

Разреженная фрактальная антенная решетка с совмещенными X- и Ku- диапазонами

С.С. Сидоренко¹, В.В. Демшевский¹, В.В. Лободин¹, И.А. Богачев¹, Г.С. Аникин^{1,2}

¹АО НПП «Исток «им. Шокина»

²Московский авиационный институт

Аннотация: в статье рассматривается структура разреженной фрактальной антенной решетки Ku-диапазона частот, а также возможность интеграции в эту структуру второго X-диапазона. Кроме того, статья анализирует возможность уменьшения приемопередающих модулей за счет разреженного антенного полотна.

Ключевые слова: АФАР, ФАР, фрактал, разреженная антенная решетка, кластеризованная антенная решетка, совмещенная ФАР.

1. Введение

Актуальность исследования обусловлена расширением функциональных возможностей АФАР за счет использования двухчастотных антенных систем с различными сочетаниями в S, C, X, Ku диапазонах частот.

Основная задача в представленной работе - провести синтез фрактальной фазированной антенной решетки (ФАР) с совмещением диапазонов на одном полотне и обеспечивающей возможность электронного отклонения луча в широком диапазоне телесных углов.

Фракталы впервые были описаны в 1970-х годах Б. Мандельбротом и характеризуются самоподобной геометрией и рекурсивной повторяемостью элементов. Формально это может быть выражено через соотношение (1):

$$F_{n+1} = T(F_n), \quad (1)$$

где F_n – фрактал на n-м уровне итерации, T — преобразующая функция.

В антенной тематике упоминание фракталов чаще всего можно встретить в контексте проектирования одиночных излучателей, тем не менее, ряд работ, к примеру, [1] использует свойство фракталов для построения ФАР. Фрактальные антенные решетки хорошо подходят для совмещения нескольких диапазонов частот, так как сами по себе уже являются разреженными и, как правило, обеспечивают возможность электронного сканирования. Разместив элементы второго диапазона частот в местах, где элементы уже отсутствуют, возможно получить вторую ФАР с электронным сканированием.

В статье [1], показана оптимизация фрактальной ФАР построенной по принципу ковра Серпинского, с целью минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ). В результате авторами статьи была получена конфигурация фракталоподобной ФАР, имеющая размерность 27x27 элементов с УБЛ менее -18 дБ.

Работа, указанная выше, была взята нами за основу для разработки фракталоподобной ФАР с совмещением диапазонов частот.

2. Фракталоподобная ФАР

Одним из способов совмещения диапазонов частот на антенном полотне (АП) фракталоподобной формы является реализация антенной решетки на основе двух типов независимых излучателей, работающих на разнесенных диапазонах частоты.

Этот способ обладает гибкостью при совмещении двух диапазонов с большим отношением частот. Как было выше сказано, результаты расчета фракталоподобной АР [1] послужили основанием для дальнейшего исследования совмещённой ФАР X- и Ku- диапазонов частот. Внешний вид исходной и модифицированной фракталоподобных АР для размещения элементов Ku- диапазона частот представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Внешний вид фракталоподобных АР Ku- диапазона частот. Исходная фракталоподобная АР а); модифицированная фракталоподобная АР б)

Для расчета диаграммы направленности (ДН) фракталоподобных АР используется формула (2):

$$f_{AP}(\theta, \varphi) = f_{из}(\theta, \varphi) * f_{реш}(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где $f_{из}(\theta, \varphi)$ – ДН патч-излучателя, рассчитанная в САПР; $f_{реш}(\theta, \varphi)$ – множитель АР

$$f_{реш}(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} A_{mn} e^{j\phi_{mn}(\theta, \varphi)}, \quad (3)$$

где $N_x N_y$ – число излучателей по x и y ; A_{mn} – амплитуда возбуждения излучателей m -го по x , n -го по y ; $\phi_{mn}(\theta, \varphi)$ – сдвиг фазы сигнала излучателя в направлении θ, φ .

Сдвиг $\phi_{mn}(\theta, \varphi)$ начальной фазы рассчитывается на основе уравнения фазирования:

$$\phi_{mn}(\theta, \varphi) = -k(m d_x \cos \varphi + n d_y \sin \varphi) \sin \theta, \quad (4)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число на рабочей длине волны λ ; d_x, d_y – шаг решетки по осям x и y .

На рисунке 2 представлены графики ДН фрактальной АР по типу ковра Серпинского. Из графиков видно, что расположение элементов по классической структуре ковра Серпинского имеют высокий УБЛ относительно главного луча ДН и не обеспечивают широкий диапазон сканирования, в отличие от модифицированной фракталоподобной АР.

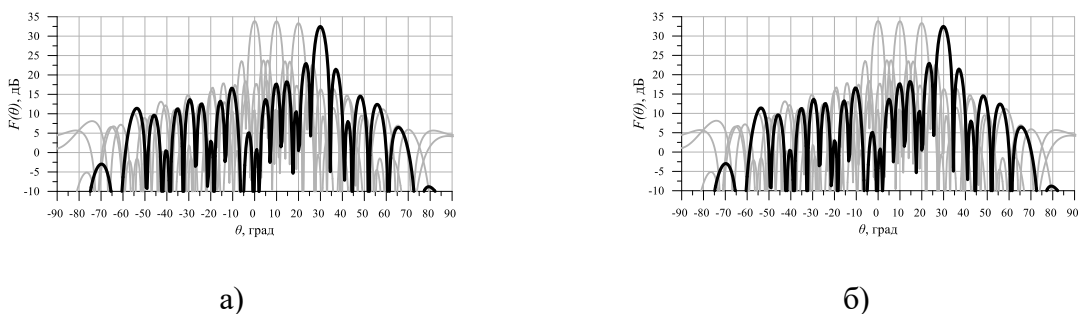


Рисунок 2. ДН фрактальной АР по типу ковра Серпинского Ku-диапазона частот при отклонении луча в азимутальной а) и угломестной б) плоскостях

На рисунке 3 представлены графики ДН модифицированной фракталоподобной АР при отклонении луча в азимутальной и угломестной плоскостях с шагом расположения элементов $0,5\lambda_{Ku0}$. Из графиков видно, что отклонение луча ДН АР в азимутальной и угломестной плоскостях достигает $\pm 60^\circ$ при этом УБЛ не превышает -10 дБ по отношению к главному лучу ДН

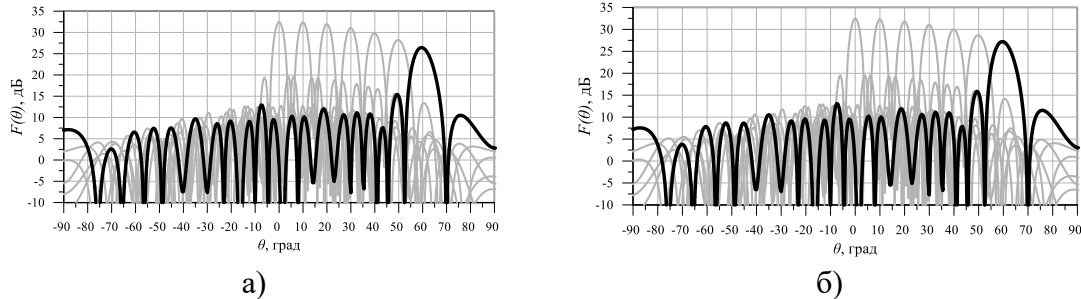


Рисунок 3. ДН модифицированной фракталоподобной АР Ку-диапазона частот при отклонении луча в азимутальной а) и угломестной б) плоскостях

Разместив элементы второго диапазона на местах отсутствующих элементов на модифицированной фракталоподобной АР, удалось также добиться электронного отклонения луча АР на $\pm 60^\circ$ в основных плоскостях, как и для первого диапазона. Графики ДН АР X-диапазона частот представлены на рисунке 4, УБЛ не превышает -10 дБ по отношению к главному лучу ДН. Неравномерность формирования боковых лепестков вызвана относительно малым шагом расположения элементов X-диапазона частот равным $0,4\lambda_{X0}$.

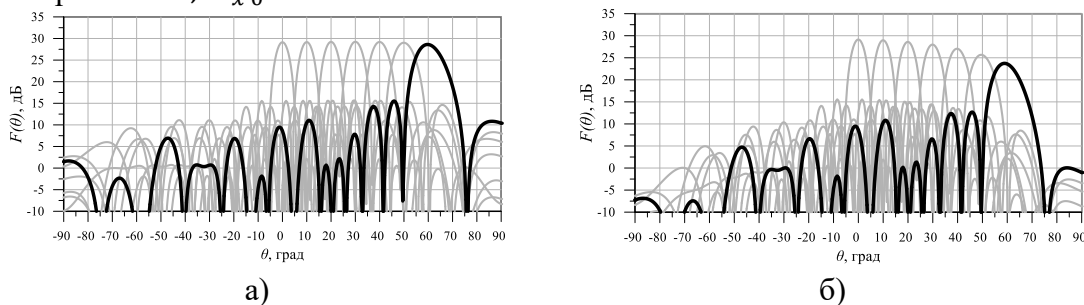


Рисунок 4. ДН фракталоподобной АР X-диапазона частот при отклонении луча в азимутальной а) и угломестной б) плоскостях

Совмещение двух диапазонов частот по принципу, описанному выше, на практике повлечет за собой плотное расположение приемо-передающих модулей (ППМ), что делает невозможным установку системы отвода тепла от нагреваемых ППМ при дефиците свободного пространства в системе с АФАР. Работа ППМ в условиях повышенной температуры [2] (максимальная рабочая температура ППМ, как правило составляет $+85^\circ\text{C} - +150^\circ\text{C}$, в зависимости от структуры радиоэлектронных компонентов модуля) приводит к выходу их из строя и, как следствие, к ухудшению работы АР и характеристик радиотехнической системы в целом. Решением этой проблемы является дополнительное разрежение фракталоподобного АП, что позволит сократить число ППМ, тем самым увеличить объем свободного пространства для установки системы отвода тепла и существенно сократить экономические затраты на производство АФАР.

3. Разрежение ФАР. Методы разрежения

На ряду с классическим методом разрежения ФАР, при котором сокращается

число излучающих элементов на АП, можно выделить метод кластеризации АР, [3] как частный случай разрежения ФАР. Кластеризация — это объединение нескольких излучающих элементов АП в одну группу (кластерную ячейку), которая возбуждается одним ПППМ. В таком случае, амплитуда и фаза возбуждения излучающих элементов, входящих в кластерную ячейку, будет одинаковой. На рисунке 5 представлены функциональные схемы регулярной, кластеризованной и разреженной ФАР.

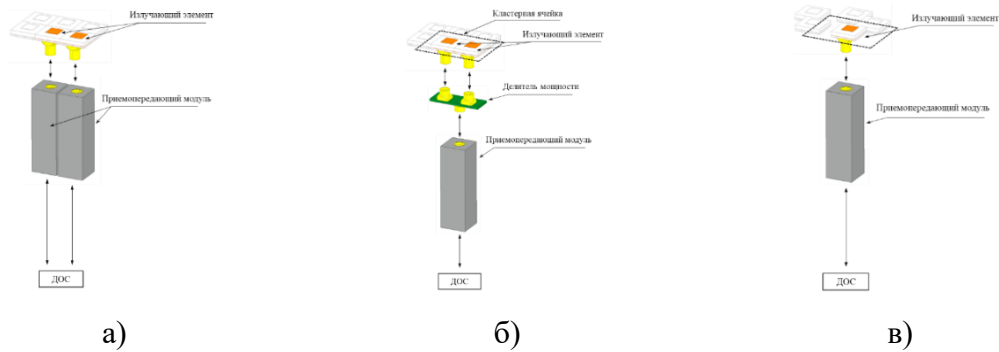


Рисунок 5. Функциональные схемы ФАР, где ДОС – диаграммообразующая система. Регулярная ФАР а); кластеризованная ФАР б); разреженная ФАР в)

Здесь и далее в работе под кластеризованной ФАР будет подразумеваться АР, построенная по принципу рисунка 6б, а под разреженной – АР, построенная по принципу рисунка 6в. Для определения преимущества одного метода разрежения перед другим, АР Ку-диапазона частот (рисунок 1) и АР Х-диапазона частот (рисунок 4) были поэтапно одинаково разрежены до структур показанных на рисунках 7 (а – г).

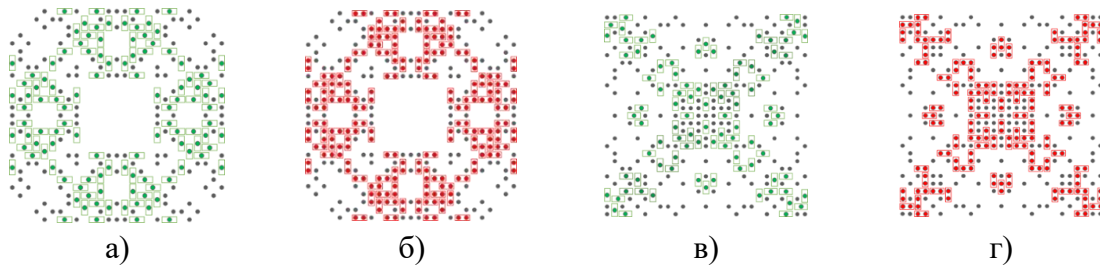


Рисунок 7. Конечный вид АР после разрежения: АР Ку-диапазона частот классическим методом а); АР Ку-диапазона частот методом кластеризации б); АР Х-диапазона частот классическим методом в); АР Х-диапазона частот методом кластеризации г)

Результаты расчетов ФАР Ку- и Х-диапазонов частот поэтапным методом разрежения и кластеризации, представлены на рисунках 8, 9.

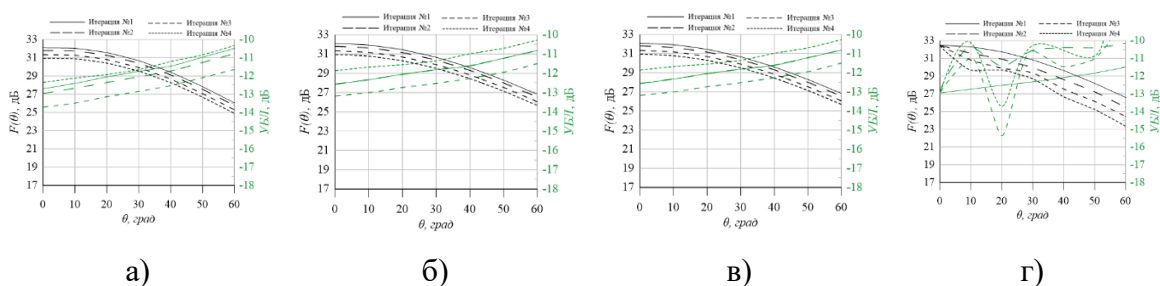


Рисунок 8. Графики зависимости КУ и УБЛ ФАР Ку-диапазона частот от угла сканирования, разреженной классическим методом в азимутальной плоскости а); в угломестной плоскости б). Разреженной методом кластеризации в азимутальной плоскости в); в угломестной плоскости г)

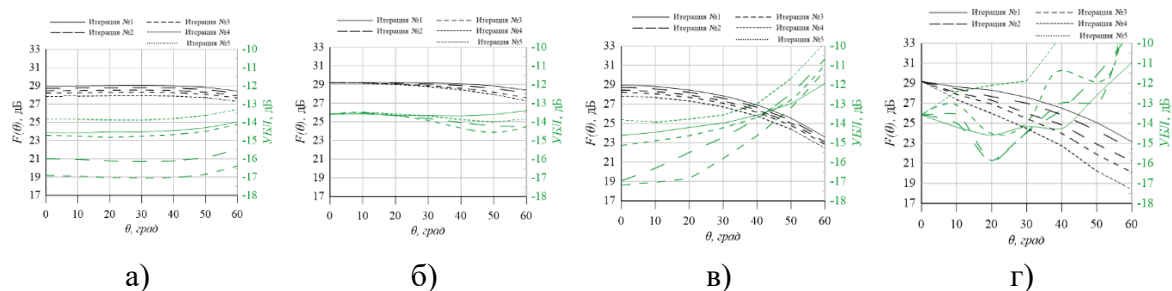


Рисунок 9. Графики зависимости КУ и УБЛ ФАР X-диапазона частот от угла сканирования, разреженной классическим методом в азимутальной плоскости а); в угломестной плоскости б). Разреженной методом кластеризации в азимутальной плоскости в); в угломестной плоскости г)

По результатам анализа графиков зависимостей КУ и УБЛ от угла сканирования разреженной и кластеризованной ФАР, представленных на рисунках 11 и 12, можно сделать вывод, что кластеризация ФАР является рабочим методом разрежения АР с углами электронного сканирования $0^\circ - 20^\circ$, сохраняя при этом более высокий уровень КУ, чем разреженные ФАР

Вывод

В работе проведены исследования методов разрежения и кластеризации ФАР на примере фракталоподобной ФАР с совмещением Ку- и X- диапазонов частот на одном АП с целью уменьшения количества ППМ и интегрирования системы отвода тепла от нагреваемых модулей при дефиците свободного пространства при использовании в системе с АФАР. Результаты моделирования и расчетов показали, что кластеризованные ФАР сохраняют более высокий уровень КУ на углах электронного сканирования $0^\circ - 20^\circ$, чем классически разреженные ФАР. Значение разницы КУ при кластеризации и разрежении может варьироваться в зависимости от количества разреженных/кластеризованных элементов.

Список литературы

1. Anirban Karmakar, Rowdra Ghatak, R.K. Mishra & D.R. Poddar (2015): Sierpinski carpet fractal-based planar array optimization based on differential evolution algorithm, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, DOI:10.1080/09205071.2014.997837.
2. Демшевский В.В, Сидоренко С.С., Баженов А.Д. «Исследование характеристик работы антенной решетки при температурном воздействии». Сборник статей XIV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт – Петербург, «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 02.06 – 06.06 2025г.г.
3. Anselmi N., Rocca P., Salucci M., Massa A. Irregular phased array tiling by means of analytic schemata-driven optimization // IEEE Transaction on Antennas and Propagations. 2017. Vol. 65. №. 9. P. 4495-4510.