

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ ФАР, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ОДИНАКОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПОДРЕШЕТОК

*Кривошеев Ю.В. – Московский физико-технический институт
Шишилов А.В. – ОАО «Радиофизика»*

В работе рассмотрены способы уменьшения интерференционных максимумов (ИМ) неэквидистантных фазированных антенных решеток (ФАР), набранных из одинаковых прямоугольных блоков (подрешеток). Внутри каждой подрешетки излучатели размещены в узлах разреженной эквидистантной косоугольной сетки с шагом около одной длины волны или более. За счет разрушения регулярности сетки на стыках между блоками можно уменьшить ИМ ФАР. Рассмотрены следующие способы реализации такого подхода: относительный сдвиг блоков, использование различных шагов в разных блоках, поворот блоков и комбинация этих методов. Приведены результаты моделирования характеристик рассмотренных ФАР.

Введение.

В работе рассматриваются способы уменьшения интерференционных максимумов (ИМ) фазированных антенных решеток (ФАР), имеющих блочную структуру. Исследуемые ФАР состоят из подрешеток (блоков), внутри каждой из которых излучатели размещены в узлах разреженной эквидистантной сетки с шагом около одной длины волны и более.

Известно, что диаграмма направленности (ДН) ФАР равна произведению множителя решетки на ДН излучателя (в приближении, что ДН всех излучателей одинаковы и отсутствует взаимное влияние):

$$f_{\Sigma}(\tau_x, \tau_y) = f(\tau_x, \tau_y) \cdot M(\tau_x, \tau_y), \quad M(\tau_x, \tau_y) = \sum_k A_k e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x_k(\tau_x - \tau_{x_0}) + y_k(\tau_y - \tau_{y_0}))}, \quad (1)$$

где (τ_x, τ_y) - направляющие косинусы угла наблюдения, (τ_{x_0}, τ_{y_0}) - направляющие косинусы угла сканирования, $f_{\Sigma}(\tau_x, \tau_y)$ и $f(\tau_x, \tau_y)$ - ДН ФАР и ДН излучателя, $M(\tau_x, \tau_y)$ - множитель ФАР, (x_k, y_k) - координаты k -го излучателя, A_k - амплитуда k -го излучателя.

Поскольку рассматриваемые ФАР являются разреженными, множитель решетки при эквидистантном расположении элементов имеет ИМ в области видимых углов, равные по величине главному максимуму (ГМ). За счет этого ИМ ДН ФАР могут принимать неприемлемо большие значения, особенно при сканировании.

ИМ множителя решетки можно уменьшить за счет разрушения регулярности решетки. Есть много работ [1,3-6], посвященных разным вариантам решеток с неэквидистантным размещением излучателей, в том числе блочным решеткам. В данной работе рассмотрены возможности создания планарных решеток из одинаковых прямоугольных блоков, т.к. такие блоки наиболее просты в изготовлении. Рассмотрены следующие способы подавления ИМ: относительный сдвиг блоков, использование различных шагов в разных блоках, поворот блоков, а также комбинация этих методов.

Для дальнейшего изложения заметим, что множитель блочных ФАР можно представить в виде:

$$M(\tau_x, \tau_y) = \sum_n \left(e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x_n(\tau_x - \tau_{x_0}) + y_n(\tau_y - \tau_{y_0}))} \sum_{m_n} A_{m_n} e^{i \frac{2\pi}{\lambda} ((x_m - x_n)(\tau_x - \tau_{x_0}) + (y_m - y_n)(\tau_y - \tau_{y_0}))} \right) = \sum_n e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x_n(\tau_x - \tau_{x_0}) + y_n(\tau_y - \tau_{y_0}))} M_n(\tau_x, \tau_y), \quad (2)$$

где $M_n(\tau_x, \tau_y)$ - множитель n -ой подрешетки, (x_n, y_n) - координаты условного центра n -ой подрешетки. Заметим, что если подрешетки одинаковы и не повернуты друг относительно

друга, то формула (2) перейдет в

$$M(\tau_x, \tau_y) = M_1(\tau_x, \tau_y) \sum_n e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x_n(\tau_x - \tau_{x0}) + y_n(\tau_y - \tau_{y0}))} = M_1(\tau_x, \tau_y) M_{c.n.}(\tau_x, \tau_y), \quad (3)$$

где $M_1(\tau_x, \tau_y)$ - множитель одной подрешетки, $M_{c.n.}(\tau_x, \tau_y)$ - множитель по положениям подрешеток.

Варианты блочных ФАР с подавлением ИМ.

ФАР с блоками квадратной формы с квадратной сеткой.

В этом подразделе будут рассмотрены ФАР, составленные из блоков квадратной формы с прямоугольной (квадратной) сеткой решетки.

Первый метод (предложен В.А.Маковой) заключается в том, что квадратные блоки сдвигаются друг относительно друга на нечетное количество полушагов (рис. 1а), вследствие чего они излучают в противофазе в направлениях центров своих первых ИМ, поэтому в указанных направлениях множитель ФАР равен нулю. По аналогии с одномерным случаем можно ожидать подавления ИМ на 3 дБ. Похожего результата можно добиться, используя разбиение, показанное на рис.2а. Эта структура построена по тому же принципу, что и первая, поэтому ожидаемое подавление ИМ – тоже 3 дБ. Однако, комбинация этих разбиений (рис.3а) дает большее подавление. Для объяснения этого применим формулу (3). При использовании ФАР рис.3а минимум $M_{c.n.}(\tau_x, \tau_y)$ как раз совпадает с ИМ $M_1(\tau_x, \tau_y)$, т.е. происходит расфазировка ИМ как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Схемы образования ИМ множителя ФАР из ИМ множителя подрешетки (серый круг) и множителя системы подрешеток (прозрачные круги) показаны на рис.1б,2б,3б (показана структура ИМ на оси X). Заметим, что этот способ (как и другие с прямоугольной сеткой) направлен на уменьшение именно осевых ИМ, (т.е. лежащих в главных плоскостях), т.к. они находятся ближе к главному максимуму (ГМ), и поэтому меньше подавляются за счет ДН излучателя.

Приведем результаты расчетов множителя. Шаг полагался равным длине волны. Это обстоятельство не влияет на величину ИМ множителя решетки, а влияет только на их положение относительно ГМ (чем больше шаг, тем ближе ИМ к ГМ).

Расчеты дают следующие результаты: уровень осевых ИМ равен -2,8 дБ, -2,6 дБ, -5,1 дБ для рассмотренных способов соответственно, уровень первых БЛ -13,1 дБ, -12,1 дБ, -12,0 дБ. Картограммы множителя показаны на рис.1в,2в,3в. Видно, что ИМ на оси X образуются по схемам, изображенным на рис.1б,2б,3б (на оси Y – повернуты на 90°).

Идея следующего способа – в разбиении решетки на большее количество блоков. При этом положение блоков будет характеризоваться одним или несколькими параметрами. Отметим, что предыдущий метод является частным случаем рассматриваемого. Вследствие этого можно ожидать большего снижения уровня ИМ. Примером применения метода является структура, показанная на рис.4а. Геометрия характеризуется четырьмя параметрами (рассмотрен симметричный случай). Для выбора наилучшей геометрии следует провести оптимизацию по этим параметрам. Схожие способы уменьшения ИМ за счет сдвигов блоков излучателей рассматривались в работах [1], [3], [4].

Расчеты показывают, что расстояния между блоками, как и в предыдущем методе, следует выбирать кратными половине шага. При этом происходит разбиение осевых ИМ на 16 частей примерно равной амплитуды. В зависимости от конкретных значений параметров, уровень ИМ составляет от -7,1 дБ до -8,5 дБ. При этом уровень первых БЛ изменяется от -11,9 дБ до -8,7 дБ. Картограмма множителя решетки для случая с ИМ, равными -8,5 дБ, приведена на рис.4б.

Идея следующих двух методов – в том, чтобы использовать эквидистантные блоки, ИМ которых приходится на разные значения угловых координат. Методы заключаются в увеличении шага в некоторых блоках решетки (в k раз) и в повороте блоков друг относительно друга (на угол α). При этом увеличение шага приводит к смещению ИМ к ГМ, а поворот блоков – к повороту ИМ относительно ГМ. Схематично это отражено на рис. 5б и 6б. Различные модификации методов рассматривались в работах [1], [5], [6].

В геометрии с использованием различных шагов (рис. 5а) ожидается подавление ИМ на

величину до 6 дБ, т.к. каждый ИМ разделяется на 2 части. В геометрии, использующей поворот блоков (рис. 6а), ожидаемая величина подавления ИМ – 12 дБ (каждый ИМ разделяется на 4 части). Заметим, что как в структуре рис.5а можно было использовать 4 шага, так и в структуре рис.6а – 2 направления поворота блоков.

Однако необходимо отметить, что для геометрии с использованием различных шагов (рис. 5а) помимо уменьшения уровня ИМ происходит приближение ИМ к ГМ из-за использования более редкого шага. Поэтому в некоторых случаях применение этого метода может отрицательно сказаться на величине ИМ ДН ФАР (это зависит от вида ДН излучателя и от сектора электронного сканирования).

Можно ожидать еще некоторое уменьшение уровня ИМ, если блоки ФАР из двух предыдущих вариантов дополнительно подвигать друг относительно друга, не изменяя их самих. Здесь идет расчет на более удачное наложение бокового излучения одних блоков на ИМ других и на некоторую расфазировку ИМ блоков друг относительно друга (подобно первому методу).

Расчеты показывают, что для геометрии рис.5а при $k=1,1$ достигается первый локальный минимум зависимости (-5,6 дБ). Уровень первых БЛ при увеличении k незначительно уменьшается. При $k=1,1$ УБЛ равен -13,3 дБ. Картографическая проекция множителя решетки для $k=1,1$ приведена на рис.5в. При дополнительных небольших (до величины шага) сдвигах блоков локальный минимум зависимости ИМ от k достигается при $k=1,09$ и составляет -6,8 дБ (рассматривался центрально-симметричный случай).

Для геометрии рис.6а при $\alpha=10^\circ$ достигается значение, близкое к абсолютному минимуму зависимости. При этом уровень ИМ равен -11,2 дБ, уровень первых БЛ -10,5 дБ. Картографическая проекция множителя решетки для $\alpha=10^\circ$ приведена на рис.6в. При увеличении α УБЛ возрастает. Использование дополнительных сдвигов при $\alpha=10^\circ$ дает уменьшение уровня ИМ на 0,2 дБ.

Блоки с прямоугольной и гексагональной сеткой.

В этом подразделе будут рассмотрены варианты уменьшения ИМ для прямоугольной и гексагональной сеток.

При использовании прямоугольной сетки ФАР (возможны как разные размеры, так и разные шаги вдоль осей X и Y) предложенные ранее методы применимы. Кроме того, при использовании прямоугольной сетки возможна другая реализация метода поворота блоков: поворот блоков на 90° (рис.7а). Снижение уровня ИМ достигается, как и при других углах поворота, за счет разделения ИМ. Каждый ИМ здесь разделяется на 2 ИМ (рис. 7б), следовательно, можно ожидать уменьшение уровня ИМ на 6 дБ.

По результатам расчетов, как и в случае геометрии рис.5а, первый локальный минимум достигается при $k=1,1$. Здесь он составляет -5,4 дБ. При этом УБЛ равен -13,2 дБ. Картографическая проекция множителя решетки для $k=1,1$ приведена на рис.7в. При увеличении k уровень первых БЛ, в отличие от геометрии рис.5а, возрастает. При дополнительных небольших (до величины шага) сдвигах блоков локальный минимум зависимости ИМ от k достигается, как и в случае рис.5а, при $k=1,09$ и составляет -6,6 дБ (рассматривался, как и прежде, центрально-симметричный случай).

При использовании гексагональной сетки ФАР предложенные для квадратной сетки методы также применимы. Здесь также возможно снижение ИМ за счет поворота блоков на 90° (рис. 8а). Аналогично прямоугольной сетке, ожидаемое уменьшение ИМ – на 6 дБ. А поскольку первые ИМ блока с гексагональной сеткой расположены в узлах правильного шестиугольника с центром в ГМ (т.е. через каждые 60°), то растяжения сетки, как это было в случае с прямоугольной сеткой, здесь не требуются. Схематически ИМ блоков показаны на рис 8б.

Картограмма ИМ для геометрии рис.8а показана на рис.8в. Уровень ИМ равен -5,9 дБ, уровень первых БЛ -13,2 дБ. При дополнительных небольших сдвигах также достигается некоторое уменьшение уровня ИМ – до значения -6,6 дБ.

Заключение.

В работе рассмотрены различные методы подавления интерференционных максимумов

ФАР, использующие блочные структуры: относительный сдвиг блоков, использование различных шагов в разных блоках, относительный поворот блоков и сочетание этих методов. Даны рекомендации по построению таких структур. Проведены расчеты множителя ФАР, имеющих подобные структуры. Наиболее простая в изготовлении структура, использующая только сдвиги и состоящая из 4 блоков, позволила снизить уровень ИМ множителя до -5,1 дБ. Наибольшее подавление обеспечила структура, использующая поворот и сдвиг блоков – уровень осевых ИМ для нее составил -11,2 дБ (также 4 блока).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.И. Емельченков. *Бортовые неэвидистантные фазированные антенные решетки с плотной упаковкой фазовращателей*. Журнал «Антенны», выпуск 11 (102), 2005 г.
2. А.А.Толкачев, В.А. Макота, М.П. Павлова, А.М. Николаев, В.В. Денисенко, Г.К. Соловьев. *Большая радиолокационная ФАР миллиметрового диапазона волн*. Журнал «Антенны», выпуск 1 (42), 1999 г.
3. S.P. Skobelev, A.G. Shubov. *Combined methods for suppression of grating lobes in limited-filed-of-view phased array antennas*. Proc. of URSI Symp. on Electromagnetic Theory, May 1998, Thessaloniki, Greece, vol. I, pp. 121 – 123.
4. H. Wang, D.-G. Fang, Y.L. Chow. *Grating lobe reduction in a phased array of limited scanning*. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 56, No 6, pp. 1581 - 1586, June 2008.
5. W.J. Evanzia. *Quick Change Technique Converts Monopulse Radar into Phased Array*. “Electronics”, p. 145 – 150, May 29, 1967.
6. V. D. Agrawal and T. C. Tong, *Grating lobe suppression in multiple access array of TDRSS spacecraft*, 1978 IEEE Int. Antennas Propagat. Symp. Dig. vol. 16, pp. 178 - 181, May 1978.

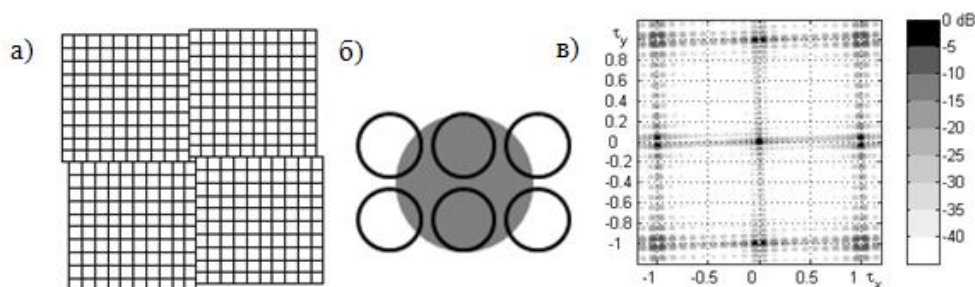


Рис. 1. Способ 1а. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

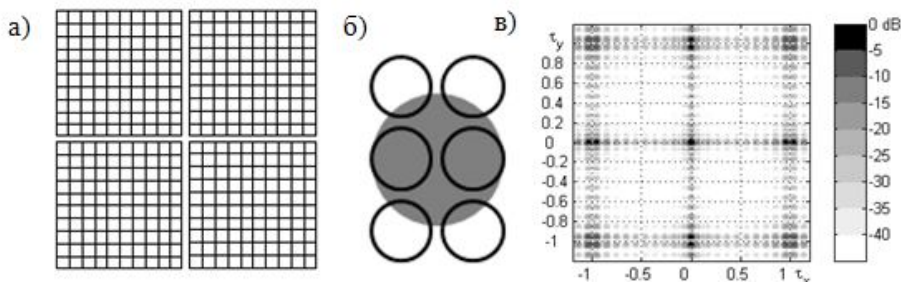


Рис. 2. Способ 1б. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

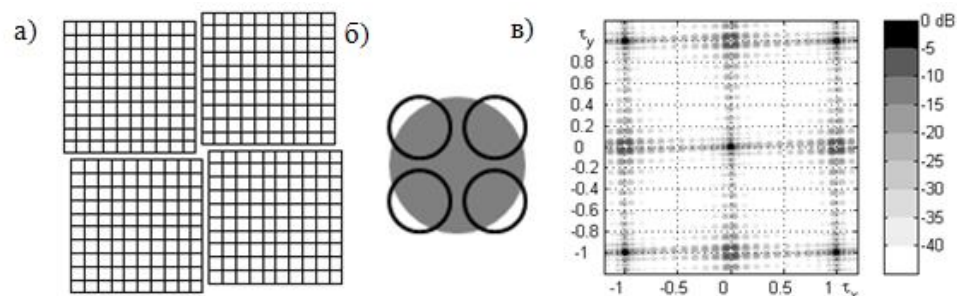


Рис. 3. Способ 1в. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

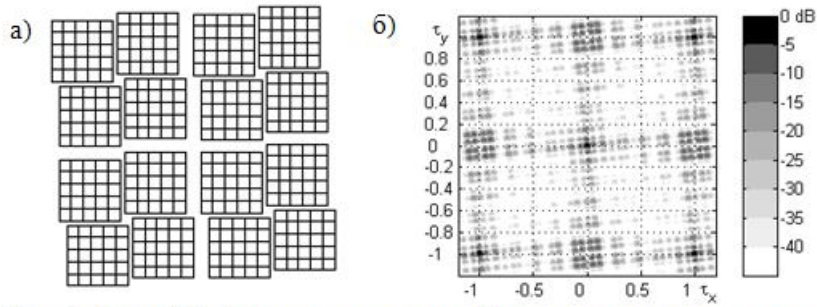


Рис. 4. Способ 2. а) геометрия решетки, б) результаты расчетов множителя.

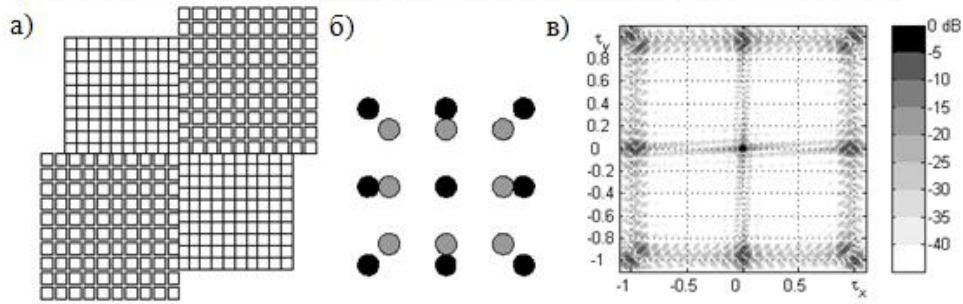


Рис. 5. Способ 3. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

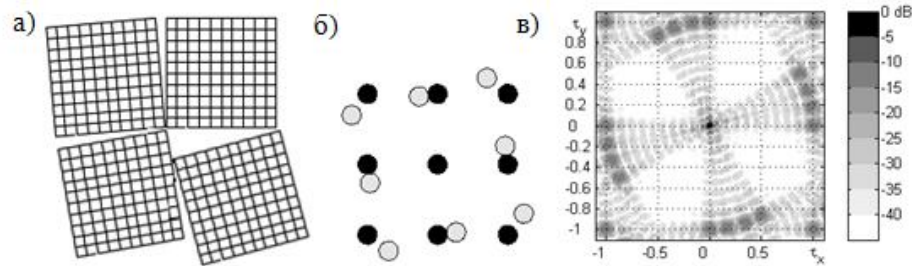


Рис. 6. Способ 4. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

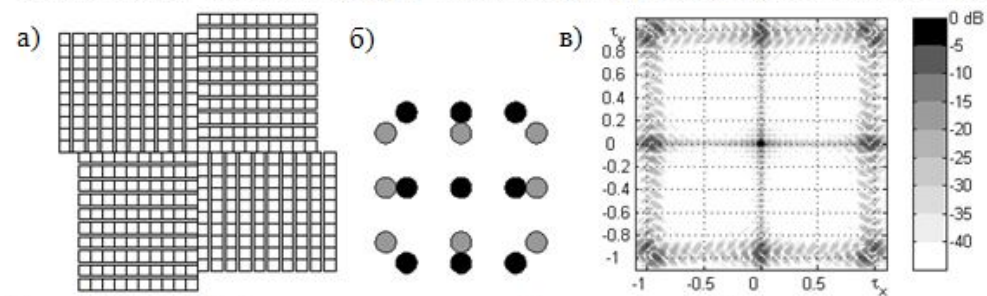


Рис. 7. Способ 5. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.

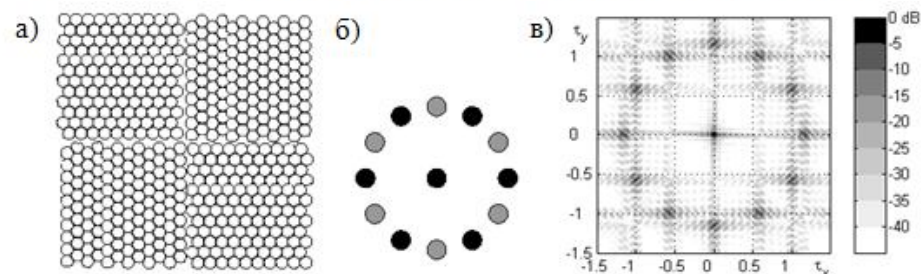


Рис. 8. Способ 6. а) геометрия решетки, б) структура ИМ, в) результаты расчетов множителя.