

УДК 621.029.351.819

**БАЙДЕЛЬДИНОВ У.С. – к.ф-м.н., доцент (г. Алматы, Казахский университет путей сообщения)**

**СУЛТАНГАЗИНОВ С.К. – д.т.н., профессор (г. Алматы, Казахский университет путей сообщения)**

**БОЛГАНБАЕВ М.К. – магистрант (г. Алматы, Казахский университет путей сообщения)**

## **ДВУМЕРНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ПУЧКОВАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

### **Аннотация**

*В этой статье была исследована новая электронно-управляемая двумерная сканирующая луч отражательная антенна решетка (из отражательной решетки), использующая жидкие кристаллы. В качестве блока фазового сдвига для отражательной матрицы для требуемой фазовой компенсации используется двухполюсная резонансная структура. Моделирование показывает, что для полосы пропускания около 7 ГГц диапазона фазового сдвига более 360° может быть достигнуто в F-диапазоне. Кроме того, предложена новая схема подключения, позволяющая уменьшить неблагоприятное влияние линии смещения на характеристики фазового сдвига и упростить производственный процесс. Моделирование разработанного отражателя 39 × 39 показывает, что максимальная дальность управления лучом, максимальное усиление и уровень боковых лепестков на частоте 115 ГГц составляют 20°, 16,55 дБи и -8,4 дБ соответственно.*

**Ключевые слова:** *терагерцовая антенна, фазовращатель, жидкие кристаллы, отражатель, диаграмма направленности.*

### **Введение.**

В последние годы миллиметровые и терагерцовые отражательные антенны решетки (из отражательной решетки) быстро развиваются благодаря своим широким возможностям применения. К ним относятся беспроводная связь, радиолокационные системы, медицинская диагностика, а также инспекция безопасности. Для субмиллиметровых и ТГц прикладных систем также возрастают потребность в терагерцовых функциональных устройствах, таких как фазовращатели, резонаторы и антенны.

Отражающие лучи преодолевают многие недостатки, обычно связанные с индивидуальными отражателями и плоскофазовыми антенными решетками. Например, они могут поддерживать высокий коэффициент усиления при низких потерях и относительно просты в изготовлении. Фазовая схема обычных отражающих лучей включает в себя различные размеры элементов отражающих лучей. Как только размеры матрицы и элементарной ячейки определены, как направление луча, так и форма луча антенны становятся неизменными. Чтобы по-прежнему обеспечивать формирование пучка и сканирование пучка, Реконфигурируемый отражатель может быть оснащен перестраиваемыми фазосдвигающими элементами. Кроме того, для изготовления фазовращателей широко используются штыревые диоды, варакторные диоды, микроэлектромеханические системы (МЭМС) и сегнетоэлектрические материалы. Однако они связаны с такими недостатками, как высокие потери, невозможность использования для терагерцовых частот и высокое напряжение смещения [1].

Жидкие кристаллы (ЖК) уже широко используются с терагерцовой технологией и очень подходят для реконфигурируемых отражательных лучей выше 60 ГГц. Благодаря своим диэлектрически регулируемым свойствам фазовращатели, основанные на ЛК, могут

динамически управлять фазой отражения, подавая переменное напряжение смещения. Кроме того, они могут реализовать большой диапазон фазового сдвига и широкую полосу пропускания, что позволяет реконфигурируемому отражателю на основе ЛК увеличить степень свободы для независимого от элементарных ячеек управления и формирования волнового фронта. Кроме того, низкая стоимость изготовления и низкое напряжение смещения определяют их как перспективных кандидатов на терагерцовые реконфигурируемые отражательные лучи. Недавно было сообщено о многих реконфигурируемых отражательных лучах на основе ЖК-дисплеев. Например, была предложена реконфигурируемая антenna на жидкокристаллической основе, и был получен коэффициент усиления 25,1 дБ на частоте 78 ГГц. В 2015 году жидкые кристаллы, работающие выше 100 ГГц, были экспериментально продемонстрированы Перес-Паломино и др. Их исследование показало, что антenna может генерировать электронно управляемый луч в одной плоскости в угловом диапазоне 55°. В 2019 году была предложена отражательная матрица, основанная на жидких кристаллах и технике статического вождения в миллиметровом диапазоне волн. Согласно моделированию, этот отражатель способен к двумерному сканированию пучка. Однако большинство представленных антенн могут выполнять только одномерное (1-D) сканирование пучка. Причина – сложная схема подключения двумерных (2-D) сканирующих антенн пучка, что затрудняет их изготовление.

В данной работе описывается применение нематических ЖК (НЖК) для электрически управляемых реконфигурируемых отражательных лучей ~115 ГГц. Предложена простая, но эффективная схема подключения, которая позволяет осуществлять 2-D сканирование пучка и обеспечивает легкость изготовления. Предложенная отражательная матрица состоит из ячеек фазового сдвига на основе двойных дипольных заплаток размером 39 × 39. Несколько двойных диполей соединены окружающими прямоугольными линиями смещения петли, которые действуют как подмассив. Численное моделирование показывает, что отрицательное влияние добавленных прямоугольных контурных линий смещения на характеристики фазового сдвига незначительно, а количество линий смещения уменьшилось на 89% (например, для элемента фазового сдвига 3 × 3 в качестве подмассива) [2-5].

### Конструкция фазовращателя на основе ЖК-дисплея.

На рисунке 1 показана структура элемента фазовращателя. Элементарная ячейка состоит из двух кварцевых подложек и многослойного слоя NLC. Как наземные, так и двухдипольные резонансные структуры были напечатаны на верхней поверхности нижней и нижней поверхностях верхних кварцевых подложек соответственно. И грунт, и заплаты были сделаны из меди с проводимостью  $5,8 \times 10^7$  с/М. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс потерь кварца составляют  $\epsilon = 3,78$  и  $\tan\delta = 0,002$  соответственно. Чтобы выровнять НЛК в состоянии без напряжения смещения, два тонких выровненных полиимидных слоя были покрыты спином на земле и двойными дипольными заплатками. Прослоенные НЛК представляли собой смеси ЖК (HFUT-HB01) со следующими характерными параметрами для F-диапазона:  $\epsilon_{\perp} = 2,50$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 3,69$  и  $\tan\delta = 0,02$ . Предполагая, что устройство освещается линейной поляризацией и нормальной падающей плоской волной, электромагнитные характеристики устройства были проанализированы и оптимизированы с помощью численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Начальное значение размера заплатка было получено с помощью классической формулы для резонансной частоты заплатка- антенны:

$$L = 12f_r \epsilon_{ref} \sqrt{(\mu_0 \epsilon_0) \sqrt{(-2\Delta L)}} \quad (1)$$

Здесь  $L$  представляет фактическую длину заплатка,  $f_r$  представляет резонансная частота,  $\mu_0$  представляет проницаемости в свободном пространстве,  $\epsilon_0$  представляет диэлектрической проницаемости в свободном пространстве,  $\epsilon_{ref}$  представляет собой

эффективную диэлектрическую проницаемость подложки, и  $\Delta L$  представляет собой удлиненное длина приращения заплатки. Например, используя (1), фактическая длина заплатки составила 713,1 мкм на частоте 115 ГГц.

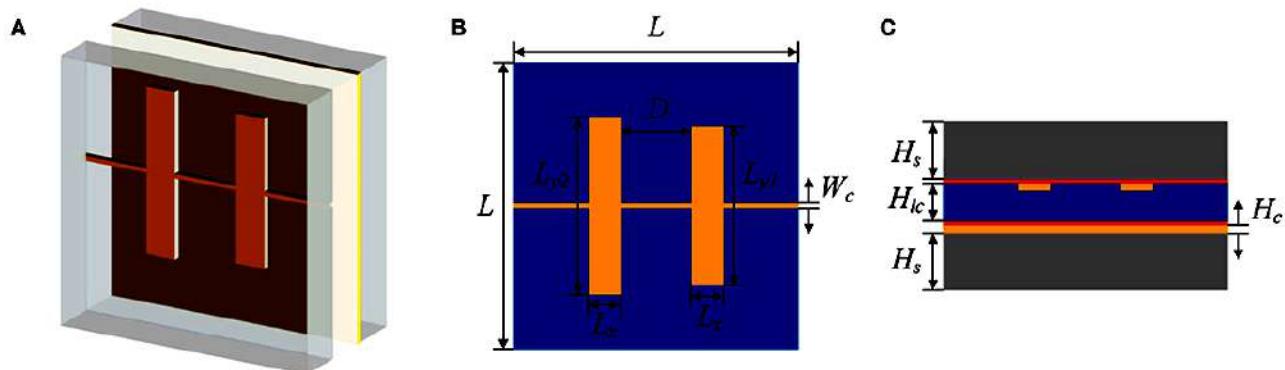


Рисунок 1 – Трехмерная (3-D) принципиальная схема блока фазовращателя (А). Вид сверху на элементарную ячейку (Б). Вид сбоку элементарной ячейки (С).

Другие параметры, такие как ширина диполя и расстояние между двумя диполями, были скорректированы для получения требуемого фазового диапазона и сдвига частоты. Корректировка производилась путем последовательного и независимого изменения каждого параметра. Оптимизированные размеры элементарной ячейки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимизированные размеры элементарной ячейки

Parameters	$L$	$L_x$	$L_{y1}$	$L_{y2}$	$D$	$W_c$	$H_s$	$H_c$	$H_c$
Value (mm)	1.3	0.13	0.626	0.696	0.404	0.01	0.2	0.065	0.001

Отраженный элемент состоит из двух параллельных неравных электрических дипольных пятен, а электрический дипольный резонанс возбуждается линейной поляризацией и нормальной падающей терагерцовой плоской волной. На рисунке 2А показана зависимость амплитуды от частоты для изменения диэлектрической проницаемости от 2,50 до 3,69 и изменения значения между -1,5 дБ и -5,5 дБ на частоте 115 ГГц. Как показано на рисунке 2А, максимальная потеря составляет -7,9 дБ на частоте 104 ГГц, а минимальная -6,4 дБ на частоте 123 ГГц. На рисунке 2В был получен диапазон фазового сдвига 360 для полосы пропускания 7 ГГц, что обеспечивает конструкцию реконфигурируемой антенны из отражательной решетки, и кривая показала хорошую линейность. Вставка на рисунке 2В показывает распределение поверхностного тока вокруг двойных диполей на частоте 115 ГГц. Наибольший ток существует на поверхности диполя, сдвинутого по фазе на резонансной частоте [6-8].

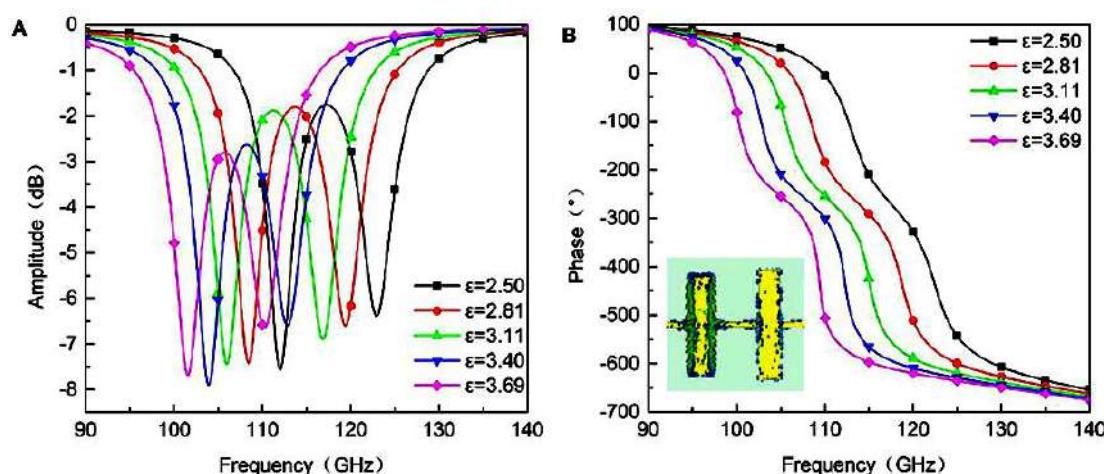


Рисунок 2 – Смоделированная амплитуда (А) и фазовый сдвиг (В) в зависимости от частоты для различных диэлектрических проницаемостей и поверхностного распределения тока вокруг двойного диполя

#### Схема подключения для двумерного сканирования пучка.

Для упрощения большинство известных реконфигурируемых фазовращающих блоков из отражательной решетки соединены одной и той же линией смещения в одном ряду; однако этого недостаточно для 2-Д сканирования пучка. Для достижения лучшего баланса сложности изготовления и производительности сканирования 2-Д пучка вводится компромисс в отношении проводки. Например, для отражателя  $39 \times 39$  каждые три заплатки в одном ряду соединены линией смещения, параллельной оси  $x$ , а каждые три ряда заплатки, описанных выше, окружены прямоугольной линией смещения петли. Линии смещения ствола проходят через зазоры между соседними элементарными ячейками вдоль оси  $x$ , как показано на рисунке 3.

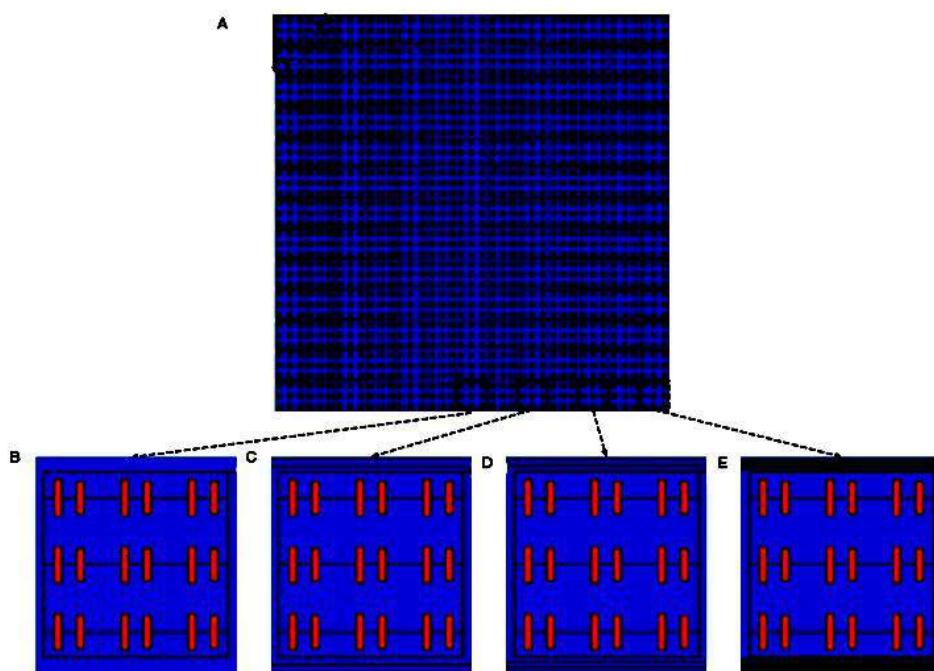


Рисунок 3 – Схема подключения всей антенны (А) и четырех приводных линий расположения поддерева  $3 \times 3$ . Нет линии смещения ствола (В). Две линии смещения ствола (С). Три линии смещения ствола (Д). Пять линий смещения ствола (Е).

Таким образом, напряжение может быть приложено индивидуально к каждому  $3 \times 3$  подмассиву. Все линии смещения и расстояние между соседними линиями смещения магистрали устанавливаются на одинаковую ширину линии (10 мкм). Из-за подмассивов количество ведущих линий значительно уменьшилось. Общее их число сократилось с 1521 до 169, что составляет сокращение на 88,9%.

Влияние различных компоновок приводных линий на характеристики фазового сдвига показано на рисунке 4. Кривая "а" представляет собой фазовый сдвиг по сравнению с относительной диэлектрической проницаемостью для элементов фазовращателя с расположением (B) на рисунке 3. Кривая "b" представляет фазовый сдвиг для расположения (C), (D) и (E) на рисунке 3. Как показано, среднее расхождение фазового сдвига между обоими случаями составляет  $\sim 20^\circ$  от 110 до 115 ГГц, что остается в пределах допуска. Полученные результаты показывают, что влияние различных схем расположения линий смещения на характеристики фазового сдвига было незначительным и поэтому им можно пренебречь. При такой схеме подключения кривые отклика фазы и относительной диэлектрической проницаемости блоков фазового сдвига по-прежнему сохраняют высокую точность. Это свидетельствует о точной фазовой компенсации реконфигурируемых отражательных лучей [9].

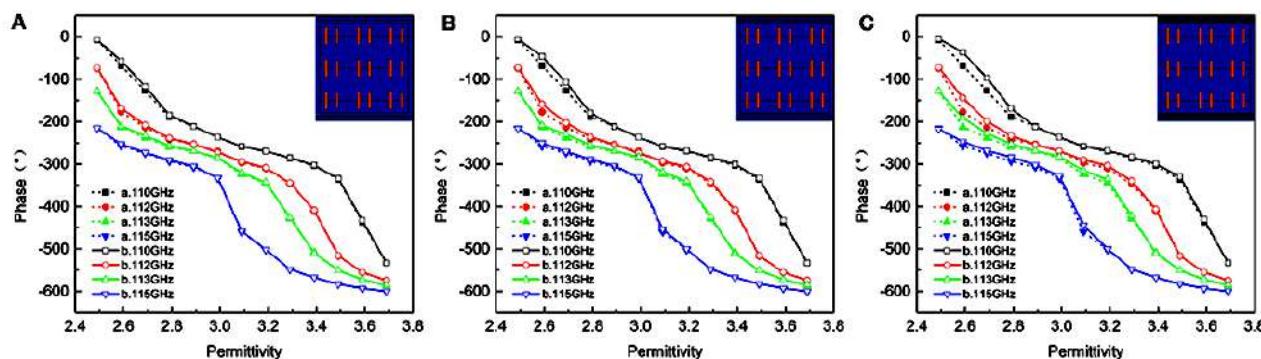


Рисунок 4 – Сравнение характеристик фазового сдвига для различных схем расположения линий смещения. Две линии смещения ствола (A). Три линии смещения ствола (B). Пять линий смещения ствола (C).

#### Расчет и численные результаты рефлекторного массива.

Отражатель состоит из  $39 \times 39$  двухдипольных фазовращательных ячеек общей площадью 50,7 мм  $\times$  50,7 мм. Рисунок 5 показывает схематическое изображение планарной из отражательной решетки. В качестве питающего рога используется пирамидальный рог, расположенный перпендикулярно отражателю. Чтобы гарантировать, что ТМ-поляризованный волна шириной пучка 10 дБ, излучаемая подачей, может охватывать отражатель, расстояние между фазовым центром и центром отражателя устанавливается равным 43,9 мм. Также учитывается ширина луча 10 дБ подачи и апертура матрицы  $30^\circ$  и 50,7 мм соответственно.

Матрица освещается электромагнитной волной, излучаемой от первичной подачи, которая генерирует вторичное излучение после фазовой компенсации элементарных ячеек. Согласно принципу суперпозиции векторного поля, наложенная волна может образовывать основной луч с фиксированным направлением в свободном пространстве. Требуемая фазовая компенсация ( $\Phi_x, y$ ) состоит из двух частей;  $\Phi_1$  компенсирует пространственную фазовую задержку, вызванную различными расстояниями от источника питания до блоков матрицы, а  $\Phi_2$  – плоское фазовое распределение, излучающее электромагнитные волны в направлении главного луча ( $\theta, \phi$ ). Это можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned}\Phi_x, y = \Phi_1 + \Phi_2, \Phi_1 = -k_0 \sin \theta_i \cos \varphi_i x_i - k_0 \sin \theta_i \sin \varphi_i y_i \\ \Phi_2 = -k_0 \sin \theta_i \cos \varphi_i x_i - k_0 \sin \theta_i \sin \varphi_i y_i,\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь  $k_0 = 2\pi/\lambda$  представляет волновое число свободного пространства  $(x_i, y_i)$ , представляет координату для каждого элемента массива, а  $(\theta_i, \varphi_i)$  представляет направление от фазового центра к каждому элементу массива. При подаче напряжения смещения на каждый элемент элементарные ячейки получают соответствующее фазовое распределение  $\Phi_x, y$ .

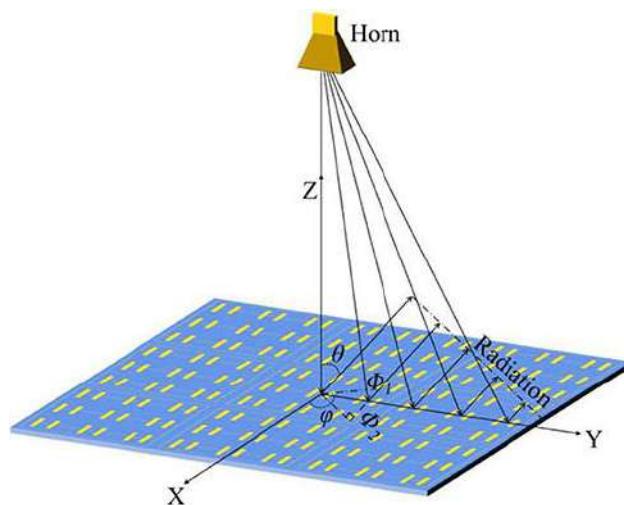


Рисунок 5 – Схема отражающего массива

На рисунке 6 показаны фазовые распределения для углов сканирования  $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ .

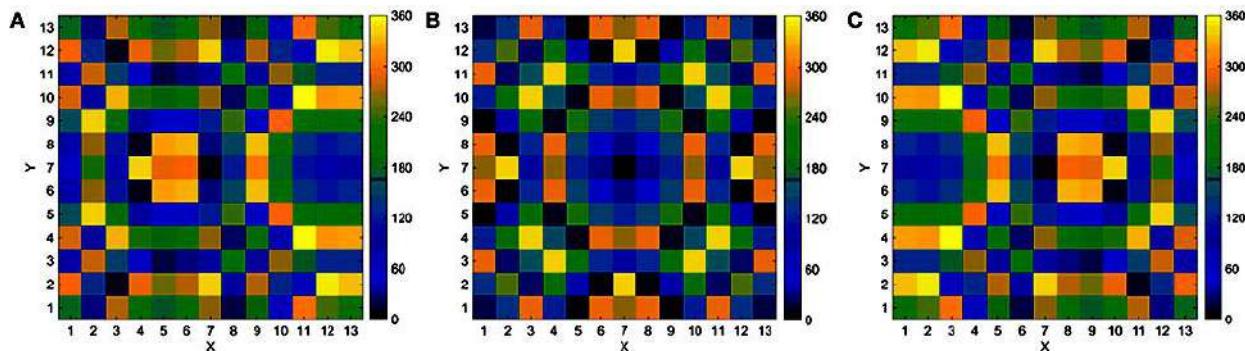


Рисунок 6 – Фазовые распределения для различных углов сканирования  $-10^\circ$  (A),  $0^\circ$  (B) и  $10^\circ$  (C)

Паттерны дальнего поля отражательного массива рассчитываются с использованием моделирования по технологии конечных интегралов (FIT). На рис. 7 показаны результаты моделирования для плоскости возвышения и плоскости Азимута для нескольких углов на частоте 115 ГГц. Для плоскости возвышения отражатель выполняет диапазон сканирования луча  $20^\circ$  с максимальным коэффициентом усиления 16,55 дБи при угле сканирования  $0^\circ$ , в то время как SLLs остается ниже  $-6,6$  дБ для всего диапазона сканирования. Ширина луча половинной мощности (ШЛПМ) составляет  $4,9, 5,6$  и  $5,8^\circ$  при

углах сканирования 0, -10 и 10° соответственно, что указывает на хорошую направленность [10].

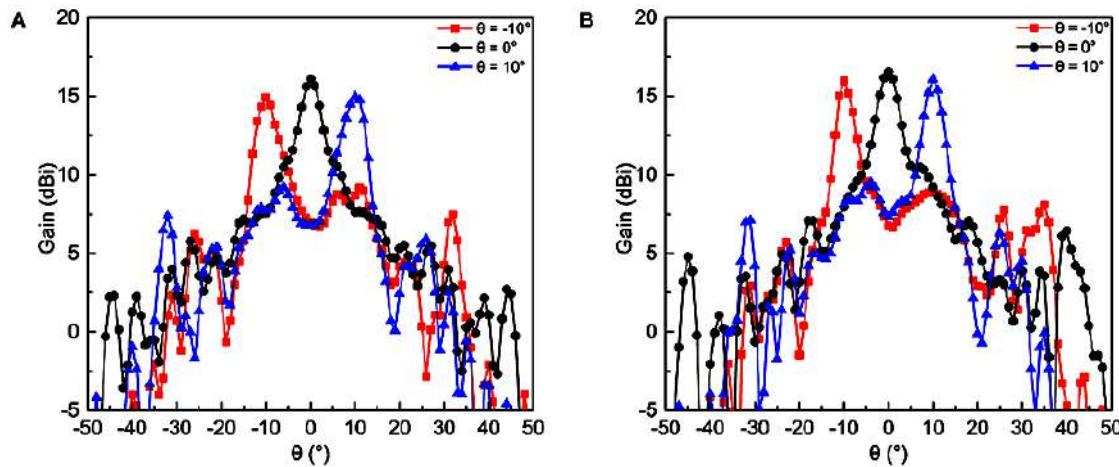


Рисунок 7 – Смоделированы диаграммы направленности излучения на частоте 115 ГГц для азимутального угла  $\phi$  90° (А) и азимутального угла  $\phi$  0° (Б).

Характеристики антенны для азимутальной плоскости несколько отличаются из-за асимметрии структур элементарных ячеек. Диапазон сканирования луча составляет 20°, как показано на рисунке 7В. Максимальный коэффициент усиления составляет 16,09 дБи при угле сканирования 0°, а SLL ниже -6,1 дБ при ШЛПМ 5,7° при угле сканирования 0°.

В таблице 2 приведены подробные электрические характеристики разработанного отражателя для нескольких углов сканирования. Производительность этой антенны улучшится, когда будут использоваться поддерево  $2 \times 2$  и более сложная схема возбуждения.

Таблица 2 – Подробные сведения об электрических характеристиках отражателя для нескольких углов сканирования

Scan angles	0°		-10°		+10°	
	Azimuth angles	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 90^\circ$
Gain (dBi)	16.55	16.09	15.96	14.92	16.07	14.97
SLL (dB)	-8.4	-6.1	-6.6	-5.8	-6.6	-5.8
HPBW (°)	4.9	5.7	5.6	6.5	5.8	6.1

### Вывод.

Разработан двухдипольный фазовращатель с фазовым диапазоном, превышающим 360°. На основе жидкокристаллического фазовращателя представлен электрически управляемый 2-D луч-сканирующий отражатель для F-диапазона. Моделирование показывает, что отражатель достигает максимального усиления (16,55 дБи) для диапазона сканирования 20° и очень низкого SLL -8,4 дБ. Новая антенна может быть использована для терагерцового изображения и обнаружения.

### Литература

1. Nagatsuma T., Ducourneau G., Reno S. Advances in terahertz communication accelerated by photonics. Nat Photon. (2016) 10:371-9.

2. Шишанов С., Быстров А., Хоар Е., Гашинова М., Черняков М. и др. Определение высоты для автомобильных ТГц-радаров. *IEEE Trans Intell Transp Syst.* (2019).
3. Auton G., Zhang Ji, Holm E., Kohila D. Terahertz detection and visualization using graphene ballistic rectifiers. *Nano Lett.* (2017) 17:7015-20. In PubMed.
4. Kawase K. Terahertz visualization of large-scale control of integrated circuits. *Opt-Photonics news.* (2004) 15:34-9. CrossRef Full Text | Google Scholar.
5. Li, Jin T, Ernie D, FC Meng, Wu. Development and numerical demonstration of a 2D mm beam scanning reflector based on liquid crystals and the static driving method. *J Phys D Appl Phys.* (2019) 52:9. CrossRef Full Text | Google Scholar.
6. Yang J, Kay K. G., Yin Z. P., Lu N. V. Reflective liquid crystal terahertz phase shifter with a tuning range of more than 360 degrees. (2018) 12:1466-9.
7. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кучмижак А.А., Емельянов В.И., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В. *Phys. Rev. E*, 023017 (2019).
8. Кучмижак А., Гурбатов С., Кульчин Ю., Витрик О., Макаров С., Кудряшов С., Ионин А. Яблоко. *Surf. Sci.* 337, 224 (2019).
9. Кучмижак А.А., Кучмижак А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Руденко А.А., Кулчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ефимов Т.В. *Opt. Lett.* 40, 1687 (2019).
10. Блохин С.А., Лотт Дж.А., Леденцов Н.Н., Каракинский Л.Я., Кузьменков А.Г., Новиков И.И., Малеев Н.А., Фиол Г., Бимберг Д. Оптические компоненты 25 Гбит/с 850 нм, работающие при 85°C, ESLW 2011, Лозанна, Швейцария, 23-24 сентября 2019 г.

### References

1. Nagatsuma T., Ducourneau G., Reno S. Advances in terahertz communication accelerated by photonics. *Nat Photon.* (2016) 10:371-9.
2. Shishanov S., Bystrov A., Hoar E., Gashinova M., Chernyakov M., et al. Height determination for automotive THz radars. *IEEE Trans Intel Trans System* (2019).
3. Auton G., Zhang Ji, Holm E., Kohila D. Terahertz detection and visualization using graphene ballistic rectifiers. *Nano Lett.* (2017) 17:7015-20. In PubMed.
4. Kawase K. Terahertz visualization of large-scale control of integrated circuits. *Opt-Photonics news.* (2004) 15:34-9. CrossRef Full Text | Google Scholar.
5. Li, Jin T, Ernie D, FC Meng, Wu. Development and numerical demonstration of a 2D mm beam scanning reflector based on liquid crystals and the static driving method. *J Phys D Appl Phys.* (2019) 52:9. CrossRef Full Text | Google Scholar.
6. Yang J, Kay K. G., Yin Z. P., Lu N. V. Reflective liquid crystal terahertz phase shifter with a tuning range of more than 360 degrees. (2018) 12:1466-9.
7. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V. *Phys. Rev. E*, 023017 (2019).
8. Kuchmizhak A., Gurbatov S., Kulchin Y., Vitrik O., Makarov S., Kudryashov S., Ionin A. *Appl. Surf. Sci.* 337, 224 (2019).
9. Kuchmizhak A.A., Kuchmizhak A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Rudenko A.A., Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Efimov T.V. *Opt. Lett.* 40, 1687 (2019).
10. Blokhin S.A., Lott J.A., Ledentsov N.N., Karachinsky L.Ya., Kuzmenkov A.G., Novikov I.I., Maleev N.A., Fiol G., Bimberg D. «25 Gb/s 850 nm optical components operating at 85°C», ESLW 2011, Lausanne, Switzerland, 23-24 Sept. 2019

**БАЙДЕЛЬДИНОВ У.С. – ф-м.ғ.к., доцент (Алматы қ., Қазақ қатынас жолдары университеті)**

**СҰЛТАНГАЗИНОВ С.К. – т.ғ.д., профессор (Алматы қ., Қазақ қатынас жолдары университеті)**

**БОЛҒАНБАЕВ М.К. – магистрант (Алматы қ., Қазақ қатынас жолдары университеті)**

## **ЕКІ ӨЛШЕМДІ ТЕРАГЕРЦ СӘУЛЕЛІ ШАҒЫЛЫСАТЫН АНТЕННА СҮЙЫҚ КРИСТАЛДАР НЕГІЗІНДЕ**

### ***Аңдатпа***

Бұл мақалада сүйық кристаллдарды қолдана отырып, жаңа электронды басқарылатын екі өлшемді сканерлеу сәулесі шағылыштын антенна торы (шағылыштын тордан) зерттелді. Қажетті фазалық өтемақы үшін шағылышу матрицасы үшін фазалық ығысу блогы ретінде екі полюсті резонанстық құрылым қолданылады. Модельдеу көрсеткендегі, шамамен 7 ГГц фазалық ығысу диапазоны үшін 360°-тан жоғары F диапазонында қол жеткізуге болады. Сонымен қатар, ығысу сзығының фазалық ығысу сипаттамаларына жағымсыз әсерін азайтуға және өндіріс процесін жеңілдетуге мүмкіндік беретін жаңа қосылу схемасы ұсынылған. Әзірленген 39 × 39 шағылыштыргышты модельдеу сәулені басқарудың максималды диапазоны, максималды пайды және 115 ГГц жүйлікке бүйірлік жасырақшалардың деңгейі сәйкесінше 20°, 16,55 dBi және -8,4 дБ болатындығын көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** терахерц антеннасы, фазалық ауыстырығыш, сүйық кристалдар, рефлектор, фокустық диаграмма.

**BAIDELDINOV U.S. – c.p-m.s., assoc. professor (Almaty, Kazakh university ways of communications)**

**SULTANGAZINOV S.K. – d.t.s., professor (Almaty, Kazakh university ways of communications)**

**BOLGANBAYEV M.K. – magistrant (Almaty, Kazakh university ways of communications)**

## **TWO-DIMENSIONAL TERAHERTZ BEAM REFLECTION ANTENNA BASED ON LIQUID CRYSTALS**

### ***Abstract***

*In this paper, a new electronically controlled two-dimensional beam-scanning reflective antenna array (from a reflective array) using liquid crystals was investigated. A two-pole resonant structure is used as the phase shift unit for the reflection matrix for the required phase compensation. Simulations show that for a bandwidth of about 7 GHz, a phase shift range of more than 360° can be achieved in the F-band. In addition, a new connection scheme is proposed to reduce the adverse effect of the offset line on the phase shift characteristics and simplify the production process. Simulation of the developed 39x39 reflector shows that the maximum beam control range, maximum gain, and side lobe level at 115 GHz are 20°, 16.55 dBi, and -8.4 dB, respectively.*

**Keywords:** terahertz antenna, phase shifter, liquid crystals, reflector, radiation pattern.