paper reviews the processing algorithms which allow obtaining the gain and EIRP values during near-field antenna measurements with a spherical scanner directly through the measured distribution of the near field without using a reference antenna. In this case the measurement time is reduced by more than half. The paper presents the results of the experimental measurements of the standard antenna horn with frequency range 5,85...8,2 GHz. The developed algorithms have been implemented in the algorithm software of the automated measurement and computing complexes produced by the scientific and research enterprise TRIM (Saint Petersburg, Russia).

Keywords: near field, spherical scanner, gain, equivalent isotropically radiated power.

Традиционным методом измерения коэффициента усиления (КУ) пассивных антенн в ближней зоне является метод сравнения, предполагающий использование эталонной антенны [1–4]. Этот метод применяется в планарных, цилиндрических и сферических сканерах и требует проведения дополнительного измерения распределения ближнего поля эталонной антенны, как правило, с теми же параметрами сканирования, что и при измерении исследуемой антенны (ИА).

Существенно сократить время измерения (более чем в два раза – с учетом времени на установку и юстировку эталонной антенны) позволяет прямой метод измерения КУ, основанный на использовании калиброванного (эталонного) зонда.

В качестве энергетической характеристики активных антенн и фазированных антенных решеток в режиме излучения применяется эквивалентная изотропная излучаемая мощность. В данной статье будем использовать принятное в англоязычной литературе обозначение EIRP (equivalent isotropically radiated power). Для пассивных антенн EIRP представляет собой произведение мощности, подводимой к антенне, на ее коэффициент усиления. Для активных антенн такое определение не имеет физического смысла.

Способы измерения EIRP в дальней зоне и в компактном полигоне (коллиматоре) непосредственно следуют из формулы Фрисса и также основываются на использовании эталонной антенны (эталонного облучателя коллиматора) [2]. Способы измерения EIRP в ближнем поле менее очевидны.

Прямые методы измерения КУ и EIRP в плоских сканерах ближнего поля рассматриваются в [3, 4]. Эти методы успешно апробированы и реализованы в программно-алгоритмическом обеспечении автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (АИВК), выпускаемых научно-производственным предприятием «ТРИМ» (Санкт-Петербург).

Способы прямого измерения КУ и EIRP в сферических сканерах недостаточно освещены в доступных источниках. Теоретические основы рассматриваются в [5]. В [6] приводится пример измерения EIRP, выполненного с помощью закрытого программного обеспечения компании TICRA. В [7] основное внимание уделено учету влияния приемопередающего тракта, при этом практические результаты измерения КУ не приводятся.

Цель работы – совершенствование математического обеспечения АИВК НПП «ТРИМ» в части, касающейся разработки алгоритмов расчета КУ и EIRP непосредственно по измерениям ближнего поля антенны в сферическом сканере, без использования эталонной антенны, а также экспериментальная проверка разработанных алгоритмов.

Расчет поля антенны в дальней зоне по измерениям ближнего поля на сфере. При измерении характеристик антенн в сферическом сканере используется аппроксимация поля $E(\theta, \varphi)$, создаваемого антенной в дальней зоне в направлении (θ, φ) сферической системы координат, сферическими волновыми функциями $K_{smn}(\theta, \varphi)$:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n T_{smn} K_{smn}(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где T_{smn} – коэффициенты сферических волновых функций; s – индексы поляризации; n – полярный индекс, соответствующий углу θ ; m – азимутальный индекс, соответствующий углу φ ; N – число сферических гармоник, используемых для аппроксимации диаграммы направленности.

Исходными данными для определения коэффициентов T_{smn} являются измерения поля $w(A, \chi, \theta, \varphi)$ на сфере радиуса A при сканировании по углам θ и φ и вращении зонда по углу χ (рис. 1). Коэффициенты T_{smn} определяются из решения уравнения наблюдения [5]:

$$w(A, \chi, \theta, \varphi) = v \sum_{\sigma \mu \nu} T_{smn} e^{j m \varphi} d_{\mu n}^{\sigma}(\theta) e^{j m \chi} C_{\sigma \mu \nu}^{sn}(kA) R_{\sigma \mu \nu}^p, \quad (2)$$

$$(3) \quad \sum_{\sigma \mu \nu} \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n \sum_{\sigma=1}^2 \sum_{\mu=-\nu_{\max}}^{\nu_{\max}} \sum_{\nu=|\mu|}^{\nu_{\max}},$$

где v – входной сигнал исследуемой антенны (рассматриваем измерение при работе ИА в режиме излучения); $d_{\mu n}^{\sigma}(\theta)$ – коэффициенты, характеризующие преобразование системы координат при перемещении зонда по углу θ ; $R_{\sigma \mu \nu}^p$ – коэффициенты сферических волновых функций зонда; $C_{\sigma \mu \nu}^{sn}(kA)$ определяет преобразование коэффициентов $R_{\sigma \mu \nu}^p$ из начала системы координат на сферу радиуса A ; индексы σ , μ , ν аналогичны индексам s , m , n применительно к зондовой антенне.

Путем последовательного интегрирования исходных данных по углам χ , φ и θ , с учетом преобразования системы координат, уравнение (2) сводится к системе уравнений вида (3) относительно неизвестных T_{1mn} и T_{2mn} :

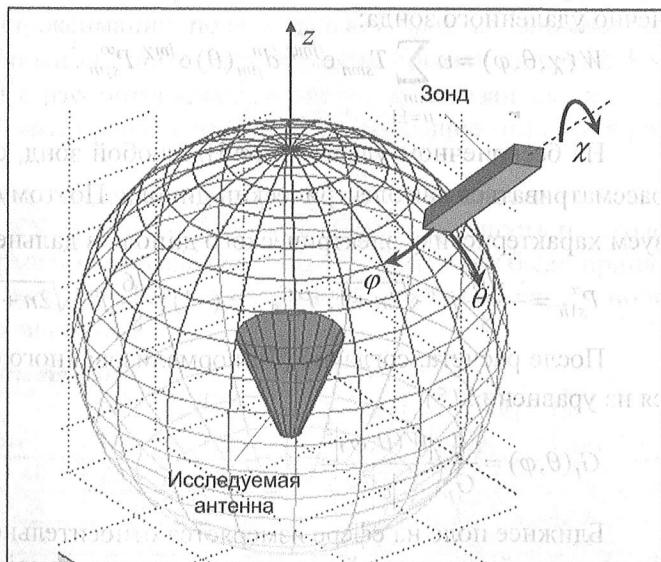


Рис. 1. Геометрия сферического сканирования

$$\nu T_{1mn} P_{1,\mu n}(kA) + \nu T_{2mn} P_{2,\mu n}(kA) = w_{\mu m}^n(A), \quad (3)$$

где $P_{s,\mu n}(kA) = \frac{1}{2} \sum_{\sigma\nu} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p$ – характеристика зонда на сфере радиуса A ; $w_{\mu m}^n(A)$ – результат интегрирования поля на сфере.

Процедура измерения и алгоритм обработки существенно упрощаются при использовании зондов, удовлетворяющих условию $\mu = \pm 1$. Такими зондами являются, например, электрический диполь или конический рупор. Однако на некотором удалении от ИА мода $\mu = \pm 1$ преобладает и в поле зондов других типов, например, прямоугольного волновода или прямоугольного рупора, которые также могут успешно использоваться при сферическом сканировании.

Для зондов с $\mu = \pm 1$ достаточно выполнить измерение ближнего поля при двух положениях однопортового линейно-поляризованного зонда по углу χ : $\chi = 0^\circ$ и $\chi = 90^\circ$, что естественным образом соответствует измерению φ -й и θ -й компонент поля.

Уравнение (3) для $\mu = \pm 1$ сводится к системе из двух уравнений:

$$\begin{aligned} \nu T_{1mn} P_{1,1n}(kA) + \nu T_{2mn} P_{2,1n}(kA) &= w_{1m}^n(A), \\ \nu T_{1mn} P_{1,-1,n}(kA) + \nu T_{2mn} P_{2,-1,n}(kA) &= w_{-1m}^n(A). \end{aligned} \quad (4)$$

После решения системы уравнений (4) относительно T_{1mn} и T_{2mn} поле в дальней зоне рассчитывается в соответствии с (1).

Прямое измерение коэффициента усиления. После определения коэффициентов T_{1mn} и T_{2mn} может быть непосредственно рассчитан КУ антенны. Для расчета КУ используется эквивалентная форма формулы Фрисса, полученная в [5] в виде

$$\frac{1}{2} |W|^2 = \frac{G_p G_t}{4}, \quad (5)$$

где G_p – КУ эталонного зонда; G_t – КУ ИА; ν – сигнал на входе ИА; W – нормализованный сигнал в дальней зоне [5], определяемый как

$$W(\chi, \theta, \varphi) = \lim_{kA \rightarrow \infty} \left[w(A, \chi, \theta, \varphi) \frac{kA}{e^{jka}} \right], \quad (6)$$

где k – волновой множитель.

Нормализованный сигнал (6) вычисляется на основе уравнения наблюдения (2) как сигнал бесконечно удаленного зонда:

$$W(\chi, \theta, \varphi) = \nu \sum_{\substack{s,m,n \\ \mu=\pm 1}} T_{smn} e^{jms\varphi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{jm\chi} P_{s,\mu n}^{\infty}. \quad (7)$$

На бесконечном удалении от ИА любой зонд, с точки зрения своих направленных свойств, может рассматриваться как электрический диполь. Поэтому в качестве характеристики зонда $P_{s,\mu n}^{\infty}$ в (7) используем характеристику электрического диполя в дальней зоне [5]:

$$P_{s,1n}^{\infty} = -\frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1}, \quad P_{s,-1,n}^{\infty} = (-1)^s \frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1}. \quad (8)$$

После расчета, согласно (7), нормализованного сигнала дальней зоны $W(\chi, \theta, \varphi)$ КУ G_t определяется из уравнения (5):

$$G_t(\theta, \varphi) = \frac{4}{G_p} \frac{|W(\theta, \varphi)|^2}{|\nu|^2}. \quad (9)$$

Ближнее поле на сфере измеряется относительно заданного уровня входного сигнала ν с точностью до некоторой постоянной величины c , определяемой ослаблением приемопередающего тракта. Поскольку алгоритм преобразования данных ближнего поля cw в дальнюю зону линеен, полученный сигнал

дальней зоны cW известен с точностью до той же постоянной величины. Константа c определяется в ходе калибровки приемопередающего тракта путем измерения затухания сигнала между портами векторного анализатора цепей при прямом соединении входа ИА и выхода зонда.

Прямое измерение EIRP. В соответствии с определением эквивалентной изотропной излучаемой мощности, используемым в [5],

$$\text{EIRP} = \frac{1}{2} |v|^2 G_t. \quad (10)$$

Тогда (5) можно записать в виде

$$\frac{1}{2} |W|^2 = \frac{G_p \text{EIRP}}{4}. \quad (11)$$

Для измерения EIRP не требуется осуществлять калибровку приемопередающего тракта. Однако относительные измерения ближнего поля $w(A, \chi, \theta, \varphi)$ должны быть дополнены одним измерением абсолютного уровня мощности P_m в некоторой точке (A, θ_m, φ_m) , как правило, соответствующей максимальному уровню ближнего поля. В результате определяется калибровочный коэффициент K , позволяющий связать относительный уровень распределения ближнего поля на сфере с его абсолютной мощностью:

$$K = \frac{P_m}{\frac{1}{2} |w(\theta_m, \varphi_m)|^2}. \quad (12)$$

Нормализованный сигнал дальней зоны $W(\chi, \theta, \varphi)$ рассчитывается согласно (7) без учета влияния приемопередающего тракта. EIRP определяется из уравнения (11) с учетом калибровочного коэффициента (12)

$$\text{EIRP}(\theta, \varphi) = \frac{2K}{G_p} |W(\theta, \varphi)|^2. \quad (13)$$

Результаты экспериментальных исследований. Рассмотренные алгоритмы были апробированы при измерении КУ и EIRP эталонной рупорной антенны с прямоугольным раскрытием $15 \times 11,5$ см, диапазона 5,85...8,2 ГГц со стандартным волноводным фланцем WR-137 производства компании Penn Engineering.

Измерения проводились в безэховой камере НПП «ТРИМ». В качестве зондовой антенны использовался открытый конец волновода WR-137 того же частотного диапазона, что и ИА. Генерация и прием измерительных сигналов осуществлялись с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) R&S ZVA40.

Радиус сферы сканирования составил $A = 50$ см, шаг сканирования $\Delta\theta = \Delta\varphi = 1,5^\circ$, диапазон углов сканирования: $\theta = 0^\circ \dots 90^\circ$, $\varphi = -180^\circ \dots 180^\circ$. Для аппроксимации поля в дальней зоне использовалось $N = 40$ сферических гармоник. КУ зонда G_p , измеренный двухантенным методом, показан на рис. 2. КУ рупорной антенны G_t , полученный в соответствии с рассмотренным алгоритмом, показан на рис. 3 в сравнении с эталонными значениями, представленными производителем. Максимальное отличие в рабочей полосе частот не превышает 0,2 дБ.

При измерении EIRP с выхода ВАЦ на вход рупора подавался сигнал с уровнем мощности +10 дБм. Далее с учетом затухания в подводящем кабеле L и КУ рупора G_{et} были рассчитаны мощность на входе рупора P_{in} и значения (EIRP)_{et} в полосе частот, которые при проведении данного измерения были приняты в качестве эталонных. Пример расчета EIRP по данным сферического сканирования ближнего поля приведен в таблице для некоторых частот f рабочего диапазона.

Таблица. Основные исходные данные и результаты расчета EIRP

f , ГГц	L , дБ	G_{et} , дБ	P_{in} , дБм	(EIRP) _{et} , дБм	P_m , дБм	K	G_p , дБ	$W(0,0)$	EIRP, дБм	Δ , дБ
6,0	-7,04	18,38	2,96	21,34	-15,40	23,48	6,12	2,49	21,52	0,18
6,5	-7,37	19,03	2,63	21,66	-15,28	24,98	6,55	2,66	21,94	0,31
7,0	-7,70	19,62	2,30	21,92	-15,54	25,70	6,88	2,75	22,01	0,09
7,5	-7,97	20,17	2,03	22,20	-15,56	26,84	7,20	2,89	22,33	0,13
8,0	-8,26	20,68	1,74	22,42	-15,77	26,59	7,42	3,04	22,51	0,09

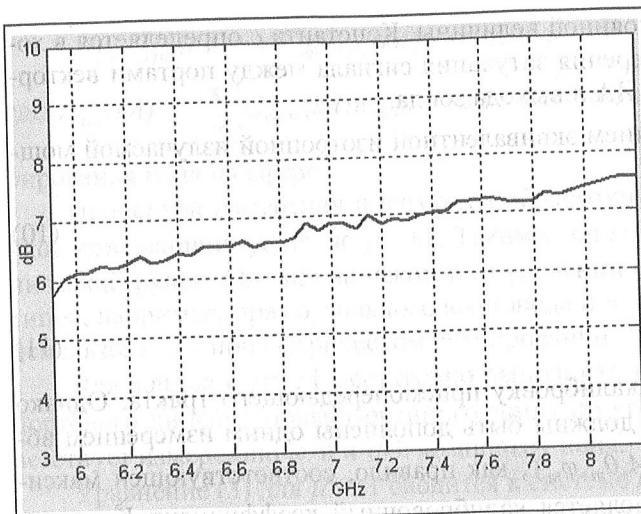


Рис. 2. Графическое представление КУ зондовой антенны открытым концом волновода WR-137

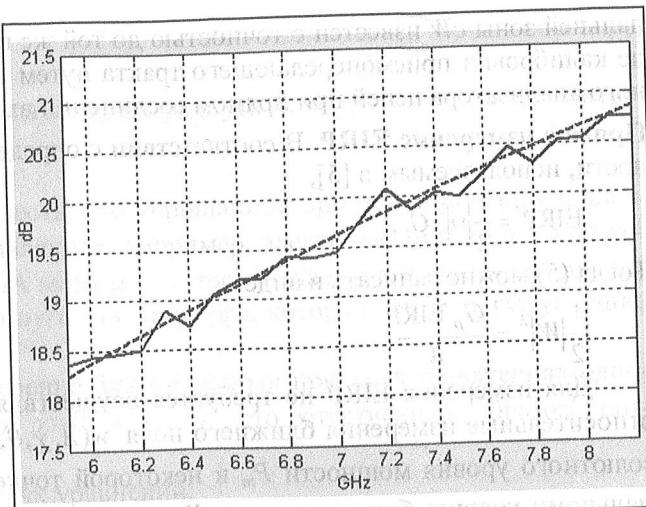


Рис. 3. Графическое представление измеренного (сплошная линия) и эталонного (пунктирная линия) КУ рупорной антенны

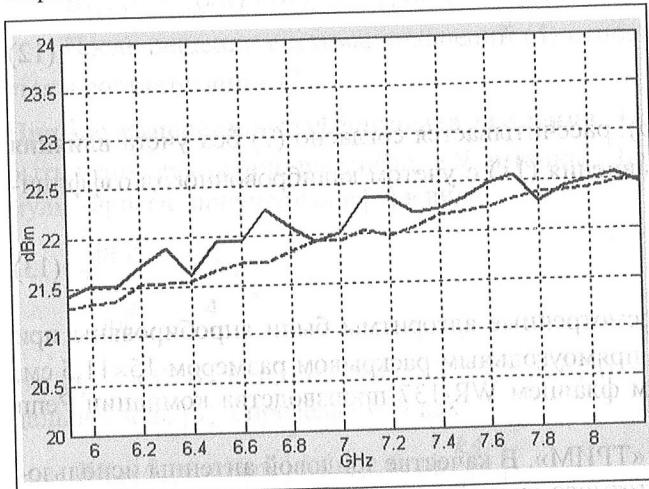


Рис. 4. Графическое представление измеренной (сплошная линия) и эталонной (пунктирная линия) эквивалентной изотропной излучаемой мощности

Измерения ближнего поля на сфере выполнялись так же, как и при измерении КУ. Затем было определено направление ($\theta_m=0^\circ$, $\varphi_m=0^\circ$), соответствующее максимуму ближнего поля, и произведено измерение мощности сигнала $P_m(\theta_m, \varphi_m)$ на выходе приемного зонда в этом направлении. Измерение осуществлялось с помощью ВАЦ в режиме измерения абсолютной мощности. После расчета калибровочного коэффициента K и нормализованного сигнала дальней зоны W согласно (13) были рассчитаны значения EIRP в рабочей полосе частот рупора (рис. 4). Максимальная погрешность измерения Δ не превышает 0,5 дБ и находится в пределах погрешности установки уровня выходной мощности внутреннего генератора ВАЦ, то есть в пределах задания значений EIRP, принятых в качестве эталонных.

- Реализованы алгоритмы прямого расчета КУ и EIRP непосредственно по измерениям ближнего поля антennы на сферической поверхности, без использования эталонной антенны. Алгоритмы экспериментально апробированы при измерении рупорной антенны диапазона 5,85...8,2 ГГц. Погрешность измерения КУ составила менее 0,2 дБ в рабочей полосе частот рупора, погрешность измерения EIRP – менее 0,5 дБ, что не превышает погрешности установки уровня мощности источника сигнала. Время измерения КУ при использовании данного метода сокращается более чем в два раза. Разработанные алгоритмы использованы в программном обеспечении АИВК, выпускаемых НПП «ТРИМ».

Литература

1. Бахрах Л.Д. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука. 1985.
2. 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.
3. Newell A., Ward R., McFarlane J. Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1988. V. 36. № 6.
4. IEEE recommended practice for near-field antenna measurements. Antenna Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society. IEEE Std 1720™. 2012.
5. Hansen J. Spherical near-field antenna measurements. London, UK: Peter Peregrinus, Ltd. 1988.
6. Doren W. Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning // Antenna Measurements and SAR. 2004.

7. Brian B. Spherical near-field antenna measurement note: insertion loss gain measurement // 30th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2008).

Поступила 4 апреля 2016 г.

Direct measurement of antenna gain and EIRP with spherical near-field scanner

© Authors, 2016

© Radiotekhnika, 2016

Yu. N. Kalinin – Ph.D. (Eng.), Deputy General Director at Scientific Research, Scientific and Production Enterprise TRIM (Saint Petersburg)

E-mail: kalinin@trimcom.ru

M. A. Chavdar – Head of Test Department, Scientific and Production Enterprise TRIM (Saint Petersburg)

E-mail: maxim@trimcom.ru

A conventional method of measuring the gain of passive antennas in the near field is the method of comparison using the reference antenna. This method is applied in planar, cylinder and spherical scanners and requires additional measurement of the distribution of the reference antenna near field. Direct method of gain measurement based on using the calibrated (standard) probe allows reducing the measurement time significantly.

Methods for measuring the equivalent isotropic radiated power (EIRP) in the far field and in the compact range (collimator) follow directly from Friis equation and are also based on using the reference antenna (standard collimator feed). Methods for measuring EIRP in the near field are less obvious.

Direct methods of measuring gain and EIRP in the planar scanners of the near field are successfully tested and implemented in the algorithm software of the automated measurement and computing complexes (AiVK) produced by the research and production enterprise TRIM (Saint Petersburg, Russia).

Methods of direct measurement of gain and EIRP in spherical scanners are insufficiently covered in the literature. The article reviews the algorithms of forward calculation of gain and EIRP directly by measuring antenna near field on spherical surface without using the reference antenna. The algorithms have been experimentally tested during measurements of antenna horn with frequency range 5,85...8,2 GHz. The gain measurement accuracy was less than 0,2 dB, EIRP measurement accuracy was less than 0,5 dB, which doesn't exceed the accuracy of the signal source power level setting. Using this method the gain measurement time is reduced by more than half.

References

1. Bakhrakh L.D. i dr. Metody izmerenij parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnej zone. L.: Nauka, 1985.
2. 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.
3. Newell A., Ward R., McFarlane J. Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1988. V. 36. № 6.
4. IEEE recommended practice for near-field antenna measurements. Antenna Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society. IEEE Std 1720-. 2012.
5. Hansen J. Spherical near-field antenna measurements. London, UK: Peter Peregrinus, Ltd. 1988.
6. Doren W. Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning // Antenna Measurements and SAR. 2004.
7. Brian B. Spherical near-field antenna measurement note: insertion loss gain measurement // 30th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2008).

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» Вы можете приобрести книгу

Авиационные системы радиовидения

Под ред. Г. С. Кондратенкова

ISBN 978-5-93108-105-2

Дано систематическое изложение основ теории авиационных систем радиовидения (амплитудные, фазовые, скоростные и поляризационные портреты, многопозиционные системы, обратное синтезирование). Приведены примеры реализации и эффективности различных методов радиовидения. Книга написана с использованием только открытых опубликованных трудов научной школы «Радиовидение» ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений радиотехнического профиля.