

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.677

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИЕМНЫХ ЛУЧЕЙ В ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ X-ДИАПАЗОНА ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ГРУППЫ ЦЕЛЕЙ НА БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЯХ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ПОДСВЕТЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ

© 2022 г. В. А. Кашин^а, И. С. Шурыгина^а, *

^а НПО “Алмаз” им. академика А.А. Расплетина,
Ленинградский просп., 80, корп. 16, Москва, 125190 Российская Федерация

*E-mail: irshurygina@gmail.com

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

Предложен подход к реализации параллельного во времени приема сигналов от группы целей, одновременно подсвеченных радиолокационной станцией (РЛС), который основан на использовании аналоговой приемно-передающей фазированной антенной решетки. Рассмотрена одна из возможных схем построения фазированной антенной решетки для работы по группе целей. Рассмотрен принцип управления фазовым распределением на раскрыве в режиме приема. Приведены оценки уменьшения потенциала РЛС и сокращения дальности обнаружения при применении описанного метода. Рассмотрен случай формирования четырех приемных лучей. Приведены результаты расчетов суммарных, разностных диаграмм направленности и пеленгационных характеристик для каждого из четырех лучей.

DOI: 10.31857/S0033849422090066

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [1] предложен подход к повышению быстродействия при работе по группе целей (под группой целей понимается совокупность целей, разрешаемых радиолокационной станцией (РЛС) по угловым координатам). При этом предполагалось, что при сокращении дальности до группы целей РЛС переходит от последовательного во времени контакта с каждой целью (подсвет и прием отраженного сигнала) к параллельному, когда осуществляется одновременный подсвет целей и параллельный во времени прием отраженных сигналов.

Для реализации этого подхода в работе [1] предложено осуществлять в режиме передачи одновременный подсвет целей за счет синтеза многолучевой диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР), а в режиме приема использовать цифровую приемную решетку с одновременным формированием цифровых лучей со своими цифровыми выходами для селекции каждой цели. Синтез многолучевой диаграммы на передачу исследован в [1] довольно подробно и прост в реализации. Однако формирование приемных лучей (по одному на каждую цель) с использованием цифровой антенной решетки явля-

ется трудно осуществимым на практике, так как современные ФАР для РЛС сопровождения в X-диапазоне имеют большое количество излучателей [2] и соответствующих им элементарных приемных каналов.

В данной работе рассматривается другой подход к формированию лучей для параллельного во времени приема сигналов от группы целей и их угловой пеленгации, который основан на использовании аналоговой приемно-передающей ФАР.

2. СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Рассмотрим как одну из возможных схему построения для работы по группе целей (рис. 1) с учетом решений, реализованных в ФАР X-диапазона [2].

Возбуждение полотна осуществляется по эфиру. Полотно антенны содержит порядка 10^4 элементов [2]. Антенный элемент имеет входной и выходной излучатели и ферритовый фазовращатель фарадеевского типа с рабочей круговой поляризацией. Блок излучателей (рис. 2) содержит передающий облучатель I и два симметрично

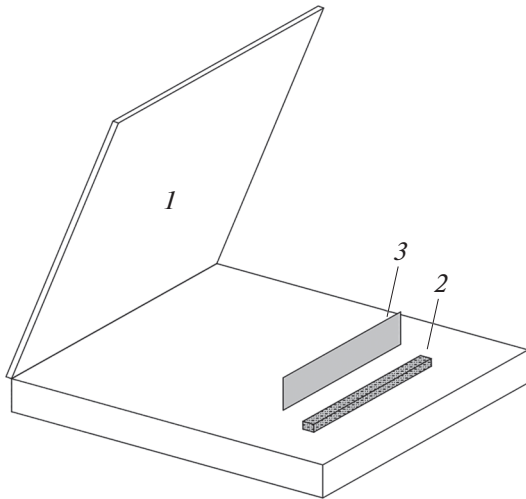


Рис. 1. Приемо-передающая ФАР: 1 – полотно антенных элементов, 2 – блок облучателей, 3 – поляризатор.

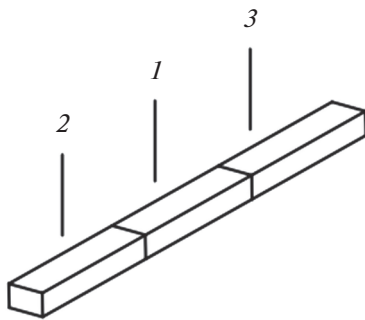


Рис. 2. Блок облучателей: 1 – передающий облучатель, 2 и 3 – комплект приемных облучателей.

расположенных комплекта приемных облучателей 2, 3.

Передающий облучатель 1 – это открытый конец волновода с расширяющимся вдоль своей оси поперечным сечением. Каждый приемный облучатель является сборкой рупоров [2] с тремя волноводными выходами, соответствующими суммарному и двум разностным каналам для реализации моноимпульсной пеленгации каждой цели. Передающий облучатель имеет горизонтальную поляризацию, приемные – вертикальную.

При движении нескольких целей в направлении РЛС, начиная с некоторой дальности, становится возможным их угловое разрешение. Если при этом дальность сокращается настолько, что возросшая мощность отраженных сигналов позволяет перейти к режиму работы по группе цели, то работа на передачу и прием осуществляется с формированием многолучевых диаграмм направленности (ДН). Передающий рупор излучает сферическую волну, которая при прохождении поляризатора изменяет горизонтальную поляризацию на круговую (рабочая поляризация фазовращателей). При прохождении волны через фазовраща-

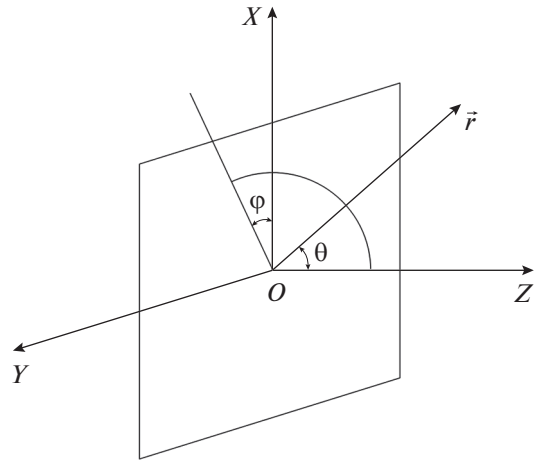


Рис. 3. Система координат, связанная с раскрытием ФАР; \vec{r} – вектор направления отклонения луча.

тель компенсируется сферический фазовый набег и формируется многолучевая ДН с числом лучей, равным числу целей.

На прием на раскрытии ФАР реализуется фазовое распределение, обеспечивающее разделение входящих от группы целей волн по разным приемным каналам за счет их раздельной одновременной фокусировки по разным приемным облучателям. Поляризация этих волн после прохождения поляризатора преобразуется из круговой на вертикальную.

3. УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА РАСКРЫТИИ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА

По цепям управления в режиме приема полотно антенных элементов разбивается на вложенные подрешетки со случайным расположением элементов. Метод разбиения описан в работе [3]. Число подрешеток равно числу целей в группе. Число целей в группе не должно превышать число приемных облучателей.

Введем систему прямоугольных координат XYZ, связанную с раскрытием (рис. 3). Фазовое распределение q-й подрешетки $\Phi_q(x_n^{(q)}, y_m^{(q)})$ имеет две компоненты:

$$\Phi_q(x_n^{(q)}, y_m^{(q)}) = \Phi_q^{(сф)}(x_n^{(q)}, y_m^{(q)}) + \Phi_q^{(лин)}(x_n^{(q)}, y_m^{(q)}), \quad (1)$$

где $\Phi_q^{(лин)}(x_n^{(q)}, y_m^{(q)})$ – линейное фазовое распределение, обеспечивающее ориентацию приемного луча в направлении q-й цели, $\Phi_q^{(сф)}(x_n^{(q)}, y_m^{(q)})$ – нелинейное фазовое распределение, обеспечивающее формирование сходящейся сферической волны, сфокусированной на q-й приемный ру-

Таблица 1. Параметры РЛС, связанные с уменьшением потенциала

Параметр	Число лучей, Q					
	1	2	3	4	5	6
Уменьшение потенциала, дБ	0	-2.25	-3.57	-4.51	-5.24	-5.83
Сокращение дальности обнаружения	1	1.68	2.27	2.82	3.34	3.83
Дальность обнаружения, км	180	107.02	78.96	63.64	58.83	46.95

Примечание. Предполагается, что дальность обнаружения в однолучевом режиме составляет 180 км.

пор, $x_n^{(q)}, y_m^{(q)}$ – координаты излучателей с номерами q -й подрешетки.

Фазовое распределение (1) обеспечивает формирование для каждого приемного луча суммарную и две разностные ДН, благодаря конструкции многорупорного приемного облучателя [2].

Остановимся подробнее на процедуре разбиения антенного полотна на Q вложенных подрешеток со случайным расположением элементов. Для этого перейдем от нумерации антенных элементов двумя числами $n \in (1, \dots, N)$ и $m \in (1, \dots, M)$ (номер столбца и номер строки) к сквозной нумерации одной последовательностью чисел $r \in (1, \dots, R)$, где $R = MN$. Чтобы разбить полотно ФАР на вложенные подрешетки, рассмотрим реализацию $R = MN$ случайных чисел η_r , равномерно распределенных на интервале $[0, 1]$.

Интервал разбиваем на Q интервалов длиной L_q :

$$\sum_{q=1}^Q L_q = 1.$$

Интервал L_q пропорционален среднему числу элементов в q -й подрешетке. Если случайное число η_r попадает на интервал L_q , то антенный элемент с номером r относим к q -й подрешетке. Антенные элементы q -й подрешетки фазуем в направлении q -й цели. Линейное фазовое распределение в (1) приобретает вид

$$\Phi_q^{(\text{лин})}(x_n^{(q)}, y_m^{(q)}) = -k(x_n^{(q)}u_q + y_m^{(q)}v_q), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны,

$$u_q = \sin \theta_q \cos \varphi_q, \quad v_q = \sin \theta_q \sin \varphi_q. \quad (3)$$

Здесь θ_q, φ_q – углы, характеризующие направление ориентации главного максимума луча q -й подрешетки.

Диаграмма направленности любого из трех моноимпульсных каналов q -й подрешетки с фазовым распределением (2) имеет вид

$$F_q(u, v) = \sum_{n, m \in R_q} A(x_n^{(q)}, y_m^{(q)}) \times \exp\{ik[x_n^{(q)}(u - u_q) + y_m^{(q)}(v - v_q)]\}, \quad (4)$$

где R_q – множество номеров n, m , принадлежащие q -й подрешетке, $A(x_n^{(q)}, y_m^{(q)})$ – амплитудное распределение канала. Среднее значение диаграммы (4) определяем по формуле

$$\overline{F_q(u, v)} = L_q F(u, v), \quad (5)$$

где

$$F(u, v) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A(x_n, y_m) \times \exp\{ik[x_n(u - u_q) + y_m(v - v_q)]\} \quad (6)$$

– ДН одного из трех моноимпульсных каналов однолучевой решетки с максимумом суммарного луча, ориентированного в направлении q -й цели;

$$A(x_n, y_m) = \begin{cases} A_{\Sigma}(x_n, y_m) \\ A_{\Delta\varphi}(x_n, y_m) \\ A_{\Delta\varepsilon}(x_n, y_m) \end{cases} \quad (7)$$

– амплитудное распределение канала, A_{Σ} – для суммарного канала, $A_{\Delta\varphi}$ – для разностного азимутального канала, $A_{\Delta\varepsilon}$ – для разностного угломестного канала.

Оценим, с какой дальности осуществляется использование алгоритма управления фазами (1). Из работы [3] следует, что при статистическом фазовом распределении на раскрыве, формирующем Q лучей с одинаковыми коэффициентами усиления, падение коэффициента усиления в каждом луче по отношению к однолучевому режиму пропорционально $1/Q^2$. Падение коэффициента усиления в каждом луче синтезированной передающей многолучевой диаграммы примерно пропорционально $1/Q$. Поэтому суммарное уменьшение коэффициента усиления на передачу и прием пропорционально $1/Q^3$.

Для того чтобы не проиграть в потенциале РЛС, необходимо начинать работу с дальности, когда возрастающий уровень полезного сигнала компенсирует суммарное падение потенциала в режиме передачи и приема. В табл. 1 в зависимости от числа лучей приведены параметры РЛС, связанные с уменьшением потенциала.

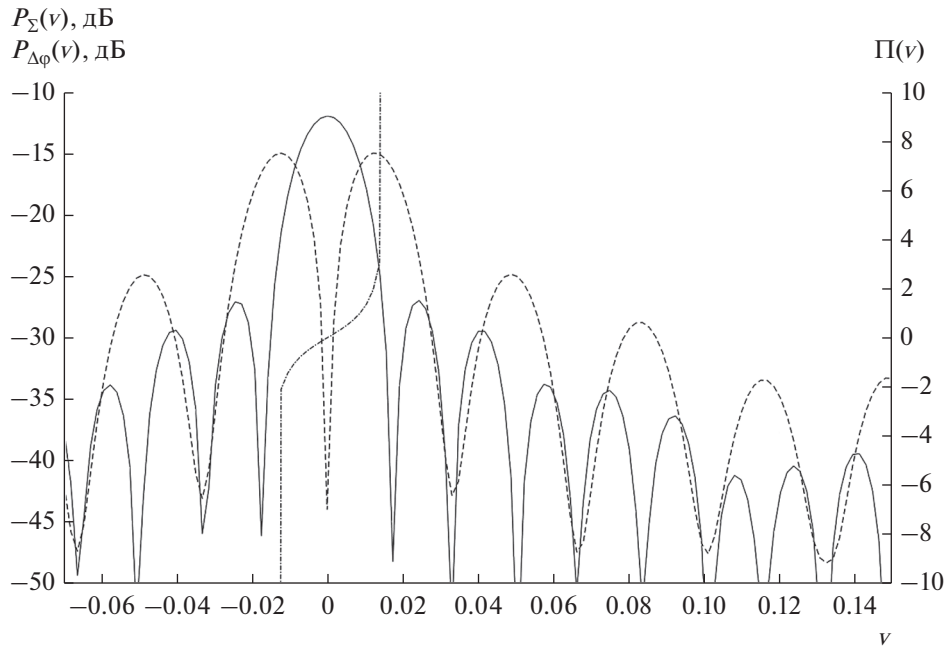


Рис. 4. Суммарная (сплошная кривая), разностная (штриховая) диаграммы направленности и пеленгационная характеристика (штрихпунктирная) для луча первой вложенной подрешетки с направлением максимума $v_1 = 0$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Расчеты проводили применительно к ФАР, которая имеет 10^4 антенных элементов, расположенных эквидистантно в $N = 100$ столбцах и $M = 100$ строках с одинаковыми междуэлементными расстояниями вдоль строк и столбцов $d_x = d_y = 0.6\lambda$ (λ — длина волны). Антенную решетку по цепям управления разбиваем на вложенные подрешетки. Каждая подрешетка формирует суммарную и две разностные ДН для реализации амплитудного суммарно-разностного метода моноимпульсной пеленгации [4] в двух плоскостях XOZ , YOZ (см. рис. 3).

При проведении расчетов использовались идеализированные амплитудные распределения (7), которые не влияют на статистический характер формируемых ДН (4):

$$\begin{cases} A_{\Sigma}(x_n, y_m) = a, \text{ для любых } x_n, y_m \\ A_{\Delta\varphi}(x_n, y_m) = \begin{cases} a, x_n > 0 \\ -a, x_n < 0 \end{cases} \\ A_{\Delta\epsilon}(x_n, y_m) = \begin{cases} a, y_m > 0 \\ -a, y_m < 0 \end{cases} \end{cases}, \quad (8)$$

т.е. для суммарного канала амплитудное распределение является равномерным, для разностных-ступенчатым знакопеременным. Здесь a — некоторая константа. Амплитудные распределения предпо-

лагались одинаковыми вне зависимости от номера канала q , поэтому ДН разных каналов отличались друг от друга только статистическим фоном.

Расчеты проводились для случая формирования четырех лучей. Лучи отклонялись в азимутальной плоскости YOZ (см. рис. 3). Реализации суммарных и разностных ДН для четырех лучей приведены на рис. 4–7 (шкала слева для суммарной ($P_{\Sigma}(v)$) и разностной ($P_{\Delta\varphi}(v)$) ДН по мощности). Обобщенные углы отклонения v_q ($q = 1, \dots, 4$) имели значения:

$$v_1 = 0, \quad v_2 = 0.087, \quad v_3 = 0.174, \quad v_4 = 0.261. \quad (9)$$

Там же приведены пеленгационные характеристики $\Pi(v)$ (шкала справа), которые вычисляли в соответствии с соотношением [4]

$$\Pi(v) = \frac{|F_{q\Delta\varphi}(v)|}{|F_{q\Sigma}(v)|} \sin(\Phi_{q\Delta\varphi} - \Phi_{q\Sigma}), \quad (10)$$

где $F_{q\Sigma}(v)$ и $F_{q\Delta\varphi}(v)$ — суммарная и разностные ДН в плоскости $u = 0$ (4), $\Phi_{q\Delta\varphi}$ и $\Phi_{q\Sigma}$ — фазовые характеристики этих ДН. На рис. 6 приведены суммарная и разностная ДН, пеленгационная характеристика для однолучевого режима.

Нормировка максимумов суммарных диаграмм на рис. 4–7 проведена относительно максимума суммарной диаграммы однолучевого режима. Разностные диаграммы в направлениях отклонения (9) не имели точных нулевых значений (отклонения приведены в табл. 2). Это объясняется тем, что

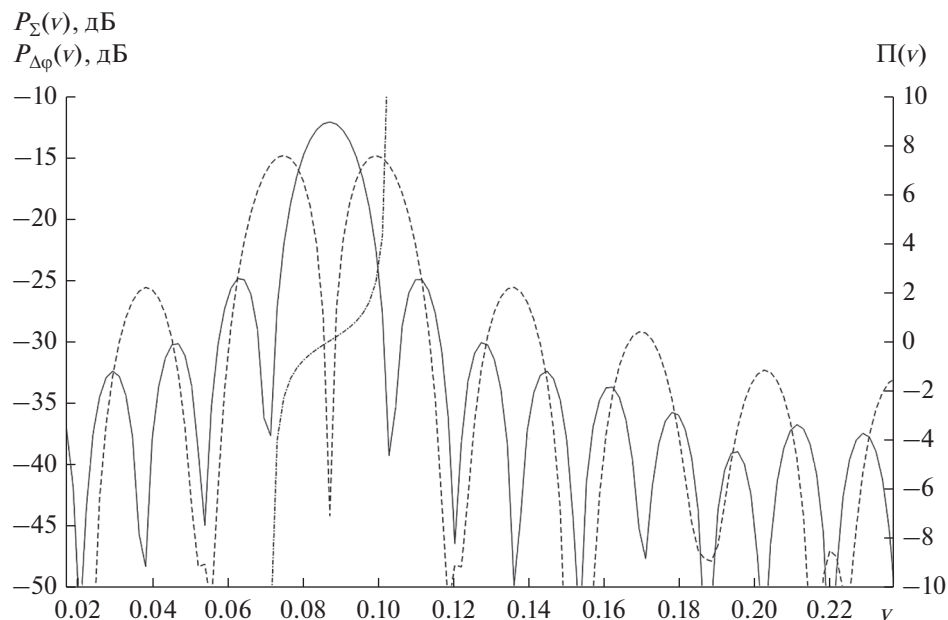


Рис. 5. Суммарная (сплошная кривая), разностная (штриховая) диаграммы направленности и пеленгационная характеристика (штрихпунктирная) для луча второй вложенной подрешетки с направлением максимума $v_2 = 0.087$.

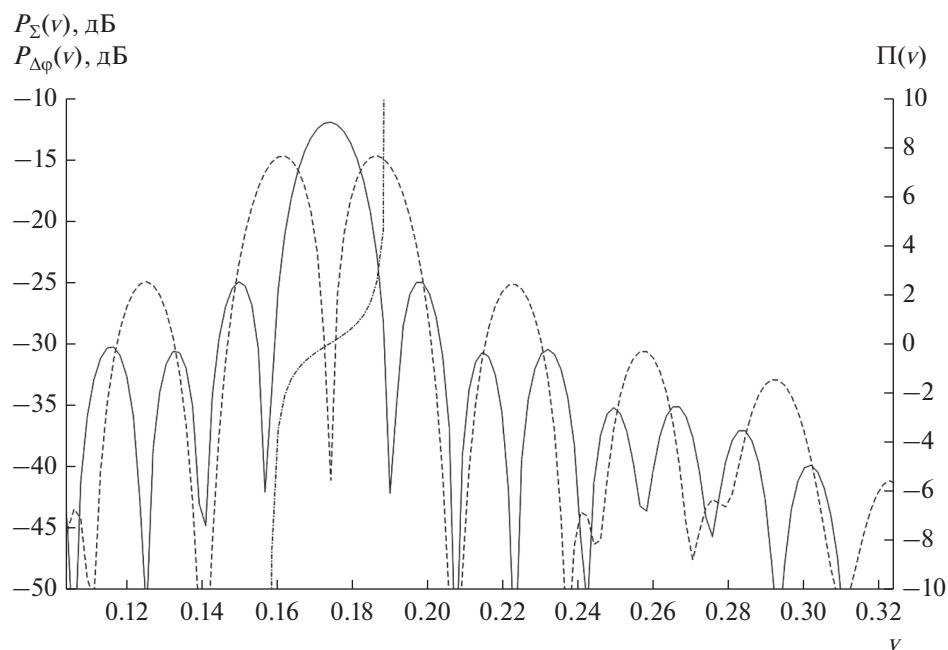


Рис. 6. Суммарная (сплошная кривая), разностная (штриховая) диаграммы направленности и пеленгационная характеристика (штрихпунктирная) для луча третьей вложенной подрешетки с направлением максимума $v_3 = 0.174$.

из-за статистического характера расположения антенных элементов в каждой подрешетке число элементов на левой ($y > 0$) и правой ($y < 0$) поло-

винках раскрыва не равны друг другу. Но глубина нуля достаточно большая. В табл. 2 приведены характеристики синтезированных ДН.

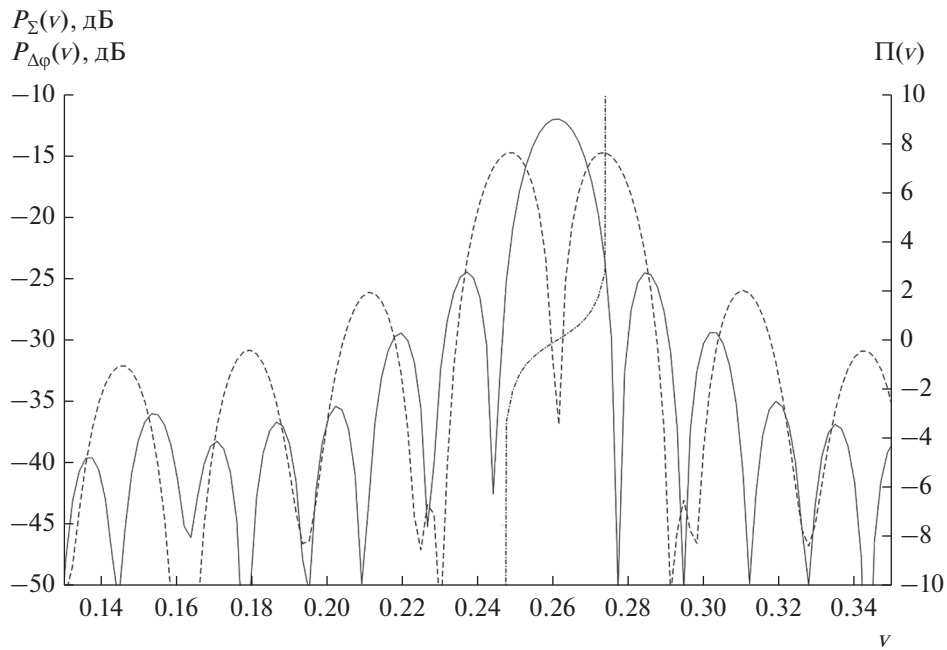


Рис. 7. Суммарная, разностная диаграммы направленности и пеленгационная характеристика для луча четвертой вложенной подрешетки с направлением максимума $\nu_4 = 0.261$.

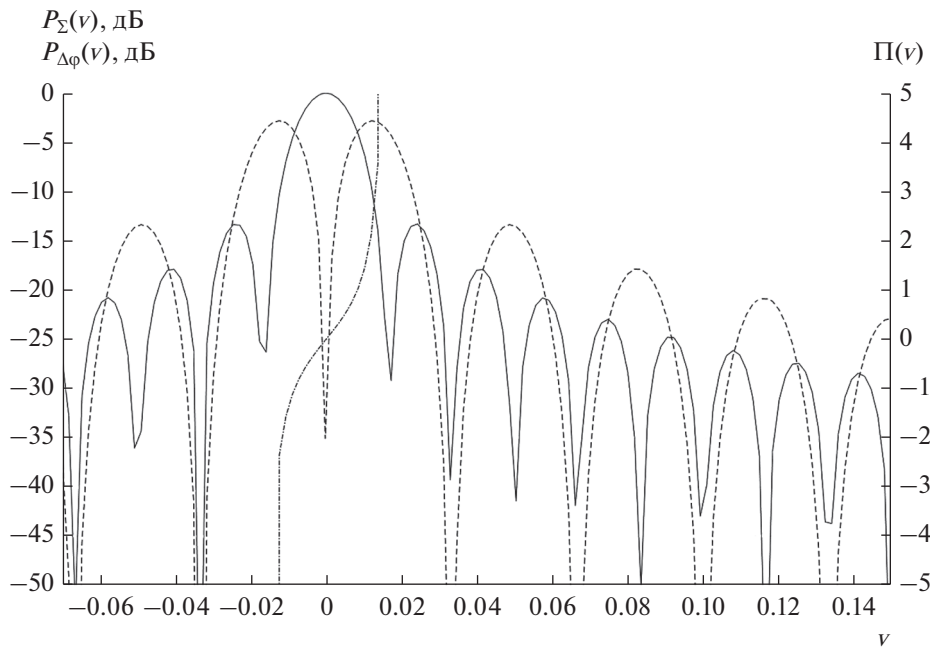


Рис. 8. Суммарная (сплошная кривая), разностная (штриховая) диаграммы направленности и пеленгационная характеристика (штрихпунктирная) для луча с направлением максимума $\nu = 0$ при однолучевом режиме всей решетки.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция приемо-передающей ФАР с формированием нескольких приемных лучей, имеющая суммарные потери коэффи-

циента усиления на прием и передачу пропорциональные $1/Q^3$, где Q – число формируемых лучей.

2. Ширина суммарной диаграммы направленности и крутизна пеленгационной характери-

Таблица 2. Характеристики синтезированных ДН

Параметр	Многочуевой режим				Однолучевой режим
Обобщенный угол отклонения луча ν , рад	0	0.087	0.174	0.261	0
Снижение коэффициента усиления суммарной диаграммы, дБ	-12.03	-12.19	-11.83	-12.15	0
Глубина нуля разностной диаграммы относительно уровня суммарной, дБ	-34.88	-30.46	-27.03	-24.72	-35.08
Сдвиг нуля пеленгационной характеристики, град (рад)	0.0015 (-2.66×10^{-5})	0.0006 (1.05×10^{-5})	0.0002 (3.49×10^{-6})	0.0008 (1.43×10^{-5})	0
Крутизна пеленгационной характеристики, 1/град	1.6690	1.6348	1.6333	1.7743	1.6603
Ширина луча суммарной диаграммы, град (рад)	0.8594 (0.0150)	0.8365 (0.0146)	0.8423 (0.0147)	0.8365 (0.0146)	0.8365 (0.0146)

ки каждого приемного канала такие же, как у однолучевой решетки. Данный результат достигнут за счет использования для каждого приемного канала расположения элементов по всему раскрытию антенной решетки. В результате полотно антенных элементов по цепям управления было разбито на Q вложенных подрешеток.

3. Для исключения появления боковых лепестков большого уровня антенные элементы вложенных подрешеток расположены случайным образом на раскрытие.

4. Максимальное количество формируемых лучей определено количеством приемных облучателей. Изменение количества приемных лучей и их ориентации осуществляется оперативно по цепям управления антенными элементами.

5. Для снижения уровня боковых лепестков в направлениях на активные помехи можно использовать систему автокомпенсации помех [5] с

введением дополнительных антенн в каналы автокомпенсации.

6. Подчеркнем, что подрешетки используют пространственное возбуждение антенных элементов. Использование фидерного возбуждения приводит к очень сложной, трудно реализуемой конструкции фидерной разводки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурыгина И.С., Кашин В.А. // РЭ. 2021. Т. 66. № 10. С. 966.
2. Bunkin V.V., Lemanski A.A. // L'Onde Électrique. 1994. V. 74. № 3. P.13.
3. Железняк М.М., Калачев В.Н., Кашин В.А. // РЭ. 1974. Т. 19. № 4. С. 671.
4. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. С. 312.
5. Радиозлектронные системы / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. С. 512.