

11

## Моделирование антенных решеток Дольф–Чебышева

© Н.Н. Кисель

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия  
Email: nnkisel@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 19 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 8 декабря 2024 г.

Принято к публикации 8 декабря 2024 г.

Представлена конструкция линейной антенной решетки Дольф–Чебышева для диапазона частот от 24 до 26.5 GHz. Геометрические параметры антенны оптимизированы с использованием Altair FEKO и по сравнению с однородной линейной антенной решеткой обеспечивают более высокий коэффициент усиления и низкий уровень боковых лепестков. Широкополосное согласование входного сопротивления антенной решетки с фидером выполнено с помощью плавной неоднородной микрополосковой линии, ширина которой меняется по экспоненциальному закону.

**Ключевые слова:** антенная решетка Дольф–Чебышева, диаграмма направленности, коэффициент отражения.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60078.20191

В настоящее время активно развиваются системы связи 5G, которые позволяют реализовать по сравнению со стандартом 4G высокую скорость передачи данных до 20 Gbit/s, допускают скорость перемещения абонента до 500 km/h, что в 10 раз выше по сравнению с 4G, при этом задержка отклика составляет менее 0.5 ms, а количество активных абонентов — 100 000. Таким образом, показатели систем связи улучшаются на порядок. Область применения нового стандарта: беспилотные системы управления автомобилями, беспилотные летательные аппараты, медицинские приложения (мониторинг параметров, дистанционная хирургия с применением роботизированных платформ). В России для систем связи 5G используются частотные диапазоны „5G sub-6 GHz“ до 6 GHz (макросоты) и „5G mmWave“ с частотами от 24 GHz и выше, например 24.5–27.5 GHz (микросоты, фемтосоты и пикосоты). Увеличение рабочей частоты систем связи приводит к уменьшению габаритов антенн, что расширяет возможность использования антенных решеток, построенных на основе MIMO-технологии, и адаптивных антенных решеток, имеющих динамическую диаграмму направленности, изменяющуюся в зависимости от сигнально-помеховой ситуации и условий распространения.

Поскольку предполагается массовое внедрение стандарта 5G в диапазоне 24.5–27.5 GHz, предусматривающее развертывание систем связи на основе микросот, фемтосот и пикосот (по оценкам, имеющимся в литературе, к 2025 г. планируется создание около 4.5 млн сот [1]), достаточно жесткие требования предъявляются к используемым для приема-передачи сигнала антеннам [2–6]. При увеличении рабочих частот, используемых для 5G, существенно увеличиваются потери распространения сигналов, что может ухудшать качество передачи сигнала за счет явлений многолучевого распространения. Однако, с другой стороны, данное

ограничение можно рассматривать и как преимущество, поскольку требования электромагнитной совместимости, связанные с одновременной работой различных систем, несколько ослабляются. А увеличение размера соты можно обеспечить за счет увеличения мощности передатчика или коэффициента усиления антенны.

В работе рассмотрена конструкция антенной решетки, распределение тока в которой основано на свойствах многочленов Чебышева. Указанная конструкция была предложена в [2] и обеспечивает оптимальное соотношение между шириной луча и уровнем боковых лепестков диаграммы направленности. Электрофизические параметры подложки и ее толщина выбираются с учетом требуемой рабочей полосы антенны и возникающих поверхностных токов. Известно, что рабочая полоса увеличивается с увеличением толщины и уменьшением диэлектрической проницаемости; с другой стороны, рост толщины приводит к росту вклада возникающих поверхностных волн.

Решетка Чебышева представляет собой антенную систему, в которой размеры элементов решетки связаны с многочленами Чебышева, что обеспечивает большую широкополосность, лучшие характеристики направленности по сравнению с решеткой одинаковых элементов, низкий уровень бокового излучения. Данная антенна предназначена для работы в диапазоне частот 24.0–26.5 GHz. Антенная решетка имеет в своем составе восемь элементов, является симметричной, используется последовательная схема питания и для построения геометрических размеров элементов используются полиномы Чебышева четвертого порядка

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1,$$

где  $T_m(x)$  — многочлен Чебышева,  $x = \cos(mu)$ ,  $-1 \leq x \leq 1$ .

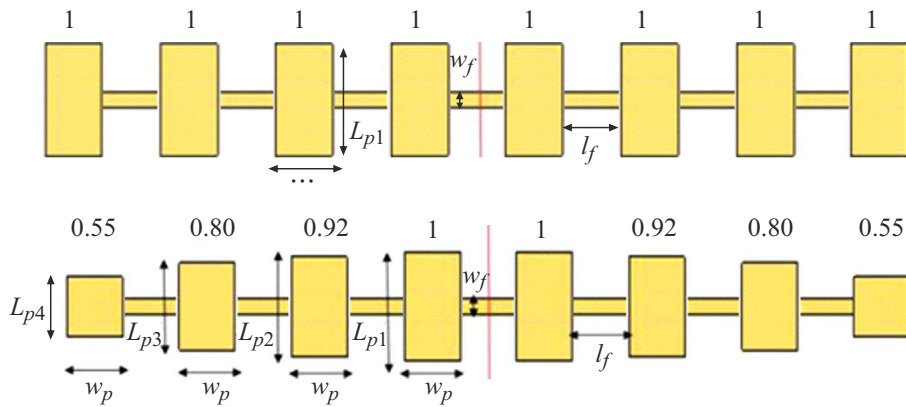


Рис. 1. Однородная и модифицированная линейная антенная решетка.

Характеристики ОЛАР и МЛАР

Характеристика	Тип исследуемой антенны			
	ОЛАР		МЛАР	
Относительная рабочая полоса частот с КСВ < 2.0	КСВ превышает 2		11 %	
Граничные частоты для определения параметров, GHz	24	26	24	26
Максимальный реализованный коэффициент усиления на частоте, dBi	12.154	8.160	13.22	13.165
Уровень бокового излучения на частоте, dBi	-10.6	-9.25	-11.25	-8.96
Эффективность антенны на частоте	92.0	88.7	91.6	91.8
Ширина главного лепестка на уровне -3 dB, deg	11.77	12.42	13.33	10.2

Для четного количества излучателей токи могут быть записаны через уровень боковых лепестков и ширину главного лепестка диаграммы направленности

$$I_m = \sum_{k=m}^N (-1)^{N-k} \frac{B^{2k-1} (2N-1)(k+N-2)!}{(k-m)!(k+m-1)!(N-k)!}$$

$B = \text{ch}(\text{arch}(q^{-1})/p)$ ,  $p$  — степень полинома Чебышева,  $q$  — уровень боковых лепестков,  $m$  — номер излучателя. Проводимость излучателей связана с шириной излучателя и токами.

Однородная линейная антенная решетка (ОЛАР) и модифицированная антенна (МЛАР) приведены на рис. 1.

Антенны выполнены на основе материала Roger RT5880 с относительной диэлектрической проницаемостью 2.2 и тангенсом потерь  $\text{tg } \delta = 0.0009$ , толщина подложки  $h = 0.8 \text{ mm}$ .

В работе проведена оптимизация геометрических размеров излучателей, ширины линии питания, исследовано

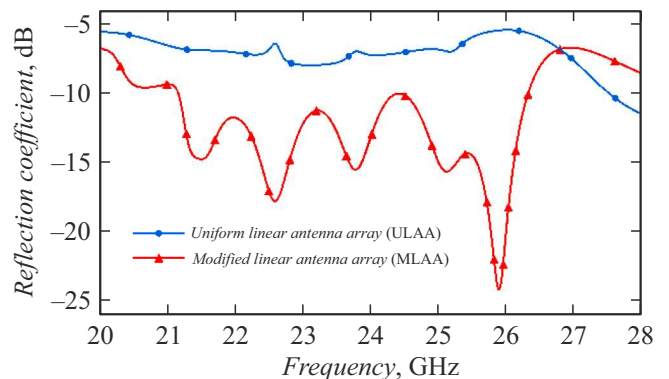


Рис. 2. Частотная характеристика коэффициента отражения ОЛАР и МЛАР.

влияние формы неоднородной линии питания на согласование антенны в диапазоне частот. Моделирование вы-

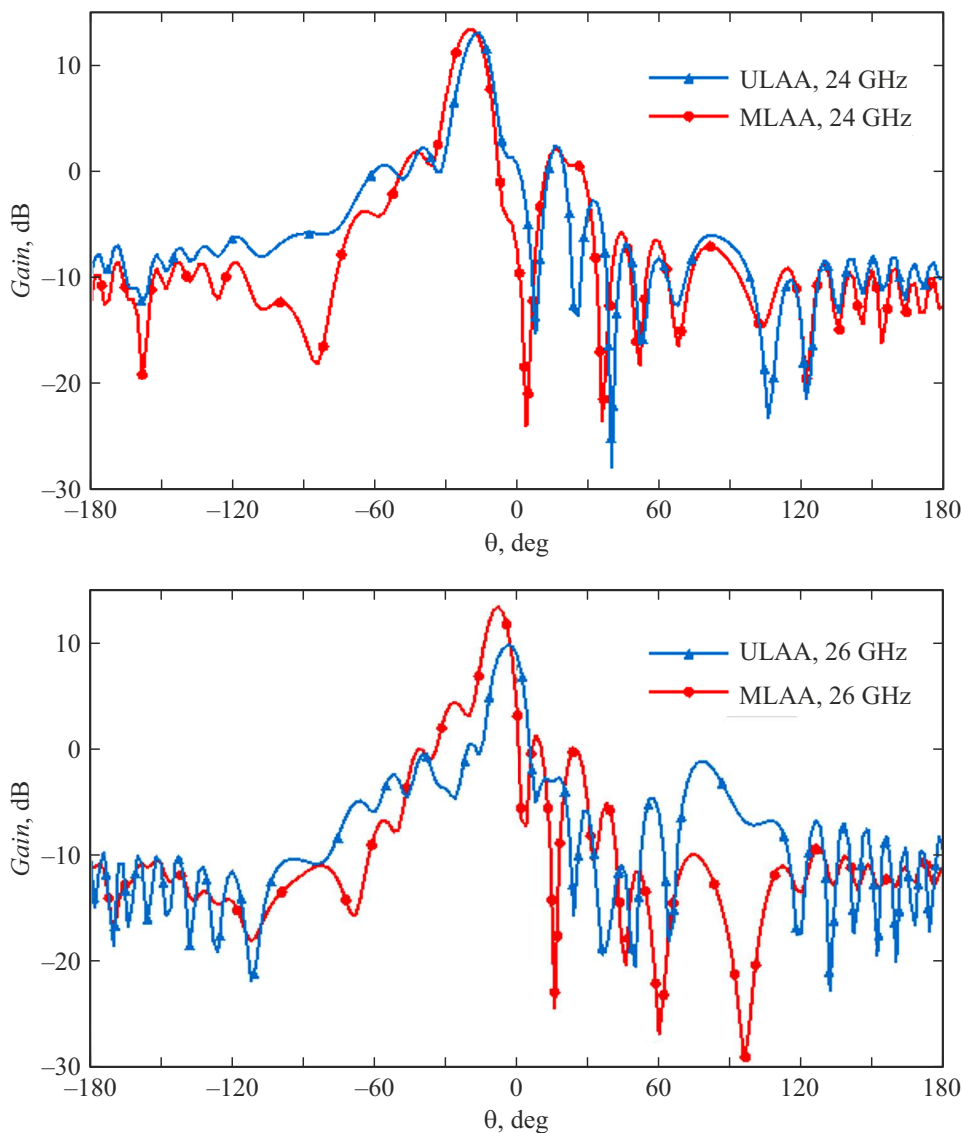


Рис. 3. Диаграммы направленности ОЛАР и МЛАР для фиксированных частот.

полнялось с использованием специализированной программы Altair FEKO на основе строгого полноволнового метода моментов.

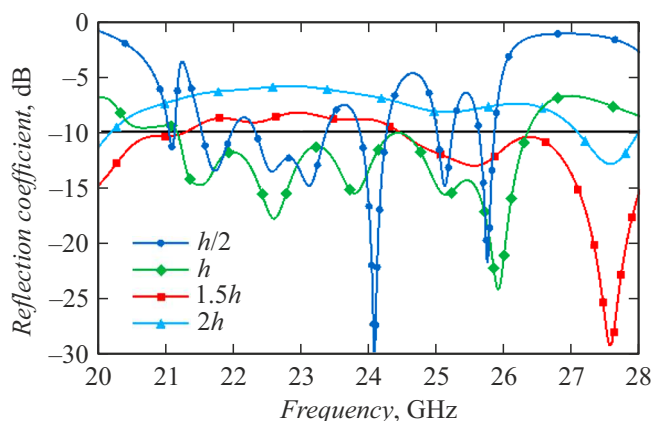
На рис. 2 приведены частотные характеристики коэффициента отражения для моделей ОЛАР и МЛАР с неоднородной линией питания, ширина которой меняется по экспоненциальному закону. Как видно из приведенных результатов, при изменении размеров излучателей в соответствии с полиномами Чебышева можно реализовать коэффициент стоячей волны КСВ  $< 2$  в диапазоне частот 21.1–26.25 GHz, в то время как ОЛАР вплоть до 27.5 GHz имеет КСВ  $> 2$ . Сравнение характеристик ОЛАР и МЛАР на фиксированных частотах 24 и 26 GHz приведено в таблице.

Из приведенных на рис. 3 диаграмм направленности ОЛАР и МЛАР на двух фиксированных частотах в Е-плоскости видно, что МЛАР имеет больший коэффициент усиления по сравнению с ОЛАР.

Исследования влияния толщины подложки на частотные характеристики коэффициента отражения модифицированной антенны (рис. 4) показали, что уменьшение толщины приводит к ухудшению частотных свойств МЛАР; кроме того, ухудшается электрическая прочность антенны.

При увеличении толщины подложки коэффициент отражения растет во всем исследуемом диапазоне, но частотная характеристика коэффициента отражения становится более гладкой. Для ограничения распространения поверхностных волн нежелательно увеличивать толщину подложки. Один из способов снижения влияния поверхностных волн — использование многослойных подложек без увеличения общей толщины или использование метаматериалов в составе подложки.

Таким образом, исследована конструкция линейной антенной решетки Дольф–Чебышева для диапазона частот от 24 до 26.5 GHz с неоднородной линией пита-



**Рис. 4.** Частотная зависимость коэффициента отражения при различной толщине подложки МЛАР,  $h = 0.7874$  mm.

ния, ширина которой изменяется по экспоненциальному закону, а геометрические параметры оптимизированы с использованием Altair FEKO. МЛАР по сравнению с ОЛАР обеспечивает более высокий коэффициент усиления и низкий уровень боковых лепестков. Характеристики антенны оказываются чувствительными к толщине подложки, при выборе которой должен учитываться компромисс между электрической прочностью антенны и ограничением влияния на характеристики поверхностных волн.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00970 (<https://rscf.ru/project/23-29-00970/>) в Южном федеральном университете.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C.R. Storck, F. Duarte-Figueiredo, *IEEE Access*, **8**, 117593 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004779
- [2] L. Wei, X. Changwu, H. Yue, C. Ligu, S. Lining, F. Guoqiang, *J. Ambient Intell. Human. Comput.*, **10** (5), 1713 (2019). DOI: 10.1007/s12652-017-0589-y
- [3] R. Chopra, G. Kumar, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **67** (6), 4275 (2019). DOI: 10.1109/TAP.2019.2908108
- [4] F. Alnemr, M.F. Ahmed, A.A. Shaalan, *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, **42** (3), 338 (2021). DOI: 10.1007/s10762-021-00770-1
- [5] I. Ahmad, S. Houjun, Q. Ali, A. Samad, in *2020 17th Int. Bhurban Conf. on applied sciences and technology (IBCAST)* (IEEE, 2020), p. 710–713. DOI: 10.1109/IBCAST47879.2020.9044577
- [6] A.E. Farahat, K.F.A. Hussein, *IEEE Access*, **10**, 32213 (2022). DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3160724