

Метод реконструкции источников: возможности и перспективы антенных измерений

А. А. Слободяненко¹, В. С. Кулик²

¹Новосибирский государственный технический университет

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

sepwood@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются достижения в области разработки метода реконструкции источников и его возможностей при решении задач антенных измерений. В частности, показано, что внедрение метода реконструкции источников в измерительно-вычислительные комплексы ближнего поля позволяет ускорить время измерений путем использования нерегулярных и адаптивных выборок ближнего поля, расширить номенклатуру зондов за счет возможности коррекции технологической оснастки, а также снизить требования к точности их позиционирования. В работе экспериментально продемонстрированы уникальные возможности метода реконструкции источников как в задачах определения диаграммы направленности антенн и их диагностики, так и проведения полунатурных испытаний антенн в составе сложных радиотехнических систем.

Ключевые слова: метод реконструкции источников; преобразования из ближнего в дальнее поле; диагностика антенн; коррекция зонда; нерегулярные измерения; полунатурное моделирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие вычислительной электродинамики, начавшееся с 80-х годов прошлого столетия и продолжающееся по сей день, привело к радикальному изменению методов и подходов не только в задачах проектирования антенн, но и в задачах их измерений. Например, макетирование, являющееся классическим подходом к проектированию и разработке антенн, было практически полностью вытеснено электродинамическим моделированием и оптимизацией их конструкций антенн в специализированных программных комплексах [1]. Что касается антенных измерений, то развитие вычислительной электродинамики в наибольшей степени отразилось на подходе, основанном на измерении ближнего поля антенны и его последующего преобразования в требуемые характеристики антенны с помощью специализированных методов обработки [2, 3]. Так наряду с голографическими методами [4], также известными как методы модального разложения, в которых преобразования осуществляются с помощью представления ближнего поля через спектр плоских, цилиндрических или сферических волновых функций [5], были предложены реконструктивные методы [6], основанные на численном решении интегральных уравнений теории рассеяния [7], связывающих электромагнитное поле, фиксируемое в некоторой точке ближней зоны антенны с его источниками, в общем случае представленными в виде распределения эквивалентных электрических и магнитных токов на поверхности охватывающей антенну [8]. Фактически метод реконструкции источников на основе измерений ближнего поля решает

обратную задачу излучения [9], определяющую численную электродинамическую модель исследуемой антенны, которую можно использовать для определения электромагнитного поля в дальней зоне, т. е. получения диаграммы направленности. Более того, в случае согласования поверхности с конструкцией антенны [10] применение методов и алгоритмов регуляризации обратных задач [11] позволяет определить фактическое распределение полей и токов на исследуемой антенне, что делает возможным проведение диагностики антенн, в частности обнаружение неисправных элементов в антенных решетках [12] и искажений рефлекторных антенн [13], а также для оценки их амплитудно-фазовых распределений [14].

Необходимо отметить, что в силу строгости интегральных уравнений, а также их универсальности, в смысле физически верного описания излучения и рассеяния электромагнитного поля произвольных металлических, диэлектрических и композитных объектов [15], область применения метода реконструкции источников, как и его предельная точность, практически не ограничены. В связи с этим исследование возможностей и перспектив разработанных реализаций метода в антенных измерениях представляет значительный интерес как для научного сообщества, так и для инженеров разработчиков антенных систем.

II. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОЧНИКОВ

Рассматривая процесс измерения ближнего поля с точки зрения задачи рассеяния, с учетом теоремы эквивалентности и взаимности [16] для множества измеренных значений электромагнитного поля в ближней зоне $S_{21}(\mathbf{r}_1) \dots S_{21}(\mathbf{r}_m)$ задача реконструкции источников формулируется как система интегральных уравнений, строгим образом описывающих взаимодействие зонда и исследуемой антенны в виде

$$S_{21}(\mathbf{r}) = \sum_{\substack{\mathbf{p} \in \mathbf{J}_{Pr}, \\ \mathbf{M}_{Pr}}} \sum_{\substack{\mathbf{s} \in \mathbf{J}_A, \\ \mathbf{M}_A}} \int_{\partial Pr} \int_{\partial A} w_{ps} \mathbf{p}(\mathbf{r}) G_{ps}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{s}(\mathbf{r}') d\mathbf{p} d\mathbf{a}, \quad (1)$$

где ∂Pr и ∂A – поверхности, охватывающие зонд и антенну, $\mathbf{J}$ и $\mathbf{M}$ – эквивалентные электрический и магнитный токи, G_{ps} – ядро интегрального уравнения с зависящим от $\mathbf{p}$ и $\mathbf{s}$ типами источников, характеризующих излучение зонда и исследуемой антенны соответственно, а w_{ps} – коэффициент, принимающий значения ± 1 и зависящий от $\mathbf{p}$ и $\mathbf{s}$.



Рис. 1. Установка для экспериментального измерения ближнего поля рупорной антенны

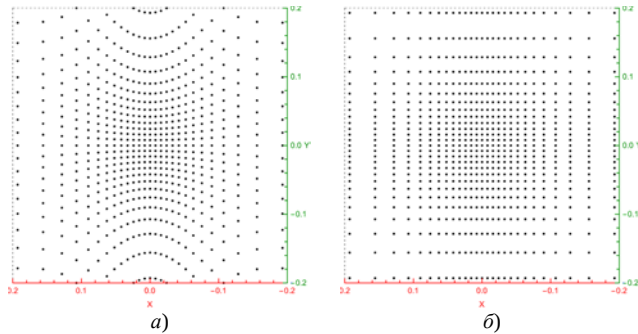


Рис. 2. Нерегулярные измерительные сетки проективного (а) и разряженного (б) типов

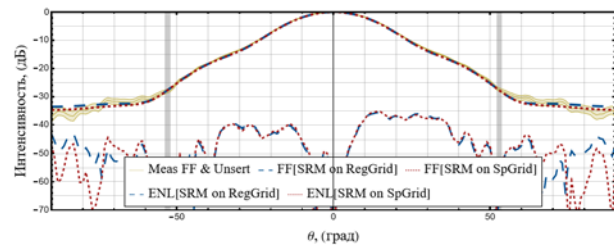


Рис. 3. Результаты прямых измерений ДН и ее реконструкция (SRM) по измерениям ближнего поля на регулярной (RegGrid) и разреженной (SpGrid) сетках

Тогда при известном распределении токов $\mathbf{J}_P, \mathbf{M}_P$, характеризующих приемные свойства зонда, в результате разложения неизвестного распределения эквивалентных источников $\mathbf{J}_A, \mathbf{M}_A$, однозначно характеризующих излучение исследуемой антенны, по RWG-функциям [17] система (1) сводится к СЛАУ вида

$$Ax = s, \quad (2)$$

для решения которой разработан класс проекционных алгоритмов, основанных на процедуре Качмажа и обеспечивающих низкие затраты по памяти $O(N)$, высокую скорость сходимости, а также регуляризацию задачи [18]. Стоит отметить, что поскольку разработанный метод использует пространственные разложения, то по скорости вычислений он уступает своему спектральному аналогу FIAFTA. Однако за счет особенностей структуры метода и алгоритмов все вычисления могут быть интегрированы в процесс измерения, что полностью нивелирует повышенную вычислительную сложность метода.

III. РАСШИРЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СКАНЕРОВ БЛИЗКОГО ПОЛЯ

A. Нерегулярные схемы измерений

Поскольку влияние зонда учтено в формулировке метода реконструкции источников (1), измерение ближнего поля на регулярной измерительной сетке, необходимой для проведения предварительной коррекции зонда не является обязательным.

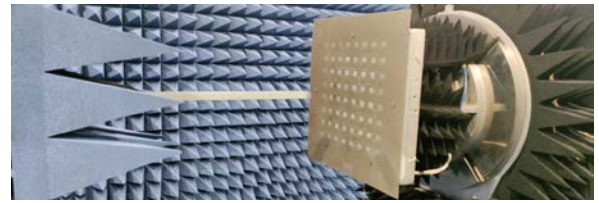


Рис. 4. Установка для экспериментального измерения ближнего поля микрополосковой антенны

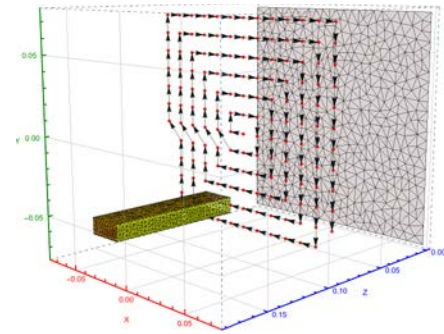


Рис. 5. Адаптивная схема измерений ближнего поля при их обработке результатов методом реконструкции источников

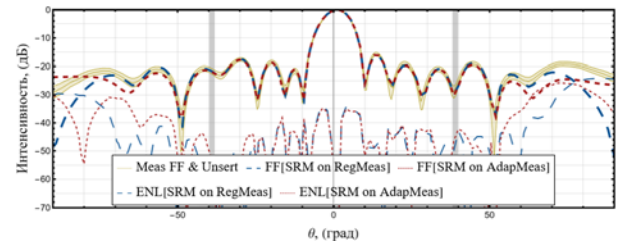


Рис. 6. Результаты прямых измерений ДН и ее реконструкция (SRM) по регулярной (RegMeas) и адаптивной (AdapMeas) схемам измерений ближнего поля

Соответственно могут быть использованы нерегулярные измерительные сетки [5], значительно снижающие итоговое время измерений. Например, для планарных сканеров классической конструкции (Т и Н) метод реконструкции источников обеспечивает определение диаграммы направленности (ДН) антенны на основе измерений ближнего поля (рис. 1) по проективной и разреженной измерительным сеткам (рис. 2), сокращающих время измерений на 30–50% при сопоставимом уровне ошибки (рис. 3), выраженным эквивалентным уровнем помех (ENL) [19].

B. Адаптивная схема измерений

Исходя из структуры процедуры Качмажа, требующей для решения (2) только строку матрицы A , сокращения времени измерений можно достичь путем интеграции вычислений в процесс измерений ближнего поля. Более того, учитывая специфику интегрированных вычислений, фактически уточняющих решение на каждой точке измерений, сокращения их суммарного времени можно добиться путем преждевременной остановки измерений по результатам апостериорной оценки достаточности измеренной информации [18], что экспериментально подтверждено на примере измерения и преобразования ближнего поля микрополосковой антенны (рис. 4). Очевидно, что в таком случае классические измерения поля типа «змейкой» не годятся, тогда целесообразным является измерение поля по квазиспиральной траектории (рис. 5), в рамках которой адаптивный вариант метода реконструкции источников обеспечивает восстановление ДН микрополосковой антенны (рис. 6), используя лишь 70% выборку поля.

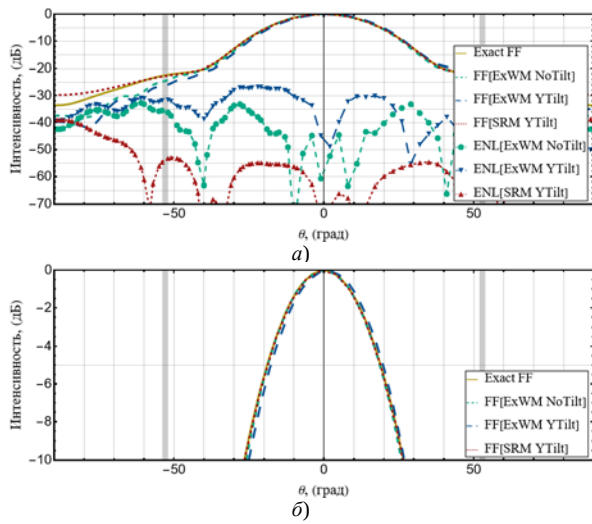


Рис. 7. Сравнения точности определения ДН (а) и главного максимума ДН (б) рупорной антенны в Е-плоскости методом модального разложения (ExrWM) и методом реконструкции источников (SRM) по данным имитационного моделирования измерений ближнего поля зондом без ошибки (NoTilt) и с ошибкой позиционирования (YTilt)

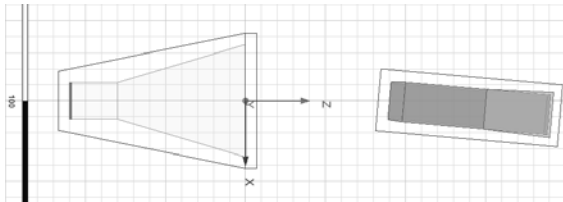


Рис. 8. Имитационная модель измерений рупорной антенны зондом с ошибкой позиционирования

С. Коррекция ошибок позиционирования зонда

Возможность коррекции влияния зонда при решении задачи определения ДН по измерениям ближнего поля является ключевым аспектом обеспечения точных измерений [20]. В рамках разработанного метода реконструкции источников это обеспечивается за счет наличия токов $\mathbf{J}_{Pr}$, $\mathbf{M}_{Pr}$, характеризующих приемно-передающие свойства зонда в интегральном уравнении (1). Тогда, учитывая, что токи $\mathbf{J}_{Pr}$, $\mathbf{M}_{Pr}$ также могут быть представлены в виде разложения по пространственному базису, который в свою очередь может быть согласован с реальным положением зонда, метод реконструкции источников обладает возможностью коррекции ошибок позиционирования зонда, что подтверждается результатами численного эксперимента (рис. 7), проведенного на модели рупорной антенны и зонда без ошибки позиционирования (NoTilt) и с ошибкой (YTilt), выраженной поворотом относительно центральной точки его апертуры на 5 градусов вокруг оси Y (рис. 8).

Д. Коррекция технологической оснастки

Поскольку для коррекции зонда требуется поверхностное распределение токов $\mathbf{J}_{Pr}$, $\mathbf{M}_{Pr}$, то благодаря теореме эквивалентности соответствующие токи могут быть определены для любого типа зонда, в том числе с учетом сопутствующей его технологической оснастки, что в свою очередь открывает возможность соответствующей коррекции, которая также подтверждается результатами численного эксперимента (рис. 9), проведенного на модели рупорной антенны и антенны Вивальди с держателем (рис. 10).

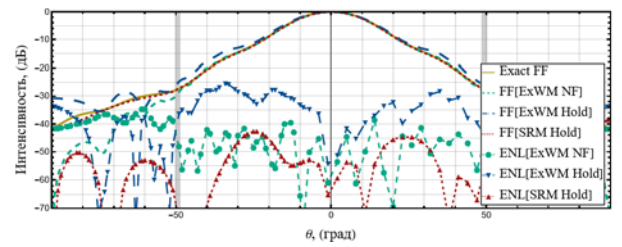


Рис. 9. Сравнений точности определения ДН рупорной антенны в Е-плоскости методом модального разложения (ExrWM) и методом реконструкции источников (SRM) по точным данным ближнего поля (NF) и данным имитационного моделирования измерений ближнего поля антенной Вивальди с держателем (Hold)

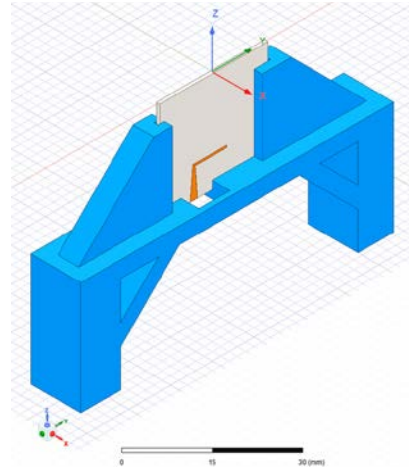


Рис. 10. Модель антенны Вивальди с держателем

Е. Многозондовые измерения

Ключевой особенностью разработанного метода реконструкции источников является возможность индивидуального использования взвешивающих коэффициентов для каждой точки измерения, что является критически важным при измерениях ближнего поля многозондовой системой, значительно ускоряющей процесс измерения. В идеале многозондовая система должна состоять из идентичных зондов, на ориентацию и положение которых предъявляются жесткие требования. Однако на практике добиться этого довольно сложно и дорого [21] поэтому применение метода реконструкции источников является крайне перспективным при реализации многозондовых измерений ближнего поля.

IV. РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СКАНЕРОВ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

А. Реконструкция электромагнитного поля

В рамках задачи восстановления ДН метод реконструкции источников за счет использование априорной информации о геометрии исследуемой антенны и типе источников излучения [19] снимает ограничения на достоверный сектор восстановления ДН антенн, присущие методам модального разложения [22], что подтверждается экспериментальными измерениями рупорной и микрополосковой антенн (рис. 3 и рис. 6). Более того, учитывая строгость интегральных уравнений теории рассеяния, лежащих в основе метода реконструкции источников, последний не ограничивается восстановлением электромагнитного поля в дальней зоне, обеспечивая определение поля в любой свободной от источников излучения точке пространства, что может быть полезным при определении зависимости коэффициента усиления и ДН антенн от расстояния.

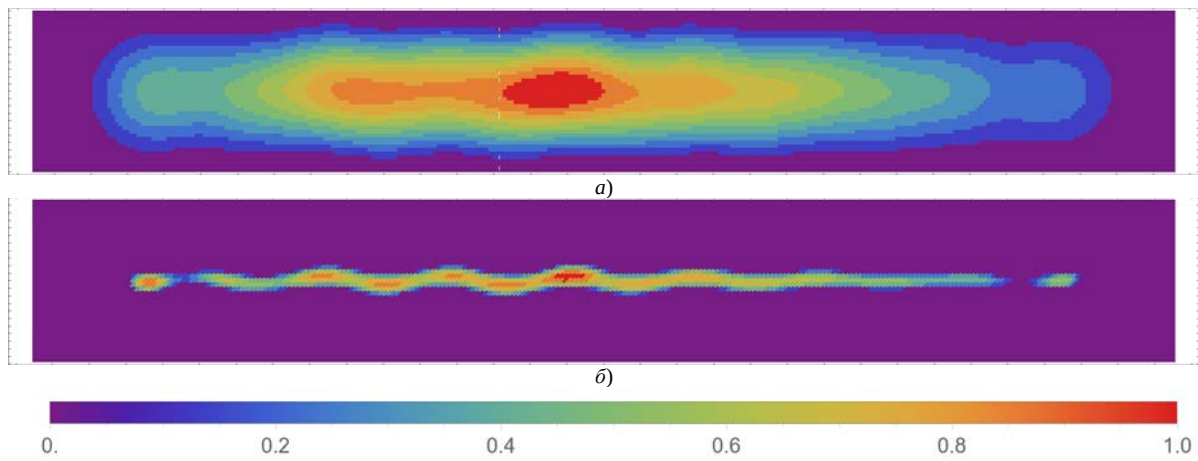


Рис. 11. Нормированные амплитудные распределения переменноразмерной волноводно-щелевой антенной решетки, полученные на основе измерений ближнего поля методами модального разложения (а) и реконструкции источников с регуляризацией (б)

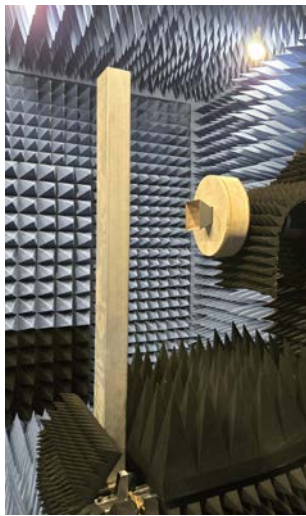


Рис. 12. Расположение рупорной антенны и металлической трубки при измерении ДН

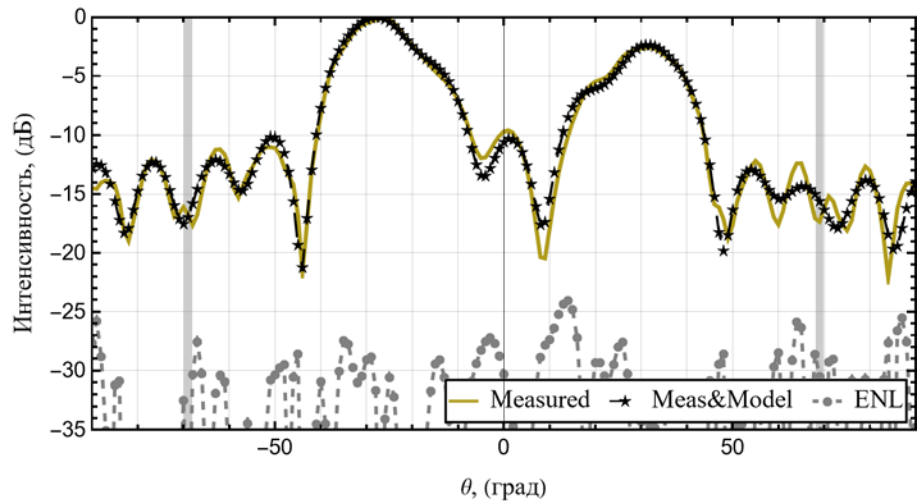


Рис. 13. ДН рупорной антенны и металлической трубки, полученные прямыми измерениями (Measured) и полунатурным моделированием на основе результатов реконструкции источников по измерениям ближнего поля рупорной антенны (Meas&Model)

В. Диагностика и локализация источников излучения

Метод реконструкции источников из-за отсутствия ограничений на пространственную дискретизацию источников, присущую методам модального разложения [23], а также регуляризирующих свойств проекционных алгоритмов, позволяет расширить функциональные возможности диагностики антенн, за счет более точной оценки амплитудно-фазового распределения. Это наиболее ярко видно из сравнения результатов определения амплитудно-фазового распределения переменноразмерной волноводно-щелевой антенной решетки (рис. 11), для которой, несмотря на сильную взаимосвязь между излучающими щелями, метод реконструкции источников обеспечил их локализацию (рис. 11б). В результате высокая степень разрешения метода реконструкции источников в перспективе позволяет решать задачи идентификации и локализации утечек электромагнитной энергии в печатных платах и экранирующих конструкциях, а также калибровки элементов активных фазированных антенных решеток.

С. Полунатурное моделирование

Формат численной модели, получаемой методом реконструкции источников, в виде множества RWG-функций позволяет использовать вычислительные методы электродинамики для оценки эффективности

облучения зеркал и фокусирующих линз [24], а также оценки искажений излучения антенны на различных платформах (автомобиль, корабль, вышка) [25], что является весьма актуальным для разработчиков антенн сложных радиотехнических систем, т.к. устраняет необходимость проведения дорогостоящих измерений. Необходимо отметить, что существующие программные комплексы, такие как HFSS, CST и FEKO использующиеся на сегодняшний день для комплексирования измерений и электродинамического моделирования, имеют ограниченную применимость, т.к. не позволяют учесть взаимное влияние между источником излучения и близкорасположенными объектами, и как следствие обеспечить достоверность результатов [24]. Однако недавно разработанный авторами численный метод, основанный на разложении Неймана и интегральных уравнениях теории рассеяния, тем самым обеспечивающий естественную интеграцию результатов реконструкции источников, а также учет многократных переотражений, позволяет проводить полунатурное моделирование излучения антенн вблизи произвольных рассеивающих объектов, сопоставимое по точности с результатами полных измерений, что экспериментально подтверждено на примере излучения рупорной антенны и металлической трубки, расположенной на расстоянии $R \approx 4\lambda$ перед ее апертурой (рис. 12). В рамках эксперимента отклонение

результатов полунатурного моделирования ДН от измерений (рис. 13), выраженное средним значением эквивалентного уровня помех ENL составило минус 35.5 дБ при максимальном значении минус 24.1 дБ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что разработанные и реализованные методы реконструкции источников, основанные на численном решении интегральных уравнений электромагнитного поля, позволяют значительно расширить инструментальные и функциональные возможности существующих измерительно-вычислительных комплексов ближнего поля, а также спроектировать новые комплексы, обладающие уникальными техническими характеристиками.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность д-ру технических наук Куксенко С.П. и канд. технических наук Фатееву А.В. за ценные советы и рекомендации по оформлению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Банков С.Е., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS //Журнал радиоэлектроники. 2009. №. 5. С. 5-5.
- [2] Бахрах Л.Д. (ред.). Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне. Наука. Ленингр. отд-ние, 1985.
- [3] Chen H. et al. Use of Computational Electromagnetics to Enhance the Accuracy and Efficiency of Antenna Pattern Measurements //IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques. 2018. Т. 3. С. 214-224.
- [4] Курочкин А.П. Теория и техника антенных измерений //Антенны. 2009. №. 7. С. 39-44.
- [5] Ferrara F., Gennarelli C., Gueriero R. Near-field antenna measurement techniques //Handbook of antenna technologies. Springer, Singapore, 2015. С. 1-49.
- [6] Taaghola A., Sarkar T. K. Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry, utilizing an equivalent magnetic current //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2002. Т. 38. №. 3. С. 536-542.
- [7] Colton D., Kress R. Integral Equation Methods in Scattering Theory. New York: John Wiley & Sons. 1983.
- [8] Alvarez Y., Las-Heras F., Pino M. R. Reconstruction of equivalent currents distribution over arbitrary three-dimensional surfaces based on integral equation algorithms //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2007. Т. 55. №. 12. С. 3460-3468.
- [9] Mojabi P. et al. Electromagnetic inversion for biomedical imaging, antenna characterization, and sea ice remote sensing applications //2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). IEEE, 2016. С. 586-589.
- [10] López Y.A. et al. An improved super-resolution source reconstruction method //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Т. 58. №. 11. С. 3855-3866.
- [11] Y Wang, AG Yagola, and C Yang. Optimization and regularization for computational inverse problems and applications. Springer, 2011.
- [12] Jørgensen E. et al. Antenna diagnostics on planar arrays using a 3D source reconstruction technique and spherical near-field measurements //2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2012. С. 2547-2550.
- [13] Las-Heras F., Galocha B., Alvarez Y. On the sources reconstruction method application for array and aperture antennas diagnostics //Microwave and Optical Technology Letters. 2009. Т. 51. №. 7. С. 1664-1668.
- [14] Álvarez Y., Las-Heras F., Pino M.R. Antenna diagnostics using phaseless NF information //Automatika. 2012. Т. 53. №. 1. С. 49-55.
- [15] Mackenzie A.I., Rao S.M., Baginski M.E. Method of moments solution of electromagnetic scattering problems involving arbitrarily-shaped conducting/dielectric bodies using triangular patches and pulse basis functions //IEEE transactions on antennas and propagation. 2009. Т. 58. №. 2. С. 488-493.
- [16] Balanis C. A. Advanced engineering electromagnetics. John Wiley & Sons, 2012.
- [17] S.M. Rao, D.R. Wilton and A.W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 30, pp. 409-418, May 1982.
- [18] Слободяненко А.А. Реконструкция электромагнитного поля антенн на основе измерений в ближней зоне: дис. ... канд. техн. наук 2.2.14. / Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники 2023. 113 с.
- [19] Слободяненко А.А., Кулик В.С. Верификация и оценка точности метода реконструкции источников в задачах определения диаграммы направленности антенн по измерениям электромагнитного поля в ближней зоне // Антенны. 2025. № 2. С. 66-85.
- [20] Romodin V.B., Slobodyanenko A.A., Myalkin S.K., & Shebalkova L.V. Near Field-Far Field Transformation with Pre-Correction Probe Technique //2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2023. С. 370-374.
- [21] Fateev A.V., Razgulyaev S.I., Slobodyanenko A.A. Investigation of the Method of Reducing the Measurement Time of Radio Technical Characteristics of Antennas in the Near Field //2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). IEEE, 2023. С. 104-107.
- [22] Cano-Fácila F.J., Pivnenko S., Sierra-Castañer M. Reduction of Truncation Errors in Planar, Cylindrical, and Partial Spherical Near-Field Antenna Measurements //International Journal of Antennas and Propagation. 2012. Т. 2012. №. 1. С. 438727.
- [23] Castañer M.S., Saccardi F., Foged L.J. Revision of Diagnosis Techniques: Holographic and Equivalent Currents Reconstructions //2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2025. С. 1-5.
- [24] Foged L.J. et al. Bringing numerical simulation and antenna measurements together //The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). IEEE, 2014. С. 3421-3425.
- [25] Scialacqua L. et al. Measured antenna representation of flush mounted antennas for Computational Electromagnetic solvers //2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2016. С. 1-5.