

А. В. Мазин¹, П. В. Николаев²

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал,
² АО «НПП «КПЗ «Тайфун»

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ

В данной работе рассмотрены методы измерений, реализуемые в условиях компактных полигонов. Основным достоинством антенных измерений в условиях компактных полигонов является их проведение в закрытом помещении – безэховой камере. Авторами приведен анализ информации об измерительной системе антенного устройства. Определены наиболее эффективные составляющие измерения параметров антенных устройств, которые достаточно просто могут быть реализованы в измерительной системе и показывают высокие результаты. Предложенный метод исследован в применении к минимизации основных погрешностей, имеющих место в измерительной системе антенного устройства, выполнен анализ его эффективности для исследуемых погрешностей. Предложен обобщенный способ анализа информации об измерительной системе, приведены его экспериментальные исследования. Использование предложенного метода позволяет повысить точность измерения параметров антенных устройств.

Ключевые слова: антенные измерения, погрешность, измерительная система, диаграмма направленности, боковые лепестки, компактный полигон

Введение

В области антенных измерений достаточно высоки требования к точности и динамическому диапазону, поэтому появляется необходимость применения специальных методов и способов, которые позволили бы повысить эффективность измерений параметров антенных устройств (АУ). Для достижения этой цели предлагается учитывать свойства полигона, используемые методы и алгоритмы обработки информации, неравномерность электромагнитного поля и проверочные данные, получаемые в процессе испытаний АУ.

Существующие способы измерений параметров АУ носят частный характер, позволяя оценить погрешности только некоторых параметров АУ либо оценивать в качестве источника погрешностей лишь отдельные свойства измерительной системы. Так, в [1] с помощью комплексного подхода продемонстрирована возможность качественного повышения точности измерений параметров антенн. Однако для дальнейшего повышения характеристик экономически целесообразно использовать методы оперативного комплексного учета параметров измерительной системы.

Условно все методы разделяют на два типа: без учета амплитудно-фазовых распределений (АФР) и с использованием данных об АФР [2]. Большинство из них недостаточно универсальны, поскольку

позволяют определить погрешности измерения только определенных параметров АУ, не восстанавливая саму диаграмму направленности (ДН), либо учитывают лишь отдельные параметры компактного полигона и измерительной системы. Однако методы, использующие АФР облучающего поля, более универсальны, поскольку его неравномерность является следствием многих других источников погрешностей и тем самым объединяет их в себе.

От стен компактных полигонов могут возникать отражения, влияющие на точность измерения. Чтобы решить эту проблему, используется техника поиска погрешности измерения уровней боковых лепестков (УБЛ) ДН [3].

Руководствуясь вышеуказанным методом, испытания проводились на ко-поляризованных каналах на частотах 1,5–9,0 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации электромагнитного излучения. Эталонная антенна была установлена на поворотном опорном устройстве. Определялись электрическая ось измеряемой антенны (ИА) с фиксацией ДН на азимутальной плоскости обзора и УБЛ. После перемещения ИА вдоль электрической оси на заданное расстояние устанавливались направление электрической оси при каждом последующем изменении и УБЛ ДН в азимутальной плоскости. Затем ИА возвращалась в исходное

положение относительно электрической оси и поворачивалась на 180° . Точность измерений УБЛ оценивалась по максимальной разнице между значениями уровней тех же лепестков ДН.

На следующем шаге снова определялись направление электрической оси и ДН антенны в азимутальной плоскости, а также фиксировались УБЛ при различных смещениях ИА относительно ее электрической оси. Изменение ширины бокового лепестка при перемещении антенны вдоль электрической оси позволяет определить амплитуду интерференционного сигнала в направлении, соответствующем угловому положению лепестка. При этом УБЛ не влияют на величину шума, которая лишь незначительно зависит от ширины ДН.

Точность измерения лепестков дальнего конца на основе предложенной оценки шума может быть выше, чем при измерении поля в рабочем диапазоне коллиматора. Заметим, что изменение амплитуды бокового лепестка зависит от сдвига и происходит с некоторым периодом, который определяется разницей пути между помехой и сигналом, поступающим от коллиматора. Ошибка в измерении усиления определяется методом прямого сравнения с результатами, полученными для антенны с известным усилением.

В настоящем исследовании проводилась стандартная калибровка с помощью эталонных антенн, поставляемых с измерительным комплексом. Например, в качестве опорной антенны с известным усилением использовалась рупорная антенна П6–23А. После нахождения электрической оси антенны усиление в направлении максимальной ДН определялось с помощью следующей эталонной антенны, например звуковой рупорно-параболической, которая работает в том же диапазоне частот, с целью калибровки измерительной системы компактного полигона. Измеренное значение усиления не должно превышать паспортную характеристику более чем на $\pm 0,5$ дБ.

Точность нахождения УБЛ и усиления с учетом полевых измерений в рабочей зоне определялась с помощью численного моделирования. Также при оценке точности измерения параметров антенны применяются косвенные результаты, учитывающие распределение поля в рабочей области. При этом неравномерность амплитуды и фазы поля в рабочей зоне – обобщающая характеристика.

Одним из основных параметров безэховой камеры, в которой установлен коллиматор, является безэховый коэффициент. При исследовании таких коэффициентов необходимо определять уровни паразитных сигналов в рабочей зоне независимо от направления их появления. Одновременное определение точности измерения боковых лепестков эталонной антенны и нахождения уровня шума

позволяют учесть все факторы, включая аппаратные, которые влияют на точность измерений ДН. При расчете точности измерения усиления учитывались как косвенные данные, полученные из распределения поля в рабочей области, так и прямое сравнение результатов для нескольких эталонных антенн.

Обработка информации об измерительной системе

Облучатель является одним из важных элементов зеркальных коллиматоров, широко используемых для измерения характеристик антенн. Точность измерения тем выше, чем более равномерным является АФР поля главной поляризационной компоненты в рабочей области коллиматора и чем меньше амплитуда поля на кромке рефлектора, определяющая уровень дифракционной составляющей поля в рабочей зоне. Малая неравномерность достигается при использовании облучателя с достаточно широкой ДН или облучателя со специальной формой главного лепестка ДН, близкой к столообразной, так как амплитуда дифракционной составляющей тем меньше, чем ниже относительный уровень ДН облучателя в направлении на кромку рефлектора [4].

В качестве облучателей зеркальных антенн наиболее часто используются рупорные, пирамидальные и конические излучатели, а также их модификации, к которым можно отнести конструкции с использованием фланцев (плоских или с концентрическими канавками) и импедансных структур в раскрыве рупора.

Источником больших проблем может быть прямое излучение облучателя на ИА или объект. Однако, если ориентировать облучатель с малым излучением в направлении ИА и установить высококачественный поглощающий материал так, чтобы он перехватывал это излучение, можно уменьшить его до допустимого уровня.

Таким образом, комплекс работ, необходимых для повышения качественных характеристик облучателя коллиматора, включает в себя проектирование и разработку облучателей, имеющих столообразную ДН с равномерным распределением амплитуды в рабочей зоне, низким уровнем излучения в направлении кромок коллиматора и слабым излучением в направлении ИА.

Анализ относительных погрешностей показал, что наибольший вклад в общую погрешность вносят отклонения в изготовлении коллиматорного зеркала и, соответственно, отклонения в его позиционировании. Погрешности геометрии зеркала оказывают влияние на форму ДН, а взаимное расположение зеркала и антенны влияет на ориентацию этой ДН в пространстве.

Сама конструкция коллиматора, обеспечивая плоскую волну, тем не менее, имеет некоторые погрешности, которые возрастают при больших углах и достигают 0,06 дБ.

Можно выделить следующие направления оптимизации параметров коллиматорного зеркала: во-первых, оптимизацию геометрии зеркала и уменьшение отклонений при его изготовлении от теоретических значений; во-вторых, оптимизацию формы контура зеркала для уменьшения влияния дифракционных эффектов.

При изготовлении коллиматорного зеркала отклонения в его геометрии от теоретических значений оказывают очень большое влияние на плоскостность формируемого им поля. В работе [4] отмечено, что дефекты поверхности в 0,007 длины волны могут привести к осцилляциям амплитуды величиной до 0,5 дБ, и при изготовлении и юстировке зеркал необходимо придерживаться расчетных значений с отклонением не более чем 0,2 мм [5].

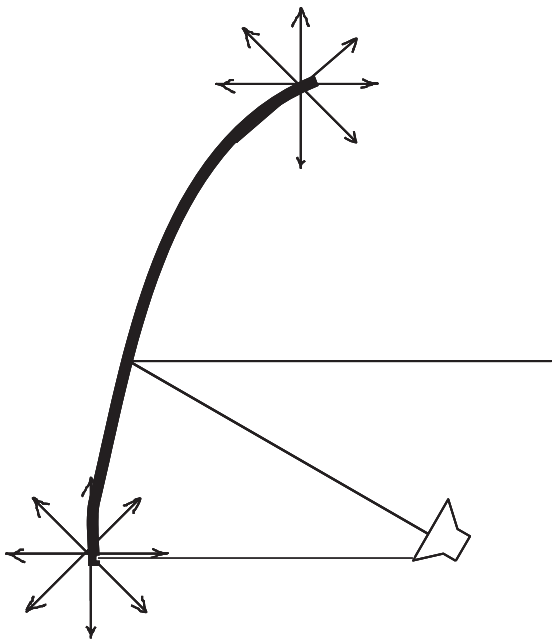


Рисунок 1. Дифракция на краях коллиматорного зеркала

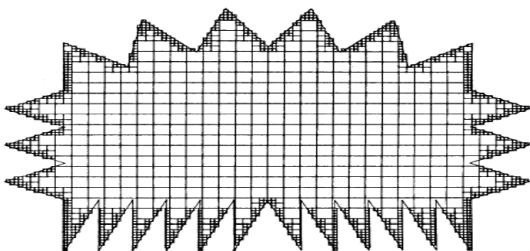


Рисунок 2. Коллиматор с зубцами на кромке

На свойства излучающей системы в большей степени влияет контур параболического коллиматора. Формируемая параболическим зеркалом плоская волна присутствует только в определенной области. Большие дифракционные поля характерны для контуров отражателя. При простом прямом контуре дифракционная составляющая достаточно велика (рис. 1).

Дифракционная составляющая интерферирует с плоской волной, которая облучает ИА и обуславливает изменение амплитуды и фазы в рабочей зоне. Таким образом, дифракционная составляющая – главный фактор, ограничивающий использование компактных полигонов.

Для уменьшения дифракционной составляющей предлагается сформировать по контуру зеркала зубцы (рис. 2). Тогда возможно перемещение области интерференции с дифрагированным сигналом за рабочую зону. Зубчатая кромка дифрагирует энергию по всем направлениям, в том числе и в рабочую зону. При увеличении количества зубцов происходит сглаживание, повышающее дифрагированный сигнал в рабочей зоне. Несмотря на сложность выбора количества и размеров зубцов, при таком решении обеспечиваются лучшие результаты, чем в случае гладкого острого контура.

Для уменьшения неоднородности поля с учетом дифракции и удаления нежелательных сигналов из рабочей зоны необходимо увеличивать площадь отражателя. На практике это решение может быть реализовано за счет отражателя с выпуклым контуром кромки (рис. 3). Такие кромки необходимо выполнить с плавными и не очень крутыми закруглениями, иначе могут образоваться дополнительные дифрагирующие поверхности. До самого конца кромки закругление должно быть выпуклым,

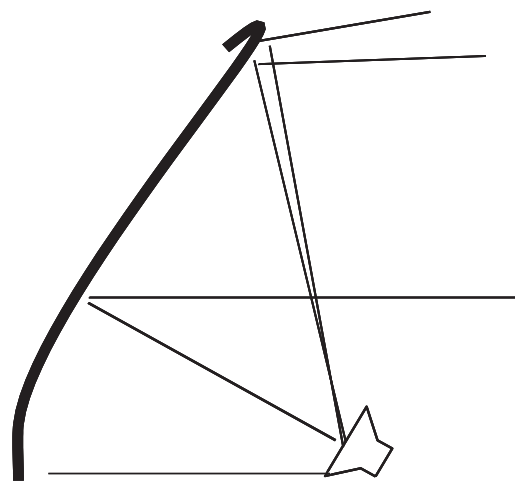


Рисунок 3. Распространение облучающего поля при отражении от коллиматора с выпуклыми кромками

тогда огибающая волна будет распространяться по контуру на заднюю часть отражателя. Радиус кривизны в начале выпуклой части поверхности должен быть больше фокусного расстояния и не менее четверти длины волны в ее конце. При конструировании радиополигона таким методом побочных эффектов не наблюдается. На границе участка плоской волны возникают наибольшие изменения поля, потому что дифрагированное кромкой рефлектора поле становится наибольшим вблизи границы тени. При этом можно определить

рабочую зону отражателя с закругленными кромками.

Поле в ближней зоне отражателя с острыми кромками изображено на рис. 4. Интенсивность поля в рабочей зоне меняется более, чем на 3 дБ, что недопустимо для измерений.

Поле, создаваемое в рабочей зоне коллиматором с закругленными кромками, изображено на рис. 5. Поскольку пульсации не превышают 1 дБ, можно констатировать выполнение требований к полю в рабочей зоне.

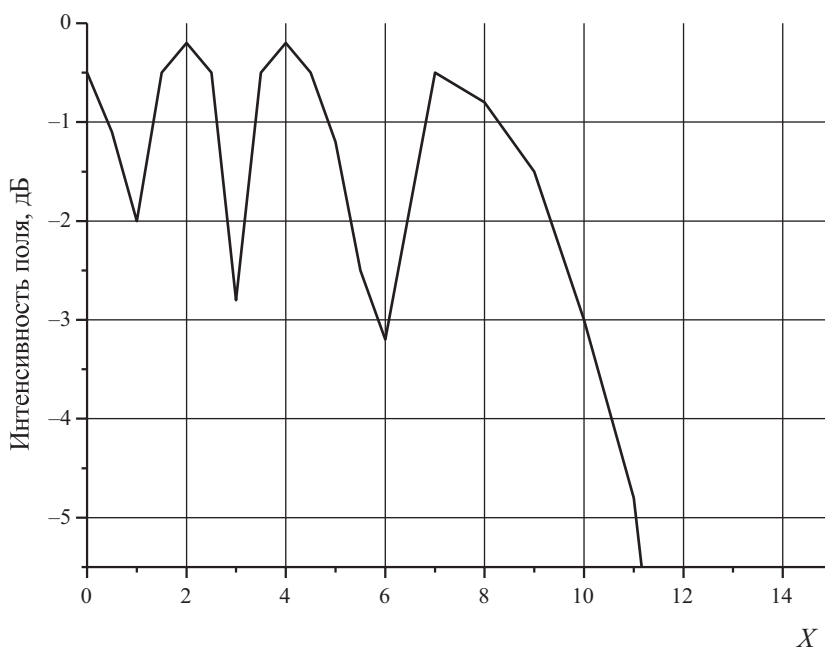


Рисунок 4. Поле в ближней зоне отражателя с острыми кромками

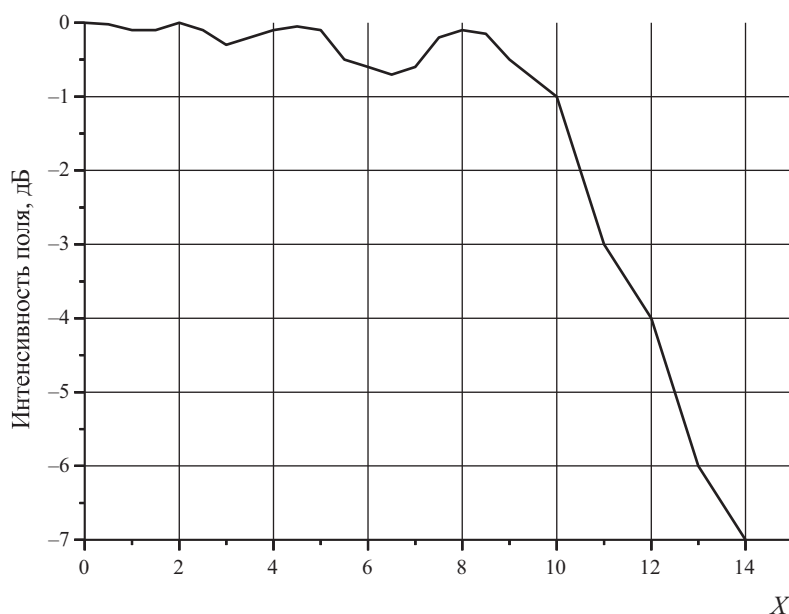


Рисунок 5. Поле в ближней зоне отражателя с выпуклыми кромками

Взаимное расположение коллиматорного зеркала и ИА оказывает влияние как на форму ДН, так и на ее ориентацию в пространстве. Основным критерием оптимального расположения зеркала и антенны являются минимальные по амплитуде колебания в рабочей зоне. При расчете оптимального взаимного расположения апертуры коллиматора и ИА учитываются следующие факторы [5]:

- фокусное расстояние коллиматора;
- оптическая длина пути от граней апертуры к точке наблюдения на оси круглой апертуры;
- эффект взаимодействия или возникновение стоячих волн;
- положение электрической оси ИА и коллиматора.

Облучатель располагается в фокусе коллиматора и формирует сферическую или цилиндрическую волны. Отраженная от коллиматорного зеркала волна – плоская с малыми колебаниями амплитуды и фазы в рабочей зоне.

Для того чтобы колебания по амплитуде электромагнитного поля в рабочей зоне были минимальны, необходимо выбрать оптимальные расстояния между коллиматором и ИА. Минимальное расстояние определяется фокусным расстоянием зеркала и эффектом взаимодействия, который заключается в том, что при близком расположении зеркала и антенны возникают стоячие волны. Также данное расстояние ограничивается наличием кроссполаризационной компоненты, поэтому желательно использовать длиннофокусное зеркало с соотношением $F/D > 0,7$, где F – фокусное расстояние, а D – диаметр зеркала.

Максимальное расстояние следует выбирать исходя из того, что амплитудные колебания электромагнитного поля растут при увеличении расстояния. Данное расстояние определяется с использованием аппроксимации Френеля или с помощью приближений волновой оптики.

Положения электрических осей ИА и коллиматора должны совпадать. Для этого производят юстировку электрической оси ИА, которая заключается в установлении соответствия между направлением электрической оси и показаниями оптической или координатной систем антенны [1].

При измерении характеристик антенны, таких как коэффициент усиления (КУ), УБЛ, коэффициент кроссполаризации (ККП), важное значение имеет соотношение поляризации падающей волны и вектора поляризации антенны. Наличие кроссполаризационной компоненты в поле падающей волны приводит к тому, что характеристики направленности антенны измеряются с некоторой погрешностью.

Во многих работах рассматривались погрешности измерения поляризационных характеристик антенны. Так, в [6] дана оценка погрешности измерения кроссполаризационной ДН из-за неточной установки поляризации поля вспомогательной облучающей антенны, в [7] – погрешности измерения ККП и коэффициента эллиптичности при измерениях в поле зеркального коллиматора из-за наличия в нем кроссполаризационной составляющей. В [8] проведено исследование влияния поляризационных характеристик антенны и падающего поля на точность измерения УБЛ и КУ антенны, а также погрешности измерения ККП. Согласно исследованию [8], относительная погрешность измерения КУ и УБЛ, обусловленная наличием кроссполаризационной компоненты, может достигать 0,078 дБ (1,812%). Используемый в данном исследовании метод позволяет оценивать относительный уровень погрешности измерения КУ и УБЛ из-за различия поляризации поля антенны и облучающего поля для конкретных значений ККП падающей волны при различных значениях суммы ККП в главном и боковом лепестках ДН.

Стоит отметить, что данный метод применим для расчета погрешностей в случае измерений в поле коллиматора для антенны с равномерным АФР в поле раскрыва при работе ее в режиме передачи. Для антенны со спадающим к краям раскрыва амплитудным распределением при симметричном ее расположении относительно плоскости симметрии зеркала коллиматора влияние кроссполаризационной составляющей поля коллиматора ослабляется по сравнению антенной, имеющей равномерное распределение.

Выводы

В процессе исследования были проанализированы результаты экспериментальных измерений для методов анализа АФР облучающего поля и временной селекции сигнала. Показано, что использование данных методов позволяет восстанавливать ДН, близкую к истинной, и, соответственно, измерять параметры АУ с повышенной точностью.

Рассмотрены различные источники погрешностей. При этом погрешность, обусловленная ККП, пренебрежительно мала и ее можно не учитывать.

Погрешности определения УБЛ и КУ антенны из-за различия поляризации поля антенны и облучающего поля при обычных измерениях малы. Однако их следует учитывать при проведении высокоточных измерений, в частности при аттестации эталонных и образцовых антенн, для которых погрешность не должна превышать 0,1 дБ. Погрешность измерения ККП в случаях, когда его уровень ниже –20 дБ, достаточно велика, если ККП облучающего поля превышает –40 дБ.

Предложенный способ достаточно универсален и позволяет повысить точностные характеристики антенных измерений, что подтверждено соответствующими экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самбуров Н.В. Юстировка электрической оси антенн на компактных антенных полигонах // Радиопромышленность. 2011. № 1. С. 18–26.
2. Мазин А.В., Николаев П.В. Определение погрешностей при коллиматорном методе измерения антенных устройств на компактных полигонах // Радиопромышленность. 2011. № 1. С. 5–18.
3. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактный полигон для измерения рассеивающих свойств объектов и параметров антенн (общее описание, измерительное оборудование, результаты испытаний) // Антенны. 2008. № 6 (133). С. 59–80.
4. Бахрах Л.Д., Каплун И.В., Курочкин А.П. Определение параметров антенн в поле неплоской облучающей волны // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 12. С. 2433–2442.
5. Драновский В.И., Ольшевский А.Л., Попель В.М. Компактная безэховая камера с коллимационным параболическим зеркалом для исследований микроволновых антенн // Международная Крымская микроволновая конференция КрыМиКо, 2005. С. 255.
6. Нарбут В.П., Хмель В.Ф. Поляризация излучения зеркальных антенн. Киев: Вища школа, 1978. 280 с.
7. Бахрах Л.Д. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука, 1985. 272 с.
8. Курочкин А.П. Оценка погрешности измерения характеристик направленности из-за различия поляризации поля антенны и падающего поля // Антенны. 2001. № 1 (47). С. 49–54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазин Анатолий Викторович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Баженова, д.2, тел.: 8 (910) 915-58-25, e-mail: mazinav@yandex.ru.

Николаев Павел Викторович, к.т.н., АО «НПП Калужский приборостроительный завод «Тайфун», Российская Федерация, 248009, Калуга, Грабцевское ш., д. 174, тел.: 8 (953) 310-64-61, e-mail: pnv11987@mail.ru.

For citation: Mazin A. V., Nikolaev P. V. Ways to improve efficiency of measuring parameters of antenna devices. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 11, pp. 70–76. DOI 10.21778/2218-5453-2019-11-70-76

A. V. Mazin, P. V. Nikolaev

WAYS TO IMPROVE EFFICIENCY OF MEASURING PARAMETERS OF ANTENNA DEVICES

The paper considers the measurement methods implemented in compact polygons. The main advantage of antenna measurements in compact polygons is their conduct indoors-anechoic chamber. The authors analyze the information about the measuring system of the antenna device. The most effective components of measurement of parameters of antenna devices, which can be implemented in the measuring system and show high results in antenna measurements, are determined. The proposed method is investigated applicable to the minimization of the basic errors occurring in the measuring system of the antenna device, the analysis of its effectiveness for the studied errors. A generalized method of analysis of information about the measuring system is proposed, experimental studies of this method are presented. The application of the proposed method allows to increase the accuracy of measurement of antenna devices.

Keywords: antenna measurements, error, measuring system, radiation pattern, side lobes, compact polygon

REFERENCES

1. Samburov N.V. Adjusting the electrical axis of the antennas on a compact antenna ranges. *Radiopromyshlennost*, 2011, no. 1, pp. 18–26. (In Russian).
2. Mazin A.V., Nikolaev P.V. Determination of uncertainties in a dot measurement method of antenna devices in compact ranges. *Radiopromyshlennost*, 2011, no. 1, pp. 5–18. (In Russian).
3. Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin B.C. Compact polygon for measuring scattering properties of objects and antenna parameters (general description, measuring equipment, test results). *Antenny*, 2008, no. 6 (133), pp. 59–80. (In Russian).
4. Bakhrakh L.D., Kaplun I.V., Kurochkin A.P. Definition of antenna parameters in the field irradiating the non-planar waves. *Radiotekhnika i elektronika*, 1975, vol. 20, no. 12, pp. 2433–2442. (In Russian).
5. Dranovskii V.I., Olshevskii A.L., Popel V.M. Compact anechoic chamber with a collimation parabolic mirror for studies of microwave antennas. (Conference proceedings) *Mezhdunarodnaya Krymskaya mikrovolnovaya konferentsiya KryMiKo*, 2005, p. 255. (In Russian).
6. Narbut V.P., Khmel V.F. *Polyarizatsiya izlucheniya zerkalnykh antenn* [Polarized radiation reflector antennas]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1978, 280 p. (In Russian).

7. Bakhrakh L.D., et al. *Metody izmerenii parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnei zone* [Methods of measurement of parameters of radiating systems in the near zone]. Leningrad, Nauka Publ., 1985, 272 p. (In Russian).
8. Kurochkin A.P. Evaluation of the error in measuring directivity characteristics due to differences in polarization of the antenna field and the incident field. *Antenny*, 2001, no. 1 (47), pp. 49–54. (In Russian).

AUTHORS

Mazin Anatoly, D. Sc., professor, head of department, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), 2, Bazhenova St., Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (910) 915-58-25, e-mail: mazinav@yandex.ru.

Nikolaev Pavel, Ph. D., NPP Kaluga instrument-making plant TYPHOON JSC, 174, Grabtsevskoye road, Kaluga, 248009, Russian Federation, tel.: +7 (953) 310-64-61, e-mail: pnv11987@mail.ru.