

Метод генерации разнесенных по частоте двухкомпонентных оптических гребенок для применения в системах связи 5G беспилотных летательных аппаратов

А.М. АЛЬ-МУФТИ,
аспирант,

Г.С. ПОТАПОВ,
аспирант,

А.А. КУЗНЕЦОВ,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),

А.В. БУРДИН,
д-р техн. наук
(НПО ГОИ им. С.И. Вавилова,
Санкт-Петербург;
ПГУТИ, Самара),

М. ТИВАРИ
(Национальный
технологический институт
Малави, Джайпур,
Республика Индия)
OGMorozov@kai.ru

Предложен новый метод генерации разнесенных по частоте двухкомпонентных оптических гребенок, основанный на преобразовании двухчастотного радиоизлучения в амплитудном модуляторе Маха – Цендера с умножением его разностной частоты. Рассматривается применение данного метода в системе связи 5G, построенной на средневысотной платформе беспилотных летательных аппаратов, с целью гибкого формирования диаграмм направленности частотно-разнесенных антенных решеток в радиодиапазоне для связи с низковысотным роем беспилотных летательных аппаратов и инициализации каналов связи между беспилотными летательными аппаратами платформы для организации оптического транспортного домена.

Беспилотный летательный аппарат, средневысотная платформа, низковысотный рой, 5G, частотно-разнесенная антенная решетка, оптический транспортный домен, амплитудный модулятор Маха – Цендера, двухкомпонентная оптическая гребенка, двухчастотный модулирующий радиосигнал, умножение разностной частоты, микроволновая фотоника

В последнее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) рассматриваются в качестве перспективной платформы для оперативного развертывания систем связи (включая 5G) с целью обеспечения восстановительных и спасательных работ в зонах чрезвычайных происшествий, безопасности гражданских и военных объектов [1]. При этом особый научный и практический интерес возникает к построению каналов связи между БЛА на платформах с низкой, средней и большой высотой полета. При этом в рамках систем 5G такая связь может быть организована как в радиотехническом [2], так и в оптическом [3, 4] транспортных доменах.

Для организации 5G радиотехнического транспортного домена между БЛА средневысотной платформы и низковысотным роем БЛА активно применяются антенные решетки, в частности, частотно-разнесенные решетки [5], в которых создают диаграмму направленности, зависящую от угла и дальности. Ее амплитудное и пространственное распределение может регулироваться величиной разностной частоты между элементами и их количеством. Благодаря этому возникает возможность полного контроля распределения передаваемой энергии, подавления помех или обнаружения объектов связи, находящихся на разных дальностях даже при одинаковом угловом расположении. Такой функционал недоступен для широко известных фазированных антенных решеток [6].

Основная задача развития частотно-разнесенных антенных решеток состоит в необходимости генерации симметричных спектрально чистых двухчастотных несущих, разнесенных по частоте, для двухчастотного диаграммообразования [7, 8], что позволит существенно увеличить их пространственное разрешение по сравнению с одночастотным. Решение данной задачи радиотехническими методами затруднено в силу узкополосности и нелинейности применяемой элементной базы. Существующие радиофотонные методы генерации характеризуются сложностью и высокой стоимостью применяемой элементной базы и наличием паразитных спектральных составляющих высокого уровня.

Оптическая связь в оптическом транспортном домене между БЛА средневысотной платформы в свободном пространстве играет ключевую роль благодаря возможности обеспечения высокой скорости передачи данных, более широкой полосы пропускания и секретности передачи. На уровне средневысотной платформы формируется оптический транспортный домен системы 5G, функционирующий в качестве реплики наземного оптического транспортного домена, например, выведенного из строя в результате чрезвычайных ситуаций.

При построении оптического транспортного домена, обеспечивающего обслуживание определенной зоны низковысотного роя или отдельных БЛА, ключевыми задачами являются юстировка осей и полей зрения объективов платформы БЛА, методы решения которой уже разработаны, а также спектральная инициализация каналов связи внутри общего оптического канала, формируемого, например, с использованием упорядоченных волноводных решеток. В силу маневренности БЛА, высокой скорости, возможной замены числа БЛА в рою на решение второй задачи отводится время в несколько миллисекунд, аналогично наземному оптическому транспортному домену, в котором это время обусловлено обеспечением необходимого качества связи. Существующие в настоящее время одночастотные методы инициализации не удовлетворяют этим условиям и требуют создания специального канала управления [9].

В данной статье предложен новый метод генерации разнесенных по частоте двухкомпонентных оптических гребенок, основанный на преобразовании двухчастотного радиоизлучения в амплитудном модуляторе Маха – Цендера с умножением его разностной частоты. Рассматривается применение данного метода в радиотехническом и оптическом транспортных доменах системы связи 5G, размещенной на средневысотной платформе БЛА, для решения задач гибкого формирования диаграмм направленности частотно-разнесенных антенных решеток с высоким разрешением в радиодиапазоне для связи с низковысотным роём БЛА и высокоскоростной инициализации каналов связи между БЛА платформы для организации оптического транспортного домена.

Рассмотрим решение первой задачи.

Схема реализации предлагаемого метода фотонной генерации двухчастотных радионесущих для частотно-разнесенных антенных решеток радиотехнического транспортного домена, основанного на двух двухкомпонентных оптических гребенках, включает лазерный диод, излучение которого на частоте ω_0 с помощью оптического разветвителя разделяется на верхний и нижний каналы. Каждый канал включает генераторы двухкомпонентных оптических гребенок, выходные сигналы которых объединяются с помощью оптического сумматора, соединенного с демультимплексором. Каждый выход демультимплексора, в свою очередь, через фотоприемник подключается к усилителю мощности и далее к антенне частотно-разнесенной антенной решетки, содержащей в линейном симметричном исполнении $2N+1$ антенн с номерами $-N, \dots, -1, 0, +1, \dots, +N$.

Двухкомпонентная оптическая гребенка верхнего канала схемы, построенная по аналогии со схемой [7], состоит из последовательно установленных амплитудного модулятора Маха – Цендера в режиме умножения межканальной частоты ω , равной частоте модулирующего радиосигнала, для получения равномерной однокомпонентной оптической гребенки с составляющими на частотах $\omega_0 \pm n\omega$ и тандемного амплитудно-фазового модулятора [10, 11] для получения равномерной двухкомпонентной оптической гребенки с составляющими на частотах $\omega_0 \pm n\omega \pm \Omega/2$, где Ω – их разностная частота, n – номер спектральной составляющей $|n|=|N|$, а составляющие на частотах $\omega_0 \pm n\omega$ подавлены.

Двухкомпонентная оптическая гребенка нижнего канала схемы, структура которой предложена в настоящей статье, состоит из амплитудного модулятора Маха – Цендера, работающего в режиме умножения разностной частоты $\Delta\omega$ между двумя составляющими модулирующего двухчастотного радиосигнала $\omega_{1,2} = \omega \pm \Delta\omega$, для получения неравномерной по разностной частоте двухкомпонентной оптической гребенки с составляющими на частотах $n(\omega \pm \Delta\omega)$.

Предполагая, что поле, излучаемое лазерным диодом и поступающее через оптический разветвитель в амплитудном модуляторе Маха – Цендера, равно $E_{in} = E_0 e^{j\omega_0 t}$ (E_0 – амплитуда; ω_0 – угловая частота несущей), выходное излучение амплитудного модулятора Маха – Цендера можно выразить следующим образом:

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) [\exp(j\varphi) + \exp(-j\varphi)] \cos[\omega_0 \pm n(\omega \pm \Delta\omega)] t, \quad (1)$$

где J_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка; $m = \pi V_{\omega_{1,2}} / V_{\pi}$ – индекс модуляции несущей радиочастотными сигналами равной амплитуды на частотах $\omega_{1,2}$; $\varphi = \pi V_{DC} / V_{\pi}$ – фазовый сдвиг, вызванный постоянным напряжением V_{DC} , приложенным к электроду смещения амплитудного модулятора Маха – Цендера; V_{π} – полуволновое напряжение амплитудного модулятора Маха – Цендера или его полуволновое напряжение.

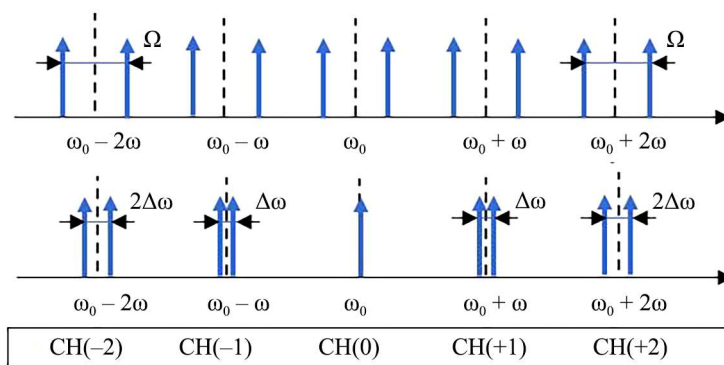
Поставим задачу получения пятиэлементной двухкомпонентной оптической гребенки с равными амплитудами $E_0 = E_{\pm 1} = E_{\pm 2}$. Для равенства амплитуд необходимо выполнить условия для четных и нечетных компонент:

$$J_0(m) = J_2(m);$$

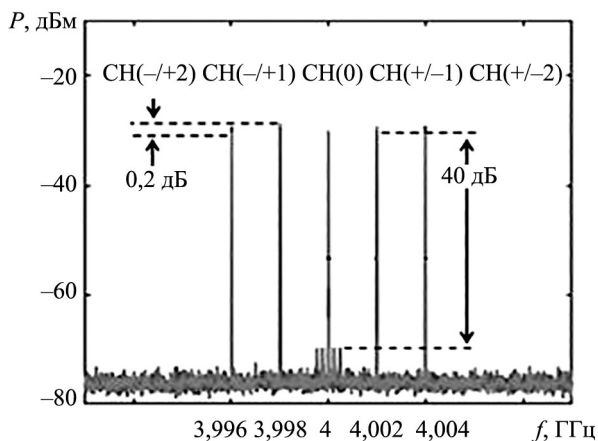
$$J_0(m) [\exp(j\varphi) + \exp(-j\varphi)] = J_1(m) [\exp(j\varphi) - \exp(-j\varphi)]. \quad (2)$$

Равенства в формулах (2) выполняются при $m = 1,84$ и $j = 0,5$.

Приведем спектры двухкомпонентной оптической гребенки (рис. 1, а) и двухчастотных несущих в каналах частотно-разнесенной пятиэлементной антенной решетки (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1

Оптические сигналы обеих двухкомпонентных оптических гребенок через оптический объединитель поступают в демультиплексор, в котором делятся на N каналов (в нашем примере пять), соответствующих числу антенн частотно-разнесенной антенной решетки: CH-2, CH-1, CH+1, CH+2. Далее они отправляются на каналные фотоприемники, в которых генерируются двухчастотные радионесущие:

$$I_{CH\pm N} = \xi_1 \xi_2 \Re \cos \left\{ 2\pi \left[f \pm n(\Delta f) \right] \right\} t, \quad (3)$$

где $\xi_{1,2}$ – амплитудные величины, определяемые биениями амплитуд составляющих обеих двухкомпонентных оптических гребенок; \mathfrak{R} – чувствительность фотоприемника, $f = 2\pi/\Omega$, $\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, $|n| = |N|$.

Как показано в формуле (3) и на рис. 1, б, схема генерирует сигнал формирования диаграммы направленности частотно-разнесенной антенной решетки с центральной частотой f и с двумя радионесущими со смещением частоты $\pm\Delta f$ и $\pm 2\Delta f$ при более высокой чистоте спектра 40 дБм, что в основном объясняется преимуществами использования в схеме тандемного амплитудно-фазового модулятора [10, 11].

Сравнительный анализ характеристик формирователей двухчастотных радионесущих для частотно-разнесенной антенной решетки радиотехнического транспортного домена продемонстрировал преимущества реализации предложенного метода по сравнению с существующими подходами (таблица).

Основные элементы формирователя двухкомпонентной оптической гребенки	Спектральная чистота, дБм	Разрешение по дальности, м	Разрешение по углу, град
Пять PDM-DPMZM [8]	35	40	20
Три амплитудных модулятора Маха – Цендера [7]	23,3	45	22
Амплитудный модулятор Маха – Цендера, тандемный амплитудно-фазовый модулятор, амплитудный модулятор Маха – Цендера [данная статья]	40	30	15

Таким образом, поставленная в работе задача решена.

Смещение частоты и центральную частоту можно гибко настраивать регулировкой частот одночастотного и двухчастотного сигнала. Оптоэлектронная широкополосная характеристика обеспечивает широкополосную генерацию диаграммообразующих сигналов частотно-разнесенной антенной решетки, повышая пространственное разрешение системы связи 5G.

Большее число каналов и более точное сканирование могут быть получены с помощью двухкомпонентных оптических гребенок с большим количеством компонент или применением нескольких схем генерации двухчастотных радионесущих с различными смещениями частоты.

Рассмотрим решение второй задачи.

Задача высокоскоростной инициализации каналов связи между узловыми и центральным БЛА средневысотной платформы с целью формирования оптического транспортного домена подразумевает настройку лазерного диода передатчика узлового БЛА на максимум контура пропускания канала упорядоченной волноводной решетки (мультиплексора), выделенного для связи с ним по восходящему каналу на центральном БЛА.

Рассматривается контур пропускания упорядоченной волноводной решетки гауссова типа с максимумом, расположенным на частоте ω_0 . Настройка осуществляется с использованием двухкомпонентной оптической гребенки с центральной перестраиваемой частотой лазерного диода передатчика ω_T из N равноотстоящих частотных групп с шагом ω и разномом $n\Delta\omega$. Цель инициализации – достичь равенства $\omega_0 = \omega_T$ с заданной погрешностью $\Delta\omega$.

На рис. 2 показан вариант конечной настройки на центр канала упорядоченной волноводной решетки, при котором $\omega_0 = \omega_T$; $A_{CH-1} = A_{CH+1}$; $A_{CH-2} = A_{CH+2}$; $A_{CH0} = \max$.

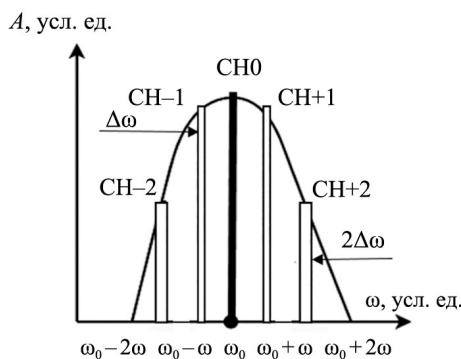


Рис. 2

Для формирования двухкомпонентной оптической гребенки с центральной перестраиваемой частотой лазерного диода передатчика ω_T используем решение для нижнего канала схемы, примененной в решении первой задачи.

Излучение гребенки, прошедшее через упорядоченную волноводную решетку узлового БЛА или отраженное от него, детектируется фотоприемником центрального или узлового БЛА, при этом оно подвергается радиофотонной обработке, основу которой составляет метод анализа биений всех его частотных компонент.

Известна калибровочная выборка для упорядоченной волноводной решетки из K значений вида

$$\mathbf{Z}_k = [P_k^1, P_k^2, P_k^3, \dots, P_k^n, \dots, P_k^{N-1}, P_k^N], \quad k = \overline{1, K}, \quad (4)$$

где верхний индекс определяет разностную частоту, на которой измерена амплитуда прохождения/отражения A_i :

$$P_k^n = \sum_{i=1}^{N+1-n} A_i A_{i+n}, \quad (5)$$

а k с точностью до разбиения $\Delta\omega$ задает частотное расстояние $k\Delta\omega$ от центральной частоты гребенки до центра контура и определяет количество компонент k , попавших в контур на первом шаге инициализации.

Определим целевое значение расстояния x_k как линейную модель

$$x_k = \sum_i^N a_i \cdot P_k^i + b, \quad (6)$$

где a_i, b – неизвестные коэффициенты линейной аппроксимации.

Для поиска коэффициентов воспользуемся методом многомерной линейной регрессии по методу наименьших квадратов, для чего перепишем (6) в матричной форме:

$$\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{Z}} \times \boldsymbol{\theta}; \quad \tilde{\mathbf{Z}} = [\mathbf{Z} \quad \mathbf{1}] \in \mathbb{R}^{K \times N}; \quad \boldsymbol{\theta} = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_N \quad b]. \quad (7)$$

Критерием оптимальной выборки коэффициентов $\boldsymbol{\theta}$ определим минимум суммы квадратов отклонений:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} \|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{Z}}\boldsymbol{\theta}\|^2. \quad (8)$$

Решением уравнения (8) по методу многомерной линейной регрессии является матрица

$$\boldsymbol{\theta}^* = (\tilde{\mathbf{Z}}^T \tilde{\mathbf{Z}})^{-1} \tilde{\mathbf{Z}}^T \mathbf{x}. \quad (9)$$

Далее для нового измеренного значения вектора \mathbf{y}

$$\mathbf{y} = (P^1, P^2, \dots, P^N) \quad (10)$$

можно определить расстояние от точки зондирования до середины (максимума) контура в виде

$$\hat{x} = \mathbf{a}^T \mathbf{y} + b. \quad (11)$$

На основе выражения (11) может быть вычислен мгновенный линейный предсказатель расстояния центра гребенки до середины контура.

Использование неравномерной двухкомпонентной оптической гребенки, реализованной по методу, предложенному в статье, может обеспечить инициализацию канала связи между БЛА оптического транс-

портного домена за один-два шага. Типовая методика настройки требует четырех-шести шагов и занимает до 20 мс [9]. Таким образом, вторая задача, поставленная в работе, также решена.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Для реализации высокоскоростных радиотехнических транспортного и оптического транспортных доменов систем связи 5G, развертываемых на базе БЛА средневысотных платформ, а также роя низкоорбитальных БЛА предложен новый метод генерации разнесенных по частоте двухкомпонентных оптических гребенок. Данный метод основан на преобразовании двухчастотного радиоизлучения в амплитудном модуляторе Маха – Цендера с последующим умножением разностной частоты. Широкополосная высокоскоростная передача информации в оптическом транспортном домене на средней высоте устойчива к эффектам турбулентности в открытых линиях связи, поэтому данный подход позволит увеличить максимальный охват территории развертывания с минимальным временем инициализации каналов связи БЛА и при введении в структуру новых аппаратов. При масштабировании системы на нижнем уровне БЛА применение частотно-разнесенных антенных решеток, построенных на основе двухчастотных радионесущих для формирования диаграмм направленности, полученных с применением предложенного метода, позволит существенно увеличить количество обслуживаемых аппаратов в силу увеличенного пространственного разрешения. Формирователи двухкомпонентных оптических гребенок могут быть реализованы на фотонных интегральных схемах [12] и нейросетевых чипах [13], что существенно снизит массу БЛА.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-79-10059 (ААК) и РФФИ, DST, NSFC и NRF в рамках научного проекта № 19-57-80016 БРИКС_Т (АВБ, МТ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reis S. et al.* General Overview of Antennas for Unmanned Aerial Vehicles: A Review // *Electronics*. 2025. Vol. 14. № 16. Article № 3205.
2. *Cumino P. et al.* On the Usefulness of Flying Base Stations in 5G and beyond Scenarios // *Wireless Networks*. 2024. Vol. 30. P. 387–403.
3. *Zhiqun Gu et al.* Network Topology Reconfiguration for FSO-Based Fronthaul/Backhaul in 5G+ Wireless Networks // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 69426–69437.
4. *Nallagonda V.R., Krishnan P.* Performance Analysis of FSO-BASED INTER-UAV Communication Systems // *Optical and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 53. Iss. 4. Article № 192.
5. *Nusenu S., Basit A.* Frequency Diverse Array Antennas: from Their Origin to Their Application in Modern Wireless Systems // *Journal of Computer Networks and Communications*. 2018. Vol. 2018. Iss. 1. Article № 5815678.
6. *Giannakopoulos G., Shaikh K.M.* Phased Array Antennas for 5G and beyond: Innovations and Implementation Challenges // *Journal of Cognitive Computing and Cybernetic Innovations*. 2025. Vol. 1. № 1. P. 42–50.
7. *Huiyun Tang et al.* Photonic Generation of Dual-Carrier Signals Using Optical Frequency Comb Pair for Frequency Diverse Array // *Journal of Lightwave Technology*. 2025. Vol. 43. Iss. 17. P. 8093–8099.
8. *Jiajun Tan et al.* Wideband and Flexible Beamforming of Frequency Diverse Array Based on Microwave Photonic Dual-Carrier Signal Generation // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2025. Vol. 73. Iss. 9. P. 6774–6786.
9. *Honda K. et al.* Wavelength Control Method of Upstream Signals Using AMCC in WDM-PON for 5G Mobile Fronthaul // *Optics Express*. 2019. Vol. 27. Iss. 19. P. 26749–26756.
10. *Morozov O.G. et al.* Two-Frequency Analysis of Fiber-Optic Structures // *Proc. SPIE*. 2006. Vol. 6277. Article № 62770E.
11. *Khabibullin R.A. et al.* Methods of Spectrally Pure Two-Frequency Radiation Forming for Terahertz Carriers Generation in Optical Range // *Proc. of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*, July 3–4, 2017, Kazan, Russia. P. 1–5.
12. *Габдулхаков И.М. и др.* Система квантового распределения ключей с двойным ортогональным спектрально-поляризационными частотным кодированием // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2021. № 3. С. 200–204.
13. *Makarov R. et al.* Enhancing Microwave Photonic Interrogation Accuracy for Fiber-Optic Temperature Sensors via Artificial Neural Network Integration // *Optics*. 2024. Vol. 5. № 2. P. 223–237.

Поступила в редакцию 2.12.25

После доработки 3.12.25

Принята к публикации 3.12.25

A Method for Generating Frequency Diverse Two-Component Optical Combs and Its Applications in Unmanned Aerial Vehicle 5G Communication Systems

A.M. AL-MUFTI¹, G.S. POTAPOV¹, A.A. KUZNETSOV¹,
A.V. BURDIN^{2,3}, AND M. TIWARI⁴

¹ Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

² NPO S.I. Vavilov GOI, Saint-Petersburg

³ PSUTI, Samara

⁴ National Institute of Technology Manipur, Jaipur, Republic of India

A new method for generating frequency diverse two-component optical combs is proposed. The method is based on converting a laser carrier in a single amplitude Mach–Zehnder modulator by means of dual-frequency radio signal. Each element of the resulting symmetrical comb, except the central element at the laser carrier frequency, contains two components separated by the difference frequency of the dual-frequency radio signal multiplied by a value equal to the element order. Its application in a 5G communication system built on a medium-altitude unmanned aerial vehicle platform is considered. The method allows for flexible radiation pattern formation of frequency diverse antenna arrays in the radio range for communication with a low-altitude unmanned aerial vehicle swarm and for initializing communication channels between unmanned aerial vehicles of the platform to organize an optical transport domain.

Unmanned aerial vehicle, medium-altitude platform, low-altitude swarm, 5G, frequency diverse antenna array, optical transport domain, Mach–Zehnder amplitude modulator, two-component optical comb, dual-frequency radio signal, difference frequency multiplication, microwave photonics