

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.21>

УДК: 621.396

ВОВ-TIE ПЕЧАТНЫЙ ДИПОЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ 5G ММ-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.В. Геворкян

Южный федеральный университет
347922, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Статья поступила в редакцию 31 октября 2024 г.

Аннотация. В работе приведена конструкция bow-tie печатного дипольного элемента антенной решётки. Было необходимо исследовать поведение его частотных характеристик при сканировании и оценить перспективность использования в системах связи 5G мм-диапазона длин волн. Он сделан на диэлектрической подложке ($\epsilon = 3$) толщиной 1,0 мм с односторонней металлизацией и имеет воздушный слой между подложкой и основанием. Габаритные размеры элемента: 5,5 мм × 5,5 мм × 1,5 мм. При отсутствии сканирования в рабочем диапазоне частот от 24,25 до 27,50 ГГц значения КСВН $\leq 1,33$. При сканировании в Е- и Н-плоскостях в секторе углов $\pm 45^\circ$ он увеличивается до 2,80 и 1,77, соответственно. Замена воздушного слоя на подложку с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1,6$ привела к следующему. При отсутствии сканирования максимальное значение КСВН уменьшилось с 1,33 до 1,31. При сканировании в Е-плоскости в секторе углов $\pm 45^\circ$ – с 2,80 до 2,32, а при сканировании в Н-плоскости – оно увеличилось с 1,77 до 1,87. Т.е. в рабочем диапазоне частот значения КСВН $\leq 2,32$. Значения реализованного коэффициента усиления находятся

в диапазоне от 3,92 до 5,09 дБ (КПД – более 97%) при отсутствии сканирования, а при сканировании в Е- и Н-плоскостях, соответственно, от 1,70 до 3,37 (КПД – более 82%) и от 2,04 до 3,20 дБ (КПД – более 89%).

Ключевые слова: bow-tie антенна, антенна, миллиметровые волны, элемент фазированной антенной решётки.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00970 (<https://rscf.ru/project/23-29-00970/>) в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета в г. Таганроге.

Автор для переписки: Геворкян Армен Валерьевич, gevorkyan.scp@yandex.ru.

Введение

Антенна типа bow-tie относится к классу дипольных антенн. Она может работать как в широкой [1-4], так и в сверхширокой полосе частот [5-7].

В [1] широкополосная (22-29 ГГц) антенная решётка состоит из двух bow-tie дипольных элементов с плечами, которые похожи на листья. Для создания направленного излучения используется рефлектор. В [2] плечи диполя имеют разрезы, в которые добавлены р-і-п диоды и варакторы. Изменяя их параметры, можно менять рабочую полосу в широком диапазоне частот (от 3,04 до 5,89 ГГц).

В [3] плечи диполя имеют сложную форму. Они состоят из ортогонально расположенных частей, которые соединены между собой. Первая часть имеет форму листа. Вторая имеет треугольную форму и состоит из двух частей, которые расположены на подложке с двухсторонней металлизацией (они имеют емкостную связь). Такая сложная форма плеч диполя позволяет получить круговую поляризацию в широкой полосе частот. Для создания направленного излучения используется рефлектор (имеет форму усеченного конуса).

В [4] антенна предназначена для работы в мм-диапазоне длин волн. Плечи диполя расположены под углом. Для улучшения диаграммы направленности и частотных характеристик используются две импедансные структуры (первая расположена между плечами и землей, а другие в апертуре).

Вариант сверхширокополосной (2-15 ГГц) само-заземленной антенны рассматривается в [5]. Плечи диполя и его отражатель выполнены из цельного свернутого металлического листа.

Антенна [6] имеет такую же листовую форму конструкции, как и [1], но она работает на меньших частотах. В [7] рассматривается другой вариант конструкции плеч, которые имеют форму полуокружностей. Плечи разделены на несколько частей, между которыми имеется зазор. В зазоры добавлены резисторы. Антенна является сверхширокополосной. Однако в диапазоне с наилучшим согласованием (0,5-3,0 ГГц) значение эффективности излучения не превышает 70%.

Антенна типа bow-tie используется как одиночная антенна [2-7], так и в составе антенных решёток [1, 8-10], в том числе – многолучевых [11,12]. Например, в [9] она используется для создания двух антенных решёток с наклонными поляризациями ($\pm 45^\circ$).

В качестве элемента фазированных антенных решёток она используется редко [13-15]. Она обладает хорошей широкополосностью при относительно простой форме плеч диполя. Поэтому её применение в мм-диапазоне длин волн является вполне целесообразным, так как большие значения коэффициента перекрытия здесь редко требуются.

Как и любая другая дипольная антенна, она может быть сделана так, чтобы иметь продольное или поперечное излучение. В миллиметровом диапазоне длин волн поперечное излучение предпочтительно. В этом случае антенна будет плоской и её можно совмещать с другими устройствами на одной печатной плате. Также это упрощает монтаж антенны, так как не требуется делать крепления для фиксации её вертикального положения. Хотя последнее может приводить к трудностям при получении согласования антенны с линией питания.

Целью данной работы было исследовать поведение частотных характеристик элемента антенной решётки типа bow-tie при сканировании и

оценить перспективность его использования в системах связи 5G мм-диапазона длин волн (в диапазоне частот от 24,25 до 27,50 ГГц).

1. Конструкция элемента антенной решётки

Электродинамическая модель конструкции разработанного элемента фазированной антенной решётки типа bow-tie приведена на рис. 1 (а – общий вид и б – вид сбоку). Он сделан на диэлектрической подложке ($\epsilon = 3$) толщиной 1,0 мм с односторонней металлизацией и имеет воздушный слой между подложкой и основанием. Габаритные размеры элемента: 5,5 мм × 5,5 мм × 1,5 мм. Плечи диполя имеют трапецеидальную форму с размерами: 0,3 мм (1,6 мм) × 2,0 мм.

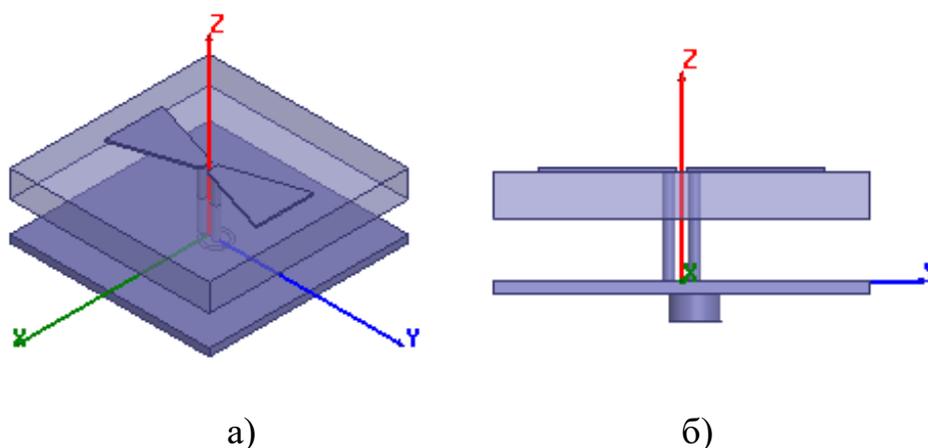


Рис. 1. Элемент антенной решётки.

2. Характеристики элемента антенной решётки

Для начала рассмотрим поведение частотных характеристик при сканировании в Е-плоскости. На рис. 2-4 приведены полученные характеристики для следующих значений угла сканирования: — — 0; — — — ±15; - - - - ±30 и - · - · - ±45°.

Из рис. 2-4 видно, что в случае отсутствия сканирования в требуемом диапазоне частот значения $K_{СВН} \leq 1,33$. На частоте 26,4 ГГц находится минимальное значение $K_{СВН}$, которое равно 1,11. Значения реализованного коэффициента усиления находятся в диапазоне от 3,92 до 5,09 дБ. КПД превышает 97%.

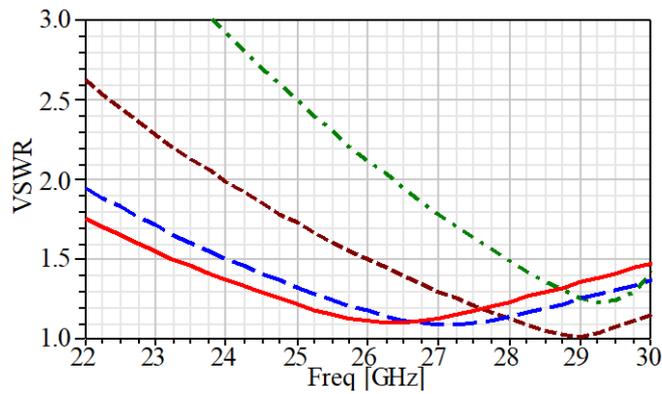


Рис. 2. КСВН.

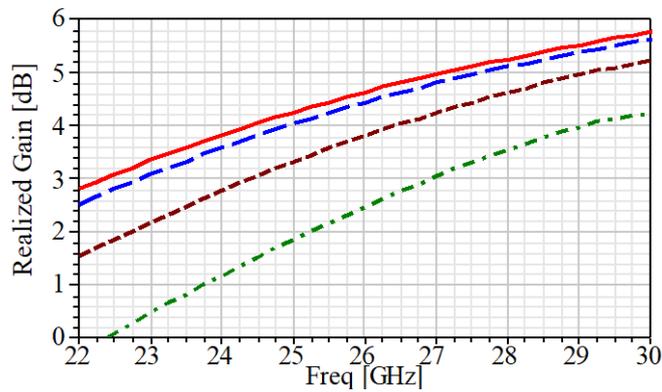


Рис. 3. Реализованный коэффициент усиления.

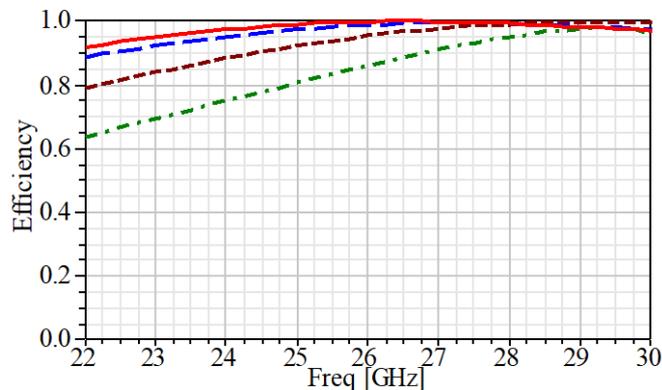


Рис. 4. КПД.

Несмотря на хорошие характеристики при отсутствии сканирования, при сканировании в Е-плоскости характеристики ухудшаются. Это связано с их смещением в сторону более высоких частот. В результате максимальное значение КСВН увеличивается (по сравнению с максимальным значением КСВН при отсутствии сканирования). При секторе углов сканирования равном $\pm 30^\circ$ он увеличивается до 1,91. При $\pm 45^\circ$ он увеличивается до 2,80, реализованный коэффициент усиления находится в диапазоне от 1,35 до 3,30 дБ, а КПД превышает 76%.

Перейдем к рассмотрению поведения частотных характеристик элемента решётки при сканировании в Н-плоскости. Они приведены на рис. 5-7. Как и ранее они исследовались при следующих значениях угла сканирования: — 0; — ±15; — ±30 и — ±45°.

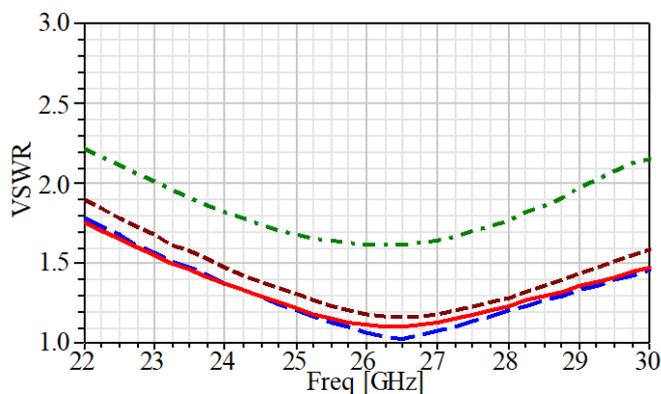


Рис. 5. КСВН.

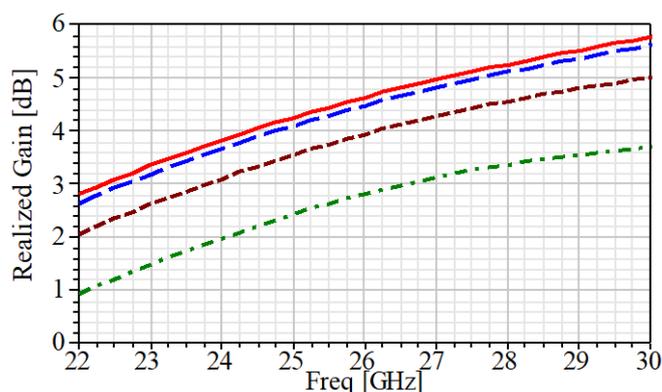


Рис. 6. Реализованный коэффициент усиления.

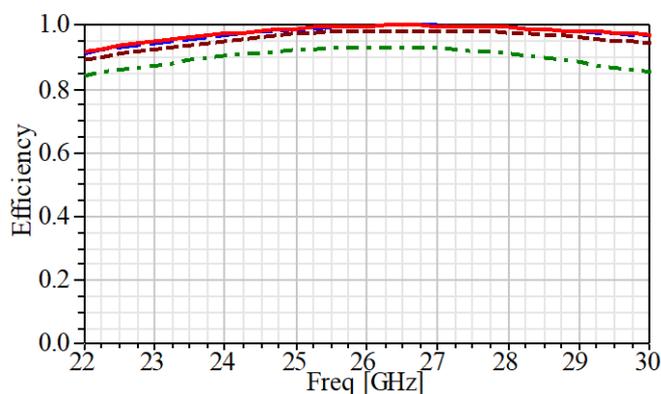


Рис. 7. КПД.

Сравнение рис. 2 и 5 показывает, что при сканировании в Н-плоскости частотные характеристики КСВН меньше зависят от угла сканирования. Из рис. 6 видно, что при секторе углов сканирования равном ±30° значения

$K_{CBH} \leq 1,43$. При $\pm 45^\circ$ значения K_{CBH} увеличиваются и находятся в диапазоне от 1,61 до 1,77. Это меньше, чем при сканировании в Е-плоскости. Поэтому значения реализованного коэффициента усиления немного больше и находятся в диапазоне от 2,10 до 3,25 дБ, а КПД превышает 90%.

Проведенный выше анализ показывает, что разработанный элемент антенной решётки типа bow-tie можно использовать для широкоугольного сканирования в обеих исследованных плоскостях. Однако при углах сканирования в Е-плоскости равных $\pm 45^\circ$ максимальное значение K_{CBH} равно 2,80 на частоте 24,25 ГГц. Это существенно хуже, чем при сканировании в Н-плоскости ($K_{CBH} \leq 1,77$).

Дополнительные исследования показали, что замена воздушного слоя на диэлектрическую подложку с небольшим значением относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1,6$) помогает уменьшить максимальное значение K_{CBH} элемента решётки при сканировании в Е-плоскости.

Частотные характеристики элемента решётки с дополнительной диэлектрической подложкой при сканировании в Е-плоскости приведены на рис. 8-10. Соответствие типа линии и значения угла сканирования: — — 0; — — — $\pm 15^\circ$; - - - $\pm 30^\circ$ и - · - · $\pm 45^\circ$.

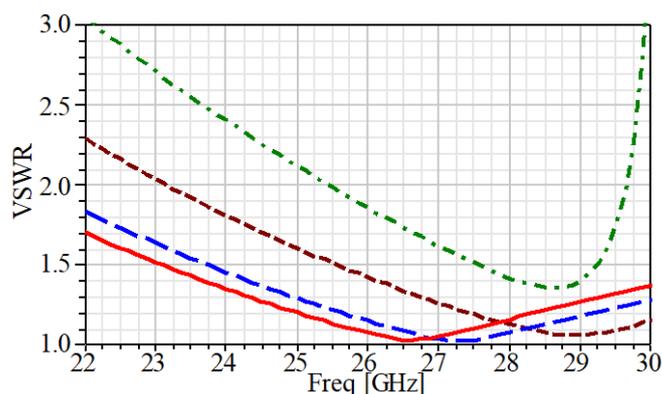


Рис. 8. K_{CBH} .

Сравнение рис. 2 и 8 показывает улучшение K_{CBH} во всей рабочей полосе частот. При отсутствии сканирования максимальное значение K_{CBH} уменьшилось с 1,33 до 1,31, при углах сканирования равных $\pm 15^\circ$ – с 1,46

до 1,41), при $\pm 30^\circ$ – с 1,91 до 1,75, а при $\pm 45^\circ$ – с 2,80 до 2,32. Т.е. максимальное значение КСВН уменьшилось при всех углах сканирования в Е-плоскости.

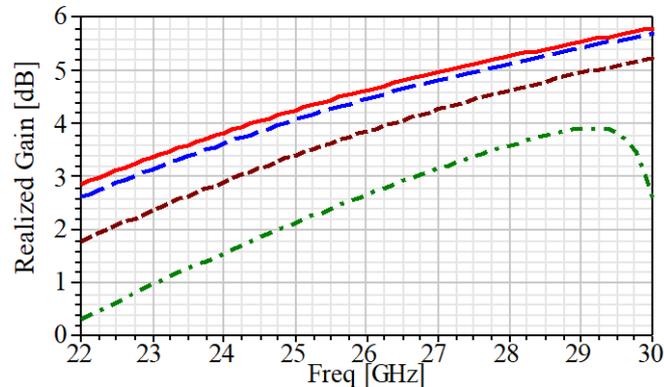


Рис. 9. Реализованный коэффициент усиления.

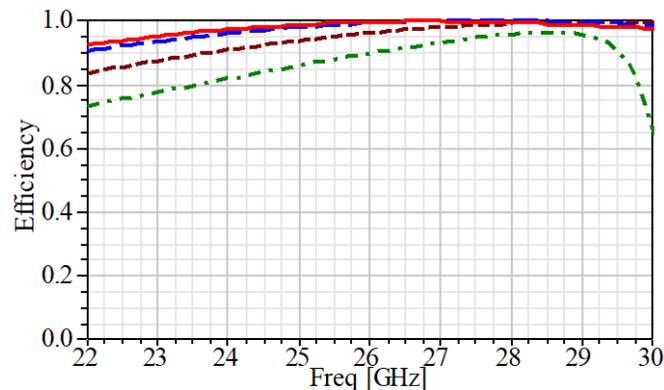


Рис. 10. КПД.

Благодаря уменьшению КСВН увеличились значения реализованного коэффициента усиления и КПД. Из рис. 9 и 10 видно, что при отсутствии сканирования значения реализованного коэффициента усиления не изменились и находятся в диапазоне от 3,92 до 5,09 дБ, а КПД превышает 97%. При сканировании в секторе углов $\pm 45^\circ$ значения реализованного коэффициента усиления находятся в диапазоне 1,70 до 3,37 дБ, а КПД превышает 82%.

Частотные характеристики элемента решётки с дополнительной диэлектрической подложкой при сканировании в Н-плоскости приведены на рис. 11-13. Соответствие типа линии и значения угла сканирования: — 0; — — ± 15 ; — — ± 30 и — — $\pm 45^\circ$.

Сравнение рис. 5 и 11 показывает, что использование дополнительной диэлектрической подложки приводит к уменьшению КСВН при сканировании

в секторе углов $\pm 30^\circ$ и его максимальное значение немного увеличивается с 1,43 до 1,48. Однако при углах сканирования $\pm 45^\circ$ КСВН ухудшается и его максимальное значение увеличивается с 1,77 до 1,87, но это меньше, чем при сканировании в Е-плоскости.

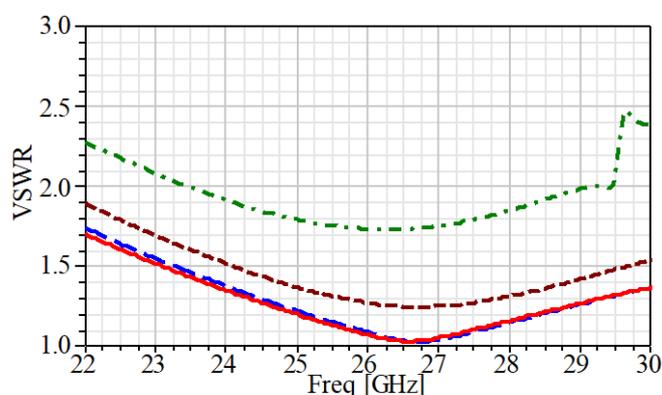


Рис. 11. КСВН.

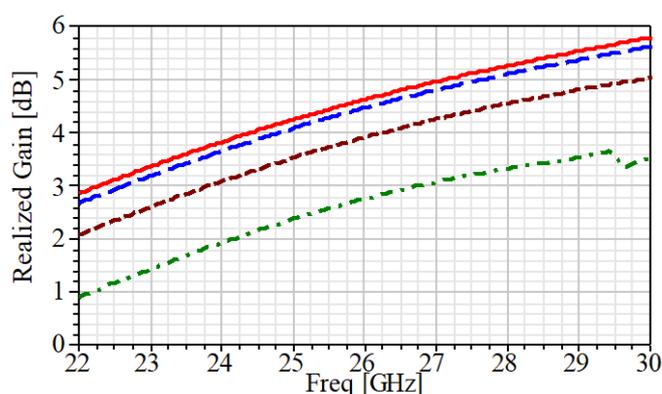


Рис. 12. Реализованный коэффициент усиления.

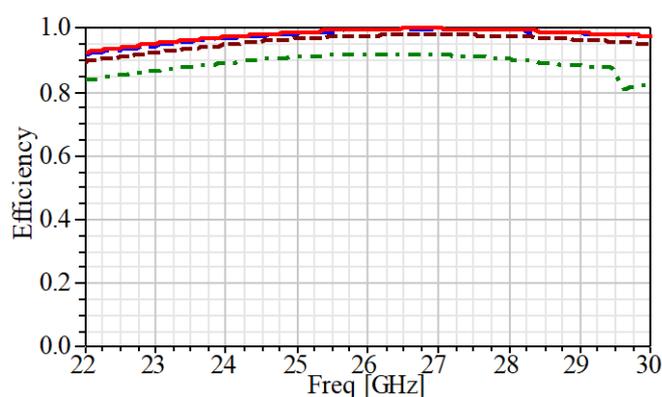


Рис. 13. КПД.

Из рис. 12 и 13 видно, что при сканировании в секторе углов $\pm 45^\circ$ значения реализованного коэффициента усиления находятся в диапазоне от 2,04 до 3,20 дБ, а КПД превышает 89%. Эти значения отличаются

от значений при сканировании в Е-плоскости из-за отличия значений КСВН в нижней и верхней части рабочего диапазона частот.

Таким образом, КСВН разработанного элемента антенной решётки не превышает 1,31 при отсутствии сканирования и не превышает 2,32 при сканировании в Е- и Н-плоскостях в секторе углов $\pm 45^\circ$.

Заключение

Рассмотренный элемент антенной решётки является широкополосным и обеспечивает широкоугольное сканирование в секторе углов $\pm 45^\circ$ в Е- и Н-плоскостях с КСВН $\leq 2,32$. На основе результатов исследований, которые были получены в данной работе, можно говорить о том, что печатная дипольная антенна типа bow-tie может найти применение при разработке фазированных антенных решёток систем связи 5G мм-диапазона длин волн.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00970 (<https://rscf.ru/project/23-29-00970/>) в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета в г. Таганроге.

Литература

1. Yamamoto M., Tokuyama D., Nojima T. Design of quasi-millimeter wave leaf-shaped bowtie array antenna for UWB applications // Proc. 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (Toronto, ON, Canada). – 2010. – P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/APS.2010.5561106>.
2. Li T., Zhai H., Li L., Liang C. Frequency-Reconfigurable Bow-Tie Antenna With a Wide Tuning Range // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 13. – P. 1549–1552. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2344676>.

3. Qu S.-W., Chan C.H., Xue Q. Wideband and High-Gain Composite Cavity-Backed Crossed Triangular Bowtie Dipoles for Circularly Polarized Radiation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58. – № 10. – P. 3157–3164. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2055792>.
4. Dadgarpour A., Zarghooni B., Virdee B.S., Denidni T.A. Millimeter-Wave High-Gain SIW End-Fire Bow-tie Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63. – № 5. – P. 2337–2342. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2406916>.
5. Yang J., Kishk A. A Novel Low-Profile Compact Directional Ultra-Wideband Antenna: The Self-Grounded Bow-Tie Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – Vol. 60. – № 3. – P. 1214–1220. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2180317>.
6. Fujita S., Yamamoto M., Nojima T. A study of a leaf-shaped bowtie slot antenna for UWB applications // Proc. 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (Nagoya, Japan). – 2012. – P. 830–833.
7. Deshmukh U.K., Choukikar Y.K., Naik S.B. Design of CPW fed bow-tie slot antenna for ground penetrating radar application // Proc. 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT) (Bangalore, India). – 2016. – P. 1820–1823. <https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7808149>.
8. Jinjin G., Fuguo Z., Kan W. A Novel Ultra Wideband Resistance Loaded Bow-Tie Antenna for Ground Penetrating Radar Applications // Proc. 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) (Shanghai, China). – 2020. – P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT49418.2020.9387017>.
9. Kaswiati W.S. Suryana J. Design and realization of planar bow-tie dipole array antenna with dual-polarization at 2.4 GHz frequency for Wi-Fi access point application // Proc. 2012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA) (Denpasar-Bali, Indonesia). – 2012. – P. 218–222. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2012.6366055>.

10. Salsabila S., Setiawan A.D., Charisma A., Najmurokhman A., Munir A. Design of printed bowtie dipole array antenna for rectenna application // Proc. 2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT) (Palembang, Indonesia). – 2017. – P. 86–89. <https://doi.org/10.1109/ICWT.2017.8284144>.
11. Yamamoto M., Fujita S., Kimura J., Nojima T. Design of a leaf-shaped bowtie slot antenna array for wide band applications // Proc. 2013 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) (Turin, Italy). – 2013. – P. 448–451. <https://doi.org/10.1109/APWC.2013.6624889>.
12. Mosalanejad M., Ocket I., Soens C., Vandenbosch G.A.E. Multi-Layer PCB Bow-Tie Antenna Array for (77–81) GHz Radar Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68. – № 3. – P. 2379–2386. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2949723>.
13. Zhang Y., Fu P., Li Y. 128-Element Multibeam Antenna Array with Integrated Feeding Networks // Proc. 2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE) (Zhuhai, China). – 2021. – P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ISAPE54070.2021.9752693>.
14. Mirbeik-Sabzevari A., Najafizadeh L., Tavassolian N. Synthetic Ultra-Wideband Phased-Array Transceiver for Millimeter-Wave Imaging Applications With On-Chip Antennas // Proc. 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI) (Singapore). – 2021. – P. 521–522. <https://doi.org/10.1109/APS/URSI47566.2021.9704601>.
15. Li L., Yan J.-B., O'Neill C., Simpson C.D., Gogineni S.P. Coplanar Side-Fed Tightly Coupled Ultra-Wideband Array for Polar Ice Sounding // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2022. – Vol. 70. – № 6. – P. 4331–4341. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3138544>.
16. Zhu Y., Lu R., Yu C., Hong W. Design and Implementation of a Wideband Antenna Subarray for Phased-Array Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68. – № 8. – P. 6059–6068. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2988946>.

17. Schulpen R., Johannsen U., Pires S.C., Smolders A.B. Design of a phased-array antenna for 5G base station applications in the 3.4–3.8 GHz band // Proc. 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018) (London, UK). – 2018. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.1102>.

Для цитирования:

Геворкян А.В. Bow-tie печатный дипольный элемент фазированной антенной решётки для системы связи 5G мм-диапазона длин волн. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.21>