

# РАДИОФОТОННЫЙ СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-10053).

## RADIO PHOTONIC SYNTHESIS OF COMPLEX RADIO SIGNALS WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION

*A. Nasybullin  
O. Morozov  
D. Vedenkin  
N. Ryabova  
V. Ivanov*

### Annotation

This article discusses the questions of formation of the double chirp radio-signal based on radio photonics methods of amplitude-phase modulation converting of optical carrier in Mach-Zehnder modulator working to suppress the carrier on "zero" point of the modulation characteristics.

**Keywords:** radio photonics, LFM signal, modulator of Mach-Zehnder, modulation transformation of optical carrier.

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы формирования двойного ЛЧМ радиосигнала на основе радиофотонных методов амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей в электрооптическом модуляторе Маха-Цендера, работающего для подавления несущей в "нулевой" точке модуляционной характеристики.

### Ключевые слова:

Радиофотоника, ЛЧМ сигнал, модулятор Маха-Цендера, модуляционное преобразование оптической несущей.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиофотоника – междисциплинарная область науки и техники, изучающая вопросы применения и обработки радиотехнических сигналов в оптическом диапазоне с использованием элементной базы интегральной и волоконной оптики. К функциям передачи, приема и обработки информации в системах радиофотоники относятся: генерация несущих частот, частот гетеродинов, полигармонических и многочастотных излучений, их передачи по оптическому волокну и преобразования, формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток, измерения мгновенной частоты и фильтрация радиосигналов и др.

Ключевым элементом систем радиофотоники является подсистема формирования модулированного лазер-

ного излучения, обеспечивающая как перенос радиосигнала в оптический диапазон, так и формирование полигармонического оптического сигнала с разностной частотой, лежащей в радиодиапазоне, например, для генерации непрерывной радиочастоты, равной разностной, после фотодетектирования. В сравнении с классическими радиоэлектронными техническими системами радиофотонные имеют существенные преимущества по более широкому частотному и амплитудному диапазону принимаемых несущих, алгоритмам обрабатываемых информационных частот, высокому разрешению при измерениях, малым потерям, высокой электромагнитной помехоустойчивости, простоте структуры, компактности, малому весу [1]. Средствами радиофотоники с модуляционным преобразованием оптической несущей возможно осуществить формирование сложных видов радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Радиосигналы с ЛЧМ нашли широкое применение в качестве зондирующих сигналов во многих технических приложениях, таких как радиолокация, геолокация, медицинская измерительная техника и др. В статье обсуждаются методы увеличения базы ЛЧМ радиосигнала, формирования двойного ЛЧМ радиосигнала с применением модуляционного преобразования в двухпортовом электрооптическом модуляторе Маха-Цендера.

Особенности модуляционного преобразования в электрооптическом модуляторе Маха-Цендера

Анализируя методы модуляции оптического излучения можно указать наибольшую эффективность электрооптических модуляторов, т.к. подобные устройства требуют малых управляющих напряжений, обладают широким частотным диапазоном, сами модуляторы характеризуются малыми весогабаритными показателями. Наиболее успешные результаты в технологии изготовления были достигнуты для интегральных электрооптических модуляторов на основе схем Маха-Цендера (ММЦ).

Функционирование ММЦ характеризуется режимом работы, отличающимся положением рабочей точки на модуляционной характеристике по напряженности поля (рис. 1).

Рассмотрим спектр выходного сигнала ММЦ при расположении рабочей точки в минимуме его модуляционной характеристики при напряженности электрического поля  $E=0$  [2-5].

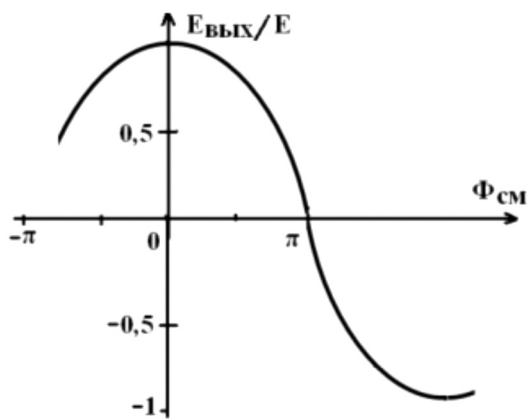


Рис. 1. Модуляционная характеристика ММЦ по напряженности поля.

Режим "нулевой" точки соответствует минимальной выходной напряженности, т.е. при  $\Phi_{см}=\pi$  (рис. 1).

Выходной сигнал будет описываться выражением (1)-(2):

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_0 t} \left[ e^{jb \sin(\Omega t + \pi)} + e^{jb \sin(\Omega t + \pi) + j\Phi_{см}} \right] =$$

$$= -2j \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_0 t} \sin(b \sin \Omega t) =$$

$$= -4j \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_0 t} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(b) \sin[(2n-1)\Omega t] \right]$$

$$b = \pi \frac{V_M}{V_\pi} \tag{2}$$

где

$E_0$  - амплитуда электрического поля входного немодулированного оптического сигнала,  $\omega_0$  - циклическая частота немодулированного оптического сигнала,  $b$  - коэффициент модуляции,  $\Omega$  - циклическая частота модулирующего радиочастотного сигнала,  $V_M$  - амплитуда напряжения модулирующего сигнала,  $V_\pi$  - полуволновое напряжение модулятора,  $J_i$  - функция Бесселя первого рода  $i$ -го порядка.

Необходимо отметить, что данный режим будет обеспечен также для  $\Phi_{см}=(2k-1)\pi$ , однако, при выборе  $k>1$  не удовлетворяется принципиальное условие малости управляющих модулятором напряжений. Параметры модулятора при больших напряжениях смещения претерпят отклонение, что скажется на эффективности преобразования.

Анализ выражения (1) показывает, что спектр выходного сигнала ММЦ при  $\Phi_{см}=\pi$  является многочастотным и состоит из двух полос, при этом колебание на частоте несущей отсутствует (рис. 2). Полосы расположены симметрично относительно подавленной несущей, спектральные составляющие находятся на частотах  $\omega = \omega_0 \pm n\Omega$ , где  $n=1,3,5...$ , то есть четные гармоники подавлены. Начальные фазы гармоник, составляющих нижнюю полосу на  $\pi$  отличны от начальной фазы гармоник верхней полосы.

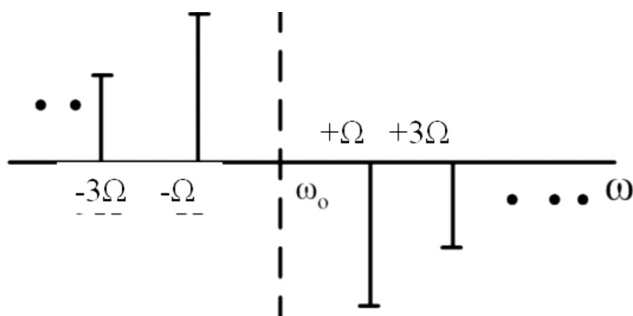


Рис. 2. Спектр на выходе ММЦ, работающего в "нулевой" рабочей точке.

Для малых модулирующих напряжений гармониками 2-го и более высокого порядка можно пренебречь в силу их малости [7].

### Радиофотонные системы формирования сложных ЛЧМ радиосигналов

Согласно описанным в предыдущем разделе представлениям в случае использования в качестве модулирующего в ММЦ сигнала с линейным нарастанием частоты вида  $V_m \cos(kt^2)$ , где  $k$  – коэффициент, определяющий скорость изменения частоты, то выражение, определяющее форму электрического сигнала на выходе фотодетектора, соединенного с выходом модулятора, будет иметь вид

$$i(t) \propto 2J_1^2(b) + 2J_1(b) \cos(2kt^2) \quad (3)$$

Постоянную составляющую в (3) можно устранить используя на выходе фотодетектора фильтр высоких частот. Анализируя выражение (3) можно наблюдать увеличение в два раза девиации частоты ЛЧМ сигнала после модуляционного преобразования в ММЦ, что позволяет в такое же количество раз увеличить базу сигнала.

Двойной ЛЧМ сигнал представляет собой комбинацию двух сигналов с зеркальным изменением частоты и одинаковой средней частотой. Подобный сигнал применяется для улучшения разрешающей способности в локационных доплеровских системах [8]. Радиофотонный подход к формированию двойного ЛЧМ радиосигнала использует двухпортовый ММЦ (рис. 3) при использова-

нии в качестве модулирующего сигнала в первом плече несущей радиодиапазона с частотой  $\Omega$ , а во втором плече радиосигнала с линейным увеличением частоты, об- ладающего скоростью изменения частоты  $k$ . Напряжения смещения  $U_1$  и  $U_2$  выбираются таким образом, чтобы обеспечить работу обоих модуляторов двухпортового ММЦ в "нулевой" рабочей точки модуляционной характеристики для подавления оптической несущей.

Оптическое колебание от лазерного диода ЛД через контроллер поляризации КП поступает на вход двухпортового ММЦ, где параллельно поступает на оба внутренних модулятора.

Выражение для выходного сигнала двухпортового ММЦ согласно (1) выглядит как

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 e^{j\omega_0 t} \left[ e^{j b_1 \cos(\Omega t)} + e^{j b_2 \cos(kt^2)} \right] = \\ &= J_1(b_1) e^{j(\omega_0 - \Omega)t} + J_1(b_1) e^{j(\omega_0 + \Omega)t} + \\ &+ J_1(b_2) e^{j(\omega_0 t - kt^2)} + J_1(b_2) e^{j(\omega_0 t + kt^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$b_i = \pi V_{mi} / V_{\pi i} \quad (i=1,2),$$

$\omega_0$  – частота оптической несущей.

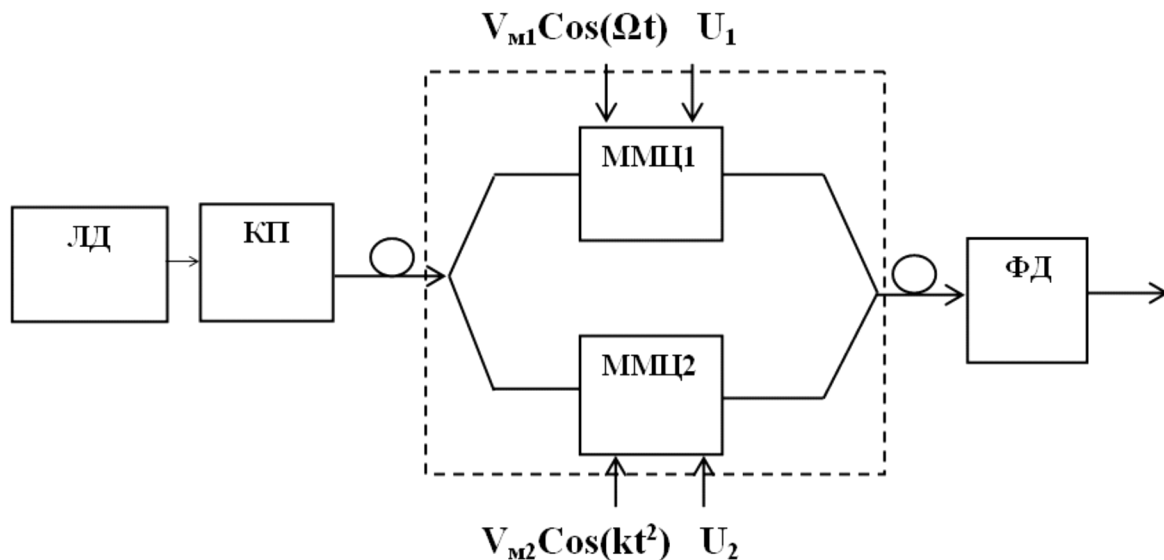


Рис. 3. Радиофотонный формирователь двойного ЛЧМ сигнала.

Оптический сигнал  $E(t)$  подается на фотодетектор ФД, на выходе которого образуется фототок, определяемый выражением (5).

$$i(t) \propto 2J_1^2(b_1) + 2J_2^2(b_1) + 2J_1^2(b_1) \cos(2kt^2) + \\ + 2J_1^2(b_2) \cos(2\Omega t) + 4J_1(b_1)J_1(b_2) \cos(\Omega t + kt^2) + \\ + 4J_1(b_1)J_1(b_2) \cos(\Omega t - kt^2)$$

Три первых слагаемых в выражении (4) являются низкочастотными колебаниями и могут быть подавлены фильтром верхних частот, подключенным к выходу фотодетектора. Четвертое слагаемое устраняется если частота  $2\Omega$  выходит за пределы полосы частот фотодетектора, в противном случае может быть отфильтровано. Оставшиеся два последних слагаемых представляют собой двойной ЛЧМ радиосигнал с центральной частотой, равной  $\Omega$ .

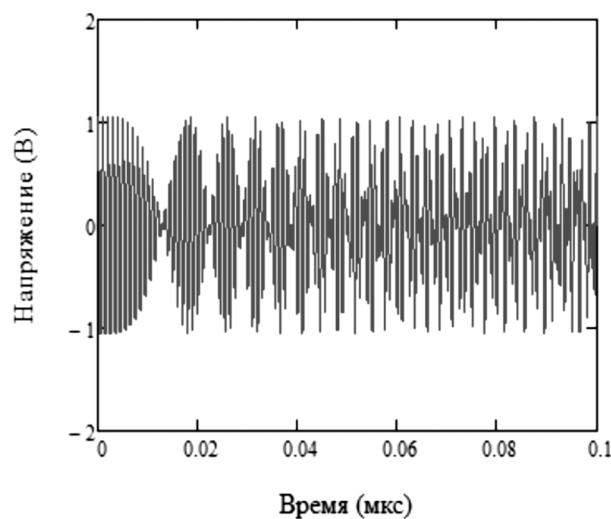
Формы временного и спектрального представления сигнала, описываемого выражением (5), при частоте несущей  $\Omega=1$  ГГц и полосе частот 600 МГц, полученные в программе Mathcad, показаны на рис. 4.

Изменение параллельной конфигурации схемы формирования на последовательную, состоящую из 2-х однопортовых ММЦ с аналогичными обозначенным на рис. 3 модулирующими сигналами, позволяет увеличить в 2 раза как несущую радиосигнала  $\Omega$ , так и девиацию частоты ЛЧМ колебания. Используя описанные принципы можно синтезировать такой вид сложного ЛЧМ сигнала, как симметричный ЛЧМ сигнал, характеризующийся законом изменения частоты во времени в виде равнобедренного треугольника. Синтез симметричного ЛЧМ сигнала на основе возможностей радиофотоники позволяет получить строгую симметричность и высокую верхнюю частоту.

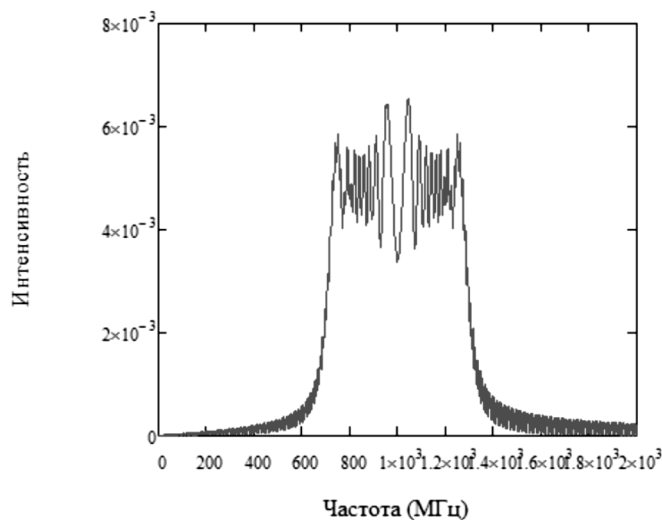
#### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В работе представлены результаты применения принципов радиофотоники, основанных на амплитудно-фазовом модуляционном преобразовании оптической несущей в модуляторе Маха-Цендера, работающего в режиме подавления несущей, для формирования двойного ЛЧМ радиосигнала. Радиофотонные методы синтеза позволяют получить высокую центральную частоту сигнала и добиться строгой синхронизации составляющих двойного ЛЧМ радиосигнала в силу природной симметрии модулированных колебаний.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-10053).*



*a*



*б*

Рис. 4. Временное (а) и спектральное (б) представление двойного ЛЧМ сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов О.Г. Системы радиопотоники с амплитудно-фазовым модуляционным преобразованием оптической несущей / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин, Г.А. Морозов. Под ред. О.Г. Морозова. – Казань: ООО "Новое знание", 2014. – 192 с.
2. Садеев Т.С. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов // Вестник МарГТУ. – 2010. – Т.10, №3. – С. 22 – 30.
3. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиопотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1. – С. 3–42.
4. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84–91.
5. Севастьянов А.А. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / А.А. Севастьянов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. №4. С.232–236.
6. Morozov O.G. Spectrum conversion investigation in lithium niobate Mach-Zehnder modulator/ D.L. Aybatov, O.G. Morozov // Optical Technologies for Telecommunications. – Proc. SPIE V.7523. – 2009. – Samara. – P.75230D-1 – 75230D-7.
7. Садеев Т.С. Фотонные фильтры микроволновых сигналов на основе одночастотного лазера и амплитудного электрооптического модулятора Маха-Цендера: Автореф. дис. канд. техн. наук, Казань, 2011.
8. Dan Zhu and Jianping Yao Dual-Chirp. Microwave Waveform Generation Using a Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator // IEEE Photonics technology letters, Vol. 27, №13, 2015, PP. 1410 1413.

© А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, Д.А. Веденькин, Н.В. Рябова, В.А. Иванов, ( aydar.nasybullin@mail.ru ), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики».

**МАЙНЕКС 2016**  
**ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЗИЯ**

**7-й ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЙ  
 ФОРУМ И ВЫСТАВКА**

**ИНВЕСТИЦИИ - ТЕХНОЛОГИИ - РЕГУЛИРОВАНИЕ**

**19 - 21 апреля 2016**  
**Астана, Казахстан**