

УДК 621.396.67

Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиоголографических измерительных комплексов

Гринчук А.П., Будаи А.Г., Громыко А.В.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 25.01.2018

Принята к печати 11.04.2018

Практическое применение радиоголографического метода измерения характеристик антенн, в особенности при проведении приемочных испытаний систем, требует адекватной оценки погрешностей восстановления дальнезонных характеристик. Указанные погрешности являются суперпозицией слагаемых от различных источников, имеющих различную природу, различные временные характеристики и различные степени влияния на конечный результат. Целью данной работы являлась разработка практической методики определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности) антенны, причем предлагаемая методика основана только на обработке экспериментальных результатов, полученных на данном измерительном комплексе.

Разработана и экспериментально подтверждена практическая методика определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления ее дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности) на основе корреляционного и спектрального анализа. Основным преимуществом разработанной методики по сравнению с использованием математического моделирования является то, что оценка точности восстановления диаграмм направленности проводится по результатам обработки экспериментальных данных, полученных на конкретном измерительном комплексе, и не накладывает априори никаких предварительных требований на статистические параметры погрешностей. Разработанная процедура оценки влияния случайных погрешностей может использоваться для разработки методики метрологической аттестации измерительных комплексов как средств измерения.

Ключевые слова: диаграмма направленности, ближняя зона, погрешности измерения, корреляционный анализ, измерительный комплекс.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Адрес для переписки:

Гринчук А.П.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: anatbudai@gmail.com

Address for correspondence:

Grinchuk A.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: anatbudai@gmail.com

Для цитирования:

Гринчук А.П., Будаи А.Г., Громыко А.В.
Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиоголографических измерительных комплексов. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 173–181.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

For citation:

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.
[Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 173–181 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.

*A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus*

Received 25.01.2018

Accepted for publication 11.04.2018

Abstract

Practical application of the radio-holographic method for measuring the characteristics of antennas, especially when conducting acceptance testing of systems, requires an adequate assessment of the errors in the recovery of long-range characteristics. These errors appear to be a superposition composed of various sources, having different nature, different time characteristics and different degrees of influence on the final result. The purpose of this work was the development of a practical technique for determining the influence of random errors in measuring the amplitude-phase distribution of the field of the antenna required for the accuracy of restoring long-range characteristics (primarily the antenna pattern) of the antenna, the proposed technique being based only on processing the experimental results obtained with this measuring complex.

A practical method for determining the influence of random errors in measuring the amplitude-phase distribution of the field of the antenna under study on the accuracy of restoring its long-range characteristics (primarily the directional pattern) on the basis of correlation and spectral analysis has been developed and experimentally confirmed. The main advantage of the developed method in comparison with the use of mathematical modeling is that the estimation of the accuracy of the reconstruction of the directivity diagrams is based on the results of processing experimental data obtained on a specific measuring complex and does not a priori impose any preliminary requirements on the statistical parameters of errors. The developed procedure for estimating the influence of random errors can be used to develop a methodology for metrological certification of measuring systems as measuring instruments.

Keywords: directional pattern, near zone, measurement errors, correlation analysis, measuring complex.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Адрес для переписки:

Гринчук А.П.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: anatbudai@gmail.com

Address for correspondence:

Grinchuk A.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: anatbudai@gmail.com

Для цитирования:

Гринчук А.П., Будай А.Г., Громько А.В.
Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиолографических измерительных комплексов.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 173–181.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

For citation:

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.
[Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 173–181 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Введение

В последнее время в связи с новыми разработками в области крупногабаритных фазированных антенных решеток все более востребованным становится радиологический метод измерения характеристик антенных систем в силу своей универсальности и информативности [1–4]. Одним из серьезных факторов, сдерживающих его распространение, наряду с достаточно высокой стоимостью программно-аппаратных измерительных комплексов, является отсутствие на настоящий момент серьезного метрологического обеспечения таких измерений, позволяющего оценить погрешности восстановления характеристик антенн. Предлагаемые в большинстве публикаций оценки адекватности ближнезонных измерений путем сравнения с результатами прямых измерений в дальней зоне [4–6] или результатами компьютерного моделирования с помощью специализированных пакетов программ [7] не могут рассматриваться как достаточно достоверные по целому ряду причин.

Анализ погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля излучения исследуемой антенны показывает, что источников погрешностей несколько, механизмы их возникновения имеют различную природу, различные временные характеристики и различные степени влияния на конечный результат.

Априори будем считать, что каждая составляющая погрешностей имеет систематическую и случайную компоненты. Выявление систематических погрешностей, определение их влияния на погрешности измерения АФР поля измеряемой антенны и точность восстанавливаемых дальнезонных характеристик является предметом отдельного исследования. В данной работе рассматривается влияние случайных компонентов погрешностей. Эти составляющие погрешностей являются преобладающими при проведении сравнительных измерений характеристик антенных систем, для которых основную роль играют постоянство и повторяемость результатов во времени.

Целью данной работы явилась разработка практической методики определения влияния случайных погрешностей измерения АФР поля исследуемой антенны на точность восстановления дальнезонных характеристик, в первую очередь диаграммы направленности (ДН) антенны, причем предлагаемая методика основана только

на обработке экспериментальных результатов, полученных на данном измерительном комплексе.

Методика

В качестве методологической основы предлагаемой методики используются подходы статистической теории антенн [8]. Представим АФР поля, измеренного на некоторой поверхности в ближней зоне антенны, в виде:

$$U = U_0 + \Delta U, \quad (1)$$

где U – измеренное АФР поля; U_0 – истинное АФР поля; ΔU – случайные погрешности измерения АФР поля.

Тогда восстановленная диаграмма направленности F описывается выражением:

$$F = F_0 + \Delta F, \quad (2)$$

где F_0 – истинная ДН; ΔF – погрешности восстановления ДН.

Используя свойство аддитивности интегральных преобразований из ближней зоны в дальнюю, будем считать, что ΔF (2) есть интегральное преобразование ΔU (1), которое представляет собой угловое распределение ошибок восстановления ДН исследуемой антенны.

Рассмотрим возможности оценки метрологических характеристик радиологических измерительных комплексов по результатам корреляционного и спектрального анализов экспериментально полученных величин ΔU .

Влияние случайных погрешностей измерительно-регистрирующей аппаратуры

В режиме неподвижного зонда регистрируем массив данных (амплитуда A и фаза Φ или квадратурные компоненты поля $A \sin \Phi$ и $A \cos \Phi$) размером $N \times M$ (N и M – число отсчетов по каждой из координат). При этом объем массива и темп измерений выбираются соответствующими реальным измерениям. Далее рассчитываются средние значения и среднеквадратичное отклонение (СКО) измеренных величин, коэффициенты и радиусы автокорреляции, а также коэффициенты их взаимосвязи¹.

¹ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Указанная процедура проводится в нескольких точках динамического диапазона исследуемого комплекса. Полученные результаты позволят определить реальный динамический диапазон измерительной аппаратуры, а корреляционный анализ – наличие или отсутствие дрейфовых компонент погрешностей.

Для определения погрешностей восстановления ДН формируем массив средних значений $V_{\text{ср}} W_{\text{ср}}$ размером $N \times M$ и в соответствии с выбранными интегральными преобразованиями рассчитываем поле в дальней зоне от сформированного массива (считая его истинной ДН F_0) и от реально измеренного массива (считая его ДН с погрешностями F). Проведя вычитание $F_0 - F$, получим пространственное распределение и относительную величину погрешностей восстановления ΔF (2). При желании, комбинируя массивы средних значений и отклонений от среднего для компонент V и W , возможно отдельно проанализировать влияние, например, амплитудных и фазовых погрешностей.

Комплексный анализ влияния случайных погрешностей

Проведение полного статистического анализа характеристик измерительного комплекса в целом, т.е. с учетом погрешностей сканирующего устройства, является весьма трудоемкой задачей, так как требует регистрации и обработки значительного числа двумерных массивов. Для практики предлагается провести анализ результатов, полученных при измерениях P раз одного сечения АФР (например, одной строки и одного столбца для измерений по плоскости) в средней части АФР исследуемой антенны. В результате получаем массивы данных размером $N \times P$ и $M \times P$, т.е. P реализаций одномерных массивов размерностью N и M . Статистическая и корреляционная обработка проводится в соответствии с алгоритмом, приведенном выше, но параметры определяются не по всему массиву, а лишь по P реализациям каждого отсчета.

Финальной процедурой оценки погрешности восстановления ДН антенн с использованием данного конкретного радиолокационного комплекса является определение границ разброса восстанавливаемых ДН. Для этого рассчитывается P одномерных реализаций ДН, и для каждого отсчета (углового значения ДН) выбираются средние значения, формирующие среднюю

(истинную) ДН, а также максимальные и минимальные значения. По результатам таких измерений строятся кривые, определяющие границы разброса восстанавливаемых ДН для нескольких типов наиболее часто встречаемых АФР полей – синфазных равноамплитудных, со спадающим амплитудным распределением, формирующих разностный канал для моноимпульсных режимов и др.

Практическая реализация методики

Результаты практической реализации предлагаемой методики представим на примере исследовательского радиолокационного аппаратно-программного комплекса для измерения характеристик антенн, функционирующего в лаборатории прикладной электродинамики НИИ ПФП БГУ. Измерительный комплекс реализует планарные измерения АФР полей излучения антенн в X диапазоне длин волн. Комплекс включает сканирующее устройство, обеспечивающее сканирование по площади до 128×128 отсчетов и волноводный квадратурный измерительный приемник. Все измерения проводились в установленном режиме, который наступает через 1 ч после включения СВЧ генератора и измерительной аппаратуры, что установлено экспериментально.

Некоторые результаты статистического и корреляционного анализа реально измеренных массивов данных приведены в таблице, на рисунке 1, а спектрального анализа – на рисунке 2.

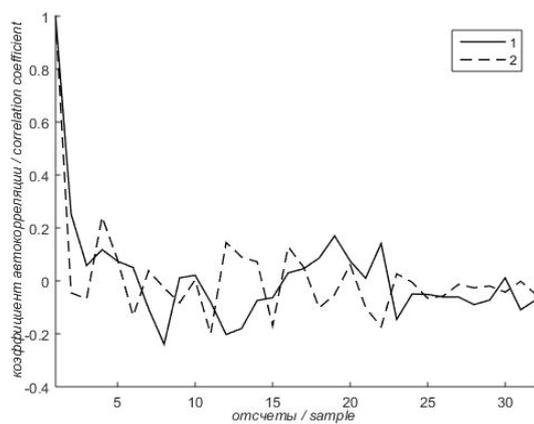
Таблица/Table

Результаты статистического и корреляционного анализа измеренных данных

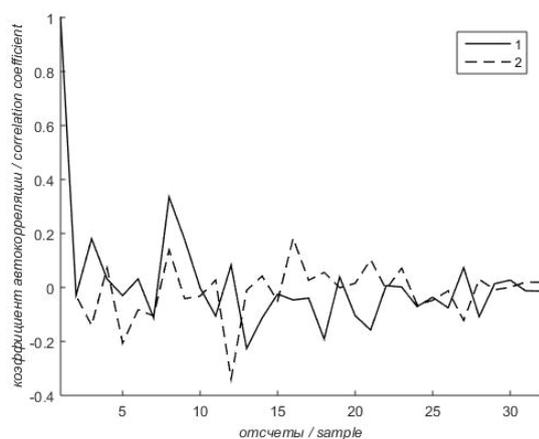
Results of statistical and correlation analysis of measured data

№	A(дБ) A(dB)	СКОА ₁ normalized standard deviation	СКОА ₂ norma- lized standard deviation	Радиусы корреляции Correlation radius			
				По строкам row		По столб- цам column	
				ρA_1	ρA_2	ρA_1	ρA_2
1	– 8,5	0,0099	0,003	0,22	0,29	0,21	0,21
2	– 14,3	0,0464	0,002	0,11	0,21	0,23	0,14
3	– 25,2	0,0088	0,018	0,24	0,14	0,18	0,15
4	– 39,5	0,0280	0,078	0,22	0,11	0,13	0,12
5	– 45,0	0,0680	0,108	0,12	0,11	0,11	0,11

В таблице приведены результаты анализа в пяти точках динамического диапазона по амплитуде: A – среднее значение амплитуды сигнала, A_1 и A_2 – среднее значение амплитуды соответствующей квадратуры. Значения амплитуды A в децибелах получены при нормировании величины A к максимальному значению 4095. Относительные значения среднеквадратичного отклонения получены путем нормирования рассчитанного СКО к величине средней амплитуды данной квадратуры и удобны для сравнения. Указанные величины совместно с видом коэффициентов автокорреляции (рисунок 1) и значениями радиусов корреляции говорят о том, что погрешности носят случайный характер и дрейфовая составляющая отсутствует.



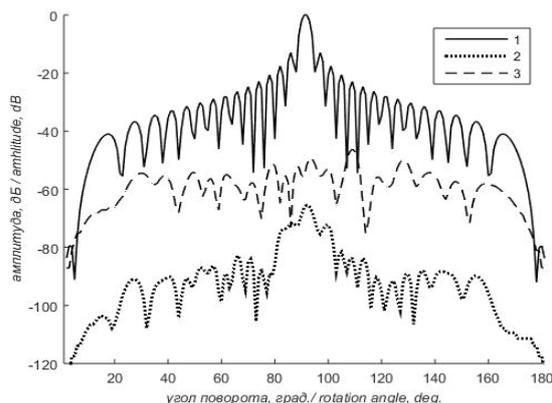
a



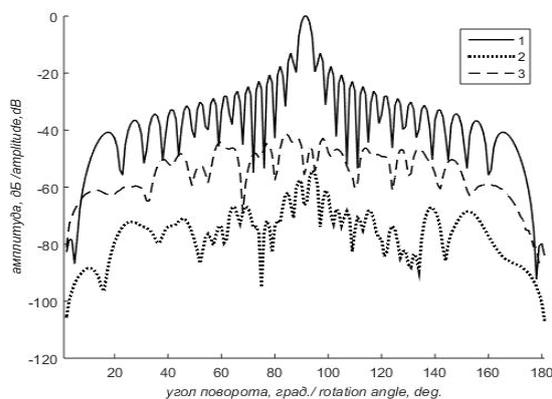
b

Рисунок 1 – Коэффициенты автокорреляции для первой (1) и второй (2) квадратур по строкам (*a*) и столбцам (*b*)

Figure 1 – The autocorrelation coefficients for the first (1) and second (2) quadratures in rows (*a*) and columns (*b*)



a



b

Рисунок 2 – Оценка влияния случайных аппаратурных погрешностей на восстанавливаемую диаграмму направленности: 1 – сечение диаграммы направленности с погрешностями; 2, 3 – разности диаграмм направленности; *a* – по строке, *b* – по столбцу

Figure 2 – Evaluation of the effect of random hardware errors on the reconstructed directional pattern. 1 – cross-section of the directional pattern with errors; 2, 3 – the difference in the directional patterns; *a* – on a line; *b* – on a column

Коэффициенты взаимной корреляции подтверждают высокую степень взаимосвязи двух квадратур (коэффициенты взаимосвязи достигают значений 0,80–0,86), поскольку измерительный канал обеих квадратур один и тот же, а измерения разнесены во времени.

На рисунке 2 представлены главные сечения ДН по строке и столбцу, рассчитанных от измеренного массива данных с погрешностями размером 32×32 отсчета. В приведенном масштабе диаграммы от реально измеренного массива и массива средних значений практически совпадают. Кривые 2, 3 – разности диаграмм, причем кривая 2 относится к варианту, когда взят массив с высокой амплитудой (массив № 1 таблицы 1), а кривая 3 – к массиву № 5 таблицы 1 соответственно. Каждая разность ДН нормирована к максимуму своей рассчитанной ДН. Очевидно, что разности

диаграмм, определенные выше как спектры случайных погрешностей измерения АФР полей, образуют почти постоянный фон, имеющий слабую зависимость от угла поворота (наблюдения).

Из полученных результатов следует, что случайные погрешности измерительной аппаратуры в установившемся режиме вносят малые погрешности в восстанавливаемые ДН. Для рассматриваемого комплекса все указанные погрешности лежат ниже уровня – 45 дБ для самого неблагоприятного случая. Учитывая слабую угловую зависимость этих погрешностей, можно считать, что их значения определяют реальный динамический диапазон восстанавливаемых ДН. Сравнение кривых 2 и 3 позволяет определять (выбирать) реальные значения амплитуды измеряемого сигнала, позволяющего минимизировать значения погрешностей восстановления ДН. Как показывает практика, с учетом возможных флуктуаций это значение амплитуды измеряемого сигнала необходимо выбирать на 3–5 дБ ниже абсолютного максимума для измерительного канала.

Анализ влияния случайных погрешностей измерительного комплекса в целом (измерительно-регистрирующей аппаратуры и сканирующего устройства) проводился с использованием нескольких типов антенн: линейки печатных вибраторных излучателей (16 излучателей через $\lambda/2$), формирующих практически синфазное равноамплитудное поле, щелевой антенной решетки, работающей в моноимпульсном режиме, и др. Для каждого типа антенн проводились измерения массивов по строкам и столбцам размерностью $P \times N$ и $P \times M$, где N и M – количество отсчетов по строкам и столбцам соответственно; P – количество измерений одной строки или одного столбца. Величины N , M варьировались от 32 до 128 отсчетов, а P – от 16 до 64.

Ниже приведены некоторые примеры полученных результатов.

На рисунке 3 приведен вид среднего значения одной из квадратур АФР поля линейки печатных вибраторных излучателей и нормированного СКО этой квадратуры, а на рисунке 4 – вид коэффициентов автокорреляции двух квадратур, радиусы корреляции которых составляют 0,20 и 0,21 соответственно. Результаты получены при обработке массивов из 16 измерений строк, содержащих 32 отсчета АФР поля. Амплитуда квадратуры нормирована к максимальному значению 4095. Уровень излучаемой мощности и коэффициент передачи измерительного канала выбраны близко

к оптимальному. Аналогичные результаты получены и для других типов антенн и видов АФР полей.

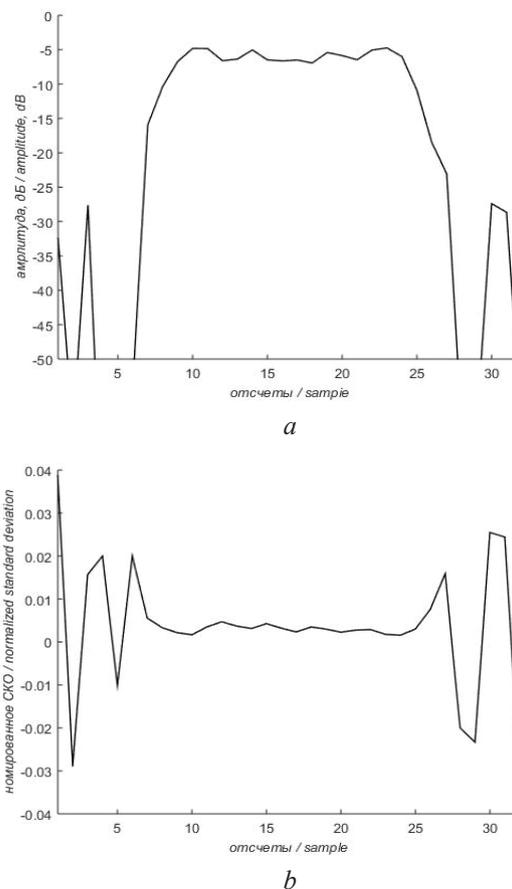


Рисунок 3 – Вид среднего значения одной из квадратур амплитудно-фазового распределения поля линейки печатных вибраторных излучателей (а) и нормированного среднеквадратичного отклонения этой квадратуры (б)

Figure 3 – Type of the mean value of one of the quadratures of the amplitude-phase distribution of the field of the line of printed vibrator emitters (a) and the standard mean-square deviation of this quadrature (b)

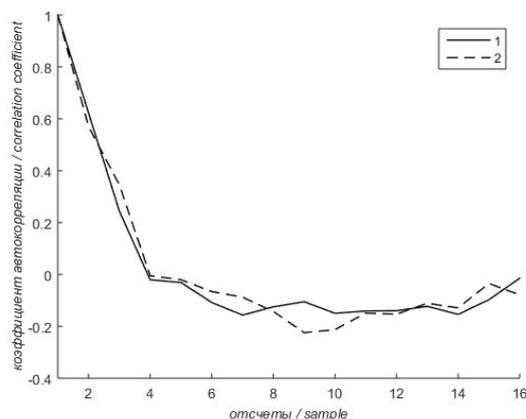


Рисунок 4 – Коэффициенты автокорреляции для первой (1) и второй (2) квадратуры

Figure 4 – Autocorrelation coefficients for the first (1) and second (2) quadratures

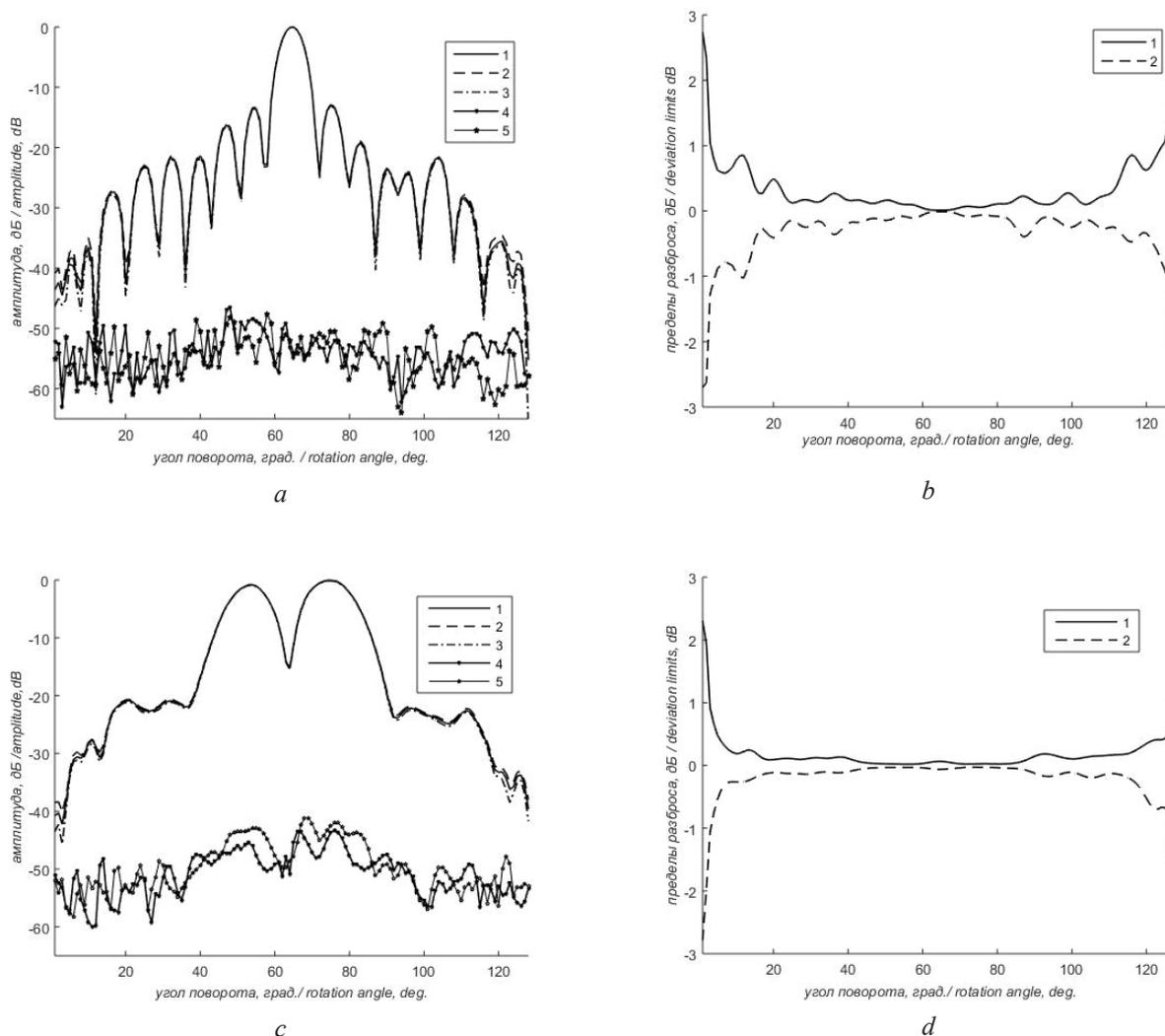


Рисунок 5 – Сечения диаграммы направленности линейки печатных вибраторных излучателей (*a*) и щелевой антенной решетки (разностный канал) (*c*): 1 – средние диаграммы направленности; 2 – максимальные и 3 – минимальные значения диаграммы направленности в каждом углу; 4, 5 – значения максимального и минимального отклонения от среднего, нормированные к максимуму диаграммы направленности; *b*, *d* – пределы разброса диаграмм направленности для тех же антенн соответственно: 1 – граница максимальных значений; 2 – граница минимальных значений

Figure 5 – Cross-sections of the directional pattern of the line of printed vibrator emitters (*a*) and the slot antenna array (difference channel) (*c*): 1 – average directional pattern; 2 – maximum and 3 – minimum values of directional patterns in each angle; 4, 5 – the values of the maximum and minimum deviations from the mean, normalized to the maximum of the directional pattern; *b*, *d* – the scatter patterns of the directional pattern for the same antennas respectively: 1 – the limit of the maximum values; 2 – the limit of the minimum values

На рисунке 5 приведены сечения ДН двух типов антенн и их границ разброса, рассчитанных по результатам обработки экспериментальных данных.

Полученные экспериментальные результаты показали, что:

- случайные погрешности измерения АФР поля для измерительного комплекса в целом имеют большие величины по сравнению с погрешностями только измерительной аппаратуры,

что очевидно. Главное, они не изменяют характер погрешностей – радиусы корреляции имеют тот же порядок. Это значит, что предложенные алгоритмы статистической обработки применимы для оценки погрешностей измерительных комплексов в целом;

- границы разбросов максимумов и минимумов восстановленных ДН, нормированные к максимуму средней ДН (рисунок 5*a*, *b* кривые 4, 5), позволяют реально оценить достижимый

динамический диапазон. Величина амплитуды квадратур для щелевой антенны выбрана ниже оптимальной, и реальный динамический диапазон, определяемый положением границ разбросов по отношению к максимуму ДН, на 10–12 дБ ниже, чем для аналогичных результатов на рисунке 5а;

– величина границ разброса зависит и от амплитуды восстанавливаемой ДН, и от углового положения анализируемой точки. Таким образом, зависимость границ разброса, приведенная на рисунке 5б, d является обобщенной характеристикой, так как определяет зависимость и от углов, и от амплитуды ДН, и может рассматриваться как наиболее объективная оценка погрешностей восстановления ДН для данной конкретной антенны, вызванных влиянием случайных погрешностей измерения АФР поля.

Заключение

Разработана практическая методика определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления ее дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности).

Экспериментально подтверждена возможность использования корреляционного анализа погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля для оценки и контроля точности восстановления диаграммы направленности.

Спектральный анализ погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения полей исследуемой антенны обеспечивает определение реального динамического диапазона и границ разброса восстанавливаемых диаграмм направленности для данного измерительного комплекса.

Основным преимуществом разработанной методики по сравнению с использованием математического моделирования является то, что оценка точности восстановления диаграммы направленности проводится по результатам обработки экспериментальных данных, полученных на конкретном измерительном комплексе, и не накладывает априори никаких предварительных требований на статистические параметры погрешностей.

Разработанная процедура оценки влияния случайных погрешностей может использоваться для разработки методики метрологической аттестации измерительных комплексов как средств измерения.

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Электроника и фотоника 2.2.02» «Разработка и создание компактного полигона для измерения амплитудно-фазовых распределений и анализа характеристик излучения приемо-передающих модулей в сантиметровом диапазоне волн».

The work was carried out within the framework of the assignment of the GPII «Electronics and Photonics 2.2.02» «Development and creation of a compact polygon for measuring amplitude-phase distributions and analyzing the radiation characteristics of transceiver modules in a centimeter wave band».

Список использованных источников

1. Parini, C. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements / C. Parini, S. Gregson, J. McCormik, D. Janse van Rensburg // The Institution of Engineering & Technology. – London, 2015. – 784 p.

2. Gregson, S. Principles of planar – near – field antenna measurements / S. Gregson, J. McCormik, C. Parini // Electromagnetic waves series. Vol.53. The Institution of Engineering & Technology. – London, 2007. – P. 95–103.

3. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений / А.П. Курочкин // Антенны. – 2009. – № 7. – С. 39–45.

4. Виноградов, А.Д. Методика антенных измерений, их современное применение и автоматизация / А.Д. Виноградов // Антенны. – 2010. – № 5. – С. 15–21.

5. Васендин, С.В. Исследование антенн и характеристик рассеяния радиолокационных объектов по планарным измерениям в ближней зоне / С.В. Васендин, А.В. Кирпанев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 2. – С. 63–68.

6. Орехов, Ю.И. Автоматизированный комплекс для измерения амплитудно-фазовых распределений диэлектрических излучателей в ближней зоне / Ю.И. Орехов [и др.] // Антенны. – 2010. – № 7. – С. 38–43.

7. Малай, И.М. Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны / И.М. Малай, М.С. Шкуркин // Антенны. – 2014. – № 12. – С. 50–55.

8. Гайдышев, И.В. Анализ и обработка данных. Специальный справочник / И.В. Гайдышев // СПб.: Питер, 2001. – 750 с.

References

1. Parini C., Gregson S., McCormik J., Janse van Rensburg D. Theory and Practice of Modern Antenna

Range Measurements; The Institution of Engineering & Technology. London, 2015, 784 p.

2. Gregson S., McCormik J., Parini C. Principles of planar – near – field antenna measurements. *Electromagnetic waves series*, vol. 53, The Institution of Engineering & Technology, London, 2007, pp. 95–103.

3. Kurochkin A. [Theory and technology of antenna measurement]. *Antenny [Antennas]*, 2009, no. 7, pp. 39–45 (in Russian).

4. Vinogradov A. [Methods of antenna measurements, their modern application and automatization.] *Antenny [Antennas]*, 2010, no. 5, pp. 15–21 (in Russian).

5. Vasendin S., Kirpanev A. [Investigation of antennas and characteristics of radar objects dispersion

as per planar measurements in the near zone]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki [Achievements of Modern Radioelectronics]*, 2013, no. 2, pp. 63–68 (in Russian).

6. Orehov J., Makarychev N., Gainulina E., Tihonov A., Kravtsov D. [Automated complex for amplitude-phase distributions measuring of dielectric radiators in the near zone]. *Antenny [Antennas]*, 2010, no. 7, pp. 38–43 (in Russian).

7. Malai I., Shkurkin M. [Application of statistical test method for evaluation of metrological characteristics of antenna automated measuring systems in the near zone]. *Antenny [Antennas]*, 2014, no. 12, pp. 50–55 (in Russian).

8. Gaidyshev I. Analysis and data treatment, Saint-Petersburg, Piter Publ., 2001, 750 p.