

## ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ

*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.** Исследована возможность применения метода тандемной амплитудно-фазовой модуляции Ильина–Морозова в формирователях сигналов для частотно-разнесенных антенных решёток. Показано, что её использование позволяет достичь подавления несущей до 60 дБ, что существенно выше, чем в традиционных схемах на амплитудных модуляторах Маха–Цендера. Предложенный подход позволяет снизить погрешности диаграммообразования и повысить стабильность работы системы.

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

### Введение

В современных формирователях сигналов для частотно-разнесенных антенных решёток (ЧРАР) широко применяются электрооптические модуляторы, работающие в режимах однополосной или двухполосной модуляции с подавленной несущей [1]. Однако такие схемы обладают рядом недостатков: необходимость фазового сдвига на  $90^\circ$  в широкой полосе частот, узкополосность, неполное подавление боковых полос или несущей. В частности, при использовании амплитудного модулятора Маха–Цендера (АММЦ) в режиме «нулевой» рабочей точки не обеспечивается полное подавление несущей, что приводит к появлению паразитных биений и погрешностям диаграммообразования.

В данной работе рассматривается применение метода тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) Ильина–Морозова [2] для формирования сигналов ЧРАР. Данный метод позволяет достичь глубокого подавления несущей (до 60 дБ) и обеспечивает компактный спектр излучения, что способствует повышению точности и стабильности диаграммообразования.

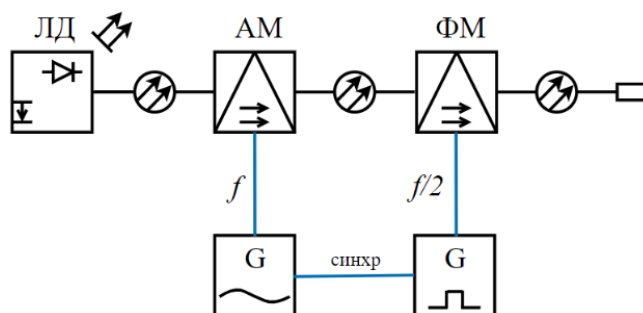


Рис. 1. Формирователь ТАФМ

## Материалы и методы

В основе предлагаемого подхода лежит метод ТАФМ, реализуемый с помощью каскадного включения амплитудного и фазового модуляторов. Структурная схема формирователя ТАФМ представлена на рисунке 1.

Управляющие напряжения амплитудного  $U_{AM}(t)$  и фазового  $U_{PM}(t)$  модуляторов формируются синфазно, что обеспечивает необходимое спектральное преобразование. Временная диаграмма напряжённости электрического поля оптического излучения на выходе формирователя  $E_{ТАФМ}(t)$  и его спектр  $E_{ТАФМ}(\omega)$  представлены на рисунке 2.

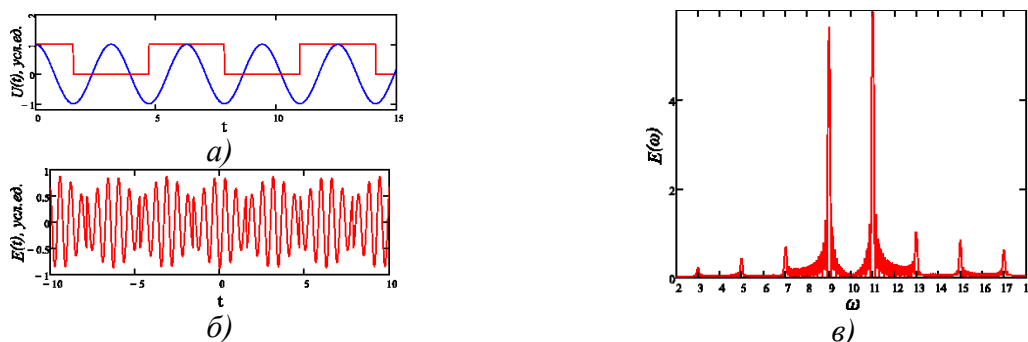


Рис. 2. Формирование ТАФМ излучения: а) напряжения амплитудного и фазового модуляторов, б) сигнал ТАФМ, в) спектр ТАФМ

Анализ спектра показывает, что несущая частота полностью подавлена, а боковые гармоники разнесены с шагом  $\omega$ . Для минимизации влияния гармоник высокого порядка, в частности составляющих на частотах  $\omega \pm 3\Omega/2$ , предложено оптимизировать глубину амплитудной модуляции  $M$ . На рисунке 3 представлен спектр излучения для  $M \sim 0.62$ , при котором амплитуда указанных гармоник минимальна.

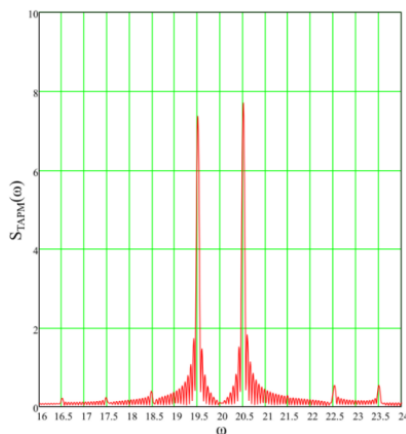


Рис. 3. Спектр излучения ТАФМ для  $M \sim 0.62$

## Результаты

Применение метода ТАФМ позволяет достичь подавления несущей до 60 дБ, что значительно превышает возможности стандартного АММЦ (подавление не более 20 дБ). Это устраняет основную причину погрешностей диаграммообразования, связанную с биениями между управляющими частотами и остаточной несущей.

Спектральный анализ показал, что оптимальная глубина амплитудной модуляции  $M \sim 0.62$  позволяет минимизировать амплитуду наиболее значимых паразитных гармоник (на частотах  $\omega \pm 3\Omega/2$ ), что дополнительно снижает уровень нежелательных биений.

Таким образом, использование формирователя на основе ТАФМ обеспечивает компактный и управляемый спектр излучения, что критически важно для точного диаграммообразования в ЧРАР.

### Заключение

Предложен метод применения тандемной амплитудно-фазовой модуляции для формирования сигналов в частотно-разнесенных антенных решётках. Показано, что данный метод позволяет достичь глубокого подавления несущей (до 60 дБ) и эффективно управлять спектральным составом излучения за счёт вариации глубины модуляции. Это обеспечивает значительное снижение погрешностей диаграммообразования, вызванных паразитными биениями, и повышает стабильность работы системы. Результаты работы могут быть использованы для разработки высокоточных формирователей сигналов для современных радиолокационных и коммуникационных систем на основе ЧРАР.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность за научное руководство профессору кафедры радиопотоники 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. Талипов, А.А. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов, О.Г. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – Т. 2. – № 16. – С. 3-12.

## RADIATION PATTERN OF FREQUENCY-SEPARATED ANTENNAS USING AN AMPLITUDE-PHASE SHAPER

*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

**Absrtact.** The method of applying the Il'in–Morozov tandem amplitude-phase modulation method to signal shapers for frequency diverse arrays is investigated. It is shown that the use of it enables carrier suppression up to 60 dB, which is significantly higher than in conventional Mach–Zehnder amplitude modulator schemes. Analysis of the radiation spectral characteristics demonstrates the ability to control the harmonic composition and minimize beat notes by optimizing the modulation depth. The proposed approach reduces pattern formation errors and improves system stability.

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

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.