

УДК 621.396.67

**КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЗОНДА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ
БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕННЫ НА ПЛОСКОСТИ****А.А. Слободяненко, В.Б. Ромодин, Л.В. Шебалкова***Новосибирский государственный технический университет*

В статье для компенсации влияния зонда при измерениях ближнего поля на плоскости рассматривается теория плоских волн, благодаря которой установлено, что коррекция может быть достигнута делением спектров измеренных плоских волн на функцию спектрального отклика зонда при его работе в режиме передачи. Для определения спектральной характеристики зонда предлагается использовать электродинамическую калибровочную структуру, состоящую из трехмерной модели эталонной антенны, дополненной моделью измерительного зонда. Продемонстрирована способность предложенного подхода корректировать измерения, выполненные с помощью дипольного зонда и открытого конца волновода.

Ключевые слова: антенные измерения, ближнее поле, коррекция, компенсация зонда, теория плоских волн.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-1-67-78

Введение

Любая разработка радиотехнической системы не обходится без проектирования антенны с заданными характеристиками излучения, которые уже на этапе изготовления прототипа необходимо измерять и контролировать. Для ряда антенн, используемых в радиолокации, радионавигации и спутниковой связи, ключевой характеристикой является пространственное распределение напряженности электрического поля в дальней зоне, также известное как диаграмма направленности (ДН), которую можно определить путем непосредственного измерения сигнала приемной антенной, находящейся на расстоянии, превышающем расстояние дальней зоны исследуемой антенны [1]. При этом важным требованием является воссоздание условий работы антенны, в частности условий свободного пространства, что в полной мере может быть реализовано проведением измерений в безэховых камерах. Однако в силу указанного выше требования к условиям размещения в случае антенны большого электрического размера необходимо создание безэховой камеры колоссальных размеров, что является экономически нецелесообразным. Эти, а также другие ограничения измерения ДН в дальней зоне привели к необходимости использования альтернативного подхода в основе которого лежит общая голографическая концепция [2, 3], предполагающая полное или частичное восстановление (воссоздание, реконструкция) ДН исследуемой антенны по данным ее ближнего поля [4].

Восстановление осуществляется с помощью специально разработанных методов и алгоритмов, которые можно разделить на два класса: методы модального разложения [5–7], наиболее распространенные на практике, и методы реконструкции источников [8, 9]. Широкое распространение методов модального разложения обусловлено простотой его математической формулировки, а также алгоритмической реализацией. Другой причиной является низкая стоимости вычислений, необ-

ходимых для выполнения преобразования ближнего поля в дальнее по сравнению с методом реконструкции источников [10]. Однако, как было показано в ряде статей, методы реконструкции источников имеют более высокую точность восстановления, в особенности при планарном сканировании ближнего поля [11, 12].

Метод реконструкции источников, по сути, численно решает обратную задачу, представленную интегральным уравнением [13], связывающим эквивалентные источники тока, распределенные по поверхности антенны с значениями касательных составляющих измеренного электромагнитного поля. Поскольку эта задача обратная, стабильность ее решения определяется алгоритмом инверсии [14–16], а также точностью исходных данных, которые представляют собой значения касательных составляющих электрической напряженности поля в точках, принадлежащих заданной поверхности сканирования. Однако, на практике измерения осуществляются с помощью специальных датчиков – зондов [17], преобразующих электрические и магнитные поля в уровни мощности (напряжения), которые затем фиксируются с помощью измерительного приемника. При этом имеется существенное различие между измеренными и реальными значениями поля [18]. Подобные отклонения напрямую зависят от приемной характеристики зонда, носят систематический характер и могут привести к значительным ошибкам в решении обратной задачи. Поэтому важным шагом стабильного решения обратной задачи является преобразование измеренных S -параметров к фактическим значениям электрической напряженности поля в точке измерения.

Поставленная задача напрямую связана с задачей компенсации влияния зонда. В первых работах [19, 20] эффект компенсации достигался путем введения в интегральное уравнение коэффициента, соответствующего ДН зонда в направлении элементарного излучающего элемента поверхности, представленного RWG-функцией электрического или магнитного поверхностного тока [21]. Данный подход продемонстрировал хорошие результаты, однако он не учитывает того факта, что датчик ближнего поля не измеряет поле в одной точке, а фактически измеряет средневзвешенное значение полей в его окрестности. Учет этого эффекта был реализован в последующих работах посредством введения в интегральное уравнение коэффициента, соответствующего мультипольному разложению [22–24], и его решению относительно данных, полученных в результате измерений (т. е. S_{21}). Такой подход известен как метод быстрых мультиполей [25, 26] и применим лишь для измерений на сферических поверхностях, а также имеет ограничения на тип применяемых зондов (зонды первого порядка). Последнее ограничение является критическим для планарных сканеров ближнего поля, к тому же большинство измерений проводится с помощью зондов (например, открытого конца волновода), лишь частично подпадающих под данную категорию. Помимо этого, данный подход является чисто аналитическим и не учитывает специфику реальных измерений (различного рода переотражения), а также физические особенности используемого зонда (неоднородности, дефекты и т. д.).

В данной работе в соответствии с теорией плоских волн для коррекции измерений ближнего поля (компенсации влияния зонда) предлагается использовать приемную характеристику зонда (спектральный отклик), определенную с помощью электродинамического моделирования калибровочной структуры, состоящей из трехмерной модели эталонной антенны, дополненной моделью измерительного зонда. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована на примере коррекции поля асимметричной рупорной антенны, полученного с помощью двух типов зондов.

1. Математическая теория измерения ближнего поля

Ближнее электромагнитное поле антенны формируется из бесконечного числа плоских волн, распространяющихся в различных направлениях. Пусть $T_{0\omega}(k_x, k_y)$ обозначает амплитуду плоской волны (спектр), соответствующей направлению распространения (k_x, k_y) , тогда электрическое поле $E_\omega(r)$ антенны, работающей на частоте ω , в любой точке r ближнего поля может быть выражено как

$$E_\omega(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T_{0\omega}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y. \quad (1)$$

В свою очередь, амплитудные значения $T_{0\omega}(k_x, k_y)$ плоских электромагнитных волн, излученных антенной (иначе спектр) определяются из пространственного распределения поля известного на некоторой поверхности согласно формуле

$$T_{0\omega}(k_x, k_y) = \frac{e^{-i\gamma z}}{2\pi a_{0\omega}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_\omega(r) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy. \quad (2)$$

Когда в точку r поверхности измерения помещается зонд, каждая плоская волна наводит на выходе зонда элементарное напряжение прямо пропорциональное ее амплитуде с учетом запаздывающего потенциала и некоторому комплексному коэффициенту, характеризующему отклик зонда. В соответствии с этим приращение напряжения, обусловленное влиянием плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении (k_x, k_y) , записывается в следующем виде:

$$db_{p\omega}(\mathbf{r}_0) = a_{0\omega} \mathbf{R}_{p\omega}(k_x, k_y) T_{0\omega}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y. \quad (3)$$

Итоговое напряжение $b_p(\mathbf{r}_0)$ на выходе зонда, впоследствии фиксируемое измерительной аппаратурой (измеритель мощности, векторный анализатор цепей, спектроанализатор), является суперпозицией напряжений (4) и представляет собой интеграл вида

$$\mathbf{b}_{p\omega}(\mathbf{r}_0) = a_{0\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{p\omega}(k_x, k_y) T_{0\omega}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y. \quad (4)$$

Применив к (4) обратное преобразование Фурье, получим уравнение

$$\mathbf{R}_{p\omega}(k_x, k_y) T_{0\omega}(k_x, k_y) = \frac{e^{i\gamma z_0}}{(2\pi)^2 a_{0\omega}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{b}_{p\omega}(\mathbf{r}_0) e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dx_0 dy_0, \quad (5)$$

выражающее спектр поля, излучаемого тестовой антенной через выходной сигнал зонда в плоскости сканирования. Правая часть полученного уравнения аналогична уравнению (2), и, следовательно, определяет спектральное представление измеренного поля, в дальнейшем обозначаемое как $S(k_x, k_y)$. Следовательно, уравнение (5) может быть переписано в виде

$$\mathbf{S}(k_x, k_y) = \mathbf{E}(k_x, k_y) \mathbf{R}(k_x, k_y), \quad (6)$$

где $E(k_x, k_y)$ и $S(k_x, k_y)$ называются спектрами плоских волн и соответственно рассчитываются по измеренному напряжению и реальным значениям электрического поля по формулам (3) и (4) при постоянной высоте, отнесенной к нулю. Из спектрального уравнения (5) естественным образом вытекает как возможность расчета реального электрического поля исследуемой антенны по результатам его измерения зондом с известным спектральным откликом, так и возможность определения самого отклика, необходимая информация для определения которого может быть эффективным образом получена из электродинамического моделирования калибровочной структуры, состоящей из трехмерной модели эталонной антенны, дополненной моделью измерительного зонда.

2. Выбор калибровочной модели, расчет спектрального отклика

Ввиду того, что отклик зонда зависит только от его характеристик [27], выбор калибровочной антенны в целом может носить произвольный характер, однако особенности расчета спектров плоских волн (2,5) все же накладывают ряд требований на ее ближнее поле. Так, конечность размера области определения полей может привести к ошибке усечения, что в свою очередь приведет к ошибке в спектральном отклике. Поэтому выбор антенны, входящей в состав калибровочной структуры, следует вести из требования на равенство нулю поля антенны на краях измерительной области. Другим требованием, также вытекающим из уравнения (5), является требование на отсутствие нулей в спектре волновых чисел антенны.

В силу указанных требований в качестве калибровочной антенны для проведения коррекции измерений ближнего поля антенн X диапазона может быть выбрана пирамидальная рупорная антенна с линейными размерами апертуры 40 и 20 мм. Что касается зонда, то его выбор определяется различными факторами, как правило, связанными с конкретными измерительными задачами, в связи с этим с помощью выбранной эталонной модели был определен спектральный отклик двух наиболее используемых зондов – открытого конца волновода и антенны Вивальди (рис. 1).

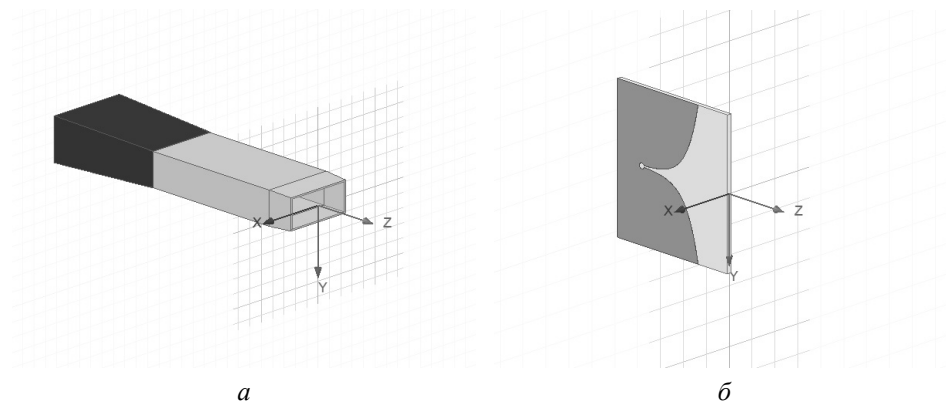


Рис. 1 – Трехмерная электродинамическая модель зонда:

a – открытый конец волновода (WR-90); *б* – антенна Вивальди

Fig. 1 – Three-dimensional electrodynamic model of the probe:

a – open-ended waveguide (WR-90); *b* – Vivaldi antenna

Для этого в программном комплексе HFSS рассчитывалось распределение электрической напряженности поля калибровочной антенны $E(x, y)$, а также проводилось моделирование измерений калибровочной антенны путем последовательного расчета коэффициента передачи (S_{21}) модели «калибровочная антенна-зонд». Для каждой точки измерительной поверхности было выполнено одно полноволновое электромагнитное моделирование, т.е. при расстоянии между измерительными точками менее половины длины волны – 12 мм, для области в 504×504 мм было проведено 1764 моделирования. Полученные данные были переведены в спектральную область после чего в соответствии с уравнением (5) был определен спектральный отклик для каждого зонда (рис. 2).

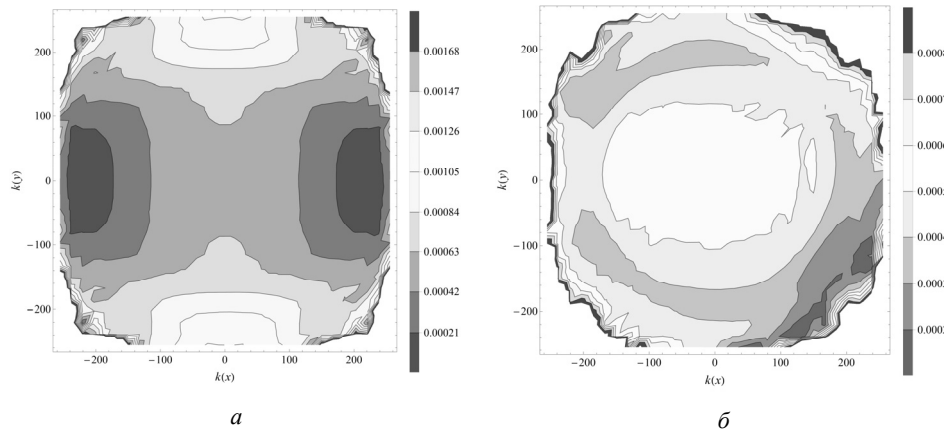


Рис. 2 – Спектральный отклик зонда:

а – открытый конец волновода (WR-90); *б* – антенна Вивальди

Fig. 2 – Spectral response of the probe:

a – open-ended waveguide (WR-90); *b* – Vivaldi antenna

3. Коррекция

Чтобы показать эффективность коррекции измерений с помощью спектральных откликов, рассчитанных по электродинамической калибровочной структуре, в качестве тестовой модели был выбран рупор с размерами апертуры 100×60 мм, сдвинутой в положительном направлении оси OX на 20 мм. Данный выбор был продиктован желанием продемонстрировать возможность коррекции измерений произвольной антенны. Как и в предыдущем разделе, измерительные данные были получены с помощью программы HFSS путем расчета коэффициента передачи между волновыми портами, установленными на модели антенны и зонда (рис. 3).

Результаты коррекции поля основной поляризации по уравнению (5) с помощью полученных спектральных откликов совместно с точными $E_y(x, y)$ и измеренными полями $S_y(x, y)$ приведены на рис. 4, 5. Можно отметить, что скорректированное поле сильно зашумлено в зонах малых амплитуд, в то время как в зонах с относительным уровнем сигнала, превышающем значение -30 дБ, имеется полное совпадение точных и скорректированных полей.

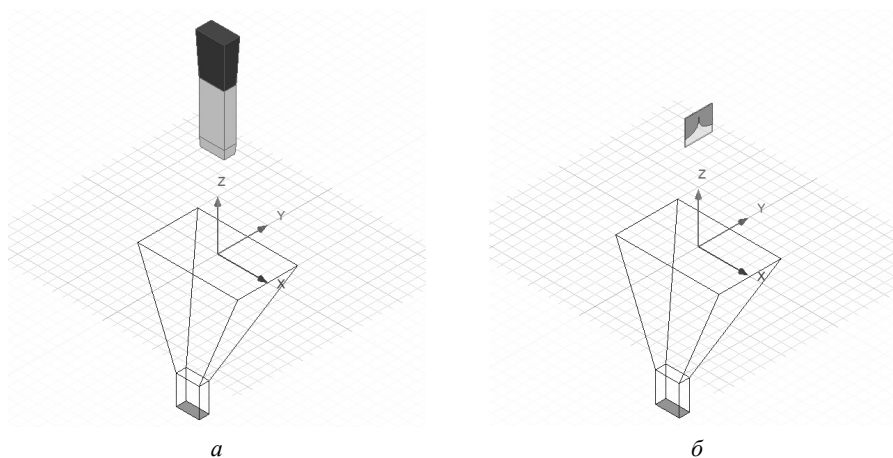


Рис. 3 – Электродинамическая модель для имитации измерений:
 а – открытым концом волновода (WR-90); б – антенной Вивальди

Fig. 3 – Electrodynamics model of simulated measure:
 а – open-ended waveguide (WR-90); б – Vivaldi antenna

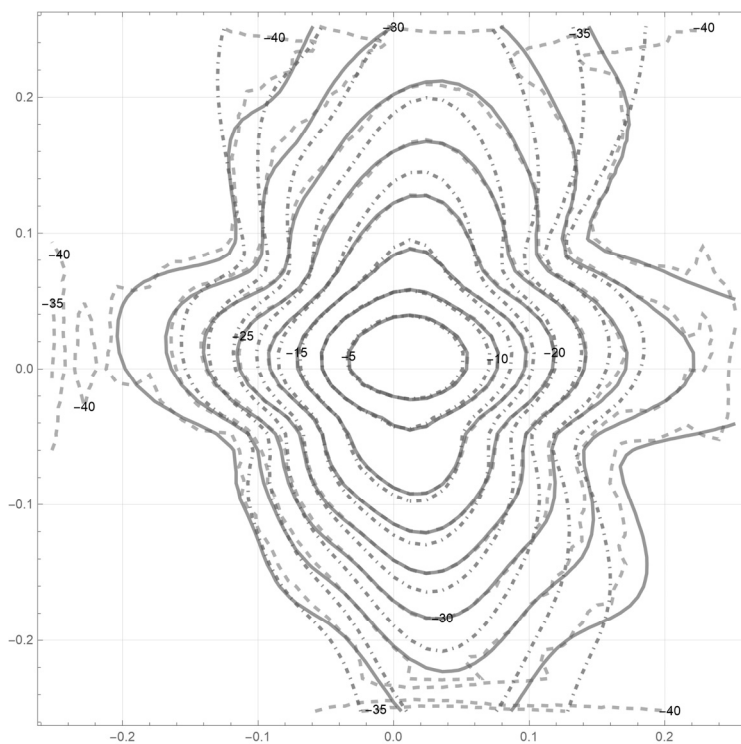


Рис. 4 – Контурный график точного (сплошная линия), измеренного открытым концом волновода (штрихпунктир) и скорректированного (пунктир) ближнего поля основной поляризации асимметричной рупорной антенны

Fig. 4 – Contour plot of the accurate (solid line), open-ended waveguide (dot-dashed line), and corrected (dashed line) main polarization near field of the asymmetric horn antenna

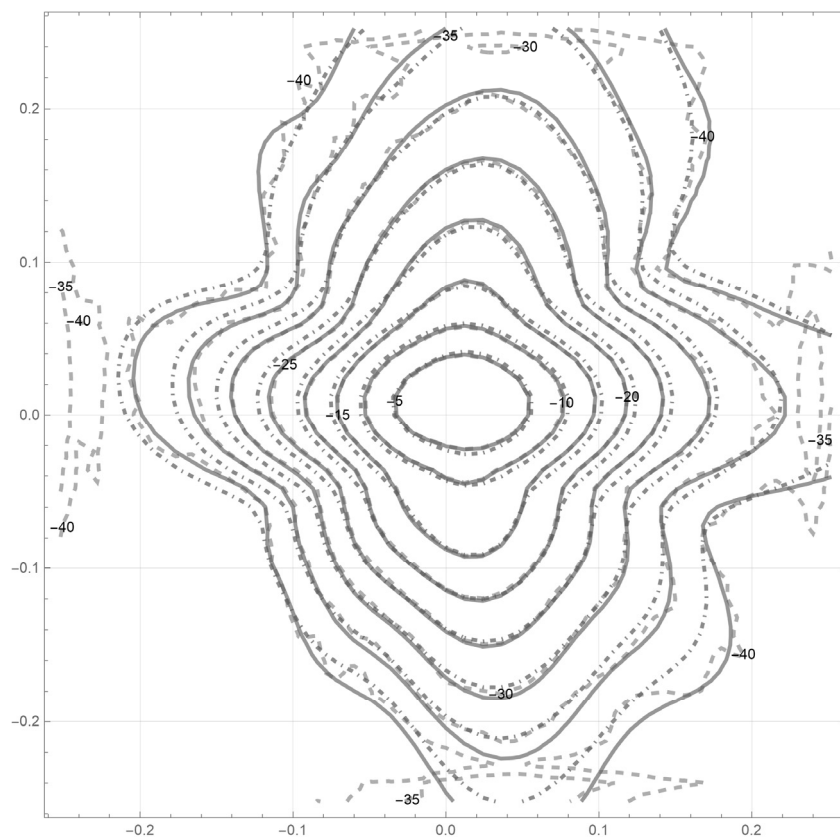


Рис. 5 – Контурный график точного (сплошная линия), измеренного антенной Вивальди (штрихпунктир) и скорректированного (пунктир) ближнего поля основной поляризации асимметричной рупорной антенны

Fig. 5 – Contour plot of the accurate (solid line), Vivaldi probe (dot-dashed line), and corrected (dashed line) main polarization near field of the asymmetric horn antenna

Количественные показатели коррекции оценивались средним значением отношения сигнал-шум, определенным по всей измерительной области. Данный показатель составил для измерений поля основной поляризации, проводимых открытым концом волновода, 29,78 дБ до коррекции и 40,78 дБ после, а для измерений антенной Вивальди – значения в 32,32 и 38,97 дБ соответственно. При таких значениях методы восстановления источников излучения [28, 29] обеспечивают устойчивое решение обратной задачи восстановления источников, следовательно, предложенный подход может использоваться в качестве алгоритма предварительной обработки измерительных данных, обеспечивающего устранение систематической ошибки измерений, обусловленной влиянием зонда.

Заключение

Представленная теория плоских электромагнитных волн совместно с предложенным подходом определения спектрального отклика измерительного зонда позволяет эффективным образом устранять влияние зонда при измерениях в ближнем поле антенны и может быть использована в качестве алгоритма предварительной коррекции в задачах определения дальнего поля с помощью метода восстановления источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antenna measuments / J. Appel-Hansen, J.D. Dyson, E.S. Gillespie, and T.G. Hickman // The Handbook of Antenna Design / A.W. Rudge, K. Milne, A.D. Olver, and P. Knight, eds. – London, UK: Peter Peregrinus, 1986. – Ch. 8.
2. **Yaccarino R.G., Rahmat-Samii Y., Williams L.I.** Bi-polar planar near-field measurement technique. Pt. 2. Near-field to far-field transformation and holographic imaging methods // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42, N 2. – P. 196–204.
3. **Воронин Е.Н., Нечаев Е.Е., Шашенков В.Ф.** Реконструктивные антенные измерения. – М.: Наука: Физматлит, 1995. – 352 с.
4. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
5. **Yaghjian A.D.** An overview of near-field antenna measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, N 1. – P. 30–45.
6. Spherical near-field antenna measurements / ed. by J.E. Hansen. – London, UK: Peter Peregrinus, 1988. – 387 p. – (IEE Electromagnetic Waves Series; 26).
7. **Wang J.J.H.** An examination of the theory and practices of planar near-field measurement // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1988. – Vol. 36, N 6. – P. 746–753.
8. An improved super-resolution source reconstruction method / Y. Álvarez, F. Las-Heras, M.R. Pino, T.K. Sarkar // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58 (11). – P. 3855–3866.
9. Recent advances in near-field to far-field transformation techniques / C. Gennarelli, A. Capozzoli, L. Foged, J. Fordham, D.J. van Rensburg // International Journal of Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 243203. – P. 1–3.
10. **Eibert T.F., Vojvodi'c D., Hansen T.B.** Fast inverse equivalent source solutions with directive sources // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – Vol. 64, N 11. – P. 4713–4724.
11. **Petre P., Sarkar T.K.** Theoretical comparison of modal expansion and integral equation methods for near-field to far-field transformation // AMPC Asia-Pacific Microwave Conference. – IEEE, 1992. – Vol. 2. – P. 713–716. – DOI: 10.1109/APMC.1992.672205.
12. **Álvarez Y., Las-Heras F., Pino M.R.** On the comparison between the spherical wave expansion and the sources reconstruction method // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56 (10). – P. 3337–3341.
13. **Stratton J.A., Chu L.J.** Diffraction theory of electromagnetic waves // Physical Review. – 1939. – Vol. 56. – P. 99–107.
14. An improved super-resolution source reconstruction method / Y. Álvarez, F. Las-Heras, M.R. Pino, T.K. Sarkar // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58 (11). – P. 3855–3866.
15. **Araque J., Vecchi G.** Field and source equivalence in source reconstruction on 3D surfaces // Progress in Electromagnetics Research. – 2010. – Vol. 103. – P. 67–100.
16. **Romodina V.B., Slobodyanenko A.A., Shebalkova L.V.** Projection method for inverse problem in antenna measurement // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai, Russian Federation, 2022. – P. 152–156.
17. Theory and practice of modern antenna range measurements / C. Parini, S. Gregson, J. McCormick, D.J. van Rensburg. – London, UK: IET, 2014.
18. Probes correction for planar near field antennas measurements / C. Taybi, M.A. Moutaouekkil, K.K. Rodrigues, B. Elmagroud, A. Ziyat // 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). – Lecce, Italy, 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MMS.2015.7375494.
19. **Paris D.T., Leach W.M. Jr., Joy E.B.** Basic theory of probe-compensated near-field measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1978. – Vol. 26, N 3. – P. 373–379.
20. Applications of probe-compensated near-field measurements / E.B. Joy, W.M. Leach Jr., G.P. Rodrigue, D.T. Paris // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1978. – Vol. 26, N 3. – P. 379–389.

21. **Rao S.M., Wilton D.R., Glisson A.W.** Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. 30, N 3. – P. 409–418.
22. **Coifman R., Rokhlin V., Wandzuraz S.** The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1993. – Vol. 35 (3). – P. 7–11.
23. The Fast Multipole Method (FMM) for electromagnetic scattering problems / N. Engheta, W.D. Murphy, V. Rokhlin, M.S. Vassiliou // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1992. – Vol. 40 (6). – P. 634–641.
24. **Laitinen T., Pivnenko S., Breinbjerg O.** Iterative probe correction technique for spherical near-field antenna measurements // Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2005. – Vol. 4, N 1. – P. 221–223.
25. A succinct way to diagonalize the translation matrix in three dimensions / W. Chew, S. Koc, J. Song, C. Lu, E. Michielssen // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest. – Montreal, QC, Canada, 1997. – Vol. 3. – P. 2072–2075.
26. **Schmidt C.H., Leibfritz M.M., Eibert T.F.** Fully probe-corrected near-field far-field transformation employing plane wave expansion and diagonal translation operators // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56 (3). – P. 737–746.
27. IEC/TS 61967-3. Integrated Circuits – Measurement of electromagnetic emissions – part 3: Measurement of radiated emissions – Surface scan method. 2013.
28. **Hansen P.C.** Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion. – Philadelphia: SIAM, 1998. – 247 p.
29. Hybrid Tikhonov source current reconstruction method for large-scale problems / M. Bod, R. Sarraf, G. Moradi, A. Jafargholi, A. Moallemizadeh // IET Microwaves, Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 12 (1). – P. 77–81.

COMPENSATION FOR THE INFLUENCE OF THE PROBE IN MEASUREMENTS OF THE NEAR FIELD OF THE ANTENNA ON THE PLANE

Slobodyanenko A.A., Romodin V.B., Shebalkova L.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In the article, to compensate for the probe effect during near-field measurements on the plane, the theory of plane waves is considered, thanks to which it is established that the correction can be achieved by dividing the spectra of the measured plane waves by the function of the spectral response of the probe when it operates in transmission mode. To determine the spectral characteristics of the probe, it is proposed to use an electrodynamic calibration structure consisting of a three-dimensional model of a reference antenna supplemented by a model of a measuring probe. The ability of the proposed approach to correct measurements made using a dipole probe and the open end of the waveguide is demonstrated.

Keywords: antenna measurement, Near-Field measurement, correction, probe compensation, Plane Wave Spectrum Theory.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-1-67-78

REFERENCES

1. Appel-Hansen J., Dyson J.D., Gillespie E.S., Hickman T.G. Antenna measurements. *The Handbook of Antenna Design*. Ch. 8. Ed by A.W. Rudge, K. Milne, A.D. Olver, P. Knight London, UK, Peter Peregrinus, 1986.
2. Yaccarino R.G., Rahmat-Samii Y., Williams L.I. Bi-polar planar near-field measurement technique. Pt. 2. Near-field to far-field transformation and holographic imaging methods. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, vol. 42, no. 2, pp. 196–204.
3. Voronin E.H., Hechaev E.E., Shashenkov B.F. *Rekonstruktivnye antennnye izmereniya* [Reconstructive antenna measurements]. Moscow, Nauka Publ., Fizmatlit Publ., 1995. 352 p.

4. Bakhrahk L.D., Kremenetskii S.D., Kurochkin A.P., Usin V.A., Shifrin Ya.S. *Metody izmerenii parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnei zone* [Methods for measuring radiating systems in the near zone]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 272 p.
5. Yaghjian A.D. An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 1, pp. 30–45.
6. Hansen J.E., ed. *Spherical near-field antenna measurements*. London, UK, Peter Peregrinus, 1988. 387 p.
7. Wang J.J.H. An examination of the theory and practices of planar near-field measurement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, vol. 36, no. 6, pp. 746–753.
8. Álvarez Y., Las-Heras F., Pino M.R., Sarkar T.K. An improved super-resolution source reconstruction method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58 (11), pp. 3855–3866.
9. Gennarelli C., Capozzoli A., Foged L., Fordham J., Rensburg D.J. van. Recent advances in near-field to far-field transformation techniques. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, vol. 2012, art. 243203, pp. 1–3.
10. Eibert T.F., Vojvodić D., Hansen T.B. Fast inverse equivalent source solutions with directive sources. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 11, pp. 4713–4724.
11. Petre P., Sarkar T.K. Theoretical comparison of modal expansion and integral equation methods for near-field to far-field transformation. *AMPC Asia-Pacific Microwave Conference*. IEEE, 1992, vol. 2, pp. 713–716. DOI: 10.1109/APMC.1992.672205.
12. Álvarez Y., Las-Heras F., Pino M.R. On the comparison between the spherical wave expansion and the sources reconstruction method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56 (10), pp. 3337–3341.
13. Stratton J., Chu L. Diffraction theory of electromagnetic waves. *Physical Review*, 1939, vol. 56, pp. 99–107.
14. Álvarez Y., Las-Heras F., Pino M.R., Sarkar T.K. An improved super-resolution source reconstruction method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58 (11), pp. 3855–3866.
15. Araque J., Vecchi G. Field and source equivalence in source reconstruction on 3D surfaces. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, vol. 103, pp. 67–100.
16. Romodin V.B., Slobodyanenko A.A., Shebalkova L.V. Projection method for inverse problem in antenna measurement. *2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russian Federation, 2022, pp. 152–156.
17. Parini C., Gregson S., McCormick J., Rensburg D.J. van. *Theory and practice of modern antenna range measurements*. London, UK, IET, 2014.
18. Taybi C., Moutaouekkil M.A., Rodrigues K.K., Elmagroud B., Ziyat A. Probes correction for planar near field antennas measurements. *2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Lecce, Italy, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MMS.2015.7375494.
19. Paris D.T., Leach W.M. Jr., Joy E.B. Basic theory of probe-compensated near-field measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, vol. 26, no. 3, pp. 373–379.
20. Joy E.B., Leach W.M. Jr., Rodrigue G.P., Paris D.T. Applications of probe-compensated near-field measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, vol. 26, no. 3, pp. 379–389.
21. Rao S.M., Wilton D.R., Glisson A.W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 3, pp. 409–418.
22. Coifman R., Rokhlin V., Wandzuraz S. The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1993, vol. 35 (3), pp. 7–11.
23. Engheta N., Murphy W.D., Rokhlin V., Vassiliou M.S. The Fast Multipole Method (FMM) for electromagnetic scattering problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, vol. 40 (6), pp. 634–641.
24. Laitinen T., Pivnenko S., Breinbjerg O. Iterative probe correction technique for spherical near-field antenna measurements. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 221–223.

25. Chew W., Koc S., Song J., Lu C., Michielssen E. A succinct way to diagonalize the translation matrix in three dimensions. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest*, Montreal, QC, Canada, 1997, vol. 3, pp. 2072–2075.
26. Schmidt C.H., Leibfritz M.M., Eibert T.F. Fully probe-corrected near-field far-field transformation employing plane wave expansion and diagonal translation operators. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56 (3), pp. 737–746.
27. IEC/TS 61967-3. *Integrated Circuits – Measurement of electromagnetic emissions – part 3: Measurement of radiated emissions – Surface scan method*. 2013.
28. Hansen P.C. *Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion*. Philadelphia, SIAM, 1998. 247 p.
29. Bod M., Sarraf R., Moradi G., Jafargholi A., Moallemizadeh A. Hybrid Tikhonov source current reconstruction method for large-scale problems. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2018, vol. 12 (1), pp. 77–81.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Слободяненко Александр Александрович – родился в 1993 году, окончил магистратуру в Новосибирском государственном техническом университете в 2017 году, в 2021 завершил обучение в аспирантуре, имеет квалификацию преподавателя-исследователя, ассистент кафедры автономных информационно-управляющих систем НГТУ. Область научных интересов: численные методы решения обратных задач электродинамики. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: sepwood@gmail.com).

Slobodyanenko Alexandr Alexandrovich (b. 1993) – he obtained the Master's degree from Novosibirsk State Technical University in 2017, in 2021 he completed postgraduate studies, qualified as a teacher-researcher, now, he is an assistant of autonomic information-control systems department, NSTU. His research interests are currently focused on numerical methods for solving inverse problems of electrodynamics. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sepwood@gmail.com).



Ромодин Валерий Борисович – родился в 1945 году, закончил Новосибирский государственный университет в 1967 году, доцент кафедры автономных информационно-управляющих систем НГТУ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник. Область научных интересов: волноводно-щелевые и микрополосковые антенные решетки, СВЧ-датчики, антенные измерения. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: romodin@corp.nstu.ru).

Romodina Valerij Borisovich (b. 1945) – he graduated from Novosibirsk State University in 1967. At present he is an Associate Professor of AIUS, NSTU, Candidate of Sciences (Eng.), Senior Researcher. Research interests are slot waveguide and microstrip antenna arrays, microwave sensors, antenna measurements. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: romodin@corp.nstu.ru).



Шебалкова Любовь Васильевна – родилась в 1966 году, в 1989 году получила диплом инженера-радиотехника Новосибирского электротехнического института (ныне Новосибирский государственный технический университет). С 2000 года – старший преподаватель кафедры летательных аппаратов. Ее профессиональные и исследовательские интересы: микрополосковые и волноводно-щелевые антенные решетки, СВЧ-датчики, антенные измерения, моделирование антенн и СВЧ-устройств. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20. E-mail: shebalkova@corp.nstu.ru).

Shebalkova Lyubov Vasilievna (b. 1966) – in 1989 she received the Engineer degree in honor in radio engineering from Novosibirsk Institute of Electrical Engineering (Novosibirsk State Technical University at present). Since 2000 she is a professor assistant in Aircraft department. Her professional and research interests are microstrip and slot waveguide arrays, microwave sensors, antenna measurements, antennas and microwave unit simulation (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: shebalkova@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 17 февраля 2023 г.
Received February 17, 2023*

To Reference:

Slobodyanenko A.A., Romodin V.B., Shebalkova L.V. Kompensatsiya vliyaniya zonda pri izmereniyakh blizhnego polya anteny na ploskosti [Compensation for the influence of the probe in measurements of the near field of the antenna on the plane]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 1 (58), pp. 67–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-1-67-78.