

Измерение коэффициента усиления электрически малых антенн в ближней зоне

М. И. Сугак

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

sugakmi@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика и результаты измерений частотной зависимости коэффициента усиления (КУ) ряда электрически малых антенн (ЭМА) в ближней зоне (БЗ) в условиях компактного настольного полигона. Суть методики заключается в попытке обобщения хорошо известных методов сравнения с эталоном (МСЭ), а также методов двух и трех антенн (МДА, МТА) на случай БЗ для ЭМА. В качестве эталонных антенн в методе сравнения предлагается использование электрически коротких рассогласованных монополей, установленных над проводящей поверхностью ограниченных размеров. Приведены результаты экспериментальной проверки методики для ряда ЭМА: коротких монополей, плоских спиралеобразных монополей УКВ-ДМВ диапазонов, печатной ЭМА с меандровой структурой, ферритовых антенн средневолнового диапазона. Приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных на основе приближенного одномодового подхода.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное совершенствование систем связи и мониторинга влечет за собой бурное развитие техники и теории ЭМА. Хорошо известны две основные проблемы ЭМА: – узкая полоса рабочих частот и низкий КУ, обусловленный потерями, причем, эти проблемы носят принципиальный характер [1–5]. Если измерение полосы рабочих частот ЭМА обычно не вызывает затруднений, то эффективная методика измерения КУ ЭМА является весьма актуальной.

В данной работе приведены результаты применения методики измерения КУ для ряда ЭМА, которая является фактически обобщением известных методов, широко применяемых в дальней зоне на случай БЗ. Измерение КУ ЭМА в БЗ основано на аппроксимации ближнего поля исследуемых антенн полем диполя Герца. В этом случае, как было показано ранее [6], в выражении для коэффициента передачи между антеннами удастся выделить сомножитель, зависящий от электрического расстояния между измеряемыми антеннами, который позволяет произвести расчет КУ в дальней зоне. На основе этого подхода в данной работе получены выражения, справедливые для метода трех электрически малых антенн монополярного типа, над проводящей поверхностью в БЗ. Для КУ, выраженных в дБ после логарифмирования получаются следующие рабочие формулы:

$$\begin{cases} G_1 = 10\log 2 + 3 + 30\log(kr) + \frac{K_{12} + K_{13} - K_{23}}{2} - 5\log(kr^4 - kr^2 + 1) \\ G_2 = 10\log 2 + 3 + 30\log(kr) + \frac{K_{12} + K_{23} - K_{13}}{2} - 5\log(kr^4 - kr^2 + 1) \\ G_3 = 10\log 2 + 3 + 30\log(kr) + \frac{K_{13} + K_{23} - K_{12}}{2} - 5\log(kr^4 - kr^2 + 1) \end{cases} \quad (1)$$

где: G_1, G_2, G_3 – КУ антенн с номерами 1,2,3, соответственно, K_{12}, K_{13}, K_{23} – измеренные коэффициенты передачи в БЗ между антеннами 1-2, 1-3 и 2-3, соответственно, kr – электрическое расстояние между исследуемыми антеннами, k – волновое число. В частном случае равенства коэффициентов передачи для одинаковых антенн, из (1) вытекает (2) для КУ, дБ из измеренного коэффициента передачи методом двух антенн (монополей) в БЗ:

$$G, \text{дБ} = 10\log 2 + 3 + 30\log(kr) + \frac{K_p, \text{дБ}}{2} - 5\log(kr^4 - kr^2 + 1) \quad (2)$$

где: $G, \text{дБ}$ – КУ антенн, K_p – измеренный коэффициент передачи между двумя одинаковыми антеннами. При $kr \rightarrow \infty$ из формул (1) и (2) вытекает известный метод измерения КУ (монополей над экраном) в дальней зоне [7]. Для антенн, установленных в свободном пространстве в формулах (1) и (2) следует убрать второе слагаемое, учитывающее наличие грунта.

Помимо методики, основанной на применении формул (1) и (2) в данной работе для измерения КУ применялся метод сравнения. В этом случае оказалось удобным в качестве эталонной антенны применять электрически малый тонкий рассогласованный монополяр с КУ, равным [8]:

$$G = \frac{5kl^4}{3 \left(\ln \left(\frac{kl}{ka} \right) - 1 \right)^2} \quad (3)$$

Здесь kl , ka электрическая длина и электрический радиус монополя. Формула (3) обладает приемлемой точностью при условии: $kl \gg ka$ и $kl \gg 1$ [8].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерялись антенны следующих типов: короткий рассогласованный монополяр, индуктивные плоские антенны с концевым шлейфом, печатные ЭМА УКВ диапазона, ферритовые антенны (ФА) средневолнового (СВ) диапазона. Измерения проводились в неэкранированном помещении с эховыми условиями, размеры рабочего полигона (плоский проводящий экран из фольгированного стеклотекстолита) с максимальными

размерами 590 x 600 кв.мм, при этом применялись необходимые меры для минимизации кабельного эффекта. Измерение коэффициентов передачи выполнялось с помощью ВАЦ АРИНСТ, использовался режим накопления. Обработка результатов измерений коэффициентов передачи была выполнена с применением формул (1) и (2) в среде Mathcad. В методе сравнения с эталоном применялись короткие (40–150 мм), тонкие проволочные монополи с известной частотной зависимостью КУ.

А. Рассогласованные монополи в КВ – ДМВ диапазоне

Сравнение результатов измерений КУ методом двух антенн в БЗ и вычислений по расчетной модели КУ для тонкого рассогласованного монополя (3) приведено на рис. 1.

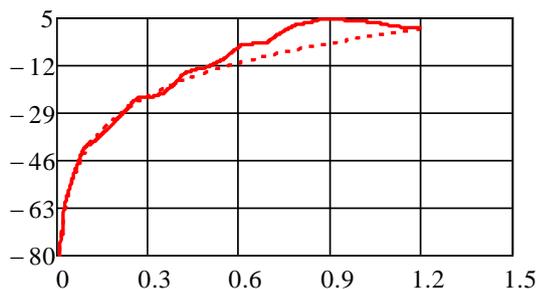


Рис. 1. Частотные зависимости КУ тонкого электрически малого монополя (длина 80 мм, диаметр 0.5 мм) над проводящей поверхностью по измерениям в БЗ (МДА, сплошная линия) и расчет (формула (3), пунктир). Расстояние между антеннами 154 мм.

Диаметр рабочего экрана дисковой формы составлял 300 мм, расстояние между монополями 154 мм. Здесь видно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных в области низких частот. В области частот выше 0.4 ГГц наблюдаются значительные расхождения, т. к. в этом случае электрические размеры монополя выходят за границы применимости формулы (3).

В. Плоская антенна на 240 МГц

Антенна выполнена обмоточным проводом в шелковой изоляции на подложке с размерами 26 x 13.5 мм.

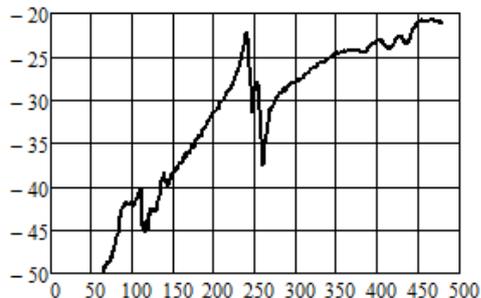


Рис. 2. Частотная зависимость КУ плоской малогабаритной спиральной антенны над экраном (эксперимент). Измерения МДА над проводящей поверхностью, расстояние между антеннами 210 мм.

Частотная зависимость, полученная методом двух антенн, приведена на рис. 2. Пиковое значение КУ в данном случае составляет минус 22 дБ, энергетическая эффективность этого варианта антенны мала и обусловлена ее размерами и, отчасти, неудачной настройкой.

С. Плоская спиральная ЭМА на частоту 430 МГц

Антенна представляет собой плоский спиральный монополюль размером 21x14 мм, измеренные частотные характеристики КУ и коэффициента отражения приведены на рис 3. Здесь максимальное значение КУ существенно выше, т. к. рабочая частота почти вдвое больше.

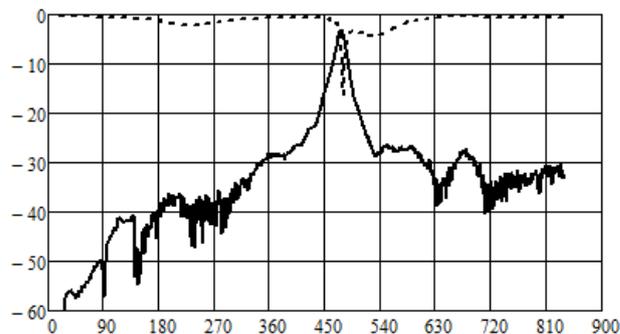


Рис. 3. Частотная зависимость КУ плоской малогабаритной спиральной антенны над экраном (эксперимент) – сплошная линия, коэффициент отражения – пунктир. Измерения методом двух антенн над проводящей поверхностью, расстояние между антеннами 210 мм.

Д. Плоские ЭМА УКВ диапазона

Характеристики плоских ЭМА УКВ диапазона с размерами порядка (0.03–0.05) длины волны приведены на рис. 4, 5. Размеры первого варианта антенны 27x56 мм, измеренные частотные зависимости КУ для него приведены на рис. 4. Кривые получены двумя разными методами (МДА, МТА), здесь в пределах рабочей полосы частот наблюдается хорошее совпадение результатов.

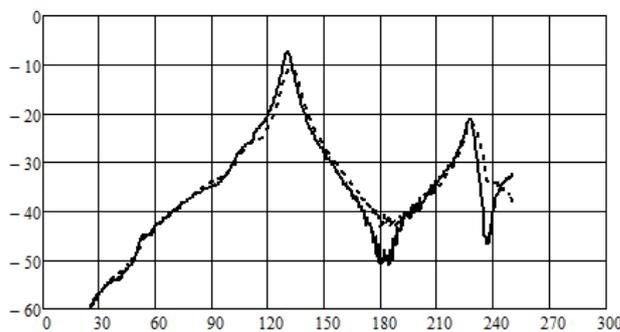


Рис. 4. Экспериментальная частотная зависимость КУ плоской малогабаритной спиральной антенны УКВ диапазона. Сплошная линия – МТА (плоская спираль, монополюль 55 мм и монополюль 79 мм), пунктир – МДА для той же антенны, расстояние между антеннами 210 мм.

Второй вариант антенны выполнен по печатной технологии на подложке из FR-4 [10], частотная зависимость КУ для него приведена на рис. 5. Оба экземпляра ЭМА в данном случае выполнены для

работы на одной частоте, но качество подложек (тангенс угла потерь) резко отличаются, это обусловлено особенностями их эксплуатации. Сопоставление данных эксперимента обнаруживает разницу в КУ около 20 дБ на частоте согласования в пользу первой конструкции.

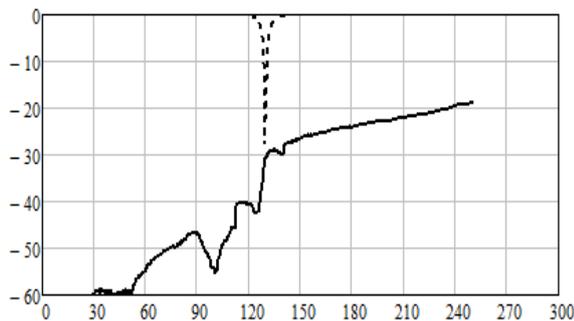


Рис. 5. Экспериментальная частотная зависимость КУ печатной спиральной антенны УКВ диапазона (подложка FR-4). Сплошная линия – МТА, пунктир – коэффициент отражения, расстояние между антеннами 210 мм.

Отметим хорошее совпадение данных, представленных на рис. 5 с результатами электродинамического моделирования, приведенных в работе [10].

Е. Ферритовая антенна средневолнового диапазона

На рис. 6 представлены результаты измерения КУ трех разных ФА на рабочую частоту 2 МГц. Антенны были выполнены на основе двояных стержней 400 НН, с размерами 160x8 мм и различались только особенностями в выполнении узла согласования. Из данных, приведенных на рис. 6 видно, что измеренные КУ в пике отличаются на 3–5 дБ (МТА). На рис. 7 приведено сравнение результатов измерения КУ для лучшего экземпляра из трех исследуемых антенн двумя различными способами (МДА и МТА), причем режимы измерения и расстояния между антеннами были разные. Из приведенных кривых видно, что пиковые значения КУ с высокой точностью совпадают, это свидетельствует о состоятельности предложенной методики.

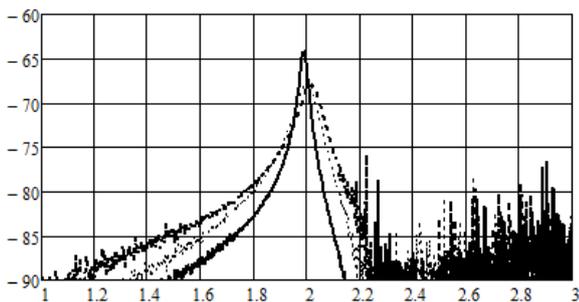


Рис. 6. Экспериментальная частотная зависимость КУ трех разных ФА СВ диапазона, расстояние между антеннами 400 мм. МТА, проводящая поверхность отсутствует.

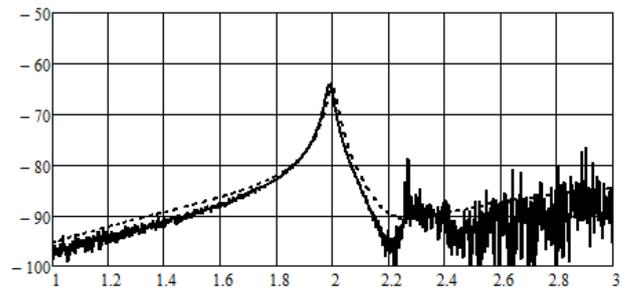


Рис. 7. Сравнение частотной зависимости КУ ФА методом двух антенн (пунктир) и трех антенн (сплошная линия), расстояние между антеннами 300 мм и 400мм, соответственно.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает опыт, для большого количества ЭМА монопольного и рамочного типа представленная методика измерений дает погрешность, вполне достаточную для инженерной практики. При этом размеры стендового оборудования позволяют разместиться на рабочем столе. Хорошей альтернативой предлагаемой методике могут служить измерения в ТЕМ камере [11], однако в этом случае применяемое стендовое оборудование существенно дороже и затраты на его калибровку выше.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность коллегам, сотрудникам антенной группы каф. ТОР СПбГЭТУ (ЛЭТИ), за полезные обсуждения и помощь в организации проведения измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wheeler H.A., "Fundamental limitations of small antennas", Proceedings of the IRE, vol.35, December 1947, pp 1479-1484.
- [2] Hansen R.C., "Fundamental limitations in antennas", Proceedings of the IEEE vol.69, no 2, February 1981, pp170-182.
- [3] Harrington R.F., "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] Fujimoto K., Morishita H. Modern Small Antennas University Printing House, Cambridge, 2013.
- [6] 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.
- [7] Balanis C.A., Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc, New York, NY, 1997.
- [8] Антонов Ю.Г., Сугак М.И., Любина Л.М. Оценка КПД несогласованных электрически малых антенн // СБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2021. № 1 (76). С. 29-32.
- [9] Shivshankar Tondare. Meander Line Antenna with Artificial Magnetic Conductor. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol.3, Issue 4, April 2014. pp. 8936-8943.
- [10] Сугак М.И., Антонов Ю.Г. Плоская электрически малая антенна УКВ диапазона // СБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2024. № 1 (79). С. 9-11.
- [11] 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 // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. с. 504-507.