



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-46-54>

УДК 621.396.96

Обобщенные характеристики расширенных секторных лучей фазированной антенной решетки, полученных масштабированием фазовых распределений

О. В. Павлович, А. Н. Грибанов, С. Е. Гаврилова, Г. Ф. Мосейчук, И. А. Кузнецов

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация

Рассматриваются особенности фазового синтеза расширенных секторных лучей фазированной антенной решетки по методу веерных парциальных диаграмм. Парциальные диаграммы направленности формируются парами соседних излучателей. Результаты синтеза обладают свойством масштабирования, позволяющего на основе одного варианта расширения получить множество других посредством умножения величин сдвига фаз сигналов на всех излучателях на одну и ту же величину. Показано, что при расширении луча по суммарному каналу в разностном канале формируется диаграмма направленности с расширенным угловым расстоянием между максимумами. Проведен анализ начальных участков разностных диаграмм направленности при формировании расширенных лучей суммарной диаграммы направленности. Проанализировано поведение обобщенных характеристик расширенных лучей в диапазоне коэффициентов расширения. Сделан вывод о возможности оперативного и предсказуемого управления шириной разностной диаграммы направленности фазированной антенной решетки.

Ключевые слова: фазовый синтез, фазированная антенная решетка, диаграмма направленности, расширение луча, масштабирование

Для цитирования: Павлович О. В., Грибанов А. Н., Гаврилова С. Е., Мосейчук Г. Ф., Кузнецов И. А. Обобщенные характеристики расширенных секторных лучей фазированной антенной решетки, полученных масштабированием фазовых распределений // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 46–54. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-46-54>

For citation: Pavlovich O. V., Griбанov A. N., Gavriloва S. E., Moseychuk G. F., Kuznetsov I. A. Generalized characteristics of expanded sector beams formed by phased antenna arrays obtained by scaling phase distributions // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 1. P. 46–54. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-46-54>

Поступила 06.11.2019

Одобрена 24.01.2020

Опубликована 21.05.2020

Введение

Основная особенность работы фазированной антенной решетки (ФАР) в составе многофункциональной радиолокационной станции (РЛС) состоит в обеспечении возможности быстрого изменения характеристик излучения. Это может быть реализовано только за счет управления фазами возбуждения излучателей при известном и фиксированном амплитудном распределении (АР). Известно значительное число теоретических работ по фазовому синтезу лучей ФАР, например [1–5]. В большинстве из них подразу-

меваются наличие заранее рассчитанных и сохраненных в памяти ЭВМ наборов фаз возбуждения элементов для всевозможных режимов работы РЛС. В то же время быстроедействие современных вычислительных средств, входящих в состав ФАР, позволяет производить расчет фазового распределения (ФР) в реальном времени непосредственно на основе быстродействующих алгоритмов. При этом желательно, чтобы операции для расчета новых значений фаз были максимально простыми. В данной работе рассматривается метод веерных парциальных диаграмм направленности (ВПДН), позволяющий на основе одного варианта расширения получить множество других посредством умножения величин сдвига фаз сигналов на всех излучателях на одну

© Павлович О. В., Грибанов А. Н., Гаврилова С. Е., Мосейчук Г. Ф., Кузнецов И. А., 2020



и ту же величину. Тем самым в процессе работы РЛС в рамках одной заданной формы расширенного луча можно сформировать разные значения ширины луча, обеспечив оперативную приспособляемость ДН ФАР к окружающей радиолокационной обстановке.

Формирование расширенных лучей методом ВПДН

В основу метода ВПДН положен принцип формирования расширенных лучей с использованием парциальных ДН, которые образованы парами соседних излучателей [6–10]. Соседние излучатели линейной ФАР, как правило, располагаются на расстоянии $d < \lambda$, поэтому парциальные ДН представляют собой широкий луч с двумя боковыми лепестками. Рассмотрим особенности формирования расширенных секторных лучей с использованием таких парциальных ДН.

На рисунке 1 приведен характерный пример формирования расширенного луча на примере ФАР, состоящей из $M = 30$ излучателей, расположенных с шагом $d = 0,5\lambda$. Использовалось АР вида «косинус на пьедестале» с уровнем поля на краю, равным $0,25$. Луч расширен по методу ВПДН примерно в 9 раз. В операции расширения участвуют $(M - 1) = 29$ парциальных ДН. Из рисунка видно, что уровни лучей довольно низки, уровень максимального парциального луча (от центральных пар излучателей) по амплитуде равен $\sim 0,054$, что составляет $\sim -25,3$ дБ. Уровень луча с минимальной амплитудой (от крайних пар) приблизительно в 4 раза меньше.

В соответствии с алгоритмом расширения каждый парциальный луч перемещается в заданное направление (рис. 1б, в). При отклонении парциального луча его максимум смещается,

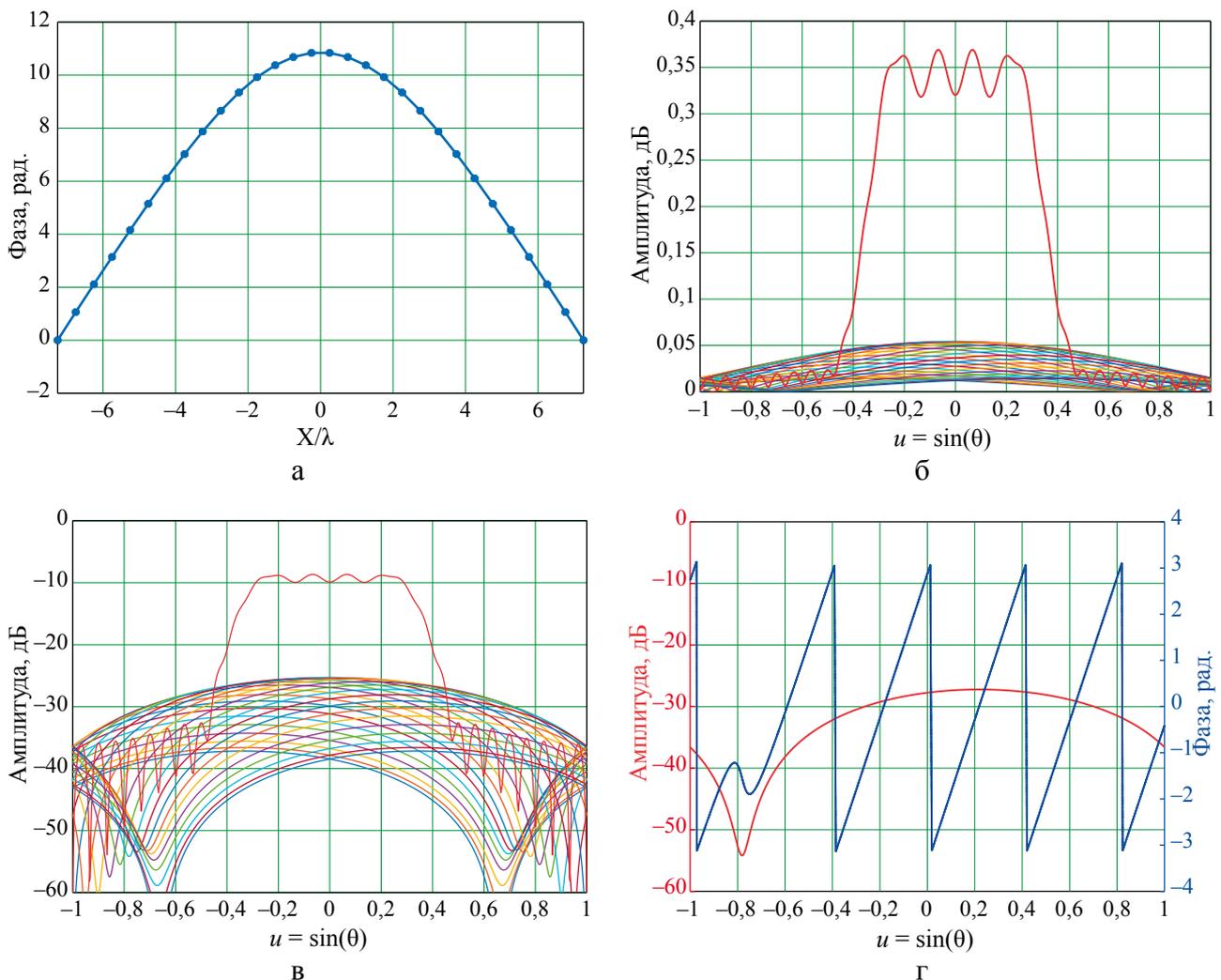


Рис. 1. Формирование расширенного луча методом ВПДН: а – фазовое распределение в раскрытии ФАР; б – амплитудные ДН ФАР и парциалов; в – ДН ФАР и парциалов в децибелах; г – амплитудная и фазовая ДН 20-го парциала



наклон фазовой составляющей ДН также изменяется (рис. 1г). В результате векторной суперпозиции множества парциальных ДН образуется расширенный луч. Причем большая часть мощности парциальных ДН равномерно распределяется в угловой области расширения, а меньшая – вне этой области. А в области расширенного луча поля парциальных ДН векторно складываются так, что результирующая амплитуда возрастает, а за пределами луча поля компенсируются. Из анализа приведенных данных можно понять, насколько точными должны быть выбраны параметры управления множеством парциальных ДН, чтобы сформировать расширенный луч.

Следует отметить, что аналогичный вариант расширения луча можно получить и с использованием классического метода геометрической оптики (ГО) [4, 5]. В большинстве случаев фазового синтеза результаты, полученные по методам ГО и ВПДН, совпадают. Однако использование парциальных ДН в методе ВПДН позволяет иметь большую гибкость синтеза и обеспечивает наглядность проведения самой операции синтеза.

Свойства масштабирования расширенных лучей

Свойство масштабирования заключается в наличии определенных соотношений между фазовым распределением и шириной луча [9, 10]. Если решение фазового синтеза обладает свойством масштабирования, то можно проводить операцию дополнительного расширения лучей ФАР на основе ранее найденного варианта расширения. Таким образом, если в ФАР необходимо реализовать семейство однотипных расширенных лучей, то достаточно найти по методу ВПДН одно первичное ФР, расширяющее луч в α раз, а все остальные лучи с расширением в $\alpha\beta$ получать посредством умножения первичного ФР на коэффициент β .

При проведении операции масштабирования необходимо учитывать следующие наиболее важные свойства:

– для операции масштабирования в общем случае необходимо использовать первичное ФР, не приведенное к интервалу 2π ;

– при операции масштабирования в β раз границы начала и конца луча изменяются в β раз по переменной $u = \sin(\theta)$;

– при масштабировании в β раз луча, первоначально расширенного в α раз по методу ВПДН, формируются те же ФР и форма луча, которые были бы получены при первоначальном расширении луча по методу ВПДН в $\alpha\beta$ раз.

Необходимо также принимать во внимание следующие обстоятельства:

– коэффициент масштабирования, так же как и коэффициент расширения луча, имеет ограничение на максимальное значение. Границы расширенного луча не могут превышать размеры области видимости;

– метод ВПДН и свойство масштабирования описаны в применении к множителю направленности (МН) многоэлементной ФАР, т. е. для случая использования всенаправленных независимых излучателей. Для реальных ФАР изложенная теория справедлива при синтезе и масштабировании лучей в угловой области, где ДН одного излучателя (диаграмма сканирования) близка к единице. При синтезе более широких лучей необходимо требуемую форму луча корректировать с учетом диаграммы сканирования;

– в ФАР с симметричным АР, при формировании в суммарном канале секторных лучей, расширенных по методу ВПДН, в разностном канале формируется ДН с расширенным угловым расстоянием между максимумами и монотонным изменением уровня.

Характеристики разностной ДН при расширении луча суммарной ДН

Рассмотрим характеристики расширенных секторных лучей на примере ФАР с круглым раскрытием, состоящей из ~ 800 излучателей (рис. 2). На рисунке приведены примеры ФР (рис. 2б) и расширенных секторных лучей по суммарному каналу (рис. 2в), полученных методом масштабирования относительно первично расширенного луча в 3 раза (ФР и ДН зеленого цвета) и серия соответствующих ДН по разностному каналу (рис. 2г). Масштабирование проводилось с одинаковыми коэффициентами $\beta = 2$, поэтому лучи ДН по суммарному

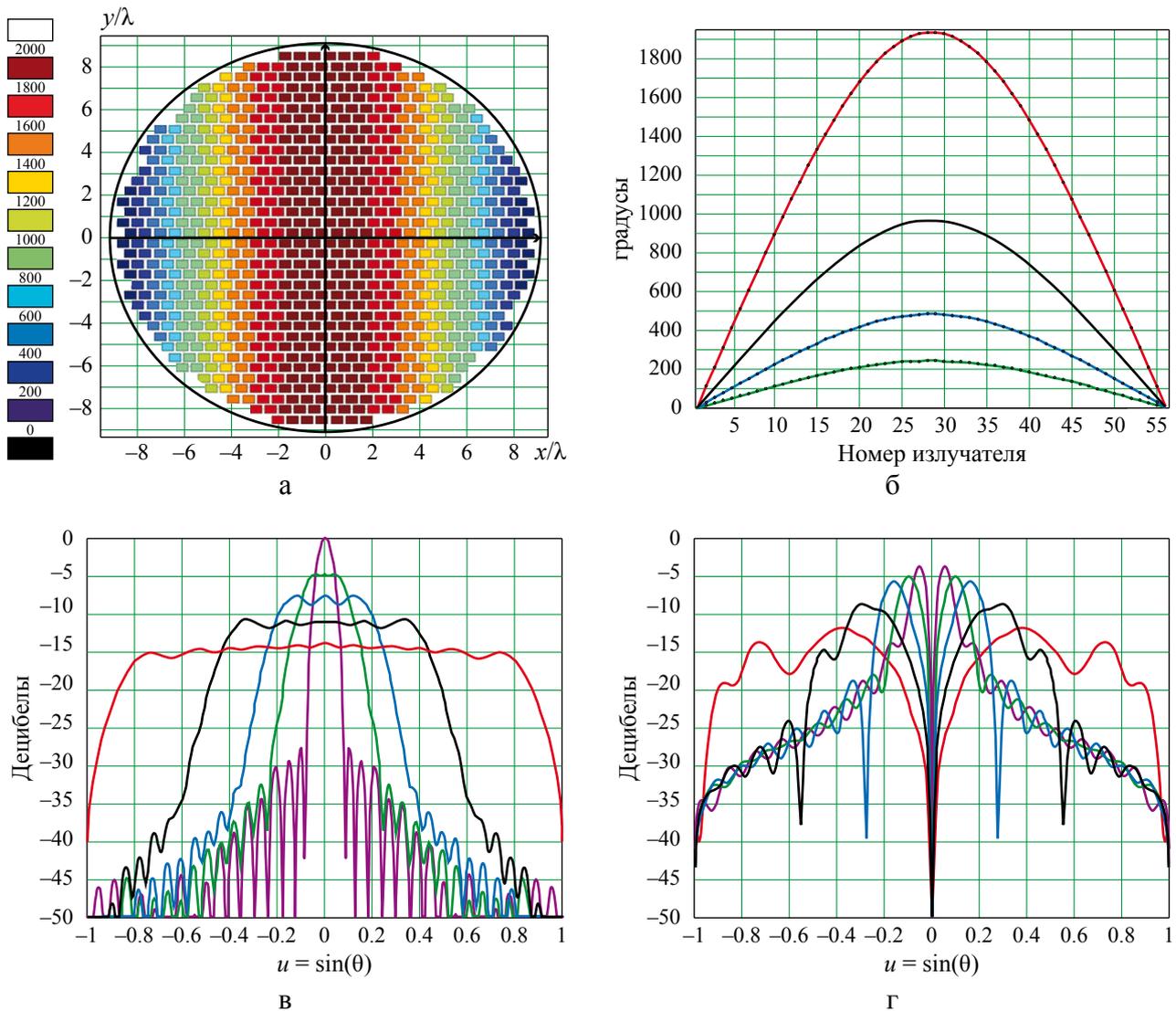


Рис. 2. Примеры расширения секторных лучей ФАР: а – фазовое распределение в раскрыве ФАР; б – фазовые распределения в эквивалентном линейном раскрыве; в – ДН по суммарному каналу; г – ДН по разностному каналу. Коэффициенты расширения луча по суммарному каналу: $K_{p-3дБ} = 1$; $K_{p-3дБ} = 3$; $K_{p-3дБ} = 6$; $K_{p-3дБ} = 12$; $K_{p-3дБ} = 24$.

каналу расширены в 3, 6, 12, 24 раза по переменной $u = \sin(\theta)$.

При расчете ДН использовалась диаграмма одного излучателя в составе решетки вида $F_1(\theta) = \cos(\theta)$. Необходимо принимать во внимание, что масштабируются ФР и форма луча только по суммарному каналу. Форма разностной ДН и ее ФР в общем случае свойством масштабирования в полном его смысле не обладают, кроме частных случаев нечетного числа коэффициентов масштабирования $\beta = (2n + 1)$. Да и в этих случаях можно говорить лишь о наличии расширенного углового диапазона начального участка разностной ДН. Из приведенных данных следует, что этот диапазон расши-

ряется медленнее, чем луч суммарной ДН, к тому же при расширении изменяется форма восходящего участка и значительно возрастают уровни боковых лепестков.

Фактор искажения формы начального участка разностной ДН имеет важное практическое значение. Для оценки искажений рассмотренных выше вариантов расширения луча были проведены аппроксимации начальных участков разностных ДН аналитическими функциями с оценками погрешностей. Исследования показали, что форма начальных участков разностных ДН при масштабировании луча суммарной ДН имеет четко выраженные закономерности поведения. Причем закономерности являются наиболее

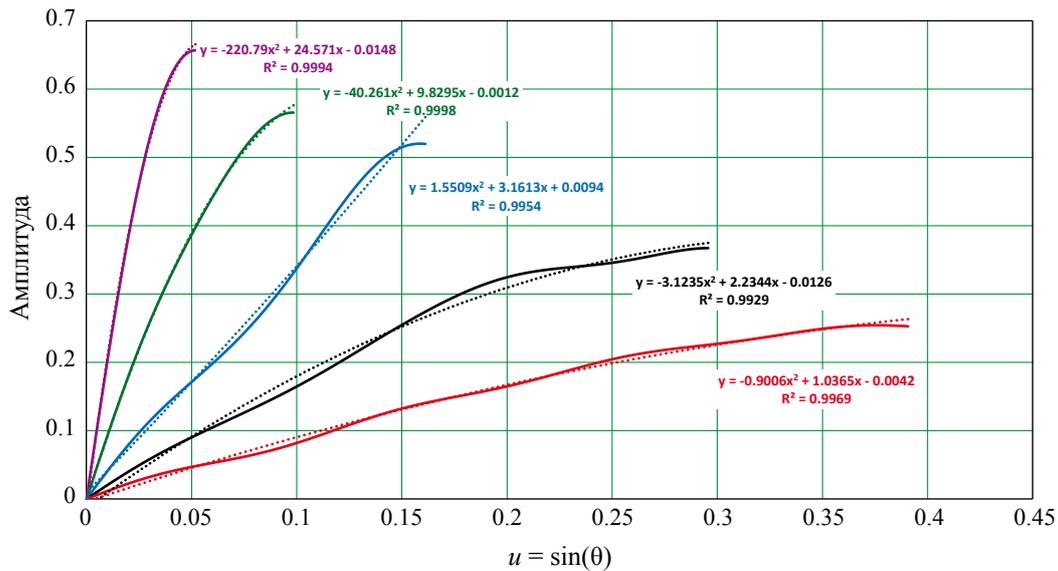


Рис. 3. Обобщенные параметры расширенных лучей по разностному азимутальному каналу
 — разностная ДН при $K_{p-3дБ}=1$; — разностная ДН при $K_{p-3дБ}=3$; — разностная ДН при $K_{p-3дБ}=6$; — разностная ДН при $K_{p-3дБ}=12$; — разностная ДН при $K_{p-3дБ}=24$; — полиномиальная (разностная ДН при $K_{p-3дБ}=1$); — полиномиальная (разностная ДН при $K_{p-3дБ}=3$); — полиномиальная (разностная ДН при $K_{p-3дБ}=6$); — полиномиальная (разностная ДН при $K_{p-3дБ}=12$); — полиномиальная (разностная ДН при $K_{p-3дБ}=24$)

простыми при использовании по оси X значений переменной $u = \sin(\theta)$. Это вполне объяснимо, поскольку в математическом выражении ДН параметр u присутствует в явном виде. Результаты математического моделирования приведены на рисунке 3 и в таблице 1.

На рисунке 3 приведены начальные участки разностной ДН до ее максимума для лучей, показанных на рисунке 2. Оказалось, что с очень высокой точностью эти участки описываются полиномами порядков от $N = 2$ до $N = 4$ (табл. 1), причем при практическом применении можно ограничиться и полиномами 1-го и 2-го порядков, особенно для лучей с малым расширением и на ограниченном начальном участке. Аппроксимация проводилась в MS Excel, в качестве показателя достоверности использовался коэффициент детерминации R^2 .

Обобщенные параметры расширенных лучей

Наибольший интерес представляют обобщенные характеристики, рассчитанные в диапазоне коэффициентов расширения. Их анализ позволяет выявить общие закономерности поведения характеристик, важных для практического применения.

На рисунке 4 для выбранной ФАР приведены обобщенные характеристики ДН по суммарному и разностному каналам. Рассчитывался один вариант расширения, все остальные находились методом масштабирования. Для оценки секторного луча использовались собственные нормированные коэффициенты расширения луча по уровням -3дБ ($K_{p-3дБ}$) и -6дБ ($K_{p-6дБ}$), для разностной ДН – нормированное угловое расстояние между первыми максимумами ($K_{p-разн}$). Поэтому значения всех

Таблица 1

Параметры достоверностей аппроксимации R^2

$K_{p-3дБ}$	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
1	0.9502	0.9994	1	1
3	0.9702	0.9998	0.9998	1
6	0.995	0.9954	0.9961	0.9999
12	0.9608	0.9929	0.9975	0.9978
24	0.9796	0.9969	0.999	0.999

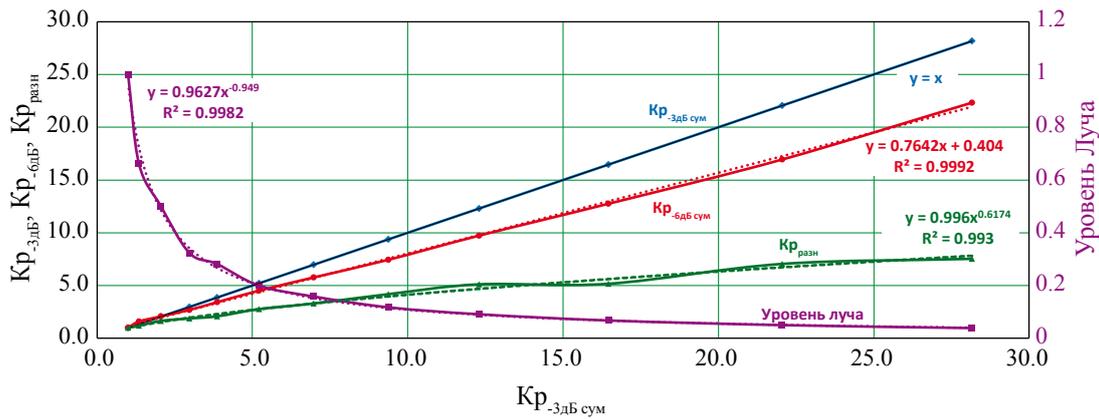


Рис. 4. Обобщенные параметры расширенных лучей

— коэффициент расширения по уровню -3дБ; — коэффициент расширения по уровню -6дБ; — угловое расстояние между первыми максимумами разностной ДН; — уровень мощности расширенного луча; — линейная (коэффициент расширения по уровню -3дБ); линейная (коэффициент расширения по уровню -6дБ); - - - - - степенная (угловое расстояние между первыми максимумами разностной ДН); степенная (уровень мощности расширенного луча)

трех зависимостей коэффициентов расширения начинаются с единицы. Для суммарной ДН также контролировался уровень мощности расширенного луча, нормированный на уровень луча синфазного раскрытия. Для коэффициентов расширения использовалась левая вертикальная ось графика, для уровня расширенного луча – правая.

Для рассматриваемой ФАР максимальные значения коэффициентов расширения достигают величин: $Kp_{-3дБ} \approx 28$, $Kp_{-6дБ} \approx 22$, $Kp_{разн} \approx 7,5$. Наличие приемлемой формы разностной ДН обусловлено симметричностью исходного АР и ФР, расширяющего луч суммарной ДН.

Для приведенных параметров определялись приближенные аналитические зависимости. Полученные величины достоверностей аппроксимации для всех зависимостей не хуже $R^2 = 0,99$. Зависимость уровня расширенного луча от коэффициента расширения выражается формулой $y = 0,9627(Kp_{-3дБ})^{-0,949}$ при $R^2 = 0,9982$, что очень близко к закону обратной пропорциональности.

Примечательно, что луч по уровню -6дБ расширяется строго пропорционально его коэффициенту расширения по уровню -3дБ. Этот показатель характеризует линейную зависимость снижения уровня ДН за пределами формируемого луча, по крайней мере на начальном участке спадания.

Очень важна обобщенная закономерность поведения величины углового разноса

максимумов разностной ДН. График функции имеет существенную нелинейность. Как показали результаты моделирования, эта функция с хорошей точностью подчиняется закономерности $y = 0,996(Kp_{-3дБ})^{0,6174}$ при $R^2 = 0,993$, что близко к закону квадратного корня.

Следует отметить, что отличия полученных результатов от теоретических частично объясняются тем, что алгоритмы расширения луча разработаны для множителя направленности ФАР, а расчеты ДН проводились с использованием ДН одного излучателя вида $F_1(\theta) = \cos(\theta)$. Также сказались наличие колебаний на вершине расширенного луча. Отличия в параметрах расширенных лучей наиболее заметны при больших расширениях, близких к предельным.

Отметим, что, хотя рассмотренные результаты получены для ФАР с определенными геометрическими параметрами и законом возбуждения, есть основания полагать, что описанные эффекты в диапазоне коэффициентов расширения будут аналогичными и для ФАР иного размера и с другим амплитудным распределением в раскрытии.

Выводы

Рассмотрены особенности фазового синтеза лучей, одномерно расширенных по методу ВПДН. Показано, что открытие свойства масштабирования фазовых решений позволяет значительно расширить область использования



результатов фазового синтеза и повысить приспособляемость многофункциональных РЛС к радиолокационной обстановке.

В работе приведены основные свойства и особенности операции масштабирования. Представлен пример, демонстрирующий операцию расширения луча с использованием 29 парциальных ДН.

Проведен анализ поведения обобщенных характеристик секторных лучей в диапазоне изменения коэффициентов расширения луча по суммарному каналу. Наибольшее внимание уделено параметрам ДН разностного канала. В ходе моделирования по методу ВПДН определялся один вариант расширения луча суммарного канала, все остальные варианты находились методом масштабирования фазового распределения этого же канала. Моделирование расширенных лучей, на примере ФАР с круглым раскрытием, состоящим из ~800 излучателей, показало, что:

- максимальные значения коэффициентов расширения луча по суммарному каналу по уровням -3 дБ ($K_{p-3дБ}$) и -6 дБ ($K_{p-6дБ}$) достигают величин: $K_{p-3дБ} \approx 28$, $K_{p-6дБ} \approx 22$;

- при расширении луча по суммарному каналу в разностном канале формируется ДН с расширенным угловым расстоянием между главными максимумами и монотонным изменением уровня;

- форма начального участка разностных ДН описывается полиномами малых порядков;

- нормированное угловое расстояние между первыми максимумами по разностному каналу достигает величины $K_{pразн} \approx 7,5$;

- обобщенная закономерность поведения величины углового разноса максимумов разностной ДН с хорошей достоверностью ($R^2 = 0,993$) подчиняется закономерности $y = 0,996(K_{p-3дБ})^{0,6174}$, что близко к закону квадратного корня.

Полученные результаты позволяют организовать оперативное, предсказуемое и согласованное управление параметрами суммарной и разностной ДН ФАР.

Список литературы

1. Kautz G. M. Phase-only shaped beam synthesis via technique of approximated beam addition //

IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47. No. 5. P. 887–894.

2. Trastoy A., Ares F., Moreno E. Phase-only control of antenna sum and shaped patterns through null perturbation // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2001. Vol. 43. No. 6. P. 45–54.

3. Gatti R. V., Marcaccioli L., Sorrentino R. A novel phase-only method for shaped beam synthesis and adaptive nulling // *33rd European Microwave Conference*. 2003. 7–9 Oct. 2003. Vol. 2. P. 739–742.

4. Chakraborty A., Das B. N., Sanyal G. S. Determination of Phase Functions for a Desired One-Dimensional Pattern // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1981. Vol. AP-29. No. 3. P. 502–506.

5. Инденбом М. В. *Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции*. М.: Радиотехника, 2015. 416 с.

6. Грибанов А. Н. Эффективный метод фазового синтеза одномерно расширенных лучей в фазированной антенной решетке // *Антенны*. 2007. № 6. С. 26–29.

7. Грибанов А. Н., Титов А. Н., Мосейчук Г. Ф. Фазовый синтез расширенных лучей ФАР методом вверных парциальных диаграмм // *Антенны*. 2008. № 9. С. 15–20.

8. Gribanov A. N., Titov A. N., Moseychuk G. F., Gavrilova S. E. Generalized formula for phase synthesis of phased array sector beams // *International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. ICATT'13. September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine. 2013. P. 273–276.

9. Павлович О. В., Грибанов А. Н., Гаврилова С. Е., Мосейчук Г. Ф., Титов А. Н. Масштабирование расширенных лучей ФАР // *XVI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, 6 декабря 2018 г.)*: Материалы конференции. М.: Мир науки, 2018. С. 82–86.

10. Грибанов А. Н., Гаврилова С. Е., Павлович О. В., Мосейчук Г. Ф., Титов А. Н. Метод формирования и масштабирования расширенных лучей фазированной антенной решетки // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2019. № 3. С. 19–29.



Об авторах

Павлович Олег Владимович – инженер 2-й категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, цифровое диаграммообразование, обработка сигналов.

Грибанов Александр Николаевич – канд. техн. наук, начальник сектора Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, измерение и обработка динамических диаграмм направленности.

Гаврилова Светлана Евгеньевна – инженер 1-й категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое моделирование характеристик излучения ФАР и АФАР, фазовый синтез лучей специальной формы, измерение и обработка динамических диаграмм направленности.

Мосейчук Георгий Феодосьевич – начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника, управление формой диаграмм направленности и режимами излучения, методы антенных измерений, в том числе динамические диаграммы направленности, настройка ФАР и АФАР.

Кузнецов Иван Алексеевич – инженер Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: электродинамическое моделирование антенных устройств, радиотехнические системы специального и гражданского назначения.



Generalized characteristics of expanded sector beams formed by phased antenna arrays obtained by scaling phase distributions

Pavlovich O. V., Gribanov A. N., Gavrilova S. E., Moseychuk G. F., Kuznetsov I. A.

Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation

This paper considers specific features of the phase synthesis of expanded sector beams formed by phased antenna arrays by the method of fan partial diagrams. Partial radiation patterns are formed by pairs of adjacent emitters. The synthesis results have the property of scaling, which allows many expansion options to be obtained on the basis of one expansion option. This is achieved by multiplying the phase shift values of the signals from all emitters by the same value. It is shown that, when the beam expands along the sum channel, a radiation pattern with an extended angular distance between the maxima is formed in the difference channel. An analysis of the initial sections of the difference radiation patterns in the formation of expanded beams of the sum radiation pattern was conducted. The behaviour of the generalized characteristics of expanded beams across the range of expansion coefficients was analysed. The conclusion was made about the possibility of timely and predictable control of the width of the difference radiation pattern of a phased antenna array.

Keywords: phase synthesis, phased antenna array, radiation pattern, beam expansion, scaling

Information about the authors

Oleg Vadimovich Pavlovich – Engineer of the 2nd category, Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of the radiation characteristics of phase antenna arrays and active phase antenna arrays, phase synthesis of beams having a special form, digital chart formation, signal processing.

Alexander Nikolaevich Gribanov – Cand. Sci. (Engineering), Sectoral Head, Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radiation characteristics of phase antenna arrays and active phase antenna arrays, phase synthesis of beams having a special form, assessment and processing of dynamic radiation patterns.

Svetlana Evgenievna Gavrilova – Engineer of the 1st category, Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation.

Research interests: mathematical modelling of radiation characteristics of phase antenna arrays and active phase antenna arrays, phase synthesis of beams having a special form, assessment and processing of dynamic radiation patterns.

Georgy Feodosievich Moseychuk – Head of Laboratory, Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation.

Research interests: active and passive antenna arrays, microwave technologies, control of the shape of radiation patterns and radiation regimes, methods of antenna measurements, including dynamic radiation patterns, tuning of phase antenna arrays and active phase antenna arrays.

Ivan Alekseevich Kuznetsov – Engineer, Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design, JSC, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation.

Research interests: electrodynamic modelling of antenna devices, radio systems for special and civil purposes.