

18. *Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Pertti Vainikainen*. Modified Test Zone Field Compensation for Small-Antenna Measurements, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, pp. 1-9.
19. *Ville Viikari, Antti V. Raisanen*. Antenna Pattern Correction Technique Based on Signal to Interference Ratio Optimization, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, pp. 1-5.
20. *Bachurin V.S., Demenev A.D., Pyshnyy V.D.* Eksperimental'naya otsenka vozmozhnostey izmereniy kharakteristik rasseyaniya metodom chastotno-vremennykh preobrazovaniy [Experimental assessment of the capabilities of measuring scattering characteristics by the method of frequency-time transformations], IV Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz» - IRE RAN [All-Russian Conference "Radarlocation and Radio Communication" - IRE RAS.], 2010, pp. 781-789.
21. *Topalov F.S.* Snizhenie polya obratnogo rasseyaniya teltsilindricheskoy formy s pomoshch'yu reshetok Van-Atta: disc. ... kand. tekhn. nauk [Reducing the cylindrical backscattering field using Van Atta gratings: cand. of eng. sc. diss.]: 05.12.07. Taganrog, 2019.
22. *Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Sergey Pivnenko*. Calibration of Multi-Prob Antenna Measurement System Using Test Zone Field Compensation, *IEEE 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009, pp. 2916-2920.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Синянян Карекин Амбарцумович – Южный федеральный университет; e-mail: sinanian@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885706087; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru ; тел.: +79882546270; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой АиРПУ; профессор.

Ильин Игорь Васильевич – e-mail: ivilin@sfedu.ru; тел.: +79889529676; кафедра АиРПУ; зав. лабораторией.

Мерглюдов Илья Владимирович – e-mail: ivmerglodov@sfedu.ru; тел.: +79054286667; кафедра АиРПУ; с.н.с.

Sinanyan Karekin Ambartsumovich – South Federal University; e-mail: sinanian@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885706087; the department of antennas and radio transmitting devices; graduate student.

Yuhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; phone: +79882546270; head of the department of antennas and radio transmitting devices; professor.

Ilin Igor Vasil'evich – e-mail: ivilin@sfedu.ru; phone: +79889529676; the department of antennas and radio transmitting devices; head of laboratory.

Merglodov Ilya Vladimirovich – e-mail: ivmerglodov@sfedu.ru; phone: +79054286667; the department of antennas and radio transmitting devices; senior science master.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-276-286

С.А. Шелкоплясов

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ РАСШИРЕННОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Проведен анализ существующих методов синтеза антенн по заданной диаграмме направленности, в которых формируемая диаграмма направленности представляет собой сумму парциальных лучей. Установлено, что в данных методах организован итерационный процесс, на каждом шаге которого к уже сформированному лучу добавляется новый дополнительный луч. При этом для определения параметров дополнительного луча используются алгоритмы поисковой оптимизации. Существование данных методов позволяет отдельно рассматривать алгоритмы определения параметров дополнительных лучей на ка-

ждом шаге итерационного процесса, как процессы решения самостоятельных задач. Разновидность такой задачи – поиск параметров дополнительных лучей для формирования одномерно расширенной диаграммы направленности. Предложен и обоснован аналитический алгоритм формирования одномерно расширенного луча линейной антенны, представляемый в виде суммы трех более узких парциальных лучей после определения двух неизвестных параметров: угла разведения дополнительных лучей и комплексной амплитуды этих лучей. Получены соотношения, позволяющие свести задачу формирования расширенного луча линейной антенны к задаче оптимизации выражения по одному параметру – углу разведения дополнительных лучей относительно центрального. Показано, что второй искомым параметр – комплексная амплитуда дополнительного луча определяется аналитически. При этом установлено, что выбор искомым параметров задачи оптимизации должен осуществляться исходя из требований к максимизации коэффициента направленного действия. После решения оптимизационной задачи амплитудно-фазовое распределение в раскрыве линейной антенны представляется в виде суперпозиции трех амплитудно-фазовых распределений для формирования соответствующих парциальных лучей. При этом показано, что алгоритм имеет ограничения, связанные с расширением лучей, поскольку реализуемость требований связана с шириной используемых парциальных лучей. В связи с этим указано, что предложенный алгоритм следует рассматривать как составную часть итерационного процесса, на каждом шаге которого происходит дополнительное расширение луча. Представлены результаты реализации предложенного алгоритма при формировании нескольких расширенных лучей, которые подтверждают работоспособность предложенного алгоритма.

Линейная антенна; расширенный луч; амплитудно-фазовое распределение; ширина диаграммы направленности.

S.A. Shelkopyasov

ALGORITHM FOR GENERATING AN EXTENDED DIRECTIVITY PATTERN OF A PHASED ARRAY ANTENNA

An analysis of existing methods for synthesizing antennas according to a given radiation pattern, in which the generated radiation pattern is the sum of partial rays, is carried out. It has been established that in these methods an iterative process is organized, at each step of which a new additional beam is added to the already formed beam. In this case, search optimization algorithms are used to determine the parameters of the additional beam. The existence of these methods allows us to separately consider algorithms for determining the parameters of additional rays at each step of the iterative process, as processes for solving independent problems. A variation of such a problem is the search for parameters of additional rays to form a one-dimensionally extended radiation pattern. An analytical algorithm for the formation of a one-dimensionally expanded beam of a linear antenna is proposed and justified, represented as a sum of three narrower partial beams after determining two unknown parameters: the angle of separation of additional beams and the complex amplitude of these beams. Relationships have been obtained that make it possible to reduce the problem of forming an extended beam of a linear antenna to the problem of optimizing the expression for one parameter - the angle of separation of additional beams relative to the central one. It is shown that the second required parameter, the complex amplitude of the additional beam, is determined analytically. It was established that the choice of the required parameters of the optimization problem should be based on the requirements for maximizing the directional coefficient. After solving the optimization problem, the amplitude-phase distribution in the aperture of a linear antenna is represented as a superposition of three amplitude-phase distributions to form the corresponding partial rays. It is shown that the algorithm has limitations associated with the expansion of rays, since the feasibility of the requirements is related to the width of the used partial rays. In this regard, it is indicated that the proposed algorithm should be considered as an integral part of an iterative process, at each step of which additional beam expansion occurs. The results of the implementation of the proposed algorithm when forming several extended beams are presented, which confirm the performance of the proposed algorithm.

Linear antenna; extended beam; amplitude-phase distribution; width of the directivity pattern.

1. Введение. Основная функция фазированной антенной решётки (ФАР) – обеспечение электронного сканирования пространства в пределах зоны ответственности и в заданном диапазоне частот. Сканирование осуществляется путём формирования диаграмм направленности (ДН) – лучей, представляющих собой проекцию поля антенны на сферу бесконечного радиуса. Антенны должны формировать такие лучи, форма которых наилучшим образом способствует решению задач, стоящих перед ФАР. В зависимости от требований, луч может иметь различные коэффициенты расширения. Известно, что для формирования одномерно расширенных лучей необходимо в раскрыве фазированной антенной решетки создавать соответствующее амплитудно-фазовое распределение (АФР), изменяющееся вдоль одного направления. Существует целый ряд простейших способов расширения луча. Наиболее известный из них – использование спадающего к краям раскрыва амплитудного распределения или оконных функций [1–3]. Для ряда распределений взаимосвязь между их параметрами и шириной луча известны. Другой широко известный подход связан с применением фазовых распределений (например, сферической фазовой подставки) [4, 5]. В работах [6, 7] был предложен аналитический метод фазового синтеза для формирования одномерно расширенных лучей. Следует отметить, что использование фазовых распределений для расширения луча наиболее актуально для излучающих антенных решеток. В случае приемных ФАР при их цифровой реализации более удобно использовать управление амплитудным или амплитудно-фазовым распределением. В этом случае для расширения луча можно использовать методы амплитудно-фазового синтеза антенных решеток, некоторые из которых рассмотрены в монографиях [4, 8–12]. В работах [13–16] был предложен метод амплитудно-фазового синтеза, который обеспечивал формирование заданной ДН в ходе добавления к исходной ДН дополнительных узких лучей. Этот подход может быть использован и для реализации простых аналитических алгоритмов расширения ДН в одной плоскости.

Целью работы является разработка алгоритма формирования расширенной ДН, упрощающего совокупность действий, связанных с выбором парциальных излучателей, и максимизация коэффициента направленного действия ФАР.

2. Постановка задачи. В работах [13–16] были предложены методы амплитудно-фазового синтеза, в которых формируемая ДН представлялась в виде суммы парциальных лучей. Новые парциальные лучи добавлялись в ходе итерационного процесса. Эти методы позволяют формировать ДН любой формы. При этом на каждом шаге итерационного алгоритма реализовывался алгоритм поиска неизвестных параметров парциальных лучей. Эти параметры определялись с использованием поисковых алгоритмов.

При формировании расширенного луча можно разработать простой полуаналитический алгоритм поиска параметров парциальных лучей без использования алгоритмов направленного поиска [17–20].

Рассмотрим задачу формирования расширенного луча, состоящего из суперпозиции трех парциальных лучей. В этом случае естественным способом расширения луча является добавление к центральному лучу двух симметричных относительно центрального луча дополнительных лучей. Пусть центральный парциальный луч ориентирован в заданном направлении θ_0 , а два боковых парциальных луча смещены в противоположных относительно центрального луча направлениях на угол θ_1 .

В этом случае результирующее амплитудно-фазовое распределение для формирования расширенного луча будет рассчитываться по формуле

$$\begin{aligned} w(x) &= w_0(x) \left(1 + a \left(\exp(ikx \sin \theta_1) + \exp(-ikx \sin \theta_1) \right) \right) = \\ &= w_0(x) \left(1 + 2a \cos(kx \sin \theta_1) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $w_0(x)$ – амплитудно-фазовое распределение в раскрыве, обеспечивающее формирование центрального парциального луча в направлении u_0 . Здесь $u = 0,5kL \sin \theta$ – обобщенная координата; k – волновое число; L – размер раскрыва антенны; $u_0 = 0,5kL \sin \theta_0$ – направление максимума формируемой ДН и центрального парциального луча; $u_1 = 0,5kL \sin \theta_1$ – смещение боковых парциальных лучей относительно максимума формируемой ДН; a – амплитуды отклоненных боковых парциальных лучей.

Цель алгоритма состоит в формировании луча заданной ширины за счет оптимизации параметра θ_1 и комплексного коэффициента a , определяющего амплитуду и фазу дополнительных парциальных лучей, при которых будут реализованы требования к максимальному значению коэффициента направленного действия (КНД) и к ширине луча по уровню половинной мощности.

3. Обоснование алгоритма. Пусть ДН парциального луча описывается функцией $f(u-u')$, где u' – направление максимума парциального луча. Тогда ненормированная формируемая ДН описывается суммой:

$$F(u) = f(u-u_0) + a \left(f(u+u_1-u_0) + f(u-u_1-u_0) \right). \quad (2)$$

Норма ДН определяется суммой

$$\|F(u)\| = |F(u_0, a, u_1)| = f(0) + a \left(f(u_1) + f(-u_1) \right) = 1 + a \left(f(u_1) + f(-u_1) \right). \quad (3)$$

При формировании ДН с заданной шириной луча по уровню половинной мощности необходимо потребовать выполнения следующих условий:

$$0,707 |F(u_0, a, u_1)| = f(\pm \Delta) + a \left(f(\pm \Delta + u_1) + f(\pm \Delta - u_1) \right). \quad (4)$$

В выражении (4) и в дальнейшем параметр Δ соответствует направлению, которое отличается от направления максимума ДН u_0 на полуширину луча заданной ДН.

Параметр a с использованием выражений (3) и (4) можно выразить, как функцию от u_1, Δ :

$$\begin{aligned} (1 + a(f(u_1) + f(-u_1)))0,707 &= f(\Delta) + a(f(\Delta + u_1) + f(\Delta - u_1)), \\ a0,707(f(u_1) + f(-u_1)) - (f(\Delta + u_1) + f(\Delta - u_1)) &= f(\Delta) - 0,707, \\ a &= (f(\Delta) - 0,707) \left(0,707(f(u_1) + f(-u_1)) - (f(\Delta + u_1) + f(\Delta - u_1)) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как при формировании расширенного луча параметр Δ превышает полуширину центрального парциального луча, то $f(\Delta) < 0,707$, а, следовательно, числитель отношения (5) всегда имеет отрицательный знак. При $u_1 \rightarrow 0$ получаем, что

$$0,707(f(u_1) + f(-u_1)) \xrightarrow{u_1 \rightarrow 0} 1,414; \quad (6)$$

$$(f(\Delta + u_1) + f(\Delta - u_1)) \xrightarrow{u_1 \rightarrow 0} 1,414. \quad (7)$$

Отсюда следует, что при малых углах отклонения боковых парциальных лучей от направления максимума ДН боковые парциальные лучи противофазны центральному парциальному лучу. Однако с увеличением значения u_1 точка $\Delta + u_1$ может принадлежать области первого бокового лепестка, а точки $u_1, -u_1, \Delta - u_1$ – главному лучу. В этом случае знаменатель выражения (5) сначала обращается в нуль, а с дальнейшим ростом u_1 меняет свой знак на отрицательный. Таким образом, множеству значений u_1 могут соответствовать весовые коэффициенты a , при которых парциальные лучи в сумме (2) складываются противофазно или синфазно. В связи с этим следует искать такое значение параметра u_1 , которое является оптимальным. В качестве критерия естественным является максимальное значение КНД или минимальное значение интеграла вида

$$Q = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{|F(u)|^2}{|F(u_0)|^2} d\theta. \quad (8)$$

С учетом полученных ранее соотношений получим выражение

$$Q = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{|f(u-u_0) + af(u-u_0+u_1) + af(u-u_0-u_1)|^2}{(1+2af(u_1))^2} d\theta, \quad (9)$$

Значение угла θ_1 может быть найдено из решения оптимизационной задачи по критерию минимума (9).

где $f(u-u_0)$, $f(u-u_0+u_1)$, $f(u-u_0-u_1)$ – соответственно диаграммы направленности центрального парциального и двух боковых парциальных лучей;

Амплитуду парциальных лучей находим в соответствии с выражением

$$a = (f(\Delta) - 0,707)(0,707(f(u_1) + f(-u_1)) - (f(\Delta + u_1) + f(\Delta - u_1)))^{-1}, \quad (10)$$

где Δ – полуширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности,

Пусть необходимо сформировать ДН ФАР с заданной шириной луча по уровню половинной мощности с помощью трех одинаковых парциальных лучей, первый из которых ориентирован в направлении u_0 , а два других – в направлениях $u_0 + u_1$ и $u_0 - u_1$ соответственно.

Из анализа выражения (9) следует, что минимальное значение числителя достигается в случае несинфазных парциальных лучей. В то же время максимальное значение знаменателя связано с увеличением амплитуд парциальных лучей при условии синфазности всех трех парциальных лучей.

Поиск экстремума (9) может быть осуществлен любым известным методом.

Таким образом, предлагаемый алгоритм формирования расширенной диаграммы направленности фазированной антенной решетки состоит в выполнении следующих действий:

1) выбор значения параметра u_1 , обеспечивающего минимум (9) с учетом того, что параметр a также однозначно связан с величиной u_1 ;

2) расчет параметра a с использованием (10);

3) формирование амплитудно-фазового распределения в раскрыве ФАР в виде суммы (1).

Предложенный алгоритм является основой технологического решения [21], защищенного патентом РФ.

4. Проверка работоспособности алгоритма. Проверка сделанных выводов подтверждается на следующем примере.

Пусть

$$f(u - u') = \frac{\sin(u - u')}{u - u'}. \quad (11)$$

Парциальный луч вида (11) формируется с помощью идеальной линейной ФАР.

В случае необходимости более существенного расширения луча предлагаемый алгоритм может использоваться для следующих трех лучей путем повторения перечисленных шагов.

На рис. 1 показан процесс формирования расширенного луча ФАР с шириной 4 градуса отклонённого на $\theta_0 = -30^\circ$ ($\theta_1 = 2,52^\circ$, $a = -1,4774$).

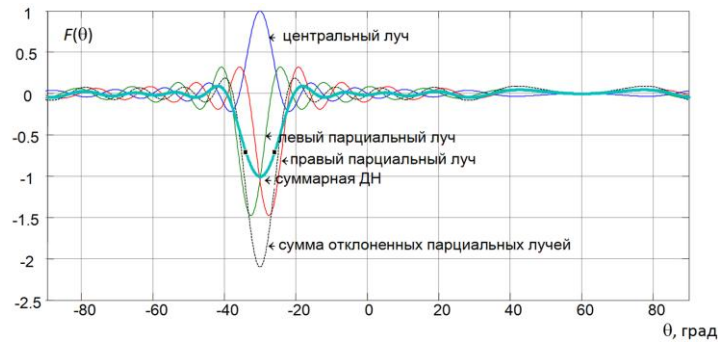


Рис. 1. Процесс формирования расширенного луча ФАР с шириной 4° , отклонённого на $\theta_0 = -30^\circ$ ($\theta_1 = 2,52^\circ$, $a = -1,4774$)

На рис. 2 приведен график, иллюстрирующий поиск минимального значения интеграла от ДН по мощности. Как следует из анализа этого графика, максимальное значение КНД достигается при $\theta_1 = 2,52^\circ$.

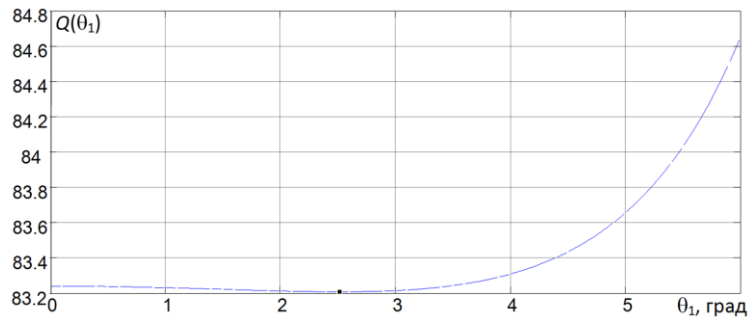


Рис. 2. Поиск минимального значения интеграла от ДН по мощности

На рис. 3 проиллюстрирован процесс формирования расширенного луча линейной ФАР с шириной 5° , отклонённого на угол $\theta_0 = -20^\circ$ ($\theta_1 = 3,97^\circ$, $a = 2,6576$).

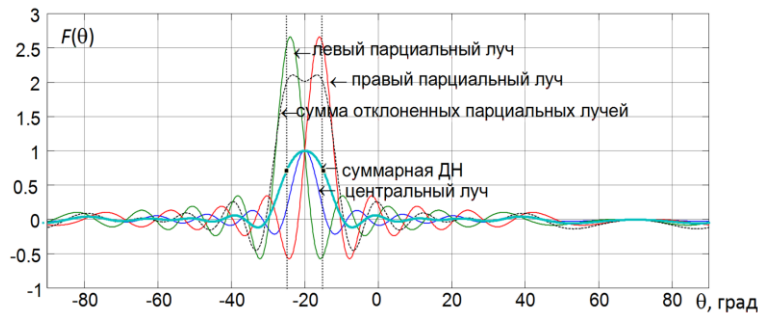


Рис. 3. Процесс формирования расширенного луча линейной ФАР с шириной 5° , отклонённого на угол $\theta_0 = -20^\circ$ ($\theta_1 = 3,97^\circ$, $a = 2,6576$)

Из анализа результатов на рис. 3 следует, что при увеличении заданной ширины луча сумма двух крайних парциальных лучей может содержать два одинаковых экстремума. Очевидно, что при разведении максимумов ширине луча на некоторый угол форма суммарного луча будет искажаться. Сначала суммарный луч будет содержать две вершины. Эта ситуация будет означать, что предел применимости предлагаемого алгоритма достигнут. Проведенные численные исследования показали, что суммарный луч содержит один максимум при условии, что левый и правый парциальные лучи пересекаются по уровню первых нулей луча. Применительно к рассматриваемой антенне это соответствует ширине суммарного луча примерно $13,6$ градусов и смещению левого и правого парциальных лучей на угол $10,2$ градусов относительно центрального луча. Правый и левый лучи при этом пересекаются на уровне «нулей» ДН. Появление двух максимумов ДН говорит о том, что для применения предлагаемого алгоритма необходимо использовать более широкие парциальные лучи.

На рис. 4 изображен поиск максимального КНД линейной ФАР при заданной ширине луча 5° (минимальное значение интеграла от ДН по мощности достигается при $\theta_1 = 3,97^\circ$).

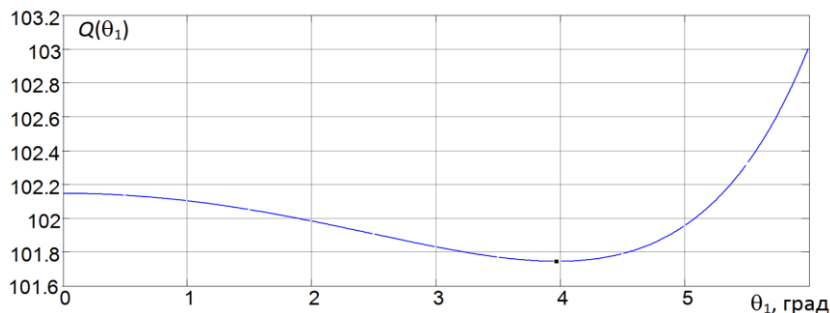


Рис. 4. Поиск максимального КНД линейной ФАР при заданной ширине луча 5° (минимальное значение интеграла от ДН по мощности достигается при $\theta_1 = 3,97^\circ$)

Для выявления особенностей формирования расширенной ДН взята линейная антенна длиной $L = 10\lambda$ и шириной луча по половинной мощности $\Delta = 4^\circ$. Полуширина парциального луча по уровню половинной мощности составляет $0,5 \cdot 50,8\lambda / L = 2,54^\circ$, а по уровню нуля – $0,5 \cdot 114,4\lambda / L = 5,74^\circ$.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды отклоненных парциальных лучей от смещения парциального луча $a(u_1)$.

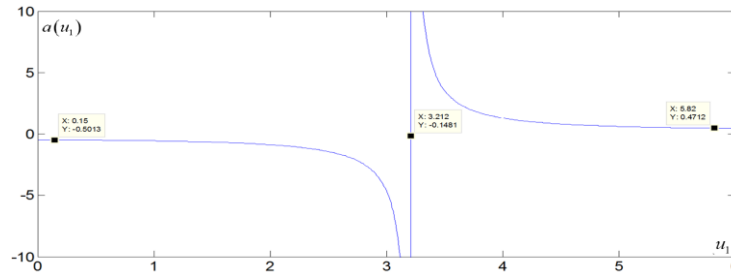


Рис. 5. Зависимость амплитуды отклоненных парциальных лучей от смещения

Сопоставление представленной на рисунке 5 зависимости и ширины парциальных лучей показывает, что неопределенность зависимости, описываемой выражением (7), которой соответствует вертикальная асимптота при $\theta_1 = 3,21^\circ$, возникает в области первого бокового лепестка парциального луча, смещенного в направлении $\theta_1 = -3,21^\circ$.

На рис. 6 представлена ДН с лучами одинаковой ширины.

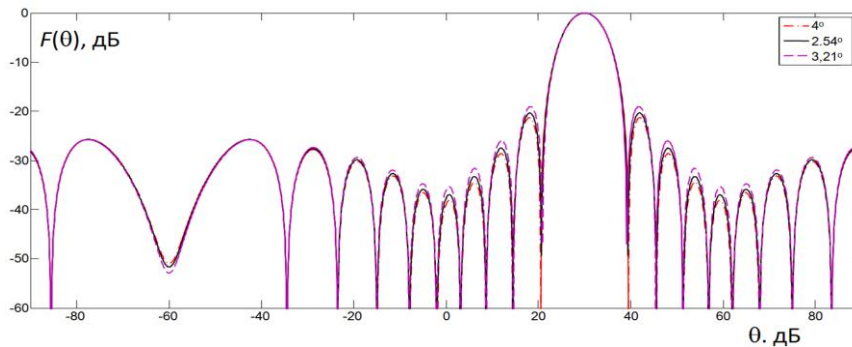


Рис. 6. Расширенные ДН с лучами одинаковой ширины при разных значениях параметра θ_1

Выводы. Проведенные исследования показывают возможность формирования расширенных лучей в линейной антенне с использованием аналитической процедуры, состоящей в том, что при использовании для формирования парциальных лучей амплитудно-фазового распределения $w_0(x) = |w_0(x)| \exp(ikx \sin \theta_0)$, а величина углового смещения двух парциальных лучей θ_1 определяется из условия минимизации (9), а окончательное амплитудно-фазовое распределение – по формуле (1). При этом в отличие от известных методов формирования ДН несколькими парциальными лучами обеспечивается достижение максимального КНД. Пред-

лагаемый алгоритм может использоваться до тех пор, пока суммарный луч имеет одну вершину. Это условие выполняется, если угол между правым и левым парциальными лучами не превышает ширины парциальных лучей по уровню нулей.

Таким образом, представленный алгоритм отличается от известных операций выбора оптимального значения параметра θ_1 . Приведенные результаты демонстрируют работоспособность алгоритма и простоту его реализации. По сложности данный алгоритм сопоставим с алгоритмом формирования расширенного луча, приведенным в работе [6], однако, имеет ограничения, связанные с шириной формируемой ДН. В случае необходимости предложенный алгоритм можно использовать повторно для более существенного расширения лучей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника. 2003. – 632 с.
2. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. – М.: Техносфера. 2014. – 112 с.
3. Айзенберг Г.З., Терёшин О.М., Ямпольский В.Г. Антенны УКВ. Т. 2. – М.: Связь, 1997. – 288 с.
4. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М.: Энергия. 1975. – 528 с.
5. Kautz G.M. Phase-only shaped beam synthesis via technique of approximated beam addition // IEEE Trans. on Antennas and Prop. – 1999. – Vol. 47, May 5. – P. 887-894.
6. Грибанов А.Н. Эффективный метод фазового синтеза одномерно расширенных лучей в фазированной антенной решетке // Антенны. – 2007. – № 6 (121). – С. 26-29.
7. Грибанов А.Н., Мосейчук Г.Ф., Титов А.Н. Фазовый синтез расширенных лучей ФАР методом веерных парциальных диаграмм // Антенны. – 2008. – № 9 (136). – С. 15-20.
8. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). – М.: Сов. радио, 1974. – 232 с.
9. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. – М.: Сов. Радио. 1980. – 296 с.
10. Минкович Б.М., Яковлев В.П. Теория синтеза антенн. – М.: Советское радио. 1969. – 296 с.
11. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. Кн. 1. – М.: ИПРЖР. 2002. – 72 с.
12. Зелкин Е.Г. Построение излучающей системы по заданной диаграмме направленности. – М.: Госэнергоиздат. 1963. – 272 с.
13. Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Метод амплитудно-фазового синтеза антенной решетки на основе управления веером неидентичных парциальных лучей // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 10. – С 955-963. – DOI: 10.30898/1684-1719.2018.8.8.
14. Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatsky V.V., Shelkopyasov S.A. Method of amplitude-phase synthesis the planar antenna arrays on the principle of the partial beams with adjustable beamwidth // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2017. – P. 331-333. – DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103665.
15. Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Метод фазового синтеза антенной решетки по принципу управления пространственными положениями парциальных лучей // Антенны. – 2014. – № 7. – С. 23-29.
16. Безуглов А.А., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Метод многокритериального синтеза антенных решеток на основе функционала энергетической оптимизации и управления веером парциальных лучей // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 7. – С. 711-719. – DOI: 10.1134/S0033849418070045.
17. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 272 с.
18. Назаров А.Н., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и техника. 2003. – 384 с.

19. Cen L., Yu Z.L., Ser W., and Cen W. Linear Aperiodic Array Synthesis Using an Improved Genetic Algorithm // IEEE Trans. On Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60, No. 2. – P. 895-902.
20. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком. 2006. – 452 с.
21. Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Помысов А.С., Шацкий В. В., Шелкоплясов С.А. Способ формирования расширенной диаграммы направленности фазированной антенной решетки // Патент РФ № 2644456, МПК H01Q 3/26, приор. 30.12.2016 г., опубл. 12.02.2018 г. Бюл. № 5.

REFERENCES

1. Ustroystva SVCh i antennoy. Proektirovanie fazirovannykh antennoy reshetok [Microwave devices and antennas. Design of phased array antennas], ed. by D.I. Voskresenskogo. Moscow: Radiotekhnika. 2003, 632 p.
2. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Okonnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza signalov [Window functions for harmonic signal analysis]. Moscow: Tekhnosfera. 2014, 112 p.
3. Ayzenberg G.Z., Tereshin O.M., Yampol'skiy V.G. Antenny UKV [Antennas VHF]. T. 2. Moscow: Svyaz', 1997, 288 p.
4. Markov G.T., Sazonov D.M. Antenny [Antennas]. Moscow: Energiya. 1975, 528 p.
5. Kautz G.M. Phase-only shaped beam synthesis via technique of approximated beam addition, *IEEE Trans. on Antennas and Prop.*, 1999, Vol. 47, May 5, pp. 887-894.
6. Griбанov A.N. Effektivnyy metod fazovogo sinteza odnomerno rasshirennykh luchey v fazirovannoy antennoy reshetke [An effective method for phase synthesis of one-dimensionally expanded beams in a phased antenna array], *Antenny [Antennas]*, 2007, No. 6 (121), pp. 26-29.
7. Griбанov A.N., Moseychuk G.F., Titov A.N. Fazovyy sintez rasshirennykh luchey FAR metodom veerennykh partsial'nykh diagramm [Phase synthesis of extended phased array beams using the partial fan diagram method], *Antenny [Antennas]*, 2008, No. 9 (136), pp. 15-20.
8. Bakhrakh L.D., Kremenetskiy S.D. Sintez izluchayushchikh sistem (teoriya i metody rascheta) [Synthesis of radiating systems (theory and calculation methods)]. Moscow: Sov. radio, 1974, 232 p.
9. Zelkin E.G., Sokolov V.G. Metody sinteza antenn: Fazirovannyye antennoye reshetki i antennoye nepreryvnoye raskryvnoye [Antenna synthesis methods: Phased array antennas and continuous aperture antennas]. Moscow: Sov. Radio. 1980, 296 p.
10. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. Teoriya sinteza antenn [Antenna synthesis theory]. Moscow: Sovetskoye radio. 1969, 296 p.
11. Zelkin E.G., Kravchenko V.F. Zadachi sinteza antenn i novyye metody ikh resheniya [Antenna synthesis problems and new methods for solving them]. Book 1. Moscow: IPRZhR. 2002, 72 p.
12. Zelkin E.G. Postroyeniye izluchayushchey sistemy po zadannoy diagramme napravlennoy [Construction of a radiating system according to a given radiation pattern]. Moscow: Gosenergoizdat. 1963, 272 p.
13. Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatskiy V.V. Metod amplitudno-fazovogo sinteza antennoy reshetki na osnove upravleniya veerom neidentichnykh partsial'nykh luchey [Method of amplitude-phase synthesis of an antenna array based on control of a fan of non-identical partial beams], *Radiotekhnika i elektronika [Radiotekhnika i elektronika]*, 2017, Vol. 62, No. 10, pp. 955-963. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.8.8.
14. Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatskiy V.V., Shelkoplyasov S.A. Method of amplitude-phase synthesis the planar antenna arrays on the principle of the partial beams with adjustable beam-width, *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoye, Russia, 2017*, pp. 331-333. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103665.
15. Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatskiy V.V. Metod fazovogo sinteza antennoy reshetki po printsipu upravleniya prostranstvennyimi polozheniyami partsial'nykh luchey [Method of phase synthesis of an antenna array based on the principle of controlling the spatial positions of partial beams], *Antenny [Antennas]*, 2014, No. 7, pp. 23-29.

16. *Bezuglov A.A., Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Shatskiy V.V.* Metod mnogokriterial'nogo sinteza antennykh reshetok na osnove funktsionala energeticheskoy optimizatsii i upravleniya veerom partial'nykh luchey [Method of multicriteria synthesis of antenna arrays based on the functional of energy optimization and control of a fan of partial rays], *Radiotekhnika i elektronika* [Radiotekhnika I elektronika], 2018, Vol. 63, No. 7, pp. 711-719. DOI: 10.
17. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 272 p.
18. *Nazarov A.N., Loskutov A.I.* Neyrosetevyye algoritmy prognozirovaniya i optimizatsii system [Neural network algorithms for forecasting and optimization of systems]. Saint Petersburg: Nauka i tekhnika. 2003, 384 p.
19. *Cen L., Yu Z.L., Ser W., and Cen W.* Linear Aperiodic Array Synthesis Using an Improved Genetic Algorithm, *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, 2012, Vol. 60, No. 2, pp. 895-902.
20. *Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L.* Neyronnyye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom. 2006, 452 p.
21. *Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Pomysov A.S., Shatskiy V.V., Shelkopyasov S.A.* Sposob formirovaniya rasshirennoy diagrammy napravlenosti fazirovannoy antennoy reshetki [Method for forming an extended radiation pattern of a phased array antenna]. Patent RF No. 2644456, МРК Н01Q 3/26, prior. 30.12.2016 g., published 12.02.2018. Bull. No. 5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Шелкоплясов Сергей Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: shelksa@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79888918482; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Shelkopyasov Sergey Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: shelksa@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79888918482; The department of antennas and radio transmitters; post-graduate student.