

Восстановление азимутальной диаграммы направленности излучающих систем по результатам цилиндрического сканирования ближнего электрического поля

© А.Г. Андреев, А.А. Ерохин, В.С. Панько

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: vranko@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2026 г.

В окончательной редакции 14 августа 2026 г.

Принято к публикации 16 августа 2026 г.

Рассмотрен алгоритм преобразования ближнего поля радиочастотных излучателей в дальнюю зону излучения для случая цилиндрического сканирования при регистрации только вертикальной компоненты электрического поля. Предложена программная реализация метода в среде MATLAB. Проведена верификация алгоритма на частоте 2 МГц с использованием модели вертикального электрического вибратора с тремя вторичными пассивными излучателями. Исследовано влияние высоты и радиуса цилиндра сканирования на точность восстановления фазовой диаграммы направленности. Показано, что для рассмотренной излучающей системы увеличение высоты цилиндра до 2λ обеспечивает среднеквадратичное отклонение восстановленной фазовой диаграммы направленности от эталонной в пределах 2° .

Ключевые слова: ближнее поле, цилиндрическое сканирование, средние волны.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63884.20834

Измерения характеристик направленности излучающих систем средневолнового диапазона в дальней зоне сопряжены со значительными трудностями, вызванными необходимостью обеспечения больших измерительных дистанций (5 km и более). Эффективным решением является сканирование ближнего поля с последующим математическим пересчетом данных в дальнюю зону (near field to far field, NF-FF) [1,2].

В практических приложениях требуются диагностика и калибровка антенных систем, фазовые диаграммы направленности (ДН) которых искажены вследствие влияния пассивных вторичных излучателей [3,4]. В этом случае интерес представляет ДН только в азимутальной (экваториальной) плоскости, определенная для вертикальной составляющей электрического поля. При измерениях используются слабонаправленные измерительные датчики, размеры которых малы по сравнению с длиной волны.

В настоящей работе рассматривается численная реализация цилиндрического NF-FF-преобразования для доминирующей вертикальной компоненты поля E_z . Особое внимание уделено критериям выбора геометрических размеров области сканирования для обеспечения высокой точности восстановления фазовых характеристик направленности.

Областью сканирования в рассматриваемой модели является цилиндрическая поверхность радиуса r_0 и высоты H , полностью окружающая исследуемую излучающую систему. Ось цилиндра совмещена с осью координат Oz , и ее середина совпадает с началом координат. Измерительный зонд перемещается по поверхности сканирования с фиксированным шагом по

угловой координате ψ и вертикальной координате z . Для перемещения зонда может быть использован БПЛА [5,6]. Измеренные значения комплексной амплитуды вертикальной компоненты электрического поля $E_z(r_0, \psi, z)$ фиксируются. Основываясь на результатах измерения, в дальней зоне излучающей системы вертикальную составляющую электрического поля можно представить в виде суперпозиции цилиндрических волновых функций [7]:

$$E_z(r_0, \psi, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b_n(h) H_n^{(2)}(\gamma r_0) e^{jn\psi} e^{-jhz} dh,$$

где $H_n^{(2)}$ — функция Ханкеля второго рода n -го порядка, $\gamma = \sqrt{k^2 - h^2}$ — радиальное волновое число, $h = k \cos \theta$ — осевое волновое число, θ — угол места, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны. Коэффициенты разложения $b_n(h)$ вычисляются с помощью двумерного преобразования Фурье от распределения поля E_z , измеренного на поверхности цилиндра:

$$b_n(h) = \frac{1}{2\pi H_n^{(2)}(\gamma r_0)} \int_{-H/2}^{H/2} \int_0^{2\pi} E_z(r_0, \psi, z) e^{-jn\psi} e^{jhz} d\psi dz.$$

Расчет распределения поля в дальней зоне осуществляется методом стационарной фазы. Для экваториальной плоскости цилиндра ($\theta = 90^\circ$, что в выбранных обозначениях соответствует $h = 0$, $\gamma = k$) комплексная характеристика направленности может быть вычислена

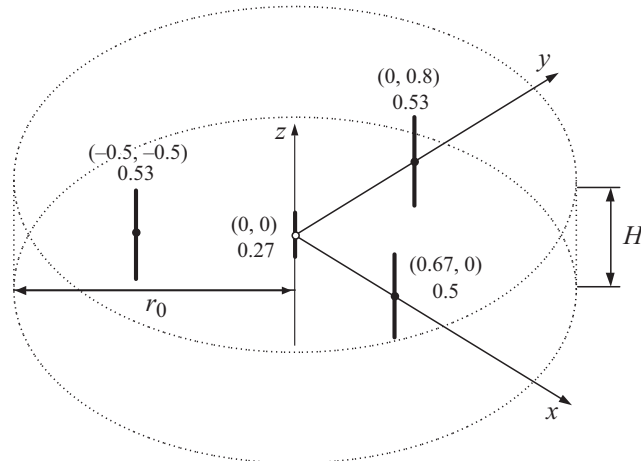


Рис. 1. Исследуемая излучающая система (масштаб соблюден).

следующим образом:

$$F(\varphi) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} j^n b_n(0) e^{jn\varphi}.$$

На практике количество суммируемых цилиндрических волновых функций усекается до конечного значения N , определяемого числом шагов дискретизации по азимуту [8]. Данное ограничение обосновано тем, что высшие пространственные гармоники с номерами $|n| > kr_a$ (где r_a — физический радиус излучающей системы) быстро затухают при удалении от структуры, переходят в реактивное поле и не участвуют в формировании ДН дальней зоны.

Для подтверждения достоверности описанного алгоритма было выполнено математическое моделирование процессов излучения и восстановления ДН на частоте 2 MHz ($\lambda = 150$ m). Исследования проводились для излучающей системы в виде вертикального симметричного вибратора, окруженного тремя вторичными (пассивными) вибраторами. На рис. 1 показаны их размеры и расположение, намеренно подобранные таким образом, чтобы получить сложную структуру ближнего поля и неравномерную „искаженную“ диаграмму направленности. На рисунке числа в скобках соответствуют координатам (x, y) центров вибраторов, следующее число — полная длина вибратора, все величины выражены в длинах волны. Центры всех вибраторов лежат на плоскости xOy , их радиусы одинаковы и составляют 0.0001 λ .

С помощью численного моделирования по методу моментов формировался массив данных комплексного поля E_z , имитирующий результаты цилиндрического сканирования. Варьируемыми параметрами в серии численных экспериментов служили полная высота цилиндра сканирования H и его радиус r_0 . Из-за сложной пространственной структуры поля, формируемого системой вторичных излучателей, данная конфигурация чувствительна к размерам измерительной поверхности.

Значения поля в модели определялись с помощью виртуального пробника, не имеющего направленности. В реальном практическом применении метода планируется использовать электрически малую антенну (например, короткий электрический вибратор или рамочную антенну), и учет ее направленных свойств должен быть рассмотрен дополнительно.

На рис. 2 приведена визуализация распределения нормированной амплитуды вертикальной компоненты ближнего поля E_z на цилиндрической поверхности радиуса $r_0 = \lambda$ для различных значений высоты H . Горизонтальными линиями на рисунке отмечены высоты цилиндра сканирования, для которых впоследствии проводилось восстановление ДН. При малых высотах ($H < 2\lambda$) на краях области наблюдаются значительные по величине остаточные напряженности поля (минус 8–10 dB). Это свидетельствует о потере существенной части излучаемой энергии, уходящей через торцевые поверхности измерительного цилиндра и не учитываемой при восстановлении ДН. При увеличении высоты до $H \sim (4-5)\lambda$ амплитуда поля на верхнем и нижнем краях цилиндра спадает практически до нуля, что минимизирует погрешность восстановления ДН, вызванную усечением волнового фронта.

Для количественной оценки точности преобразования были получены восстановленные ДН в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) при $r_0 = \lambda$. На рис. 3 представлены угловые зависимости восстановленных ДН в сравнении с эталонными, полученными моделированием по методу моментов. Установлено, что ошибки восстановления амплитудной и фазовой ДН составляют примерно от -3.4 до 0.5 dB, от -9 до 9° при высоте цилиндра 0.4 λ , от -1.2 до 0.4 dB, от -6 до 5° при высоте 1.2 λ , а увеличение высоты до 4 λ снижает расхождение до уровня от -0.5 до 0.4 dB, от -3 до 3° во всем азимутальном секторе $\varphi = 0-360^\circ$.

С целью комплексного анализа влияния размеров области измерений на точность восстановления фазовой

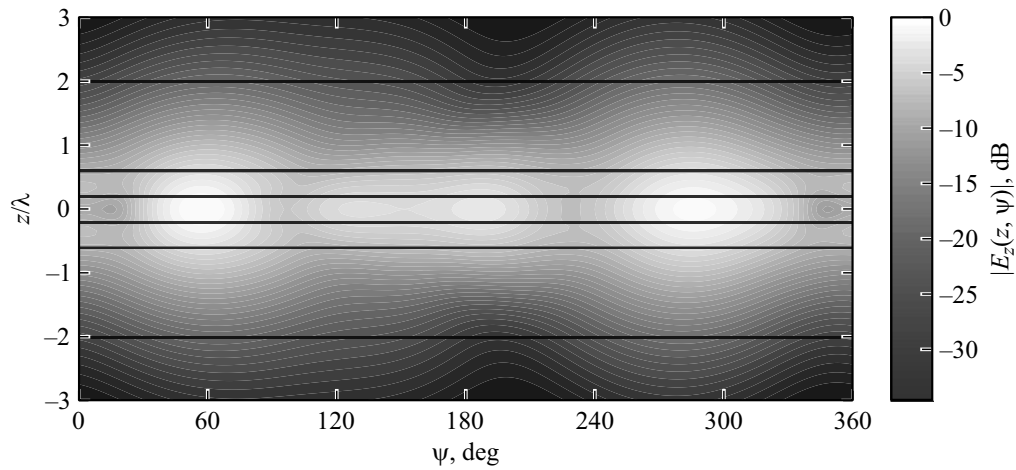


Рис. 2. Распределение амплитуды поля на цилиндрической поверхности сканирования.

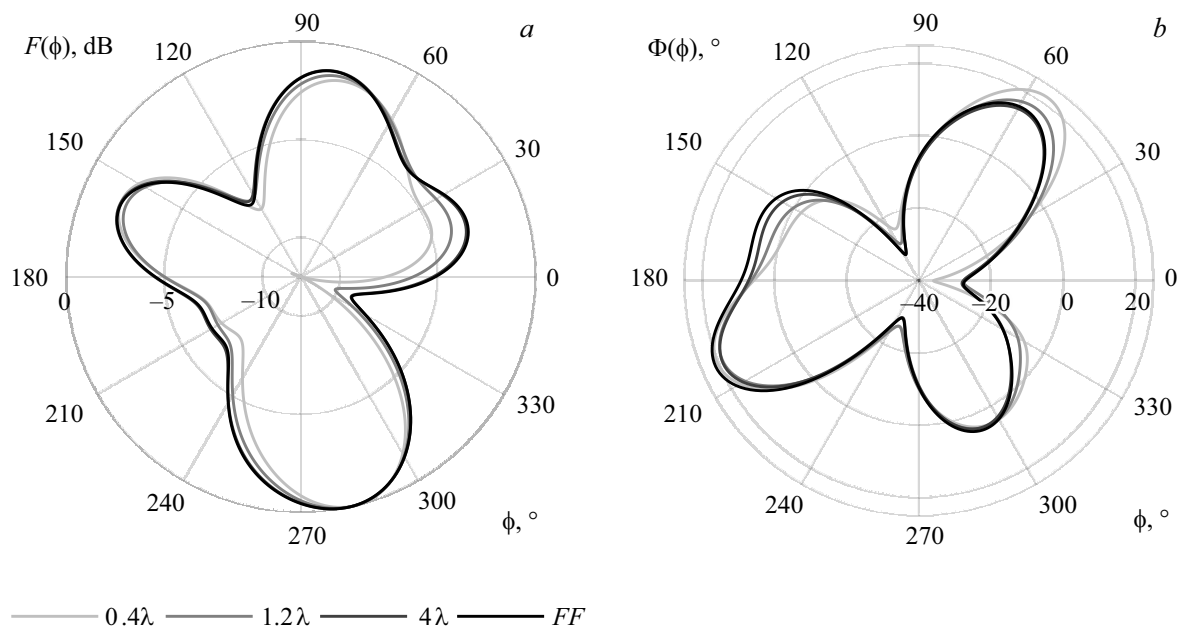


Рис. 3. Эталонная и восстановленные амплитудные (a) и фазовые (b) ДН.

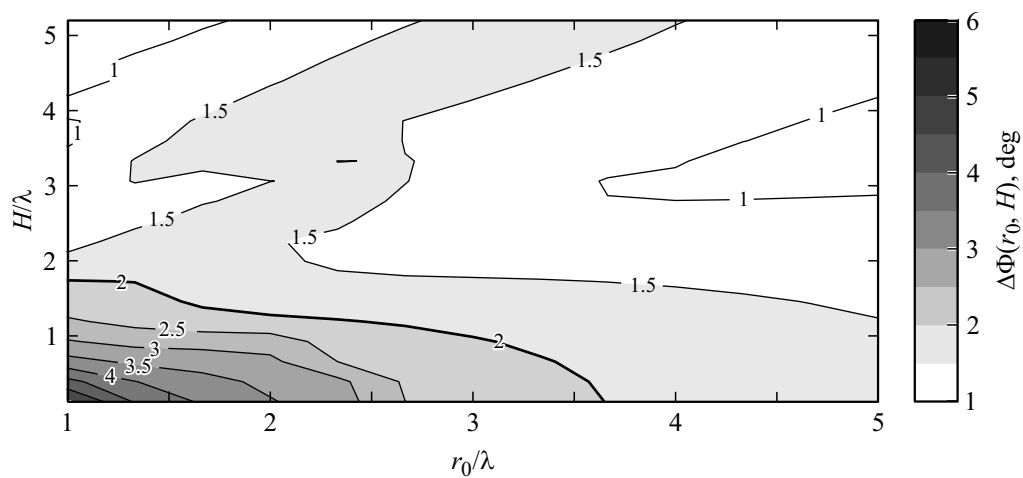


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение восстановленной фазовой ДН от эталонной.

ДН (ФДН) был проведен вычислительный эксперимент с одновременным варьированием геометрических параметров цилиндра. На рис. 4 в координатах $H-r_0$ представлена двумерная карта распределения среднеквадратичного отклонения восстановленной ФДН $\Phi(\varphi)$ от эталонной $\Phi_0(\varphi)$, вычисленного следующим образом:

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| \Phi(\varphi_m) - \Phi_0(\varphi_m) \right|^2},$$

где M — количество отсчетов ФДН по азимуту. Анализ двумерного распределения показывает, что область минимальных фазовых погрешностей (менее 2°) локализована в верхней части карты, где высота цилиндра превышает 2λ . При этом увеличение радиуса сканирования r_0 при фиксированной малой высоте H приводит к закономерному уменьшению погрешности, так как сценарий измерения в этом случае трансформируется в сценарий для случая обычных измерений ДН в дальней зоне.

В заключение отметим, что при наличии априорных данных о размерах излучающей системы описанная методика позволяет провести оценку точности восстановления ДН и должным образом выбрать габариты области цилиндрического сканирования крупноразмерных излучающих систем гектометрового диапазона длин волн.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20180 (<https://rscf.ru/project/25-29-20180/>), гранта Красноярского краевого фонда науки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.D. Yaghjian, IEEE Trans. Antennas Propag., **34** (1), 35 (1986). DOI: 10.1109/TAP.1986.1143727
- [2] J. Hald, F. Jensen, F.H. Larsen, *Spherical near-field antenna measurements* (Peter Peregrinus, London, 1988). DOI: 10.1049/PBEW026E
- [3] К.В. Князева, В.С. Панько, А.А. Ерохин, А.Г. Андреев, А.В. Косолапов, С.Б. Нелипа, Журн. радиоэлектроники, № 7, 1 (2024). DOI: 10.30898/1684-1719.2024.7.6
- [4] Н.В. Барановский, С.Б. Нелипа, А.В. Косолапов, А.Г. Андреев, В.С. Панько, Успехи современной радиоэлектроники, **80** (2), 39 (2026). DOI: 10.18127/j20700784-202602-04
- [5] Q. Herbet, S. Saillant, M. Menelle, B. Urbani, N. Bourey, M. Darces, M. Hélier, in *2019 Int. Radar Conf. (RADAR)*, (IEEE, 2019), p. 1–4. DOI:10.1109/RADAR41533.2019.171336
- [6] H.-J. Steiner, T. Fritzel, R. Strauß, in *15th Eur. Conf. on antennas and propagation (EuCAP)* (IEEE, 2021), p. 1–5. DOI: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411291
- [7] *IEEE recommended practice for near-field antenna measurements* (IEEE-SA Standards Board, 2012).
- [8] W.M. Leach, D.T. Paris, IEEE Trans. Antennas Propag., **21** (4), 435 (1973). DOI: 10.1109/TAP.1973.1140520