

О МОДЕЛИРОВАНИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

В.В. Торопов, студент

*Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. СВЧуКР, tvv@tusur-ya.ru*

Дана оценка точности и вычислительной эффективности метода расчета дальнего поля антенных решеток (АР) с использованием пространственной декомпозиции. Оценка производилась на примере моделирования дальнего поля квадратных АР, состоящих из 16, 64, 100 и 400 печатных антенных элементов (АЭ). Показано, что при использовании декомпозиции для расчета АР из 400 АЭ требуется почти в 3 раза меньше памяти, чем при полном моделировании АР. Кроме того, время моделирования сокращается почти в 2,5 раза. Вместе с тем точность моделирования возрастает с ростом числа АЭ.

Ключевые слова: антенная решетка, антенный элемент, пространственная декомпозиция, краевые эффекты, эффекты взаимной связи.

Антенные решетки (АР) играют ключевую роль в современных системах связи, радиолокации и радионавигации [1–3]. Разработка АР сопровождается предварительным моделированием в САПР, что позволяет оптимизировать их конструкцию, параметры и характеристики [4]. Основная сложность расчета характеристик излучения АР связана с учетом электромагнитного взаимодействия между их антенными элементами (АЭ) [5]. Взаимодействие между АЭ может быть полностью учтено при решении граничной электродинамической задачи для всей АР с использованием интегральных или конечно-разностных уравнений. Такой подход позволяет рассчитать характеристики АР с высокой точностью и с учетом различных неоднородностей в моделируемой структуре. Однако полное электродинамическое моделирование больших АР требует значительных вычислительных затрат. В связи с этим применяют методы расчета, которые позволяют сократить затраты и тем самым ускорить процесс моделирования. Одним из таких методов является метод расчета ДН АР с использованием пространственной декомпозиции [6]. Цель работы – выполнить сравнение этого метода с полным моделированием АР, оценить его точность и вычислительную эффективность при моделировании АР различных размеров.

Принцип работы метода. Пространственная декомпозиция позволяет с приемлемой точностью учитывать краевые эффекты и взаим-

ную связь между АЭ при расчете ДН АР. Для этого АЭ делятся на группы в зависимости от их расположения в АР. Рассмотрим планарную квадратную АР из рис. 1. В ней определено девять групп: угловые (2–5), краевые (6–9) и центральная (1).

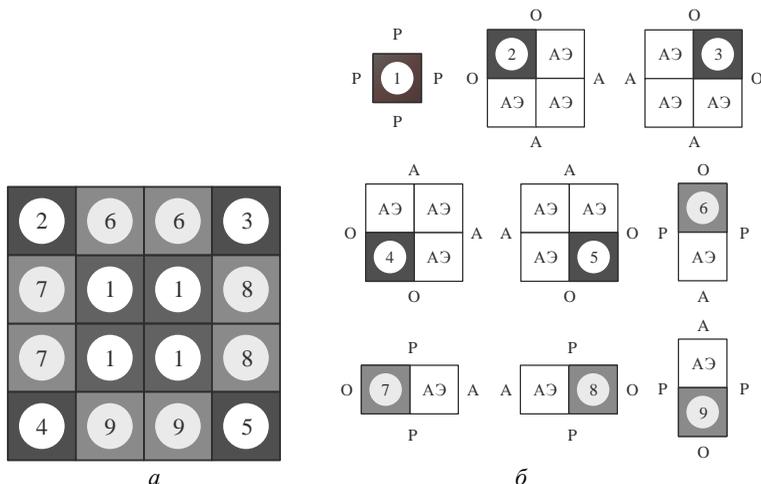


Рис. 1. Классификация АЭ по группам (а), граничные условия для каждой группы (б): Р – периодические граничные условия, О – открытые границы, А – поглощающие граничные условия

Результирующая ДН всей АР определяется как

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{I}_n \dot{f}_n(\theta, \varphi) e^{j\Phi_{xn} + \Phi_{yn}},$$

где Φ_{xn} и Φ_{yn} – пространственные фазовые сдвиги для направления наблюдения (θ, φ) вдоль осей x и y , определяемые как

$$\Phi_{xn} = \frac{2\pi}{\lambda} X_n \sin(\theta) \cos(\varphi), \quad \Phi_{yn} = \frac{2\pi}{\lambda} Y_n \sin(\theta) \sin(\varphi),$$

где $\dot{f}_n(\theta, \varphi)$ – суммарная ДН каждой группы АЭ, λ – длина волны излучения АР, \dot{I}_n – комплексная амплитуда возбуждения n -го излучателя, а X_n и Y_n – его координаты в решетке.

Оценка эффективности метода. Для оценки точности и вычислительной эффективности исследуемого метода проведено моделирование квадратных АР из 16, 64, 100 и 400 АЭ. Сравнивались результаты, полученные с применением пространственной декомпозиции и при моделировании полной АР (рис. 2). Каждый АЭ представлял собой печатную антенну радиусом 23,2 мм, выполненную на диэлектри-

ческой подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 2,33 и толщиной 2,8 мм. Под подложкой располагалась металлическая пластина заземления толщиной 3,5 мм. Расчет проводился на частоте 2,4 ГГц при изменении угла θ от -180 до $+180^\circ$. Расстояния между АЭ по осям x и y составляли 60 мм.

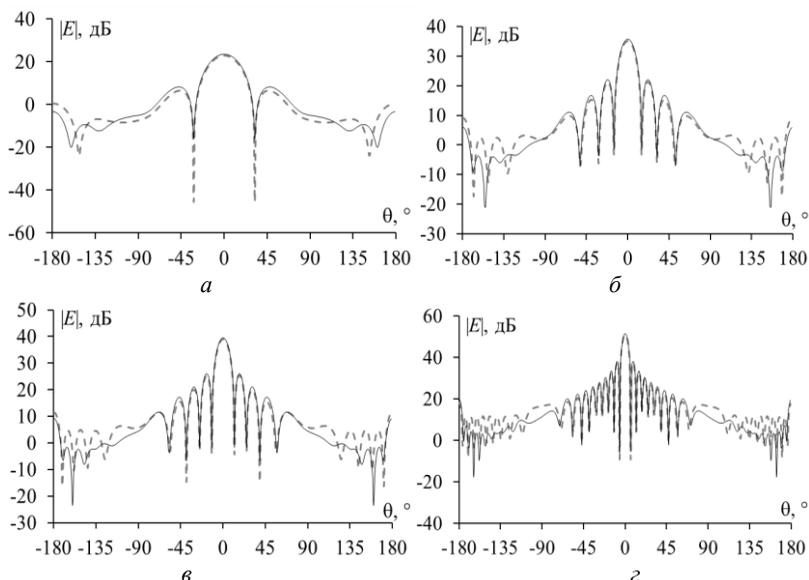


Рис. 2. Угловые зависимости модуля напряженности электрического поля $|E|$ в плоскости $\varphi = 0^\circ$ для АР с 16 (а), 64 (б), 100 (в) и 400 (г) АЭ: моделирование полной АР (—), декомпозиция (---)

Из рис. 2 видно, что при θ от -90 до $+90^\circ$ ДН, полученные с применением пространственной декомпозиции, согласуются с ДН, полученными полным моделированием АР. В таблице приведены минимальные и максимальные значения отклонений результатов моделирования исследуемым методом от полного моделирования АР и результаты оценки вычислительных затрат при моделировании полной АР. Результаты, представленные в таблице, подтверждают вычислительную эффективность метода [6], что особенно заметно, начиная от 100 АЭ. Для АР с 400 АЭ использование декомпозиции позволяет сократить затраты памяти на 66%, а время, необходимое для расчета ДН, – 60%. Однако отклонения в результатах могут достигать 14 дБ. При этом значение максимального отклонения тем ниже, чем больше АЭ в АР.

Оценка эффективности исследуемого метода

Число АЭ	Отклонения, дБ	Память, ГБайт	Время, ч
16	0,11–29,52	0,789	0,259
64	0,04–19,52	2,56	0,945
100	0,01–19,09	3,671	1,416
400	0,06–14,13	13,819	4,224
Затраты на декомпозицию		4,697	1,692

Заключение. Выполнены оценки точности и вычислительной эффективности метода расчета дальнего поля АР, основанного на применении пространственной декомпозиции. Сравнивались результаты, полученные этим методом и при моделировании полной АР. Показано, что с увеличением числа АЭ точность моделирования возрастает. Отклонения в результатах могут достигать 14 дБ, при этом для диапазона углов θ от -90° до $+90^\circ$ полученные ДН хорошо согласуются. Вычислительная эффективность исследуемого метода подтверждается тем, что при использовании пространственной декомпозиции для АР из 400 АЭ требуется почти в 3 раза меньше памяти, чем при полном моделировании АР. Кроме того, время моделирования сокращается почти в 2,5 раза. Однако метод целесообразно использовать только для АР с числом АЭ не менее 100.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fenn A.J. Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications. – Boston: USA, 2008. – 424 p.
2. Chang Y. A K-band series-fed microstrip array antenna with low sidelobe for anticollision radar application / Y. Chang, Y. Jiao, L. Zhang, G. Chen, X. Qiu // 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). – 2017. – P. 1–3.
3. Fan F. A Wideband Compact Printed Dipole Antenna Array With SICL Feeding Network for 5G Application / F. Fan, Q. Chen, Y. Xu, X. Zhao, J. Feng, Z. Yan // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2023. – Vol. 22, No 2. – P. 283–287.
4. Cheng D.K. Optimization techniques for antenna arrays // Proceedings of the IEEE. – 1971. – Vol. 59, No 12. – P. 1664–1674.
5. Stutzman W.L. Antenna Theory and Design / W.L. Stutzman, G.A. Thiele. – 2nd ed. – New York: USA, 1997. – 598 p.
6. Zhou H. A Novel Unit Classification Method for Fast and Accurate Calculation of Radiation Patterns / H. Zhou, J. Li, K. Wei // Electronics. – 2023. – Vol. 12. – P. 3512.