

Измерение коэффициента усиления электрически малых излучателей в ближней зоне методом одной антенны

М. И. Сугак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

sugakmi@yandex.ru

Аннотация. Представлены методика и результаты измерений частотной зависимости коэффициента усиления (КУ) электрически малых излучателей в ближней зоне (БЗ) в условиях компактного настольного полигона с применением одной исследуемой антенны и плоского рефлектора ограниченных размеров. Приведены результаты измерений частотной зависимости КУ для ряда антенн, дано сравнение полученных результатов с другими методами.

Ключевые слова: измерение КУ, метод одной антенны, ближняя зона, электрически малые антенны, ферритовые антенны, полоса рабочих частот

I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Интенсивное развитие мобильных средств связи стимулирует совершенствование и разработку эффективных расчетных и экспериментальных методов определения энергетических характеристик электрически малых антенн (ЭМА). Характерной особенностью любых ЭМА является узкая полоса рабочих частот, а также низкий коэффициент полезного действия (КПД) и КУ [1–5], поэтому большой интерес представляют расчетные и экспериментальные методы определения этих характеристик. При этом особый интерес представляют методы измерений, пригодные для реализации в условиях компактных (настольных) полигонов, а также аналитические математические модели, позволяющие выполнить предварительные оперативные инженерные оценки до детального полноволнового электродинамического моделирования. К такого рода результатам можно отнести работы [6–11].

В данном докладе предложен метод экспериментального определения КУ ЭМА, пригодный в условиях ближней зоны, который основан на применении одной исследуемой антенны и проводящего экрана ограниченных размеров. Представлены результаты проверки состоятельности метода с помощью математического моделирования методом интегрального уравнения для короткого рассогласованного монополя над экраном и результаты измерений ряда ЭМА различных типов. Приведено сопоставление результатов измерения с другими методами.

II. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ОДНОЙ АНТЕННЫ С ЭКРАНОМ

В работах [9–11] обсуждается возможность измерения КУ ЭМА в условиях ближней зоны методом двух или трех антенн на основе измерения взаимных коэффициентов – передачи в условиях компактного

настольного полигона. Дальнейшим развитием этой методики может быть применение только одной антенны и проводящего рефлектора. Такая методика применяется для полноразмерных антенн в СВЧ диапазоне [12] для дальней зоны и требует выполнения условий, которые для ряда ЭМА, например, ферритовых антенн (ФА) средневолнового диапазона практически недостижимы. Вместе с тем, использование подхода, описанного в работах [9–11] позволяет перенести метод одной антенны и на ближнюю зону.

Для системы из двух одинаковых антенн в свободном пространстве, расположенных на расстоянии $2R$ (при этом условие дальней зоны может и не выполняться), справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \dot{C}_{1+} = \dot{S}_{11}\dot{C}_{1-} + \dot{S}_{21}\dot{C}_{2-}, \\ \dot{C}_{2+} = \dot{S}_{21}\dot{C}_{1-} + \dot{S}_{11}\dot{C}_{2-}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{11} = \dot{S}_{22}, \quad \dot{S}_{12} = \dot{S}_{21}$$

Здесь приняты следующие обозначения: $\dot{S}_{ij}$ – элементы матрицы рассеяния, $C_{i\mp}$ – амплитуды падающей и отраженной волн.

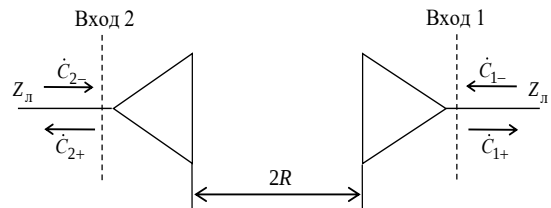


Рис. 1. Эквивалентность системы из двух антенн и одной антенны с экраном

Поставим теперь принудительно рассматриваемую систему в режим противофазного возбуждения, при котором имеет место соотношение:

$$\dot{C}_{2-} = -\dot{C}_{1-}.$$

Для реализации этого режима можно применить идеально проводящий бесконечный экран, установленный на расстоянии R от раскрытия исследуемой антенны (рис. 1). В этом случае, в соответствии с формулой (1) из первой строчки, имеем:

$$\dot{C}_{1+} = (\dot{S}_{11} - \dot{S}_{21})\dot{C}_{1-},$$

т. е. коэффициент отражения на входе антенны 1 в присутствии экрана равен:

$$\dot{\rho}_1 = \dot{S}_{11} - \dot{S}_{21}. \quad (2)$$

Из соотношения (2) вытекает способ определения эквивалентного коэффициента передачи $\dot{S}_{21}$ между двумя одинаковыми антеннами на основе измерения характеристик одиночной антенны. Таким образом, удастся воспользоваться разработанной ранее методикой для расчета КУ на основе измерения коэффициента передачи между двумя одинаковыми антеннами в БЗ. В результате можно сформулировать алгоритм определения КУ на основе измерения методом одной антенны в БЗ.

Для экспериментального определения частотной зависимости КУ на основе одиночной ЭМА следует сначала определить частотную зависимость коэффициента отражения $\dot{S}_{11}$ при отсутствии экрана, затем частотную зависимость коэффициента отражения $\dot{\rho}_1$ при установке экрана на расстоянии R (это расстояние может соответствовать требованиям к БЗ). Далее из формулы (2) определяется элемент матрицы рассеяния $\dot{S}_{21}$. Затем по $\dot{S}_{21}$ определяется значение КУ из формулы, справедливой для метода двух одинаковых антенн [10, 11]. Отсюда следует рабочая формула для предлагаемого метода:

$$G = 2 \left| \dot{S}_{11} - \dot{\rho}_1 \right| \frac{(kR)^3}{\sqrt{(kR)^4 - (kR)^2 + 1}} \quad (3)$$

Для больших значений электрического расстояния до экрана: ($kR \rightarrow \infty$) формула (3) перетекает в следующую:

$$G = 2kR \left| \dot{S}_{11} - \dot{\rho}_1 \right|$$

Эту формулу можно рассматривать как аналог соотношения, приведенного в [12] для измерения КУ уединенной антенны в дальней зоне с плоским экраном.

Отметим принципиальное отличие предлагаемой методики от известного способа измерения КУ методом одной антенны с экраном: формула (3) позволяет работать как в дальней, так и в ближней зоне исследуемой антенны, т.е. в данном случае не накладывается ограничений на расстояние R , что для ряда ЭМА, например, средневолновых ферритовых антенн (ФА) является принципиальным преимуществом.

Проверим состоятельность предлагаемой методики с помощью математического моделирования методом интегрального уравнения Поклингтона (ИУ) применительно к короткому рассогласованному монополю, установленному над бесконечной проводящей поверхностью. Наличие проводящей поверхности и рефлектора учитывалось в ядре ИУ. На рис. 2 приведена расчетная частотная зависимость модуля коэффициента отражения, как функция электрической длины плеча для одиночного монополя (сплошная линия) и монополя в присутствии экрана (пунктирная линия). В данном случае электрическое расстояние от монополя до экрана было равно электрической длине монополя, отношение длины монополя к его радиусу $l/a = 100$.

Здесь видно, что для малых значений электрической длины монополя отличия в кривых практически не заметны, тем не менее, в разности $|\dot{S}_{11} - \dot{\rho}_1|$ содержится информация о частотной зависимости КУ исследуемой антенны.

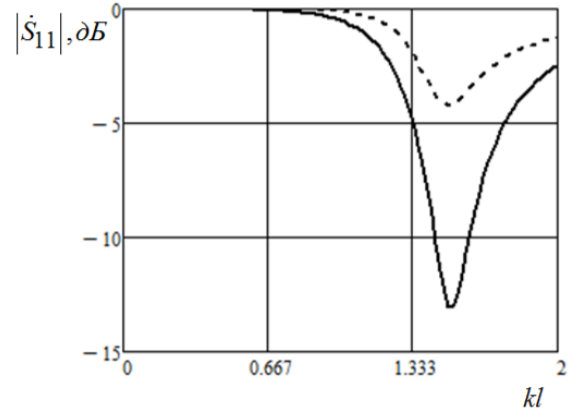


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения одиночного монополя и монополя с экраном

На рис. 3 приведены частотные зависимости КУ монополя, полученные непосредственно на основе решения ИУ методом Галеркина в одномодовом приближении (сплошная линия) и на основе данных из рис. 1 после обработки результатов по формуле (3). С уменьшением электрических размеров и увеличением числа базисных функций совпадение результатов расчета улучшается.

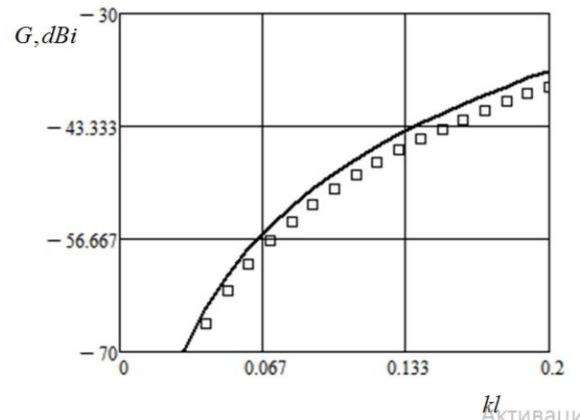


Рис. 3. Расчетные частотные зависимости КУ монополя по формуле (3) и непосредственно из ИУ в одномодовом приближении

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КУ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ЭМА

Результаты измерения частотной зависимости КУ по предложенной методике для средневолновой ФА на частоту 2 МГц приведены на рис. 4. Представлены экспериментальные кривые, полученные методом одной антенны с экраном, методом двух и трех антенн, а также с помощью калиброванной ТЕМ камеры [13] (красная кривая). Расстояние между антеннами составляло 300, 400 мм (БЗ), продольный размер ФА в долях длины волны равен: $3.733 \cdot 10^{-4} \lambda$, материал – 400 НН.

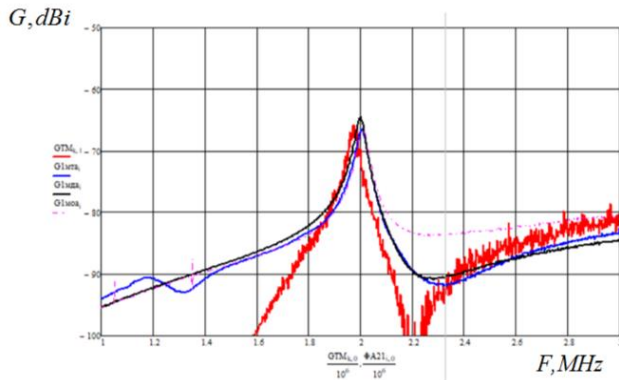


Рис. 4. Экспериментальные результаты измерения частотной зависимости КУ ФА в ближней зоне и в ТЕМ-камере

Данные измерений свидетельствуют, что все четыре методики в пиковом значении КУ (на частоте около 2 МГц) дают близкие результаты. Следует отметить здесь две характерные особенности: низкое значение КУ ФА (около минус 65 дБ в лучшей точке) и значительную зашумленность кривых. Это обусловлено чрезвычайно малыми электрическими размерами ФА средневолнового диапазона.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинства предложенной методики заключаются в применении всего лишь одной исследуемой антенны, которая может быть расположена в ближней зоне, и ограниченного плоского рефлектора. Таким образом, материальные затраты на вспомогательное оборудование для измерений минимальны. В этом смысле метод выглядит предпочтительнее, чем метод двух или трех антенн. По отношению к методике Уиллера в данном случае подкупает простота изготовления рефлектора.

Сравнение с методикой измерений в калиброванной ТЕМ-камере обнаруживает, что отношение сигнал/шум в данном случае заметно выше (рис. 4). Практическая реализация предложенной методики должна учитывать требования минимизации антенного эффекта подводящего кабеля. Для антенн с низкими значениями КУ следует избегать расположения подводящего кабеля в пространстве исследуемая антенна-рефлектор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] H.A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", Proceedings of the IRE, vol.35, December 1947, pp. 1479-1484.
- [2] R.C. Hansen, "Fundamental limitations in antennas", Proceedings of the IEEE vol.69, no 2, February 1981, pp. 170-182.
- [3] R.F. Harrington, "Effect of antenna size, on gain, bandwidth, and efficiency, Journal of RNBS, vol.64 D, 1960, pp. 1-12.
- [4] Small antennas. Miniaturization techniques and application. J.L. Volakis, C.C. Chen, K. Fujimoto. Mc Graw Hill. 2010.
- [5] K. Fujimoto, H. Morishita. Modern Small Antennas. University Printing House, Cambridge, 2013.
- [6] Wheeler H.A. The radiansphere around a small antenna // Proceedings of the IRE. 1959. V. 47. №. 8, pp. 1325-1331
- [7] Pozar D.M., Kaufman B. Comparison of three methods for the measurement of printed antenna efficiency // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1988. V. 36. №. 1. P. 136-139.
- [8] И.А. Илларионов, О.Ю. Журавлева, М.И. Дудкин. Экспериментальное исследование электрически малых антенн VHF диапазона модифицированным методом Вилера. // Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн», Санкт-Петербург. 23-25 октября 2024 г. С.1 04-107.
- [9] Schantz Hans, Nikravan Amin. Simple Formulas for Near-Field Transmission, Gain, and Fields. Antennas Applications Symposium At: Allerton Park, IL, 2013.
- [10] Gain estimation for electrically small antennas with the use of the Nearfield zone measurements / Antonov Y.G., Kostikov G.A., Liubina L.M., Sugak M.I., Ballandovich S.V. // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021.
- [11] Сугак М.И. Измерение коэффициента усиления электрически малых антенн в ближней зоне. // Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн», 23-25 октября 2024 г., Санкт-Петербург. С. 101-103.
- [12] J.C. Kraus, Antennas, Second Edition. Tata Mc Graw-Hill Edition 1997.
- [13] Измерение характеристик ферритовых антенн КВ/УКВ диапазона в ТЕМ-камере / В.А. Сучков, Ю.Г. Антонов, С.В. Балландович, Л.М. Любина, Г.А. Костиков, М.И. Сугак // Конференция «Электроника СВЧ». 2023. С. 504-507.