



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-75-83>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.383:621.396

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

А. В. ШАРАМЕТ^{1,2}, А. Н. ЛЫСЫЙ¹

¹ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 31.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Измерение параметров диаграммы направленности антенны является актуальной задачей при разработке и эксплуатации радиотехнических систем. Ее решение возможно различными методами антенных измерений. При этом в зависимости от зоны излучения антенны выделяются две основные группы способов измерений: методы прямых измерений в дальней зоне и методы реконструктивных измерений в ближней зоне. Методы антенных измерений в дальней зоне, позволяющие получить прямые результаты, являются наиболее отработанными и простыми, поскольку в случае дальней зоны угловое распределение поля независимо от расстояния характеризуется диаграммой направленности. Методы ближней зоны основаны на измерении амплитудно-фазового распределения ортогональных компонент электромагнитного поля в ближней зоне с последующим пересчетом параметров и восстановлением пространственной диаграммы направленности исследуемой антенны. Сравнительный анализ основных групп методов антенных измерений показал, что на современном этапе их развития ввиду ряда преимуществ наибольшее распространение получили методы измерения в ближней зоне с последующей реконструкцией диаграммы направленности исследуемой антенны в дальней зоне.

Ключевые слова: антенные измерения, диаграмма направленности, зона излучения, радиолокационная станция, источник радиоизлучения, зона обнаружения, облёт, сканирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шарамет, А. В. Анализ методов измерений параметров диаграммы направленности антенных систем / А. В. Шарамет, А. Н. Лысый // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 75–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-75-83>.

ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING PARAMETERS OF THE RADIATION PATTERN OF ANTENNA SYSTEMS

ANDREI V. SHARAMET^{1,2}, ANDREI N. LYSY¹

¹JSC “KB Radar” – Managing Director Holding Company “Radar Systems” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.05.2023

Abstract. Measuring the parameters of the antenna pattern is an urgent task in the development and operation of radio engineering systems. This problem can be solved by various methods of antenna measurements. In this case, depending on the radiation zone of the antenna, two main groups of measurement methods are distinguished: methods of direct measurements in the far-field and methods of reconstructive measurements in the near-field.

Methods of antenna measurements in the far-field, which allow obtaining direct results, are the most developed and simple, since in the case of the far-field, the angular distribution of the field, regardless of distance, is characterized by a radiation pattern. Methods of the near-field are based on measuring the amplitude-phase distribution of the orthogonal components of the electromagnetic field in the near zone with subsequent recalculation of the parameters and restoration of the spatial radiation pattern of the antenna under study. The comparative analysis of the main groups of antenna measurement methods shows that at the present stage of their development, due to a number of advantages, measurement methods in the near-field with subsequent reconstruction of the radiation pattern of the studied antenna in the far-field are most widely used.

Keywords: antenna measurements, radiation pattern, radiation zone, radar station, radio emission source, detection zone, flying around, scanning.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Sharamet A. V., Lysy A. N. (2023) Analysis of Methods for Measuring Parameters of the Radiation Pattern of Antenna Systems. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 75–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-75-83> (in Russian).

Введение

Тактико-технические характеристики современных радиолокационных станций (РЛС) предъявляют повышенные требования к вопросам технической организации и метрологической корректности измерений их параметров. Особую актуальность в этом плане приобретают антенные измерения, по результатам которых появляется возможность не только получить характеристики антенных систем, но и оценить пространственные показатели возможностей РЛС [1]. Кроме того, антенные измерения позволяют более точно откалибровать математические модели и сформировать наборы исходных данных для моделирования при проведении полунатурных испытаний [2]. Ввиду этого, теория и техника антенных измерений – одни из наиболее интенсивно развивающихся направлений, среди которых – методы антенных измерений в дальней зоне (ДЗ) и ближней зоне (БЗ). К основным антенным измерениям в ДЗ относятся: метод вышки, радиоастрономический метод и методы облёта. В БЗ измерения реализуются методами сканирования по различным поверхностям вблизи исследуемой антенны с последующей реконструкцией диаграммы направленности (ДН) в дальней зоне.

Антенные измерения в дальней зоне методом вышки

Первыми, получившими наибольшее распространение, способами прямых измерений параметров ДН явились измерения в ДЗ. Самый широко применяемый на практике – метод вышки. Его особенность – наличие прямой видимости между исследуемой и измерительной антеннами, расстояние которой определяется в соответствии с выражением

$$R_m \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (1)$$

При этом во всем секторе измерений максимальная высота препятствий не должна превышать допустимую $h_{\text{доп}}$ и удовлетворять условию $h_{\text{доп}} \leq \lambda/16\sin\theta$, где θ – угол падения волны. Выполнение указанных условий обеспечит точность измерений не менее 2 % [1, 3].

Проведенный анализ [1, 3–5] показывает, что метод вышки позволяет проводить оценку параметров ДН в широком диапазоне электрических размеров антенн и может применяться как на открытых участках местности (полигонах), так и в безэховых камерах. В то же время в условиях полигонов наличие переотражений от земной поверхности приводит к дополнительным ошибкам при измерении параметров ДН. Исследования методом вышки [5] измерительной антенны П6-23М на частоте 3,5 ГГц показали, что такие ошибки могут достигать 3 дБ и более.

Следует отметить, что переотражения от земной поверхности в VHS-диапазоне оказывают существенное влияние. Это вызвано особенностью двупутного распространения радиоволн (наличие прямой и переотраженной волн). Данное влияние может быть учтено только отдельной оценкой E - и H -составляющих волны с последующим пересчетом. Кроме того, метод вышки дает значительные различия в зависимости от характера подстилающей поверхности и климатичес-

ких условий. Эти различия вызывают необходимость учета типа и состояния подстилающей поверхности, характеризующейся удельной электрической проводимостью σ и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{rov} . Средние значения σ и ϵ_{rov} для разных типов поверхности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Усредненные параметры подстилающей поверхности
Table 1. Average parameters of the underlying surface

Тип поверхности / Surface type	Значение σ , См/м, при f , ГГц / Value σ , S/m, at f , GHz		Значение ϵ_{rov} при f , ГГц / Value ϵ_{rov} at f , GHz	
	0,3	3,0	0,3	3,0
Вода морская ($T = 23\text{ }^\circ\text{C}$)	3,5	3,5	75	70
Вода пресная ($T = 23\text{ }^\circ\text{C}$)	0,15	1,5	80	75
Лёд ($T = -10\text{ }^\circ\text{C}$)	0,05	0,035	4,5	4
Снег ($T = -10\text{ }^\circ\text{C}$)	10^{-6}	10^{-5}	1,2	1,2
Почва сухая ($T = 23\text{ }^\circ\text{C}$)	10^{-4}	0,035	4,3	4,3
Почва влажная ($T = 23\text{ }^\circ\text{C}$)	0,16	0,75	27	27
Почва мерзлая ($T = -10\text{ }^\circ\text{C}$)	0,05	–	4,5	–
Лес ($T = 22\text{ }^\circ\text{C}$)	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	1	1,2

Анализ табл. 1 показывает, что в течение года (при различной температуре) значения σ и ϵ_{rov} для одного и того же участка местности существенно меняются. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости модуля коэффициента отражения в VHS-диапазоне длин волн для различных состояний водной поверхности при малых углах падения.

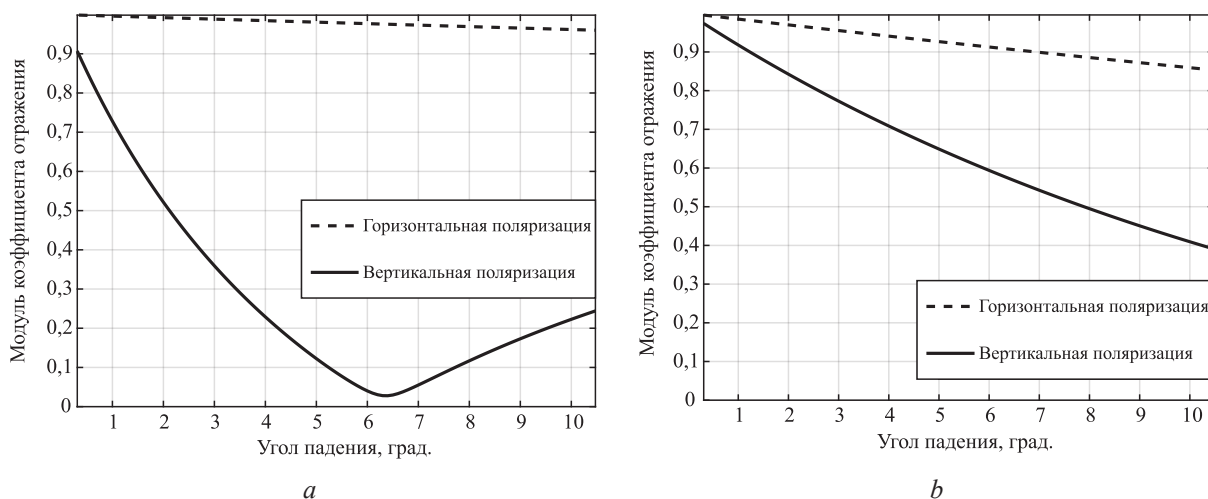


Рис. 1. Значения модуля комплексного коэффициента отражения на частоте 0,3 ГГц:
a – для $\sigma = 0,15$ См/м, $\epsilon_{rov} = 80$, $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$; *b* – для $\sigma = 0,05$ См/м, $\epsilon_{rov} = 4,5$, $T = -10\text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 1. Values of the modulus of the complex reflection coefficient at a frequency of 0.3 GHz:
a – for $\sigma = 0.15$ S/m, $\epsilon_{rov} = 80$, $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$; *b* – for $\sigma = 0.05$ S/m, $\epsilon_{rov} = 4.5$, $T = -10\text{ }^\circ\text{C}$

Согласно рис. 1, в условиях положительных температур для волны с вертикальной поляризацией модуль коэффициента отражения изменяется от 0 до 1 (рис. 1, *a*), в то время как при отрицательных температурах (рис. 1, *b*) наблюдается слабая зависимость (от 0,4 до 1,0). Это обуславливает необходимость оценки параметров ДН для различных условий эксплуатации РЛС, что существенно усложняет реализацию метода вышки.

При использовании вместо открытых полигонов безэховых камер влияние переотражений существенно минимизируется. Однако в данном случае метод вышки применим только для антенн с небольшим значением R_m . Для снятия такого ограничения используют измерения на коротких интервалах времени (временных окнах длительностью от 0,1 пс до 1,0 мкс), что позволяет реализовать метод вышки в помещениях, не оборудованных радиопоглощающими материалами.

При этом расстояние от линии визирования «исследуемая антенна – зонд» до ближайшего предмета должно удовлетворять условию¹:

$$D_{ref} \geq 0,5 \left(\sqrt{(c\tau_{min})^2 + 2c\tau_{min}R_m} \right),$$

где c – скорость света; τ_{min} – минимальный размер временного окна.

Для исследуемой антенны, имеющей, согласно (1), границу дальней зоны 20,0 м, при использовании временного окна 1,0 нс расстояние до ближайшего предмета составит 1,7 м, что позволяет применять метод вышки в лабораторных и промышленных помещениях.

Радиоастрономический метод измерений по радиоизлучению космических объектов

Радиоастрономический метод предполагает использование внеземных (космических) объектов в качестве источников сигнала [6]. Особенностью метода является то, что он применим для антенн, ширина ДН которых в 10–20 раз больше угловых размеров источника радиоизлучения. Проведенный анализ [6, 7] показывает, что для РЛС VHS-диапазона, имеющих ДН шириной более 4°, эффективным источником радиоизлучения является Солнце, угловой размер которого составляет 32'. При этом в данном диапазоне спектральная плотность потока мощности радиоизлучения спокойного Солнца (S_c) составляет $(0,5–1,0) \cdot 10^{-21}$ Вт/(м²·Гц) [Дж/м²]. Спектральная плотность потока мощности радиоизлучения Солнца на входе приемного устройства РЛС определяется согласно выражению

$$N_c = S_c \lambda^2 / 4\pi GL_{np}, \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления антенны; L_{np} – коэффициент потерь сигнала в тракте.

Спектральная плотность мощности собственных шумов приемного устройства²

$$N_0 = kT_0 (K_{ш} + \gamma_a - 1), \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $K_{ш}$ – коэффициент шума приемного устройства; $T_0 = 290$ К – шумовая температура; $\gamma_a = T_0 / T_a$ – относительная шумовая температура антенны; T_a – абсолютная температура антенны.

Проведенные в (2) и (3) расчеты для РЛС VHS-диапазона представлены в табл. 2. При вычислениях принято $S_c = 0,75 \cdot 10^{-21}$ Вт/(м²·Гц).

Таблица 2. Расчетные данные для радиолокационных станций VHS-диапазона

Table 2. Calculation data for VHS-band radar stations

Радиолокационная станция / Radar station	λ , м / λ , m	G	$K_{ш}$	L_{np} , дБ / L_{np} , dB	N_0 , Дж / N_0 , J	N_c , Дж / N_c , J	N_c / N_0
5Н84А	1,67	28,5	2,5	3	$0,99 \cdot 10^{-20}$	$6,2 \cdot 10^{-20}$	6,2
1РЛ131	1,87	22,5	2,3	3	$0,92 \cdot 10^{-20}$	$3,9 \cdot 10^{-20}$	4,2
5Р08РБ-Д	1,71	21,0	2,0	2	$0,81 \cdot 10^{-20}$	$3,1 \cdot 10^{-20}$	3,8
5Р08РБ (VHS-канал)	1,54	20,0	2,0	2	$0,81 \cdot 10^{-20}$	$2,3 \cdot 10^{-20}$	2,8

Анализ табл. 2 показывает, что у РЛС VHS-диапазона спектральная плотность мощности радиоизлучения Солнца на входе приемного устройства более чем в 2,8 раза превышает спектральную плотность мощности собственных шумов приемников. Это позволяет использовать радиоастрономический метод для измерения параметров ДН таких РЛС.

В процессе измерений определяется превышение аддитивной смеси шумов приемника и радиоизлучения Солнца над собственными шумами приемника. Зная угловое положение Солнца, определяется ДН антенны в угломестной плоскости.

Достоинства радиоастрономического метода – гарантированное выполнение условия ДЗ (1) и возможность измерений под большими углами места (Солнце поднимается на небосводе до 80°). В то же время ввиду ограниченности динамического диапазона приемников РЛС макси-

¹ TRIM – сверхширокополосные измерительные системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://trimcom.ru>.

² Сколник, М. И. Справочник по радиолокации. В 2 кн. / М. И. Сколник; пер. с англ. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015.

мальный диапазон измерения ДН по мощности составляет (-20) дБ, что недостаточно для большинства измерений.

Помимо Солнца и других естественных источников радиоизлучения, при реализации радиоастрономического метода широко используются искусственные объекты, в частности, искусственные спутники Земли (ИСЗ) специального назначения. Применительно к антенным измерениям находят применение эталонные сферические ИСЗ, у которых в силу симметрии эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) постоянна вне зависимости от ракурса [2]. Основные характеристики таких ИСЗ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики эталонных сферических искусственных спутников Земли
Table 3. Characteristics of reference spherical artificial Earth satellites

Характеристика / Characteristic	Значение характеристики при диаметре искусственного спутника Земли, м / Characteristic value for the diameter of artificial Earth satellite, m					
	0,25	0,355	0,406	0,508	1,12*	1,12*
ЭПР в S -диапазоне, м ²	0,06	0,10	0,13	0,23	1,00	1,00
Масса, кг	0,9	9,8	1,6	2,5	34	40
Период обращения, мин	99,2	106,6	103,37	103,41	102,8	128,6
Высота в перигее, км	395	1056	910,2	911,7	774	2730
Высота в апогее, км	725	1076,5	921,3	930,6	915	2730

* Искусственные спутники Земли одинакового размера, но изготовленные из металла различной плотности и запущенные на разные орбиты.

Данные табл. 3 показывают, что значение ЭПР у эталонных сферических ИСЗ не превышает 1 м^2 , поэтому обнаружение и сопровождение таких объектов на больших дальностях и при меняющемся ракурсе может быть обеспечено только при отсутствии изрезанности в диаграмме обратного излучения. Для достижения этого при создании ИСЗ должна быть обеспечена очень высокая точность изготовления их поверхности. Так, согласно проведенным исследованиям [1], для РЛС S -диапазона, работающей на частоте $3,0 \text{ ГГц}$, высота неровностей поверхности не должна превышать $0,1 \text{ мм}$. Но даже при соблюдении этого требования изменения ЭПР, вызванные неровностями, могут быть существенными и достигать $0,1-1,5 \text{ дБ}$. Эти изменения за время нахождения ИСЗ на орбите будут увеличиваться вследствие ухудшающегося состояния его поверхности. По этой причине, а также с учетом высокой стоимости производства и доставки на орбиту ИСЗ, возможности радиоастрономического метода ограничены. В целом применительно к РЛС обнаружения радиоастрономический метод рассматривается только как вспомогательный.

Облётный метод измерений

К методу, обеспечивающему прямые измерения, относится облётный. Проведенный анализ [1, 2, 8] показывает, что основными его реализациями являются облёт и лётная проверка.

Облёт предполагает измерения в ДЗ с помощью подвижной измерительной антенны, перемещающейся в пространстве на борту пилотируемого или беспилотного летательного аппарата (ЛА) по круговым траекториям (рис. 2, а). При этом производятся измерения на горизонтальных сечениях верхней полусферы заданного радиуса R с постоянным шагом по углу места.

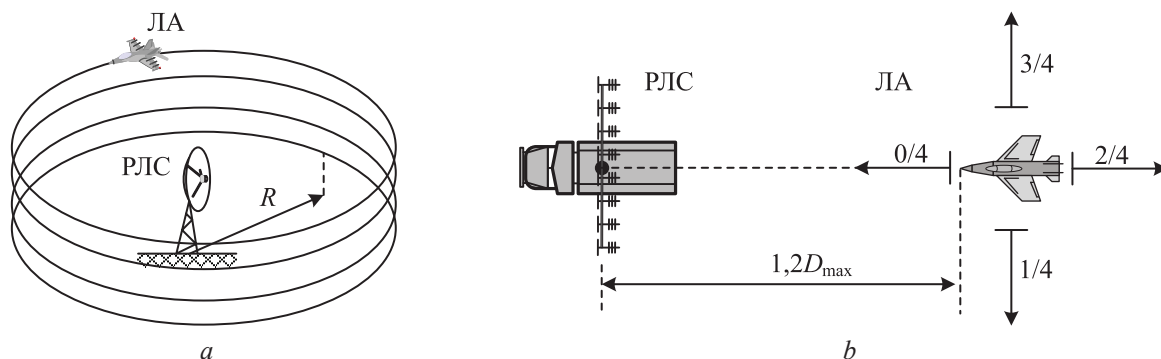


Рис. 2. Траектории полета летательного аппарата: a – при облёте; b – при лётной проверке
Fig. 2. Aircraft flight trajectories: a – during flight around; b – during flight check

В зависимости от аппаратуры, размещенной на борту ЛА, возможно проводить измерения ДН исследуемой антенны, работающей как на передачу, так и на прием. Существенный недостаток облётного метода связан с компромиссом между объемом проводимых измерений, который ограничивается возможностями ЛА, располагаемым временем и требуемой точностью. Для точного построения ДН только в области главного лепестка по уровню (-3) дБ необходимо осуществить не менее десяти измерений в соответствующей плоскости [3], что делает облётный метод малоприменимым для оценки пространственной ДН во всем диапазоне углов. Еще один недостаток данного метода – сильное влияние корпуса ЛА на ДН транспортируемой им измерительной антенны; изменения в ДН могут достигать 10 дБ (даже при использовании малогабаритного беспилотного ЛА). В то же время применение направленной бортовой (встроенной) антенны позволяет устранить этот недостаток и обеспечить измерения ДН с ошибкой, не превышающей 1 дБ.

Лётная проверка используется для уточнения или подтверждения характеристик, полученных ранее другими методами [8]. При этом основные задачи лётной проверки – уточнение зон обнаружения (ЗО) РЛС на предельно малых (200 м над рельефом местности и ниже) и малых (200–1000 м) высотах и выявление областей радиотеней (непросматриваемых участков зоны обнаружения) для данных высот полета ЛА.

При выполнении лётной проверки задается не круговая, а радиальная (с ракурсом $0/4$) траектория полета ЛА. Максимальное удаление ЛА от РЛС должно в 1,2 раза превышать дальнюю границу D_{\max} расчетной ЗО РЛС для данной высоты полета (рис. 2, *b*).

Ограничение облётного метода связано с тем, что у высокопотенциальных РЛС максимальные высоты обнаружения превышают практический потолок полета ЛА. В этом случае оценка верхней границы ЗО РЛС и радиуса «мертвой воронки» может производиться способом понижения потенциала станции. При этом по измеренным в результате лётной проверки дальностям и высотам строится «сжатая» ЗО РЛС в вертикальной плоскости. Реальная ЗО определяется методом пересчета. Для пересчета внешней границы «сжатой» ЗО РЛС относительно реальной используется соотношение

$$D_{\text{действ}}(\varepsilon) = D_{\text{обл}}(\varepsilon) \frac{1}{K_{\text{сж}}} = D_{\text{обл}}(\varepsilon) \cdot 10^{-\frac{N}{40}},$$

где $D_{\text{действ}}(\varepsilon)$, $D_{\text{обл}}(\varepsilon)$ – внешняя граница зоны обнаружения РЛС при номинальном и пониженном потенциале станции; N – величина затухания или степень понижения потенциала, дБ.

Второе существенное ограничение облётного метода связано с необходимостью пересчета измеренных данных относительно различных значений ЭПР. Как показывает анализ [1], разница между расчетными и полученными в результате лётной проверки данными может достигать 15 %, что еще больше ограничивает возможности облётного метода.

Методы антенных измерений в ближней зоне

К методам антенных измерений в БЗ относятся так называемые реконструктивные методы (NF2FF Transformation) [4, 9]. Данные, полученные в БЗ, являются результатом измерения амплитуды и фазы поля антенны при последовательном перемещении слабонаправленной измерительной антенны в точки, расположенные на некоторой поверхности вблизи исследуемой антенны. В зависимости от типа этой поверхности в практике антенных измерений находят применение планарное, цилиндрическое и сферическое сканирование.

Планарное сканирование. Первые измерительные установки использовали планарное сканирование ввиду простоты реализации механической части и управления позиционированием. При планарном сканировании измерительная антенна (зонд) перемещается по плоскости сканирования, расположенной перед исследуемой антенной на расстоянии $d = (1-10)\lambda$ (рис. 3, *a*). Это расстояние совместно с требуемым углом восстановления ДН θ и раскрытием антенны D задает размер области сканирования L_S ($L_S \geq D + 2d \tan(\theta)$) в соответствующей плоскости. Величина угла θ определяет степень достоверности измерений. Достоверными для большинства антенн можно считать измерения, проводимые в диапазоне углов $50^\circ-60^\circ$ [4, 10]. При реализации планарного сканирования перемещение зонда происходит дискретно, например, по столбцово-строчной траектории (рис. 3, *b*) с шагом перемещений Δx и Δy вдоль осей x и y соответственно. От величины шага перемещения зависит точность восстановления ДН и время сканирования.

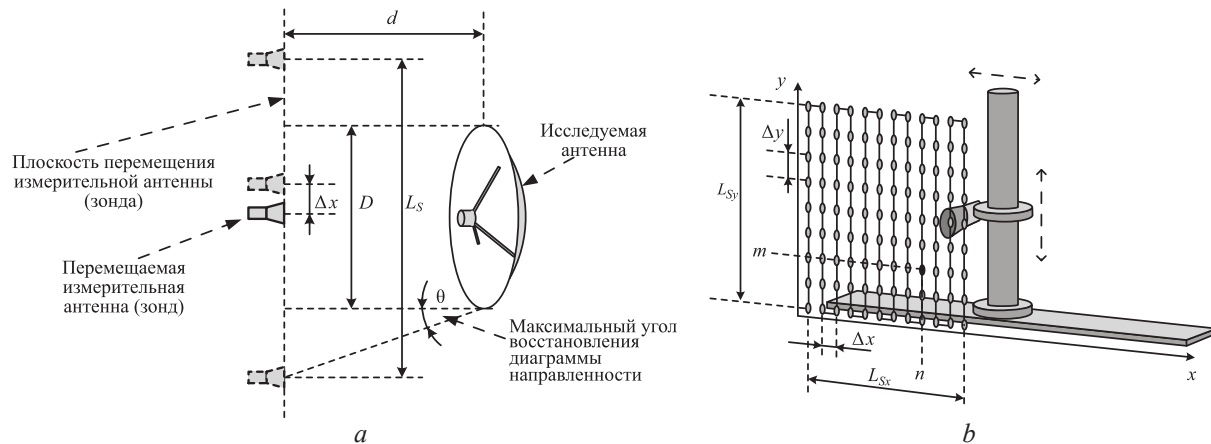


Рис. 3. Реализация планарного сканирования
Fig. 3. Planar scan implementation

Согласно [4, 10], величина шага выбирается меньшей или равной $0,5\lambda$. Уменьшение шага до $0,2\lambda$ улучшает точность восстановления ДН. В то же время в [4] экспериментально установлено, что выбор значения шага сканирования 2λ не приводит к ухудшению реконструкции ДН в области основного и первых боковых лепестков. При этом существенно уменьшается время сканирования (более чем в четыре раза по сравнению с традиционным значением шага $0,5\lambda$). Некоторые источники [9, 11] предлагают при выборе шага сканирования исходить из условия $\Delta x = \Delta y \leq \lambda/2\sin\theta$.

Цилиндрическое сканирование. В отличие от планарного, при цилиндрическом сканировании исследуемая антенна вращается вокруг вертикальной оси z системы координат xuz с шагом $\Delta\varphi$. Зонд, находясь на расстоянии d , перемещается на различную высоту относительно плоскости xu с шагом Δz . Значения d , $\Delta\varphi$ и Δz определяются соотношениями $d = (1-10)\lambda$, $\Delta\varphi = \lambda/2d$ и $\Delta z = \lambda/2$ соответственно [10]. Поскольку в результате перемещений описывается цилиндрическая поверхность с радиусом, такое сканирование позволяет измерить ДН антенны в азимутальной плоскости во всем диапазоне углов. Недостаток цилиндрического сканирования связан с конечным расстоянием перемещения зонда вдоль оси z , что не позволяет получить точные данные в угломестной плоскости, особенно в области дальних боковых лепестков.

Сферическое сканирование. В этом случае исследуемая антенна вращается вокруг оси z с шагом $\Delta\varphi$, зонд перемещается в плоскости, перпендикулярной xu , по круговой траектории радиусом d с шагом $\Delta\theta$. Также возможна реализация с неподвижной исследуемой антенной [3, 11], когда перемещается только зонд, описывая сферу с шагом перемещения $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$. Значения d и $\Delta\varphi$ выбираются аналогично случаю цилиндрического сканирования, а шаги перемещения, как правило, одинаковы ($\Delta\theta = \Delta\varphi$). Существенным преимуществом сферического сканирования в сравнении с планарным и цилиндрическим является получение трехмерной ДН антенны во всем диапазоне углов.

По результатам сравнительного анализа [4, 9, 10, 12] можно сделать вывод, что планарное сканирование целесообразно использовать в случае остронаправленных антенн с большим коэффициентом усиления, а также для антенных решеток. При этом планарные установки отличаются несложной кинематикой перемещения зонда. Для секторных и остронаправленных антенн с малым уровнем боковых лепестков оптимальным является цилиндрическое сканирование. Сферическое сканирование, как наиболее точное, применяется в случае слабонаправленных и изотропных антенн.

Заключение

1. Проведенный анализ методов измерений параметров диаграммы направленности антенных систем показывает, что основной тенденцией их развития является постепенное вытеснение из мировой практики измерений в дальней зоне реконструктивными измерениями в ближней зоне. В первую очередь это связано с тем, что они не требуют больших полигонов, существенных

материальных, организационных и временных затрат. Методы измерений в ближней зоне обладают универсальностью и применимы для ненаправленных, остронаправленных и секторных антенн. Кроме того, данные методы свободны от ограничений по частотному диапазону радиолокационных станций.

2. Следует отметить, что методам измерения в ближней зоне присущи два существенных недостатка, обусловленных ошибками измерения фазового распределения на поверхности сканирования и увеличением времени сканирования из-за дискретного перемещения зонда. Основные направления развития методов ближней зоны, связанные с устранением этих недостатков, следующие:

– использование амплитудных итерационных алгоритмов реконструкции диаграммы направленности, позволяющих восстановить диаграммы направленности по результатам измерений только амплитудного распределения поля на нескольких поверхностях. При этом априорная информация об исследуемой антенне задает начальное фазовое приближение, а требуемая точность определяет длительность итерационного процесса и, соответственно, вычислительные затраты;

– использование в качестве зонда линейной антенны, длина которой L_{pr} выбирается из условия $L_{pr} \geq L_S$. Такая антенна может быть реализована в виде линейной эквидистантной антенной решетки с равномерным амплитудным и линейным фазовым распределением на ее раскрытии. Применение линейного зонда позволит не только сократить время сканирования, но и существенно упростить вычисления, перейдя от двумерных преобразований к одномерным, поскольку интегрирование (суммирование) по одной из переменных выполняется непосредственно зондом.

Список литературы

1. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев [и др.]. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
2. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А. И. Леонов. М.: Радио и связь, 1990.
3. Фрадин, А. З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А. З. Фрадин, Е. В. Рыжков. М.: Связьиздат, 1972. 316 с.
4. Hacker, P. S. Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns / P. S. Hacker, H. E. Schrank // IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine. 1982. Vol. AP-30, No 5. P. 956–966.
5. Лысый, А. Н. Методика предварительной оценки искажений при проведении натуральных испытаний антенной системы / А. Н. Лысый, А. В. Шарамет // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2022. Т. 77, № 4. С. 78–86.
6. Троицкий, В. С. Радиоастрономические методы исследования антенн / В. С. Троицкий // Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1, № 5. 601 с.
7. Железняков, В. В. Радиоизлучение Солнца и планет / В. В. Железняков. М.: Наука, 1964. 558 с.
8. Авиационные правила организации и проведения летной проверки средств радиолокации, средств связи и радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации Республики Беларусь: пост. Мин-ва обороны Респ. Беларусь от 14.04.2017 № 7.
9. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements (Electromagnetic Waves) / C. Parini [et al.]. London: The Institution of Engineering & Technology, 2015.
10. Antenna Measurement Theory. Introduction to Antenna Measurement [Electronic Resource]. Mode of access: http://keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf.
11. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements: IEEE 1720–2012. NY, 2012.
12. Использование плоского сканера ближнего поля для измерения крупноапертурных антенн / А. А. Калинин [и др.] // Новости науки и технологий. 2016. № 3. С. 24–29.

References

1. Zakhar'yev L. N., Lemanskiy A. A., Turchin V. I., Tseytlin N. M., Shcheglov K. S. (1985) *Methods for Measuring the Characteristics of Microwave Antennas*. Moscow, Radio and Communication Publ. 368 (in Russian).
2. Leonov A. I., Leonov S. A., Nagulinko F. V., Omel'chuk V. P., Stepanov S. P. (1990) *Radar Testing (Performance Assessment)*. Moscow, Radio and Communication Publ. (in Russian).
3. Fradin A. Z., Ryzgkov E. V. (1972) *Measuring the Parameters of Antenna-Feeder Devices*. Moscow, Svyazizdat. 316 (in Russian).
4. Hacker P. S., Schrank H. E. (1982) Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns. *IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine*. AP-30 (5), 956–966.

5. Lysy A. N., Sharamet A. V. (2022) Methodology for Preliminary Assessment of Distortions During Full-Scale Tests of an Antenna System. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 77 (4), 78–86 (in Russian).
6. Troitskiy V. S. (1956) Radio Astronomical Methods for Studying Antennas. *Radio Engineering and Electronics*. 1 (5), 601 (in Russian).
7. Zheleznyakov V. V. (1964) *Radio Emission from the Sun and Planets*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
8. Aviation Rules for Organizing and Conducting Flight Inspections of Radar Equipment, Communications Equipment and Radio Technical Support for State Aviation Flights of the Republic of Belarus. *Resolution of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus, Apr. 14, 2017 No 7* (in Russian).
9. Parini C., Gregson St., McCormick J., Janse van Resburg D. (2015) *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements (Electromagnetic Waves)*. London, The Institution of Engineering & Technology.
10. *Antenna Measurement Theory. Introduction to Antenna Measurement*. Available: http://keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf.
11. IEEE 1720–2012. *IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements*. NY, 2012.
12. Kalinin A., Parhomenko A., Solonovich D., Krupski P. (2016) Using a Flat-Panel Near-Field Scanner to Measure Large-Aperture Antennas. *News of Science and Technology*. (3), 24–29 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Шарамет А. В., канд. техн. наук, доц., докторант каф. электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, начальник тематического отдела ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Лысый А. Н., ст. науч. сотр. ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Партизанский, 64а
ОАО «КБ Радар»
Тел.: +375 29 633-68-84
E-mail: a.lysyj@kbradar.by
Лысый Андрей Николаевич

Information about the authors

Sharamet A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Doctoral Student at the Electronic Computing Facilities Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Head of the Department of JSC “KB Radar” – Managing Director Holding Company “Radar Systems”

Lysy A. N., Senior Researcher at JSC “KB Radar” – Managing Director Holding Company “Radar Systems”

Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,
Minsk, Partizansky Ave., 64a.
JSC “KB Radar”
Tel.: +375 29 633-68-84
E-mail: a.lysyj@kbradar.by
Lysy Andrei Nikolaevich