

Фазовый синтез расширенных лучей в ФАР

А.Н. Грибанов, А.Н. Титов, Г.Ф. Мосейчук, С.Е. Гаврилова

АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»

Россия, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д.3, niki@nio11.niip.ru

Излагаются теоретические основы метода фазового синтеза одномерно расширенных лучей ФАР. Метод позволяет на основе известного амплитудного распределения в раскрыве и требуемой формы луча однозначно определить фазовое распределение. Предложен метод определения обобщенного вида аналитического выражения фазового распределения, применяемого для формирования секторных лучей ФАР. В формулу для расчета фазового распределения входит только коэффициент расширения луча. Алгоритм определения формулы отличается простотой и практической реализуемостью. Метод может быть применен в ФАР и АФАР с линейными и плоскими раскрывами.

The theory of proposed method of phase synthesis of one-dimensionally extended phased array beams is posed. The method allows uniquely determine required phase distribution on the basis given amplitude aperture distribution and required beam shape. A method for defining generic analytical expression of phase distribution applied for sector beam formation in phased arrays is presented. Only the beam extension ratio is taken for phase distribution calculation in the formula. The formula definition algorithm is simple and practically feasible. The method can be applied in phased arrays with linear and planar apertures.

Введение

Антенны должны формировать диаграммы направленности, форма которых наилучшим образом способствует решению задач, стоящих перед бортовой РЛС. В большинстве режимов радиолокаторы при работе по воздушным целям используют ДН, имеющие лучи карандашной формы, а также расширенные в одной или двух плоскостях. Для работы по земле часто применяют лучи вида « $\operatorname{cosec}^2(\theta)$ ». При использовании пассивной ФАР в качестве антенны РЛС необходимо принимать во внимание, что амплитудное распределение жестко определяется параметрами распределительной системы и в процессе эксплуатации изменяться не может. Поэтому все трансформации формы луча могут производиться только посредством изменения фазового распределения в раскрыве ФАР.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию вопросов фазового синтеза лучей специальной формы [1÷4], число методов, доведенных до практического использования, сравнительно невелико. Большинство современных научных публикаций, посвященных исследованию тех или иных фазовых методов, базируются на использовании численных технологий, что позволяет находить отдельные варианты расширения луча, но затрудняет поиск обобщенных решений для всего класса тех или иных форм лучей.

В данной работе приводятся результаты развития так называемого фазового метода веерных парциальных диаграмм [5÷7], который наряду с простотой решения, позволяет находить *аналитические* соотношения, связывающие параметры одномерно расширенных лучей с формулами для расчета фазового распределения (ФР) в раскрыве ФАР.

Базовые положения фазового метода виртуальных парциальных ДН

В основе метода лежит использование уравнения Парсевалья. При формировании расширенных лучей вся энергия, излучаемая раскрывом антенны, должна быть распределена в угловом пространстве от $u_{\min}=\sin(\theta_{\min})$ до $u_{\max}=\sin(\theta_{\max})$, и уравнение

Парсевалю для случая ФАР с линейным дискретным раскрывом может быть приведено к виду

$$\frac{1}{L} \sum_{n=1}^N A_{n_cp}^2 \Delta x_n = \sum_{n=1}^N F_{n_cp}^2 \Delta u_n \quad (1)$$

где N – число излучателей раскрыва и число угловых интервалов разбиения луча;

L – длина антенны;

Δx_n – n -ый участок раскрыва антенны;

$A_{n_cp}^2$ – средняя величина излучаемой мощности на участке раскрыва Δx_n ;

Δu_n – n -ый угловой интервал, выраженный в переменных $u = \sin(\theta)$;

$F_{n_cp}^2$ – средняя величина мощности поля в угловом интервале Δu_n .

Поскольку геометрические параметры раскрыва и его возбуждение известны, то полностью определены все члены левой суммы. Требуемый вид луча $F(u)$ считается заданным, неопределенными являются угловые интервалы $\{\Delta u_n\}$ и соответствующие им средние значения $\{F_{n_cp}^2\}$.

Очевидно, что уравнение (1) имеет множество решений. Самое простое решение можно получить, при почленном равенстве слагаемых, т.е. при выполнении для всех значений n соотношения

$$\frac{1}{L} A_{n_cp}^2 \Delta x_n = F_{n_cp}^2 \Delta u_n \quad (2)$$

Выражение (2) является ключевым для рассматриваемого метода фазового синтеза. Физически оно означает, что энергия, излучаемая каждым n -ым элементом раскрыва, расположенным на интервале Δx_n , должна быть направлена в соответствующую n -ую угловую зону, и именно она должна определять плотность энергии в зоне Δu_n . Процесс определения расположения n -ой угловой зоны и ее размеров можно наглядно отобразить при использовании соответствующих интегральных функций $P(x)$ и $P(u)$, выражающих энергетический баланс распределения энергии в раскрыве ФАР с одной стороны и углом в пространстве с другой (рис. 1).

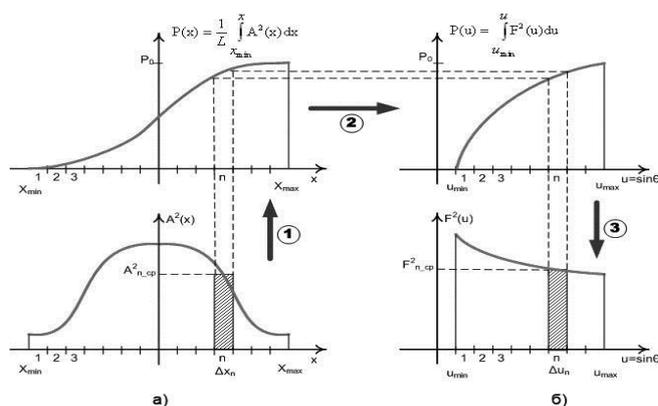


Рис. 1. Формирование расширенного луча
 а) область излучения на раскрыве;
 б) угловая область формируемого луча.

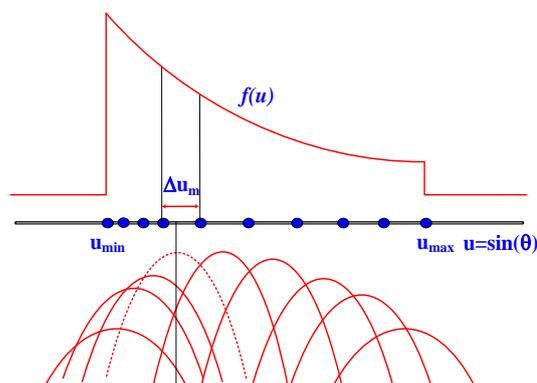


Рис. 2. Формирование расширенного луча. Показан вид формируемого луча $f(u)$ и парциальные лучи.

Требуемая форма луча обеспечивается за счет правильного расположения парциальных лучей с учетом их уровня (рис. 2)

В дискретной ФАР удобно в качестве подрешеток использовать два соседних излучателя. Уровень максимумов парциальных ДН $F_m(0)$ определяется видом амплитудного распределения в раскрыве и местоположением пары соответствующих излучателей:

$$A_{m_cp} = F_m(0) = \begin{cases} A_1 + \frac{1}{2} A_2, & m = 1 \\ \frac{1}{2} A_m + \frac{1}{2} A_{m+1}, & m \in [2, M - 2] \\ \frac{1}{2} A_{M-1} + A_M, & m = M - 1 \end{cases} \quad (3)$$

Ширина углового интервала, выделяемого каждому парциальному лучу (рис. 2), пропорциональна уровню парциального луча и определяется в наиболее простом случае секторного расширения исходного луча эквидистантной ФАР, выражением

$$\Delta u_m = \left(\frac{u_{\max} - u_{\min}}{\sum_{i=1}^{M-1} F_i^2(0)} \right) F_m^2(0) \quad (4)$$

Максимумы парциальных лучей должны быть направлены в центры соответствующих интервалов, поэтому они будут определяться выражением

$$u_m = u_{\min} + \sum_{n=1}^{m-1} \Delta u_n + 0.5 \Delta u_m \quad (5)$$

Для установки парциальных лучей в направления $\{u_m\}$ необходимо обеспечить сдвиг фаз на правых излучателях подрешеток на величину

$$\Delta \varphi_{m+1} = -k d u_m \quad (6)$$

С учетом того, что фазу первого (самого левого) излучателя можно не изменять, искомая фаза излучателя с номером m ($m > 1$) будет определяться формулой

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta \varphi_i = -k d \sum_{i=2}^m u_{i-1} \quad (7)$$

Пользуясь рассмотренным методом, можно формировать как одномерно расширенные секторные лучи, так и лучи, уровень которых зависит от угловой переменной, например, вида « $\text{cosec}^2(\theta)$ » [5]. Основное преимущество данного метода заключается в том, что расчет фазового распределения сводится к простым математическим выражениям, дающим однозначное решение.

Получение обобщенной формулы фазового распределения

Отличительной чертой получаемых ФР является плавный характер изменения фаз вдоль раскрыва. Поэтому ФР может быть аппроксимировано некоторой функцией, зависящей от удаленности излучателя от центра раскрыва. В качестве таких функций целесообразно брать полиномиальные, так как для них хорошо разработан аппарат аппроксимации. Кроме того, работа с такими функциями требует относительно небольшой производительности бортовых вычислительных средств. ФР, формирующие симметрично расширенные секторные лучи, также являются симметричными относительно центра раскрыва, поэтому выражение для фаз возбуждения элементов будет иметь вид:

$$\varphi(h) = \sum_{n=1}^N A_n(Kp) \cdot (h)^n, \quad (8)$$

Где h – удалённость излучателя от центра раскрыва;

N - число членов полинома;

Kp – коэффициент расширения секторного луча;

A_n - коэффициенты полинома.

Значения коэффициентов полинома $\{A_n\}$ зависят от вида полученного ФР, а, следовательно, от значения Kp .

Найти обобщенное решение, справедливое для всех значений коэффициента расширения луча K_p , предлагается на основе анализа совокупности фазовых распределений, полученных с помощью метода веерных парциальных диаграмм для различных значений K_p . Для этого необходимо провести аппроксимацию второго уровня.

На этом этапе необходимо для всего диапазона значений K_p рассчитать массив величин $\{A_n\}$ и эти данные в свою очередь аппроксимировать какой-либо функцией [7]. Эту аппроксимацию можно также проводить с помощью полиномиальных функций.

В этом случае обобщенная формула фазового распределения может быть записана в следующем виде:

$$\varphi(K_p, h) = \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M B_{nm} \cdot K_p^m \right) \cdot (h)^n, \quad (9)$$

где B_{nm} – коэффициенты полиномов аппроксимации второго уровня.

Важно правильно выбрать число членов N и M используемых полиномов. Дело в том, что при формировании конкретного фазового распределения в раскрыве ФАР расчет фаз по переменной m необходимо проводить один раз, а по переменной n – для каждого излучателя раскрыва, число которых может быть достаточно велико. Поэтому, избыточное число используемых членов ряда приведет к неоправданному увеличению времени, отводимому на подготовительные расчеты, а недостаточная степень используемых полиномов приведет к искажению формы секторного луча.

Окончательное решение о достаточной точности аппроксимации фазового распределения необходимо принимать по результатам математического моделирования ДН конкретной ФАР с заданным возбуждением раскрыва.

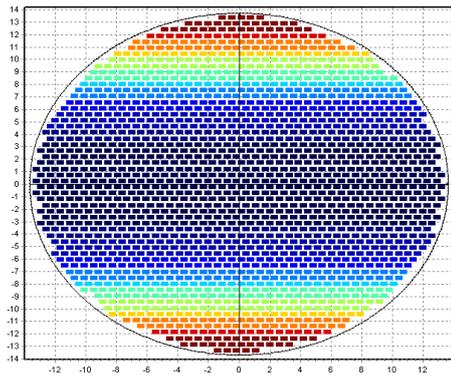
Пример математического моделирования

Рассмотрим результаты моделирования для ФАР с раскрывом круглой формы диаметром $D \approx 28\lambda$, числом излучателей около 2000 и амплитудным распределением с КИП=0.94.

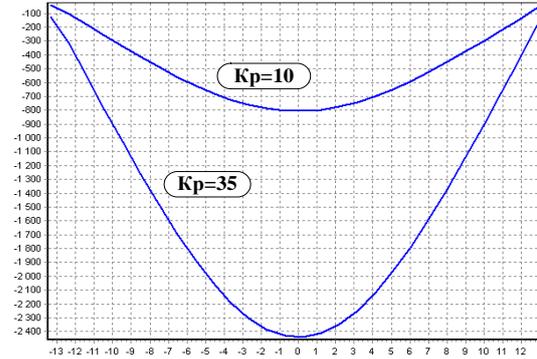
Расчеты показали, что применение полиномов третьего порядка ($M=N=3$) для аппроксимации фазовых распределений вида (9) в диапазоне изменения K_p от 3 до 40, приводит к практически полному совпадению, как анализируемых фазовых распределений, так и ДН с расширенными лучами.

На рис. 3 для анализируемой ФАР приведен пример формирования в угломестном сечении секторных лучей с использованием полученных обобщенных формул. Представлены два фазовых распределения вдоль центрального столбца излучателей (рис. 3б) и ДН с двумя соответствующими секторными лучами ($K_p=10$ и $K_p=35$) (рис. 3в), а также пространственная ДН, луч которой расширен в 35 раз (рис. 3г). Для сравнения на рис. 3в представлена также исходная ДН.

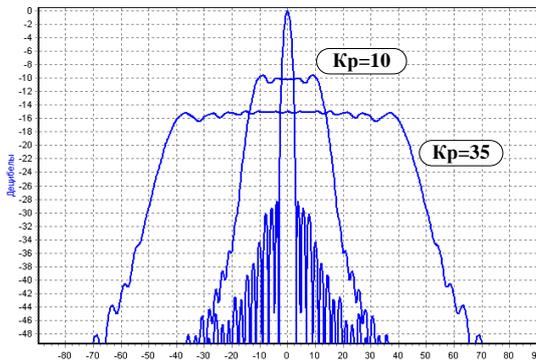
Наличие обобщенной формулы позволяет для плоских ФАР значительно упростить операцию формирования расширенных лучей в наклонных плоскостях. Пример подобного варианта расширения луча приведен на рис. 4. Это особенно важно для ФАР, установленных, например, на летательных аппаратах, в тех случаях, когда необходимо стабилизировать форму луча при эволюциях самолета. Ее реализация в ФАР осуществляется путем изменения в раскрыве плоскости формирования фазового распределения.



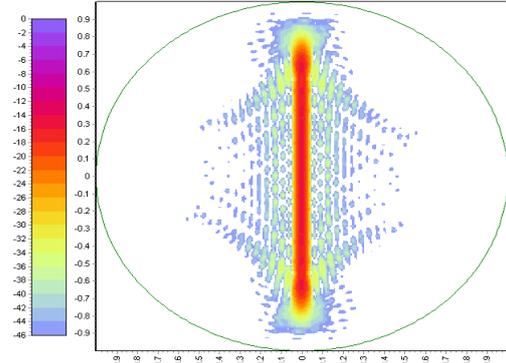
а) ФР в раскрытие ФАР



б) Фазовые распределения для двух K_p вдоль центрального столбца излучателей

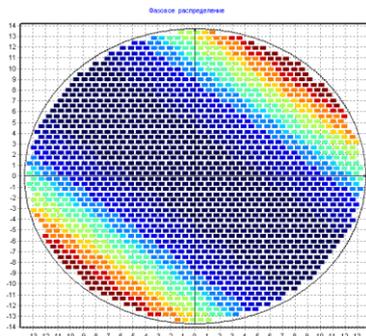


в) ДН исходная и с секторными лучами $K_p=10, K_p=35$

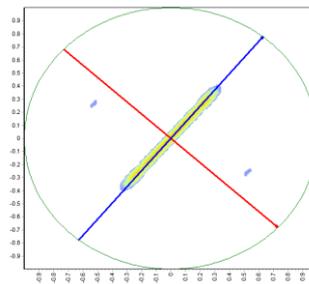


г) Пространственная ДН с секторным лучом ($K_p=35$)

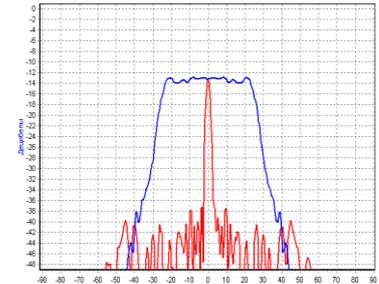
Рис. 3. Пример формирования секторных лучей в ДН плоской ФАР.



а) ФР в раскрытие ФАР



б) Пространственная ДН



в) ДН в ортогональных сечениях

Рис. 4. Пример формирования секторного луча в наклонной плоскости.

Заключение

Таким образом, в данной работе:

- изложены базовые положения фазового метода верных парциальных ДН, используемого для одномерного расширения луча;

– получены обобщенные аналитические решения, непосредственно связывающие коэффициент расширения луча Kp с законом изменения фазового распределения в раскрыве ФАР;

– показано, что при выборе функции аппроксимации, должны учитываться возможности спецвычислителя ФАР и требования на точность реализации формы лучей. Для каждого вида одномерно расширенных лучей, используемого возбуждения и геометрических параметров ФАР, можно найти свой вид обобщенной формулы и ее количественные параметры;

– на примере конкретной ФАР показано, что для формирования секторных лучей достаточно определить количественные значения девяти параметров;

– отмечено, что преимуществом данного метода является использование сравнительно малого числа количественных параметров, входящих в обобщенную аналитическую формулу и высокие энергетические характеристики формируемых лучей;

Наличие обобщенной формулы фазового распределения позволяет упростить операцию формирования расширенных лучей в наклонных плоскостях. Предложенный метод может быть применим в любых видах ФАР и АФАР с линейными и плоскими раскрывами.

Литература:

1. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрывом. – М.: Сов. Радио, 1980. – 296 с.
2. Kautz G.M. Phase-only shaped beam synthesis via technique of approximated beam addition //, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Issue: 5, May 1999. - Vol. 47. – pp. 887-894.
3. Trastoy, Ares F., Moreno E. Phase-only control of antenna sum and shaped patterns through null perturbation // IEEE Antennas and Propagation Magazine, Dec. 2001. - Vol. 43. N° 6. - pp.45-54.
4. 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. – pp.739-742.
5. Грибанов А.Н. Эффективный метод фазового синтеза одномерно расширенных лучей в фазированной антенной решетке. // Антенны, 2007, №6(121). – с.26-29.
6. Грибанов А.Н., Титов А.Н., Мосейчук Г.Ф. Фазовый синтез расширенных лучей ФАР методом веерных парциальных диаграмм. // Антенны, 2008, №9(136).
7. Griбанov 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, pp.273-276.