

Уравнение измерения метода двух (трех) антенн любого типа

В. А. ТИЩЕНКО, В. И. ТОКАТЛЫ, С. А. КОЛОТЫГИН, В. И. ЛУКЬЯНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: otd200@vniiftri.ru

Получено уравнение измерения метода двух (трех) антенн на основе строгих электродинамических соотношений, справедливое для антенн любого типа.

Ключевые слова: антенна, уравнение измерения.

The equation of measurement of two (three) antennas method based on the strict electrodynamic correlations and valid for any type of antenna was obtained.

Key words: antenna, measurement equation.

Исторически сложилось так, что метод двух (трех) антенн разрабатывали и совершенствовали практически независимо для рупорных на частотах выше 1 ГГц [1—5] и дипольных на частотах ниже 1 ГГц [6—8] антенн. Теорию этого метода для рупорных антенн создавали в рамках электродинамических понятий и теорий, на основе строгих решений уравнений Максвелла для однородной линии передачи и для дальней зоны источника электромагнитного излучения в свободном пространстве. На этой же основе метод усовершенствовали с учетом конечного расстояния между антеннами (учет близости антенн), влияния земли и антенн друг на друга, отличия поляризации от линейной и т. д. Поэтому параметры всех элементов системы (коэффициенты отражения от антенны, генератора, ваттметра и пр.) относили к опорным сечениям соответствующих элементов, что однозначно определяло параметры антенны и других элементов цепей сверхвысокой частоты (СВЧ).

При разработке метода двух (трех) антенн применительно к дипольным антеннам сложилась совсем иная ситуация. Для описания электромагнитного поля в дальней зоне и в этом случае служат решения уравнений Максвелла для дальней зоны. Однако вся остальная часть теории метода построена с использованием понятий и теорем низкочастотных цепей. Это сразу же породило целый ряд проблем, связанных с некорректностью таких понятий, как «клеммы или зажимы антенны», «вход антенны», «ток на входе антенны» и т. д. Все уточнения метода, направленные на учет влияния земли, взаимодействия антенн и других факторов, проводились в рамках той же идеологии и поэтому не давали ответа на главный вопрос о корректности использования в данном случае понятий и теорем низкочастотных цепей. Получить ответ на этот вопрос можно, только если подойти к выводу формул, лежащих в основе метода, со строгих электродинамических позиций для антенны произвольного типа.

В классическом варианте искомой величиной, подлежащей определению, в методе двух (трех) антенн служит коэффициент усиления антенны, а измеряемой величиной — мощность (отношение мощностей). Для дипольных антенн традиционно определяемой величиной является действующая длина, а измеряемой величиной — напряжение (отношение напряжений), которое является векторной величи-

ной в том смысле, что оно характеризуется модулем и фазой. Поэтому в уравнение измерений рассматриваемого метода входят фазовые соотношения, которые позволяют оперировать понятием электрического (фазового) центра антенны и однозначно определиться с выбором точек для измерения расстояния между антеннами. Учитывая прогресс в создании векторных анализаторов цепей, которые охватывают широкий диапазон частот от десятков килогерц до десятков гигагерц и позволяют измерять параметры четырехполюсников через отношение напряжений падающих и отраженных волн, появляется возможность использовать их в этом методе. В данной работе приведен вывод уравнения измерений метода двух (трех) антенн на основе строгих электродинамических соотношений, справедливых для антенн любого типа, который основан на измерении коэффициента передачи между антеннами (отношения напряжений), в том числе при применении анализаторов цепей.

Коэффициент передачи между двумя антеннами. Пусть имеется несколько (две или три) антенн A_k , $k = 1, 2, 3$. Антенна A_g с номером $k = g$ (см. рисунок) соединяется линией передачи с генератором электромагнитных колебаний Γ и образует генератор электромагнитного поля (ЭМП). Антенна A_m с номером $k = m$ соединяется линией передачи с вольтметром B и образует измеритель параметров ЭМП. Точки O_g , O_m — электрические центры антенн соответственно ге-

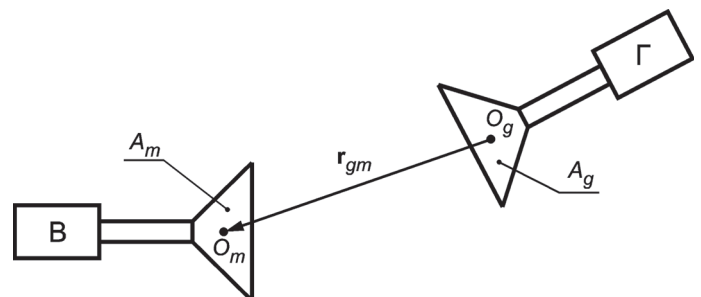


Схема включения двух антенн A_g и A_m :

Γ — генератор электромагнитного поля; B — вольтметр; O_g , O_m — электрические центры антенн; r_{gm} — радиус-вектор

нератора и измерителя; $\mathbf{r}_{gm}$ — радиус-вектор, соединяющий точку O_g с точкой O_m , $r_{gm} = |\mathbf{r}_{gm}|$ — расстояние между электрическими центрами антенн генератора и измерителя. Под электрическим центром антенны понимаем начало системы координат, в которой записывается (измеряется) амплитудная, поляризационная и фазовая диаграммы направленности антенны.

Найдем коэффициент передачи по напряжению K_U между входом антенны генератора и выходом антенны измерителя. Конкретизировать тип антенны (дипольная, рупорная), а также тип линии передачи (коаксиальная линия, волновод) не будем, так как проводимый ниже анализ не зависит от их типов. Полагаем, что выполняются следующие условия:

генератор и измеритель параметров ЭМП расположены в свободном пространстве, т. е. пренебрегаем влиянием земли и окружающих предметов на процессы генерации и измерения;

расстояние между генератором и измерителем таково, что можно, во-первых, использовать приближение дальней зоны, а во-вторых, пренебречь взаимодействием между генератором и измерителем.

Запишем формулу для комплексной амплитуды напряженности электрического поля (НЭП) $\mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm})$, возбуждаемой генератором ЭМП в точке O_m [9]:

$$\mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm}) = \frac{kW_0 L_{ag} I_g}{4\pi r_{gm}} f_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \times \exp\left\{i\left[\frac{\pi}{2} + \Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0) - kr_{gm}\right]\right\}. \quad (1)$$

Здесь k — волновое число; W_0 — волновое сопротивление свободного пространства; L_{ag} , I_g — действующая длина и ток во входном опорном сечении антенны генератора ЭМП;

$f_g(\mathbf{r}_{gm}^0)$, $\mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0)$, $\Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0)$ — амплитудная, поляризационная и фазовая диаграммы направленности антенны генератора; $\mathbf{r}_{gm}^0 = \mathbf{r}_{gm} / r_{gm}$; $\mathbf{r}_{g0}^0$ — единичный вектор в направлении максимума амплитудной диаграммы направленности антенны генератора.

Напряжение U_{am} , измеряемое вольтметром (напряжение в выходном опорном сечении антенны измерителя), определяется по формуле [9]:

$$U_{am} = V_m Z_B / (Z_{am} + Z_B),$$

где Z_B — входное сопротивление вольтметра; Z_{am} , V_m — сопротивление антенны измерителя и ЭДС эквивалентного генератора,

$$V_m = \mathbf{E}_g(\mathbf{r}_{gm}) \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0) f_m(\mathbf{r}_{mg}^0) L_{am} \times \exp\left[i\left(\Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) - \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0)\right)\right]; \quad (2)$$

L_{am} — действующая длина антенны измерителя; $f_m(\mathbf{r}_{mg}^0)$, $\mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0)$, $\Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0)$ — амплитудная, поляризационная и фа-

зовая диаграммы направленности антенны измерителя; $\mathbf{r}_{mg}^0 = -\mathbf{r}_{gm}^0$; $\mathbf{r}_{m0}^0$ — единичный вектор в направлении максимума амплитудной диаграммы направленности антенны измерителя.

Подставим (1) в (2) с учетом того, что напряжение U_{ag} во входном опорном сечении антенны генератора ЭМП связано с током I_g соотношением $U_{ag} = I_g Z_{ag}$, где Z_{ag} — сопротивление антенны, найдем коэффициент передачи между антеннами

$$K_{mg} = \frac{U_{am}}{U_{ag}} = \frac{kW_0 Z_B}{4\pi r_{gm} Z_{ag} (Z_{am} + Z_B)} \times f_g(\mathbf{r}_{gm}^0) f_m(\mathbf{r}_{mg}^0) \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{gm}^0) \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{mg}^0) L_{ag} L_{am} \times \exp\left\{i\left[\frac{\pi}{2} + \Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) - \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0) + \Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) - \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0) - kr_{gm}\right]\right\}. \quad (3)$$

Будем считать, что измеритель и генератор ЭМП ориентированы в пространстве так, что выполняются условия:

направление главного максимума амплитудной диаграммы направленности измерителя совпадает с $\mathbf{r}_{gm}$ (см. рисунок), т. е. $\mathbf{r}_{m0}^0 = \mathbf{r}_{mg}^0$;

направление главного максимума амплитудной диаграммы направленности генератора совпадает с $\mathbf{r}_{gm}$, т. е. $\mathbf{r}_{g0}^0 = \mathbf{r}_{gm}^0$.

Из этих условий следует, что

$$f_m(\mathbf{r}_{mg}^0) = f_g(\mathbf{r}_{gm}^0) = 1, \quad \Phi_m(\mathbf{r}_{mg}^0) = \Phi_m(\mathbf{r}_{m0}^0);$$

$$\Phi_g(\mathbf{r}_{gm}^0) = \Phi_g(\mathbf{r}_{g0}^0).$$

Эти соотношения позволяют упростить (3):

$$K_{mg} = \frac{U_{am}}{U_{ag}} = \frac{kW_0 Z_B}{4\pi r_{gm} Z_{ag} (Z_{am} + Z_B)} \times \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{g0}^0) \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{m0}^0) L_{ag} L_{am} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2} - kr_{gm}\right)\right]. \quad (4)$$

Найдем из (4) произведение

$$L_{am} L_{ag} = \beta_{mg}, \quad (5)$$

$$\text{где } \beta_{mg} = K_{mg} \frac{4\pi r_{gm} (Z_{am} + Z_B) Z_{ag}}{kW_0 Z_B \rho_{mg}} \exp\left[i\left(kr_{mg} - \frac{\pi}{2}\right)\right], \quad (6)$$

$$\rho_{mg} = \mathbf{p}_m(\mathbf{r}_{m0}^0) \mathbf{p}_g(\mathbf{r}_{g0}^0).$$

Формулу (6) можно переписать, используя вместо Z_{am} , Z_{ag} и Z_B коэффициенты отражения согласно формулам [9]:

$$Z_{am} = W_n \frac{1 + \Gamma_{am}}{1 - \Gamma_{am}}; Z_{ag} = W_n \frac{1 + \Gamma_{ag}}{1 - \Gamma_{ag}}; Z_B = W_n \frac{1 + \Gamma_B}{1 - \Gamma_B}, \quad (7)$$

где W_n — характеристическое сопротивление линии передачи; Γ_B , Γ_{ag} , Γ_{am} — коэффициенты отражения от вольтметра, антенн генератора и измерителя.

Формулы (5), (6) лежат в основе определения действующей длины антенны методом двух или трех антенн при измерении напряжений на входе генераторной и выходе измерительной антенн.

Метод двух антенн. Пусть имеются две одинаковые антенны A_1 и A_2 . Это значит, что $L_{a1} = L_{a2} = L_a$, $Z_{a1} = Z_{a2} = Z_a$, $\rho_{12} = 1$. Учитывая это, получаем

$$L_a = \sqrt{\beta_{12}}; \beta_{12} = K_{12} \frac{4\pi r_{12}(Z_a + Z_B)Z_a}{kW_0 Z_B} \exp\left[i\left(kr_{12} - \frac{\pi}{2}\right)\right].$$

Метод трех антенн. Пусть имеются три разные антенны A_k , $k = 1, 2, 3$. Используя их попарно, можно измерить коэффициенты передачи K_{12} , K_{13} и K_{23} . Тогда для определения действующих длин L_{a1} , L_{a2} и L_{a3} получим систему уравнений

$$L_{a1}L_{a2} = \beta_{12}, L_{a1}L_{a3} = \beta_{13}, L_{a2}L_{a3} = \beta_{23}.$$

Решая эту систему, находим действующие длины антенн

$$L_{a1} = \sqrt{\beta_{12}\beta_{13} / \beta_{23}}; L_{a2} = \sqrt{\beta_{12}\beta_{23} / \beta_{13}}; L_{a3} = \sqrt{\beta_{13}\beta_{23} / \beta_{12}}.$$

Сравнение с известными результатами. Сравним полученные результаты с классическим вариантом метода двух антенн, в котором [3]:

на выходе измерительной антенны измеряется не напряжение, а мощность;

вместо напряжения на входе генераторной антенны измеряется мощность на входе измерителя мощности, подключенного вместо генераторной антенны;

определяется коэффициент усиления антенны G_a , а не действующая длина антенны L_a ;

вместо комплексных сопротивлений используются коэффициенты отражения.

Так как в [3] приведена формула для $G_m G_g$, для сравнения с [3] вернемся к формуле (5), подставим в нее β_{mg} из (6) и заменим действующую длину на коэффициент усиления, используя зависимость между ними [9]:

$$|L_a| = k^{-1} \sqrt{4\pi G_a \operatorname{Re}(Z_a) / W_0},$$

тогда получим

$$G_{am}G_{ag} = |K_{mg}|^2 \frac{k^2 r_{mg}^2 |(Z_{am} + Z_m)|^2 |Z_{ag}|^2}{|p_{mg}|^2 |Z_m|^2 \operatorname{Re}(Z_{am}) \operatorname{Re}(Z_{ag})}, \quad (8)$$

где Z_m — входное сопротивление измерителя мощности, который заменил вольтметр.

Мощность на выходе m -й измерительной антенны определяется по формуле

$$P_{am} = \operatorname{Re}(Z_m) |U_{am}|^2 / (2|Z_m|^2).$$

Аналогично определяется мощность P_m на входе измерителя мощности через его входное напряжение U_m , когда последний присоединен к генератору электромагнитных колебаний вместо линии передачи с генераторной антенной A_g . Поскольку в коэффициент передачи по напряжению K_{mg} кроме U_{am} входит напряжение на входе генераторной антенны U_{ag} , требуется найти зависимость между U_{ag} и U_m , а затем выразить U_{ag} через P_m .

При условии, что ЭДС генератора электромагнитных колебаний Γ (см. рисунок) поддерживается одинаковой при подключении линии передачи с антенной A_g и измерителя мощности, получаем

$$U_{ag} = U_m (Z_r + Z_m) Z_{ag} / [(Z_r + Z_{ag}) Z_m],$$

где Z_r — входное сопротивление генератора.

Отсюда исходя из определения можно выразить $|K_{mg}|^2$ через измеряемые мощности P_{am} и P_m :

$$|K_{mg}|^2 = |Z_r + Z_{ag}|^2 |Z_m|^2 P_{am} / (|Z_r + Z_m|^2 |Z_{ag}|^2 P_m). \quad (9)$$

После замены комплексных сопротивлений коэффициентами отражений с использованием формул (7) и (9) из (8) находим

$$G_{am}G_{ag} = \frac{P_{am}}{P_m} \left(\frac{4\pi r_{mg}}{\lambda |p_{mg}|} \right)^2 \frac{|1 - \Gamma_m \Gamma_{am}|^2 |1 - \Gamma_r \Gamma_{ag}|^2}{|1 - \Gamma_m \Gamma_r|^2 (1 - |\Gamma_{am}|^2) (1 - |\Gamma_{ag}|^2)}, \quad (10)$$

где $\lambda = 2\pi/k$ — длина волны; Γ_m , Γ_r — коэффициенты отражения от измерителя мощности и генератора.

Если генераторная и измерительная антенны согласованы по поляризации (имеют одинаковую левую или правую поляризацию, большие оси эллипсов поляризации параллельны) и имеют одинаковый коэффициент эллиптичности, то $p_{mg} = 1$. В этом случае формула (10) совпадает с соответствующей формулой из [3].

Уравнения измерений при использовании векторных анализаторов цепей. Изложенный метод определения параметров антенн основан на измерении напряжений и мощностей в системе вход антенны генератора ЭМП — выход антенны измерителя ЭМП, которую можно рассматривать как четырехполюсник, включенный в линию передачи. В технике СВЧ для измерения параметров четырехполюсников принято пользоваться понятиями падающих и отраженных волн, которые позволяют характеризовать четырехполюсник системой S-параметров, измеряемых при помощи векторных анализаторов цепей. При этом важно, что они дают возможность измерять как модуль, так и фазу S-параметров, применять метод двух (трех) антенн не только для определения амплитудных, но и фазовых характеристик антенн с анализом погрешностей полученных результатов.

Чтобы выразить параметры антенн через S-параметры, достаточно преобразовать (6) и определить действующие длины антенн. Для перехода к S-параметрам введем поня-

тия падающих и отраженных волн на входе генераторной и выходе измерительной антенн:

$$U_{ag} = U_{ag}^i + U_{ag}^s; U_{am} = U_{am}^i + U_{am}^s,$$

где U_{ag}^i, U_{am}^i — амплитуды напряжения падающей и отраженной волн соответственно во входном опорном сечении генераторной и в выходном опорном сечении измерительной антенн.

Тогда, если выполняется условие $Z_r = Z_b = W_n$, обязательное для анализаторов цепей, можно записать

$$U_{am}^s = 0; \Gamma_b = 0; K_{mg} = S_{21}^{mg} / (1 + \Gamma_{ag}); \Gamma_{ag} = S_{11}^g; \Gamma_{am} = S_{22}^m. \quad (11)$$

С учетом (11) получим вместо (6) формулу, при помощи которой определяются действующие длины антенн:

$$\beta_{mg} = \frac{8\pi r_{gm} W_n S_{21}^{mg}}{kW_0 (1 - S_{11}^g) (1 - S_{22}^m) \rho_{mg}} \exp \left[i \left(kr_{gm} - \frac{\pi}{2} \right) \right].$$

Для коэффициентов усиления антенн вместо (10) получим

$$G_{am} G_{ag} = \left(4\pi r_{mg} / (\lambda | \rho_{mg} |) \right)^2 | S_{12}^{mg} |^2 / \left[(1 - | S_{22}^m |^2) (1 - | S_{11}^g |^2) \right].$$

Заключение. Выведены формулы, которые лежат в основе методов двух и трех антенн. Они определяют уравнение измерений для антенн любого типа (дипольных и рупорных), любого типа линии передачи, соединяющей антенну с вольтметром, ваттметром или анализатором цепей, применимое при измерении напряжения, мощности и S-параметров. Полученные формулы позволяют найти действующую длину антенны и другие параметры: коэффициент калибровки, коэффициент усиления или эффективную площадь. Таким образом, приведенные результаты носят достаточно общий и универсальный характер. В частных случаях, которые рассмотрены ранее другими авторами, полученные формулы приводятся к известным.

Следовательно, ответ на вопрос о корректности использования понятий и теорем низкочастотных цепей является в случае дипольных антенн положительным, но при выполнении весьма существенных условий. Полученные формулы строго справедливы только тогда, когда под антенной понимается устройство, содержащее отрезок однородной линии передачи (соединитель) и предназначенное для преобразования электромагнитной волны в этой линии передачи в

электромагнитное поле в пространстве, окружающем антенну, или, наоборот, для преобразования электромагнитного поля во внешнем пространстве антенны в электромагнитную волну в линии передачи. При таком понимании входом антенны является опорное сечение линии передачи и все величины задаются в этом сечении и именно для него применима эквивалентная схема соединения антенны с генератором электромагнитных колебаний, вольтметром или ваттметром. Это значит, что антенна как конструктивный элемент кончается соединителем (коаксиальным или волноводным), а то, что называют в случае дипольной антенны клеммами, вместе с симметрирующим трансформатором и другими согласующими элементами, расположенными между соединителем и клеммами, относится к внутреннему устройству антенны.

Литература

1. **Фрадин А. З., Рыжков Е. В.** Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М.: Связьиздат, 1962.
2. **Захарьев Л. Н. и др.** Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М.: Радио и связь, 1985.
3. **Баумен Р. Р.** Калибровка образцовых антенн на частотах выше 1 ГГц // ТИИЭР. 1967. Т. 55. № 6. С. 272.
4. **Куммер В. Х., Джиллеспей Э. С.** Антенные измерения // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 4. С. 143.
5. **Ньюэлл А. К., Штубенрах К. Ф., Бейрд Р. К.** Методы градуировки образцовых СВЧ-антенн по коэффициенту усиления // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 1. С. 145.
6. **Smith A. A. Jr.** Standard site method for determining antennas factors // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 1982. EMC-24. N 3. P. 316.
7. **Smith A. A. Jr., German R. F., Pate J. B.** Calculation of Site Attenuation From Antenna Factors // Ibid. P. 301.
8. **ANSI C63.5-1988.** American National Standard for Calibration of Antennas Used for Radiated Emission Measurement in Electromagnetic Interference (EMI) Control.
9. **Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И.** Основные положения общей теории генераторных и измерительных антенн радиочастотного диапазона // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 44—47; **Tishchenko V. A., Tokatly V. I., Luk'yanov V. I.** Fundamental propositions of a general theory of radio-frequency generator and measuring antennas // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 875—881.
10. **Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П.** Справочник по элементам волноводной техники. М.: Госэнергоиздат, 1963. С. 111—119.

Дата принятия 18.06.2012 г.