



УДК 621.396.6

© М. Ю. Пономарёв, О. Ю. Платонов, В. В. Шубников, 2015

Особенности измерения коэффициента усиления на планарном и сферическом стендах ближнего поля

Рассмотрены три основных метода и освещены некоторые особенности измерения коэффициента усиления на стендах ближнего поля с плоской и сферической поверхностями сканирования, описаны их основные преимущества и недостатки. Представлена зависимость конечного результата от параметров сканирования и даны рекомендации по их выбору. Проанализирована степень влияния на окончательный результат основных факторов, воздействующих на точность определения коэффициента усиления.

Ключевые слова: коэффициент усиления, электромагнитное поле, эффективная площадь антенны.

Задача определения коэффициента усиления (КУ) на стендах ближнего поля представляет большой практический интерес. Коэффициентом усиления G называют отношения квадрата напряжённости электромагнитного поля (ЭМП) от данной антенны в точке на электрической оси (или под заданным к ней углом) в дальней зоне к квадрату напряжённости ЭМП от ненаправленной антенны в той же точке при одинаковой входной мощности антенн [1].

Существует также понятие коэффициента усиления с учётом потерь на отражение (т. е. реализуемого КУ) G_r , который отличается от собственно коэффициента усиления G на величину потерь рассогласования в тракте и имеет вид [2]:

$$G_r = G(1 - |\Gamma_a|),$$

где Γ_a – комплексный коэффициент отражения трактовой волны от входа антенны.

Необходимо чётко понимать, какой именно КУ приведён в паспортах используемых эталонов.

Рассмотрим схему планарного сканирования в ближнем поле (рис. 1).

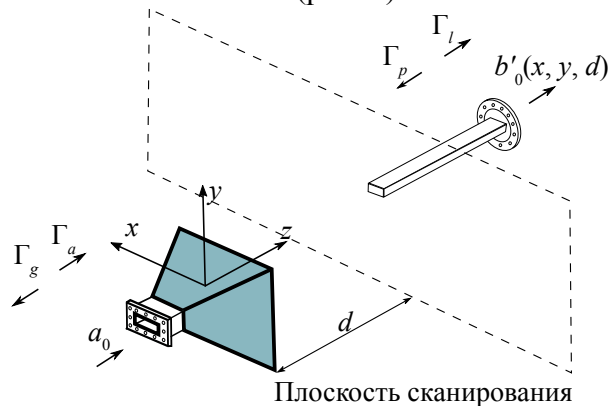


Рис. 1. Схема планарного сканирования в ближнем поле: с антенной связана левосторонняя система координат, с зондом – правосторонняя

Если пренебречь влиянием полей рассеяния зонда при его работе на приём на распределение токов исследуемого источника, то сигнал в волновом тракте зонда может быть определен выражениями [3]:

$$b'_0(x, y, d) = \gamma' a_0 \iint A_{10}(k_x, k_y) S'_{02}(k'_x, k'_y) \times e^{-ik_z d} e^{-ik_x x - ik_y y} dk_x dk_y;$$

$$b''_0(x, y, d) = \gamma'' a_0 \iint A_{10}(k_x, k_y) S''_{02}(k''_x, k''_y) \times e^{-ik_z d} e^{-ik_x x - ik_y y} dk_x dk_y,$$

где $b'_0(x, y, d)$, $b''_0(x, y, d)$ – комплексные амплитуды, снимаемые с зонда в двух соответствующих ортогональных поляризациях в точке (x, y) на плоскости сканирования, находящейся на расстоянии d от раскрыва исследуемой антенны;

a_0 – комплексная амплитуда волны, распространяющаяся по направлению к излучателям (раскрыву) антенны (т. е. входной сигнал, подводящийся к измеряемой антенне);

γ' и γ'' – импедансные рассогласования между зондами обеих поляризаций и нагрузочным портом, подключенным к зонду.

Значения γ' и γ'' определяются выражениями:

$$\gamma' = (1 - \Gamma_l \Gamma'_p)^{-1}; \quad \gamma'' = (1 - \Gamma_l \Gamma''_p)^{-1},$$

где Γ_l – комплексный коэффициент отражения трактовой волны от входной нагрузки приёмника зонда;

Γ'_p , Γ''_p – комплексные коэффициенты отражения зонда в двух ортогональных поляризациях.

Передающие свойства исследуемой антенны описывает амплитудный спектр плоских волн $A_{10}(k_x, k_y)$. Это векторная спектральная диаграмма направленности, подлежащая определению.

В свою очередь, приёмные свойства зонда в двух ортогональных поляризациях характеризуются амплитудными спектрами плоских волн $S'_{02}(k'_x, k'_y)$ и $S''_{02}(k''_x, k''_y)$ соответственно.

Результирующий спектр плоских волн для двух ортогональных поляризаций будет определяться выражениями:

$$D'(k_x, k_y) = A_{10}(k_x, k_y)S'_{02}(k'_x, k'_y);$$

$$D''(k_x, k_y) = A_{10}(k_x, k_y)S''_{02}(k''_x, k''_y).$$

Применяя преобразование Фурье к массивам измеренных данных $b'_0(x, y, d)$ и $b''_0(x, y, d)$, определяем выражения для результирующего углового спектра:

$$D'(k_x, k_y) = \frac{e^{ik_z d}}{4\pi^2 \gamma' a'_{0n}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} B'_0(x, y) e^{ik_x x + ik_y y} dx dy;$$

$$D''(k_x, k_y) = \frac{e^{ik_z d}}{4\pi^2 \gamma'' a''_{0n}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} B''_0(x, y) e^{ik_x x + ik_y y} dx dy,$$

где $B'_0(x, y)$ и $B''_0(x, y)$ – нормированные амплитудно-фазовые распределения к максимальному значению поля на этих АФР в точке (x_0, y_0) выражаются как:

$$B'_0(x, y) = b'_0(x, y) / b'_0(x_0, y_0);$$

$$B''_0(x, y) = b''_0(x, y) / b''_0(x_0, y_0).$$

В свою очередь a'_{0n} и a''_{0n} является нормирующими константами и имеют вид:

$$a'_{0n} = a_0 / b'_0(x_0, y_0);$$

$$a''_{0n} = a_0 / b''_0(x_0, y_0).$$

Коэффициент усиления исследуемой антенны связан с амплитудным спектром плоских волн соотношением:

$$G(k_x, k_y) = \frac{4\pi Y_0 k_z^2 |A_{10}(k_x, k_y)|^2}{\eta_0 (1 - |\Gamma_a|^2)}.$$

Для антенны (зонда), работающей в режиме приёма, основным параметром, характеризующим её приёмные характеристики, является действующая (эффективная) площадь антенны [3, 4]:

$$\sigma(k_x, k_y) = \frac{4\pi^2 \eta_0 |S'_{02}(k_x, k_y)|^2}{Y_0 (1 - |\Gamma_p|^2)},$$

где η_0 – характеристический адмитанс для распространяющихся волн в передающей линии, подсоединённой к антенне;

$Y_0 = \sqrt{\epsilon / \mu}$ – адмитанс окружающего пространства.

Коэффициент усиления и действующая площадь для взаимной антенны связаны соот-

ношением [4]: $\sigma = \lambda^2 G / 4\pi$.

Для определения a'_{0n} и a''_{0n} необходимо произвести дополнительное измерение характеристики коэффициента передачи кабельной системы c'_n , где кабель, идущий от генератора, соединяется непосредственно с нагрузкой, т. е. с приёмником. В этом случае c'_n будет связан с a'_{0n} соотношением:

$$a'_{0n} = \frac{1 - \Gamma_g \Gamma_l}{1 - \Gamma_g \Gamma_a} c'_n.$$

Таким образом, для зонда с поляризацией совпадающей с поляризацией антенны в направлении главного максимума исследуемой антенны, коэффициент усиления антенны можно выразить соотношением:

$$G_a(k_{x0}, k_{y0}) = \frac{M}{G_p(k_{x0}, k_{y0})} \times \left| \frac{4\pi}{\lambda^2} \Delta x \Delta y \sum_{x_m, y_n} \frac{B'_0(x_m, y_n)}{|c'_n|^2} e^{ik_{x0} x_m + ik_{y0} y_n} \right|^2, \quad (1)$$

в котором коэффициент рассогласования M , определяющийся коэффициентами отражения $\Gamma_g, \Gamma_l, \Gamma_a$ и Γ_p , будет иметь вид:

$$M = \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_a|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_l|^2} \frac{|1 - \Gamma_l \Gamma_p|^2}{(1 - |\Gamma_a|^2)(1 - |\Gamma_p|^2)},$$

где Γ_g – коэффициент отражения от генератора.

Существует три основных метода определения коэффициента усиления на стендах ближнего поля.

1. Метод непосредственного нахождения КУ (прямой метод)

При использовании прямого метода КУ находится непосредственно из снятого скана для исследуемой антенны по формуле (1). Для этого нужно иметь данные о КУ зонда G_p , с помощью которого производятся измерения, данные о коэффициенте передачи всей кабельной системы c'_n , а также данные о коэффициентах отражения $\Gamma_g, \Gamma_l, \Gamma_a$ и Γ_p от всех неоднородностей в системе.

Для точного определения КУ необходимо перехватить все энергию, излучённую (или принятую) измеряемой антенной, для чего тре-





буется корректно выбрать как шаг зондирования по вертикальной и по горизонтальной координатам, так и размеры области сканирования. Для этого шаг зондирования не должен превышать $\lambda/2$, где λ – длина волны, на которой определяется КУ. Это необходимо для выполнения условия теоремы отсчётов, описывающей точное восстановление непрерывной спектрально ограниченной функции по набору дискретных отсчётов. На практике желательно использовать более мелкий шаг, но такой, чтобы векторный анализатор цепей успевал осуществлять запись всей сетки необходимых частот в каждой точке, в противном случае придётся уменьшать механическую скорость движения станда. При той же области сканирования меньший шаг обеспечит большее число точек и, следовательно, лучшее усреднение случайных шумов.

Размеры области сканирования выбираются в каждом случае индивидуально, исходя из характерных особенностей измеряемой антенны.

Как правило, для узконаправленных антенн целесообразно выбирать границы области сканирования таким образом, чтобы добиться убывания амплитудного распределения на краях на уровне около -30 дБ относительно максимального значения амплитуды поля на плоскости сканирования. В таком случае погрешность, вызванная усечением области сканирования, обычно не превышает $0,1$ дБ. Выбирать границы области шире, как правило, не имеет смысла, т. к. вместо получения дополнительной информации будет происходить только накопление шумов.

В отдельных случаях допустимо выбирать область сканирования так, чтобы убывание на краю области сканирования составляло $-25 \dots -20$ дБ. В таком случае погрешность, вызванная усечением области сканирования, возрастает и может достигать $0,4$ дБ.

На практике наиболее серьёзную ошибку при измерении КУ может вносить нестабильность коэффициента передачи всей кабельной системы c'_n , особенно в случае большой длины кабелей, поэтому желательно провести серию измерений коэффициента передачи всей кабельной системы c'_n как до, так и после из-

мерений КУ, чтобы убедиться, что параметры кабельной системы остались неизменными с необходимой степенью точности.

В коэффициент рассогласования, как правило, основной вклад вносят множители $(1-|\Gamma_a|^2)^{-1}$ и $(1-|\Gamma_p|^2)^{-1}$. На рис. 2 показано, какое влияние оказывает данный множитель на коэффициент рассогласования M в зависимости от того, какой коэффициент стоячей волны (КСВ) имеют антенна или зонд. Рисунок также иллюстрирует отличие величины реализуемого КУ G_r от обычного КУ G в зависимости от величины КСВ в рассматриваемом устройстве.

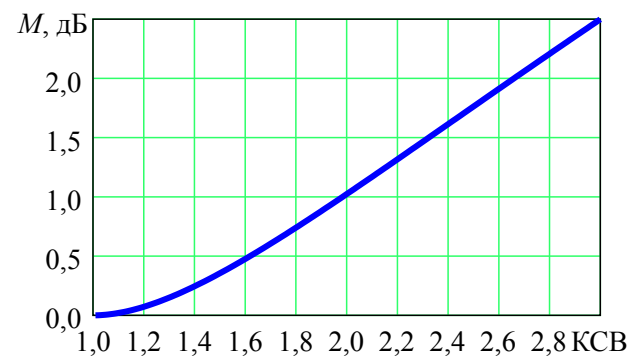


Рис. 2. Зависимость коэффициента рассогласования M от КСВ

2. Метод сравнения с эталонной антенной

Для нахождения КУ исследуемой антенны методом сравнения требуется наличие эталонной антенны с паспортизованным КУ. При этом в одних и тех же условиях производится последовательное снятие скана сначала исследуемой антенны, а затем дополнительного скана эталонной антенны.

Строгое нахождение КУ по методу сравнения осуществляется по формуле:

$$G_a(k_{x0}, k_{y0}) = \frac{\left| \sum_{x_m, y_n} B'_{0a}(x_m, y_n) e^{ik_{x0}x_m + ik_{y0}y_n} \right|^2}{\left| \sum_{x_m, y_n} B'_{0ST}(x_m, y_n) e^{ik_{x0}x_m + ik_{y0}y_n} \right|^2} \times \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_a|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_{ST}|^2} \frac{(1 - |\Gamma_{ST}|^2)}{(1 - |\Gamma_a|^2)} G_{ST}(k_{x0}, k_{y0}),$$

где G_{ST} – КУ эталонной антенны;

Γ_{ST} – коэффициент отражения для эталонной антенны.

При измерении КУ методом сравнения особенно важно понимать, какой КУ указан

производителем в паспорте эталонной антенны – G_r или G .

Главное преимущество данного метода в том, что для нахождения КУ не требуется знать информации ни о КУ зонда, ни о коэффициенте передачи всей кабельной системы c'_n и коэффициентах отражения Γ_l и Γ'_p . При этом для точного нахождения КУ всё же желательно знать коэффициенты отражения Γ_g , Γ_a и Γ_{ST} .

Основной недостаток метода – необходимость снятия дополнительного скана для эталонной антенны, что требует значительных временных затрат. Проведение измерений как основного скана для исследуемой антенны, так и дополнительного скана для эталонной антенны лучше проводить в один день, т. к. за это время условия, при которых проводятся измерения (температура, положение объекта, положение кабелей), изменяются не существенно. Если же условия, при которых проводятся измерения меняются, то это может привести к ошибке в определении КУ. Поэтому данный метод нельзя рекомендовать использовать при необходимости проведения большого числа измерений.

Размер обоих сканов целесообразно выбирать исходя из тех же рекомендаций, что и в прямом методе. Следует лишь отметить, что, поскольку сравнение обоих сканов производят на одинаковых частотах, то шаг зондирования должен быть у обоих сканов одинаковым по обеим координатам. Размеры области сканирования при этом могут различаться. Кроме того, в отдельных случаях, например, когда эталонная антенна имеет амплитудное распределение, более локализованное по площади, чем исследуемая антенна, размеры областей сканирования обязаны быть разными. Такое наблюдается, в частности, если в роли исследуемой антенны выступает решётка большой площади, а в качестве эталонной антенны – антенна рупорного типа.

3. Метод трёх антенн

Для нахождения КУ по методу трёх антенн нужно провести серию, состоящую из трёх измерений. КУ всех трёх антенн находится путём решения системы, состоящих из трёх уравнений:

$$G_{rA1} = \sqrt{\frac{G_{rA1} G_{rA2} \cdot G_{rA1} G_{rA3}}{G_{rA2} G_{rA3}}};$$

$$G_{rA2} = \sqrt{\frac{G_{rA1} G_{rA2} \cdot G_{rA2} G_{rA3}}{G_{rA1} G_{rA3}}};$$

$$G_{rA3} = \sqrt{\frac{G_{rA3} G_{rA2} \cdot G_{rA1} G_{rA3}}{G_{rA2} G_{rA1}}},$$

где G_{rA1} , G_{rA2} , G_{rA3} – реализуемые коэффициенты усиления всех измеряемых антенн;

$G_{rA1} G_{rA2}$, $G_{rA1} G_{rA3}$, $G_{rA2} G_{rA3}$ – определяются уравнением передачи Фрииса [5]:

$$G_{rA1} G_{rA2} = \frac{P_{A12}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2;$$

$$G_{rA1} G_{rA3} = \frac{P_{A13}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2;$$

$$G_{rA2} G_{rA3} = \frac{P_{A23}}{P_{TX}} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2,$$

где P_{A12} , P_{A13} , P_{A23} – мощности, принимаемые антеннами в трёх измерениях;

P_{TX} – мощность, передаваемая в тракт;

R – расстояние между антеннами.

Основным преимуществом метода является возможность нахождения КУ в условиях полного отсутствия информации о характеристиках измеряемых антенн.

В силу того, что часто по крайней мере одна из антенн является зондом, имеющим узконаправленную диаграмму направленности (ДН), реализация данного метода на стенде ближнего поля с плоской поверхностью сканирования не вполне оправдана, т. к. часто плоской поверхности сканирования не хватает для того, чтобы перехватить всю энергию, принимаемую (или излучаемую) антенной, вследствие чего могут возникать ошибки в определении КУ. Кроме того, есть вероятность возникновения эффекта Гиббса, вызванного скачком поля на краю поверхности сканирования, при пересчёте амплитудно-фазового распределения в ДН [6]. В таком случае ДН антенны после пересчёта может иметь осциллирующий характер, что будет дополнительным источником ошибок определения КУ. Это особенно актуально для низкочастотных антенн, где часто бывает сложно достичь убывания поля на границах области сканирования даже



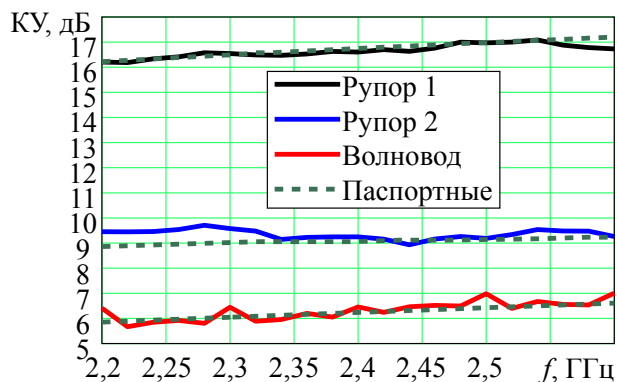


Рис. 3. КУ (*Gain*), найденный методом трёх антенн при сферическом сканировании

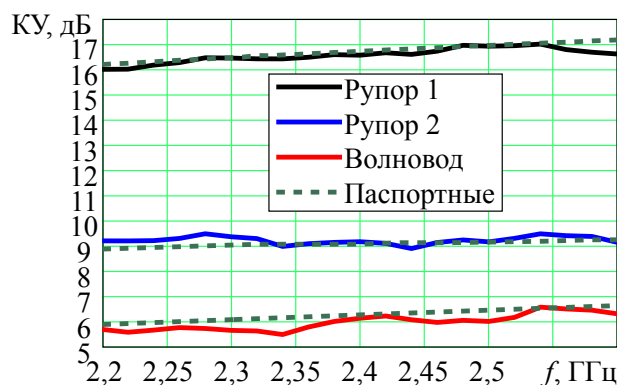


Рис. 4. КУ (*Gain Realized*), найденный методом трёх антенн при сферическом сканировании

до -20 дБ относительно максимума амплитудного распределения.

Таким образом, наиболее целесообразно использовать для измерения метод трёх антенн на стендах ближнего поля со сферической поверхностью сканирования, т. к. в этом случае удастся перехватить всю энергию антенн с любым характером диаграммы направленности.

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений КУ методом трёх антенн на стенде ближнего поля со сферической поверхностью сканирования. Эталонный рупор 1 в техническом паспорте имеет погрешность $KU \pm 0,5$ дБ,

эталонный рупор 2 – погрешность $KU \pm 1$ дБ. Как можно увидеть, полученные значения КУ в измерениях для всех трёх антенн достаточно хорошо совпадают с характеристиками, заявленными производителями эталонных антенн. Основным недостатком метода трёх антенн является длительность процесса измерений. Оптимально использовать этот метод для нахождения характеристик измерительных зондов с целью создания набора их калибровочных характеристик, которые затем можно использовать для нахождения КУ исследуемых антенн с помощью прямого метода.

Список литературы

1. Геруни П. М. Антенны сверхвысоких частот. Антенные измерения. Термины и определения. Рекомендация. Ереван: НПО «ВНИИРИ», 1990, 130 с.
2. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-1993. Approved March 18. IEEE: 1993, 36 p.
3. Newell A. C., Ward R. D., Mcfarlane E. J. Gain and power parameter measurement using planar near-field techniques // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1988. Vol. 36, No. 6. P. 792–803.
4. Kerns D. M. Plane-Wave Scattering-Matrix Theory of Antennas and Antenna-Antenna Interactions: Formulation and Applications // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – B. Mathematical Sciences 1976. Vol. 80B, No. 1, January – March. P. 40-49.
5. Stuzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design, 2nd edn, New York : John Wiley & Sons Inc., 1998. 79 p.
6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.

Поступила 03.06.15

Пономарёв Максим Юрьевич – начальник сектора разработки алгоритмов и программ АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: методы измерения характеристик антенн в ближней зоне для планарной, цилиндрической и сферической поверхностей сканирования, методы настройки антенных решёток.

Платонов Олег Юрьевич – начальник НИС антенных измерений АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: методы измерения характеристик антенн в ближней зоне для планарной, цилиндрической и сферической поверхностей сканирования, методы настройки антенных решёток.

Шубников Виктор Васильевич – инженер второй категории АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: методы измерения характеристик антенн в ближней зоне для сферической, цилиндрической и планарной поверхностей сканирования, методы настройки антенных решёток, параллельные вычисления.