

## СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАР

Лыткина Ю.А.,

научный руководитель канд. техн. наук, доц. Вяхирев В.А.

*Сибирский федеральный университет*

В связи с быстрым темпом развития вооружения и военной техники (ВВТ) большинство задач современной радиолокации решается с использованием фазированных антенных решеток (ФАР). Применение таких антенн дает возможность формировать необходимую диаграмму направленности (ДН), управлять ею в определенных пределах, производить быстрое сканирование пространства, при этом не прибегая к их механическому повороту. В силу этого управление ФАР отличается от управления антеннами других видов.

Существует множество алгоритмов управления ФАР:

1. Алгоритмы максимизации коэффициента направленного действия (КНД).
2. Строчно-столбцовые алгоритмы управления.
3. Алгоритмы управления многокольцевыми ФАР.
4. Алгоритмы управления плоской ФАР с неуправляемой линзой.
5. Алгоритмы управления несколькими взаимодействующими ФАР.
6. Алгоритмы распределенного управления и фазирования ФАР.

Рассмотрим особенности каждой группы алгоритмов более подробно.

### 1. Алгоритмы максимизации коэффициента направленного действия.

Основной задачей данной группы алгоритмов является обеспечение максимального КНД в заданном направлении. Условие максимума определяется соотношением

$$\Psi(r_0, U_0) = \Phi_{\text{нач}} \cdot \Phi_p(r_0) \cdot \Phi_y(U_0) = \mathbf{I}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{нач}}$  – матрица начального фазового распределения;  $\Phi_p(r_0)$  – матрица пространственного набега фаз;  $\Phi_y(U_0)$  – матрица управляемых фазовых сдвигов, образуемых фазовращателями.

Данная группа алгоритмов хорошо зарекомендовала себя в обычной беспомеховой обстановке, обеспечивая максимальную дальность работы средств радиолокации. Однако в ряде случаев возникает необходимость управления ФАР с существенным уменьшением КНД, например, за счет формирования провалов характеристики направленности антенны в направлении источника помех. В результате этого используется большое количество алгоритмов, оптимизированных по определенным правилам, например, стабилизация КНД антенной решетки при фазовом синтезе нулей, минимизация систематических ошибок измерения и др.

### 2. Строчно-столбцовые алгоритмы управления.

Данная группа алгоритмов основана на управлении лучом в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной. Как показано на рисунке, на каждой строке (столбце) расположены излучатели с одинаковым шагом, нумерация их двойная – номер строки и номер столбца. Если начало координат совмещено с излучателем, то вектор координат излучателя является суммой двух векторов шагов решетки по осям  $X$  и  $Y$ :

$$\tilde{R}_{mn} = m\tilde{\gamma}_y + n\tilde{\gamma}_x, \quad (2)$$

где  $\tilde{\gamma}_y, \tilde{\gamma}_x$  – шаги решетки по осям  $y$  и  $x$  соответственно.

Если же начало координат не совмещено с излучателем (при наличии множества подрешеток поверхностной ФАР), то в формуле (2) необходимо учесть вектор положения начальной системы координат  $k$ -й подрешетки.

Наиболее распространенные решетки элементов имеют либо прямоугольную, либо треугольную сетку.

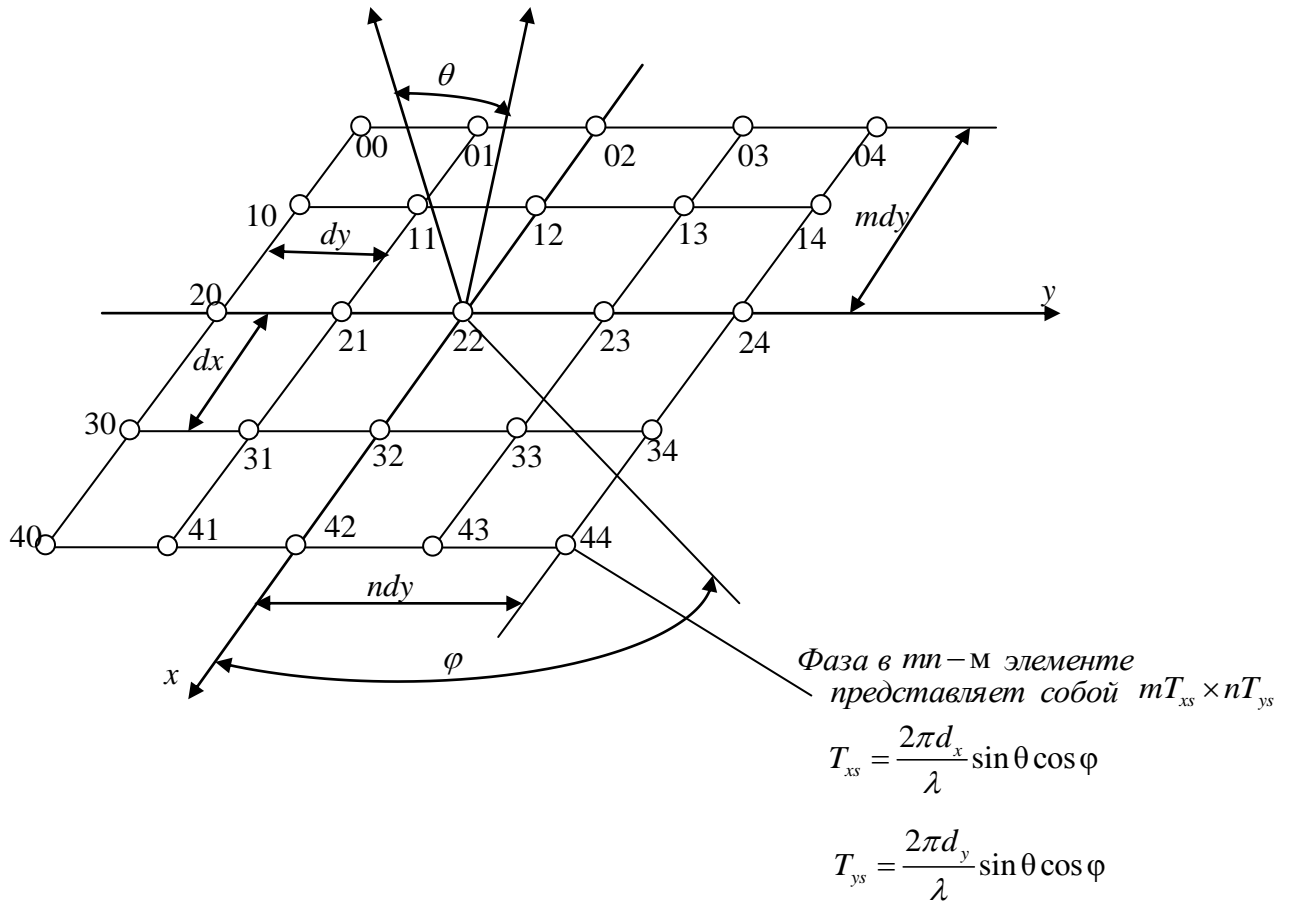


Рис. Геометрические и фазовые соотношения в плоской решетке

На практике чаще всего применяют осесимметричные структуры плоских решеток, т. е. когда начало координат совмещено с центром решетки. Это позволяет использовать правила симметрии, т. е., разбив плоскость на четыре квадранта, можно вычислять коды фаз для одного из них.

Данная группа алгоритмов чаще используется в стационарных радиолокационных станциях (РЛС), где несколько плоских ФАР размещается под углом друг к другу. Алгоритмы для управления такими ФАР часто описываются простыми математическими выражениями и особой трудности в технической реализации в современных условиях не вызывают.

Однако данная группа алгоритмов имеет существенные недостатки:

- При адаптации к направлению источника помехи, находящейся в нормали в одной из плоскостей, происходит полное подавление полезного сигнала.
- При увеличении отклонения от нормали уменьшается КНД и угол работы современных антенных решеток достигает  $\pm 60^\circ$ .

Последний недостаток устранен в многокольцевых антенных решетках, т. е. в них имеется возможность управления в круговую.

### **3. Алгоритм управления многокольцевыми ФАР.**

Синтез алгоритма управления многокольцевыми ФАР основан на простом рекуррентном алгоритме определения фазы  $(k + 1)$ -го излучателя по известным фазам  $k$ -го и  $(k - 1)$ -го излучателей, т. е. для определения фазы всех излучателей многокольцевой ФАР необходимо знать фазы двух соседних излучающих элементов  $i$ -го кольца. Следует отметить, что при четном порядковом номере излучателя в  $i$ -м кольце можно найти излучатель  $k$ , фаза которого будет противоположна по знаку, что существенно увеличит быстродействие данного алгоритма.

Этот алгоритм может быть применен для управления коническими, сферическими и цилиндрическими кольцевыми ФАР. Однако его очень сложно адаптировать к помехам из-за многоярусной структуры антенной решетки и алгоритмов обработки сигналов.

### **4. Алгоритм управления плоской ФАР с неуправляемой линзой.**

Применение данного алгоритма позволяет обеспечить сканирование более чем в полусфере  $\pm 120^\circ$ , что значительно больше плоских ФАР со строчно-столбцовым управлением. Однако неуправляемая линза (купол) вносит дополнительные потери и искажения в ДН антенны. Данному способу управления присущи следующие недостатки: пространство между куполом и ФАР нельзя заполнять чем-либо; вычислители средства управления лучом для такой антенны значительно сложнее, чем для поверхностной ФАР: форма фазового распределения линзы в общем случае заранее неизвестна и зависит от показателя преломления линзы.

### **5. Управление несколькими взаимодействующими ФАР.**

Очень часто в современных РЛС возникает задача создания антенных комплексов, состоящих из нескольких отдельных ФАР, разнесенных в пространстве. Такое размещение антенных комплексов позволяет создать более узкие ДН, повысить скрытность радиолокатора, а также решать задачи радиосвязи, радиоразведки и пр. При этом данные решетки могут быть как одного диапазона волн и работать на одной частоте, так и на различных частотах. В случае использования одной большой антенны с непрерывным раскрытием его представляют в виде нескольких отдельных ФАР с выводом управления на один пункт обработки и управления. Для этого используются алгоритмы управления и фазовой синхронизации одновременно.

В связи с этим все ФАР в зависимости от складывающейся температурной, помеховой, воздушно-огневой обстановки требуют совместной синфазной работы. Для этих целей используют следующие методы настройки:

- *Метод управления устройствами фазирования удаленных генераторов.* Сущность данного метода заключается во введении компенсирующих обратных связей. Для фазировки двух удаленных друг от друга генераторов можно использовать фазовую подстройку частоты, такую, что выходное напряжение будет равно нулю. При изменении задержки в линии связи будет изменяться частота обоих генераторов. Для устранения такой зависимости один из генераторов делают задающим, другой – ведомым.

- *Метод управления ФАР с помощью пилот-сигнала.* Имеется две ФАР, каждая из которых управляется пилот-сигналом от другой. Для формирования оптимального по передаваемой мощности амплитудно-фазового распределения (АФР) антенны 1 (антенны 2) используют либо итеративную процедуру (имеется АФР на антенне 1, которое создает на антенне 2 пилот-сигнал, по этому пилот-сигналу на антенне 2 создается АФР на антенне 1), либо рассчитывают необходимое АФР (найти собственное максимальное АФР и умножить его на коэффициент, обеспечивающий равенство излучающей мощности номинальной, создавая при этом при

фазосопряженном управлении на другой антенне максимальную передаваемую мощность).

Рассмотрев оба метода, можно сделать вывод о том, что использование пилот-сигнала будет более целесообразным на практике. Очевидным недостатком первого метода является высокое требование к надежности элементов, так как отказ в цепи одного звена может привести к существенным искажениям фазового фронта. Использовать такой алгоритм возможно только на передачу. Вторым методом можно использовать для любого типа антенн.

Падающая на апертуру приемной антенны волна записывается  $k$ -мерным вектором  $\mathbf{s}$ :

$$\mathbf{s} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{e}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{M}$  –  $(m \times k)$ -мерная матрица передачи;  $m$  – количество излучателей;  $k$  – порядковый номер элемента ФАР;  $\mathbf{e}$  – вектор направления излучения.

### **6 Алгоритм распределенного управления и фазирования ФАР.**

При управлении большими ФАР устройства управления располагают вблизи управляемых фазовращателей с целью сокращения количества соединительных фидеров. Распределенное управление можно осуществлять как в дискретной форме, так и в аналоговой. В антеннах такого типа возможно применение фазовращателей непрерывного действия, при этом нестабильность их характеристик управления не будет влиять на результат фазирования. Управление осуществляется в данном алгоритме по одному фидеру, а управляющие сигналы передаются от элемента к элементу с учетом их расположения.

Данный алгоритм применим для линейных, поверхностных и плоских ФАР.

Выше рассмотренные алгоритмы позволяют полностью раскрыть все возможности управления ФАР. Однако каждый алгоритм применим только для конкретной технической реализации и наилучшим образом решает только одну из поставленных перед РЛС задач. Совмещение нескольких алгоритмов позволяет расширить круг решаемых задач и создать более универсальные РЛС.