

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.10>

УДК: 621.396.67

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Э.О. Можаров, И.Я. Афанасьев, В.Ю. Лоскутов, Е.С. Литвинов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с.1

Статья поступила в редакцию 12 марта 2025 г.

Аннотация. Исследованы и сравнены наиболее часто применяемые в инженерной и научной среде методы расчета пространственных электрических характеристик антенных решеток на примере фазированной антенной решетки (ФАР) широкополосных низкопрофильных излучателей 7×7 с гексагональной сеткой расположения. Для оценки качества вычисления диаграмм направленностей (ДН) введены функции потерь, позволяющие сравнить диаграммы, полученные различными методами. Рассмотрены вариации приближенных методов расчета ДН ФАР на основе системного множителя антенной решетки. Показаны модификации строго полноволнового электродинамического расчета ФАР, основанного на вычислении электромагнитных полей каждого излучателя или только групп излучателей. Предложен метод расчета антенных решеток на основе вычисления электромагнитных полей излучателей в составе малоэлементных групп с последующим вычислением полновесной ДН антенной системы за счет сшивающих полей сферических волн. Предложенный метод позволяет выполнять расчет пространственных характеристик антенных решеток с меньшими

требованиями к вычислительным ресурсам. Показаны преимущества и недостатки рассмотренных методов расчета ДН ФАР.

Ключевые слова: антенная решетка, фазированная антенная решетка, излучатель, диаграмма направленности, метод расчета, функция потерь.

Автор для переписки: Можаров Эдуард Олегович, eduardmozharov@yandex.ru

Введение

При разработке и проектировании радиотехнических систем, содержащих ФАР и АФАР, возникает потребность в многократных вычислениях электрических характеристик антенных решеток на ряде частотных точек в рабочем диапазоне частот для большого количества положений главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Несмотря на рост вычислительных мощностей современных расчетных кластеров и персональных компьютеров, полномасштабный электродинамический расчет хорошего качества строгими методами [1-4] полной модели ФАР либо невозможен из-за размеров доступной оперативной памяти или памяти расчетной видеокарты, либо занимает длительное время. Стоит отметить, что при равных электрических размерах сложность конструкции излучателей приводит к кратному увеличению требований к вычислительным ресурсам.

За последние десятилетия разработано и внедрено большое количество, как строгих [1-4], так и приближенных [5-9] методов расчета и оценки характеристик излучения антенных решеток. Ряд из них получил наиболее широкое распространение в научной и инженерной среде. Анализ как отечественных, так и зарубежных источников [10-24] позволяет сделать вывод, что сформировался и устоялся набор методов расчета антенных решеток, ряд из которых хорошо интегрирован в различные математические пакеты программ и пакеты прикладных программ электродинамического моделирования. Выбор метода расчета ФАР часто определяется количеством излучателей. При расчете ДН и КУ многоэлементных ФАР принято использовать приближенные подходы, малоэлементные ФАР чаще вычисляют строгими численными методами.

Обосновывая выбранные методы доступными вычислительными ресурсами, устоявшимися исторически в коллективе разработчиков подходами. В данной работе предлагается ввести более качественные оценки расчета ДН ФАР, основанные на функциях потерь, позволяющие более строго подойти к оценке качества расчета ФАР.

1. Методы расчета электрических характеристик полотен фазированных антенных решеток

Рассматриваемые методы расчета электрических характеристик фазированных антенных решеток представлены на рис. 1.



Рис. 1. Методы расчета электрических характеристик полотен ФАР.

Классический упрощенный аналитический метод расчета ДН полотен многоэлементных ФАР основан на теореме перемножения диаграмм [5, 11-15]. При таком подходе пренебрегают краевыми эффектами – изменением характеристик излучателей на краях антенного полотна. Для быстрой, но грубой оценки в инженерной среде при неимении данных о диаграмме направленности излучателя в составе ФАР часто вычисляется только системный множитель [11-15] (M1.1 на рис. 1), либо в качестве ДН излучателя берется ДН «идеального излучателя» [5] (M1.2 на рис. 1). Такой подход хорошо себя зарекомендовал при

синтезе ДН ФАР требуемой формы: расширенной [25, 26], столообразной [27, 28], адаптивных ФАР [29] и т.д.

Более качественным и часто применяемым подходом, является учет ДН излучателя в канале Флоке [9] (М1.3 на рис. 1). Вначале проводится выбор типа излучателя, расчет его характеристик с последующей оптимизацией излучателя в канале Флоке по критериям обеспечения в заданном диапазоне частот и секторе сканирования луча требуемых характеристик: коэффициента отражения, формы ДН, коэффициента эллиптичности и т.д. Далее ДН полотна ФАР $F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ вычисляется путем перемножения ДН системного множителя $F_{\text{с.мн.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ на ДН излучателя в канале Флоке $F_{\text{изл.}}(\theta, \varphi)$ [5-10]:

$$F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = F_{\text{изл.}}(\theta, \varphi) \cdot F_{\text{с.мн.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}). \quad (1)$$

$$F_{\text{с.мн.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = \sum_{i=1}^N \left[A_i \cdot e^{jk[(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) \sin \theta + z_i \cos \theta]} \cdot e^{-jk\psi_{\text{откл.},i}} \right], \quad (2)$$

где θ, φ – углы сферической системы координат, рад.;

$\psi_{\text{откл.},i} = (x_i \cos \varphi_{\text{откл.}} + y_i \sin \varphi_{\text{откл.}}) \sin \theta_{\text{откл.}} + z_i \cos \theta_{\text{откл.}}$ – фаза излучателя;

$\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}$ – углы отклонения, рад.;

k – волновое число;

x_i, y_i, z_i – координаты излучателя.

Такой подход позволяет быстро и с приемлемой точностью вычислить основные пространственные электрические характеристики ФАР. Применение теоремы перемножения ДН для быстрой оценки характеристик ФАР реализовано в ряде пакетов программ электродинамического моделирования, например, MWS CST, FEKO и т.д.

Значительно реже в литературе можно найти модификацию рассмотренного выше приближенного классического подхода. Для повышения качества вычисления отклоненных ДН многоэлементных ФАР используется ДН излучателя в канале Флоке для каждого положения луча (М1.4 на рис. 1) – $F_{\text{изл.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$:

$$F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = F_{\text{изл.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \cdot F_{\text{с.мн.}}(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}). \quad (3)$$

Такой подход требует расчетов ДН излучателя в канале Флоке для каждого интересующего разработчика положения луча, что незначительно усложняет расчет итоговой ДН антенной системы. Малые габариты электродинамической модели излучателя и возможность сохранения расчетной сетки позволяет вычислить ДН излучателя в канале Флоке для большого количества углов сканирования с малыми затратами времени и вычислительных ресурсов. Стоит отметить, что данные вычисления необходимы при качественной разработке излучателя для оценки коэффициента отражения излучателя в секторе рабочих углов с учетом взаимного влияния [19-24].

2. Полноволновое моделирование ФАР

Наилучшим решением для получения точных и качественных расчетных характеристик ФАР является его полноволновое электродинамическое моделирование (М2 на рис. 1). Выполнить его можно в одной из современных прикладных программ [1]: CST, HFSS, FEKO и т.д. Но при исследовании крупноапертурных ФАР полноволновое электродинамическое моделирование становится длительной и ресурсоемкой задачей. Для ряда задач либо не хватит вычислительных ресурсов современных расчетных серверов, либо по экономическим и временным причинам выполнение таких расчетов не целесообразно.

Оценка качества расчета ДН ФАР, рассматриваемыми методами, проведена на двумерной ФАР 7x7 элементов. ФАР построена на основе широкополосных низкопрофильных печатных излучателей с пониженными межэлементными связями (см. рис. 2а) [23, 24], расположенными в узлах гексагональной сетки (см. рис. 2б).

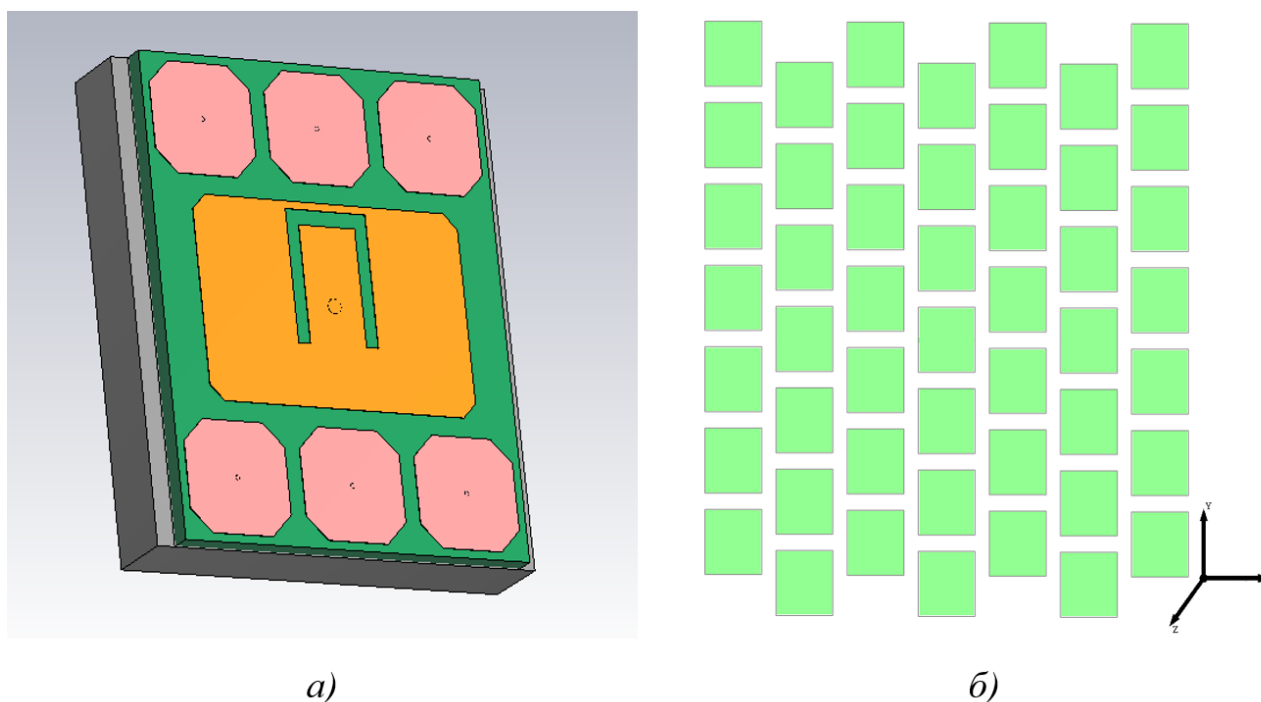


Рис. 2. Трехмерная модель широкополосного низкопрофильного печатного излучателя (а) и схематичное изображение ФАР 7х7 (б).

Стоит отметить, что вычислительная сложность полноволнового моделирования антенной решетки зависит не только от ее максимальных электрических размеров, но и от сложности конструкции излучателя. Сравнены потребляемые вычислительные ресурсы при моделировании простого классического квадратного печатного излучателя с широкополосным низкопрофильным печатным излучателем, представленным на рис. 2, при прочих равных параметрах на одном и том же персональном компьютере:

- метод расчета FEM;
- адаптивная сетка при сходимости S-параметров 0,01;
- равный размер ячейки Флоке и количество мод Флоке.

Сравнительный анализ в табл. 1 показывает, что у более сложной модели излучателя потребовалось разбиение с количеством ячеек в четыре раза большим, в 10 раз больше потребовалось оперативной памяти и в 5,5 раз больше времени. У более сложной модели ФАР по сравнению с простой количество ячеек в четыре раза больше, в 5 раз больше потребовалось оперативной памяти и в 4,7 раз больше времени.

Таблица 1. Сравнение потребляемых вычислительных ресурсов при расчете в канале Флоке излучателей разных типов.

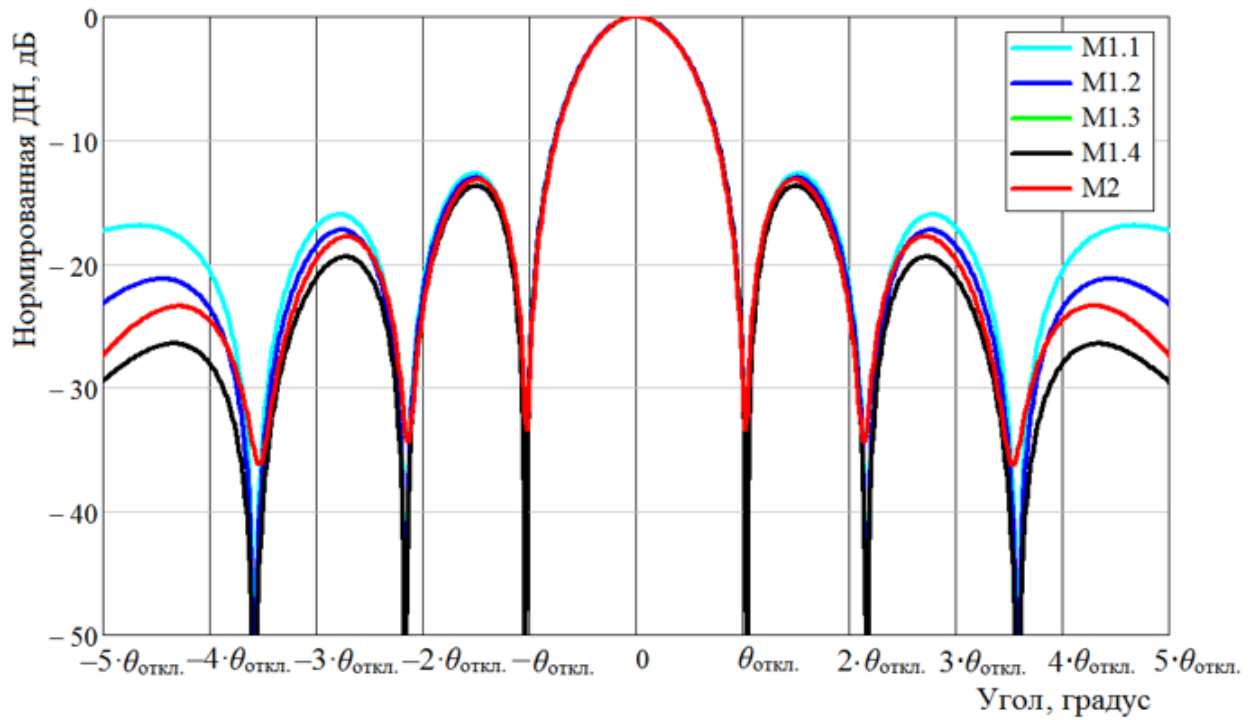
Электродинамическая модель		Ячеек, тыс.ед.	ОЗУ, ГБ	Время расчета, с
тип антенны	тип излучателя			
Излучатель в канале Флоке	классический квадратный печатный	20,5	0,4	58
	широкополосный низкопрофильный печатный	82,9	4,3	321
ФАР 7x7	классический квадратный печатный	531	11,5	1637
	широкополосный низкопрофильный печатный	2063	58	7787

Качество расчета ДН ФАР, полученных рассматриваемыми методами, предлагается сравнивать с эталонной ДН. Эталонными ДН выбраны ДН, полученные в результате полноволнового моделирования частотным методом конечных элементов (ФЕМ). Для оценки качества ДН с заданным направлением луча $\theta_{\text{откл.}}$, $\varphi_{\text{откл.}}$ вводятся функции потерь $L(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ и взвешенных потерь $L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$:

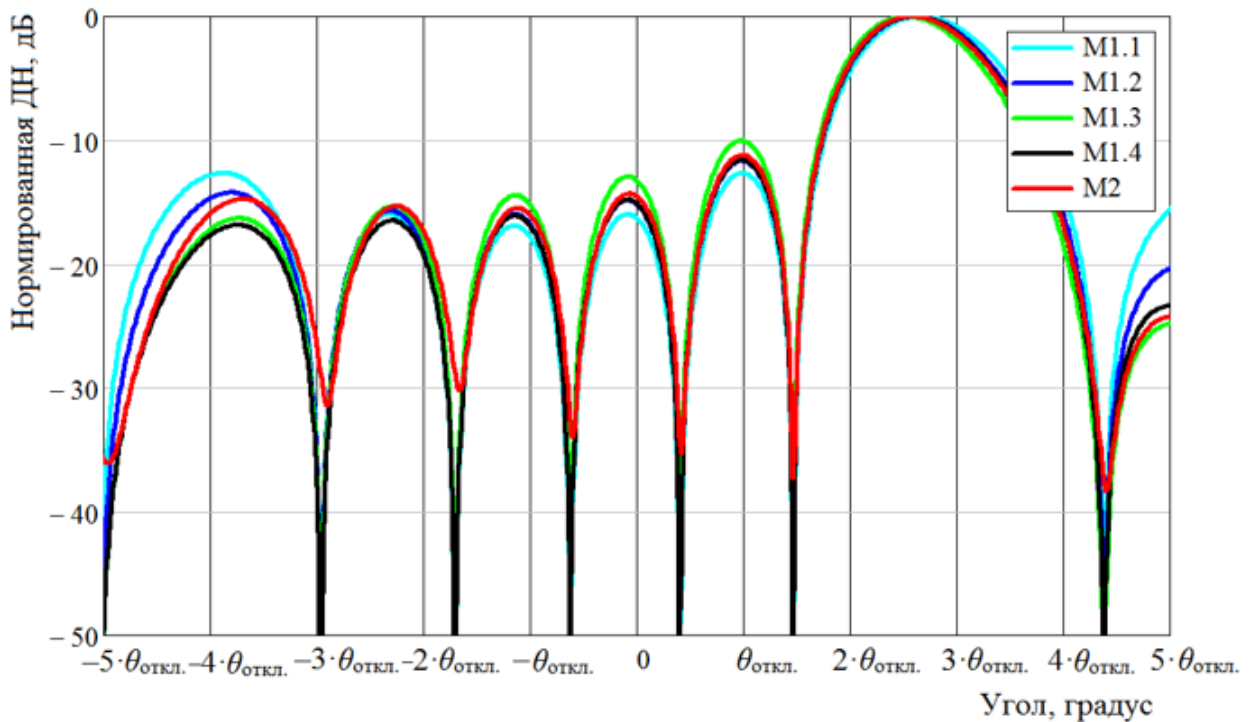
$$L(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) - F_0(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}))^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi}, \quad (4)$$

$$L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_0(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})^2 (F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) - F_0(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}))^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F_0(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi}}. \quad (5)$$

Сечения ДН исследуемой двумерной ФАР в горизонтальной плоскости при неотклоненном и отклоненном главном лепестке ДН, полученные вариациями классического приближенного и строгим методами представлены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Сечения ДН исследуемой ФАР в горизонтальной плоскости: при неотклоненном луче(а) и при отклонении луча(б).

Функция потерь $L(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ является среднеквадратичным отклонением рассматриваемой амплитудной ДН относительно эталонной ДН. Функция потерь $L(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ равномерно учитывает все направления излучения

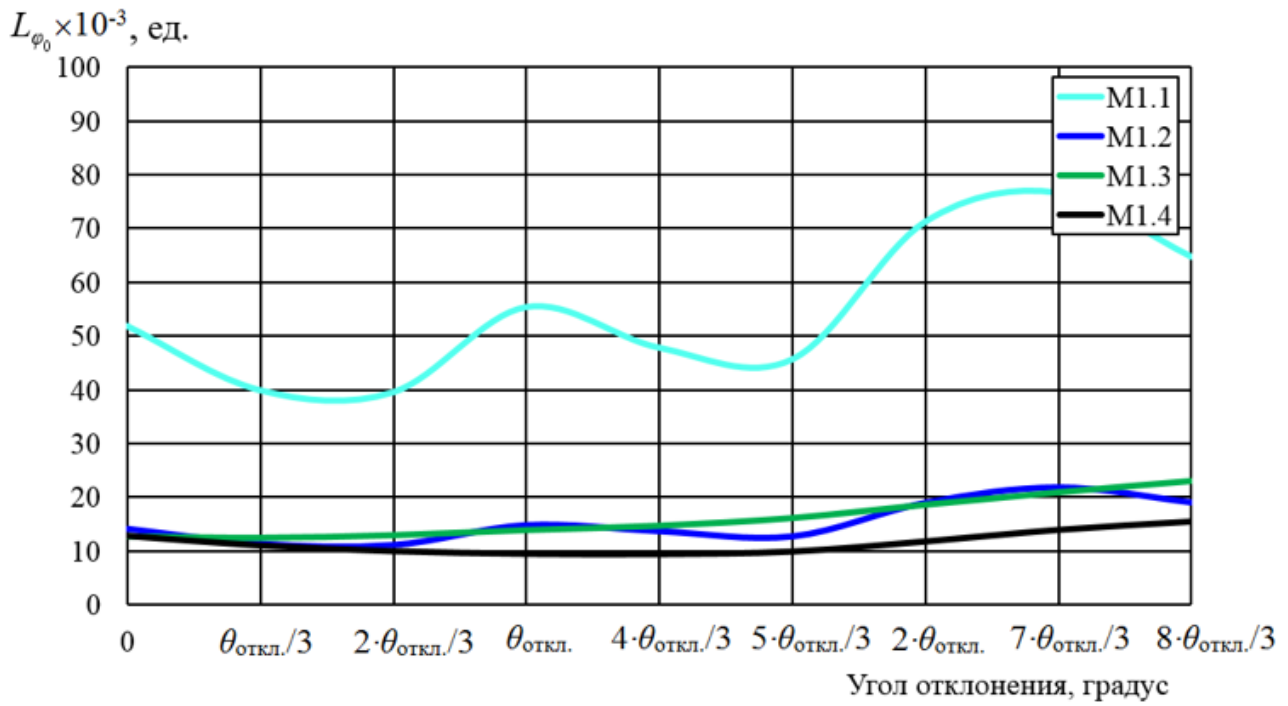
ДН и в рассматриваемых ситуациях больший вклад в нее вносит расхождение по уровню дальних боковых лепестков, так как рассматриваемые методы в основном с меньшей ошибкой отображают главный лепесток и ближайшие к нему боковые лепестки ДН. Функция потерь $L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ является взвешенным среднеквадратичным отклонением рассматриваемой амплитудной ДН относительно эталонной ДН. В качестве весов в функции $L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ принят квадрат эталонной амплитудной ДН $|F(\theta, \varphi, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})|^2$. Она позволяет оценить качество ДН в области главного лепестка, так как больший вклад в нее вносит расхождение в области главного лепестка ДН.

Для исследования поведения сечений ДН, упростив выражения (4) и (5), зададим функции потерь для фиксированного сечения ДН $\varphi = \varphi_0$:

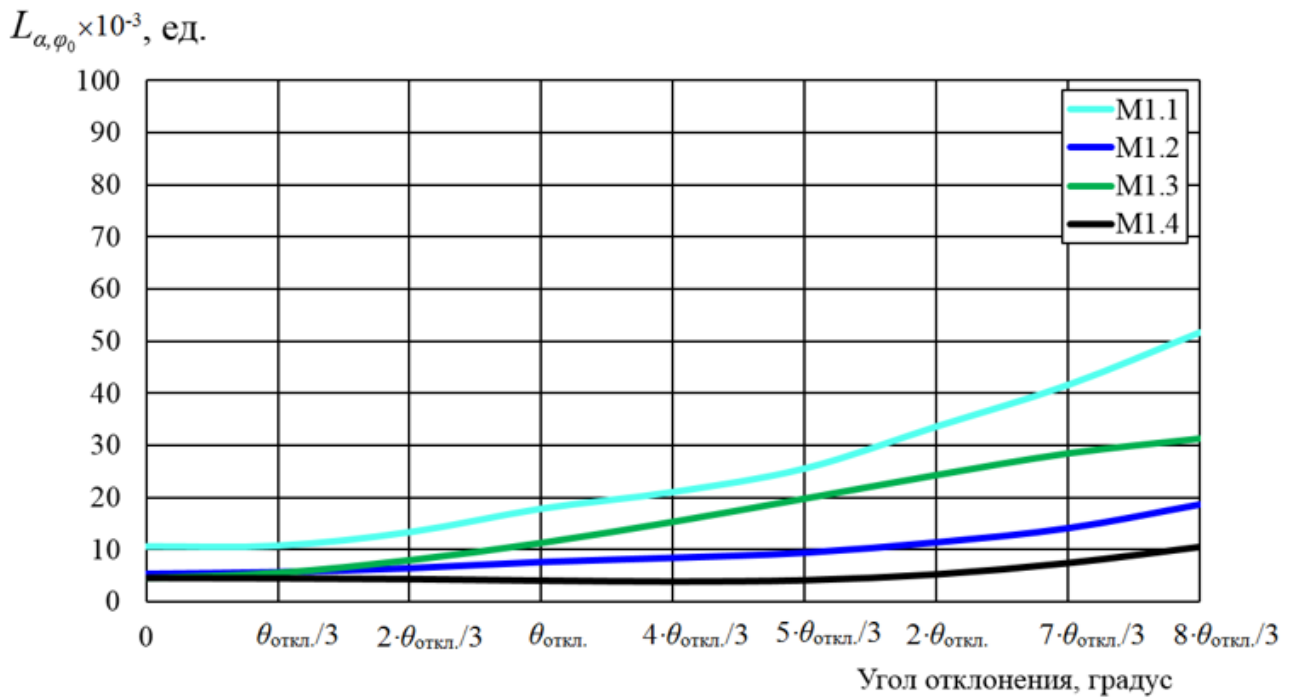
$$L_{\varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) - F_0(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}))^2}, \quad (6)$$

$$L_{\alpha, \varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N F_0(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})^2 (F(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) - F_0(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}))^2}{\sum_{i=1}^N F_0(\theta_i, \varphi_0, \theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})^2}}. \quad (7)$$

Графики зависимости функций потерь для сечений ДН в плоскости $\varphi = 0^\circ$, полученные для различных углов отклонения луча, для рассмотренных упрощенных и строго методов расчета показаны на рис. 4 Сравнения функций потерь показало, худшие результаты сходимости имеет метод М1.1, основанный только на системном множителе ФАР. Методы М1.2 и М1.3 имеют схожие результаты, при этом расходятся при отклонении луча из-за сравнительно малого количества элементов в ФАР.



а)



б)

Рис. 4. Функции потерь сечений ДН в горизонтальной плоскости при упрощенных методах расчета ДН ФАР при отклонении луча:

$$L_{\varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (a) и } L_{\alpha, \varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (б).}$$

При этом, как и ожидалось, наилучшие результаты сходимости имеет метод M1.4, основанный на перемножении системного множителя и ДН

излучателя в канале Флоке при отклонении луча. При этом, при отклонении луча ошибка практически не возрастает, что свидетельствует о хорошей достоверности результатов расчета данным методом.

3. Полноволновое моделирование ФАР с разбиением на группы

Часто возникает потребность расчета многоэлементных ФАР при разных углах отклонения луча с ограниченными ресурсами вычислительного оборудования. При полноволновом моделировании для каждого положения луча необходимо заново полностью производить расчет. Для ускорения пересчетов вместо полноволнового моделирования с одновременной запиткой всех излучателей в соответствии с требуемым амплитудно-фазовым распределением, выполняется расчет электромагнитных полей каждого излучателя (метод М3.1 на рис. 1), с последующим их сложением в составе антенной системы [19, 20]. Для рассматриваемой антенной решетки это потребовало 49 полноволновых расчетов полной модели ФАР, при этом ДН получились полностью идентичны полученным прямым строгим методом (метод М2 на рис. 1) при одновременной запитке для каждого положения луча. Существует метод группировки излучателей со схожим расположением в антенном полотне. Например, можно объединить излучатели, расположенные в центре и на краях антенного полотна. Тогда в расчете участвуют не все излучатели, а только один из группы (метод М3.2 на рис. 1). При этом количество моделируемых излучателей сокращается с 49 до 11, а пересчет модели с различными отклонениями луча занимает до нескольких минут.

На рис. 5 предложен один из вариантов разбиения исследуемой ФАР на группы. Объединены центральные, крайние и угловые излучатели. В квадратных скобках указан рассчитываемый излучатель для каждой группы.

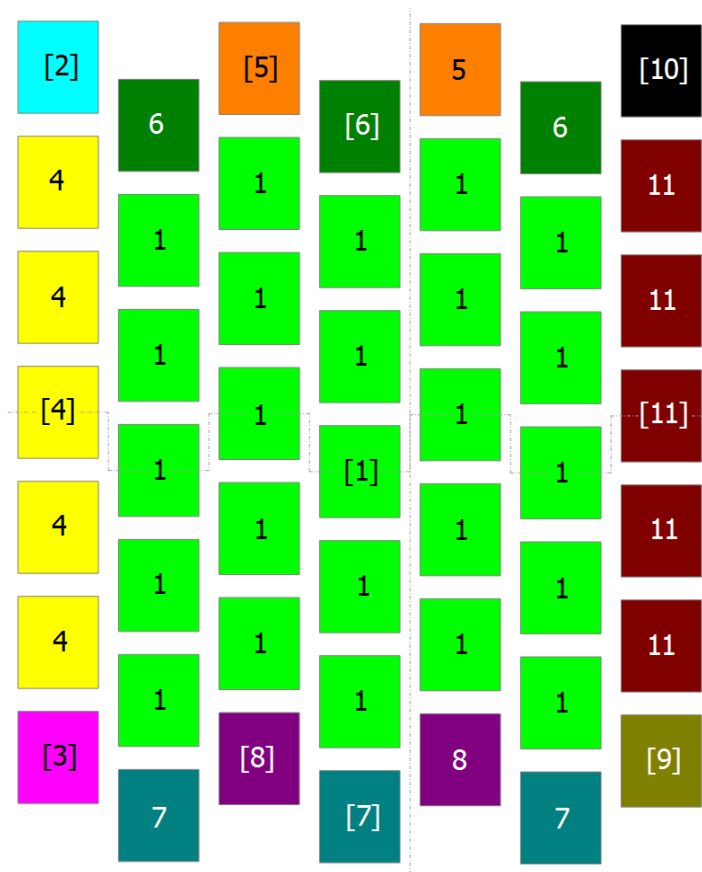
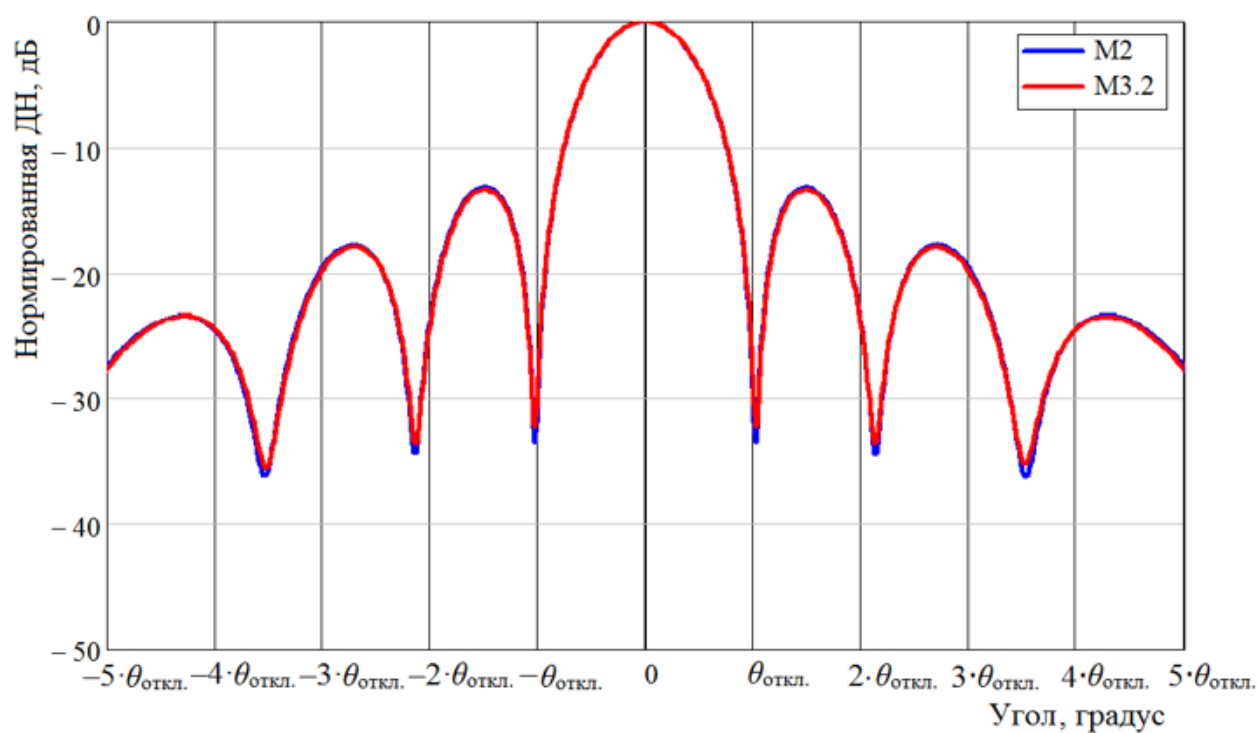


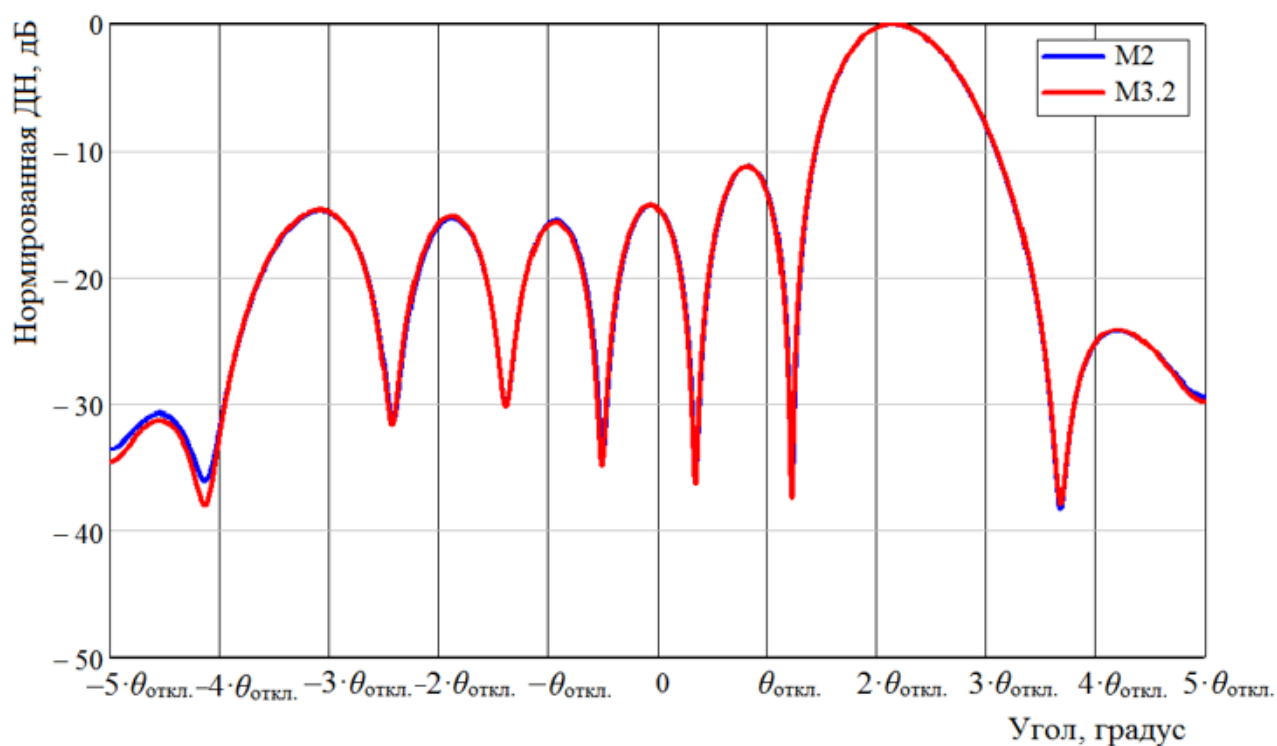
Рис. 5. Вариант группировки излучателей ФАР 7x7 элементов.

После расчета электромагнитных полей в составе ФАР излучателей каждой группы задается нужное фазовое распределение для углов отклонения $\theta_{\text{откл.}}$, $\varphi_{\text{откл.}}$ и выполняется пересчет ДН для заданного положения луча. На рис. 6 представлены сечения ДН исследуемой двумерной ФАР в горизонтальной плоскости при неотклоненном и отклоненном главном лепестке ДН, полученные методами М2 и М3.2.

Для проверки качества расчета воспользуемся функциями потерь, описанными выше. Графики зависимости функций потерь при расчете сечений ДН в плоскости $\varphi = 0^\circ$ для метода группировки М3.2 и имеющего наименьшие потери приближенного метода М1.4, показаны на рис. 7.



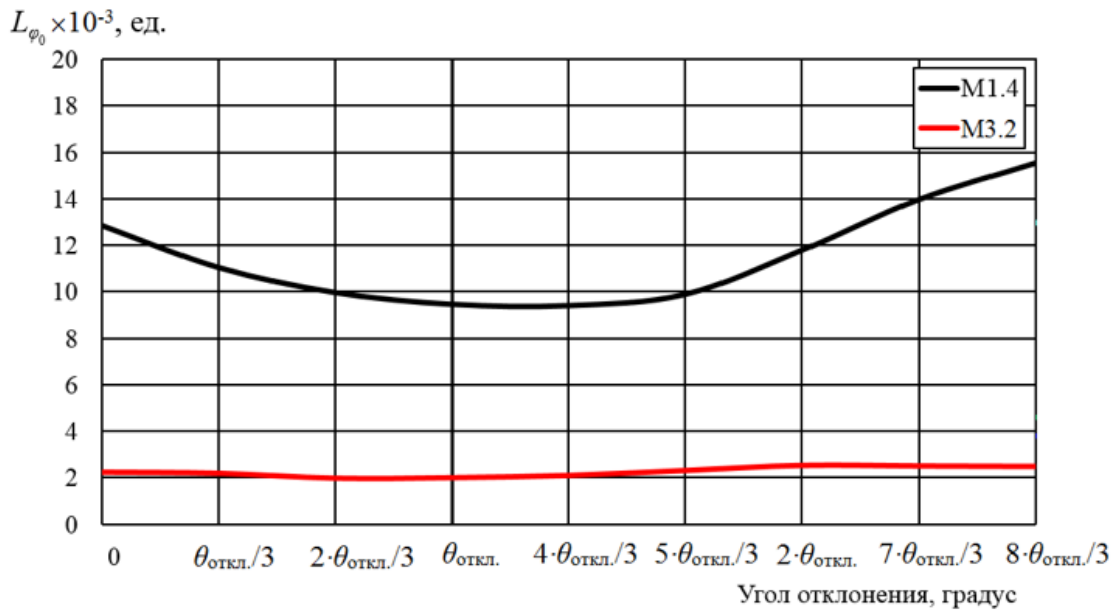
а)



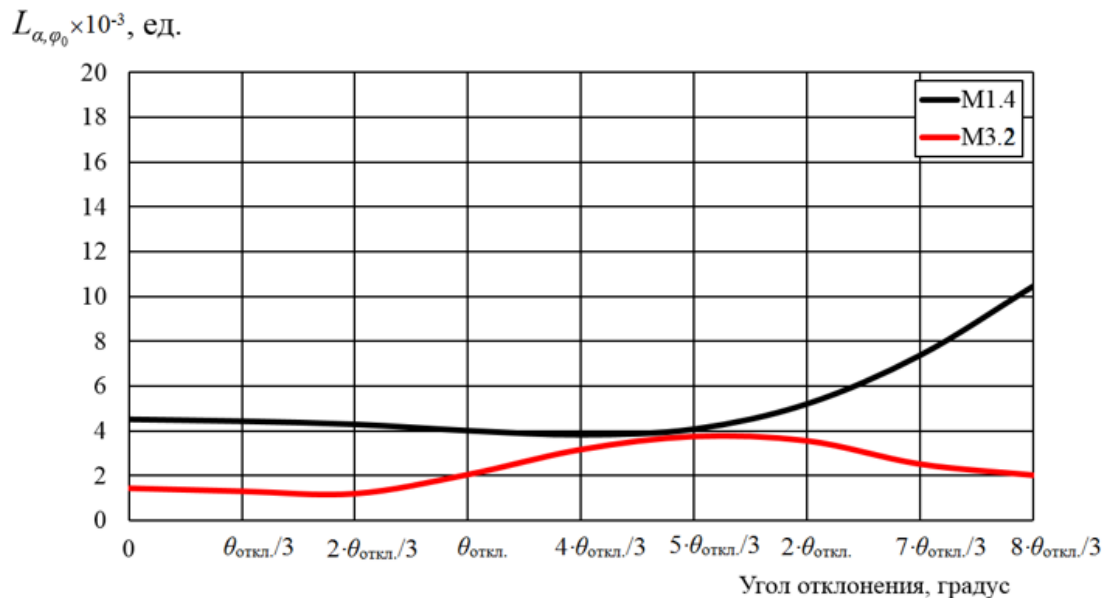
б)

Рис. 6. Сечения ДН исследуемой ФАР в горизонтальной плоскости, полученные методами М2 и М3.2:
при неотклоненном луче (а) и при отклонении луча (б).

Сравнение функций потерь, представленных на рис. 7, показывает, что метод М3.2 позволяет получить ДН ФАР с наименьшими ошибками, так как наиболее точно повторяет результаты строгого полноволнового моделирования. Расчет методом разбиения на группы М3.2 требует столько же оперативной памяти. Проведя всего 11 полноволновых электродинамических расчетов, удастся получить информацию для любого положения луча.



а)



б)

Рис. 7. Функции потерь при расчете сечений ДН в горизонтальной плоскости методами М1.4 и М3.2:

$$L_{\varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (a) и } L_{\alpha, \varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (б).}$$

Главным достоинством метода М3.2 является быстрое получение электрических характеристик ФАР, таких как ДН, КУ, КПД и т.д., для любых отклонений луча антенной решетки.

4. Расчет ДН ФАР на основе полноволнового моделирования малоэлементных групп

Анализ метода расчета ФАР на основе полноволнового электродинамического моделирования с разбиением на группы показал высокое качество соответствия электрических характеристик ФАР при сравнении с полным электродинамическим расчетом. Данный подход предлагается модифицировать, за счет полноволнового моделирования каждого излучателя выбранной группы не в составе в ФАР, а только с несколькими кольцами окружающих излучателей [23, 24]. Последующее вычисление ДН ФАР достигается путем «сшивания» полей сферических волн [30-32] (метод М4.2 на рис. 1) или ДН малоэлементных групп (метод М4.1 на рис. 1). Полученные модели малоэлементных групп излучателей обладают меньшей вычислительной сложностью, позволяют проводить расчеты на компьютерах меньшей производительности, что в ряде случаев влияет на возможность вычисления электрических характеристик ФАР.

При вычислении параметров ФАР 7×7 для каждого излучателя группы выбрано два кольца окружения. Полученные поля представлены в виде сферических волн, которые в последующем «сшиваются» в составе ФАР с заданным фазовым распределением. На рис. 8 представлены с первой по шестую группы излучателей при двух кольцах окружения. Количество излучателей в каждой малоэлементной группе указано в табл. 2. ДН ФАР, полученные методами М4.1 и М4.2, не отличаются, так как исследование характеристик происходит в дальней зоне.

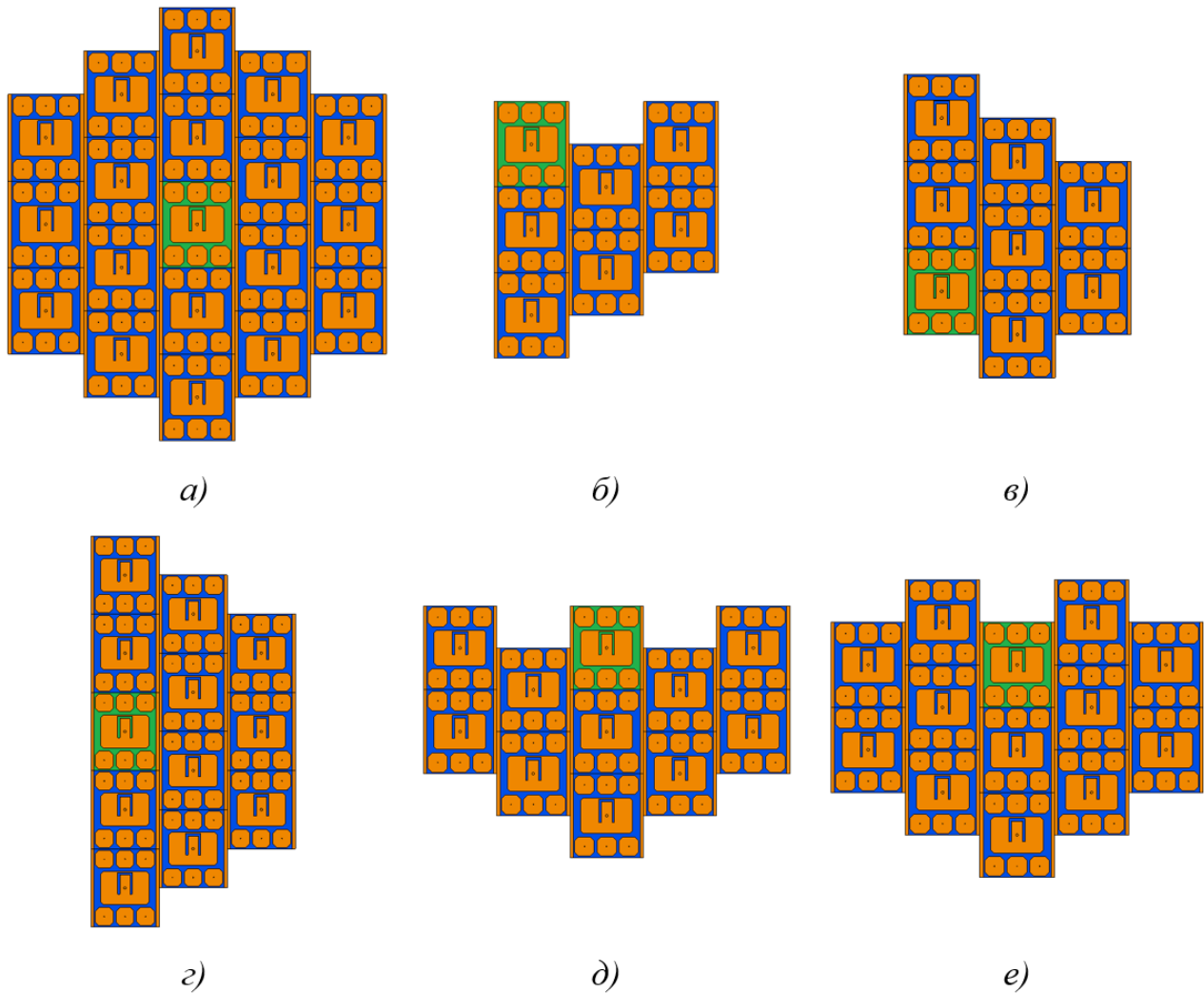
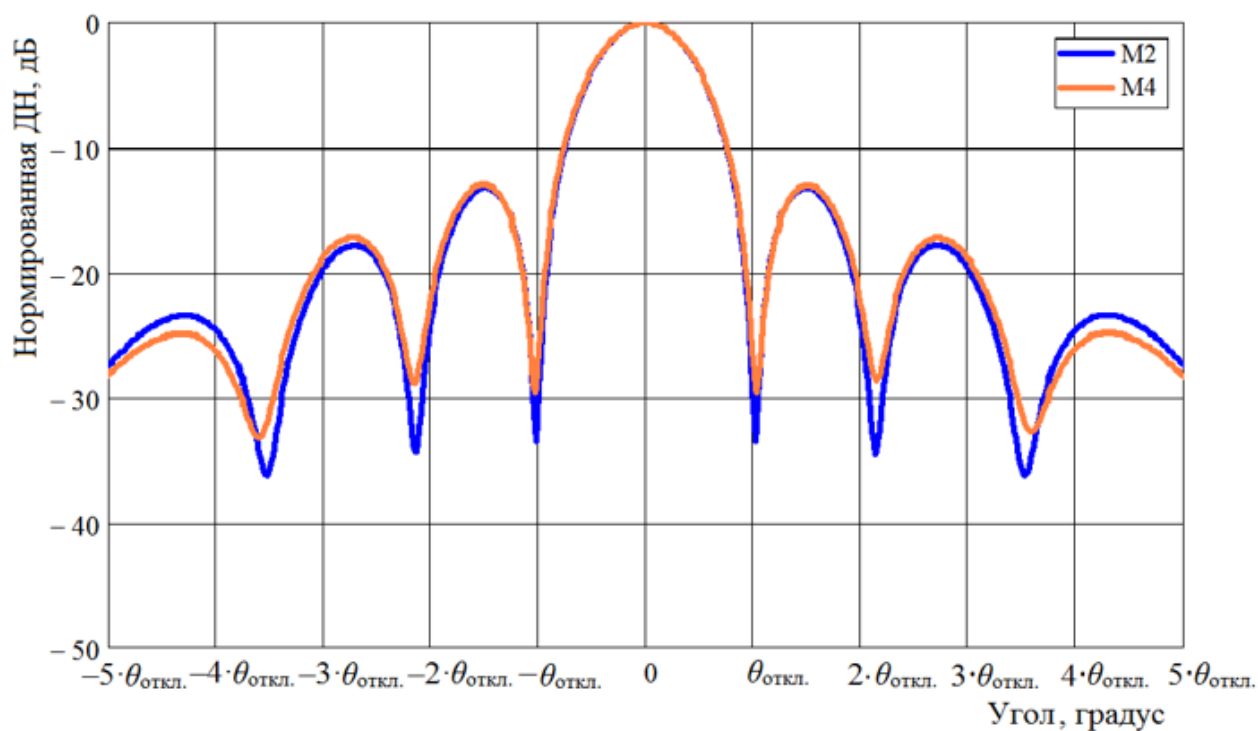


Рис. 8. Малоэлементные группы излучателей для расчета электромагнитных полей при запитке одного излучателя (подсвечен зеленым): группа 1 (а); группа 2 (б); группа 3 (в); группа 4 (г); группа 5 (д); группа 6 (е).

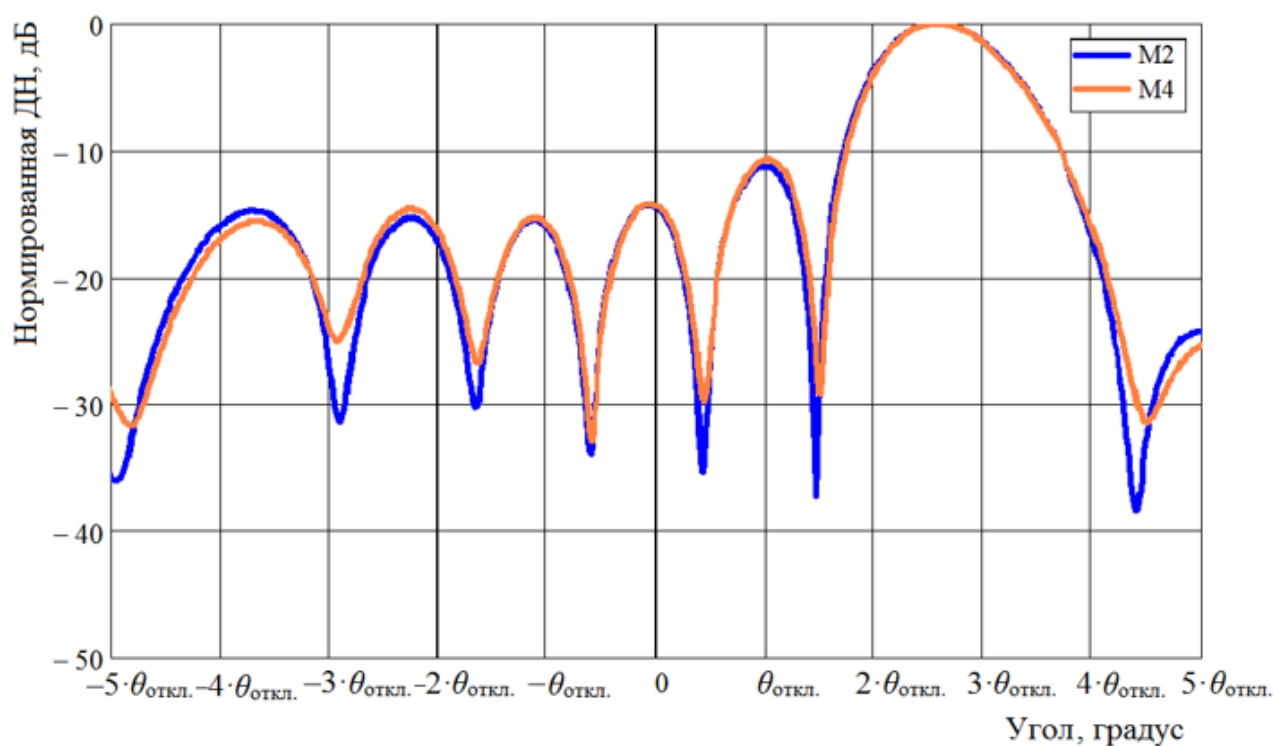
Таблица 2. Количество излучателей в малоэлементных группах.

Номер группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество излучателей	19	7	8	12	11	13	11	13	8	7	12

На рис. 9 представлены сечения ДН исследуемой двумерной ФАР в горизонтальной плоскости при неотклоненном и отклоненном главном лепестке ДН, полученные методами М2 и М4.



а)

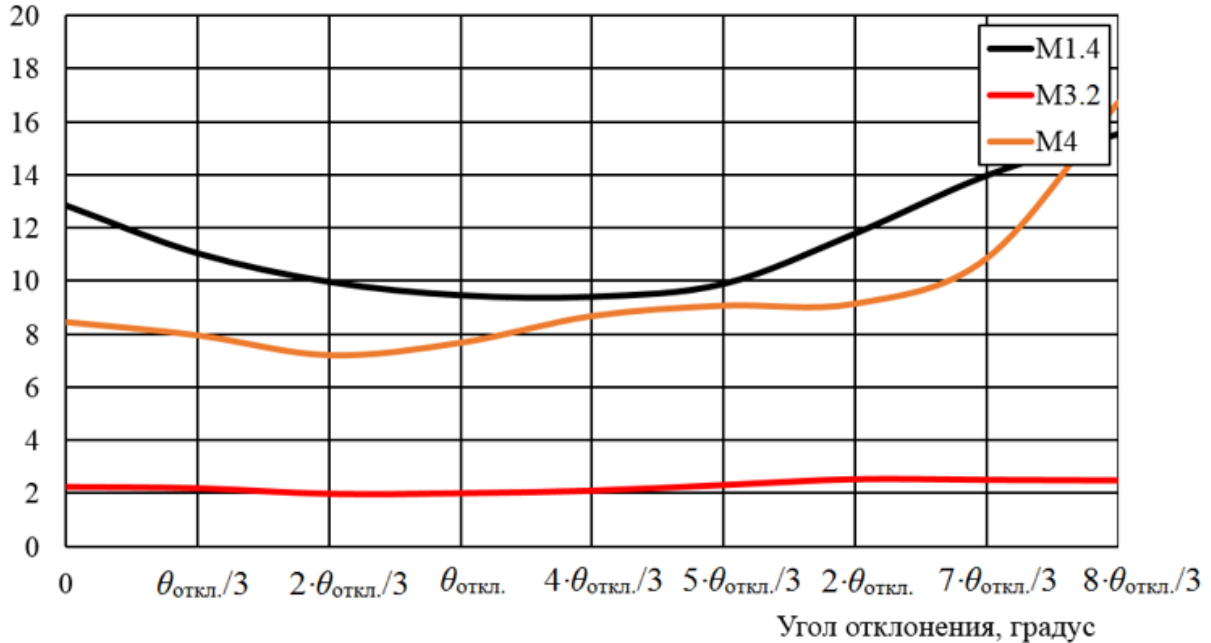


б)

Рис. 9. Сечения ДН исследуемой ФАР в горизонтальной плоскости, полученные методами M2 и M4:
при неотклоненном луче (а) и при отклонении луча (б).

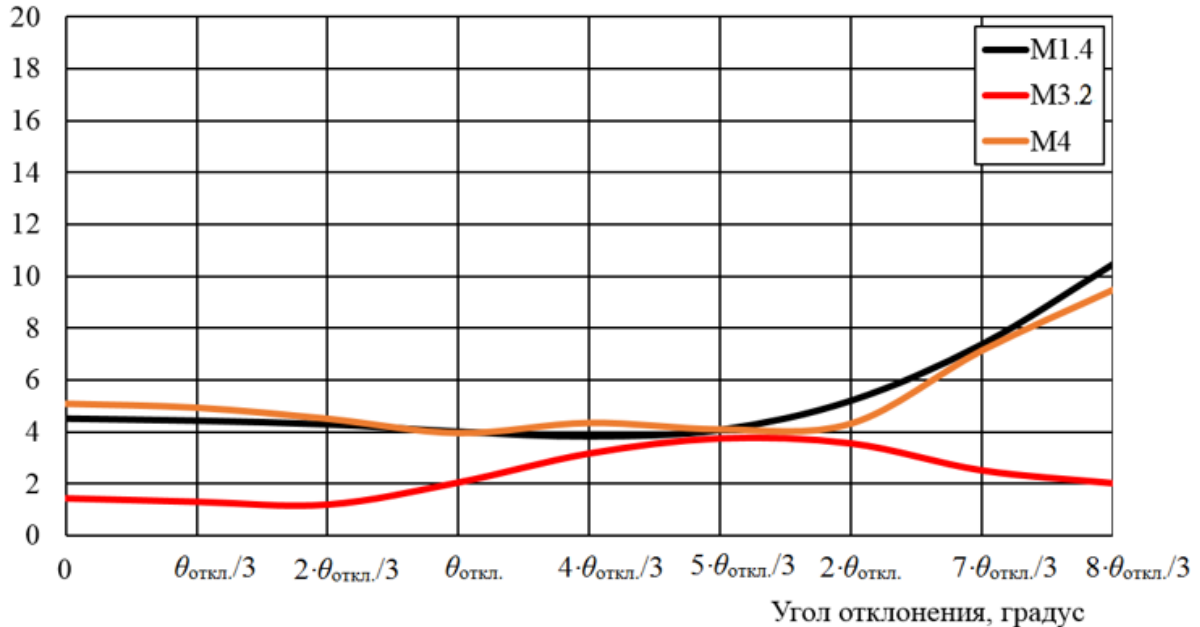
Графики зависимости функций потерь при расчете сечений ДН в плоскости $\varphi = 0^\circ$ для методов группировки М3.2, М4 и имеющего наименьшие потери приближенного метода М1.4, показаны на рис. 10.

$L_{\varphi_0} \times 10^{-3}$, ед.



а)

$L_{\alpha, \varphi_0} \times 10^{-3}$, ед.



б)

Рис. 10. Функции потерь при расчете сечений ДН в горизонтальной плоскости методами М1.4, М3.2 и М4 при отклонении луча:

$$L_{\varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (а) и } L_{\alpha, \varphi_0}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}}) \text{ (б).}$$

Сравнение функций потерь, представленных на рис. 10, показывает, что метод М4 расчета ФАР 7x7 при разбиении на малоэлементные группы с двойным кольцом окружения незначительно лучше приближенного метода М1.4. Такой результат можно объяснить малым количеством колец окружения излучателя в малоэлементной группе. Расчет методом М4 по сравнению с методом М3.2 требует значительно меньше оперативной памяти (20 ГБ, по сравнению с 58 ГБ для полной модели ФАР) и времени расчета (11x2760 с, по сравнению с 11x7787 с для полной модели ФАР). При этом для метода М4 сохраняется главное преимущество метода М3.2: быстрый пересчет электрических характеристик ФАР для любых положений луча.

Заключение

В работе проведены исследования наиболее популярных методов расчета пространственных электрических характеристик антенных решеток. Предложенные функции потерь $L(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ и $L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ позволили сравнить ДН ФАР 7x7, получаемых рассматриваемыми методами. Функция потерь $L_{\alpha}(\theta_{\text{откл.}}, \varphi_{\text{откл.}})$ позволяет акцентировать внимание на качество главного лепестка ДН. Проведенный анализ двумерной ФАР 7x7 показал, что наилучшее качество, помимо прямого строгого метода, показал приближенный метод, основанный на перемножении системного множителя с ДН излучателя в канале Флоке для каждого направления луча. ДН рассмотренных упрощенных методов в неотклоненном положении луча практически не отличаются. При сканировании ошибка расчета ДН растет, в особенности уровень дальних боковых лепестков.

В связи с небольшим количеством излучателей рассматриваемой ФАР, ни один из приближенных методов по качеству не выдал ДН, лучше любого из модификаций строгих методов. Метод разбиения на группы показал очень качественный результат. Метод разбиения на малоэлементные группы позволил в три раза снизить требования к объему оперативной памяти. Тем самым

продемонстрировав возможность проводить качественные расчеты многоэлементных ФАР небольшими вычислительными мощностями.

Особенности рассматриваемых методов расчета ДН ФАР их преимущества и недостатки сведены в табл. 3. Время расчета каждым методом, указанное в табл. 3, зависит от многих параметров расчетной модели и, несмотря на оценочный характер, соответствует большинству расчетов, проводимых авторами.

Таблица 3. Сравнение методов расчета ФАР.

Параметр	Метод						
	М1.1	М1.2	М1.3	М1.4	М2	М3.2	М4
Сложность построения модели	•	•	••	•••	••••	•••••	•••••
Требуемые вычислительные ресурсы	•	•	••	••	••••	•••••	•••
Качество расчетной ДН	•	•	••	•••	••••	•••••	•••
Время расчета одного положения луча	0	0	t	t	$t^*N^* \ln(N)$	$N_{\text{групп}}^* N^* \ln(N)$	$N_{\text{групп}}^* N_{\text{м.э.}}^* \ln(N_{\text{м.э.}})$
Время расчета k шт. положений луча	0	0	t	$k*t$	$k*t^*N^* \ln(N)$	$N_{\text{групп}}^* N^* \ln(N)$	$N_{\text{групп}}^* N_{\text{м.э.}}^* \ln(N_{\text{м.э.}})$
Учет взаимного влияния излучателей	-	-	$\pm$	+	+	+	+
Учет эффекта «ослепления» ФАР	-	-	-	+	+	+	+
Учет краевых эффектов	-	-	-	-	+	+	+
где t – время расчета излучателя в канале Флоке, с; N – отношение количества ячеек полной модели к количеству ячеек модели излучателя в канале Флоке, отн. ед.; $N_{\text{м.э.}}$ – отношение среднего количества ячеек в моделях малоэлементных групп к количеству ячеек модели излучателя в канале Флоке, отн. ед.; $N_{\text{групп}}$ – количество групп, ед.; k – количество положений луча, ед.							

Литература

1. Гринев А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики // Радиотехника. – 2012.
2. Курушин А.А., Банков С.Е., Грибанов А.Н. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М.: Солон-пресс. – 2017.
3. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Комплексное моделирование в программе CST SUITE. – М.: Солон-Пресс. – 2021.
4. Курушин А.А., Банков С.Е. Моделирование антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS. – М.: Солон-Пресс. – 2019.
5. Воскресенский Д.И. Проектирование фазированных антенных решеток. – М.: Радиотехника. – 2003. – Т. 3.
6. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа. – 1988.
7. Бахрах Л.Д., Воскресенский Д.И. Проблемы антенной техники. – М.: Радио и связь. – 1989.
8. Balanis C.A. Advanced Engineering Electromagnetics 3rd Edition. Wiley. – 2023.
9. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток – М.: Мир. – 1974. – 457 с.
10. Сазонов Д.М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. – М.: Радиотехника. – 2015.
11. Haupt R.L. Antenna arrays: a computational approach. John Wiley & Sons. – 2010.
12. Крехтунов В.М., Будкин А.А., Комиссарова Е.В. Расчет диаграмм направленности волноводно-диэлектрических излучателей с учетом взаимного влияния в антенной решетке // Радиолокация, навигация, связь. – 2014. – С. 680-686.

13. Эминов С.И., Сочилин А.В. Численно-аналитический метод расчета фазированных антенных решеток // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2022. – №. 3 (128). – С. 111-113. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).111-113](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).111-113)
14. Craeye C.A. fast impedance and pattern computation scheme for finite antenna arrays // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2006. – Т. 54. – №. 10. – С. 3030-3034. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.882202>
15. Propastin A., Prokhorenko V. Determining the DOA of jamming signals using root-music and MVDR algorithms for planar elliptical digital antenna array // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2023. – Т. 5. – С. 1-6. <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086894>
16. Propastin A.A. Synthesis of the Radiation Pattern of a Conformal Antenna Array Under Conditions of Strong Mutual Coupling of Radiators // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2024. – С. 298-302. <https://doi.org/10.1109/rmc62880.2024.10846902>
17. Ponomarev L.I., Vasin A.A., Krekhtunov V.M.; Terekhin O.V., Komissarova E.V. Onboard phased array antenna of the millimeter wave range // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2023. – Т. 68. – №. 8. – С. 857-866. <https://doi.org/10.1134/S1064226923080107>
18. Садыков А.Р. Излучающий элемент для малоэлементных антенных решеток / А.Р. Садыков, Ю.Е. Седельников, А.В. Петров [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №9 (147).
19. Rutschlin M., Wittig T., Iluz Z. Phased antenna array design with CST STUDIO SUITE // 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2016. – С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481530>
20. Lesur B. et al. A large antenna array for Ka-band satcom-on-the-move applications – Accurate modeling and experimental characterization // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Т. 66. – №. 9. – С. 4586-4595. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851296>

21. Виленский А.Р. и др. Широкополосный печатный элемент антенной решетки с воздушной полостью в экране // Антенны. – 2017. – №. 9. – С. 241.
22. Люлюкин К.В., Литун В.И., Рогозин А.А. Широкополосный печатный излучатель фазированной антенной решетки с полостью в металлическом основании // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). – 2015. – С. 457-458.
23. Люлюкин К.В. и др. Низкопрофильный излучатель широкополосной антенной решетки с пониженными межэлементными связями // Антенны и распространение радиоволн. – 2018. – С. 22-25.
24. Vilenskiy A.R., Litun V.I., Lyulyukin K.V. Wideband beam steering antenna array of printed cavity-backed elements with integrated EBG structure // IEEE antennas and wireless propagation letters. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 245-249.
<https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2888487>
25. Туральчук П.А., Вендик О.Г., Вендик И.Б. Расширение главного луча решетки Дольфа-Чебышева с использованием разложения по функциям Котельникова // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 213-216.
26. Valle P. et al. The design, modeling and development of WRAS antenna for GALILEOSAT // Proc 26th ESA Antenna Technology Workshop, Noordwijk. – 2003. – URL: http://www.idscompany.it/upload7/File/design_modelling.pdf
27. Русов Ю.С., Пропастин А.А. Применение нечетных функций Матье для синтеза секторной диаграммы направленности многоэлементного излучателя // Радиостроение. – 2021. – №. 3. – С. 1-12.
28. Mitrokhin V.N., Propastin A.A. Synthesis of the radiating system forming the flat-topped radiation pattern with the most flat top // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2017. – С. 319-322.
29. Маничев А.О., Кондратьев А.С., Балагуровский В.А. Методы фазового формирования расширенных глубоких нулей в диаграмме направленности ФАР со случайными искажениями амплитудно-фазового распределения // Антенны. – 2009. – №. 9. – С. 12-28.

30. Митрохин В.Н., Можаров Э.О. Способы формирования и методы оценки сфокусированного поля в микроволновой технике // Антенны. – 2015. – №. 3. – С. 39-46.
31. Голубева Н.С., Митрохин В.Н. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот. – МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2008. 488 с.
32. Serhir M., Besnier P., Drissi M. Antenna modeling based on a multiple spherical wave expansion method: Application to an antenna array // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2009. – Т. 58. – №. 1. – С. 51-58.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2036284>

Для цитирования:

Можаров Э.О., Афанасьев И.Я., Лоскутов В.Ю., Литвинов Е.С. Сравнительная оценка методов расчета электрических характеристик антенных решеток // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.10>