

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.396.677
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.3.15-20

Дата поступления: 02.04.2019
Дата принятия: 08.05.2019

Амплитудно-фазовое распределение для формирования частотно-независимых пеленгационных характеристик в линейных антенных решетках

Н.И. Бобков¹, Д.Д. Габриэльян², Ю.В. Иванов³

¹ АО «ВНИИ «Градиент»
344010, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону
пр. Соколова, 96

² ФНПЦ «ФГУП «РНИИРС»
344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону
ул. Нансена, 130

³ Московский технический университет связи и информатики
111024, Российская Федерация, г. Москва
ул. Авиамоторная, 8а

Рассмотрено амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве линейной антенной решетки, обеспечивающее формирование частотно-независимых пеленгационных характеристик в широкой полосе частот. На примере 45-элементной линейной решетки, предназначенной для работы в полосе частот с относительным перекрытием 4:1 исследовано влияние параметров амплитудного и фазового распределений на величину и характер отклонения пеленгационных характеристик в полосе рабочих частот. Проведен анализ основных закономерностей формирования частотно-независимых пеленгационных характеристик.

Ключевые слова: линейная антенная решетка, раскрыв, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности, пеленгационная характеристика.

Для ряда направлений применения антенных систем широкополосных радиоэлектронных комплексов требуется формирование частотно-независимых характеристик направленности и, в частности, частотно-независимых пеленгационных характеристик (ПХ). Формирование частотно-независимых ПХ позволяет значительно упростить построение широкополосных радиопеленгаторов [1–3], когда во всей полосе рабочих частот поддерживается постоянным пересечение парциальных диаграмм направленности (ДН) на уровне минус 3...4 дБ. Такая задача является актуальной для радиопеленгаторов с различными антенными системами, включая и линейные антенные решетки (АР).

Для определения частотной зависимости амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве АР, обеспечивающего формирование частотно-независимых ПХ, могут использоваться методы амплитудно-фазового синтеза [4–6]. Однако получаемые при этом решения приводят к сложным, зачастую нереализуемым АФР в раскрыве антенны. В то же время для практики актуальным является построение антенн, которые бы

обеспечивали формирование частотно-независимых ПХ при неизменном от частоты амплитудном распределении в раскрыве линейной АР, а частотную зависимость имело бы только фазовое распределение.

Цель работы – изучить основные закономерности выбора параметров АФР для формирования частотно-независимых ПХ линейных АР при независимом от частоты амплитудном и изменяющемся с частотой фазовом распределении в раскрыве.

Результаты работ [1–3; 7] показывают, что эффект стабилизации ПХ линейного или прямоугольного раскрыва в широкой полосе частот ΔF непосредственно связан с формированием частотно-независимых парциальных ДН и может быть достигнут при выполнении следующих условий:

– в раскрыве должно быть сформировано независимое от частоты спадающее амплитудное распределение;

– должно быть введено соответствующее дополнительное частотно-зависимое четное (обычно квадратичное) фазовое распределение, при котором убывание ширины ДН с ростом частоты

компенсируется возрастанием расфазировки раскрыва. Под расфазировкой раскрыва АР будем понимать величину разности фаз возбуждения центральных и крайних излучателей, задаваемых дополнительным фазовым распределением.

Однако как с теоретической, так и с практической точек зрения представляет интерес уточнение АФР, обеспечивающего частотную стабилизацию ПХ. При этом для исследования основных закономерностей, связанных с выбором АФР, как правило, достаточно рассмотреть случай линейных АР.

Рассмотрим линейную АР, геометрия которой показана на рис. 1.

Представим АФР линейной N -элементной АР длиной L следующим образом:

$$A(x_n, f) = \sum_{m=0}^{\infty} (B_m x_n^{2m}) \exp\{-i[x_n \sin \theta_0 + \Delta\Phi(f)x_n^2]\}, \quad (1)$$

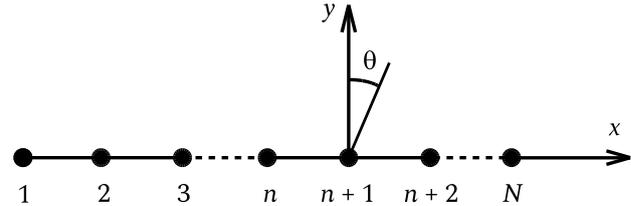


Рис. 1. Геометрия линейной АР

где B_m – частотно-независимые коэффициенты разложения, определяющие амплитудное распределение в линейной АР; $x_n \in [-L/2, L/2]$ – координата n -го излучателя в линейной АР; $\Delta\Phi(f)$ – функция, определяющая частотную зависимость дополнительной расфазировки раскрыва; θ_0 – требуемое угловое положение главного максимума ДН.

Частотную зависимость расфазировки $\Delta\Phi(f)$ представим следующим соотношением

$$\Delta\Phi(f) = \left\{ \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{\Delta F} (f - f_0) \right\}^P, \quad (2)$$

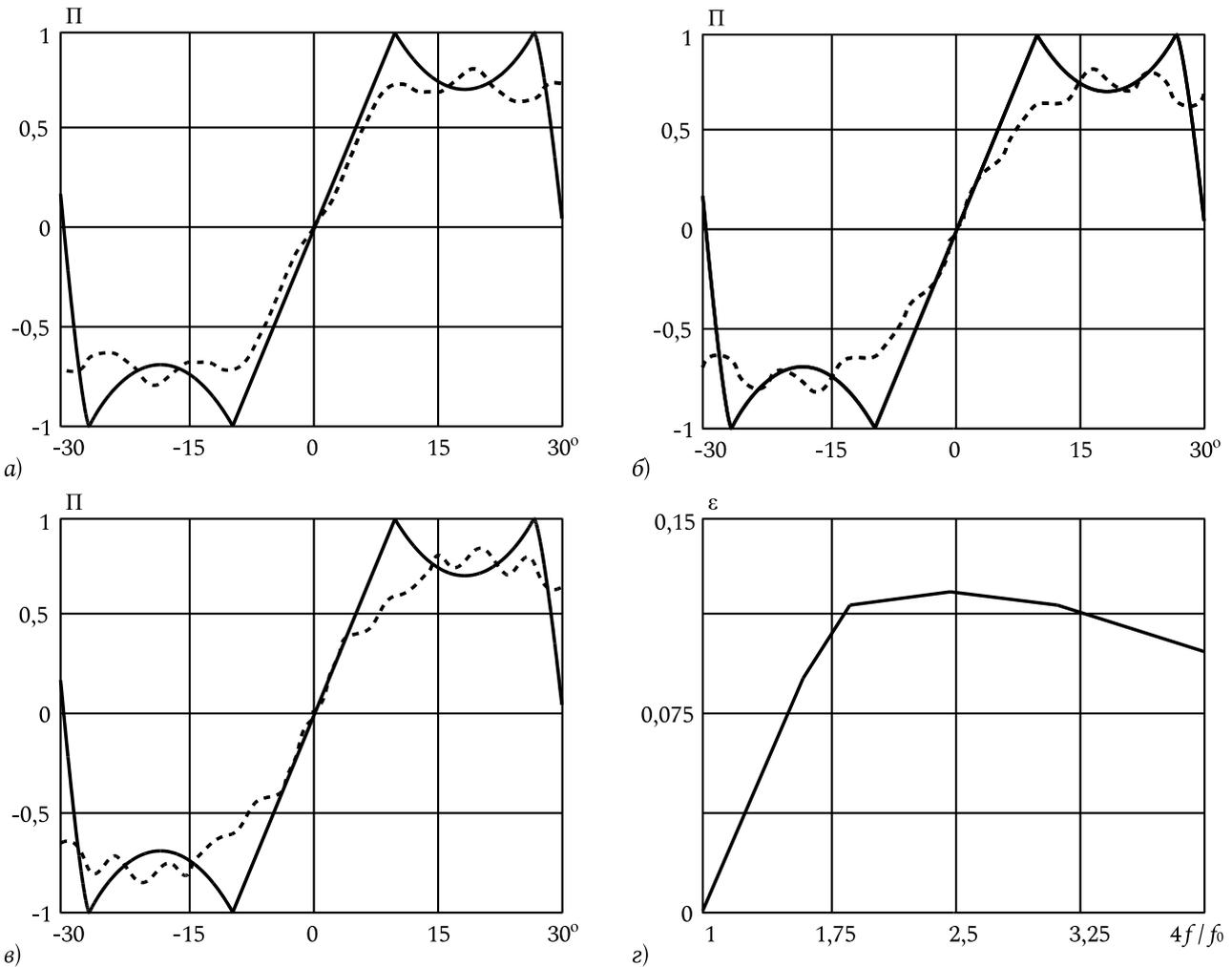


Рис. 2. Сравнение пеленгационных характеристик на частоте $2f_0$ (а); $3f_0$ (б) и $4f_0$ (в) с пеленгационной характеристикой на частоте f_0 (сплошная линия на полях а, б, в) и частотная зависимость их отклонения в полосе частот (г) для амплитудного распределения с параметрами $B_0 = 0, B_1 = -\pi^2/4$

в котором Φ_0 и Φ_1 – величина расфазировки раскрыва на крайних частотах f_0 и $f_0 + \Delta F$ соответственно. С учетом представления АФР в виде (1) соотношение для ДН решетки может быть записано в виде [4–6]

$$F(\theta, f) = \mu(\theta) \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{\infty} (B_m x_n^{2m}) \times \exp\left\{-i\left[k(f)x_n(\sin\theta - \sin\theta_0) + \Delta\Phi(f)x_n^2\right]\right\}, \quad (3)$$

где $\mu(\theta)$ – ДН излучателя; $k(f)$ – волновое число.

На основе соотношения (3) ПХ линейной АР может быть представлена соотношением

$$\Pi(\theta, f) = \frac{F(\theta + \theta_0, f) - F(\theta - \theta_0, f)}{F(\theta + \theta_0, f) + F(\theta - \theta_0, f)}. \quad (4)$$

Параметром, определяющим частотную независимость ПХ, является интегральное среднеквадратическое отклонение (СКО) ПХ в полосе частот от ПХ на нижней частоте, которое определяется следующим выражением

$$\varepsilon = \left| \Pi(\theta, f_{cp}) \right|^{-2} (\Delta f)^{-1} \int_{\Delta f} \left| \Pi(\theta, f) - \Pi(\theta, f_{cp}) \right|^2 df. \quad (5)$$

Результаты исследований возможности формирования частотно-независимой ПХ для 45-элементной АР в полосе частот с перекрытием 4:1 ($\Delta F = 3f_0$) для различных параметров амплитудного распределения приведены на рис. 2 и 3, при этом частотная зависимость расфазировки взята в виде $\Delta\Phi(f) = \{3\pi(f/f_0 - 1)\}^{0,8}$.

На рис. 2 (поля с индексами а–в) приведены расчетные ПХ для амплитудного распределения с параметрами $B_0 = 0$, $B_1 = -\pi^2/4$ с высоким уровнем возбуждения крайних излучателей АР. Сплошной линией показаны ПХ на частоте f_0 , штриховой линией – ПХ на частотах $2f_0$, $3f_0$ и $4f_0$ соответственно. Из приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что при повышении частоты происходит искажение ПХ. Однако максимальное в соответствии с выражением (5) искажение ПХ для этого

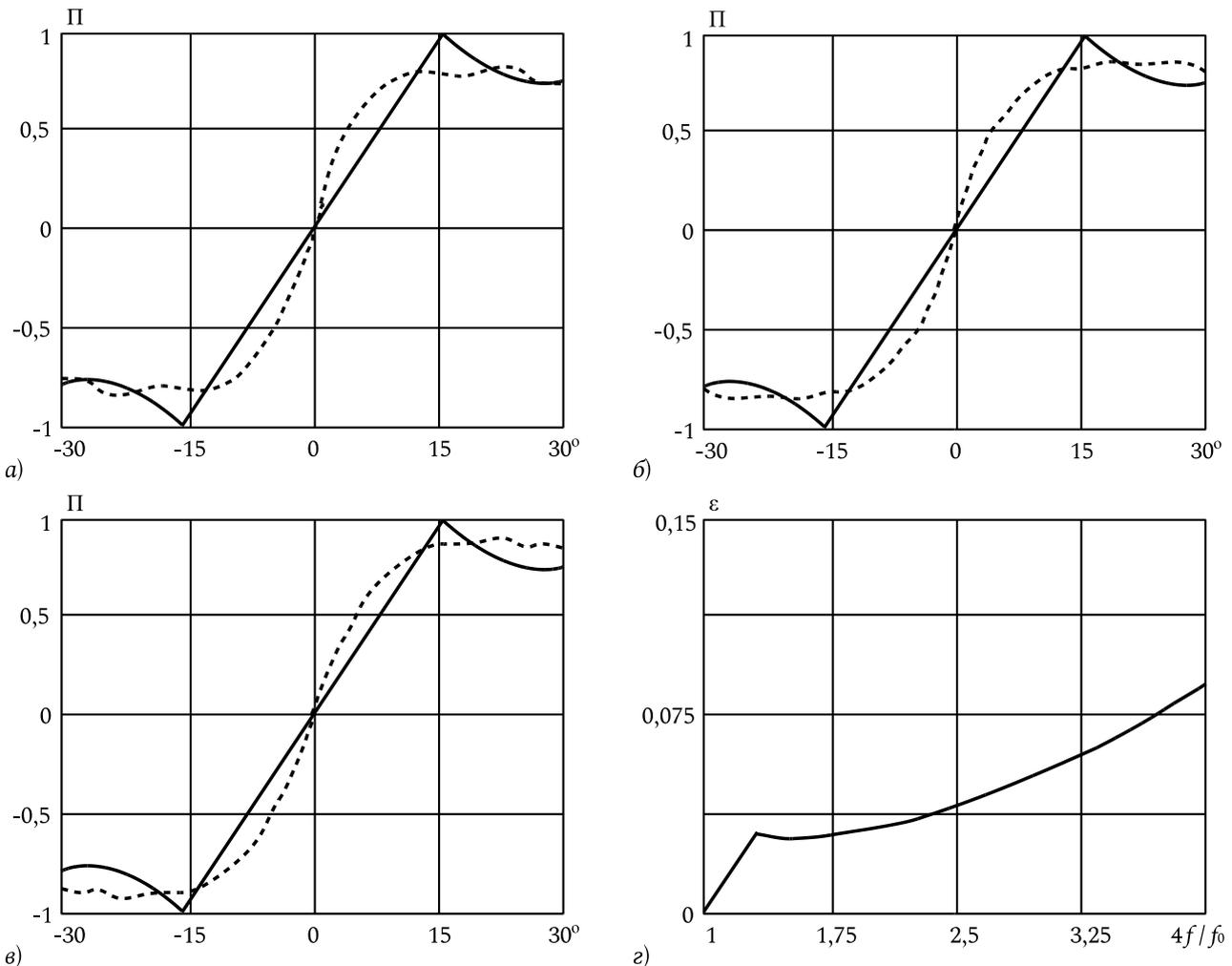


Рис. 3. Сравнение пеленгационных характеристик на частоте $2f_0$ (а); $3f_0$ (б) и $4f_0$ (в) с пеленгационной характеристикой на частоте f_0 (сплошная линия на полях а, б, в) и частотная зависимость их отклонения в полосе частот (г) для амплитудного распределения с параметрами $B_0 = 0$, $B_1 = -\pi^2/2$

амплитудного распределения наблюдается вблизи середины полосы частот (рис. 2, з).

На рис. 3 приведены результаты аналогичных исследований для случая существенно спадающего амплитудного распределения в раскрыве АР с параметрами $B_0 = 0$, $B_1 = -\pi^2/2$. Переход к более спадающему амплитудному распределению позволяет, как следует из результатов, представленных на рис. 3, а-в при той же расфазировке в раскрыве АР снизить частотную зависимость ПХ. При этом характер частотной зависимости степени искажения ПХ, показанный на рис. 3, з существенно изменяется по сравнению с предыдущим случаем.

На рис. 4 для случая 45-элементной АР с амплитудным распределением $B_0 = 0$, $B_1 = -\pi^2/2$ приведены результаты исследований изменения ПХ в полосе частот в зависимости от параметра p в выражении для частотной зависимости расфазировки раскрыва АР (2). Сплошной линией показаны ПХ на частоте f_0 , штриховой линией – ПХ на частоте $2f_0$, штрих-пунктирной линией – ПХ на частоте $3f_0$, точками показаны ПХ на частоте $4f_0$.

Приведенные на рис. 4 зависимости ПХ показывают, что при спадающем амплитудном распределении возможен выбор параметров частотно-зависимого фазового распределения в раскрыве АР, при котором в широкой полосе частот формируется практическая независимая ПХ.

Таким образом, можно отметить, что формирование частотно-независимых ПХ в широкой полосе частот возможно на основе следующих принципов:

- амплитудное распределение в раскрыве является частотно-независимым;
- изменение дополнительного фазового распределения в раскрыве АР от частоты имеет характер, близкий к линейному;
- частотная зависимость отклонения ПХ определяется параметрами амплитудного распределения, требования к которому могут обуславливаться различными факторами, при этом введение существенно спадающего амплитудного распределения способствует снижению интегрального СКО ПХ в полосе частот;

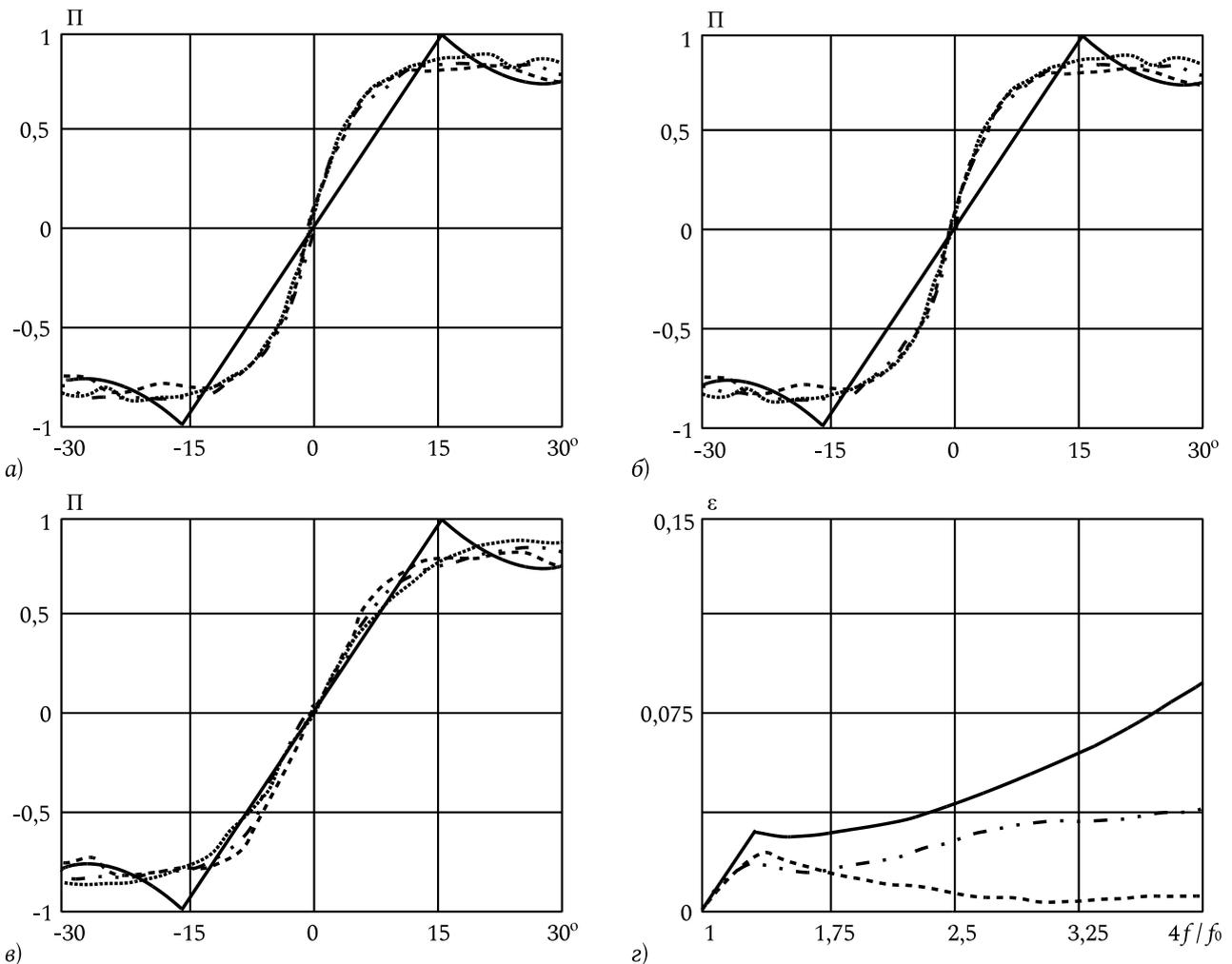


Рис. 4. Пеленгационные характеристики (а – $p = 0,8$; б – $p = 0,85$; в – $p = 0,9$) и частотная зависимость их отклонения (д): сплошная линия $p = 0,8$; штриховая линия $p = 0,85$; штрих-пунктирная линия $p = 0,9$

– изменение закона расфазировки поля в раскрыве решетки приводит к изменению характера частотной зависимости отклонения ПХ.

Учет выявленных закономерностей позволяет уточнить характеристики и сократить время разработки частотно-независимых пеленгационных антенных решеток.

Список литературы

1. Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения / Н.И. Бобков [и др.] // Радиотехника. 2016. № 1. С. 42–49.
2. U.S. Patent 8466848. Beam shaping for wide band array antennas. Guy D., Pirolo B. 18 June 2013.
3. Патент № 2099836 Российская Федерация. Широкополосная четырехлучевая зеркальная антенна (варианты) / Бобков Н.И., Бочарников А.А., Кашубин В.Т., Логвиненко Е.Л., Савеленко А.А., Стуров А.Г., Яшин Н.Н. Приоритет 26.09.1994. МПК H01Q 19/17.
4. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем. Теория и методы расчета. М.: Сов. радио, 1974. 223 с.
5. Караваев В.В., Сазонов В.В. Основы теории синтезированных антенн. М.: Сов. радио, 1974. 168 с.
6. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
7. Горин А.М., Радченко Н.А. Сканирующая антенная решётка со стабильной диаграммой направленности в широком диапазоне частот // Вопросы специальной радиоэлектроники: науч.-техн. сб. ОВР. Вып. 1. М.; Таганрог, 2014. С. 77–80.

References

1. Bobkov N.I. [et al.] Postroenie aperturnykh antenn s chastotno-nezavisimymi harakteristikami izlucheniya [Construction of aperture antennas with frequency-independent radiation characteristics]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2016, no. 1, pp. 42–49 [in Russian].
2. U.S. Patent 8466848. Beam shaping for wide band array antennas. Guy D., Pirolo B. 18 June 2013 [in English].
3. Patent № 2099836 Russian Federation. Shirokopolosnaja chetyrehluhevaja zerkal'naja antenna (varianty) [Broadband four-beam mirror antenna (options)] / Bobkov N.I., Bocharnikov A.A., Kashubin B.T., Logvinenko E.L., Savelenko A.A., Sturov A.G., Jashin N.N. Priority 26.09.1994. МПК H01Q 19/17 [in Russian].
4. Bahrah L.D., Kremenetskij S.D. Sintez izluchajuschih sistem. Teorija i metody rascheta [Synthesis of emitting systems. Theory and calculation methods]. М.: Sov. radio, 1974, 223 p. [in Russian].
5. Karavaev V.V., Sazonov V.V. Osnovy teorii sintezirovannykh antenn [Fundamentals of the theory of synthesized antennas]. М.: Sov. radio, 1974, 168 p. [in Russian].
6. Zelkin E.G., Sokolov V.G. Metody sinteza antenn: Fazirovannye antennnye reshetki i anteny s nepreryvnyim raskryvom [Antenna synthesis methods: Phased array antennas and antennas with continuous opening]. М.: Sov. radio, 1980, 296 p. [in Russian].
7. Gorin A.M., Radchenko N.A. Skanirujuschaja antennaja reshetka so stabil'noj diagrammoj napravlenosti v shirokom diapazone chastot [Scanning antenna array with a stable radiation pattern in a wide frequency range]. *Voprosy spetsial'noj radioelektroniki: nauch.-tehn. sb. OVR. Vyp. 1* [Issues of special radio electronics: scientific-technical collection. OVR. Vol. 1], М.; Taganrog, 2014, pp. 77–80 [in Russian].

UDC 621.396.677

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.3.15-20

Received: 02.04.2019

Accepted: 08.05.2019

An aperture's amplitude-phase distribution for forming frequency-independent direction-finding characteristics of a linear antenna arrays

N.I. Bobkov¹, D.D. Gabriel'an², Yu.V. Ivanov³

¹ JSC «RRI “Gradient”»

96, Sokolov Prospect

Rostov-on-Don, 344010, Russian Federation

² FRPC «FSUE “RSRIRC”»

130, Nansen Street

Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

³ Moscow Technical University of Communications and Informatics

8a, Aviamotornaya Street

Moscow, 111024, Russian Federation

The aperture's amplitude-phase distribution of a linear antenna array, ensuring the formation of frequency-independent direction-finding characteristics in a wide frequency band, is considered. The basic regularities of the choice of the amplitude-phase distribution parameters of linear antenna arrays for the case of frequency independent amplitude distribution and frequency dependent phase distribution are investigated. Using the example of a 45-element linear array designed for operation in

a frequency band with a relative overlap of 4:1, the influence of the amplitude and phase distribution's parameters on the magnitude and deviation's character of the direction-finding characteristics in the operating frequency band is investigated. It is shown that the introduction of a substantially decreasing amplitude distribution contributes to a decrease in the integral standard deviation of the direction-finding characteristics in the frequency band. The relationship between deviation of frequency dependence of the direction-finding characteristics of the array and variations in the frequency dependence of the phase distribution in the aperture is established. The analysis of the basic regularities of the formation of frequency-independent direction-finding characteristics of broadband antenna arrays has been carried out.

Keywords: linear antenna array, aperture, amplitude-phase distribution, radiation pattern, direction-finding characteristic.

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.