

11

Широкополосная низкопрофильная антенная решетка с механоэлектрическим сканированием на основе протяженных ТЕМ-излучателей

© С.В. Поленга, Р.О. Рязанцев, Е.А. Стригова, А.В. Станковский, А.Д. Полигина

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: twinlive@gmail.com

Поступило в Редакцию 6 марта 2025 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2025 г.

Принято к публикации 7 мая 2025 г.

Разработана и исследована широкополосная низкопрофильная антенная решетка с широкоугольным механоэлектрическим сканированием на основе протяженных ТЕМ-излучателей. В предложенной конструкции антенная решетка возбуждается источником плоской квази-ТЕМ-волны, формируемой в делителе мощности на основе бинарных делителей, реализованных на П-образном волноводе. Сканирование достигается путем вращения источника плоской волны относительно решетки излучателей. Апертурный коэффициент использования поверхности антенной решетки составил более 60 % при сканировании в секторе углов $\pm 30^\circ$ в полосе частот более 45 % при коэффициенте стоячей волны по напряжению не более 1.2. Частотное сканирование у предложенной антенны отсутствует.

Ключевые слова: протяженный ТЕМ-излучатель, антенная решетка, спутниковая связь, широкоугольное сканирование, VICTS, CTS.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.15.60805.20309

Современные телекоммуникационные системы и радиолокация требуют антенных систем с широкоугольным сканированием диаграммы направленности, сочетающих в себе широкополосность, компактность и высокую эффективность. Сканирующие антенны на основе активных компонентов обладают рядом преимуществ перед классическими волноводными и микрополосковыми антенными системами, однако стоимость сложных электронных компонентов зачастую делает такие антенны недоступными для широкого потребителя. В наши дни зарубежные и отечественные исследования направлены на создание и совершенствование антенных систем с широкоугольным сканированием на основе механоэлектрического способа управления лучом [1–4].

Антенная решетка на основе протяженных ТЕМ-излучателей (continuous transverse stub, CTS) была предложена в начале 90-х годов [5]. Такая антенна состоит из решетки излучателей в виде волноводов из широких параллельных пластин, возбуждаемых квази-ТЕМ-волной, обладает высоким коэффициентом использования поверхности (КИП) и широкой полосой рабочих частот. Данный тип антенных решеток является отличной основой для антенных систем с широкоугольным механоэлектрическим сканированием ввиду высокой эффективности и малого количества излучателей, в последующие годы в литературе был представлен ряд работ, посвященных данному вопросу.

Спустя 10 лет после изобретения антенной решетки на основе протяженных ТЕМ-излучателей той же группой авторов была запатентована дифракционная сканирующая антенна типа VICTS [6]. Антенна состояла из

CTS-антенны с последовательным возбуждением и вращающимся источником квази-ТЕМ-волны, который при вращении относительно системы излучателей формировал линейный фазовый набег вдоль ширины волновода. Таким образом, достигалось сканирование в широком секторе углов путем вращения всего двух дисков — с излучателями и с источником плоской волны. Данный тип антенн в последние годы развивается в направлении получения многодиапазонных конструкций [7–9] и повышения эффективности [10], предложены конструкции антенн для систем спутниковой связи [11]. Кроме того, терминалы для спутниковой связи на основе VICTS коммерчески выпускаются фирмой Thinkom [12]. Несмотря на простоту и высокую эффективность, антенны типа VICTS в связи с последовательным типом возбуждения обладают важным недостатком — частотным сканированием, что в том числе ограничивает мгновенную полосу рабочих частот, и чем больше необходимо усиление антенны, тем уже становится мгновенная полоса. Помимо этого такие антенны обладают слепой зоной в направлении нормали к антенне. Использование параллельной диаграммообразующей схемы (ДОС) позволяет избежать основного недостатка VICTS — частотного сканирования. В литературе было представлено несколько сканирующих антенных систем на основе CTS-антенных решеток с параллельной ДОС [13,14]. Общим среди представленных антенных систем является диапазон сканирования, не превышающий $\pm 40^\circ$. Управление диаграммой направленности, как и в случае с VICTS, в них выполняется за счет поворота источника плоской волны, однако запитывается не последовательная антен-

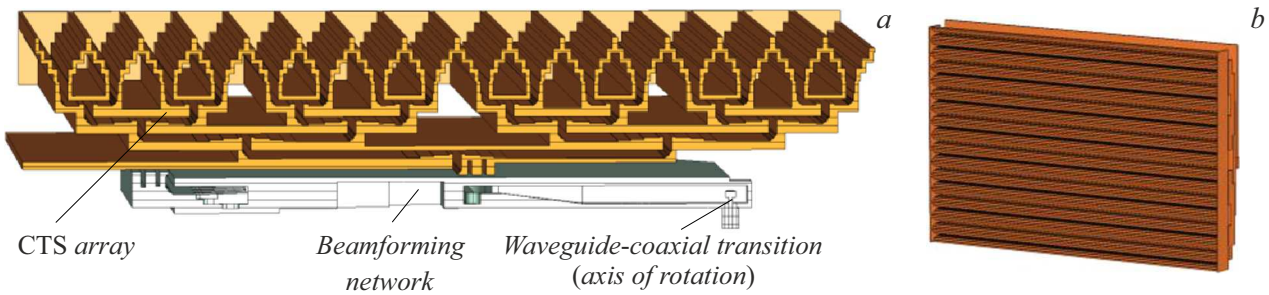


Рис. 1. Антенная система с механоэлектрическим сканированием. *a* — поперечное сечение; *b* — внешний вид.

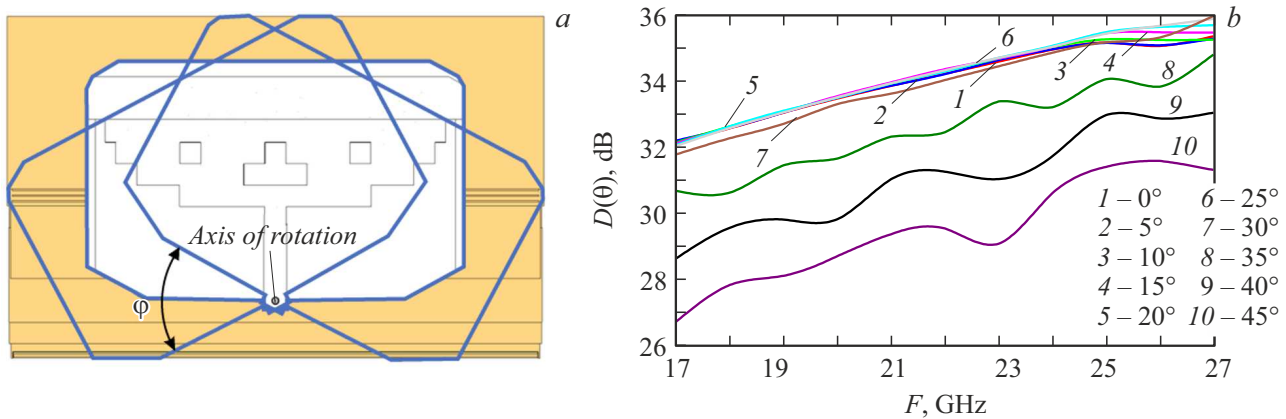


Рис. 2. Вид на антенную систему со стороны ДОС (*a*) и частотные зависимости КНД при различных углах поворота ДОС (*b*).

ная решетка, а параллельная. Несмотря на потенциал используемого принципа, ширина полосы рабочих частот в представленных работах составляет не более десятка процентов. На подобном принципе управления лучом также основаны последовательные СТС-антенны [15,16], обладающие идентичным сектором сканирования $\pm 30^\circ$.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию широкополосной низкопрофильной антенной решетки с широкоугольным механоэлектрическим сканированием на основе протяженных ТЕМ-излучателей. Сечение предложенной антенной решетки показано на рис. 1, *a*. Антенная система состоит из двух основных частей, не имеющих электрического и механического контакта между собой, а именно системы излучателей сверху и источника плоской квази-ТЕМ-волны снизу.

Сканирование осуществляется за счет углового смещения источника плоской волны относительно структуры с излучателями. Верхний слой представляет собой антенную решетку на основе протяженных ТЕМ-излучателей, которая запитывается ТЕМ-волной. Источник плоской волны построен на бинарных делителях мощности на основе П-образного волновода, использование такой линии передачи позволило добиться показателей КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) менее 1.2 в полосе частот, превышающей рабочий диапазон питающего волновода стандартного сечения (WR 42). Волновод в свою очередь запитан

волноводно-коаксиальным переходом, ось которого совмещена с осью вращения всего источника плоской волны относительно излучающей структуры (рис. 2, *a*). Такая конструкция позволяет разместить вращающийся СВЧ-переход и обеспечивает практическую реализуемость. Передача мощности от источника плоской волны к параллельной СТС производится через три ступенчатых поворота волноведущей линии, два из которых реализованы без контакта стенок волновода. Зазор составляет 0.5 mm. Для предотвращения распространения волны в нежелательном направлении использованы загораживающие структуры на основе дроссельных канавок. Коэффициент отражения такого поворота составляет не более -28 dB во всей рабочей полосе частот.

Размер апертуры разработанной антенны составляет 200×312 mm (рис. 1, *b*) при шаге решетки 12.5 mm, профиль не превышает 42 mm, ширина источника плоской волны равна 220 mm, профиль — 12 mm. При повороте источника относительно излучателей (рис. 2, *a*) плоский фазовый фронт источника приобретает линейный фазовый набег и в схеме излучателей уже распространяется отклоненная от нормали волна.

В связи с конечностью размера структуры возникает дополнительное ограничение на соотношение ширины ТЕМ-волноводов источника и системы излучателей. В случае одинаковой ширины источника и системы излучателей наблюдается максимальный КИП в нормальном

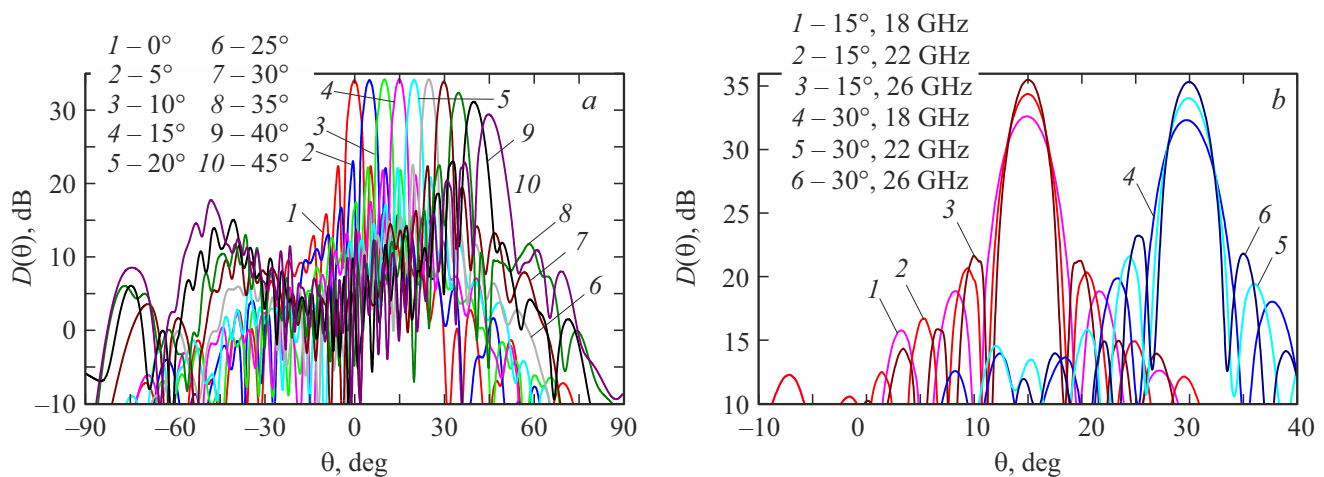


Рис. 3. Рассчитанные диаграммы направленности в E -плоскости на частоте $F = 22$ GHz при различных углах поворота ДОС (а) и на различных частотах при двух положениях ДОС ($\varphi = 15^\circ, 30^\circ$) (б). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

направлении диаграммы направленности, однако при сканировании за счет наклона источника наблюдается резкое снижение коэффициента направленного действия (КНД) из-за того, что часть энергии, распространяющейся под углом, доходит до боковой границы волновода и отражается от нее. Таким образом, для эффективного сканирования необходимо увеличение ширины излучателей, чтобы отклоненная волна при распространении в делителях излучающей структуры не взаимодействовала с границами волновода и сохранялся режим квази-ТЕМ. По сути, в апертуре антенны при сканировании перемещается область излучения. Данный подход снижает общий КИП антенной решетки за счет того, что не вся апертура антенны является активной при различных углах наклона источника ТЕМ-волны.

Предложенные пропорции ширины источника и излучателей позволили обеспечить апертурный КИП более 60% при сканировании в секторе углов $\pm 30^\circ$. При дальнейшем сканировании наблюдается значительное снижение КНД системы, фактически происходит загораживание прохождения волны боковой стенкой волноводящей структуры и формируется зеркальный луч. При повороте ДОС на угол более 30° ступенчатые повороты упираются друг в друга. Диаграммы направленности на углах более 30° приведены (рис. 3, а) для оценки величины спада КНД и не могут быть получены в эксперименте в рамках предложенной конструкции. Флуктуация КНД при сканировании в секторе углов $\pm 30^\circ$ не превышает 0.3 dB (рис. 2, б), КИП находится на уровне 60% для всех случаев углов отклонения и частот. На частотах выше 25 GHz КИП немного снижается за счет появления дифракционных максимумов, в целом их влияние незначительно.

Расчетные диаграммы направленности на частоте 22 GHz приведены на рис. 3, а. Уровень бокового излучения соответствует апертуре с равномерным амплитуд-

ным распределением и составляет не более -13 dB. Расчеты производились методом конечного интегрирования во временной области.

Одним из преимуществ используемой ТЕМ-волны можно считать отсутствующую дисперсию, поэтому у антенной решетки практически отсутствует частотное сканирование (рис. 3, б).

Таким образом, разработана низкопрофильная антенная решетка с широкоугольным сканированием с практически постоянным КНД в секторе углов $\pm 30^\circ$. Одним из недостатков данной решетки является фиксированная линейная поляризация. Для формирования излучения с круговой поляризацией или управления линейной потребуется внешний поляризатор, который несколько увеличит габарит антенны. По сравнению с известными антеннами типа VICTS явными преимуществами предложенной антенны являются широкая полоса рабочих частот и отсутствие частотного сканирования, однако сектор сканирования не так велик. При установке антенны под углом 30° относительно горизонта и механическом вращении по азимуту угломестный сектор сканирования может быть расширен до $\pm 60^\circ$, соответственно такая антенна может быть использована в наземных терминалах спутниковой связи и в радарях.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10205).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.V. Stankovsky, S.V. Polenga, A.D. Nemshon, Ye.A. Litinskaya, A.M. Alexandrin, K.V. Lemberg, Yu.P. Salomatov, in *2017 IEEE Conf. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)* (IEEE, 2017), p. 45–48. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103559
- [2] Y.A. Litinskaya, A.D. Nemshon, A.V. Stankovsky, S.V. Polenga, Y.P. Salomatov, in *2016 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)* (IEEE, 2016), p. 1–3.
DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491862
- [3] R.S. Hao, Y.J. Cheng, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **71** (12), 9674 (2023). DOI: 10.1109/TAP.2023.3323800
- [4] S.V. Ballandovich, M.I. Sugak, G.A. Kostikov, Y.G. Antonov, L.M. Liubina, in *2021 Antennas Design and Measurement Int. Conf. (ADMInC)* (IEEE, 2021), p. 27–30.
DOI: 10.1109/ADMInC54110.2021.9670899
- [5] W.W. Milroy, *Continuous transverse stub element devises and method of making same*, patent US 5266961 (publ. 30.11.1993).
- [6] W.W. Milroy, S.B. Coppedge, A.C. Lemons, *Variable inclination continuous transverse stub array*, patent US 6919854B2 (publ. 15.07.2005).
- [7] R.S. Hao, Y.J. Cheng, Y.F. Wu, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **68** (9), 6656 (2020). DOI: 10.1109/TAP.2020.2984337
- [8] Y. Lu, Y. You, Y. Wang, Z.W. Zheng, J. Huang, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **70** (10), 8962 (2022).
DOI: 10.1109/TAP.2022.3177502
- [9] Y. Lu, Y. You, Q. You, Y. Wang, J. Huang, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **71** (1), 463 (2023).
DOI: 10.1109/TAP.2022.3212043
- [10] K. Wang, X. Lei, J. Gao, T. Li, M. Zhao, in *2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conf. (IMCEC)* (IEEE, 2021), p. 1554–1558.
DOI: 10.1109/IMCEC51613.2021.9482173
- [11] S.Y. Liu, C.F. Zhou, J. Liu, J.H. Fu, Q. Wu, X.M. Ding, *IEEE Open J. Antennas Propag.*, **3**, 1218 (2022).
DOI: 10.1109/OJAP.2022.3212754
- [12] <https://www.thinkom.com/>
- [13] M. Ettorre, F.F. Manzillo, M. Casaletti, R. Sauleau, L. Le Coq, N. Capet, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **63** (11), 4792 (2015). DOI: 10.1109/TAP.2015.2479243
- [14] X. Lu, S. Gu, X. Wang, H. Liu, W. Lu, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **16**, 1675 (2017).
DOI: 10.1109/LAWP.2017.2664880
- [15] H. Qiu, Q. Cao, X. Yang, in *2019 Int. Applied Computational Electromagnetics Society Symp. (ACES)* (IEEE, 2019), p. 1–2. DOI: 10.23919/ACES48530.2019.9060559
- [16] H. Xiang, S. Han, Y. Zhao, T. Zhang, Z. Yan, in *2018 Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)* (IEEE, 2018), p. 1–3.
DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563515