

УДК 621.396.67

**ПОДАВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МАКСИМУМОВ
В АПЕРИОДИЧЕСКИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ,
СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОДРЕШЁТОК**

Кривошеев Ю.В., Денисенко В.В., Шишлов А.В.

(ОАО «Радиофизика»)

Рассмотрены способы подавления интерференционных максимумов (ИМ) диаграмм направленности фазированных антенных решеток, составленных из одинаковых или схожих периодических подрешёток с прямоугольной или гексагональной сетками. Подавление ИМ достигается за счет нерегулярного размещения подрешёток. Проведено сравнение вариантов решеток с различными размещениями по уровню подавления ИМ, уровню боковых лепестков. Приведены расчеты шумовой температуры.

The paper describes grating lobe (GL) suppression methods in phased arrays composed of identical or similar subarrays. Subarrays have equidistant rectangular or triangular grid. Several methods of GL suppression of an antenna array due to irregular arrangement of subarrays are considered. The methods are compared by simulation of GL suppression and side lobe level. Antenna noise temperature simulation is presented.

Введение.

Снижение стоимости фазированных антенных решеток (ФАР) является одним из ключевых вопросов проектирования радиосистем с электрическим сканированием луча. Для подобных систем часто применяются разреженные решётки (с шагом около длины волны или более), что позволяет сократить количество элементов решётки и таким образом уменьшить стоимость изделия. Как известно, это возможно лишь за счет сужения сектора электронного сканирования (СЭС) ФАР. Кроме того, в диаграммах направленности (ДН) разреженных периодических решёток возникают ИМ, что ухудшает энергетику и, в особенности, помехозащищенность систем. Приведём примеры эквидистантных ФАР, ДН которых имеют высокий уровень ИМ.

Первый пример – это ФАР РЛС "Руза" с излучателями в виде двухзеркальных антенн (рис.1), работающая в Ka-диапазоне [1]. Шаг решётки - 68λ (λ – длина волны), диаметр апертуры – 850λ , число излучателей – 120. Ширина луча по уровню половинной мощности – 4 угловые минуты. ФАР размещена на поворотном устройстве, которое

обеспечивает предварительное механическое нацеливание луча в пределах верхней полусферы. Точная установка луча осуществляется за счет электрического сканирования в коническом секторе с углом при вершине 50 угловых минут. Указанный СЭС характеризуется тем, что при отклонении луча на максимальный угол ИМ сравнивается по уровню с главным максимумом (ГМ), что иллюстрируется ДН, показанной на рис.2 (пунктир – ДН излучателя решетки, сплошная – ДН при отклонении луча на угол 25 минут).

Следующий пример – ФАР Ка-диапазона с излучателями в виде диэлектрических стержней [2], показанная на рис.3. Шаг решётки – $1,14 \lambda$, диаметр апертуры – 70λ , число излучателей – 3600. Ширина луча по уровню половинной мощности равна 1° , заданный СЭС – конус с углом при вершине 50° . На рис.4 приведена ДН ФАР при отклонении луча на 35° , т.е. за пределы заданного СЭС. Видно, что в этом случае уровень ИМ превышает уровень ГМ, что и делает невозможным расширение СЭС.

Известны два способа уменьшения ИМ ДН разреженных ФАР: а) использование излучателей с секторными ДН, б) использование неэквидистантных (апериодических) решёток. Первый из упомянутых способов подробно рассмотрен, например, в монографии [3]. Цель настоящей работы - рассмотреть и сравнить возможные способы подавления ИМ ФАР, составленных из плоских эквидистантных подрешеток, за счет их непериодического размещения [4].

Применение эквидистантных подрешеток существенно упрощает их изготовление и, следовательно, стоимость. Это особенно важно при создании активных ФАР, в которых подрешётки интегрированы с приёмо-передающими модулями с эквидистантным расположением активных каналов.

В работе рассмотрены преимущественно ФАР, состоящие из относительно небольшого числа крупных периодических подрешеток. Это также позволяет сделать конструкцию проще и дешевле.

Обзор методов построения неэквидистантных ФАР из эквидистантных подрешёток.

Рассмотрим известные методы построения апериодических ФАР, составленных из периодических подрешеток. В [5] предложено размещать прямоугольные эквидистантные подрешетки с прямоугольной сеткой по концентрическим окружностям (рис.5). Таким образом, ИМ от разных подрешёток формируются в разных угловых направлениях. В [6] уменьшение уровня ИМ обеспечивается за счет поворота подрешеток друг относительно друга на произвольные углы (рис.6). Как и в [5] уровень ИМ уменьшается в силу того, что

ИМ от разных подрешёток ориентированы в разных направлениях. В [7] использованы перемежающиеся (interlaced) подрешётки, объединяющие группы излучателей, произвольно расположенных на расстоянии друг от друга (рис.7). В [8,9,10] ФАР составлены из линеек излучателей (рис.8), причём линейки сдвинуты друг относительно друга. Таким образом удаётся расфазировать ИМ линеек в одной плоскости. В [11] предложено составлять ФАР из полиоминно – одинаковых групп элементов с одним фазовращателем, которыми можно плотно заполнить апертуру ФАР. В [12] предложена ФАР, составленная из гибких лент излучателей, изогнутых в спирали. В ленте излучатели расположены эквидистантно, а формируемая многими лентами двумерная ФАР – аперриодическая.

В настоящей работе проведено сравнение вариантов аперриодических ФАР, скомпонованных из двумерных подрешеток с использованием некоторых из упомянутых методов.

Геометрия и модель решетки

Рассмотрим плоскую двумерную периодическую решетку, составленную из двумерных подрешеток. Будем изменять геометрию этой решетки, используя следующие действия:

- сдвиги подрешеток относительно друг друга,
- размещение подрешеток с зазорами,
- использование подрешеток с несколькими разными значениями шага,
- повороты подрешеток.

Предположим, что ДН излучателей решетки одинаковы и не изменяются при указанных выше действиях. Такое допущение не приводит к большим погрешностям расчета ДН ФАР, если взаимодействие между излучателями мало или же если подрешетки содержат много излучателей, и, соответственно, мала доля излучателей, прилегающих к границам подрешеток.

Как известно, в указанном приближении ДН ФАР является произведением множителя решётки и ДН излучателя:

$$f_{\Sigma}(t_x, t_y) = f(t_x, t_y) \cdot M(t_x, t_y, t_{x0}, t_{y0}), \quad M(t_x, t_y, t_{x0}, t_{y0}) = \sum_k A_k e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (x_k (t_x - t_{x0}) + y_k (t_y - t_{y0}))}, \quad (1)$$

где (t_x, t_y) - направляющие косинусы угла наблюдения, (t_{x0}, t_{y0}) - направляющие косинусы угла сканирования, $f_{\Sigma}(t_x, t_y)$ и $f(t_x, t_y)$ - ДН ФАР и ДН излучателя соответственно, $M(t_x, t_y, t_{x0}, t_{y0})$ - множитель решетки (t_{x0}, t_{y0} - параметры), (x_k, y_k) -

координаты k -го излучателя, A_k - амплитуда k -го излучателя. Модель (1) весьма удобна для предварительного анализа и поиска приемлемой геометрии ФАР. При необходимости, характеристики ФАР могут быть уточнены с помощью алгоритмов, основанных на строгих электродинамических моделях, в том числе реализованных в коммерческих программах.

Поскольку ДН излучателя – медленно меняющаяся функция углов, – изменение ИМ ДН ФАР близко к изменению ИМ множителя решётки, что позволяет на первом этапе анализа ограничиться моделированием множителя решетки. Из формулы (1) видно, что уровень ИМ множителя не зависит от углов сканирования. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать множитель только для центрального положения луча $(t_{x_0}, t_{y_0}) = (0, 0)$.

Для дальнейшего изложения заметим, что множитель ФАР, состоящих из подрешеток, можно представить в виде:

$$M(t_x, t_y) = \sum_n \left(e^{i\frac{2p}{l}(x_n(t_x-t_{x_0})+y_n(t_y-t_{y_0}))} \sum_{m_n} A_m e^{i\frac{2p}{l}((x_m-x_n)(t_x-t_{x_0})+(y_m-y_n)(t_y-t_{y_0}))} \right) = \sum_n e^{i\frac{2p}{l}(x_n(t_x-t_{x_0})+y_n(t_y-t_{y_0}))} M_n(t_x, t_y), \quad (2)$$

где $M_n(t_x, t_y)$ – множитель n -ой подрешётки, (x_n, y_n) – координаты условного центра n -ой подрешётки. Заметим, что если подрешётки одинаковы и не повернуты друг относительно друга, то формула (2) перейдёт в:

$$M(t_x, t_y) = M_1(t_x, t_y) \sum_n e^{i\frac{2p}{l}(x_n(t_x-t_{x_0})+y_n(t_y-t_{y_0}))} = M_1(t_x, t_y) M_{c.n.}(t_x, t_y), \quad (3)$$

где $M_1(t_x, t_y)$ - множитель одной подрешётки, $M_{c.n.}(t_x, t_y)$ - множитель системы подрешёток.

Для дальнейших расчетов положим $A_k = 1$, поскольку решетки с равномерным возбуждением наиболее часто применяются на практике. При необходимости результаты могут быть уточнены для других амплитудных распределений.

ФАР, составленные из квадратных подрешёток с квадратной сеткой.

Рассмотрим ФАР, составленную из подрешеток квадратной формы с квадратной сеткой. Если элементы подрешеток образуют единую периодическую решетку в пределах ФАР, то ИМ множителя решётки равен уровню ГМ, а уровень боковых лепестков составляет минус 13,2 дБ. Поставим задачу уменьшить ИМ первого порядка в главных

плоскостях, т.к. эти ИМ расположены ближе других к ГМ, и, поэтому, меньше подавляются за счёт ДН излучателя.

Первый метод (предложен В.А. Макотой) заключается в том, что решетка разбивается на четыре подрешетки, которые сдвигаются друг относительно друга на нечётное число полупериодов решетки (рис. 11а), т.е. на величину:

$$\Delta = d / 2 + n \times d \quad (4)$$

(d – шаг подрешетки, $n = 0, 1, 2, \dots$). При этом подрешетки излучают в противофазе в направлениях центров своих первых ИМ, и в этих направлениях множитель решетки равен нулю. Полного подавления ИМ, однако, не происходит из-за того, что ИМ имеют ширину порядка λ/D (D - размер подрешетки), а противофазное сложение поля происходит только в одном направлении. На рис.11б показана схема образования ИМ множителя ФАР вблизи сечения $t_y = 0$ из ИМ множителя подрешётки (большой круг) и множителя системы подрешёток (малые круги). Видно, что ИМ расщепляется на два лепестка в одной плоскости, снижение его уровня составляет около 3 дБ.

Похожего результата можно добиться, используя размещение подрешеток, показанное на рис.12а. Структура ИМ показана на рис. 12б. Ближайшие ИМ также расщепляются надвое, только в другой плоскости, поэтому ожидаемое подавление ИМ тоже составляет около 3 дБ.

Комбинация сдвигов и зазоров (рис.13а) приводит к расщеплению ближайшего ИМ на 4 лепестка вдвое меньшей ширины в обеих плоскостях (рис.13б), так как происходит расфазировка полей подрешеток в двух плоскостях. Уровень ИМ по сравнению с исходным может быть уменьшен примерно на 6 дБ.

Приведём результаты расчётов множителя для рассмотренных вариантов. Примем шаг решетки равным длине волны: значение шага не влияет на уровень ИМ и уровень боковых лепестков множителя решётки, а влияет только на их угловое положение относительно ГМ (чем больше шаг, тем ближе ИМ к ГМ). Количество излучателей в подрешетке примем равным $N \times N = 100$. Картограммы множителя показаны на рис.11в, 12в, 13в. Видно, что ИМ на оси абсцисс образуются по схемам, изображенным на рис.11б, 12б, 13б (на оси ординат их структуры повернуты на 90°). Расчетные значения уровня ИМ в главных плоскостях для рассмотренных способов составляют соответственно -2,8 дБ, -2,6 дБ, -5,1 дБ, уровень первых БЛ: -13,1 дБ, -12,1 дБ, -12,0 дБ. Первые боковые лепестки практически не меняются в первом случае, поскольку доля неизлучающей части в центре апертуры мала. При размещении подрешеток с зазорами (второй и третий варианты) площадь неизлучающей части между подрешетками возрастает, что и приводит к росту УБЛ.

Идея следующего способа – в разбиении решётки на большее количество подрешеток. При этом положение блоков характеризуется 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.14а. Геометрия характеризуется четырьмя параметрами (рассмотрен симметричный случай). Для выбора наилучшей геометрии следует провести численную оптимизацию по этим параметрам.

Результаты оптимизации геометрии и расчета множителя решетки, составленной из 16 квадратных подрешеток по 25 излучателей каждая, показывают, что расстояния между подрешетками, как и в предыдущем методе, следует выбирать кратными нечетному числу полушага решетки. При этом ИМ в главных плоскостях расщепляются на 16 частей примерно равной амплитуды. В зависимости от значений параметров размещения подрешеток, 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, т.е. максимальный уровень БЛ примерно сравнивается с уровнем ИМ. Картограмма множителя решётки для случая с ИМ, равными -8,5 дБ, приведена на рис.14б.

Идея следующих двух методов – в том, чтобы использовать эквидистантные подрешетки, ИМ которых ориентированы в разных направлениях. Методы заключаются в увеличении шага в части подрешёток или в их повороте друг относительно друга (рис. 15а и 16а). При этом увеличение шага приводит к смещению ИМ к ГМ, а поворот подрешеток – к повороту ИМ относительно ГМ. Схематично это отражено на рис. 15б и 16б.

Оценим минимальные значения угла поворота и коэффициента увеличения шага, при которых ИМ снижаются до уровня, близкого к наименьшему возможному для соответствующего метода. Рассмотрим квадратную подрешётку из $N \times N$ излучателей с шагом d и равноамплитудным возбуждением. Ширину ИМ в координатах (τ_x, τ_y) по уровню -3 дБ можно оценить как $\Delta\theta_{0.5} = \lambda/dN$ (где τ_x, τ_y, τ_z – направляющие косинусы направления). Угол между осями ГМ и первого ИМ в любой из главных плоскостей равен $\theta_{им} = \lambda/d$. Для оценки минимального относительного угла поворота двух таких подрешёток, при котором достигается требуемый эффект, примем, что их ближайшие ИМ в главных плоскостях пересекаются по уровню -3дБ (рис.16б). Тогда получим следующую оценку:

$$q_{i\dot{o}} \approx \Delta q_{0.5} / q_{ei} = 1 / N \quad (5)$$

Если ФАР состоит более чем из двух подрешеток, то угол поворота каждой i -й подрешетки выбирается из условия $\theta_i = n_i \times \theta_{онм}$ (n_i – целое число).

Аналогично поступим для оценки минимального необходимого отличия шагов в соседних подрешётках. Поскольку ширина ИМ в координатах (τ_x, τ_y) составляет $\Delta\theta_{0.5} = \lambda/dN$, а расстояние между первыми осевыми ИМ и главным максимумом $\theta_{им} = \lambda/d$, то минимальный коэффициент увеличения шага k можно найти из условия $(\lambda/d) - (\lambda/kd) = \lambda/dN$, т.е.

$$k_{opt} = N / (N - 1) \approx (1 / N) \quad (6)$$

В рассматриваемых примерах (рис. 15а, 16а) $N=10$, и оценки дают результат $\theta_{opt} \approx 5,7^\circ$, $k_{opt} \approx 1,1$.

В геометрии с использованием различных шагов (рис. 15а) ожидаемое подавление ИМ – до 6 дБ, т.к. каждый ИМ разделяется на 2 части. В геометрии, использующей поворот подрешеток (рис. 16а), ожидаемая величина подавления ИМ – 12 дБ (каждый ИМ разделяется на 4 части). Заметим, что в структуре, показанной на рис.15а, можно использовать 4 значения шага, а в структуре, приведенной на рис.16а, – два направления поворота подрешеток.

Отметим, что для геометрии с использованием различных шагов (рис. 15а) помимо уменьшения уровня ИМ происходит приближение ИМ к ГМ из-за использования более редкого шага. Поэтому применение этого метода может привести к возрастанию уровня ИМ ДН (это зависит от вида ДН излучателя и от сектора электронного сканирования).

Можно ожидать еще некоторого уменьшения уровня ИМ в двух предыдущих вариантах, если оптимизировать положение подрешеток путем их дополнительных сдвигов друг относительно друга. Здесь идет расчёт на более удачное наложение бокового излучения одних блоков на ИМ других и на некоторую расфазировку ИМ блоков друг относительно друга (подобно первому методу).

Численная оптимизация геометрии (рис.15а) дает первый локальный минимум зависимости ИМ от k при $k=1,1$. Достигнутый уровень ИМ составляет -5,6 дБ. Уровень первых БЛ при увеличении k незначительно уменьшается. При $k=1,1$ УБЛ равен -13,3 дБ. Картографическая проекция множителя решётки для $k=1,1$ приведена на рис.15в. При дополнительных небольших (до величины шага) сдвигах подрешеток локальный минимум зависимости ИМ от k достигается при $k=1,09$ и составляет -6,8 дБ (центрально-симметричный случай).

Для геометрии, показанной на рис.16а, первый минимум достигается при $\alpha \approx 7^\circ$ (уровень ИМ – 10.2 дБ), что близко к оценке (1), а при $\alpha=10^\circ$ достигается значение уровня ИМ, близкое к абсолютному минимуму -11,2 дБ. Уровень первых БЛ равен -10,5 дБ, что обусловлено относительно большой площадью зазоров между подрешетками.

Картографическая проекция множителя решётки для $\alpha=10^\circ$ приведена на рис.16в. При увеличении α УБЛ возрастает. Использование дополнительных сдвигов при $\alpha=10^\circ$ дает уменьшение уровня ИМ на 0,2 дБ, однако для меньших углов улучшение более значительное.

ФАР из подрешёток с прямоугольной или гексагональной сетками.

Рассмотрим варианты уменьшения ИМ при использовании подрешеток с прямоугольной и гексагональной сетками.

В случае прямоугольной сетки применимы предложенные ранее методы поворота подрешеток и использования подрешеток с разным шагом. Возможны как разные размеры, так и разные шаги вдоль главных осей. Однако приведённые выше оценки требуют небольшой корректировки: так формула (5) перейдет в

$$q_{omn} \approx \max\{(I / d_x N_x) / (I / d_x), (I / d_y N_y) / (I / d_y)\} = \max\{1 / N_x, 1 / N_y\} \quad (7)$$

а формула (6) – в

$$k_{omn} \approx \max\{N_x / (N_x - 1), N_y / (N_y - 1)\} = \max\{1 + (1 / N_x), 1 + (1 / N_y)\} \quad (8)$$

(N_x и N_y – это количество элементов одной подрешетки вдоль осей абсцисс и ординат соответственно)

Кроме того, при использовании прямоугольной сетки можно поворачивать подрешетки на 90° (рис.17а). Применение преобразования поворота в этом случае не приводит к возникновению зазоров между подрешетками и, следовательно, не снижает коэффициент использования поверхности (КИП) антенны. Снижение уровня ИМ достигается, как и при других углах поворота, за счет разделения ИМ. Каждый ИМ разделяется на два (рис. 17б), следовательно, ожидаемое уменьшения уровня ИМ составляет около 6 дБ.

Минимальное значение отношения большего шага решётки к меньшему шагу (т.е. во взаимно перпендикулярных направлениях) для получения необходимого эффекта, оценим так же, как в предыдущем пункте: потребовав, чтобы первые ИМ от разных блоков пересекались по уровню -3 дБ. Тогда, обозначив меньший шаг через d , больший шаг – kd , линейный размер одной подрешетки – D (предположим, что размеры по обеим осям примерно равны), получаем условие: $(\lambda/d) - (\lambda/kd) = \lambda/D$, или

$$k_{omn} = D / (D - d) \approx (d / D) = 1 + (1 / N), \quad (9)$$

где N – количество излучателей в подрешетке вдоль оси с меньшим шагом.

Проведя численную оптимизацию по параметру k , как и в случае геометрии, представленной на рис.15а, получим, что первый локальный минимум ИМ в главных плоскостях достигается при $k=1,1$. Его уровень составляет -5,4 дБ. При этом УБЛ равен

-13,2 дБ. Картографическая проекция множителя решётки для $k=1,1$ приведена на рис.17в. При увеличении k уровень первых БЛ, в отличие варианта, представленного на рис.15а, возрастает. При оптимизации за счет дополнительных небольших (до величины шага) сдвигах подрешеток локальный минимум зависимости ИМ от k достигается, как и для варианта, показанного на рис.15а, при $k=1,09$ и составляет -6,6 дБ (рассматривался, как и прежде, центрально-симметричный случай).

При использовании гексагональной сетки, предложенные для квадратной сетки методы также применимы. Кроме того, есть дополнительная возможность снижать уровень ИМ за счет поворота одинаковых подрешеток на угол 90° , т.е. практически без зазоров между подрешетками (рис. 18а). Этот способ предложен Россельс Н.А. Схематически ближайшие ИМ подрешеток, расположенные в узлах правильного шестиугольника, показаны на рис. 18б. Ожидаемое снижение уровня ИМ решетки составляет 6 дБ. Картограмма множителя решетки для геометрии, представленной на рис.18а, показана на рис.18в. Уровень ИМ равен -5,9 дБ, уровень первых БЛ -13,2 дБ. За счет оптимизации геометрии путем дополнительных небольших сдвигов достигается некоторое уменьшение уровня ИМ – до значения -6,6 дБ.

Подрешетки с гексагональной сеткой могут быть повернуты и на меньшие углы. При равных размерах подрешеток по обеим осям оценка для угла поворота (5) переходит в

$$q_i = n_i \times q_{i\tau\delta} = n_i \times (1 / dN) / (21 / d\sqrt{3}) = \sqrt{3} / (2N), \quad (10)$$

где i - номер подрешетки, n_i – целое число, N - количество излучателей в строке с шагом d . Для равенства размеров подрешетки во взаимно перпендикулярных направлениях число строк должно быть примерно $M = [N\sqrt{3} / 2]$.

Другая возможность – использование подрешеток одинаковой ориентации с разным шагом. По аналогии с (6), оценка коэффициента увеличения шага k_{omn} от подрешетки к подрешетке имеет вид:

$$k_{omn} = (2N / \sqrt{3}) / (2N / \sqrt{3} - 1) \approx 1 + (\sqrt{3} / (2N)), \quad (11)$$

где N – количество элементов в строке, т.е. $N \times d = D$. Количество строк $M = [N\sqrt{3} / 2]$.

Геометрия и количество подрешеток, на которые разбивается ФАР, определяется как требуемыми характеристиками излучения, так и конструктивными соображениями. Например, иногда между подрешетками необходимы зазоры для размещения в них силовых элементов рамы, обеспечивающих жесткость конструкции. Эти зазоры целесообразно использовать и для подавления ИМ.

Рассмотрим ФАР с гексагональной сеткой, состоящую из прямоугольных подрешеток. Подрешетки отделены друг от друга зазорами (рис.19а). Проводя

оптимизацию, можно определить ширины зазоров, при которых достигается наибольшее подавление ИМ за счет их расфазировки. Расчёты показывают, что оптимальными ширинами зазоров являются $0,47\lambda$, $1,04\lambda$, $1,48\lambda$. При этом уровень ИМ множителя решётки равен $-4,7$ дБ, а УБЛ $-11,4$ дБ. Отметим, что при наличии только вертикальных зазоров (рис. 19а) для проведения оптимизации достаточно рассмотреть только горизонтальные сечения множителя решётки в координатах (t_x, t_y) , проходящие через ИМ множителя. Для объяснения этого заметим, что $M_{c.n.}(t_x, t_y)$ в формуле (3) зависит только от t_x . При оптимизации минимизируется выражение $\max_{t_x, t_y} M(t_x, t_y) = \max_{t_x, t_y} M_1(t_x, t_y)M_{c.n.}(t_x, t_y)$ при (t_x, t_y) в окрестности ИМ. Далее:

$$\max_{t_x, t_y} M_1(t_x, t_y)M_{c.n.}(t_x, t_y) = \max_{t_x} \left\{ M_{c.n.}(t_x) \max_{t_y} \{ M_1(t_x, t_y) \} \right\} = \max_{t_x} \{ M_{c.n.}(t_x)g(t_x) \}, \quad (12)$$

т.е. задача сводится к оптимизации одномерной функции. Видно, что $g(t_x)$ - это сечение, параллельное оси t_x и проходящее через ИМ. Вид картограммы множителя показан на рис.19б.

Заметим, что в случае гексагональной сетки (рис.19а) за счёт введения зазоров только в одном направлении удаётся уменьшить одновременно все ИМ первого порядка, поскольку в плоскости зазоров отсутствуют ИМ. В прямоугольной же сетке вертикальные зазоры не влияют на уровень вертикальных ИМ, а горизонтальные – на уровень горизонтальных ИМ.

Отметим, что возрастание УБЛ решетки (для тех случаев, где оно имеет место) зависит от количества излучателей в ней. Причём, чем больше апертура решетки, тем меньше возрастает УБЛ. Это связано с тем, что площадь зазоров в апертуре становятся меньше относительно площади апертуры решетки.

Примеры вычислений ДН ФАР.

Приведем примеры ФАР, составленных на основе предложенных методов, и рассчитаем их характеристики.

Рассмотрим ФАР с прямоугольной сеткой, состоящую из 756 излучателей (рис.20а). Форма апертуры ФАР близка к круглой для уменьшения УБЛ. Шаг решётки 20λ , диаметр – около 600λ . На рис. 21а показан фрагмент решетки таких излучателей в виде зеркальных антенн, разработанных в ОАО «Радиофизика». ДН излучателя приведены на рис. 21.б. В ЦПЛ ($\tau_{x0}=\tau_{y0}=0$) уровень ИМ ДН составляет $-19,8$ дБ (определяется ДН излучателя), а уровень первого бокового лепестка равен $-16,7$ дБ. При сканировании на

угол $\theta_{ск} = 1.4^0$ в горизонтальной плоскости уровень ГМ уменьшается из-за спада ДН излучателя на 2,8 дБ, при этом ИМ сравнивается по уровню с ГМ (рис. 20б, в).

Разделим решетку на четыре подрешетки и сдвинем их относительно друг друга на полшага, как показано на рис. 22а. Полученная решетка имеет в ЦПЛ уровень первого ИМ -22,8 дБ, а уровень первого бокового лепестка -16,6 дБ. При сканировании в горизонтальной плоскости на угол $\theta = 1.4^0$ уровень ГМ снижается, как и в предыдущем варианте на 2.8 дБ, а уровень ИМ равен -3,1 дБ относительно ГМ (рис. 22 б, в).

Введем дополнительно между подрешетками зазор шириной в полшага решетки как показано на рис. 23а, тогда в ЦПЛ уровень первого ИМ составляет -23,8 дБ, а УБЛ возрастает до -15,3 дБ. При сканировании на угол $\theta = 1.4^0$ уровень ИМ равен -5,6 дБ относительно ГМ (рис. 23б, в).

Теперь рассмотрим ФАР с гексагональной сеткой, состоящую из 1292 излучателей (рис. 24а). Шаг решётки $1,14 \lambda$, диаметр 43λ . В качестве излучателей могут быть использованы элементы на основе ребристых стержней (рис. 25 а) с секторными ДН (рис. 25 б) [13]. В ЦПЛ все ИМ находятся за пределами области видимых углов, а уровень первого бокового лепестка составляет -17,9 дБ. При сканировании на угол $\theta = 30,7^0$ в одной из главных плоскостей уровень ГМ уменьшается на 4,3 дБ, а ИМ сравнивается по уровню с ГМ (рис. 24 б, в).

Модифицируем рассмотренную ФАР, разделив ее на 4 части и повернув сетки в двух квадрантах на 90^0 относительно исходной (рис. 26а). В ЦПЛ, как и в предыдущем случае, ИМ отсутствует, а УБЛ равен -17,5 дБ. При сканировании на угол $\theta = 30,7^0$ в главной плоскости уровень ГМ снижается также на 4,3 дБ, а уровень ИМ равен -5,9 дБ относительно ГМ (рис. 26 б, в).

Шумовая температура ФАР.

Как показано выше, при апериодическом размещении подрешеток в ряде направлений возрастает УБЛ ФАР. Рост среднего УБЛ может приводить к увеличению шумовой температуры антенны за счет приема большей мощности внешних шумов. Рассмотрим, как изменяется шумовая температура ФАР на примере двух модификаций ФАР, рассмотренных в предыдущем пункте (рис. 24, 26). Апертура ФАР наклонена относительно горизонта на угол γ (рис. 27). Угломестная зависимость шумовой температуры неба (рис. 28) взята из [14] для С-диапазона. Расчетные зависимости шумовой температуры ФАР от угла сканирования в угломестной плоскости для углов наклона полотна ФАР относительно горизонта $\gamma=10^0$ и 30^0 приведены на рис. 29. Сектор

сканирования – конус с углом при вершине 60° . При $\gamma < 30^\circ$ сектор становится меньше и ограничен снизу линией горизонта.

Пунктиром показана шумовая температура исходной ФАР (рис. 24), а сплошной – модифицированной ФАР (рис. 26). Видно, что отличие зависимостей незначительное. Значение шумовой температуры в обоих вариантах возрастает, если ГМ или ИМ направлены в сторону земли. Шумовая температуры заметно ниже при $\gamma=30^\circ$, поскольку в этом случае антенна сильнее повернута в сторону неба, и шумы земли сказываются меньше.

Расчеты других рассмотренных выше вариантов также показывают незначительное отличие шумовой температуры регулярной и соответствующей аperiodической ФАР.

Заключение.

В работе рассмотрены методы уменьшения интерференционных максимумов фазированных антенных решеток, составленных из малого числа одинаковых, подрешеток с регулярной структурой (прямоугольной или гексагональной сеткой). Показано, что эти методы, основанные на сдвигах и поворотах подрешеток, а также на использовании подрешеток с различным шагом и комбинировании этих подходов, эффективны для подавления интерференционных максимумов в диапазоне до 10 дБ и более. Показано, что некоторое возрастание уровня боковых лепестков подобных ФАР по сравнению эквидистантными ФАР не приводит к существенному увеличению их шумовой температуры.

Литература.

1. *А.А. Толкачев, В.А. Макота, М.П. Павлова, А.М. Николаев, В.В. Денисенко, Г.К. Соловьев.* Большая радиолокационная ФАР миллиметрового диапазона волн. - Антенны, 1999, № 1 (42), с. 4-11.
2. *В.В. Денисенко, Ю.Б. Дубров, Ю.Б. Корчемкин, В.А. Макота, А.М. Николаев, А.А. Толкачев, А.М. Шитиков, А.В. Шишлов, А.Г. Шубов.* Многоэлементная ФАР Ка диапазона волн. - Антенны, 2005, № 1, с. 7-14.
3. *Скобелев С.П.* Фазированные антенные решетки с секторными диаграммами направленности. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2010. 320 с.
4. *Yu.V. Kri vosheev, A.V. Shi shlov,* Grating Lobe Suppression in Phased Arrays Composed of Identical or Similar Subarrays. – Proceedings of Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham-Boston, 2010, p.p.724-730.
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.
7. *J. J. Stangel and J. J. Punturieri*, Random subarray techniques in electronic scan antenna design - 1972 IEEE Group on Antennas and Propagation Int. Symp. Dig., vol. 10, pp. 17 - 20, December 1972.
8. *R. J. Mailloux, L. Zahn, and A. Martinez III* Grating lobe control in limited scan arrays - IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 27, pp. 79 - 85, January 1979
9. *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.
10. *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.
11. *R.J. Mailloux, S. G. Santarelli and T. M. Roberts*, “Wideband arrays using irregular (*polyomino*) shaped subarrays”, *Electr. Lett.*, Vol. 42, No 18, pp. 1019–1020, 31 Aug. 2006.
12. *Ф.И. Емельченков* Бортовые неэквидистантные фазированные антенные решётки с плотной упаковкой фазовращателей. – Антенны, 2005, № 11 (102), с.45-52.
13. *С.А. Ганин, В.В. Денисенко, Б.А. Левитан, А.В. Шишлов, А.Г. Шубов, В.Я. Щербенков*. Разработка антенн с печатными элементами в ОАО «Радиофизика». – Радиолокация и связь, № 10, 2010, с.44-54.
14. *М. Сколник* Справочник по радиолокации. – М., "Советское радио", 1977.

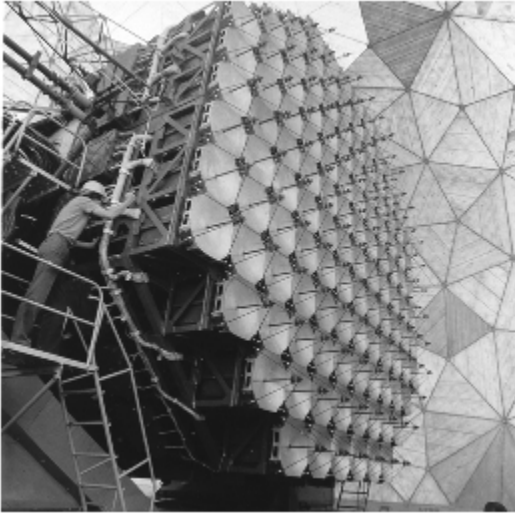


Рис. 1. ФАР РЛС "Руза" [1]

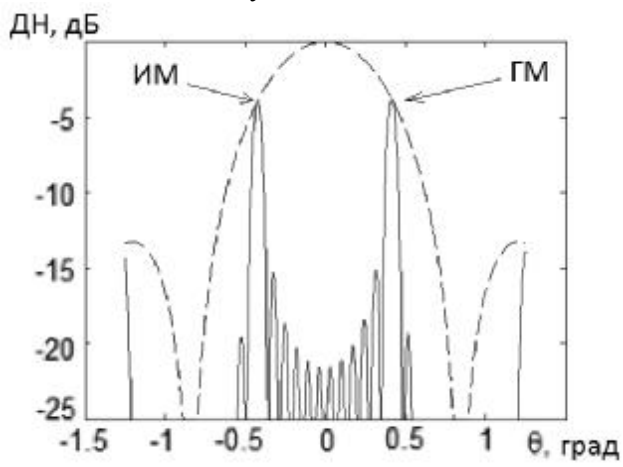


Рис. 2. ДН ФАР при отклонении луча на угол 25 угловых минут

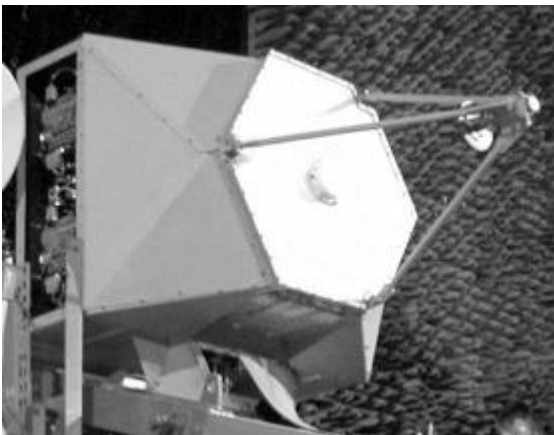


Рис. 3. ФАР РЛС «МРФ-1» [2]

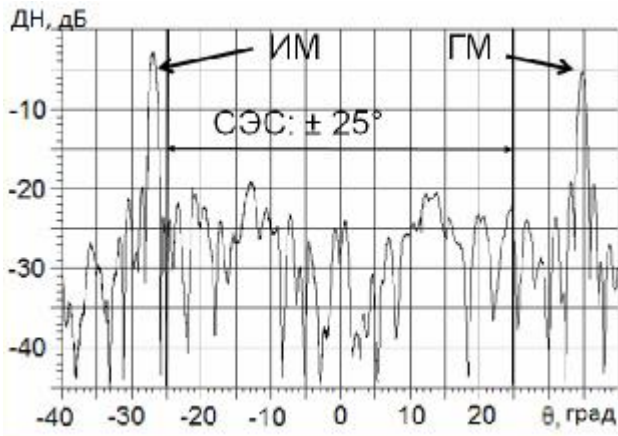


Рис. 4. ДН ФАР при отклонении луча на угол 35° .

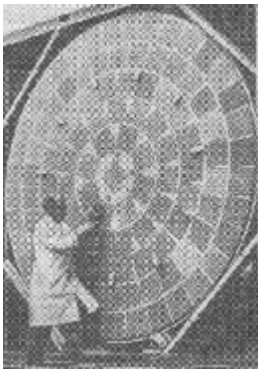


Рис. 5. ФАР с круговым расположением подрешёток [5].

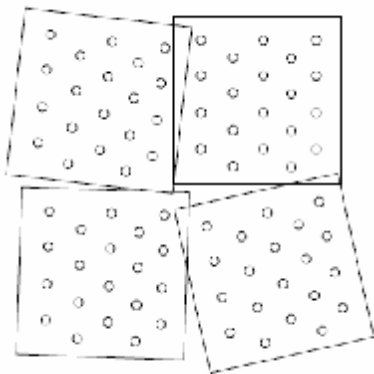


Рис. 6. ФАР с разворотом подрешёток [6].

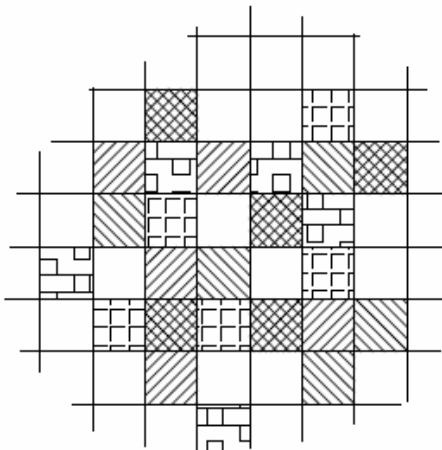


Рис. 7. ФАР с перемежающимися подрешётками [7]

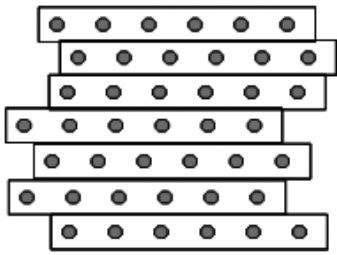


Рис. 8. ФАР со сдвигом столбцов [8, 9, 10]

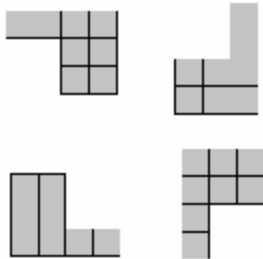
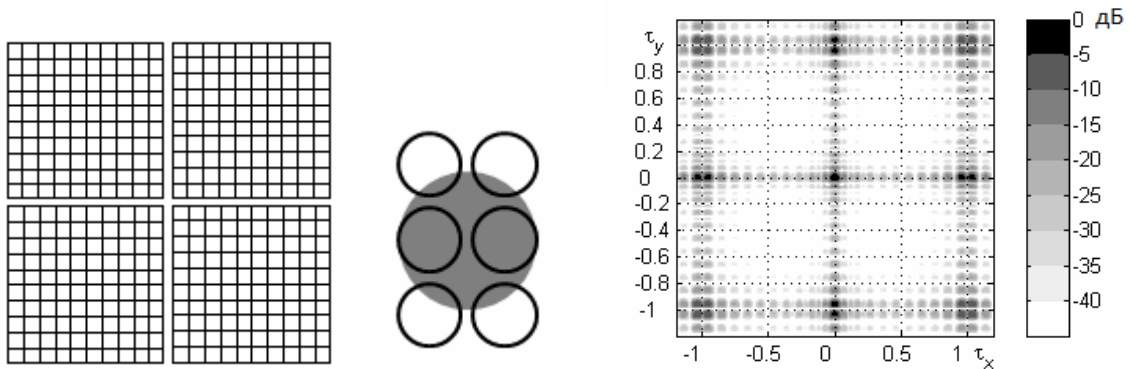
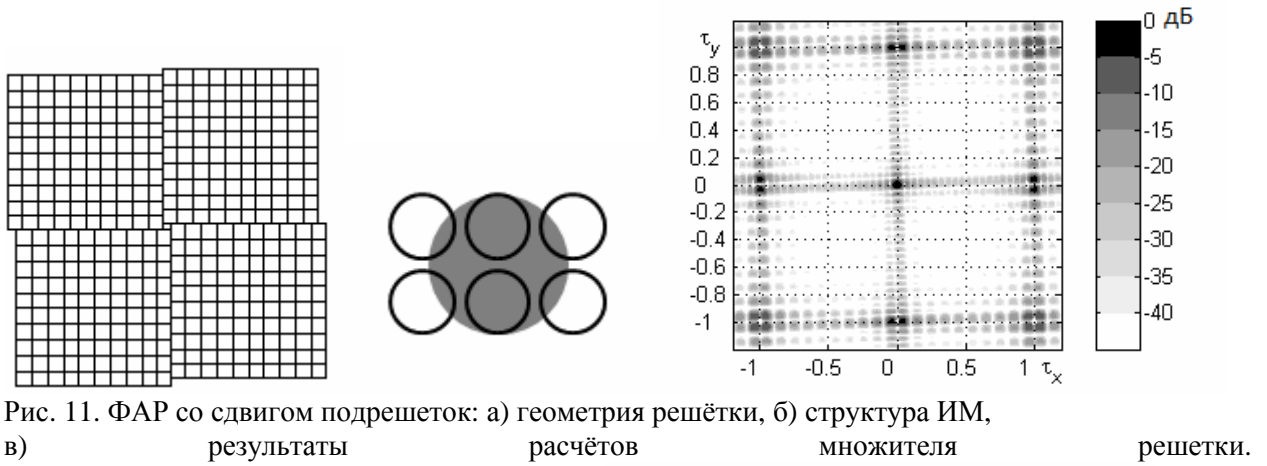


Рис. 9. ФАР на основе принципа полимино [11].



Рис. 10. ФАР, из гибких линеек, изогнутых в спирали [12].



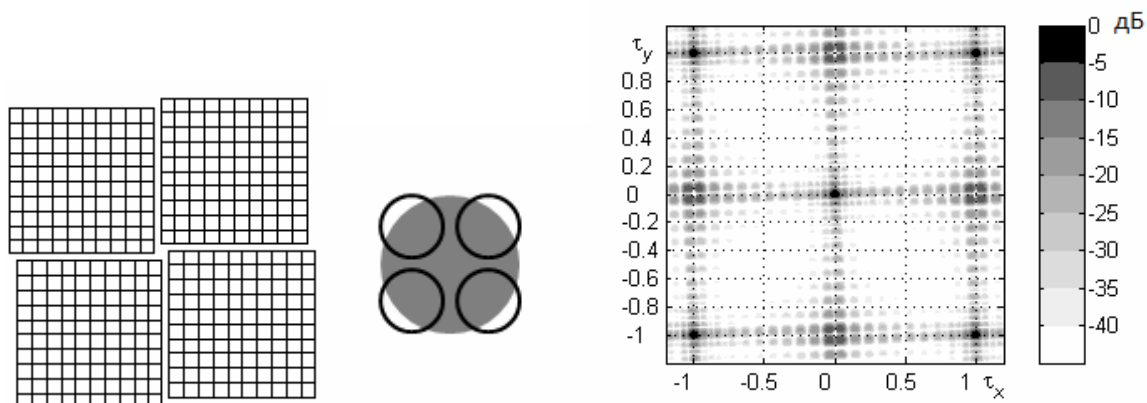


Рис. 13 ФАР с комбинацией сдвигов и зазоров между подрешетками: а) геометрия решётки, б) структура ИМ, в) результаты расчётов множителя решетки.

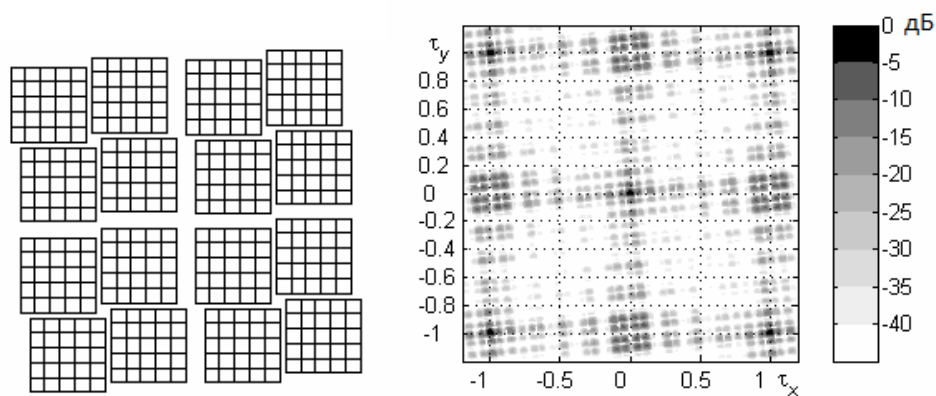


Рис. 14. ФАР из 16 подрешеток: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов множителя решетки.

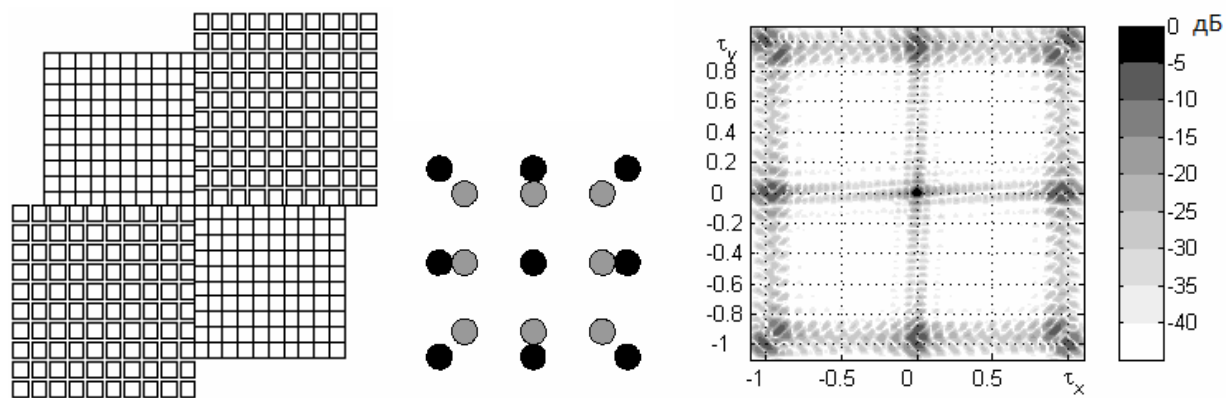


Рис. 15. ФАР из подрешеток с разным шагом: а) геометрия решётки, б) структура ИМ, в) результаты расчётов множителя решетки.

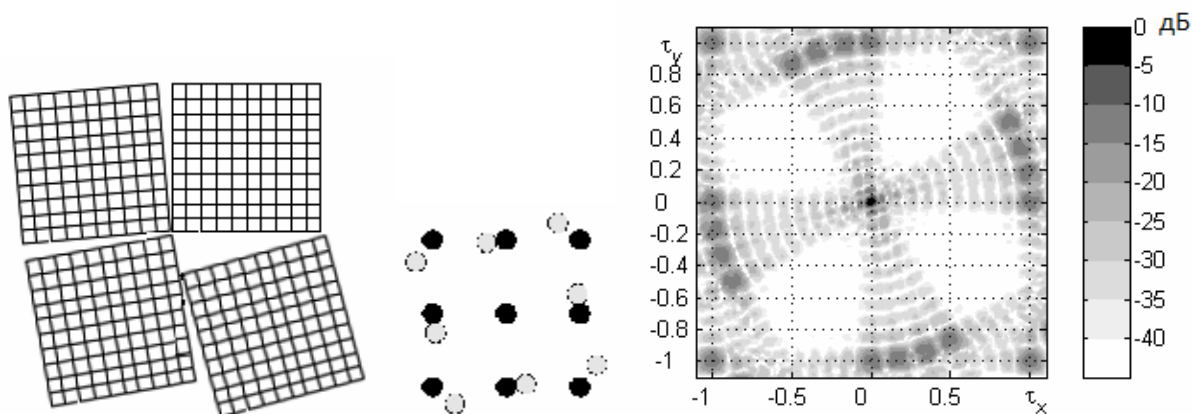


Рис. 16. ФАР с поворотами подрешеток: а) геометрия решётки, б) структура ИМ, в) результаты расчётов множителя решетки.

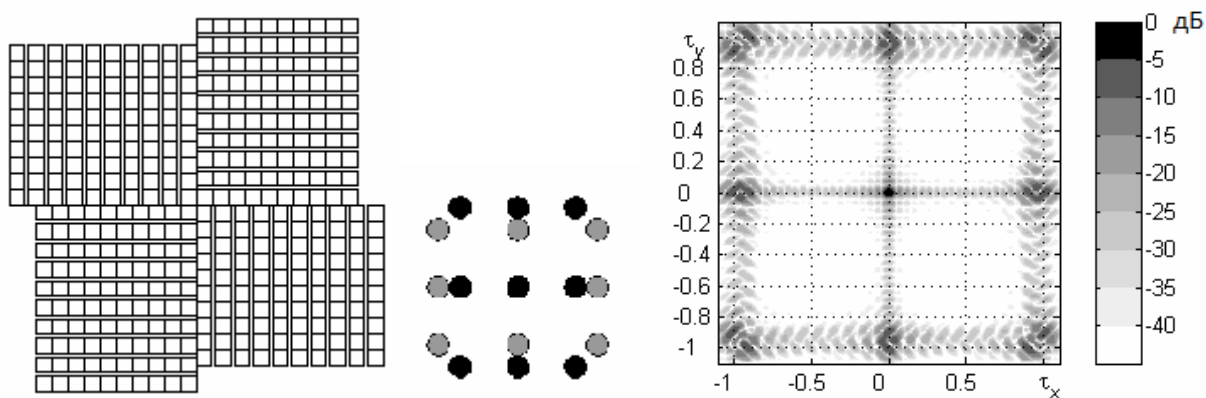


Рис. 17. ФАР с поворотами подрешеток с прямоугольной сеткой на 90° : а) геометрия решётки, б) структура ИМ, в) результаты расчётов множителя решетки.

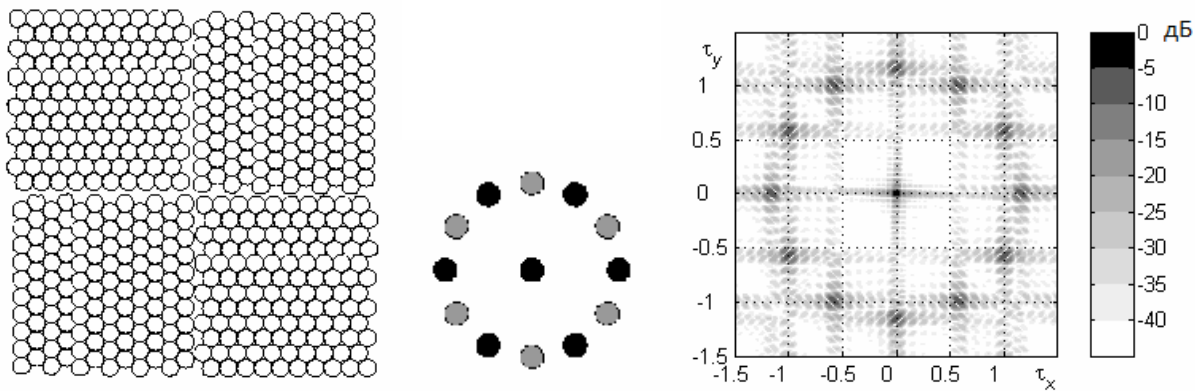


Рис. 18. ФАР с поворотами подрешеток с гексагональной сеткой на 90° : а) геометрия решётки, б) структура ИМ, в) результаты расчётов множителя решетки.

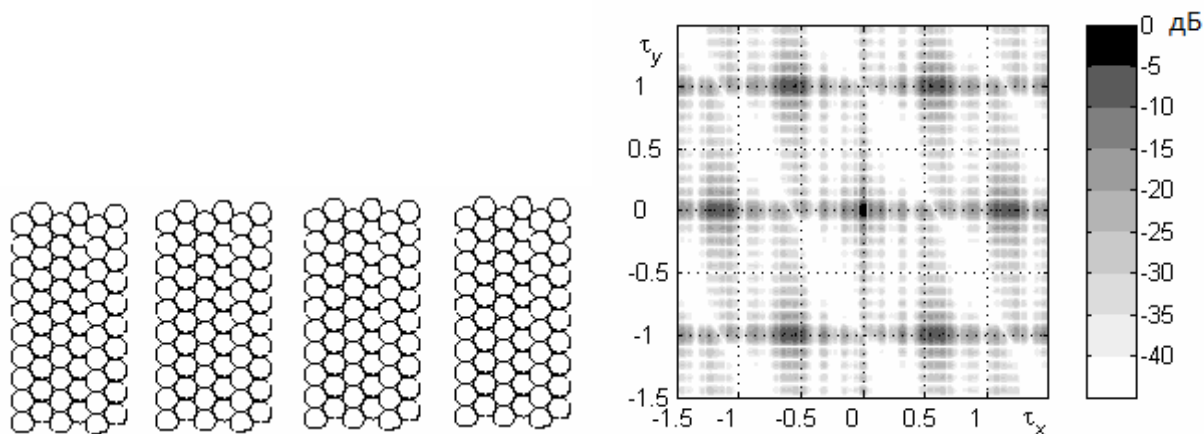


Рис. 19. ФАР с зазорами между подрешетками с гексагональной сеткой: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов множителя решетки.

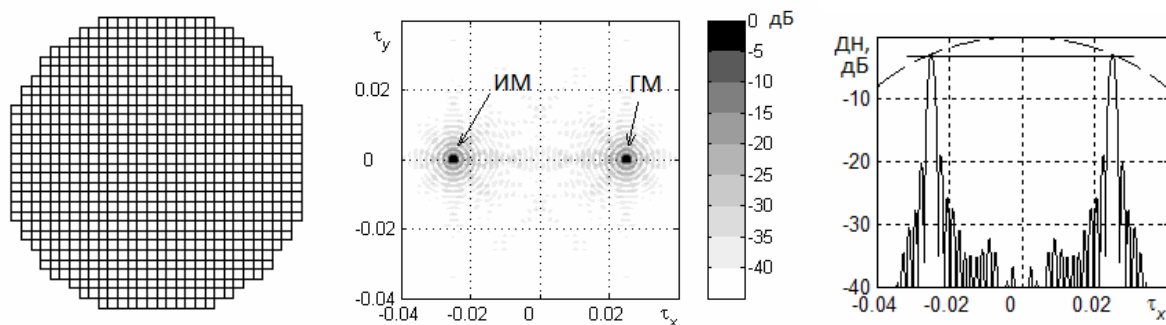


Рис. 20. ФАР с квадратной сеткой: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов ДН, в) сечение ДН.

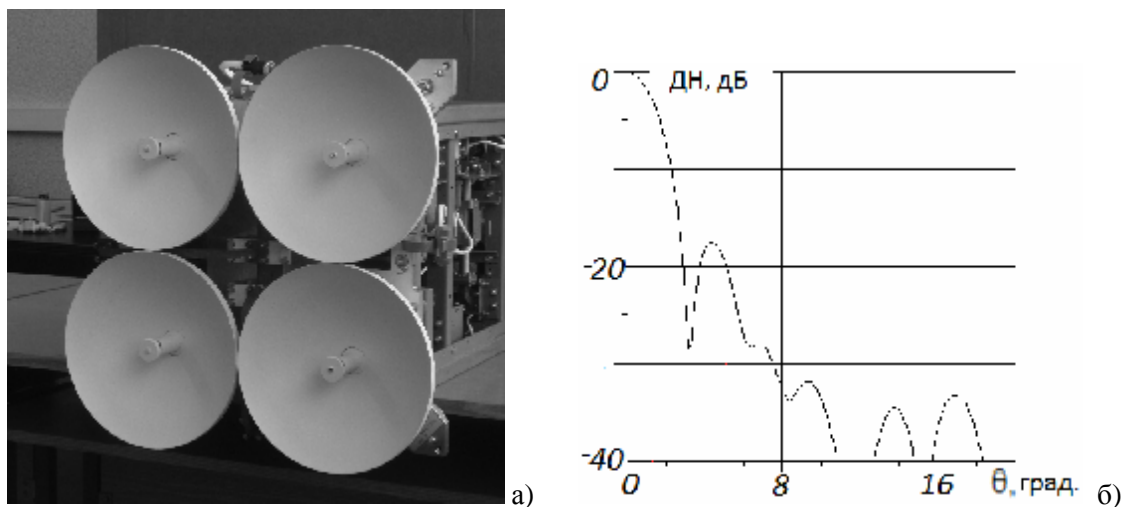


Рис. 21. Крупноапертурные излучатели ФАР: а) группа из 4-х излучателей, б) ДН излучателя.

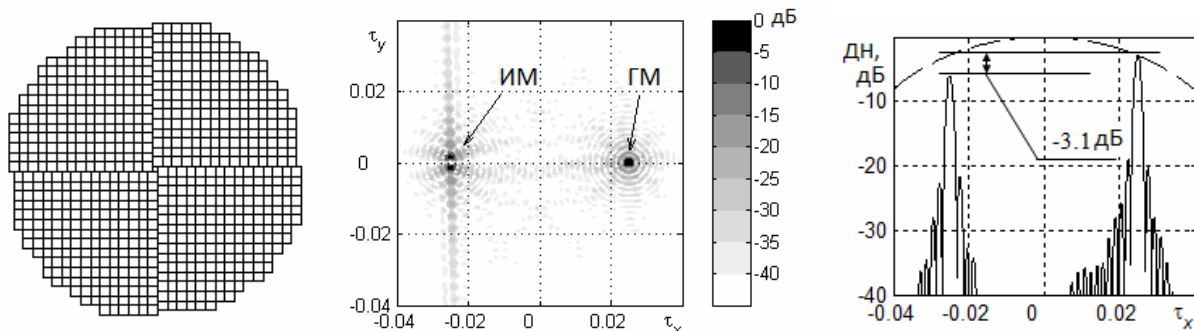


Рис. 22. ФАР со сдвигами подрешеток: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов ДН,

в) сечение ДН.

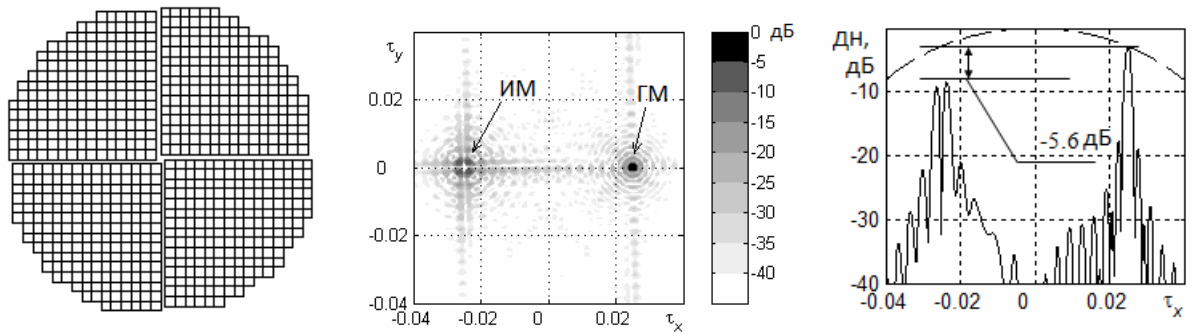


Рис. 23. ФАР с комбинированием сдвигов и зазоров между подрешетками: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов ДН, в) сечение ДН.

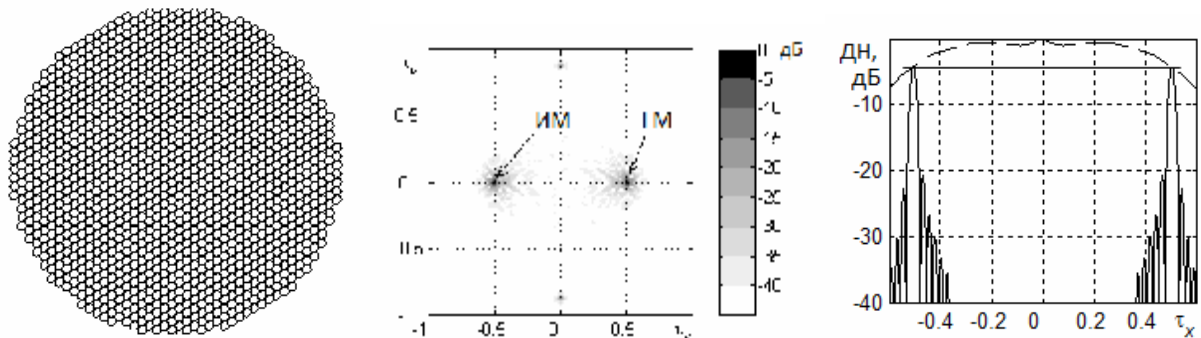


Рис. 24. ФАР с гексагональной сеткой: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов ДН, в) сечение ДН.

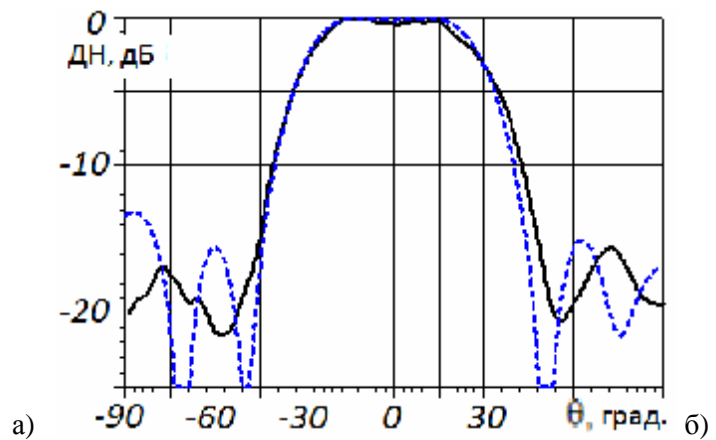
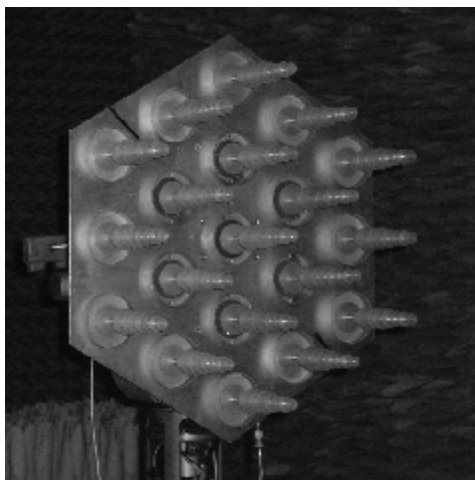


Рис. 25 ФАР с излучателями на основе ребристых стержней: а) фрагмент, б) секторная парциальная ДН излучателя

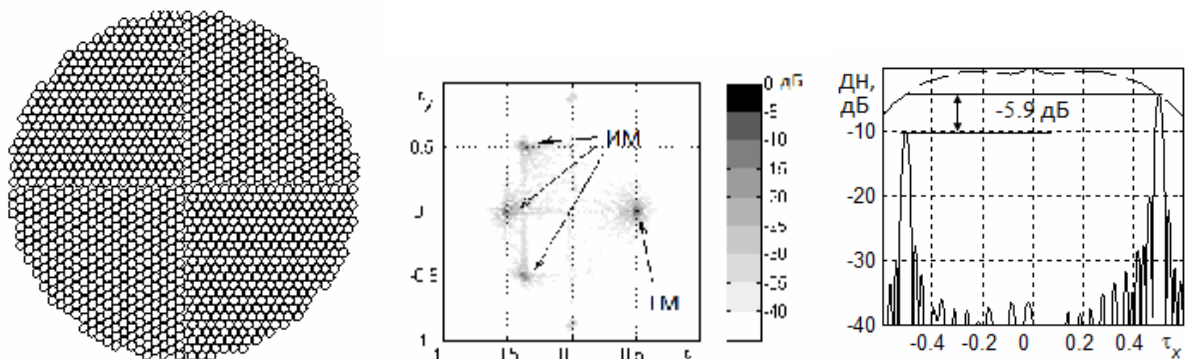


Рис. 26. ФАР с гексагональной сеткой и поворотами подрешеток на 90°: а) геометрия решётки, б) результаты расчётов ДН, в) сечение ДН.

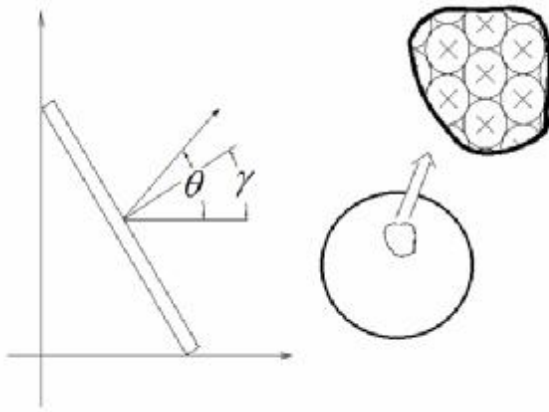


Рис. 27. Ориентация ФАР относительно линии горизонта .

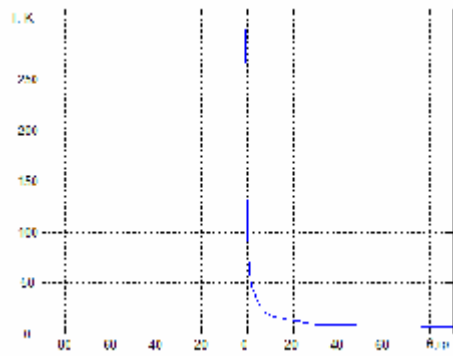


Рис. 28. Угломестная зависимость радиояростной температуры неба

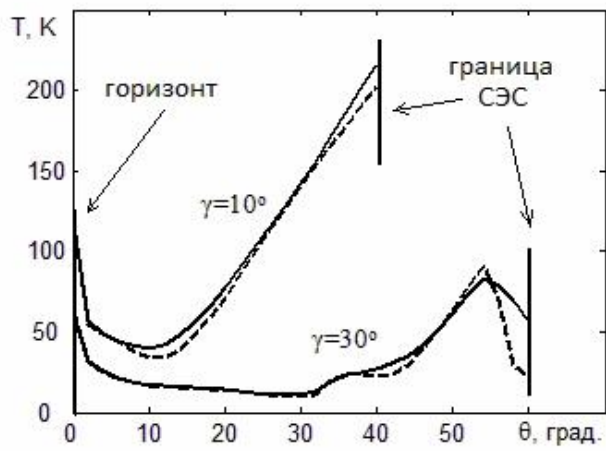


Рис.29. Зависимость шумовой температуры от угла сканирования θ для углов наклона $\gamma=10^\circ$ и 30° .