

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.677

СИНТЕЗ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

© 2021 г. В. А. Кашин^а, И. С. Шурыгина^а, *

^аНПО “Алмаз”,

Ленинградский просп., 80/16, Москва, 125190 Российская Федерация

*E-mail: irshurygina@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2020 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2021 г.

Рассмотрен простой подход к созданию многолучевых диаграмм, когда имеется один СВЧ вход/выход, а комплект лучей формируется как лучи одной многолучевой диаграммы направленности. Показано, что алгоритм фазового синтеза многолучевой диаграммы является более простым для реализации, чем алгоритм амплитудно-фазового синтеза. Кроме того, показано, что фазовый синтез имеет существенно меньшие потери энергии, чем амплитудно-фазовый. Рассмотрен принцип одновременного формирования нескольких лучей в цифровой антенной решетке. Показано, что если антенная решетка имеет блочное построение, то вычисление фазового распределения можно проводить параллельно во всех встроенных вычислителях, что обеспечивает высокую скорость вычислений всего массива фаз для излучающей апертуры.

DOI: 10.31857/S0033849421100089

ВВЕДЕНИЕ

В литературе приводятся схемы построения многолучевых антенных решеток (АР) с независимым управлением лучами и возможностью плавного изменения их ориентации в пространстве, в которых используется СВЧ-аппаратура для создания индивидуального распределения токов на раскрыве антенны для каждого луча [1, 2]. При этом каждому лучу соответствует свой входной канал антенны и своя диаграмма направленности (ДН). По сравнению с однолучевой такие многолучевые решетки имеют более сложную конструкцию.

Возможен другой, более простой подход к созданию многолучевой АР, не требующий дополнительной СВЧ-аппаратуры для создания совокупности лучей с плавным и независимым управлением ориентацией, — это когда имеется один СВЧ-вход, а комплект лучей формируется как лучи одной многолучевой ДН, возбужденной одной совокупностью токов на раскрыве антенны. В теоретическом отношении синтез многолучевых ДН является неисследованной задачей для передающих антенных решеток и довольно простой для приемных цифровых [3].

Синтез многолучевых ДН АР интересен для практики с точки зрения повышения производительности радиолокационных станций (РЛС) со-

провождения и наведения при работе по группе целей на близких расстояниях.

При этом следует решить две задачи. Во-первых, синтезировать многолучевую ДН на передачу для подсвета группы целей. Во-вторых, на прием из совокупности отраженных от целей сигналов, излученных лучами передающей диаграммы, необходимо выделить сигналы, принадлежащие только одному лучу.

Основная часть данной работы посвящена первой задаче. Рассмотрены два метода синтеза в зависимости от набора управляемых параметров: фазовый метод, когда регулируются фазы антенных элементов, и амплитудно-фазовый, когда регулируются как фазы, так и амплитуды токов на антенных элементах. Второй метод применим в случае активных фазированных АР. Показано также, что вопрос реализации многолучевых приемных ДН с селекцией сигналов, принадлежащих одному передающему лучу, не является проблемным и решается на основе применения цифровых АР [3].

Первые результаты по синтезу многолучевых ДН АР были опубликованы в работе [4]. В то время в антенной технике имели широкое распространение пассивные фазированные антенные решетки (ФАР). В пассивных ФАР управляемыми параметрами являются фазы антенных эле-

ментов, поэтому в [4] рассматривался фазовый синтез.

1. ФАЗОВЫЙ СИНТЕЗ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ

Из результатов работы [4] следует, что фазовое распределение φ_{nm} (nm – номер антенного элемента в решетке) для синтеза многолучевой ДН плоского раскрыва с минимальными потерями коэффициентов усиления лучей (по отношению к синфазному раскрыву) следует искать в виде

$$\varphi_{nm} = \arg \left\{ \sum_{q=1}^Q \Lambda_q \exp(i\gamma_q) \exp(-i\vec{k}_q \vec{r}_{nm}) \right\}, \quad (1)$$

где Q – количество лучей, Λ_q и γ_q – неизвестные вещественные параметры, $\vec{k}_q$ – волновые векторы, задающие ориентацию лучей, $\vec{r}_{nm}$ – вектор, задающий положение антенного элемента с номером nm на раскрыве антенны. Однако в [4] не указано, как определять неизвестные параметры Λ_q и γ_q . В данной работе рассмотрим задачу синтеза лучей с одинаковым уровнем их максимумов. Для определения фаз φ_{nm} предлагаем упрощенный вариант выражения (1), когда

$$\gamma_q \equiv 0, \quad \Lambda_q \equiv 1.$$

В этом случае

$$\varphi_{nm} = \arg \left\{ \sum_{q=1}^Q \exp(-i\vec{k}_q \vec{r}_{nm}) \right\}. \quad (2)$$

С точки зрения обеспечения стабильности уровня главных максимумов лучей многолучевой диаграммы желательно, чтобы направления главных максимумов расходились на величину, большую ширины ДН синфазного раскрыва.

Предполагая, что ДН антенных элементов являются изотропными, на основании выражения (2) выполним расчеты для синтеза трех- и четырехлучевой ДН решетки с квадратным раскрывом, содержащей 1600 антенных элементов, с квадратной ячейкой расположения. Расстояние между элементами $\lambda/2$ (λ – длина волны). Амплитудное распределение равномерное. Результаты расчетов для трехлучевой и четырехлучевой диаграмм представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Для каждого варианта синтеза приведены значения обобщенных углов u_q, v_q , характеризующих положения главных максимумов лучей, и значения уровней лучей синтезированной диаграммы, нормированных относительно уровня главного луча синфазного раскрыва. Величины u_q и v_q связаны с

Таблица 1. Трехлучевая диаграмма направленности

Обобщенные углы u_g, v_g	Уровни лучей, дБ		
	1-й луч	2-й луч	3-й луч
$u_1 = -0.25, v_1 = 0$ $u_2 = 0.34, v_2 = 0$ $u_3 = 0, v_3 = -0.25$	–5.6	–5.6	–5.5
$u_1 = 0, v_1 = 0$ $u_2 = 0.15, v_2 = 0.08$ $u_3 = 0.24, v_3 = 0.24$	–5.6	–5.45	–5.5
$u_1 = 0.08, v_1 = 0$ $u_2 = 0.29, v_2 = 0.17$ $u_3 = -0.11, v_3 = -0.13$	–5.8	–5.52	–5.48
$u_1 = 0.5, v_1 = 0$ $u_2 = 0, v_2 = 0.54$ $u_3 = 0, v_3 = -0.17$	–5.6	–5.35	–5.55

Таблица 2. Четырехлучевая диаграмма направленности

Обобщенные углы u_g, v_g	Уровни лучей, дБ			
	1-й луч	2-й луч	3-й луч	4-й луч
$u_1 = 0.25, v_1 = 0.06$ $u_2 = 0.21, v_2 = 0.21$ $u_3 = 0.08, v_3 = 0.15$ $u_4 = 0.19, v_4 = 0.06$	–5	–6.7	–6.9	–5
$u_1 = 0.25, v_1 = 0.06$ $u_2 = 0.21, v_2 = 0.21$ $u_3 = 0.08, v_3 = 0.15$ $u_4 = 0.16, v_4 = 0.05$	–7.7	–6.8	–7.4	–6.4
$u_1 = 0, v_1 = 0$ $u_2 = 0.15, v_2 = 0.08$ $u_3 = 0.24, v_3 = 0.24$ $u_4 = 0.17, v_4 = 0.46$	–6.7	–7.23	–7.1	–7.24
$u_1 = 0.5, v_1 = 0$ $u_2 = 0, v_2 = 0.34$ $u_3 = 0, v_3 = -0.17$ $u_4 = -0.34, v_4 = 0$	–6.9	–6.8	–6.8	–6.9

углами сферической системы координат соотношениями

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

Среднее значение потерь усиления η_3 в максимуме синтезированных лучей для трехлучевой диаграммы по данным табл. 1 составляет

$$\eta_3 = -5.54 \text{ дБ}. \quad (3)$$

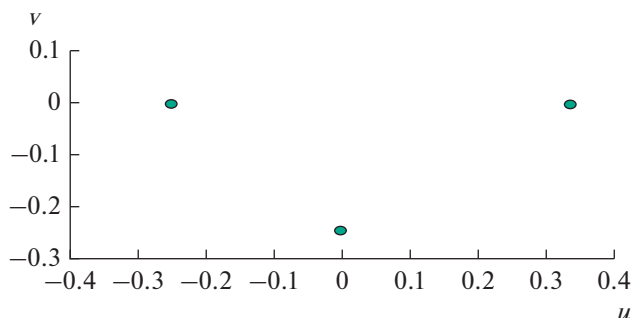


Рис. 1. Фазовый синтез трехлучевой диаграммы направленности. Расположение лучей на координатной плоскости u, v .

Среднее значение потерь усиления η_4 в максимуме лучей четырехлучевой диаграммы согласно табл. 2 составляет

$$\eta_4 = -6.99 \text{ дБ}. \quad (4)$$

Для двухлучевой диаграммы, как показано в [3], средний уровень потерь усиления равен

$$\eta_2 = -3.9 \text{ дБ}.$$

Если исходить из физических соображений, то можно полагать, что при переходе от однолучевой диаграммы к многолучевой мощность делится между лучами пропорционально их количеству. Тогда коэффициенты усиления в главных лучах многолучевой диаграммы должны быть ослаблены в Q раз, где Q — количество лучей. Иначе говоря, коэффициенты ослабления в случае синтеза, близкого к оптимальному, должны иметь значения

$$\eta_Q^0 = -10 \lg Q. \quad (5)$$

Для $Q = 3$ и $Q = 4$ эти значения соответственно равны $\eta_3^0 = -4.77$ дБ и $\eta_4^0 = -6.02$ дБ. Как видим, расчетные и оптимальные значения близки друг к другу (с отличием меньше 1 дБ). Данный результат показывает, что для фазового синтеза многолучевой ДН с одинаковыми коэффициентами усиления в максимумах отдельных лучей можно использовать довольно простое в вычислительном отношении выражение (2) с учетом, что угловое разделение лучей должно превосходить ширину луча синфазного раскрыва.

На рис. 1 приведен пример синтеза трехлучевой диаграммы направленности, на котором представлены диаграммы в области главных лучей по уровню выше -10 дБ. Угловые координаты лучей соответствуют координатам, указанным в первой строке табл. 1. На рис. 2а, 2б приведены сечения многолучевой диаграммы в плоскостях $v = 0$ и $v = -0.25$ соответственно.

2. АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ СИНТЕЗ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ

Предлагаемый метод амплитудно-фазового синтеза многолучевой диаграммы направленности основан на формировании парциальных диаграмм плоского раскрыва. Предположим, что нужно сформировать Q лучей в направлениях u_q, v_q , где $1 \leq q \leq Q$. Для формирования q -й парциальной диаграммы на раскрыве ФАР реализуем распределение токов единичной амплитуды с линейной зависимостью фаз от координат точки раскрыва

$$\dot{a}_{nm}^{(q)} = \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)). \quad (6)$$

Распределение (6) создает парциальную ДН

$$f_q(u, v) = \sum_{n,m} \exp(ikx_n(u - u_q) + iky_m(v - v_q)). \quad (7)$$

Для Q парциальных диаграмм суммарное амплитудно-фазовое распределение имеет вид

$$\dot{A}_{nm} = \sum_{q=1}^Q \dot{a}_{nm}^{(q)} = \sum_{q=1}^Q \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)), \quad (8)$$

а результирующая многолучевая диаграмма имеет вид

$$F(u, v) = \sum_{n,m} \sum_{q=1}^Q \exp(ikx_n(u - u_q) + iky_m(v - v_q)). \quad (9)$$

2.1. Общие соотношения для оценки потерь энергии фАР с многолучевой диаграммой направленности

Энергетический потенциал Π передающей однолучевой активной ФАР (АФАР) описывается выражением [6]

$$\Pi = PD, \quad (10)$$

где P — излучаемая антенной мощность, D — коэффициент усиления в максимуме луча.

Энергетический потенциал $\Pi^{(q)}$ для q -го луча синтезированной многолучевой ДН имеет вид

$$\Pi^{(q)} = P_m D^{(q)}, \quad (11)$$

где P_m — общая мощность, излучаемая многолучевой антенной, $D^{(q)}$ — коэффициент усиления, соответствующий максимуму q -го луча.

Из (10) и (11) следует, что потери энергетического потенциала при переходе от однолучевой к многолучевой диаграмме определяются формулой

$$\Pi^{(q)}/\Pi = \eta_1 \eta_2, \quad (12)$$

где величина

$$\eta_1 = D^{(q)}/D \quad (13)$$

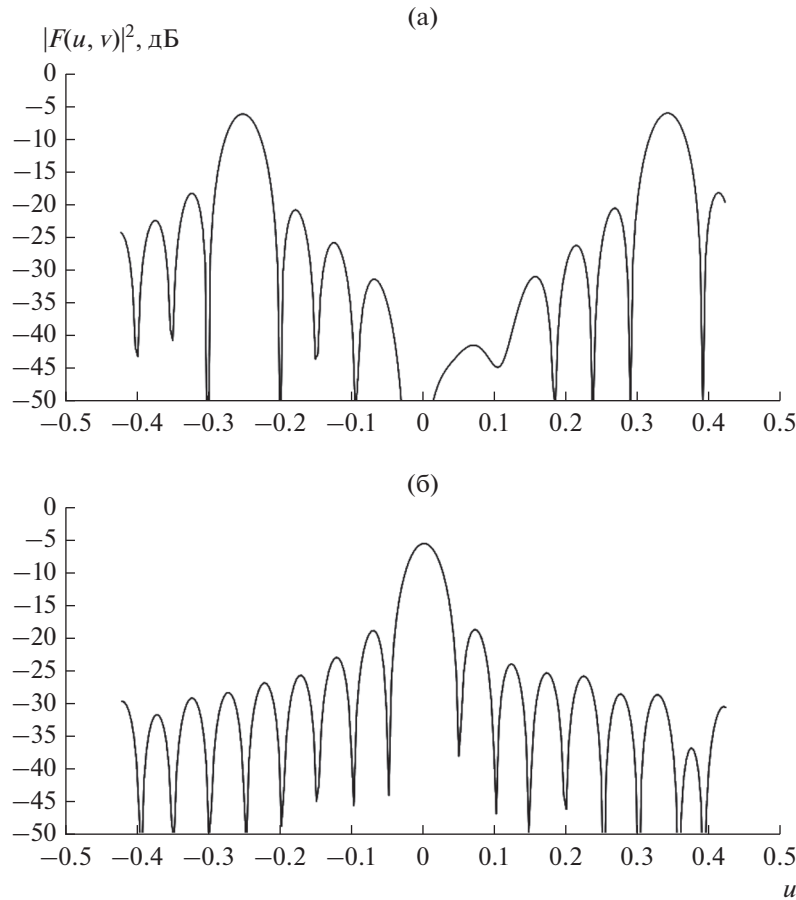


Рис. 2. Фазовый синтез трехлучевой диаграммы направленности. Сечения в плоскостях $v = 0$ (а) и $v = -0.25$ (б).

— относительные потери коэффициента усиления, а величина

$$\eta_2 = P_m/P \quad (14)$$

— относительные потери мощности, которые физически объясняются амплитудной регулировкой коэффициентов передачи каналов АФАР с помощью аттенюаторов.

Потери усиления, обусловленные неравномерностью амплитудно-фазового распределения на плоском раскрытии по отношению к ФАР с равномерным возбуждением [5], рассчитываются по формуле

$$\eta_1 = \frac{\left| \sum_{n,m} \dot{A}_{nm} \right|^2}{R \sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2}, \quad (15)$$

где R — общее число антенных элементов.

Выражение (15) дает оценку изменения коэффициента усиления для направления излучения вдоль нормали к раскрытию: $u = 0, v = 0$. (u, v — обобщенные угловые координаты).

Величина $\sum_{n,m} \dot{A}_{nm}$ — это значение диаграммы направленности:

$$F(u, v) = \sum_{n,m} \dot{A}_{nm} \exp(ikx_n u + iky_m v)$$

в направлении $u = 0, v = 0$.

Для других направлений u, v потери усиления будут описываться выражением

$$\eta_1 = \frac{\left| \sum_{n,m} \dot{A}_{nm} \exp(ikx_n u + iky_m v) \right|^2}{R \sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2}. \quad (16)$$

С учетом (8) и (9) величина потерь усиления (16) описывается выражением

$$\eta_1 = \frac{\left| \sum_{n,m} \sum_q \exp(ikx_n(u - u_q) + iky_m(v - v_q)) \right|^2}{R \sum_{n,m} \left| \sum_q \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)) \right|^2}. \quad (17)$$

Для направления максимума s -й диаграммы $u = u_s, v = v_s$ из (17) получим

$$\eta_1 = \frac{\left| \sum_{n,m} \left\{ 1 + \sum_{q \neq s} \exp(ikx_n(u_s - u_q) +iky_m(v_s - v_q)) \right\} \right|^2}{R \sum_{n,m} \left| \sum_{q=1}^Q \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)) \right|^2}. \quad (18)$$

2.2. Потеря усиления в максимумах лучей, обусловленная коэффициентами возбуждения антенных элементов. Асимптотическая оценка

Дадим асимптотическую оценку величины (18). Сначала преобразуем числитель C_1 выражения (18), проводя суммирование по n и m :

$$C_1 = \left| R + R \sum_{q \neq s} f(u_s - u_q) f(v_s - v_q) \right|^2, \quad (19)$$

где $f(u_s - u_q), f(v_s - v_q)$ — ДН плоского раскрыва. Будем полагать, что раскрыв имеет квадратную форму с квадратной ячейкой расположения антенных элементов со стороной d и общим числом элементов $N \times M = N^2 = R$.

Тогда

$$f(u_s - u_q) = \frac{\sin(0.5Nkd(u_s - u_q))}{N \sin(0.5kd(u_s - u_q))}, \quad (20)$$

$$f(v_s - v_q) = \frac{\sin(0.5Nkd(v_s - v_q))}{N \sin(0.5kd(v_s - v_q))}. \quad (21)$$

Пусть ширина луча по первому нулю антенной решетки с равномерным возбуждением есть $\psi^{(0)}$. Тогда, если

$$|u_s - u_q| > 5\psi^{(0)},$$

то

$$|f(u_s - u_q)| < 0.032. \quad (22)$$

Аналогично для

$$|v_s - v_q| > 5\psi^{(0)}$$

получим

$$|f(v_s - v_q)| < 0.032. \quad (23)$$

Эти оценки показывают, что для больших угловых расстояний между лучами многолучевой диаграммы, как это следует из (19), имеем

$$C_1 \approx R^2. \quad (24)$$

В тех же предположениях оценим величину знаменателя C_2 выражения (18):

$$C_2 = R \sum_{n,m} \left| \sum_{q=1}^Q \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)) \right|^2. \quad (25)$$

Заметим, что

$$\left| \sum_{q=1}^Q \exp(-i(kx_n u_q + ky_m v_q)) \right|^2 = \sum_{q=1}^Q 1 + \sum_{p \neq q} \sum_{p \neq q} \exp(-ikx_n(u_q - u_p) -iky_m(v_q - v_p)). \quad (26)$$

Из (25) и (26) с учетом суммирования по n и m следует:

$$C_2 = R^2 Q + R \sum_{p \neq q} \sum_{p \neq q} \frac{\sin(0.5Nkd(u_q - u_p))}{N \sin(0.5kd(u_q - u_p))} \times \frac{\sin(0.5Nkd(v_q - v_p))}{N \sin(0.5kd(v_q - v_p))}.$$

Если углы разделения между направлениями $u_q, v_q (q = 1, \dots, Q)$ для разных q больше ширины луча синфазного раскрыва, то для C_2 получаем выражение

$$C_2 \approx R^2 Q. \quad (27)$$

Из (18), (24) и (27) следует асимптотическая оценка потери усиления в максимумах лучей многолучевой ДН, обусловленной неравномерностью возбуждения антенного раскрыва:

$$\eta_1 = 1/Q, \quad (28)$$

что соответствует и физическим соображениям. В активной ФАР реализация амплитудно-фазового распределения (8) осуществляется за счет регулировки в передающих каналах фазовращателей и аттенуаторов. Введение затуханий с помощью аттенуаторов вызывает потери суммарной мощности, излучаемой антенной.

Оценим потери мощности (14), обусловленные ее ослаблением аттенуаторами в отдельных каналах. При равномерном амплитудном распределении, когда этого ослабления нет, суммарная излучаемая мощность равна

$$P_{\Sigma}^{(1)} = P_0 R, \quad (29)$$

где P_0 — излучаемая мощность одного канала при отсутствии ослабления, обусловленного аттенуаторами канала, R — общее число передающих каналов.

При формировании неравномерного распределения (8) определяется максимальное значение

амплитуды на раскрые $|\dot{A}_{nm}|_{\max}$. В передающем канале, соответствующем максимальному значению амплитуды, затухание не вводится.

В остальных каналах вводятся затухания мощности, равные $|\dot{A}_{nm}|^2 / |\dot{A}_{nm}|_{\max}^2$. В этом случае величина ослабленной суммарной мощности $P_{\Sigma}^{(2)}$ будет равна

$$P_{\Sigma}^{(2)} = P_0 \sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2 / |\dot{A}_{nm}|_{\max}^2 \quad (30)$$

и коэффициент ослабления мощности равен

$$\eta_2 = P_{\Sigma}^{(2)} / P_{\Sigma}^{(1)} = \frac{1}{R} \sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2 / |\dot{A}_{nm}|_{\max}^2.$$

Отметим, что распределению (30) соответствует распределение комплексных нормированных амплитуд:

$$\dot{B}_{nm} = \dot{A}_{nm} / |\dot{A}_{nm}|_{\max}. \quad (31)$$

Из (25) следует, что

$$\sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2 = C_2 / R. \quad (32)$$

Воспользовавшись выражением (27), для асимптотической оценки величины (32) получим выражение

$$\sum_{n,m} |\dot{A}_{nm}|^2 \approx RQ. \quad (33)$$

Из (31) и (33) следует асимптотическая оценка η_2 :

$$\eta_2 = Q / |\dot{A}_{nm}|_{\max}^2. \quad (34)$$

Суммарные потери энергии в максимумах лучей по сравнению с однолучевой диаграммой раскрыва вычислим по формуле

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 \eta_2 = 1 / |\dot{A}_{nm}|_{\max}^2. \quad (35)$$

2.3. Аналитические выражения потерь энергии для частных случаев

В общем случае аналитические выражения для величины (35) получить не удастся. Рассмотрим некоторые частные случаи. В соответствии с (8) величины $\dot{A}_{nm}$ есть сумма Q распределений на раскрые решетки токов единичной амплитуды с линейным фазовым распределением.

Если фазовые распределения выбраны таким образом, что они имеют фазу, равную 0 на одном и том же антенном элементе с номером nm , то очевидно, что на этом элементе будет максимальная амплитуда токов, равная Q . В этом случае имеем максимальное ослабление энергии (см. (35)):

$$\eta_{\Sigma} = 1 / Q^2. \quad (36)$$

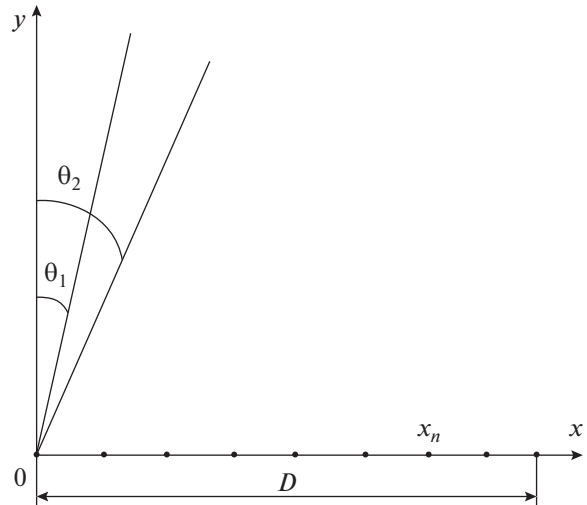


Рис. 3. Случай двух лучей с углами θ_1 и θ_2 .

Чтобы избежать максимальных потерь, можно попытаться выбирать распределения с некоторой начальной фазовой константой φ_q :

$$\Phi_q = -(kx_n u_q + ky_m v_q) + \varphi_q, \quad (37)$$

чтобы они не оказывались одинаковыми на каком-либо антенном элементе.

Однако в случае синтеза двухлучевой диаграммы фазовая добавка φ_q не позволяет избежать максимальной потери энергии. Покажем это на примере линейной АР. Предположим, что для этой решетки требуется синтезировать двухлучевую ДН с направлениями ориентации лучей $u_1 = \sin \theta_1$, $u_2 = \sin \theta_2$, где углы θ_1 и θ_2 отсчитываются относительно нормали к оси решетки (рис. 3).

На раскрые возбуждается сумма двух амплитудно-фазовых распределений

$$\dot{A}_n = \exp(-ikx_n u_1) + \exp(-ikx_n u_2 + i\varphi), \quad (38)$$

где φ — некоторая фаза. На раскрые антенны найдется точка, где фазы двух линейных фазовых распределений будут одинаковыми:

$$-kx_n u_1 = -kx_n u_2 + \varphi. \quad (39)$$

Из (39) следует

$$x_n = \frac{\varphi}{k(u_2 - u_1)}. \quad (40)$$

Если точка x_n лежит на раскрые решетки, то должно выполняться условие

$$\left| \frac{\varphi}{k(u_2 - u_1)} \right| \leq D,$$

где D — длина раскрыва. Это значит, что угол разделения $|u_2 - u_1|$ максимумов лучей должен удовлетворять условию

$$|u_2 - u_1| \geq \varphi \lambda / 2\pi D = (\varphi / 2\pi) \Delta u,$$

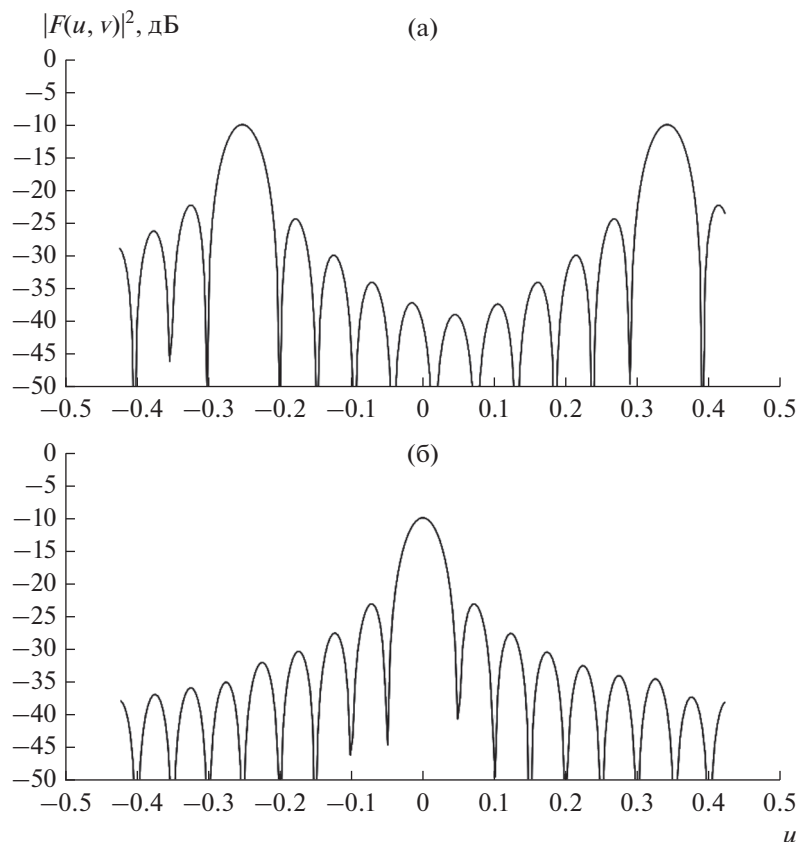


Рис. 4. Амплитудно-фазовый синтез трехлучевой диаграммы направленности. Сечения в плоскостях $v = 0$ (а) и $v = -0.25$ (б).

где Δu — ширина луча синфазного раскрыва, $0 \leq \varphi < \pi$.

Например, для фазы $\varphi = \pi$ из последнего выражения получаем

$$|u_2 - u_1| \geq \Delta u/2,$$

т.е. в этом случае угол разделения должен быть более половины ширины луча $\Delta u/2$.

В точке x_n , где выполняется равенство (39), имеем

$$|\dot{A}_{nm}|_{\max} = 2.$$

В результате для двухлучевой диаграммы относительные потери энергии (30) имеют величину $\eta_{\Sigma} = 1/4$, т.е. подчиняются закономерности (36), хотя для оптимальной величины (28) потери составляют $\eta_{\Sigma} = 1/2$.

Потери энергии для числа лучей, большего двух, должны определяться путем численного определения $|\dot{A}_{nm}|_{\max}^2$ для каждого конкретного случая ориентировки лучей в пространстве. С привлечением серии расчетов была проанализирована эффективность введения различных фазовых констант φ_q для случая трех лучей, обобщен-

ные угловые координаты которых соответствовали первой строке табл. 1. Были рассмотрены девять произвольных комбинаций фаз $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ из интервала $[0, 2\pi]$ и получены значения потерь энергии для каждого из трех лучей, близкие к значению -9.54 дБ, соответствующего формуле (36). Следовательно, введение комбинаций начальных фаз φ_q не является эффективной мерой уменьшения потерь энергии для трехлучевой диаграммы. Вероятно, что данный вывод распространяется на большее количество лучей многолучевой ДН.

Был проведен амплитудно-фазовый синтез трехлучевой диаграммы. Конфигурация АР и направления ориентации лучей были выбраны теми же, что и в случае фазового синтеза, представленного на рис. 1. На рис. 4а, 4б приведены сечения многолучевой диаграммы в плоскостях $v = 0$ и $v = -0.25$. Была определена величина максимальной амплитуды

$$|A_{nm}|_{\max} = 2.97$$

и потери энергии (30) $\eta_{\Sigma} = 9.6$ дБ.

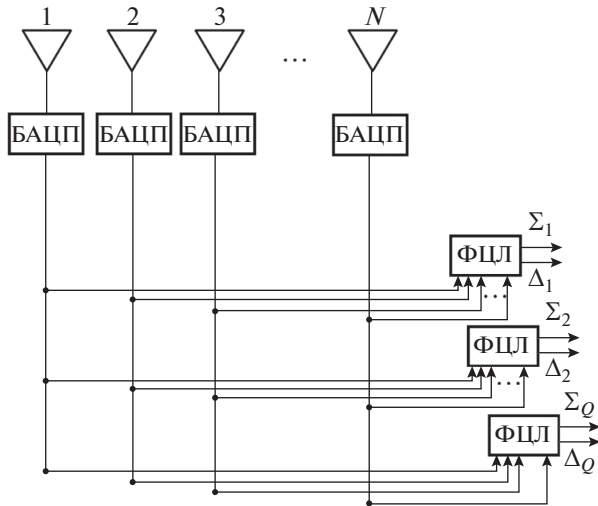


Рис. 5. Схема линейной цифровой антенной решетки.

3. ПРИНЦИП ОДНОВРЕМЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЛУЧЕЙ В ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

При рассмотрении построения цифровой многолучевой приемной решетки следуем работе [3]. В качестве примера рассматриваем линейную АР (рис. 5). Решетка имеет N антенных элементов, где N — четное число. Сигнал с выхода антенного элемента подводится к блоку аналого-цифрового преобразования (БАЦП), содержащему преобразователь частоты, усилитель и аналого-цифровой преобразователь.

Выход каждого БАЦП имеет Q ответвлений на Q формирователей цифровых лучей (ФЦЛ). В q -м формирователе выполняются следующие операции. Сигнал u_n с выхода n -го блока БАЦП умножается на весовой коэффициент $\dot{a}_n^{(q)}$

$$\dot{a}_n^{(q)} = a_n \exp(-ikx_n u_q), \quad (41)$$

где $u_q = \sin \theta_q$, θ_q — угол ориентировки q -го луча.

Взвешенные сигналы $u_n = u_n \dot{a}_n^{(q)}$ подаются на формирователи суммарной и разностной диаграмм для каждого q -го луча. В формирователях сначала вычисляются суммы для левой $u_{\text{лев}}$ и правой $u_{\text{прав}}$ половин решетки:

$$u_{\text{лев}} = \sum_{n=1}^{N/2} u_n \dot{a}_n^{(q)}, \quad u_{\text{прав}} = \sum_{n=1+N/2}^N u_n \dot{a}_n^{(q)},$$

а затем величины, соответствующие суммарной $F_{\Sigma_q}(u_q)$ и разностной $F_{\Delta_q}(u_q)$ диаграммам —

$$\Sigma_q = u_{\text{лев}} + u_{\text{прав}}, \quad (42)$$

$$\Delta_q = u_{\text{лев}} - u_{\text{прав}}. \quad (43)$$

Диаграммы (42) и (43) используются для моноимпульсной пеленгации целей в q -м луче и для последующей корректировки положения максимумов лучей в многолучевой диаграмме передающей АР.

Подчеркнем, одному формирователю приемного луча соответствует одна пара разностной и суммарной диаграмм. В результате q -й формирователь осуществляет селекцию сигналов, излученных q -м лучом многолучевой передающей диаграммы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм фазового синтеза многолучевой диаграммы является более простым для реализации, чем алгоритм амплитудно-фазового синтеза. Если антенная решетка имеет блочное построение, причем каждый блок имеет встроенный вычислитель, то вычисление фазового распределения можно проводить параллельно во всех встроенных вычислителях, что обеспечивает высокую скорость вычислений всего массива фаз для излучающей апертуры.

В случае алгоритма амплитудно-фазового синтеза полностью распараллелить вычисления не удастся, из-за того что требуется произвести предварительный расчет всех значений амплитуд $|\dot{A}_{nm}|$, а затем рассчитать их нормированные значения $|\dot{A}_{nm}|/|\dot{A}_{nm}|_{\max}$. Кроме того, если в случае фазового синтеза требуется расчет и управление только фазами, то в случае амплитудно-фазового требуется расчет и управление амплитудами и фазами.

Фазовый синтез имеет существенно меньшие потери энергии, чем амплитудно-фазовый.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. Гл. 10.
2. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. Гл. 19.
3. Brookner E., Howell J.M. // Proc. IEEE. 1986. V. 74. № 4. P. 602.
4. Кашин В.А., Кухтевич А.В. // РЭ. 1979. Т. 24. № 12. С. 2415.
5. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.Н. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М.: Радио и связь. 1985. С. 295.
6. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2011. Гл. 2.