

ФОТОННЫЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ДВУХЧАСТОТНЫХ РАДИОНЕСУЩИХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ЧАСТОТНО-РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

О.Г. Морозов, Г.С. Потанов, Г.А. Морозов, И.И. Нуреев, Т.Р. Шагвалиев

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

Аннотация. В статье представлен фотонный метод генерации двухчастотных радионесущих для формирования диаграммы направленности (ДН) линейных симметричных частотно-разнесенных антенных решеток (ЧРАР). В отличие от существующих работ реализация метода основана на применении технологии двухкомпонентных комбгенераторов, а именно, двух формирователей оптических двухчастотных гребёнок (ОДЧГ) с одинаковой частотой повторения каждой двухчастотной группы (межгрупповой частотой ω). Метод теоретически промоделирован и верифицирован по результатам численного эксперимента. В рассматриваемом примере генерируются пять групп радионесущих для пятиэлементной линейной симметричной ЧРАР на частотах $\Omega \pm n\Delta\omega$. Неравномерность мощности частотных компонент составляет 0,2 дБ при уровне подавления паразитных излучений более 40 дБ, что в 2 раза больше, чем у известных реализаций аналогичного конструктивного уровня. Оценена возможность получения более высокого разрешения по дальности и углу за счет увеличения числа каналов и элементов, а также величины частотного декремента.

Ключевые слова: оптическая двухкомпонентная частотная гребенка, двухчастотные несущие, диаграммообразование, линейная симметричная частотно-разнесенная антенная решетка, модулятор Маха-Цендера, тандемный амплитудно-фазовый модулятор, радиофотонная локация.

Введение

Благодаря своим неотъемлемым преимуществам, таким как высокий коэффициент усиления, гибкие возможности сканирования и надежная защита от помех, технология фазированных антенных решеток (ФАР) нашла широкое применение в различных областях, включая все сферы локационных измерений [1]. Однако сигналы, передаваемые каждым элементом ФАР частотно коррелированы, поэтому их диаграмма направленности (ДН) в пространстве определяется исключительно угловыми характеристиками. Такая ДН накладывает определенные ограничения при оценке положения пространственных целей. В частности, может быть сложно различить несколько целей, которые выровнены в одном направлении, но находятся на разных расстояниях.

Для решения этих проблем в 2006 году впервые была представлена новая система построения радиолокационных антенных решеток – частотно-разнесенная антенная решетка (ЧРАР) [2]. В ЧРАР вводится уникальный (адресный) частотный сдвиг между несущими соседних элементов, что позволяет ДН быть чувствительной как к углу положения цели, так и к расстоянию до нее. Эта особенность открывает многообещающий потенциал и для приложений, отличающихся от радиолокационных, но зависящих от расстояния, а именно подавления помех в главном лепестке, повышение скрытности радиочастотного обмена и обеспечение секретности каналов связи [3].

Традиционные линейные фиксированные ЧРАР имеют характерную S-образную пространственную ДН, что приводит к рассредоточению излучаемой энергии. Недостаточная концентрация энергии делает решетку уязвимой к помехам и шумам под различными углами и положениями, а также увеличивает риск обнаружения сигнала сторонними объектами. Поэтому достижение более сфокусированной ДН с одновременным разделением по дальности и угловым размерам стало ключевой задачей для повышения практических характеристик ЧРАР.

В настоящее время существует два подхода к оптимизации решения проблемы формирования ДН ЧРАР, включая оптимизацию устройств смещения частоты и оптимизацию структуры самой антенной решетки.

В области оптимизации традиционных ЧРАР используется линейная частотная модуляция непрерывного излучения на двух несущих для получения ДН с концентрированными точками усиления, применяется структура решетки с несколькими несущими, что обеспечивает эффективное разделение угловых и дистанционных измерений и демонстрирует преимущество высокой степени свободы. В [4] предложена X-образная пространственная ДН с использованием симметричной ЧРАР.

Однако большинство исследований в области ЧРАР сосредоточено на генерации несущих только электронными методами, что приводит к ряду ограничений, включая узкую полосу пропускания, частотно-зависимые потери, паразитные искажения и уязвимость по электромагнитным помехам. Эти проблемы мешают ЧРАР удовлетворять растущим требованиям к современным радиолокационным системам высокого разрешения [5].

Радиофотоника (РФ), как развивающаяся междисциплинарная технология, объединяет уникальные преимущества радиочастотных, в основном, микроволновых, и фотонных технологий, предлагая новый подход к генерации, передаче и обработке диаграммообразующих и информационных сигналов [6-9] в оптическом диапазоне. По сравнению с частотным диапазоном микроволновых сигналов несущая частота оптического диапазона частот значительно выше на 3-5 порядков, что указывает не только на существенно более широкую доступную полосу пропускания при использовании технологий РФ, но и на расширенный рабочий частотный спектр. Более того, частотная характеристика фотонных устройств не только практически плоская, но и легко перестраиваемая, что значительно повышает гибкость и реконфигурируемость генерации микроволновых сигналов. Достижения в области радиофотонной локации привлекли широкое внимание как в академических, так и в промышленных кругах. Это внимание вполне заслужено, учитывая быстрое развитие технологии, которое доказало большой потенциал РФ в генерации и обработке радиолокационных сигналов [10-13].

Однако методы и устройства радиофотонных ЧРАР, как правило, сложны. Для достижения многоканальной генерации несущих ЧРАР требуется много электрооптических и фотозлектрических устройств, пропорциональных количеству каналов, что делает расширение каналов дорогостоящим [14]. В [15] была предложена схема генерации многоканальных сигналов с использованием оптических одночастотных гребенок (ООЧГ), которая может эффективно снизить затраты. Тем не менее, достижение смещений частоты по-прежнему требует высокочастотных электрических гибридных ответвителей и структурно сложных электрооптических модуляторов. Эти компоненты не только усложняют рабочий процесс и увеличивают нестабильность, но и приводят к большим потерям. Таким образом, эти ограничения указывают на острую потребность в упрощенных архитектурах, способных генерировать точечные ДН на простых некомбинированных электрооптических модуляторах.

За последние два года были представлены системы генерации двухкомпонентных радионесущих для диаграммообразования ЧРАР на основе ОДЧГ [16-18]. Однако в [16] генерируются сигналы диаграммообразования ЧРАР только с ограниченным количеством элементов. В [17] и [18] представлена неоднородная ЧРАР, способная формировать точечную

диаграмму направленности и разделять угол и расстояние. Однако ее реализация требует большего количества элементов, что приводит к увеличению сложности системы.

В [19], используя преимущества технологии РФ, предложен и экспериментально подтвержден новый метод генерации диаграммообразующих сигналов с двумя несущими. По сравнению с симметричными ЧРАР на ООЧГ, предлагаемый метод вдвое сокращает количество элементов решетки, достигая при этом формирования не менее эффективных ДН, тем самым снижая сложность и трудность реализации. Однако, применение в них однополосных модуляторов или устройств сдвига частоты, а также задающих генераторов радиосигналов с откликом частоты в четвертом знаке сильно снижают стабильность и чистоту спектра сгенерированных несущих.

В [20] представлен метод фотонной генерации сигнала с двумя несущими с использованием двух комбгенераторов оптических частотных гребёнок: ОДЧГ и ООЧГ. Схема, реализующая метод, способна генерировать сигналы с двумя несущими для пятиэлементной ЧРАР без использования электрических гибридных ответвителей и сложных модуляторов, что позволяет получать точечные ДН. В частности, два амплитудных модулятора Маха-Цендера (ММЦ) формируют две ООЧГ с разными свободными спектральными диапазонами. Одна из ООЧГ дополнительно модулируется еще одним амплитудным ММЦ для получения ОДЧГ с подавленными компонентами исходной ООЧГ. Фотосмещение ОДЧГ и ООЧГ позволяет генерировать симметричные диаграммообразующие сигналы ЧРАР с двумя несущими с адресным частотным разносом для разных элементов. Однако, при реализации наблюдаются паразитные составляющие менее с частотой менее адресной, в основном из-за нелинейности цифро-аналогового преобразователя генератора сигналов произвольной формы и усилителя мощности, используемых для формирования и усиления сигнала ООЧГ, подаваемого в дополнительный ММЦ. Высшие гармоники адресной частоты обусловлены, главным образом, неполной фильтрацией нежелательных боковых полос из других каналов. Джиттер мощности между каналами в основном вызван смещением точек смещения ММЦ, что может быть, но не всегда, эффективно устранено путем интеграции в структуру контроллера напряжения смещения.

Цель работы – снижение уровня паразитных составляющих в спектре двухчастотных радионесущих с сохранением простоты конструкции.

Структура статьи следующая. В разделе 1 излагаются принципы предлагаемого метода генерации сигналов диаграммообразования ЧРАР с двумя радионесущими. В разделе 2 описываются условия проведения компьютерного эксперимента, а также анализируются полученные экспериментальные результаты в радиотехническом диапазоне. Наконец, в заключение предлагаются основные направления дальнейших исследований

1. Теоретическое обоснование принципов фотонной генерации адресных двухчастотных радионесущих на основе пары оптических двухкомпонентных частотных гребенок

В данной работе для генерации адресных двухчастотных несущих для формирования ДН в линейной n -элементной ЧРАР ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) требуется применение лазера, работающего на частоте ω_0 , пары параллельных комбгенераторов ОДЧГ, n -канального мультиплексора и n фотоприемников. Первый комбгенератор состоит из последовательно установленных генератора оптической однокомпонентной частотной гребёнки (ООЧГ) на основе амплитудного модулятора Маха-Цендера (ММЦ), работающего в режиме умножения межканальной частоты ω , и тандемного амплитудно-фазового модулятора (ТАФМ) [21-22] для получения равномерной ОДЧГ с составляющими на частотах $n\omega \pm \Omega/2$, где Ω – частота сплиттирования компонент ОДЧГ первого комбгенератора. При этом спектр первой ОДЧГ состоит из двухчастотных компонент на частотах $\omega_0 \pm \Omega/2$ для ($n=0$) и $\omega_0 + n\omega \pm \Omega/2$ для ($n \neq 0$),

частотные компоненты ω_0 и $\omega_0+n\omega$ подавлены. Второй комбгенератор состоит из генератора равномерной ОДЧГ на основе одного ММЦ, работающего в режиме умножения межканальной частоты ω элементов ЧРАР, сплиттированных на величину адресной частоты каждого канала. При этом спектр второй ОДЧГ состоит из одночастотной несущей центрального канала ($n=0$) на частоте ω_0 и двухчастотными компонентами правых и левых каналов ($n\neq 0$), сплиттированных на адресную частоту $\omega_0+n(\omega\pm\Delta\omega/2)$, где $\Delta\omega$ – опорная межэлементная частота смещения, а частотные компоненты $\omega_0+n\omega$ подавлены. Разделенные в каналах мультиплексора суммарные компоненты обоих ОДЧГ, после фотосмещения в фотоприемниках формируют адресные двухчастотные радионесущие, которые позволяют создавать точечные ДН симметричных ЧРАР без применения однополосных модуляторов и устройств сдвига частоты, а также задающих генераторов радиосигналов с отличием частоты в четвертом знаке. В рассматриваемом примере генерируются пять адресных радионесущих элементов симметричной линейной ЧРАР с частотой $\Omega\pm n\Delta\omega$.

Схема реализации предлагаемого метода фотонной генерации адресных двухчастотных радионесущих на основе пары ОДЧГ представлена на рис. 1.

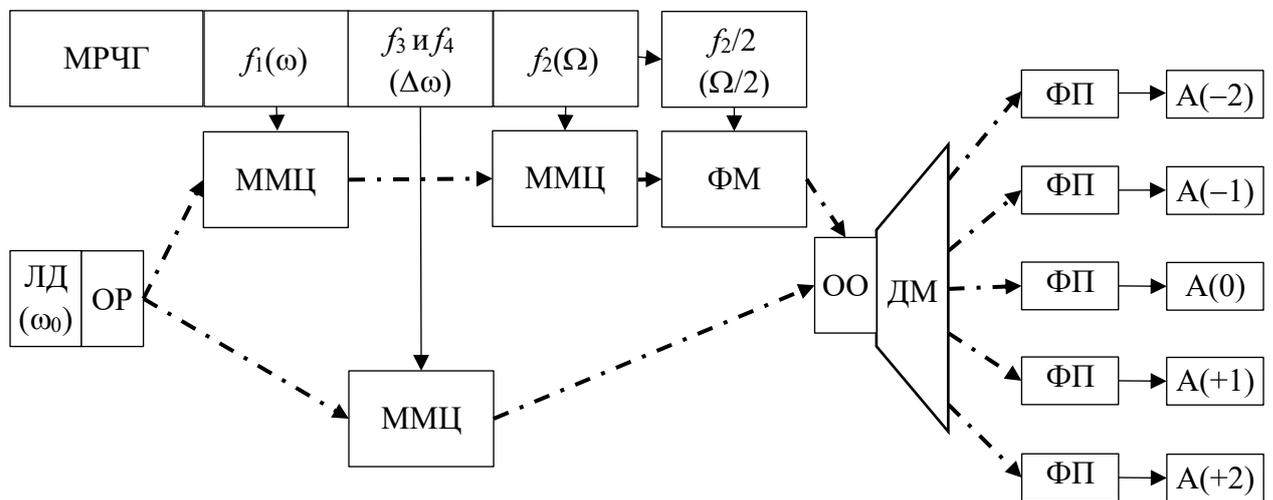


Рис. 1. Структурная схема фотонного генератора адресных двухчастотных радионесущих

В ней используется лазерный диод (ЛД), излучение которого разделено на верхний и нижний каналы оптическим разветвителем (ОР). Каждый канал содержит комбгенератор ОДЧГ, выходы которых объединены оптическим объединителем (ОО), соединенным с пятиканальным демультиплексором (ДМ), каждый выход которого через фотоприемник (ФП) нагружен на усилитель мощности антенного элемента $A(N)$ ЧРАР.

Управление комбгенераторами осуществляется с помощью модуля радиочастотных генераторов (МРГ). В модуле формируются: частота f_1 , соответствующая межканальной частоте ω ; частота f_2 , соответствующая разностной частоте Ω между компонентами верхнего ОДЧГ, частоты f_3 и f_4 , соответствующие опорной адресной частоте $\Delta\omega$ между компонентами нижнего ОДЧГ. Частота f_1 подается на вход ММЦ, а частота f_2 подается на вход ТАФМ верхнего плеча. Частоты f_3 и f_4 подаются на вход ММЦ нижнего плеча.

Рабочие точки смещения для ММЦ обоих каналов и ТАФМ выбираются в области квадратуры, а величина модулирующего напряжения – подбирается исходя из необходимого числа компонент ОДЧГ и обеспечения подавления компонент канальных частот демультиплексора.

Первый комбгенератор верхнего канала состоит из последовательно установленных генератора ООЧГ на основе амплитудного модулятора Маха-Цендера (ММЦ), работающего в режиме умножения межканальной частоты ω , и тандемного амплитудно-фазового модулятора (ТАФМ) для получения равномерной ОДЧГ с составляющими на частотах $\omega_0 \pm \Omega$, где 2Ω – частота сплиттирования компонент ОДЧГ первого комбгенератора.

Предполагая, что поле ЛД равно $E_{in} = E_0 e^{j\omega_0 t}$, где E_0 обозначает амплитуду оптического поля, а ω_0 – угловую частоту оптической несущей. Тогда оптическое поле на выходе ММЦ верхнего канала можно выразить как:

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [J_n(m_1) \exp j(n\omega t + \varphi_1) - J_n(m_1) \exp j(n\omega t - \varphi_1)], \quad (1)$$

где J_n обозначает функцию Бесселя первого рода n -го порядка; $m_1 = V_{f1}/V_\pi$ – индекс модуляции радиочастотным сигналом f_1 ; $\varphi_1 = \pi V_{dc1}/V_\pi$ – фазовый сдвиг, вызванный постоянным напряжением, приложенным к ММЦ верхнего канала, а V_π – его полуволновое напряжение.

Поставим задачу получения пятикомпонентной ООЧГ с равными амплитудами $E_0 = E_{\pm 1} = E_{\pm 2}$. Исходя из (1), опишем искомые компоненты:

$$E_0 = \frac{E_{in}}{2} J_0(m_1) [\exp(j\varphi_1) + \exp(-j\varphi_1)] \cos \omega_0 t, \quad (2)$$

$$E_{\pm 1} = \frac{E_{in}}{2} J_{\pm 1}(m_1) [\exp(j\varphi_1) + \exp(-j\varphi_1)] \cos(\omega_0 \pm \omega)t, \quad (3)$$

$$E_{\pm 2} = \frac{E_{in}}{2} J_{\pm 2}(m_1) [\exp(j\varphi_1) + \exp(-j\varphi_1)] \cos(\omega_0 \pm 2\omega)t. \quad (4)$$

Для равенства амплитуд необходимо выполнить условия для четных и нечетных компонент:

$$J_0(m_1) = J_2(m_1), \quad (5)$$

$$J_0(m_1) [\exp(j\varphi_1) + \exp(-j\varphi_1)] = J_1(m_1) [\exp(j\varphi_1) - \exp(-j\varphi_1)]. \quad (6)$$

Равенства в (2) и (3) выполняются при $m_1 = 1,84$ и $\varphi_1 = 0,5$.

Для получения ОДЧГ подадим полученную гребенку на ТАФМ. В этом случае каждая компонента ООЧГ, разнесенная на частоту f_1 , сплиттирована на две с разностной частотой f_2 :

$$E_0 = \xi_1 \cos(\omega_0 \pm \Omega/2)t, \quad (7)$$

$$E_{\pm 1} = \xi_1 \cos(\omega_0 \pm \omega \pm \Omega/2)t, \quad (8)$$

$$E_{\pm 2} = \xi_1 \cos(\omega_0 \pm 2\omega \pm \Omega/2)t, \quad (9)$$

где ξ_1 – амплитудная составляющая, зависящая от преобразования амплитуды E_{in} в ММЦ и ТАФМ, а также потери модуляторов, при этом межканальная частота подавлена.

Второй комбгенератор нижнего канала состоит из амплитудного модулятора Маха-Цендера (ММЦ), работающего в режиме умножения межканальной частоты ω и разностной частоты $\Delta\omega = 2\pi(f_4 - f_3)$ для получения неравномерной ОДЧГ с составляющими на частотах $n(\omega \pm \Delta\omega)$, где $\Delta\omega$ – частота сплиттирования компонент ОДЧГ второго комбгенератора.

При сохранении условий $m_1 = 1,84$ и $\varphi_1 = 0.5$ в ММЦ нижнего канала получим ОДЧГ, которая описывается следующими выражениями:

$$E_0 = \xi_2 \cos \omega_0 t, \tag{10}$$

$$E_{\pm 1} = \xi_2 \cos(\omega_0 \pm \omega \pm \Delta\omega)t, \tag{11}$$

$$E_{\pm 2} = \xi_2 \cos(\omega_0 \pm 2\omega \pm 2\Delta\omega)t, \tag{12}$$

где ξ_2 – амплитудная составляющая, зависящая от преобразования амплитуды E_{in} в ММЦ нижнего плеча, а также потери модулятора, при этом межканальная частота подавлена.

Спектр обоих ОДЧГ показан на рис. 2.

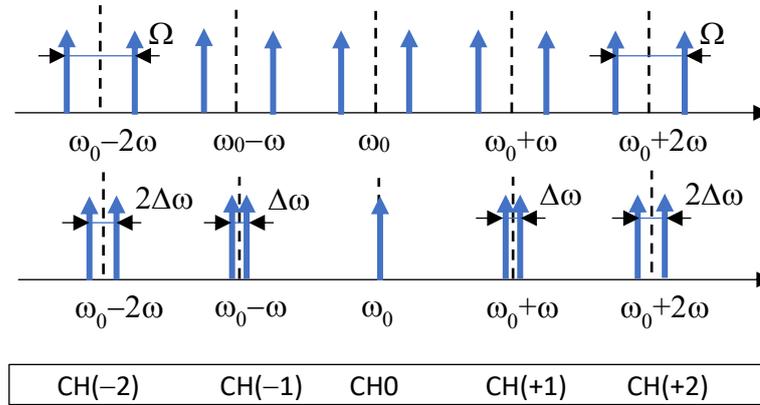


Рис. 2. Спектр ОДЧГ обоих комбгенераторов верхнего и нижнего плеча для формирования канальных сигналов мультиплексора CH(N)

Таким образом, спектр первой ОДЧГ состоит из двухчастотных компонент на частотах $\omega_0 \pm \Omega$ для ($n=0$) и $\omega_0 + n\omega \pm \Omega/2$ для ($n \neq 0$), частотные компоненты ω_0 и $\omega_0 + n\omega$ подавлены. Второй комбгенератор состоит из генератора равномерной ОДЧГ на основе одного ММЦ, работающего в режиме умножения межканальной частоты ω элементов ЧРАР, сплиттированных на величину адресной частоты каждого канала. При этом спектр второй ОДЧГ состоит из одночастотной несущей центрального канала ($n=0$) на частоте ω_0 и двухчастотными компонентами правых и левых каналов ($n \neq 0$), сплиттированных на адресную частоту $\omega_0 + n(\omega \pm \Delta\omega)$, где $\Delta\omega$ – опорная межэлементная частота смещения, а частотные компоненты $\omega_0 + n\omega$ подавлены.

Членами более высокого порядка пренебрегаем, поскольку их можно легко отфильтровать с помощью фильтра нижних частот в практических приложениях, чтобы избежать снижения отношения сигнал/шум диаграммы направленности радара.

Оптические сигналы обоих ОДЧГ через ОО поступают в ДМ, в котором делятся на N каналов, например, пять, соответствующих числу каналов ЧРАР: CH(-2), CH(-1), CH(0), CH(+1), CH(+2), как показано на рис. 2.

Далее они отправляются на канальные фотоприемники, в которых генерируются двухчастотные радионесущие:

$$I_{CHN} = \xi_1 \xi_2 \Re \cos \left\{ 2\pi \left[f \pm n \left(\Delta f / 2 \right) \right] \right\} t, \tag{13}$$

где \Re – чувствительность ФП, $f = 2\pi/\Omega$, $\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, а $n = 0, \pm 1, \pm 2$ симметрично от минимального к максимальному распределены по каналам N .

Проведем компьютерное моделирование формирователя.

2. Результаты компьютерного моделирования

В компьютерной модели формируются: частота $f_1=16$ ГГц, соответствующая межканальной частоте ω ; частота $f_2=4$ ГГц, соответствующая разностной частоте Ω между компонентами верхнего ОДЧГ, частоты $f_3=15,999$ ГГц и $f_4=16,001$ ГГц, соответствующие опорной адресной частоте $\Delta\omega$ между компонентами нижнего ОДЧГ. Частота f_1 подается на вход ММЦ, а частота f_2 подается на вход ТАФМ верхнего плеча. Частоты f_3 и f_4 подаются на вход ММЦ нижнего плеча. Рабочие точки смещения для ММЦ обоих каналов и ТАФМ выбираются в области квадратуры, а величина модулирующего напряжения – подбирается исходя из необходимого числа компонент ОДЧГ и обеспечения подавления компонент канальных частот демультиплексора.

Как показано в (13) и на рис. 3, модель формирует пять каналов сигнала диаграммообразования ЧРАР с двумя радионесущими с центральной частотой Ω и смещением частоты $n\Delta\omega$.

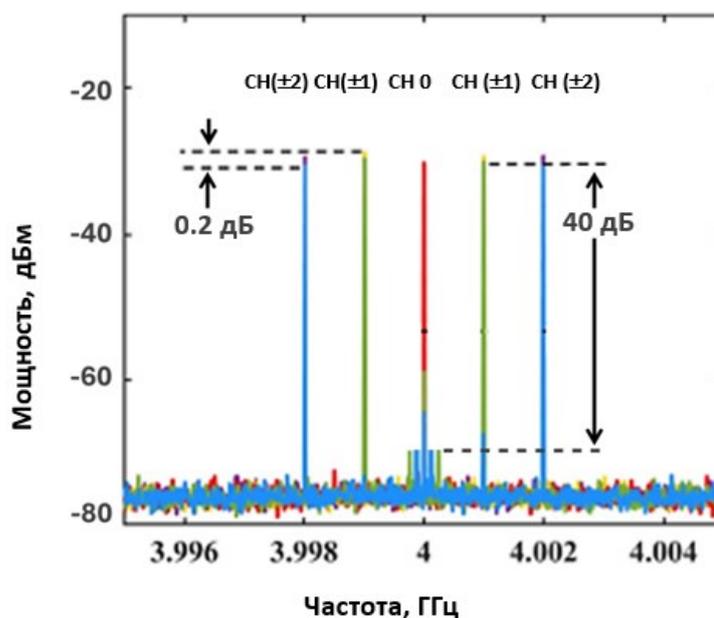


Рис. 3. Спектр сгенерированных адресных двухчастотных радионесущих для пятиэлементной ЧРАР

Микроволновые пары частот, сгенерированные для пяти каналов, составляют 3,998 и 4,002 ГГц, 3,999 и 4,001 ГГц, 4 ГГц, 4,001 и 3,999 ГГц, 4,002 и 3,998 ГГц соответственно. Смещение частоты от элемента к элементу составляет 1 МГц. Используя модуляторы с более широкой полосой пропускания, можно генерировать ОДЧГ с большей межканальной частотой или для большего числа элементов. При моделировании предполагалось применение 40 ГГц ММЦ.

Как показано на рис. 3, сгенерированные сигналы диаграммообразования имеют уровень мощности 40 дБ и демонстрируют неравномерность мощности 0,2 дБ. Обратим внимание, что поскольку несущие в каналах являются результатом биения двух компонент, отсутствует необходимость ослабления мощности в центральном канале CH0 с помощью специально разработанных фильтров, что отмечено в работах прототипах [], в которых используется ОДЧГ в верхнем канале и ООЧГ в нижнем.

Джиттер мощности между каналами в основном вызван смещением рабочей точки модуляторов, что может быть эффективно устранено путем интеграции в структуру формирователя контроллера напряжения смещения.

Преимущества, достигнутые при реализации предложенного метода по сравнению с существующими представлены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительный анализ характеристик формирователей двухчастотных радионесущих для ЧРАР РТД

Основные элементы формирователя ДОГ	Спектральная чистота, дБм	Разрешение по дальности, м	Разрешение по углу, °
Пять PDM-DPMZM [19]	35	40	20
Три АММЦ [20]	23,3	45	22
АММЦ, ТАФМ, АММЦ [данная статья]	40	30	15

Наблюдаемые паразитные составляющие менее 1 МГц на частоте 4 ГГц обусловлены, главным образом, неполной фильтрацией не до конца подавленных межканальных частот первого комбгенератора. Использование ТАФМ позволяет уменьшить этот эффект практически в два раза (табл. 1).

Смещение частоты и центральную частоту можно гибко настраивать путем регулировки частот одночастотного и двухчастотного сигнала. Оптоэлектронная широкополосная характеристика обеспечивает широкополосную генерацию диаграммообразующих сигналов ЧРАР, повышая пространственное разрешение системы связи 5G. В табл. 1 показано увеличение пространственного разрешения ЧРАР в 1,33 раза, как по дальности, так и по углу, для предложенного метода.

Большее число каналов и более точное сканирование могут быть достигнуты с помощью ОДЧГ с большим количеством компонент или применением нескольких формирователей ОДЧГ с различными смещениями частоты.

Заключение

Мы предложили и продемонстрировали на компьютерной модели фотонный метод генерации сигнала диаграммобразования ЧРАР с двумя радионесущими на основе двух симметричных ОДЧГ. Простая схема с двумя ММЦ и одним ТАФМ используется для реализации пятиканального сигнала диаграммобразования ЧРАР с двумя радионесущими, обеспечивая при этом точечные диаграммы направленности с повышенными в два раза спектральной чистотой и в 1,33 раза пространственным разрешением как по дальности, так и по углу. В эксперименте генерируется пятиканальный сигнал диаграммобразования ЧРАР с двумя радионесущими с центральной частотой 4 ГГц и смещением частоты 1 МГц от элемента к элементу. Сгенерированный пятиканальный сигнал диаграммобразования ЧРАР с двумя радионесущими имеет неравномерность мощности 0,2 дБ с коэффициентом подавления паразитных излучений более 40 дБ, что обосновано применением второй ОДЧГ, имеющей также симметричный двухкомпонентный характер, и ТАФМ соответственно. Формирователь позволяет гибко настраивать смещение частоты и центральную частоту, поскольку все частоты управления привязаны к одному генератору радиочастоты. Дальнейшие направления исследования заключаются в оценке применения многочастотных и неравномерных массивов несущих для дальнейшего повышения пространственного разрешения ЧРАР с сохранением конструктивной простоты фотонных формирователей сигналов их диаграммобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Wang C. Space phased array antenna developments: A perspective on structural design / C. Wang et al. // IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag., Jul. 2020. – V. 35, no. 7. – P. 44-63.
2. Antonik P. Frequency diverse array radars / P. Antonik, M. C. Wicks, H. D. Griffiths, and C. J. Baker // Proc. IEEE Conf. Radar, Apr. 2006. – P. 215-217.
3. Wang W. Q. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications / W. Q. Wang // IET Radar, Sonar Navigation, Jul. 2016. – V. 10, no. 6. – P. 1001-1012.
4. Liao Y. Frequency diverse array beam pattern synthesis using symmetrical logarithmic frequency offsets for target indication / Y. Liao, W.-Q. Wang, and Z. Zheng // IEEE Trans. Antennas Propag., May 2019. – V. 67, no. 5. – P. 3505-3509.
5. Meng J. Electronic bottleneck suppression in next-generation networks with integrated photonic digital-to-analog converters / J. Meng et al. // Advanced Photonics Research. – 2021. – V.2, no. 2. – Art. no. 2000033.
6. Yao J. Microwave photonic systems / J. Yao // Journal Lightwave Technology. – 2022. – V. 40, no. 20. – P. 6595-6607.
7. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С.6-42.
8. Pan S. Microwave photonic radars / S. Pan and Y. Zhang // Journal Lightwave Technology. – 2020. – V. 38, no. 19. – P. 5450-5484.
9. Mo B. Photonic-assisted frequency diverse array / B. Mo et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2024. – V. 72, no. 10. - P. 6020-6032.
10. Лустина А.А. Радиофотонный метод определения доплеровского изменения частоты отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Лустина и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 2 (50). – С.63-75.
11. Лустина А.А. Радиофотонный метод определения угла прихода отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Лустина и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 1 (49). – С.50-62.
12. Лустина А.А. Программно-аппаратный анализатор спектра для радиофотонных устройств измерения доплеровского сдвига частоты и его знака / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Лустина и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2022. – № 1 (53). – С. 65-80.
13. Лустина А.А. Простое радиофотонное устройство для измерения мгновенной частоты множества СВЧ-сигналов на основе симметричного неплоского генератора гребенки / А.В. Мальцев, О.Г. Морозов, А.А. Иванов и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 5. – С. 32-39.

14. Zhong X. Photonic assisted dot-shaped beamforming for frequency diverse array with non-fixed frequency offset / X. Zhong et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Nov. 2024. – vol. 72, no. 11, pp. 8307-8318,
15. Mo B. Photonic-assisted frequency diverse array / B. Mo et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Oct. 2024. – V. 72, no. 10. – P. 6020-6032.
16. Gao Y. Frequency diverse array signal generation and beamforming based on dual optical combs / Y. Gao et al. // Journal Lightwave Technology, Oct. 15, 2024. – V. 42, no. 20. – P. 7133-7143, doi: 10.1109/JLT.2024.3418040.
17. Mo B. Photonic-assisted frequency diverse array / B. Mo et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., Oct. 2024. – V. 72, no. 10. – P. 6020-6032, doi:10.1109/TMTT.2024.3383959.
18. Zhong X. Photonic-assisted dot-shaped beamforming for frequency diverse array with nonfixed frequency offset / X. Zhong et al.// IEEE Trans.Antennas Propag., Nov. 2024. – V.72, no.11. – P. 8307-8318, doi: 10.1109/TAP.2024.3454751.
19. Tan J. Wideband and flexible beamforming of frequency diverse array based on microwave photonic dual-carrier signal generation / J. Tan et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2025. – Vol. 73, no. 9. – P. 6774-6786.
20. Tang H. Photonic generation of dual-carrier signals using optical frequency comb pair for frequency diverse array / H. Tang et al. // Journal of Lightwave Technology. – 2025. – Vol. 43, no. 17. – P. 8093-8095.
21. Севастьянов А.А. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / Севастьянов А.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 232-236.
22. 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. – № 2 (16). – С. 3-12.

A PHOTONIC METHOD FOR GENERATING DUAL-FREQUENCY RADIOCARRIERS FOR RADIATION PATTERN FORMATION OF LINEAR SYMMETRICAL FREQUENCY DIVERSE ANTENNA ARRAYS

O.G. Morozov, G.S. Potapov, G.A. Morozov, I.I. Nureyev, T.R. Shagvaliev

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

Abstract. A photonic method for generating dual-frequency radio carriers for shaping the radiation pattern (RP) of linear symmetric frequency-diversed antenna arrays (FDAAs). Unlike existing work, the method is based on the use of two-component comb generators, specifically two optical dual-frequency comb generators (ODFGs) with the same repetition rate for each dual-frequency group (intergroup frequency ω). The method is theoretically modeled and verified using numerical simulations. In the example under consideration, five groups of radio carriers are generated for a five-element linear symmetric FDAA at frequencies $\Omega \pm n\Delta\omega$. The power unevenness of the frequency components is 0.2 dB with a spurious emission suppression level exceeding 40 dB, which is twice that of known implementations of a similar design level. The feasibility of achieving higher range and

angular resolution by increasing the number of channels and elements, as well as the frequency decrement, is assessed.

Keywords: optical two-component frequency comb, dual-frequency carriers, beamforming, linear symmetric frequency-spaced antenna array, Mach-Zehnder modulator, tandem amplitude-phase modulator, microwave photonic location.

Статья представлена в редакцию 30 сентября 2025 г.