

V. P. Ipatov, A. B. Khachaturian
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Efficiency of spectral compact signals against jamming and intersystem interferences

Formats of binary phase modulation and frequency modulation with continuous phase according to the criteria of resistance to jamming and intersystem interference in view of the severe resource constraints is compared. It is shown that the minimum frequency modulation provides better filtering these types of interference.

Satellite navigation, continuous phase frequency modulation, minimum frequency modulation, partial response, spectral-efficient signals, jamming, intersystem interference

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2015 г.

УДК 621.391(681.325:535)

Л. А. Аронов, В. Н. Ушаков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Спектральный анализ радиосигналов средствами радиофотоники

Представлен обзор методов анализа спектра радиосигналов средствами радиофотоники. Рассмотрены схемы устройств, алгоритмы получения информации о спектральных характеристиках радиосигналов, достижимые параметры устройств.

Преобразование Фурье, спектральный анализ радиосигналов, радиофотоника

В теории сигналов спектр сигнала является одной из ключевых характеристик. В радиотехнике устройства, выполняющие спектральный анализ, являются неотъемлемой частью комплексов радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы, а также используются в качестве измерительной аппаратуры при разработке систем связи.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили спектроанализаторы, работающие на принципах дискретного преобразования Фурье и реализуемые на базе цифровой техники. Помимо них существуют устройства, использующие метод пространственного преобразования Фурье (ППФ), являющийся естественной для оптики операцией [1]. В первую очередь к ним относятся акустооптические спектроанализаторы (АОС) [2], отличающиеся от цифровых устройств простотой реализации спектрального анализа в широкой полосе частот. Стоит отметить, что полоса анализа АОС ограничена параметрами акустооптического модулятора (АОМ) – устройства, реализующего преобразование электрического сигнала в пространственно-временное распределение коэффициента преломления рабо-

чей среды, что впоследствии позволяет перенести информацию на оптическую несущую. Однако к настоящему времени технология создания АОМ практически исчерпала свои возможности [3].

С другой стороны, бурное развитие оптоволоконных систем передачи информации привело к появлению высококачественных устройств генерации, модуляции и регистрации света, а также оптических направляющих систем – оптических волокон. Широкая номенклатура этих устройств нашла применение и при решении радиотехнических задач, что привело к появлению такого направления, как радиофотоника [4]. Основным методом переноса радиосигнала на оптическую несущую в радиофотонике является электрооптическое взаимодействие. Модуляторы, построенные на основе этого явления, способны обеспечивать полосы рабочих частот в несколько десятков гигагерц [5], [6], однако они в отличие от АОМ не позволяют реализовать ППФ.

Рассмотрим методы, которые в той или иной степени позволяют получить информацию о спектре радиосигнала средствами радиофотоники. На рис. 1 представлена структурная схема устройства,

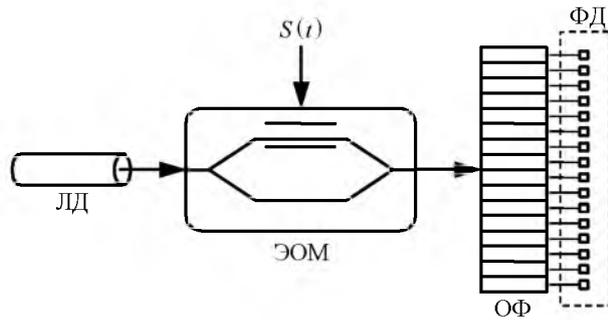


Рис. 1

иллюстрирующая один из основных вариантов спектрального анализа [7].

В состав устройства входят лазерный диод ЛД, электрооптический модулятор ЭОМ, линейка оптических фильтров ОФ и линейка фотодетекторов ФД. Принцип работы следующий. Анализируемый радиосигнал $S(t)$ подается на ЭОМ и модулирует непрерывную монохроматическую оптическую волну, генерируемую лазерным диодом. Полученный оптический сигнал со сложным спектром пропускается через набор ОФ, в результате чего различные спектральные составляющие разделяются по пространственным каналам и регистрируются набором ФД.

Рассмотренный метод характеризуется весьма низкой – порядка 1 ГГц – разрешающей способностью, определяемой набором ОФ, которые могут быть реализованы в виде резонаторов Фабри–Перо, дифракционной решетки, волоконной решетки Брэгга и др. [7]. Описано также модифицированное устройство, в котором, помимо оптического разделения спектральных составляющих, организовано временное разделение [7], [8]. Для этого оптический сигнал, который представляет собой сверхкороткий импульс, пропускается через дисперсионный элемент. В результате формируется растянутый во времени импульс с линейной частотной модуляцией. Авторы работы заявляют существенное улучшение частотного разрешения вплоть до 25 МГц.

Устройства, построенные по схеме, представленной на рис. 1, обладают полосой анализа в несколько десятков гигагерц, но плохим частотным разрешением. При этом информация о спектре радиосигнала формируется в реальном времени. Вариант же с импульсным источником излучения характеризуется заметными пропусками сигнала во времени.

Иной алгоритм предложен в [9]. Схема устройства, реализующего этот алгоритм, представлена на рис. 2. В ее состав входят перестраиваемый лазерный диод ПЛД, электрооптический модулятор ЭОМ (может быть, в частности, фазовым), дисперсионный элемент ДЭ, фотодетектор ФД, измеритель мощности ИМ и цифровой процессор ЦП.

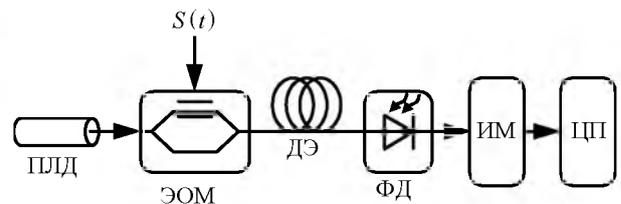


Рис. 2

Основным элементом устройства является ДЭ, выполняющий задержку (развертку) оптического сигнала во времени в зависимости от длины волны. Показано [9], что информация о спектре мощности $G(\omega)$ радиосигнала $S(t)$ может быть получена косвенно – измерением распределения мощности сигнала на выходе ФД $P_{RF}(\ddot{\Phi})$ в зависимости от значения дисперсии групповой скорости $\ddot{\Phi}$:

$$\tilde{S}(\Omega) = 4 \int_0^{\infty} |P_{RF}(\ddot{\Phi}) - \overline{P_{RF}(\ddot{\Phi})}| \cos(\ddot{\Phi}\Omega) d\ddot{\Phi}, \quad (1)$$

где $\tilde{S}(\Omega) = G(\omega)/\omega$; $\Omega = \omega^2$; $\overline{P_{RF}(\ddot{\Phi})}$ – среднее значение $P_{RF}(\ddot{\Phi})$. Для получения спектра радиосигнала необходимо, перестраивая длину волны излучения ПЛД, измерить дискретные значения мощности сигнала на выходе ФД. Далее, зная зависимость дисперсии $\ddot{\Phi}$ от длины волны, восстановить вид функции $P_{RF}(\ddot{\Phi})$. В соответствии с (1) полученный дискретный сигнал связан с $\tilde{S}(\Omega)$ косинусным преобразованием Фурье, поэтому далее средствами ЦП выполняется обратное преобразование, а также восстановление масштаба по частоте с учетом связи $G(\omega) = \tilde{S}(\Omega)\sqrt{\Omega}$. Последнее равенство определяет ряд существенных особенностей устройства. Показано, что разрешение по частоте является функцией частоты и определяется зависимостью: $\delta f = (4\pi\ddot{\Phi}_{\max}f)^{-1}$, где $\ddot{\Phi}_{\max}$ – максимальное значение дисперсии. Таким образом, разрешение выше на более высоких частотах и определяется параметрами ДЭ. Ширину диапазона анализируемых частот авторы [9] оценивают как

$$\Delta f = (4\pi\ddot{\Phi}_{\max}\delta f)^{-1} \dots \sqrt{N/(4\pi\ddot{\Phi}_{\max})},$$

где N – количество отсчетов данных. На рис. 3 приведены зависимости верхней f_{up} и нижней f_{lo} частот диапазона, полученные в [9] численным моделированием.

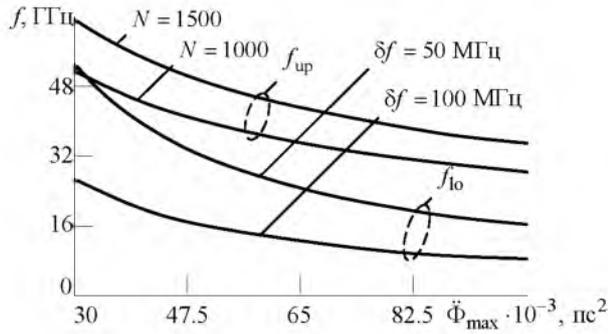


Рис. 3

Таким образом, основные рабочие характеристики устройства определяются параметрами ДЭ. Приводимые в [9] достижимые значения погонной дисперсии составляют около $17\,000\text{ пс}^2/\text{км}$, что, однако, требует более детального изучения с учетом вносимых ДЭ потерь. Также допустимо использовать ДЭ с нелинейной зависимостью $\dot{\Phi}$ от длины волны излучения, если эта зависимость известна. Для работы устройства также требуется перестраиваемый источник лазерного излучения, скорость перестройки которого определяет быстродействие устройства в целом. Несмотря на все указанные особенности рассмотренной схемы, заложенный в ее основу метод спектрального анализа представляет интерес с точки зрения достижимых параметров, простоты исполнения и гибкости работы устройства.

Рассмотрим еще одно устройство, позволяющее получать частотные характеристики радиосигнала [10]. Указанное устройство выполняет анализ радиосигналов в полосе 14 ГГц за 2.8 мкс, при этом заявлена возможность определения фазы радиосигнала.

Схема устройства представлена на рис. 4. В его состав входят: лазерный диод ЛД, устройство контроля поляризации УКП, электрооптический модулятор ЭОМ, сканер С, оптический усилитель ОУ, балансный фотодиод БФД, аналого-цифровой преобразователь АЦП и цифровой сигнальный процессор ЦСП.

Прежде чем приступить к описанию алгоритма работы устройства в целом, рассмотрим устройство сканера и опишем его функции. Структурная схема сканера представлена на рис. 5. В ее состав

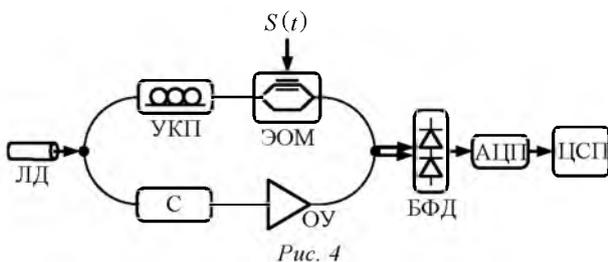


Рис. 4

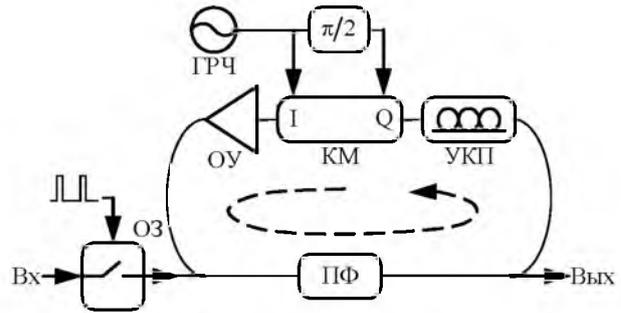


Рис. 5

входят оптический затвор ОЗ, ОУ, квадратурный модулятор КМ, генератор радиочастоты ГРЧ, УКП, полосовой фильтр ПФ и фазовращатель на $\pi/2$.

Принцип работы следующий. Из непрерывного оптического излучения с помощью ОЗ, управляемого электрическим сигналом, формируется последовательность импульсов. Каждый импульс последовательности проходит несколько циклов по оптической петле в направлении, указанном штриховой линией. При каждом обходе по петле спектр импульса, прошедшего КМ, где осуществляется однополосная модуляция с подавлением несущей, смещается на $\delta f_{\text{ГРЧ}}$ – значение частоты ГРЧ. Компенсация энергетических потерь осуществляется эрбиевым ОУ. Таким образом, за счет пошагового смещения спектра оптического импульса осуществляется последовательное во времени сканирование полосы частот, ширина которой ограничена характеристикой ПФ.

Рассмотрим алгоритм работы схемы на рис. 4. Радиосигнал $S(t)$ подается на ЭОМ и модулирует непрерывную оптическую волну от ЛД. Полученная волна последовательно во времени интерферирует с каждым из импульсов, формируемых сканером, образуя сигналы биения, которые регистрируются БФД. Далее выделяются временные каналы, соответствующие различным оптическим импульсам. Частоты f_1 и f_2 биений, регистрируемых в двух соседних каналах, определяются выражениями [8]:

$$f_1 = f_x - (k - 1)\delta f_{\text{ГРЧ}}; f_2 = k\delta f_{\text{ГРЧ}} - f_x,$$

где f_x – несущая частота радиосигнала $S(t)$. В целях исключения неопределенности результата каждый временной канал рассматривается в полосе частот, не меньшей $\delta f_{\text{ГРЧ}}$. В [10] представлена наглядная иллюстрация обнаружения спектральной составляющей радиосигнала. Без описания алгоритма отмечается также возможность выделения амплитудного спектра широкополосного (более 100 МГц) радиосигнала.

В работе [10] также представлены результаты экспериментального исследования устройства при следующих параметрах схемы: частота ГРЧ и диапазон частот одного временного канала 2 ГГц; длительность оптического импульса (ширина временного канала) 400 нс, что соответствует теоретическому частотному разрешению 2.5 МГц; количество временных каналов 7, что дает время анализа 2.8 мкс и полосу анализа 14 ГГц. В эксперименте получен спектр полигармонического радиосигнала с частотами 1.2, 2.4, 3.7, 4.5 и 5.6 ГГц. Также получен спектр радиосигнала с шириной спектра 40 МГц и исследована работа устройства с сигналом с бинарной фазовой манипуляцией. Однако авторы работы не описывают алгоритмы цифровой последетекторной обработки и не дают оценок времени, необходимого для их выполнения. Необходимо отметить, что рассмотренное устройство является весьма гибким с точки зрения перестройки основных характеристик – частотного разрешения и полосы анализируемых частот.

Рассмотренные устройства, построенные на элементной базе радиофотоники, действительно позволяют получать информацию о спектре радиосигнала в широкой полосе частот при весьма небольшом времени анализа. Так, первый из описанных подходов способен потенциально перекрыть полосу в несколько десятков гигагерц при работе в реальном времени, обеспечивая разрешающую способность порядка единиц гигагерц. С алгоритмической точки зрения метод вполне очевиден.

Два других устройства нельзя, в строгом смысле, назвать спектроанализаторами радиосигналов, поскольку для получения информации о спектре требуется последетекторная обработка, в которую заложена значительная алгоритмическая составляющая.

В заключение необходимо также отметить, что помимо спектрального анализа радиосигналов средства радиофотоники находят применение в таких областях, как спектроскопия, формирование сигналов произвольной формы, формирование сигналов в ФАР и др. [8], [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 354 с.
2. Акустооптические процессоры спектрального типа / под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
3. Грачев С. В., Рогов А. Н., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием // Радиотехника. 2003. № 4. С. 23–28.
4. Seeds A. Microwave photonics // IEEE Trans. microw. theory tech. 2002. Vol. MTT-50, № 3. P. 877–887.
5. Le Nguyen Binh. Photonic signal processing. Technics and applications. Boca Raton: CRC Press, 2007. 376 p.
6. The Handbook of photonics / ed. by M. C. Gupta, J. Ballato. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1040 p.
7. Wang C., Yao J. Ultrahigh-resolution photonic-assisted microwave frequency identification based on temporal channelization // IEEE Trans. microw. theory tech. 2013. Vol. MTT-61, № 12. P. 4275–4282.
8. Wang C. Dispersive Fourier transformation for versatile microwave photonics applications // Photonics. 2014. Vol. 1, № 4. P. 586–612.
9. Photonic approach for microwave spectral analysis based on Fourier cosine transform / Yun Wang, Hao Chi, Xianmin Zhang, Shilie Zheng, Xiaofeng Jin // Optics let. 2011. Vol. 36, № 19. P. 3897–3899.
10. Optical serial coherent analyzer of radio-frequency (OSCAR) / R. Li, H. Chen, C. Lei et al. // Opt. express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 13579–13585.
11. Copmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature photonics. 2007. Vol. 1, № 10. P. 319–330.

L. A. Aronov, V. N. Ushakov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Microwave signals spectrum analysis by means of microwave photonics

Approaches for microwave spectral analysis by means of microwave photonics are reviewed. Schemes, algorithms of functioning and possible device's parameters are discussed.

Fourier transformation, microwave spectrum analysis, microwave photonics

Статья поступила в редакцию 28 августа 2015 г.