



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36>

УДК 621.396.67

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНЕРА БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

А. А. СТАНУЛЬ, В. А. СИМОНЕНКО, А. П. ЮБКО

ООО «СКБ «Радиотехпроект» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлены результаты измерения характеристик направленности антенн при помощи сканера ближнего поля. Выполнено сравнение диаграмм направленности изготовленной антенной решетки, полученных при помощи сканера и классическим методом с использованием поворотного стола в безэховой камере. Приведены краткое описание разработанного сканера, алгоритмы и методика, использованные в процессе пересчета измеренного ближнего поля антенны в диаграмму направленности. Отмечены такие достоинства сканера, как оценка дефектных элементов решетки; существенное снижение требований к размерам помещения, в котором проводятся измерения; получение объемной диаграммы направленности в передней полусфере; возможность осуществления первичной калибровки антенной системы.

Ключевые слова: диаграмма направленности антенн, сканер ближнего поля, спектр плоских волн, безэховая камера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Стануль, А. А. Оценка характеристик направленности антенных решеток с использованием сканера ближнего поля / А. А. Стануль, В. А. Симоненко, А. П. Юбко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 30–36. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36>.

EVALUATION OF THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF ANTENNA ARRAYS USING A NEAR-FIELD SCANNER

ALIAKSANDR STANUL, VIKTAR SIMANENKA, ALEXSANDR JOUBKO

LLC “SDC “Radiotechproject” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of antenna directivity characteristics measurement using a near-field scanner. A comparison is made between the radiation patterns of the manufactured antenna array obtained using the scanner and the classical method using a turntable in an anechoic chamber. A brief description of the scanner developed by the authors, the algorithms and methods used in the process of converting the measured near field of the antenna into a directional pattern are provided. The scanner’s advantages include the ability to assess defective array elements; significantly reduce the size requirements for the measurement room; the ability to obtain a three-dimensional radiation pattern in the forward hemisphere; and the ability to perform primary calibration of the antenna system.

Keywords: antenna radiation pattern, near-field scanner, plane wave spectrum, anechoic chamber.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Stanul A., Simanenka V., Joubko A. (2026) Evaluation of the Directional Characteristics of Antenna Arrays Using a Near-Field Scanner. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 30–36. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36> (in Russian).

Введение

Измерение параметров сложной радиотехнической системы обязательно включает этап измерения характеристик направленности антенной системы, будь то одиночный излучатель или активная фазированная антенная решетка. Классический и достоверный (при определенных условиях) метод определения таких характеристик – измерение в дальней зоне в безэховой камере (БЭК) или на открытой местности с использованием поворотного стенда.

Измерение в дальней зоне предполагает работы в БЭК либо выезд на открытую местность. С одной стороны, это сопровождается дополнительными логистическими затратами. С другой – измерения в БЭК классическим методом (без использования коллиматора) могут привести к искажению диаграммы направленности (ДН) из-за ограниченности габаритов камеры, поскольку измерение антенн с размером апертуры от нескольких десятков длин волн сопровождается появлением фазовой ошибки поля на краях апертуры. Измерения на открытой местности хоть и решают вопрос с дальней зоной, но не нивелируют фактор переотражений электромагнитной волны (ЭМВ) от подстилающей поверхности. В результате основная проблема измерений в БЭК, связанная с фазовой ошибкой ввиду сферического фронта волны, вынуждает использовать альтернативные методы измерений ДН. В частности, голографический принцип определения характеристик антенн [1].

В статье представлены разработанный сканер ближнего поля и алгоритм расчета ДН по результатам измерения поля в ближней зоне (БЗ). Выполнено сравнение характеристик антенн, приведены методика и результаты измерений.

Проблема измерений в дальней зоне в безэховой камере

Классическая формула для определения ближней границы дальней зоны (ДЗ), приведенная в [2], соответствует электрической разности фаз (равной $22,5^\circ$) между колебаниями поля в центре антенны и ее крайними точками:

$$D \gg \frac{2L^2}{\lambda}. \quad (1)$$

Ограниченные размеры БЭК не позволяют измерить параметры антенн больших электрических размеров с заданной точностью ввиду искажения фронта волны. В качестве объекта измерений использовалась антенная решетка X-диапазона с апертурой $0,8 \times 0,4$ м (наибольший размер – $L \approx 25\lambda$). На рис. 1 приведено сравнение теоретических ДН в азимутальной плоскости для идеальной решетки тех же геометрических размеров, что и в реальном образце, при расстояниях от решетки до измерительной антенны $D \approx 13$ м ($D \approx 400\lambda$) и $D = \infty$.

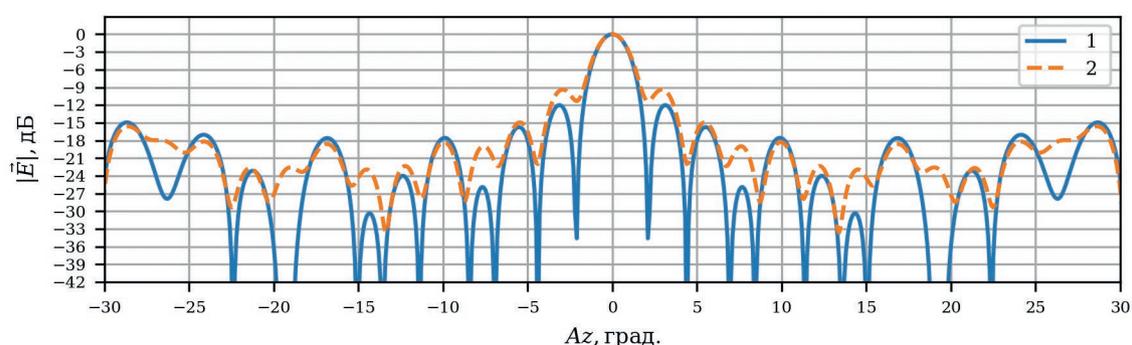


Рис. 1. Диаграмма направленности: 1 – в дальней зоне ($D = \infty$); 2 – при $D \approx 400\lambda$

Fig. 1. Radiation pattern: 1 – in the far zone ($D = \infty$); 2 – at $D \approx 400\lambda$

Как следует из рис. 1, при указанном расстоянии ($D = 13$ м) заметны искажения уровня боковых лепестков и наблюдается так называемое «запыление нулей» ДН. Это объясняется известной фазовой ошибкой, возрастающей к краю апертуры антенны вследствие сферичности фронта волны, распространяющейся от измерительной антенны. На рис. 2 изображены геометрическая (ΔD) и электрическая ($\Delta \varphi$) зависимости разности хода ЭМВ от измерительной антенны до n -го излучателя по отношению к центральному (ым) на исследуемой решетке для расстояния $D \approx 400\lambda$.

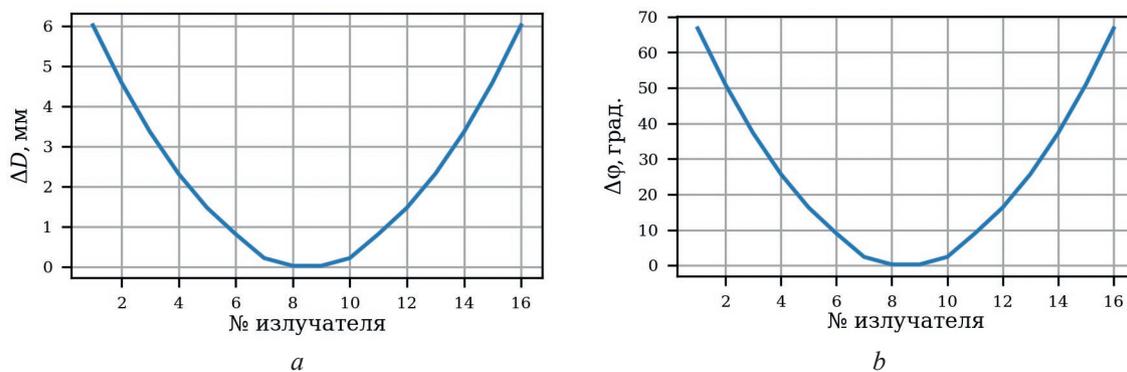


Рис. 2. Зависимость разности хода электромагнитной волны: *a* – геометрическая; *b* – электрическая
Fig. 2. Dependence of the path difference of an electromagnetic wave: *a* – geometric; *b* – electrical

Согласно рис. 2, *b*, фазовая ошибка для используемого образца в БЭК показывает, что расстояние между антеннами меньше, чем общепринятая граница дальней зоны.

Измерения характеристик антенн на планарном сканере в ближней зоне

Несмотря на то что измерение ДН в БЭК в дальней зоне является прямым, менее затратным с точки зрения оборудования и не требует математической постобработки, тем не менее, ввиду искажения фронта волны, определение ДН остронаправленных антенн с большой апертурой целесообразно проводить с применением сканера ближнего поля. Авторами статьи был спроектирован и изготовлен планарный сканер ближнего поля (СБП). Его структурная схема является типовой (с использованием 2D-координатного стола с управляющим блоком, векторного анализатора цепей и ЭВМ), поэтому не приводится. В качестве зонда использовался открытый конец волновода, ориентация зонда изменялась при помощи шагового двигателя. На рис. 3 представлена решетка *X*-диапазона (размер апертуры 0,8×0,4 м), ДН которой измерялась двумя способами: в БЭК (рис. 3, *a*) на поворотном столе и с помощью СБП (рис. 3, *b*).

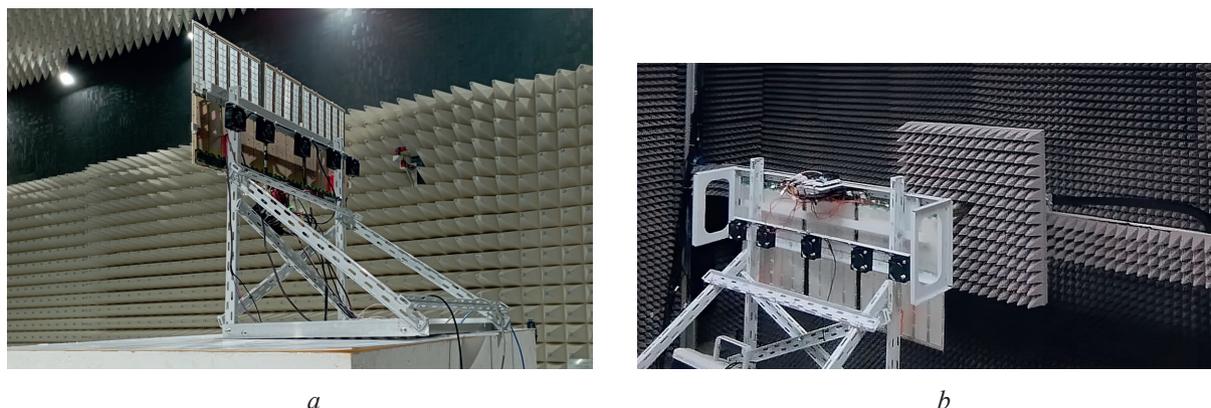


Рис. 3. Измерение диаграммы направленности антенны: *a* – в безэховой камере;
b – с помощью сканера ближнего поля

Fig. 3. Measuring the antenna radiation pattern: *a* – in an anechoic chamber; *b* – using a near-field scanner

Ввиду того, что определение ДН в СБП сводилось к двум этапам (измерение ближнего поля на апертуре антенны и последующая постобработка), по результатам измеренного поля можно судить о работоспособности отдельных фрагментов антенной решетки, что невозможно при измерении в ДЗ с использованием поворотного стола.

На рис. 4 приведены результаты измерения ближнего поля исследуемой антенны. Затраченное время для представленной области сканирования для трех частот составило около 30 мин, шаг сканирования – 10 мм. Картина распределения ближнего поля, приведенная на рис. 4, позволяет быстро оценить работоспособность отдельных частей решетки. В рассматриваемом случае (как на амплитудном, так и на фазовом распределении поля) отчетливо видны участки неэквидистантной решетки, свободные от излучающих элементов.

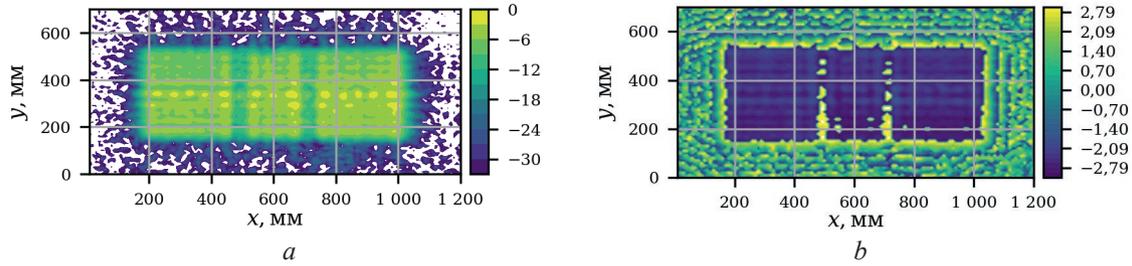


Рис. 4. Результат измерения ближнего поля антенны: *a* – амплитуда; *b* – фаза
Fig. 4. Antenna near field measurement result: *a* – amplitude; *b* – phase

Процесс пересчета измеренного ближнего поля в дальнюю зону описан в [3, 4] формулами:

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy; \quad (2)$$

$$E_{\theta}(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} (S_x \cos \varphi + S_y \sin \varphi); \quad (3)$$

$$E_{\varphi}(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} \cos \theta (-S_x \sin \varphi + S_y \cos \varphi), \quad (4)$$

где $S_{x,y}(k_x, k_y)$ – спектр плоских волн (СПВ) в зависимости от проекций волновых векторов k_x, k_y ; $E_{x,y}$ – измеренные компоненты поля в БЗ; $E_{\theta}(r, \theta, \varphi)$, $E_{\varphi}(r, \theta, \varphi)$ – компоненты поля в сферической системе координат (СК) в ДЗ.

Процесс определения ДН в ДЗ по результатам измеренного ближнего поля вблизи апертуры антенны сводится к расчету СПВ (Plane wave spectrum) посредством двумерного преобразования Фурье (ДПФ), которым заменялось двойное интегрирование в (2). Перед операцией ДПФ для улучшения углового разрешения ДН использовался известный в цифровой обработке сигналов прием – исходная матрица коэффициентов ближнего поля $E_{x,y}$ дополнялась нулями на периферии апертуры.

Ввиду того, что зонд, с помощью которого измеряется ближнее поле, также имеет характеристики направленности, целесообразно предусмотреть математическую коррекцию спектра плоских волн исследуемой антенны [5, 6]. В расчетах применялся метод, описанный в [5], использующий СПВ зондовой антенны. Следует отметить, что для коррекции направленности зонда ближнее поле исследуемой антенны должно быть измерено при двух ортогональных положениях зонда:

$$A_x(k_x, k_y) = \frac{A_{mx}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x) - A_{my}(k_x, k_y)A_{py}(k_x, k_y)}{A_{py}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) + A_{px}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x)}; \quad (5)$$

$$A_y(k_x, k_y) = \frac{A_{mx}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) - A_{my}(k_x, k_y)A_{px}(k_x, k_y)}{A_{py}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) + A_{px}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x)}; \quad (6)$$

где $A_x(k_x, k_y)$, $A_y(k_x, k_y)$ – СПВ антенны с учетом коррекции зонда; $A_{px}(k_x, k_y)$, $A_{py}(k_x, k_y)$ – СПВ зонда; $A_{mx}(k_x, k_y)$, $A_{my}(k_x, k_y)$ – СПВ антенны по результатам измерений в БЗ.

Ввиду того, что открытый конец волновода представлял собой относительно простую структуру, его СПВ определялся исходя из ближнего поля вблизи апертуры волновода, полученного посредством электродинамического моделирования. Затем производился расчет СПВ в декартовой СК и пересчитывался в спектр плоских волн в сферической СК. На заключительном этапе по СПВ в сферической СК определялись компоненты поля E_{θ} , E_{φ} в ДЗ. Но поскольку в антенной технике чаще оперируют азимутально-угломестной СК, по результатам E_{θ} , E_{φ} находили компоненты E_{A_z} , E_{El} [7].

На рис. 5, 6 приведены результаты промежуточных этапов расчета ДН по показателям измеренного поля в БЗ исследуемой антенны. На рис. 5 изображен нормированный спектр плоских волн для преобладающей y -компоненты в пространстве волновых векторов k_x, k_y .

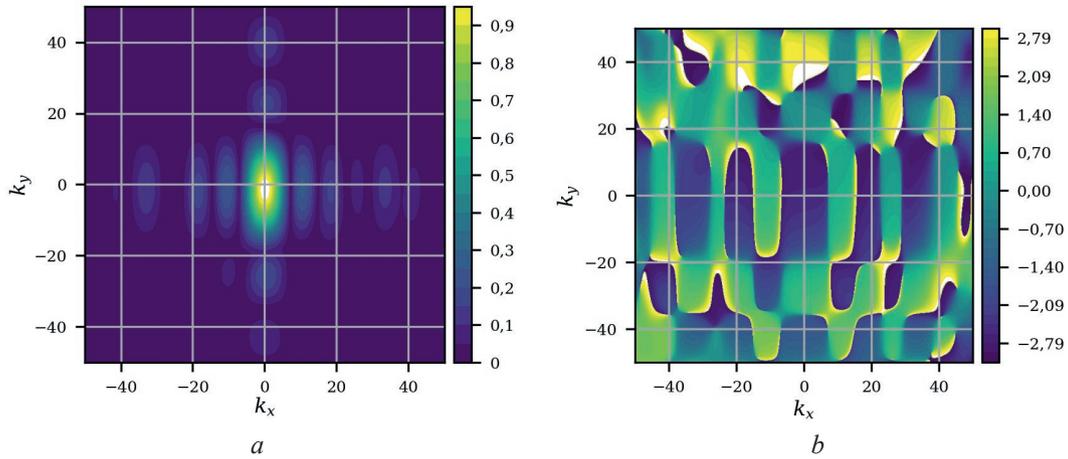


Рис. 5. Нормированный спектр плоских волн: *a* – амплитудный; *b* – фазовый
Fig. 5. Normalized spectrum of plane waves: *a* – amplitude; *b* – phase

На рис. 6 изображены компоненты поля E_θ , E_φ двумерной ДН (uv -проекции) в дальней зоне в сферической СК, на рис. 7 – компоненты поля E_{Az} , E_{El} двумерной ДН в дальней зоне в азимутально-угломестной СК.

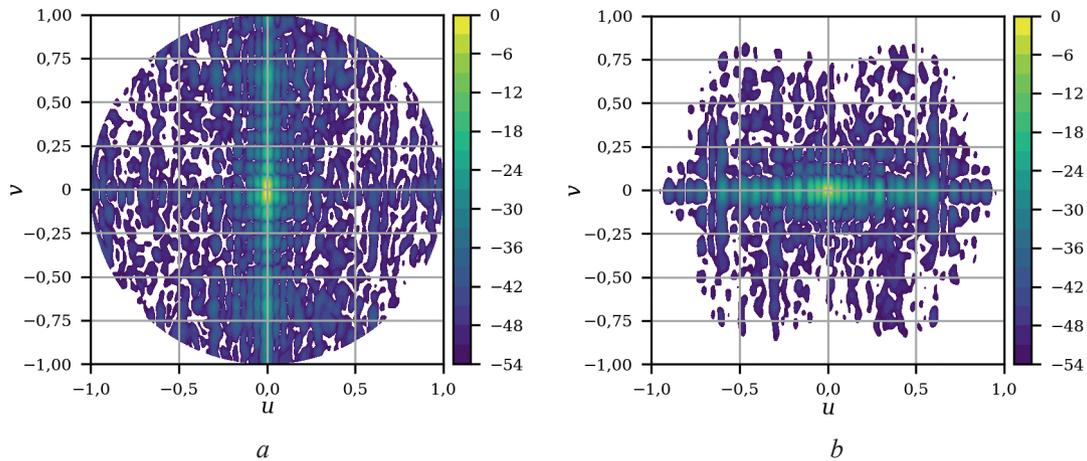


Рис. 6. Компоненты поля диаграммы направленности в дальней зоне в сферической системе координат:
a – $|E_\theta/E_{\max}|$, дБ; *b* – $|E_\varphi/E_{\max}|$, дБ

Fig. 6. Far-field radiation pattern components in spherical coordinates: *a* – $|E_\theta/E_{\max}|$, dB; *b* – $|E_\varphi/E_{\max}|$, dB

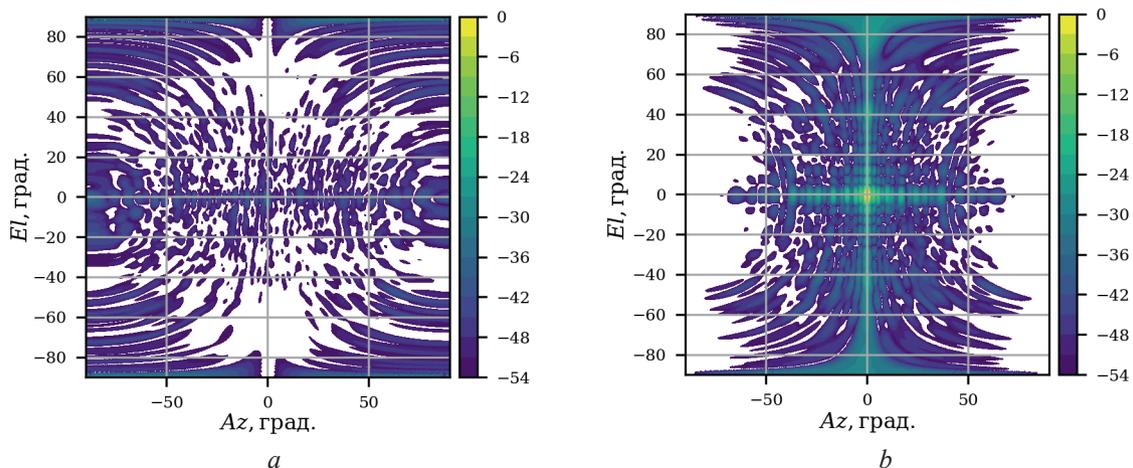


Рис. 7. Компоненты поля диаграммы направленности в дальней зоне в азимутально-угломестной системе координат: *a* – $|E_{Az}/E_{\max}|$, дБ; *b* – $|E_{El}/E_{\max}|$, дБ
Fig. 7. Far-field radiation pattern components in the azimuth-elevation coordinate system:
a – $|E_{Az}/E_{\max}|$, dB; *b* – $|E_{El}/E_{\max}|$, dB

На рис. 7 отчетливо видна разница между амплитудами двух компонент поля (горизонтальной и вертикальной), так как антенная решетка имеет вертикальную поляризацию.

На рис. 8 приведено сравнение сечений в плоскости главного лепестка ДН (основной у-компоненты поля) исследуемой решетки, полученное посредством измерения в БЭК на поворотном столе (дистанция 13 м) и при помощи сканера (с учетом коррекции антенны-зонда и без), а также посредством электродинамического моделирования методом конечных элементов (ФЕМ). Результаты представлены для у-компоненты ДН (основной, вертикальной). Крессовая компонента ДН довольно низкая (менее -35 дБ) и не отображена.

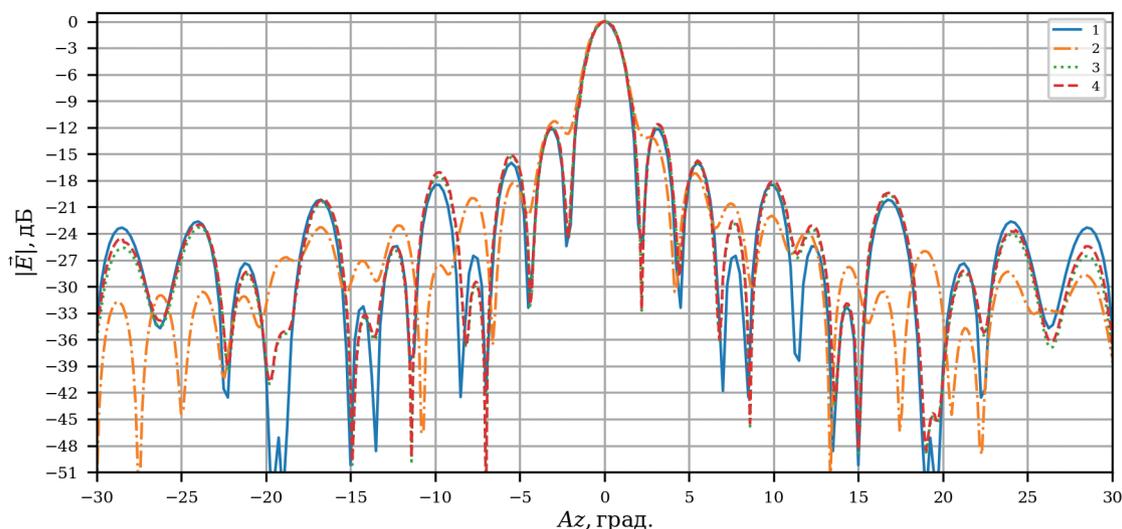


Рис. 8. Сравнение измерений диаграммы направленности: 1 – методом конечных элементов (ФЕМ); 2 – в безэховой камере на поворотном столе (дистанция 13 м);

3, 4 – при помощи сканера с учетом коррекции антенны-зонда и без соответственно

Fig. 8. Comparison of radiation pattern measurements: 1 – using the finite element method (FEM);

2 – in an anechoic chamber on a turntable (distance 13 m);

3, 4 – using scanner with and without correction of the probe antenna, respectively

Согласно рис. 8, полученные кривые свидетельствуют о существенной ошибке в измерении боковых лепестков антенных решеток больших электрических размеров классическим методом на ограниченной дистанции. В то же время в довольно широком диапазоне углов не наблюдается заметно ощутимая разница с и без использования коррекции направленности зондовой антенны.

Заключение

1. Результаты измерений наглядно демонстрируют преимущество использования сканера ближнего поля для измерения диаграммы направленности антенн с размерами апертур порядка десятка и более длин волн по сравнению с классическим методом измерения в дальней зоне при наличии ограничений на расстояние между поворотным столом с измеряемой антенной и расположением измерительной антенны.

2. Отмечено, что для остронаправленных антенн влияние направленности зонда в диапазоне углов от нормали к плоскости апертуры $\pm 30^\circ$ несущественно. Явным преимуществом также является возможность получить 3D-диаграмму направленности и оценить излучение вне главных плоскостей сечения.

Список литературы

1. Joy, E. V. Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements / E. V. Joy. USA: Georgia Institute of Technology, 1970.
2. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук, О. А. Юрцев. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2006. Ч. 3. Антенны.
3. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах [и др.]. Л.: Наука, 1985.

4. Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design* / C. A. Balanis. NJ: Wiley-Interscience, 2005.
5. Joy, E. B. *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements* / E. B. Joy, D. Paris // *Engineering, Physics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1972. Vol. 20, Iss. 3. P. 253–261.
6. Masters, G. F. *Probe-Correction Coefficients Derived from Near-Field Measurements* / G. F. Masters. USA: AMTA, 1991.
7. Gregson, S. *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements* / S. Gregson, J. McCormick, C. Parini. London: IET, 2007.

Поступила 05.01.2026

Принята в печать 26.01.2026

References

1. Joy E. B. (1970) *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements*. USA, Georgia Institute of Technology.
2. Gololobov D. V., Kirilchuk V. B., Yurtsev O. A. (2006) *Radio Wave Propagation and Antenna-Feeder Devices*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Part. 3. Antennas (in Russian).
3. Bahrah L. D., Kremenetsky S. D., Kurochkin A. P., Usin V. A., Shifrin Y. S. (1985) *Methods for Measuring the Parameters of Radiating Systems in the Near Field*. Leningrad, Nauka Publ. (in Russian).
4. Balanis C. A. (2005) *Antenna Theory: Analysis and Design*. NJ, Wiley-Interscience.
5. Joy E. B., Paris D. (1972) *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements. Engineering, Physics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 20 (3), 253–261.
6. Masters G. F. (1991) *Probe-Correction Coefficients Derived from Near-Field Measurements*. USA, AMTA Publ.
7. Gregson S., McCormick J., Parini C. (2007) *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements*. London, IET.

Received: 5 January 2026

Accepted: 26 January 2026

Вклад авторов

Стануль А. А. Представил общую концепцию и разработал алгоритм управления сканером.
Симоненко В. А. Разработал программу управления сканером и измерительным оборудованием.
Юбко А. П. Выполнил алгоритмизацию расчета характеристик антенны по данным ближнего поля.

Authors' contribution

Stanul A. Presented the general concept and developed a scanner control algorithm.
Simanenka V. Developed a program to control the scanner and measuring equipment.
Joubko A. Performed algorithmization of antenna characteristics' calculation, based on near-field data.

Сведения об авторах

Стануль А. А., нач. отдела разработки и проектирования, ООО «СКБ «Радиотехпроект» (Радиотехпроект)

Симоненко В. А., магистр техн. наук, инж. отдела разработки и проектирования, Радиотехпроект

Юбко А. П., магистр техн. наук, инж. отдела разработки и проектирования, Радиотехпроект

Information about the authors

Stanul A., Head of Development and Design Department, LLC “SDC “Radiotechproject” (Radiotechproject)

Simanenka V., M. Sci. (Tech.), Engineer of the Development and Design Department, Radiotechproject

Joubko A., M. Sci. (Tech.), Engineer of the Development and Design Department, Radiotechproject

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
Минск, ул. Огинского, 6
ООО «СКБ «Радиотехпроект»
Тел.: +375 17 215-04-24
E-mail: A.Stanul@rtp.by
Стануль Александр Александрович

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Oginskogo St., 6
LLC “SDC “Radiotechproject”
Tel.: +375 17 215-04-24
E-mail: A.Stanul@rtp.by
Stanul Aliaksandr