

## ФОРМИРОВАНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ ВОКРУГ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРИЕМНОГО ЛУЧА В ЦИФРОВОЙ ФАР

Григорьев Л.Н., Кузнецов Ю.А.

### Введение

В фазированных антенных решетках (ФАР) с двумерным управлением лучом часто требуется вокруг основного приемного луча сформировать несколько вспомогательных лучей, например, с целью увеличения точности определения угловых координат обнаруженных объектов. Основным приемным лучом обычно называют центральным (**ц** – на рис. 1), относительно него формируются боковые лучи: **в** и **н** (верхний и нижний), **л** и **п** (левый и правый), **вл** и **вп** (верхний левый и верхний правый), **нл** и **нп** (нижний левый и нижний правый). Варианты расположения лучей в поперечном сечении в координатах азимут и угол места ( $\beta$  и  $\varepsilon$ ) показаны на рис. 1.

Лучи, образующие «розочку», содержатся также в «матрице» и «ромашке», где имеются еще угловые лучи. В «матрице» угловые лучи несколько отдалены от центрального луча, в «ромашке» все боковые лучи «касаются» центрального луча. Для точного определения угловых координат обнаруженных объектов используется отношение уровней сигналов, принимаемых центральным и боковыми лучами. Очевидно, что при равновероятном расположении объекта относительно приемных лучей точность определения угловых координат (при прочих равных условиях) будет наибольшей при использовании «ромашки» и наименьшей – при «розочке».

Настоящая статья посвящена экономным методам формирования боковых лучей ФАР относительно центрального луча при определенной структуре (геометрии) расположения излучателей.

**Исходные условия:** излучатели ФАР расположены по строкам и столбцам, принимаемые излучателями сигналы оцифровываются, положение центрального луча относительно нормали ФАР определяется соответствующим фазовым распределением по раскрытию антенны.

**Ставится задача:** минимизировать объем вычислительных операций при формировании боковых лучей относительно центрального луча. Эффективность

*Рассмотрен способ формирования вспомогательных лучей вокруг центрального приемного луча в цифровой фазированной антенной решетке при строчно-столбцовом расположении излучателей. Показана возможность существенного сокращения операций умножения при формировании вспомогательных лучей по сравнению с традиционным способом.*

решения задачи будем оценивать по сокращению количества операций умножения.

### Универсальный подход

Для формирования боковых лучей используется цифровое фазовое распределение по раскрытию ФАР, соответствующее положению центрального луча. Его положение по отношению к нормали ФАР может быть любым (в пределах сектора сканирования). Фазовый фронт каждого бокового луча должен быть повернут относительно фазового фронта центрального луча определенным образом. Для этого необходимо в каждый излучатель ФАР ввести определенную фазовую добавку. Изменение фазы есть операция умножения. Для формирования одного бокового луча требуется количество операций умножения, равное количеству излучателей. Последующее сложение сигналов излучателей даст один боковой луч. При формировании нескольких боковых лучей количество операций умножения увеличивается пропорционально количеству лучей.

Такой подход применим при любой геометрии расположения излучателей в раскрытии ФАР. Рассмотрим как можно упростить решение задачи при строчно-столбцовом расположении излучателей.

### Формирование «розочки» лучей

При строчно-столбцовой структуре ФАР для формирования, например, лучей **л** и **п** необходимо «повернуть» фазовый фронт центрального луча вокруг столбца до необходимого положения (влево или вправо).

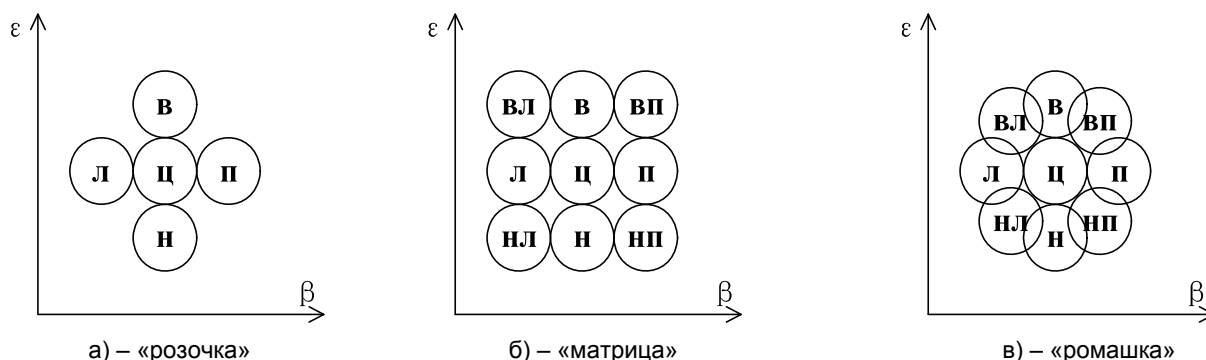


Рис. 1

При таком «повороте» взаимное соотношение фаз по столбцу не меняется, но необходимо обеспечить одинаковую дополнительную нарастающую фазу между столбцами. Следовательно, в отдельно взятом столбце сигналы всех излучателей должны получить одинаковый дополнительный фазовый сдвиг (умножение на одинаковую величину). Это позволяет модифицировать алгоритм: сигналы излучателей, соответствующие положению центрального луча, сначала суммировать по столбцам, затем эти суммарные сигналы сдвинуть по фазе (умножить) с нарастанием от столбца к столбцу, после чего просуммировать полученные произведения. В результате получим сигнал, соответствующий лучу **л** или **п**.

Для левого луча (при одинаковом шаге между столбцами):

$$U_{\text{л}} = \sum_{i=1}^n U_{1i} + \sum_{j=2}^m [(j-1)\Delta\varphi] \sum_{i=1}^n U_{ji} \quad (1)$$

где  $U_{\text{л}}$  – выходной сигнал луча **л**,

$i$  – номер строки,

$j$  – номер столбца,

$U_{ji}$  – сигнал излучателя  $j$ -го столбца  $i$ -ой строки,

$U_{1i}$  – сигнал излучателя первого столбца  $i$ -ой строки,

$n$  – количество строк,

$m$  – количество столбцов,

$\Delta\varphi$  – дополнительный фазовый сдвиг между соседними столбцами.

В формуле (1) использована условная запись произведения  $\Delta\varphi \cdot U$ , означающая поворот вектора сигнала  $U$  на угол  $\Delta\varphi$  (реально надо вычислять квадратуры результирующего сигнала с использованием квадратур исходного сигнала и квадратур единичного сигнала с фазой  $\varphi$ ). Это условное упрощение формулы позволяет яснее понять общий алгоритм преобразования, не вникая в сложности операций с квадратурами.

В крайний столбец не требуется вводить дополнительную фазу (при  $j=1$ ), поэтому количество операций умножения составляет  $(m-1)$ , количество складываемых величин равно  $m \cdot n + m = m(n+1)$ .

По сравнению с универсальным методом количество операций умножения сокращается в  $m \cdot n / (m-1)$  раз, при  $m \gg 1$  выигрыш получим приблизительно в  $n$  раз.

Для правого луча **п** (при одинаковом с левым лучом отклонении от центрального луча) имеем

$$U_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n U_{1i} + \sum_{j=2}^m [(j-1)(-\Delta\varphi)] \sum_{i=1}^n U_{ji} \quad (2)$$

при таком же выигрыше в сокращении операций умножения, как и для луча **л**.

Упрощенная схема (алгоритм) формирования лучей **л** и **п** показана на рис. 2.

Верхний и нижний лучи формируются аналогичным образом с той разницей, что сигналы до умножения суммируются по строкам. При одинаковом шаге между строками имеем:

$$U_{\text{В,Н}} = \sum_{j=1}^m U_{j1} + \sum_{i=2}^n [(i-1)(\pm\Delta\psi)] \sum_{j=1}^m U_{ji} \quad (3)$$

Здесь  $\Delta\psi$  – дополнительный фазовый сдвиг между соседними строками (для луча **в**  $\Delta\psi$  берется со знаком «+», для **н** – со знаком «-»).

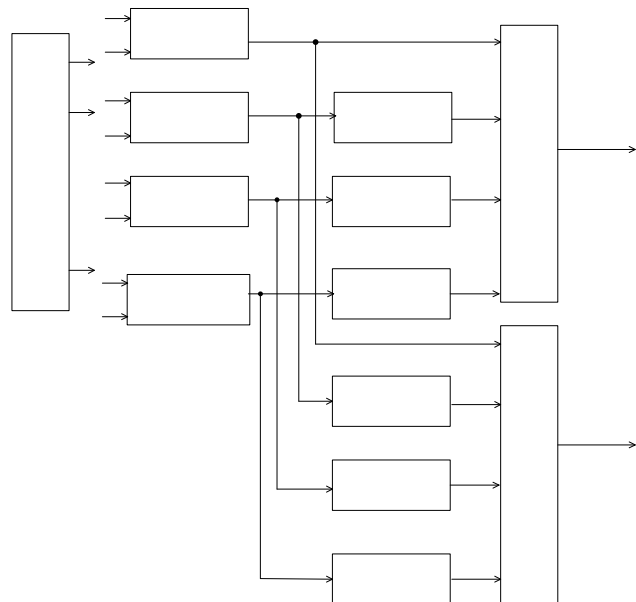


Рис. 2.

Количество операций умножения для формирования одного луча составляет  $(n-1)$ . Количество складываемых величин равно  $m \cdot n + n = n(m+1)$ , для случая  $n=m$  получим соответственно  $n(n+1)$ .

Схема формирования лучей **в** и **н** аналогична рис. 2 с той разницей, что до умножения сигналы суммируются по строкам.

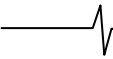
Положение лучей **л**, **п**, **в**, **н** относительно центрального луча можно менять путем выбора соответствующих значений  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\psi$ , при этом указанные лучи будут перемещаться в направлениях, указанных стрелками на Рис.1а. Эти направления перпендикулярны столбцам или строкам.

Данный способ формирования боковых лучей «розочки» изложен в [1]. Он применим при строчно-столбцовой геометрии размещения излучателей и может быть использован при разной геометрии плоскости раскрыва ФАР (прямоугольная, овальная и др.). При неэквидистантном расположении столбцов (строк) формулы (1), (2), (3) следует уточнить: дополнительная фаза между соседними столбцами(строками) должна соответствовать шагу между ними. Применим он также при разделении ФАР на подрешетки (с суммированием сигналов в подрешетках) с последующим использованием сигналов подрешеток для формирования боковых лучей.

### Формирование лучей «матрицы»

В «матрице» лучи **л**, **п**, **в** и **н** формируются изложенным выше способом. К ним надо добавить угловые лучи **вл**, **нл**, **вп** и **нп**. Для их формирования воспользуемся таким же подходом – поворот фронта волны центрального луча относительно диагонали, соединяющей углы прямоугольника, образованного соседними излучателями строк и столбцов.

Рассмотрим это на примере квадратной ФАР с одинаковым шагом излучателей по вертикали и по горизонтали. На рис. 3 точками представлено расположение излучателей для ФАР, состоящей из 5 строк и 5 столбцов, и показаны диагональные линии (слева вверх направо), соединяющие соответствующие излучатели. При повороте фазового фронта центрального луча вокруг одной из диаго-



нальных линий взаимное соотношение фаз по линии не меняется, но необходимо обеспечить одинаковую дополнительную нарастающую фазу между линиями.

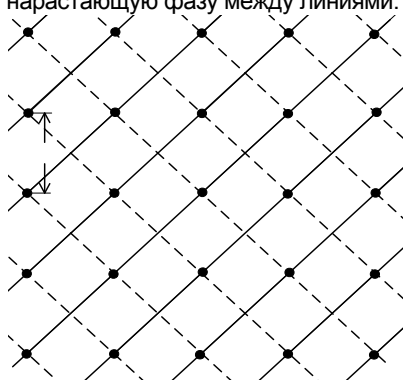


Рис. 3

Следовательно, в отдельно взятой диагональной линии сигналы всех излучателей получают одинаковый фазовый сдвиг, поэтому можно сначала просуммировать сигналы излучателей по линиям, а затем полученные суммы умножить на соответствующий фазовый сдвиг. В результате получим лучи **вл** или **нп**, которые смещены относительно центрального луча перпендикулярно диагонали.

При повороте фазового фронта относительно другой диагональной линии (на рис.3 ортогональные диагональные линии показаны пунктиром слева вниз направо) можно аналогичным образом сформировать лучи **лн** или **пв**.

Количество диагональных линий в квадратной решетке (при  $n=m$ ) будет равно  $(2n-1)$ . Суммирование сигналов по линиям, проходящим через угловые излучатели (одиночные), не требуется. Сигнал одиночного углового излучателя ( $U_{11}$ ) умножать также не требуется. Поэтому для формирования одного углового луча необходимо  $(2n-3)$  сумматора,  $(2n-2)$  умножителя и один выходной сумматор.

Схема (алгоритм) формирования двух угловых лучей (например, **лв** и **нп**) представлена на рис. 4, где  $\Delta\theta$  – дополнительный фазовый сдвиг между соседними диагональными линиями.

Количество операций умножения для формирования одного углового луча в 2 раза больше, чем при формировании луча «розочки». По сравнению с универсальным методом сокращение операций умножения будет примерно в  $n/2$  раза (при  $n \gg 1$ ). Количество складываемых величин равно  $(n+1)^2-4$ .

Угловые лучи **лн** и **вн** формируются аналогичным образом с той разницей, что сигналы до умножения суммируются по другим диагональным линиям (пунктирные линии на рис. 3).

Положение угловых лучей относительно центрального луча можно менять путем выбора необходимых значений фазового сдвига между соседними диагональными линиями, при этом угловые лучи будут перемещаться в направлениях, перпендикулярных диагоналям.

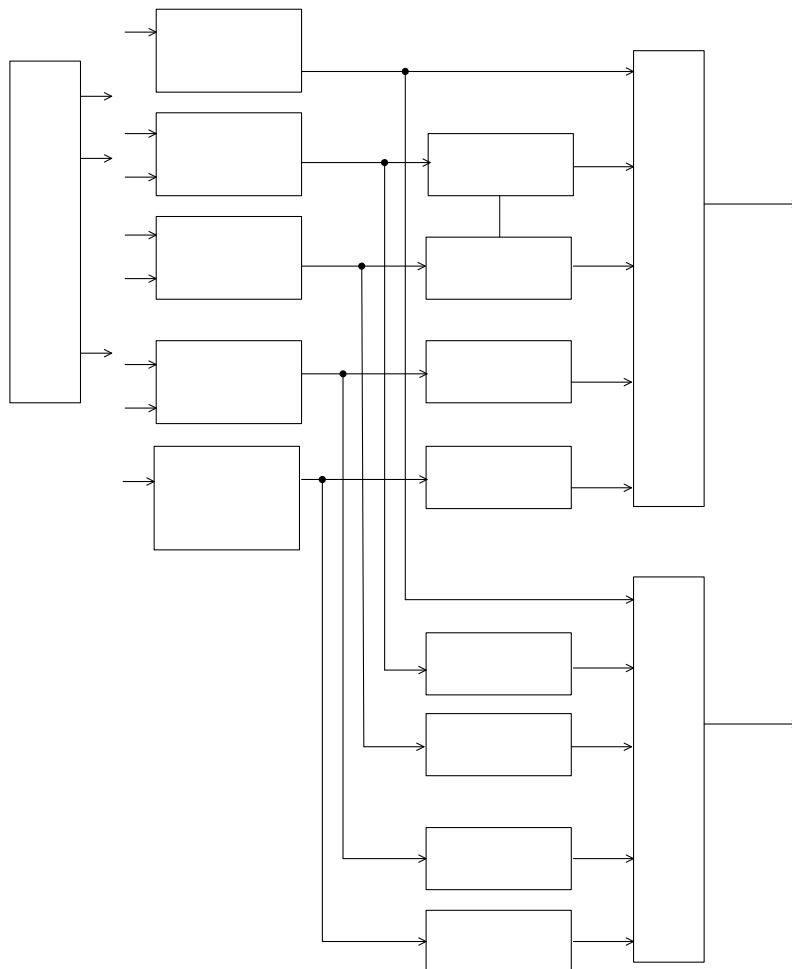


Рис. 4.

Количество	Рассмотренный способ		Универсальный способ
	лучи <b>в, н, л, п</b>	лучи <b>нл, вп, вл, нп</b>	
1. Операций умножения	$n - 1$	$2(n - 1)$	$n^2$
2. Операций сложения	$n + 1$	$2(n - 1)$	1
2.1. Складываемых величин в одной операции сложения	$n$	от 2 до $(n - 1)$	$n^2$
2.2. Всего складываемых величин	$n^2 + n$	$(n+1)^2 - 4$	$n^2$

### Формирование лучей «ромашки»

«Ромашка» формируется тем же способом, как и «матрица». Положение угловых лучей относительно центрального луча определяется выбором необходимого значения фазового сдвига между соседними диагональными линиями, обеспечивающего требуемое пересечение углового луча с центральным.

Прежде чем сделать заключительные выводы о представленном способе формирования лучей в цифровой ФАР, - несколько замечаний о пределах его применения. Исходным условием применения является строчно-столбцовая геометрия размещения излучателей. Шаг решетки в одном измерении должен быть одинаковым. Допускается разный шаг решетки по двум измерениям: по вертикали один шаг, по горизонтали – другой. Изложенные условия достаточны для применения данного способа[2].

Иной вопрос – обеспечение одинакового уровня пересечения угловых лучей с соседними вспомогательными лучами. Это определяется, во-первых, формой лучей в поперечном сечении (т.е. соотношением вертикального и горизонтального размеров ФАР) и, во-вторых, - положением диагоналей. Приведенная на Рис.1 конфигурация лучей является частным случаем, когда лучи имеют карандашную форму, а ФАР имеет одинаковый шаг решетки по столбцам и строкам. В общем случае сечение луча может отличаться от круга, и не всегда возможно требуемое размещение угловых лучей относительно других, что надо учитывать при формировании ансамбля пеленгационных характеристик для определения угловых координат.

Изложенный подход – поворот фазового фронта центрального луча вокруг строки, столбца и диагонали – можно использовать и для общего случая, когда строки и столбцы расположены не под прямым углом, а диагонали взаимно не перпендикулярны. Взаимное расположение лучей при этом отличается от показанного на Рис.1. Представляет интерес вариант, в котором соседние друг с другом излучатели расположены на вершинах ромба. Диагонали ромба

можно разместить по вертикали и горизонтали (они взаимно перпендикулярны) и формировать относительно них «розочку», а угловые лучи будут перемещаться перпендикулярно сторонам ромба. Изменяя угол при вершине ромба (в зависимости от размеров луча по вертикали и горизонтали), можно варьировать положения угловых лучей и уровни их пересечений с соседними лучами.

### Заключение

Представленный способ формирования в цифровой ФАР боковых приемных лучей вокруг центрального луча позволяет существенно уменьшить количество операций умножения по сравнению с универсальным методом. Для квадратной ФАР с одинаковым количеством строк и столбцов ( $n=m$ ) это уменьшение будет в  $n$  раз при формировании боковых лучей «розочки», и в  $n/2$  раз при формировании «угловых» лучей «матрицы» и «ромашки» (при  $n \gg 1$ ).

При этом несколько увеличивается количество операций сложения, но при уменьшении количества складываемых величин в одной операции. Приведенная таблица дает количество операций умножения и сложения (для квадратной ФАР) при формировании одного бокового луча.

Для иной формы плоскости раскрытия ФАР (в том числе с неодинаковым количеством строк и столбцов) количество операций умножения легко определяется по изложенной выше методике и зависит от количества строк, столбцов и диагональных линий. При этом использование формы, близкой к «гладкой» (круг, овал и т.п.), даст уменьшение количества диагональных линий.

### Литература

1. Григорьев Л.Н., Кузнецов Ю.А. «Устройство формирования диаграммы направленности цифровой ФАР». Патент на полезную модель №52266.
2. Григорьев Л.Н., Кузнецов Ю.А. «Устройство формирования вспомогательных лучей в цифровой ФАР». Заявка на полезную модель №2009110097, приоритет от 20 марта 2009г.