



УДК 621.396.677
ГРНТИ 47.45.29

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С РАВНОАМПЛИТУДНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Н.И. БОБКОВ, кандидат технических наук

АО «ВНИИ «Градиент» (г. Ростов-на-Дону)

П.Е. СУХОПАРОВ, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

На основе свойств эквивалентного линейного излучателя для плоских антенных решеток с равноамплитудным возбуждением элементов предложен метод формирования частотно-независимых характеристик излучения в широкой полосе частот. На примерах решеток с раскрывом круглой, эллиптической, а также правильной многоугольной формы показано, что эффект стабилизации ширины и формы парциальных диаграмм направленности может быть достигнут в полосе частот шириной не менее четырех октав. Рассмотрены вопросы практической реализации предложенного метода.

Ключевые слова: многолучевая антенная решетка; диаграмма направленности; амплитудно-фазовое возбуждение элементов решетки; раскрыв антенны; метод синтеза частотно-зависимого фазового распределения.

THE RADIATION FREQUENCY-INDEPENDENT CHARACTERISTICS FORMATION OF WIDEBAND ANTENNA ARRAYS WITH ELEMENTS EQUAL AMPLITUDE EXCITATION

N.I. BOBKOV, Candidate of Technical Sciences

JSC "VNI Gradient" (Rostov-on-Don)

P.E. SUKHOPAROV, Candidate of Technical Sciences

MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

Based on the properties of an equivalent linear radiator for plane antenna arrays with equal-amplitude excitation of elements, a method is proposed for the formation of frequency-independent radiation characteristics in a wide frequency band. Examples of gratings with a circular round, elliptical, and regular polygonal shape have shown that the effect of stabilizing the width and shape of partial directional patterns can be achieved in a frequency band not less than four octaves wide. The questions of practical realization of the proposed method are considered.

Keywords: multibeam antenna array; radiation pattern; amplitude-phase excitation of the lattice elements; antenna opening; method of frequency-dependent phase distribution synthesis.

Введение. При проектировании широкополосных многолучевых антенных решеток (МАР) одной из актуальных задач является поддержание неизменных параметров парциальных диаграмм направленности (ДН) в полосе рабочих частот. Как показано в [1], эффект стабилизации характеристик излучения (ширины и формы главного лепестка ДН, а также огибающей боковых лепестков) для линейных МАР со спадающим косинусоидальным амплитудным распределением может быть достигнут в полосе частот не менее декады путем введения частотнозависимого квадратичного фазового распределения, при котором убывание ширины ДН с ростом частоты компенсируется возрастанием расфазировки раскрыва. Формируемые при этом парци-



альные ДН являются практически частотно-независимыми. Однако в ряде случаев требуется сформировать частотно-независимые ДН при равномерном амплитудном распределении в раскрыве МАР. Например, при проектировании передающих активных многолучевых антенных решеток (АМАР), когда снижение выходной мощности усилительных приборов по мере приближения к краям раскрыва, применяемое для создания спадающего амплитудного распределения, ведет к заметному падению энергетического потенциала АМАР и снижению КПД передающей системы.

В [2] предложен один из методов формирования частотно-независимых ДН для антенн с круглым раскрывом, сущность которого состоит в том, что для равномерно возбужденного круглого раскрыва амплитудное распределение эквивалентного линейного излучателя является спадающим до нуля [3], благодаря чему эффект стабилизации характеристик излучения в одной или в обеих главных плоскостях может быть достигнут путем формирования соответствующего частотнозависимого фазового распределения по одной или обеим координатам раскрыва [2].

Цель работы. Рассмотрение особенностей формирования частотно-независимых ДН широкополосных МАР с равномерным амплитудным возбуждением для некоторых видов конфигурации раскрыва.

Круглый раскрыв. На рисунке 1 схематически показано заполнение излучателями раскрыва в форме круга радиуса R и огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя, соответствующего равномерно возбужденной решетке.

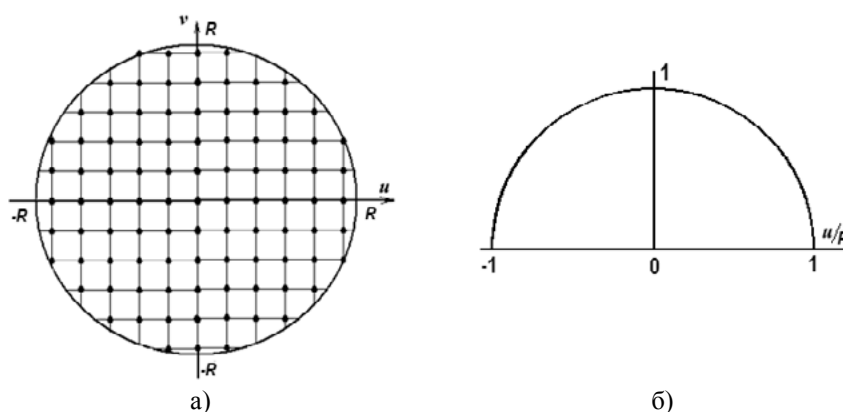


Рисунок 1 – МАР с раскрывом круглой формы а) и огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя б)

Для равномерно возбужденной решетки с круглым раскрывом радиуса R огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя длиной $2R$ имеет вид полуокружности и определяется выражением [3]:

$$A_{\text{экс}}(u) = A_0 \sqrt{R^2 - u^2}, \quad u \in [-R, R] \quad (1)$$

В [2] изложен метод синтеза частотнозависимого фазового распределения, обеспечивающего формирование частотно-независимых ДН равномерно возбужденного круглого непрерывного раскрыва. Наилучшим с точки зрения сохранения формы и отклонения ширины ДН в полосе частот с перекрытием 16:1 является фазовое распределение вида «косинус в степени 0,35» с начальной расфазировкой 200° для нижней рабочей частоты f_0 . На рисунках 2, 3 приведены ДН на шести частотах для центрального (неотклоненного) луча МАР с круглым раскрывом и луча, отклоненного на 40° , рассчитанные с применением указанного фазового распределения, задаваемого в одной плоскости. Расчет проведен для эквивалентной линейной решетки размером $2R=10,6\lambda_0$ (λ_0 – длина волны на нижней рабочей частоте f_0), состоящей из 100 элементов со



спадающим амплитудным возбуждением согласно (1) без учета направленности элемента решетки.

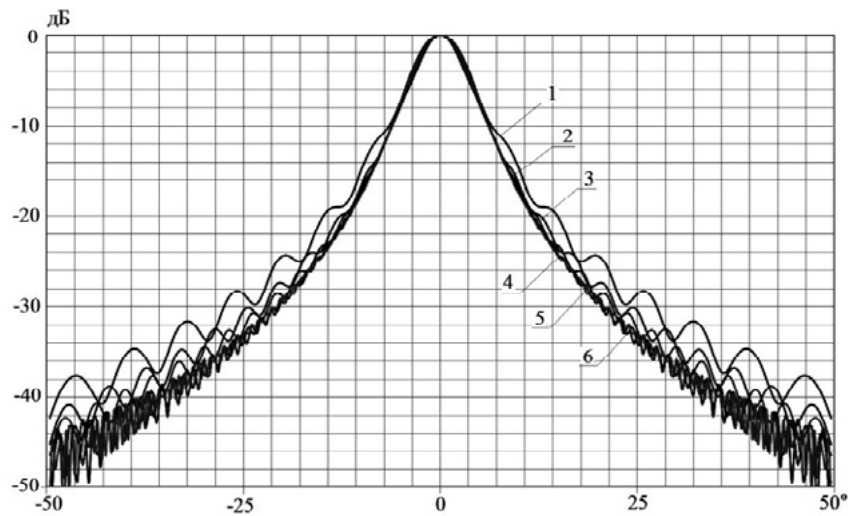


Рисунок 2 – Диаграммы направленности МАР с круглым раскрывом для луча, формируемого по нормали на частотах:
1 – f_0 ; 2 – $1,5 f_0$; 3 – $2 f_0$; 4 – $4 f_0$; 5 – $7,5 f_0$; 6 – $10 f_0$

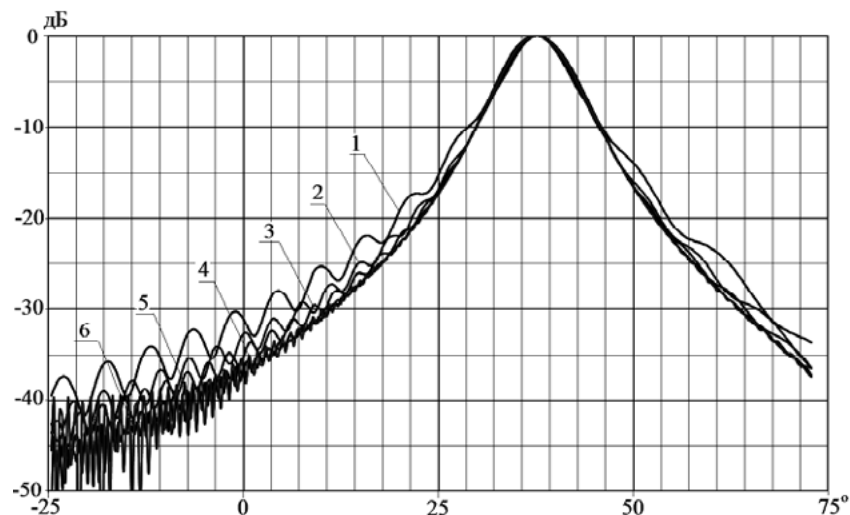


Рисунок 3 – Диаграммы направленности МАР с круглым раскрывом для луча, отклоненного на 40° на частотах:
1 – f_0 ; 2 – $1,5 f_0$; 3 – $2 f_0$; 4 – $4 f_0$; 5 – $7,5 f_0$; 6 – $10 f_0$

Из результатов расчета следует, что ДН являются частотно-независимыми по ширине и по форме главного лепестка до уровня минус 10 дБ. На более низких уровнях ДН отличаются более заметно, однако выше по частоте, начиная с $4f_0$, форма огибающей боковых лепестков изменяется незначительно. Ширина ДН по уровню минус 3 дБ в полосе частот с перекрытием 16:1 составляет $5,7^\circ \pm 0,6^\circ$. Для синфазного режима ширина ДН этой же МАР на нижней частоте составляет $5,58^\circ$. Ширина ДН отклоненного на 40° луча в полосе частот с перекрытием 16:1 составляет $7,4^\circ \pm 0,75^\circ$, при этом форма ДН сохраняется так же, как и в случае луча, формируемого по нормали к плоскости раскрыва.

Очевидно, что приведенные результаты справедливы и для равномерно возбужденного раскрыва эллиптической формы, поскольку выражения для амплитудного распределения экви-



валентного линейного излучателя в плоскостях, совпадающих с главными осями для эллиптического и круглого раскрывов совпадают с точностью до постоянного множителя.

Восьмиугольный раскрыв. На рисунке 4а схематически показано заполнение излучателями раскрыва в форме правильного восьмиугольника, вписанного в окружность радиуса R , а на рисунке 4б - огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя.

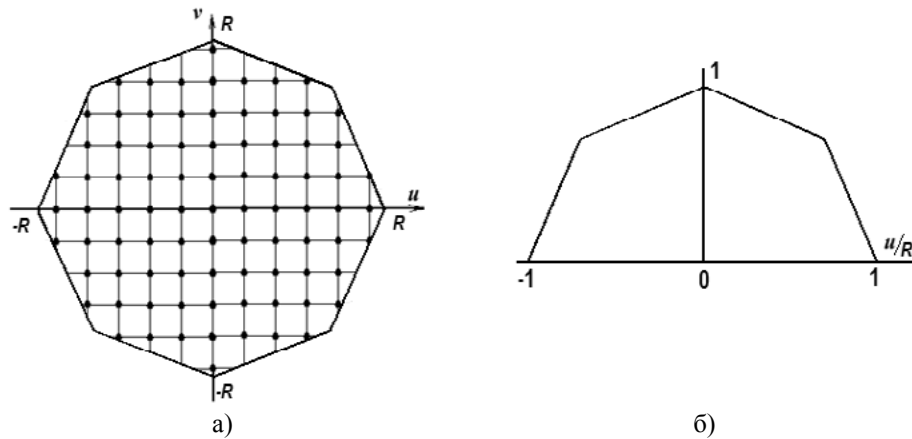


Рисунок 4 – МАР с раскрывом в форме правильного восьмиугольника а) и огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя б)

Для восьмиугольного раскрыва наилучшим в полосе частот с перекрытием 16:1 является фазовое распределение вида «косинус в степени 0,3» с начальной расфазировкой 250° для нижней рабочей частоты f_0 . На рисунках 5, 6 приведены ДН на шести частотах для центрального и отклоненного на 40° лучей МАР с восьмиугольным раскрывом, рассчитанные с применением указанного фазового распределения, задаваемого в одной плоскости. Расчет проведен для эквивалентной линейной решетки с теми же параметрами, что и для круглого раскрыва.

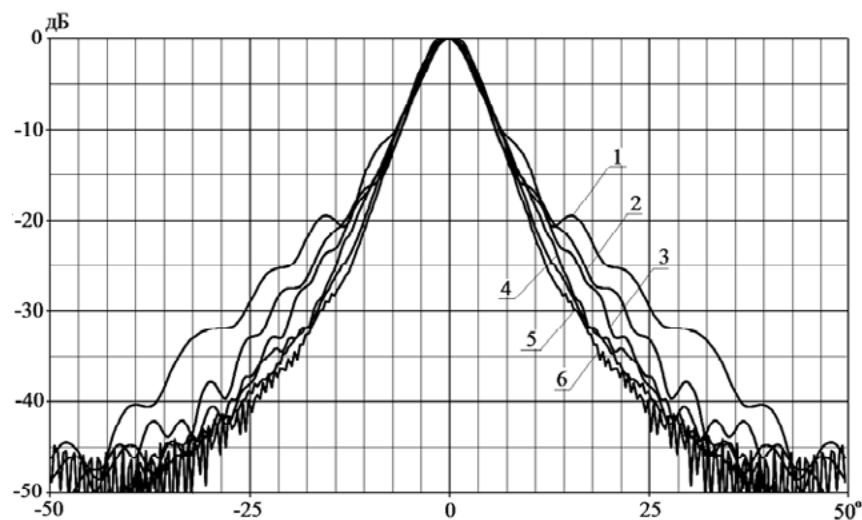


Рисунок 5 – Диаграммы направленности МАР с восьмиугольным раскрывом для луча, формируемого по нормали на частотах:
1 – f_0 ; 2 – $1,5 f_0$; 3 – $2 f_0$; 4 – $4 f_0$; 5 – $7,5 f_0$; 6 – $10 f_0$

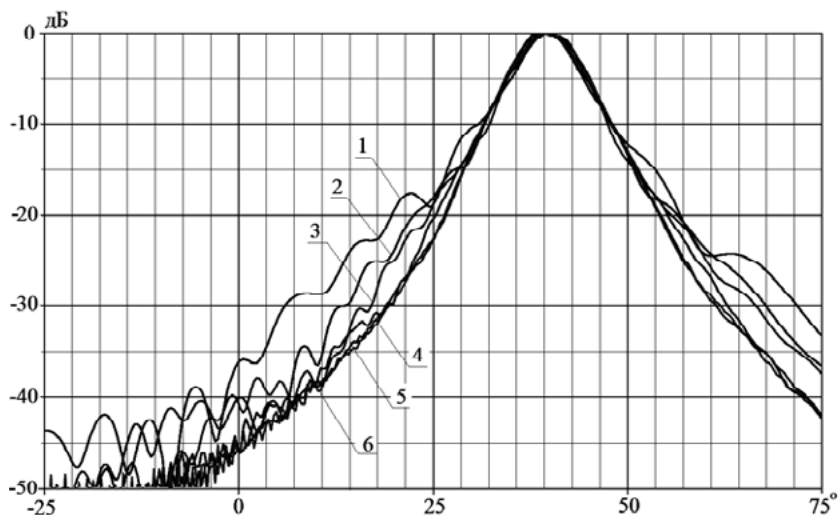


Рисунок 6 – Диаграммы направленности МАР с восьмиугольным раскрывом для луча, отклоненного на 40° на частотах:
1 – f_0 ; 2 – $1,5 f_0$; 3 – $2 f_0$; 4 – $4 f_0$; 5 – $7,5 f_0$; 6 – $10 f_0$

Как и в случае круглого раскрыва ДН на рисунках 5, 6 являются частотно-независимыми по ширине и по форме главного лепестка до уровня минус 10 дБ. На более низких уровнях ДН различие формы огибающих боковых лепестков более существенно, чем для МАР с круглым раскрывом. Ширина ДН по уровню минус 3 дБ в полосе частот с перекрытием 16:1 составляет $5,8^\circ \pm 0,75^\circ$. По сравнению с синфазным режимом расфазировка восьмиугольного раскрыва приводит к расширению главного лепестка ДН на нижней частоте на 11,6% и к снижению КНД решетки на 0,94 дБ. Ширина и форма ДН отклоненного на 40° луча в полосе частот с перекрытием 16:1 сохраняются так же, как и в случае луча, формируемого по нормали к плоскости раскрыва.

Шестиугольный раскрыв. На рисунке 7а схематически показано заполнение излучателями раскрыва в форме правильного шестиугольника, вписанного в окружность радиуса R , а на рисунке 7б - огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя.

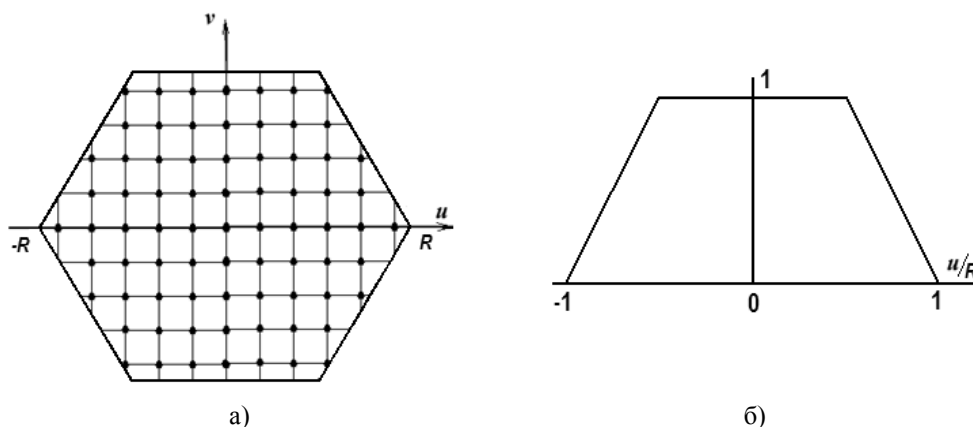


Рисунок 7 – МАР с раскрывом в форме правильного шестиугольника а) и огибающая амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя б)

Для шестиугольного раскрыва наилучшим в полосе частот с перекрытием 16:1 является фазовое распределение, описываемое степенной функцией с показателем 2,4 с начальной расфазировкой 144° на нижней рабочей частоте f_0 . На рисунке 8 приведены ДН для центрального (неотклоненного) луча МАР с шестиугольным раскрывом, рассчитанные для эквивалентной линейной решетки с теми же параметрами, что и для круглого раскрыва.



В отличие от рассмотренных ранее, ДН, приведенные на рисунке 8 можно считать частотно-независимыми условно. Ширина главного лепестка ДН является наиболее стабильной на уровне минус 3 дБ и на уровне минус 10 дБ. ДН на уровнях ниже минус 10 дБ заметно различаются по ширине и по форме. Ширина ДН по уровню минус 3 дБ в полосе частот с перекрытием 16:1 составляет $6,2^\circ \pm 0,7^\circ$. Форма главного лепестка в меньшей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ДН пеленгационных антенн, в то же время передающие МАР вполне могут быть построены с такой конфигурацией раскрыва. Как и в предыдущих случаях, отклонение луча от нормали не вызывает существенных изменений формы ДН.

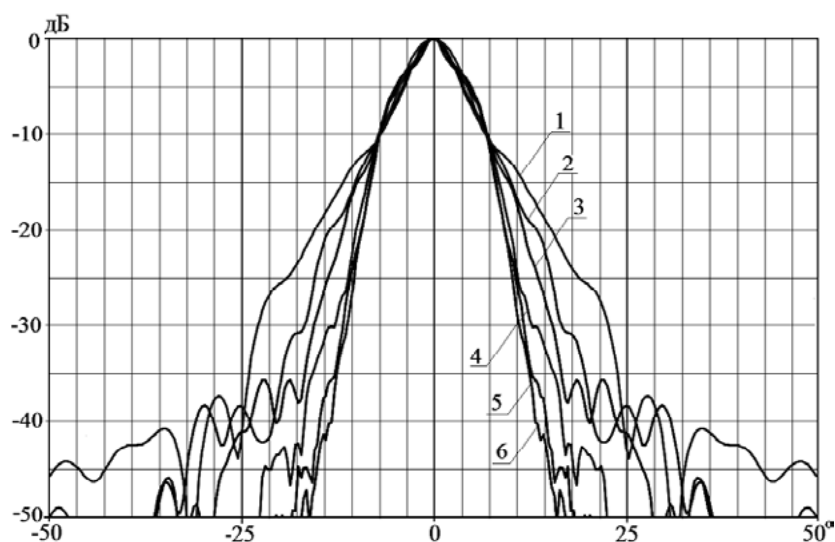


Рисунок 8 – Диаграммы направленности МАР с шестиугольным раскрывом для луча, формируемого по нормали на частотах:
1 – f_0 ; 2 – $1,5 f_0$; 3 – $2 f_0$; 4 – $4 f_0$; 5 – $7,5 f_0$; 6 – $10 f_0$

Из сравнения результатов расчета следует, что в широкой полосе частот наиболее близкими к частотно-независимым являются парциальные ДН, формируемые круглым или эллиптическим равноамплитудным раскрывом с гладким амплитудным распределением эквивалентного линейного излучателя. Антенные решетки с такими формами раскрыва наиболее часто применяются в бортовых радиоэлектронных средствах. Следует также отметить, что результаты расчета являются приближенными, поскольку приведены для пространственного множителя эквивалентной линейной решетки. При более детальном исследовании необходим более полный анализ с учетом характеристик излучения элементов решетки [4], их взаимных связей и других факторов. При проектировании реальных широкополосных МАР наибольшую сложность представляет разработка диаграммообразующих устройств, поддерживающих неизменное постоянное амплитудное распределение в полосе рабочих частот. Формирование требуемых фазовых распределений не представляет сложности и может быть осуществлено соответствующим подбором электрической длины соединительных линий передачи между диаграммообразующим устройством и группами элементов излучающей решетки.

Выводы. Выполненные исследования доказывают возможность формирования частотно-независимых ДН плоских МАР с равноамплитудным возбуждением. Соответствующий выбор формы раскрыва и использование специальных фазовых распределений позволяют расширить потенциально возможную полосу рабочих частот МАР до четырех октав. Для приемных МАР при этом поддерживается постоянный уровень пересечения парциальных ДН и крутизна пеленгационных характеристик. Равноамплитудное возбуждение элементов решетки позволяет сохранить высокий энергетический потенциал и КПД передающей системы в полосе частот. Предложенный метод построения широкополосных МАР может найти применение при разработке широкополосных антенных систем различного назначения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков Н.И., Габриэлян Д.Д., Ивакина С.С., Пархоменко Н.Г. Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения//«Радиотехника», №1, 2016 г., с.42-49.
2. Бобков Н.И., Габриэлян Д.Д., Ивакина С.С., Проживальский В.В. Исследование частотно-независимых характеристик излучения антенн с круглой апертурой//«Радиотехника», №11, 2016 г., с.170-176.
3. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны / М.: Энергия. – 1975. – 529 с.
4. Гринев А.Ю., Багно Д.В., Синани А.И., Мосейчук Г.Ф. Расширение полосы рабочих частот многофункциональных фазированных антенных решеток / Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г., с. 631-635.

REFERENCES

1. Bobkov N. And. Gabrielyan D. D. Ivakin, S. S., Parkhomenko N. G. Build aperture antennas with frequency-independent radiation characteristics//Radiotekhnika, no 1, 2016, pp. 42-49.
2. Bobkov N.I., Gabriehl'yan D.D., Ivakina S.S., Prozhival'skij V.V. Issledovanie chastotno-nezavisimykh kharakteristik izlucheniya antenn s krugloj aperturoj//«Radiotekhnika», №11, 2016 g., P.170-176.
3. Markov G.T., Sazonov D.M. Antenny / M.: ENnergiya. 1975. 529 p.
4. Grinev A.YU., Bagno D.V., Sinani A.I., Mosejchuk G.F. Rasshirenie polosy rabochikh chastot mnogofunktsional'nykh fazirovannykh antennykh reshetok / Materialy IV Vserossijskoj konferentsii «Radiolokatsiya i radiosvyaz'» – IREN RAN, 29 noyabrya – 3 dekabrya 2010 g., P. 631-635.

© Бобков Н.И., Сухопаров П.Е., 2018

Бобков Николай Иванович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского сектора, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (г. Ростов-на-Дону), Россия, 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96, uablac@mil.ru

Сухопаров Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Pavel_s1980@mail.ru