

## Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот

*А.А. Кузнецов*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань*

**Аннотация:** В работе приведена сравнительная оценка способов формирования излучений в виде двух и трехчастотного симметричного пакета дискретных частот, как традиционных, на основе модулятора Маха-Цандера, работающего в различных рабочих точках, так и авторских, на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции. Сформированные излучения являются частными случаями сверхузкополосного пакета дискретных частот, используемых для построения радиофотонных векторных анализаторов. По результатам компьютерного моделирования формирователей в специализированном ПО приведена качественная и количественная оценка чистоты формируемых излучений, что служит подтверждением результатов, полученных для математических моделей и их адекватности описываемым физическим процессам.

**Ключевые слова:** модуляция оптического излучения, сверхузкополосный пакет дискретных частот, модулятор Маха-Цандера, тандемная амплитудно-фазовая модуляция, электроабсорбционный модулятор

### Общие положения

Ранее в работе [1] дано определение сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ). В данном исследовании приведены способы формирования двух- и трехчастотных симметричных СПДЧ. Для оценки чистоты формируемого излучения определяется его коэффициент гармоник:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{(A_2)^2 + (A_3)^2 + \dots + (A_N)^2}}{A_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $A_1$  – амплитуда гармоники первого порядка (информационная),  $A_2, A_3 \dots A_N$  – амплитуды гармоник второго, третьего и  $N$ -го порядков (паразитные). Величина  $N$  определяется исходя из условия  $A_{N+1} < -50$  дБ. Коэффициент гармонических искажений дает количественную оценку вклада амплитуд гармоник высокого порядка в общий сигнал, для большинства применений считается допустимым  $K_{\Gamma} < 3$  %. При условии  $K_{\Gamma} > 3$  % необходимо учитывать перекрестные биения гармоник более высоких порядков.

## Двухчастотный симметричный сверхзкополосный пакет дискретных частот

Двухчастотный симметричный СПДЧ представляет собой излучение, сформированное путем двухполосной амплитудной модуляции с подавленной несущей монохроматического излучения. Существует два основных способа формирования такого излучения: использование модулятора Маха-Цандера (ММЦ) [2-3], работающего в нулевой рабочей точке [4-5] или тандемная амплитудно-фазовая модуляция [6-7].

В первом случае сигнал на выходе модулятора описывается соотношением:

$$I_{MIN}(t, \beta) = \sum_{n=1}^N J_{2n-1}(\beta) \left[ \cos[(\omega - (2n-1)\Omega)t + (2n-1)\pi] \right], \quad (2)$$

где  $J_n$  – функции Бесселя первого рода  $n$ -ого порядка,  $\omega$  – частота оптической несущей,  $\Omega$  – частота модулирующего напряжения,  $\beta$  – глубина модуляции.

На рис. 1 представлена блок-схема компьютерной модели и спектр на выходе ММЦ:

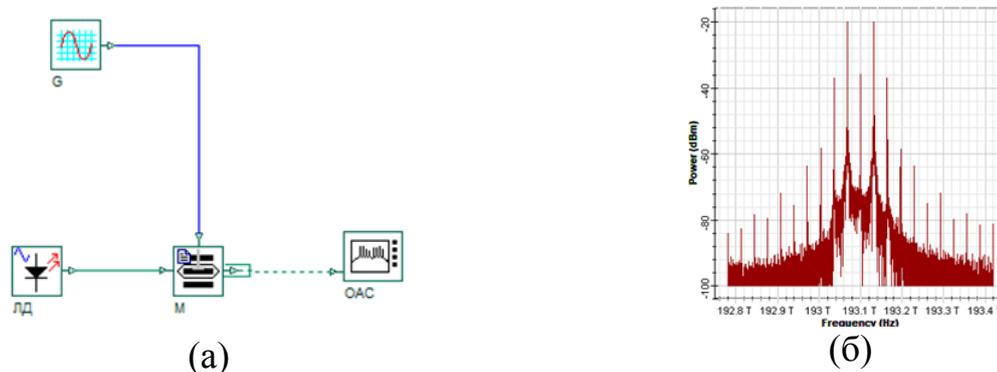


Рис. 1 – Блок-схема компьютерной модели (а) и спектр на выходе (б) формирователя двухчастотного СПДЧ на основе ММЦ

Моделирование было проведено с использованием компонентов с характеристиками, близкими к реальным, в специализированном ПО OptiSystem 7.0. Амплитуды гармоник определены графически из рис.1:

$A_1 = -20$  дБм,  $A_2 = -37$  дБм и  $A_3 = -58$  дБм, подставив полученные значения в (1), определим  $K_{\Gamma} = 2$  %.

Тандемная амплитудно-фазовая модуляция заключается в последовательной амплитудной модуляции и фазовой коммутации на величину  $\pi$  (по минимуму огибающей и с частотой, вдвое меньшей частоты амплитудной модуляции). Такой подход позволяет подавить оптическую несущую до минус 60 дБ, против минус 20 дБ для предыдущего способа. На рис. 3 представлены блок-схема формирователя и выходной спектр.



Рис. 2 – Блок-схема компьютерной модели (а) и спектр на выходе (б) формирователя двухчастотного СПДЧ на основе ТАФМ

Амплитуды гармоник определяются графически из рис. 2:  $A_1 = -12$  дБм,  $A_2 = -33$  дБм и  $A_3 = -33$  дБм, подставив полученные значения в (1), определим  $K_{\Gamma} = 1,3$  %, таким образом коэффициент гармоник излучения, полученного путем ТАФМ ниже в полтора раза, чем для ММЦ.

### Трехчастотный симметричный сверхзкополосный пакет дискретных частот

Трехчастотное симметричное излучение представляет собой амплитудно-модулированное оптическое излучение, такие сигналы получают двумя путями: непосредственной модуляцией лазерного излучателя, либо с использованием модуляторов (ММЦ, ЭАМ, акустооптические). Непосредственная модуляция лазерного излучателя осуществляется подачей

модулирующего напряжения непосредственно на лазерный диод. При этом мощность выходного оптического излучения меняется по закону модулирующего напряжения – тока накачки. Данный подход прост и позволяет получить трехчастотное излучение с разностной частотой до 5 ГГц без значительных нелинейных искажений. Второй способ формирования АМ колебаний основан на применении электроабсорбционных модуляторов (ЭАМ), принцип действия которых основан на эффекте Франца-Келдыша в полупроводниках [8-10]. Этот эффект связан с искривлением энергетических зон полупроводника при воздействии внешнего электрического поля. Третий способ синтеза симметричного трехчастотного излучения основан на применении ММЦ, работающего в квадратурной рабочей точке. Излучения, полученные путем прямой модуляции, модуляции с использованием ЭАМ и ММЦ, приведены на рис. 3.

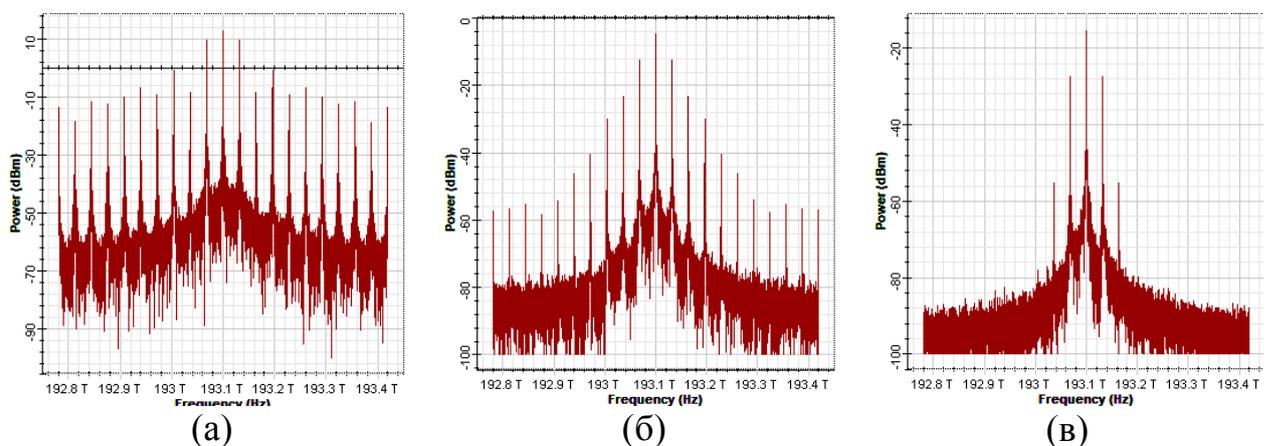


Рис. 3 – Спектры симметричного трехчастотного СПДЧ, полученные при прямой модуляции лазера (а), с использованием ЭАМ (б) и ММЦ (в)

Амплитуды гармоник: прямая модуляция (Рис. 3, а):  $A_1 = 10$  дБм,  $A_2 = -9$  дБм и  $A_3 = -0,6$  дБм; ЭАМ (рис. 3,б):  $A_1 = -13$  дБм,  $A_2 = -24$  дБм и  $A_3 = -30$  дБм, ММЦ (рис. 3,в):  $A_1 = -27$  дБм,  $A_2 = -55$  дБм и  $A_3 = -78$  дБм. Значения коэффициентов гармоник следующие: 8,8 % (прямая модуляция), 8,2 % (ЭАМ), 0,1 % (ММЦ), что согласуется с теоретическими данными.

Таким образом, минимальные нелинейные искажения достигаются при формировании симметричного трехчастотного СПДЧ с использованием ММЦ, что обеспечивает снижение коэффициента гармоник больше, чем на порядок, по сравнению с другими способами.

### Заключение

Представлена сравнительная оценка способов формирования двух- и трёхчастотных симметричных сверхузкополосных пакетов дискретных частот с использованием модулятора Маха-Цандера, работающего в нулевой рабочей точке и тандемной амплитудно-фазовой модуляции (двухчастотное), путем непосредственной модуляции лазерного диода, модулятора Маха-Цандера, работающего в квадратурной рабочей точке и электроабсорбционного модулятора (трехчастотное). По результатам компьютерного моделирования показано, что наибольшей чистотой обладает двухчастотное излучение, полученное с помощью тандемной амплитудно-фазовой модуляции с коэффициентом гармоник 1,3% и трехчастотное, полученное с помощью модулятора Маха-Цандера, работающего в квадратурной рабочей точке с коэффициентом гармоник 0,1%. Показано, что трехчастотное излучение обладает наименьшим коэффициентом гармоник.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020, программа «Фократ»).*

### Литература

1. Кузнецов А.А. Концепция построения радиофотонных оптических векторных анализаторов нового типа // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2021. Т. 1. № 1. С. 47-55.

2. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. А.с. 1477130 СССР, МПК G02F 1/03. Двухчастотный лазерный излучатель (СССР). 4033402/25, заявлено 03.03.86; опубл. 20.07.2004, Бюл. №20.

3. Chen W., Xue M., Zhu D. Optical vector analysis with improved accuracy and enhanced dynamic range // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. V. 31. № 19. pp. 1565-1568.

4. Dai J., Chen Z., Ye L. Accurate optical vector network analyzer based on optical double-sideband suppressed carrier modulation // Optics Communications. 2019. V. 447. pp. 61-66.

5. Chen Z., Ye L., Dai J., Yin F. Long-term measurement of high Q optical resonators based on optical vector network analysis with Pound Drever Hall technique // Optics Express. 2018. V. 26. № 21. P. 26888-26895.

6. Ильин Г.И., Морозов О.Г. А.с. 1338647 СССР, МПК G02F 1/03. Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное (СССР). 3578456/25, заявлено 13.04.83; опубл. 20.07.2004, Бюл. №20.

7. Vasilets A.A., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I. Symmetric vector analyzer for characterization of the spectral parameters of optical high-Q optical structures // Optical Technologies for Telecommunications 2020. International Society for Optics and Photonics, 2021. 2021. V. 11793. P. 1179316.

8. Сидоров А.И. Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники. Учебное пособие. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014. 148 с.

9. Розеншер Э. Витнер Б. Оптоэлектроника. Москва: Техносфера, 2004. 592 с.

10. Ермаков О. Прикладная оптоэлектроника. Москва: Техносфера, 2004. 416 с.

## References

1. Kuznetsov, A.A. Kontsepsiya postroyeniya radiofotonnykh opticheskikh vektornykh analizatorov novogo tipa. Elektronika, fotonika i kiberfizicheskiye sistemy. 2021. V. 1. № 1. pp. 47-55.

2. Il'in G.I., Morozov O.G., Pol'skiy Yu.E. A.s. 1477130 SSSR, MPK G02F 1/03. Dvukhchastotnyy lazernyy izluchatel' [Dual frequency laser emitter]. (USSR). 4033402/25, zayavleno 03.03.86; opubl. 20.07.2004, Byul. №20.

3. Chen W., Xue M., Zhu D. Optical vector analysis with improved accuracy and enhanced dynamic range. IEEE Photonics Technology Letters. 2019. V. 31. № 19. P. 1565-1568.

4. Dai J., Chen Z., Ye L. Accurate optical vector network analyzer based on optical double-sideband suppressed carrier modulation. Optics Communications. 2019. V. 447. P. 61-66.

5. Chen Z., Ye L., Dai J., Yin F. Long-term measurement of high Q optical resonators based on optical vector network analysis with Pound Drever Hall technique. Optics Express. 2018. V. 26. № 21. P. 26888-26895.

6. Il'in G.I., Morozov O.G. A.s. 1338647 SSSR, MPK G02F 1/03. Sposob preobrazovaniya odnochastotnogo kogerentnogo izlucheniya v dvukhchastotnoye [Method of converting single-frequency coherent radiation into two-frequency]. (USSR). 3578456/25, zayavleno 13.04.83; opubl. 20.07.2004, Byul. №20.

7. Vasilets A.A., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I. Optical Technologies for Telecommunications 2020. International Society for Optics and Photonics, 2021. V. 11793. P. 1179316.

8. Sidorov A.I. Osnovy fotoniki: fizicheskiye printsipy i metody preobrazovaniya opticheskikh signalov v ustroystvakh fotoniki. Uchebnoye posobiye [Fundamentals of Photonics: Physical Principles and Methods for Converting Optical Signals in Photonic Devices. Textbook]. Sankt-Peterburg: FGBOU VPO «SPb NIU ITMO», 2014. 148 p.

---



9. Rozensher E. Vitner B. Optoelektronika [Optoelectronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 592 p.

10. Ermakov, O. Prikladnaya optoelektronika [Applied optoelectronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 416 p.