

## РАДИОФОТОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА В ДИАГРАММООБРАЗОВАНИИ ЧАСТОТНО-РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕНН

*В.Д. Андреев, П.Е. Денисенко*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

**Аннотация.** Предложен метод генерации фотонных сигналов для частотно-разнесенных антенных решёток с использованием двух оптических частотных гребёнок, формируемых на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции и умножения частоты. Метод позволяет получать двухканальные сигналы с различным частотным разнесом без применения гибридных ответвителей и сложных модуляторов, что упрощает архитектуру системы и снижает потери. Формируемая диаграмма направленности имеет точечный характер, что повышает разрешающую способность системы.

**Ключевые слова:** частотно-разнесенная антенная решётка, оптическая частотная гребёнка, тандемная модуляция.

### Введение

Технология фазированных антенных решёток (ФАР) широко применяется в радиолокации, связи и других областях благодаря высокой направленности и возможности электронного сканирования [1]. Однако ФАР обладают ограничениями в подавлении боковых лепестков и разделении целей, находящихся на одном направлении, но разных расстояниях. Для решения этих проблем предложены частотно-разнесенные антенные решётки (ЧРАР), в которых каждая антенна излучает сигнал на слегка отличающейся частоте, что позволяет формировать диаграмму направленности, зависящую как от угла, так и от дальности.

Традиционные методы генерации сигналов ЧРАР основаны на электронных схемах, которые страдают от ограниченной полосы пропускания, частотных потерь и электромагнитных помех. Радиофотонные технологии объединяют преимущества оптических и микроволновых систем, обеспечивая широкую полосу пропускания, низкие потери и устойчивость к помехам. Однако существующие фотонные методы генерации сигналов ЧРАР часто требуют множества компонентов, что усложняет систему и увеличивает её стоимость.

В данной работе предлагается упрощённый метод генерации двухканальных сигналов ЧРАР с использованием двух оптических частотных гребёнок, формируемых на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) и умножения частоты. Метод исключает необходимость в гибридных ответвителях и сложных модуляторах, что снижает потери и упрощает архитектуру системы.

## Материалы и методы

Для генерации сигналов ЧРАР предложена схема на основе двух оптических частотных гребёнок (ОЧГ) [2]. Первый канал формирует ОЧГ с подавленной несущей и двухполосной модуляцией (CS-DSB) с большим разносом (до 5 ГГц) с использованием однопортового модулятора с умножением частоты и ТАФМ. Второй канал формирует ОЧГ с малым разносом (около 1 МГц) с использованием однопортового модулятора с умножением частоты и подавлением несущей. Для управления интермодуляционными искажениями используются микроволновые генераторы.

В качестве источников излучения применяются лазеры с узкой спектральной шириной линии. Модуляторы выполнены на основе электрооптических кристаллов. Формирование ОЧГ осуществляется в оптическом диапазоне с последующей фотодетекцией для получения микроволновых сигналов.

## Результаты

Предложенный метод позволяет генерировать двухканальные сигналы ЧРАР с различным частотным разносом без применения гибридных ответвителей и сложных модуляторов. Это упрощает архитектуру системы, снижает потери и повышает стабильность работы. Формируемая диаграмма направленности имеет точечный характер, что обеспечивает высокое разрешение по углу и дальности.

Использование двух ОЧГ позволяет независимо управлять разносом частот в каждом канале, что обеспечивает гибкость в формировании диаграммы направленности. Отсутствие гибридных ответвителей снижает потери и упрощает настройку системы.

## Заключение

Разработан метод генерации фотонных сигналов для ЧРАР, основанный на использовании двух ОЧГ, формируемых с помощью ТАФМ и умножения частоты. Метод позволяет упростить архитектуру системы, снизить потери и повысить стабильность работы. Формируемая диаграмма направленности имеет точечный характер, что улучшает разрешающую способность системы. Предложенный подход может быть использован в современных радиолокационных и коммуникационных системах высокого разрешения.

## Благодарность

Авторы выражают благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Морозову О.Г.

## Список литературы

1. Mo, B. Photonic-Assisted Frequency Diverse Array / B. Mo, J. Chen, C. Li et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2024. – Vol. 72. – № 10. – С. 6020-6032.
2. Аль-Муфти, А.М. Широкополосные и сверхузкополосные пакеты дискретных частот для решения задач спектральной настройки восходящих каналов волоконно-оптических транспортных доменов сетей доступа мобильной связи 5G+ / А.М. Аль-Муфти, В.С. Соколов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2025. – Т. 5. – № 1. – С. 64-89.

## MICROWAVE PHOTONICS TECHNOLOGIES AND THEIR ADVANTAGES IN THE RADIATION PATTERN FORMATION OF FREQUENCY-SEPARATED ANTENNAS

*V.D. Andreev, P.E. Denisenko*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

**Abstract.** A method for generating photonic signals for frequency diverse arrays (FDA) using two optical frequency combs (OFC) based on tandem amplitude-phase modulation and frequency multiplication is proposed. The method allows obtaining two-channel signals with different frequency offsets without hybrid couplers and complex modulators, which simplifies the system architecture and reduces losses. The formed radiation pattern has a point-like shape, which improves the resolution of the system.

**Keywords:** frequency diverse array, optical frequency comb, tandem modulation.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.