

УДК 621.391(681.325:535)

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

Спектроанализатор на основе волоконно-оптических дисперсионных элементов

Рассмотрен принцип функционирования анализатора спектра радиосигналов на основе алгоритма ЛЧМ-преобразования в оптическом диапазоне. Для создания указанного устройства используются оптические элементы, обладающие частотной дисперсией. Приведена схема и потенциально достижимые характеристики устройства.

Преобразование Фурье, спектральный анализ, дисперсионные элементы, ЛЧМ-преобразование

Развитие оптоволоконных систем передачи информации привело к появлению устройств генерации, модуляции и регистрации света, обладающих рекордными техническими характеристиками. Одновременно появилась широкая номенклатура оптических волокон с низким погонным затуханием. Все это привело к возможности обработки радиосигналов средствами волоконной оптики (ВО). Такое направление называется радиофотоникой. Сущность этого подхода заключается в переносе радиосигнала на оптическую несущую, обработке радиосигнала средствами ВО и преобразовании выходного оптического сигнала в электрический. Такой подход позволяет надеяться на расширение диапазона обрабатываемых частот, увеличение быстродействия, снижение энергопотребления и массогабаритных характеристик устройств.

Существуют различные схемы спектроанализаторов, осуществляющих спектральный анализ радиосигналов средствами фотоники [1]. В настоящей статье рассмотрен спектроанализатор, реализующий алгоритм ЛЧМ-преобразования в оптическом диапазоне (ЛЧМ – линейная частотная модуляция). Алгоритм ЛЧМ-преобразования предусматривает перенос исследуемого сигнала на ЛЧМ-несущую, затем полученный радиосигнал поступает на дисперсионную линию задержки (ДЛЗ) с линейной частотной дисперсией. Ампли-

туда радиосигнала на выходе ДЛЗ пропорциональна амплитудному, а фаза – фазовому спектру исследуемого радиосигнала. Ранее алгоритм ЛЧМ-преобразования реализовывался средствами акустоэлектроники [2] и акустооптики [3], однако полосы обрабатываемых частот в силу технологических причин ограничены в первом случае значением 200 МГц, во втором – 1 ГГц. Освоение миллиметрового диапазона частот вызывает потребность спектрального анализа в значительно большей полосе частот. В [4] описан спектроанализатор, реализующий ЛЧМ-преобразование в оптическом диапазоне. Перенос радиосигнала на оптическую несущую позволяет надеяться на значительное расширение полосы анализа по сравнению с акустоэлектроникой и акустооптикой. Схема спектроанализатора представлена на рис. 1.

Устройство работает следующим образом. Короткий световой импульс от полупроводникового лазерного диода ЛД поступает на первый дисперсионный элемент ДЭ1. На выходе ДЭ1 образуется оптический сигнал с линейно изменяющейся частотой (оптический ЛЧМ-сигнал – ОЛЧМ). ОЛЧМ поступает на электрооптический модулятор ЭОМ на основе интегрально-оптического интерферометра Маха–Цандера. На управляющий электрод ЭОМ поступает исследуемый радиосигнал $S(t)$, в результате на выходе ЭОМ формируется ОЛЧМ,

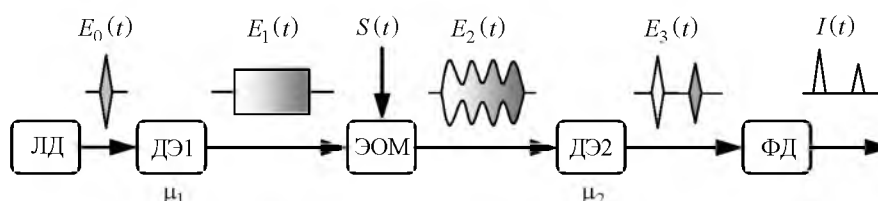


Рис. 1

промодулированный по амплитуде исследуемым радиосигналом. Оптический сигнал с выхода ЭОМ поступает на второй дисперсионный элемент ДЭ2 с дисперсией, обратной дисперсии ДЭ1. На выходе ДЭ2 образуется оптический сигнал, промодулированный комплексным спектром исследуемого сигнала. Этот сигнал детектируется фотодиодом ФД, на выходе которого формируется электрический сигнал, пропорциональный спектру мощности исследуемого радиосигнала.

Характеристики такого устройства в значительной степени зависят от характеристик используемых для его реализации оптических элементов. Для оценки предельных характеристик устройства рассмотрим подробнее преобразование сигналов в оптической схеме.

ЛД вырабатывает короткий световой импульс $\dot{E}_0(t)$. Пусть для определенности комплексный сигнал имеет вид

$$\dot{E}_0(t) = \frac{2}{\tau_0 \sqrt{\pi}} e^{-(2t/\tau_0)^2} e^{j\omega_0 t}, \quad (1)$$

где τ_0 – длительность импульса; ω_0 – средняя частота света.

Определим комплексный коэффициент передачи дисперсионного элемента ДЭ1 как

$$\dot{H}_1(\omega) = \dot{A} \exp(-j\omega T) \exp\left[-j(\mu_1/2)(\omega - \omega_0)^2\right],$$

где \dot{A} – константа; T – задержка сигнала на средней частоте диапазона; μ_1 – наклон дисперсионной характеристики. Импульсная характеристика ДЭ1 $\dot{h}_1(t)$ может быть получена обратным преобразованием Фурье $\dot{H}_1(\omega)$:

$$\dot{h}_1(t) = \dot{C} \exp\left[j \frac{(t-T)^2}{2\mu_1}\right] e^{j\omega_0 t},$$

где \dot{C} – произвольная константа. Не нарушая общности, положим $\dot{C} = 1$.

Определим импульсную характеристику последовательного соединения ДЭ1–ЭОМ–ДЭ2. Для этого подадим на вход ДЭ1 δ -функцию. Тогда оптический сигнал $\dot{E}_1(t)$ на выходе первого дисперсионного элемента определится интегралом свертки:

$$\dot{E}_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t') h_1(t-t') dt' = \exp\left[j \left(\omega_0 t + \frac{t^2}{2\mu_1}\right)\right].$$

Таким образом, сигнал на входе ЭОМ представляет собой оптический ЛЧМ-сигнал.

На управляющий электрод ЭОМ поступает исследуемый радиосигнал $S(t)$. Тогда оптический сигнал на выходе ЭОМ $\dot{E}_2(t) = \dot{S}(t) \dot{E}_1(t)$. Оптический сигнал на выходе ДЭ2 определяется сверткой входного сигнала $\dot{E}_2(t)$ и импульсной характеристики ДЭ2

$$\dot{h}_2(t) = \exp\left[j \frac{(t-T)^2}{2\mu_2}\right] e^{j\omega_0 t};$$

$$\dot{E}_3(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t') \dot{E}_1(t') \dot{h}_2(t-t') dt'. \quad (2)$$

Для того чтобы на выходе устройства сформировался спектр исследуемого радиосигнала, необходимо, чтобы $\mu_2 = -\mu_1 = -\mu$. Проинтегрировав (2) с учетом последнего условия, получим оптический сигнал на выходе ДЭ2:

$$\dot{E}_3(t) = \exp\left[j \left(\omega_0 t - \frac{t^2}{2\mu}\right)\right] F_S\left(\frac{t}{\mu}\right), \quad (3)$$

где

$$F_S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t) \exp(-j\omega t) dt$$

– спектр анализируемого сигнала. Таким образом, оптический сигнал на входе фотодиода представляет собой ОЛЧМ (первый множитель в (3)), промодулированный по амплитуде и фазе комплексным спектром анализируемого сигнала (второй множитель в (3)). В том случае, когда на вход устройства поступает реальный световой импульс $\dot{E}_0(t)$, вместо спектра радиосигнала в (3) нужно подставить спектр радиосигнала, свернутый с огибающей импульса ЛД:

$$\begin{aligned} \dot{E}_3(t) &= \\ &= \exp\left[j \left(\omega_0 t - \frac{t^2}{2\mu}\right)\right] \left\{ F_S\left(\frac{t}{\mu}\right) * \exp\left[-\left(\frac{2t}{\tau_0}\right)^2\right] \right\}, \end{aligned}$$

где "*" – символ операции свертки. Таким образом, огибающая импульса ЛД выступает в качестве аппаратной функции спектроанализатора.

Ток на выходе фотодетектора пропорционален оптической мощности P_0 :

$$I(t) = S_\lambda P_0(t) = \frac{S_\lambda |E_3(t)|^2}{W_0} \approx \frac{S_\lambda}{W_0} \left| F_S\left(\frac{t}{\mu}\right) \right|^2,$$

где W_0 – импеданс свободного пространства; S_λ – токовая монохроматическая чувствительность фотоприемника. Следовательно, ток на выходе фотоприемника пропорционален спектру мощности анализируемого сигнала. Спектр сигнала развернут во времени с масштабом $\Omega = t/\mu$.

Основными характеристиками спектроанализатора являются полоса анализа, разрешение по частоте и динамический диапазон.

Определим разрешение по частоте δF как ширину аппаратной функции спектроанализатора на уровне 0.25 [3]. При этом провал между аппаратными функциями, соответствующими откликам спектроанализатора на 2 сигнала, разнесенных по частоте на δF , составит –3 дБ.

Если лазерный импульс является гауссовским (1), разрешение по частоте

$$\delta F = \frac{\sqrt{\ln 2} \tau_0}{2\pi \mu} \quad (4)$$

прямо пропорционально длительности лазерного импульса и обратно пропорционально наклону дисперсионной характеристики. Длительность лазерного импульса τ_0 может быть менее 1 пс. Наклон дисперсионной характеристики μ согласно [5] может достигать значения $17\,000 \text{ пс}^2/\text{км}$. Приняв $\tau_0 = 1 \text{ пс}$, $\mu = 10^4 \text{ пс}^2/\text{км}$ и длину отрезка волокна 1 км, получим разрешение по частоте $\delta F = 13.2 \text{ МГц}$.

Полученный результат справедлив для безынерционного фотодиода. Реальные фотодиоды обладают конечной полосой рабочих частот. Представим реальный фотодиод в виде последовательного соединения безынерционного ФД и низкочастотного фильтра с частотой среза B . При этом импульсный отклик фотодиода можно аппроксимировать функцией $h_{\text{ФД}}(t) = \text{sinc}(2\pi Bt)$.

Ток на выходе фотодиода представляет собой свертку тока на выходе безынерционного ФД с импульсным откликом низкочастотного фильтра:

$$I(t) \approx (S/W_0) |F_S(t/\mu)|^2 * \text{sinc}(2\pi Bt).$$

Поскольку длительность отклика фотодиода, равная $1/B$, существенно больше длительности лазерного импульса τ_0 , функция $\text{sinc}(2\pi Bt)$ выступает в качестве аппаратной функции спектроанализатора и определяет его частотное разрешение:

$$\delta F = 0.39/(\pi\mu B),$$

обратно пропорциональное произведению μB .

Полоса рабочих частот фотодиода может превышать 100 ГГц [6]. При прежних значениях μ и длины волокна разрешение по частоте анализатора спектра $\delta F = 124 \text{ МГц}$. Этот результат значительно хуже, чем полученный из (4), но ближе к реально достижимым значениям.

Полоса анализа ΔF определяется полосой рабочих частот ЭОМ в силу существенного различия значений анализируемых частот и частоты света. По данным [6] полоса рабочих частот ЭОМ может достигать значения 110 ГГц.

Еще одним важным параметром спектроанализатора является динамический диапазон. Определим его как отношение максимального сигнала на входе устройства к минимальному уровню сигнала, который может быть обнаружен устройством, выраженное в децибелах: $DR = 10 \lg(P_{\text{max}}/P_{\text{min}})$, где P_{max} и P_{min} – минимальная и максимальная мощности входного сигнала, при которых сохраняется работоспособность устройства.

Поскольку для регистрации сигнала используется фотоприемник, минимальный уровень сигнала определяется уровнем его шумов. Шумы фотоприемника складывается из дробовой и тепловой составляющих. Будем считать, что дробовая составляющая значительно превышает тепловую, что справедливо при значительном уровне оптического сигнала [7]. Тогда дисперсия шума на выходе фотоприемника

$$\langle I \rangle^2 = 2eI_{\text{ср}}B, \quad (5)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона; $I_{\text{ср}}$ – средний ток фотодиода.

Радиосигнал вводится в оптический тракт с помощью ЭОМ на основе интерферометра Маха–Цандера, поэтому мощность оптического сигнала на выходе ЭОМ можно записать как

$$P_S = P_0 \sin[mS(t)/S_{\text{max}}],$$

где P_0 – мощность света на входе модулятора; m – индекс фазовой модуляции; S_{max} – максимальное значение сигнала.

В силу того, что в ЭОМ модуляция сигнала осуществляется за счет преобразования фазовой модуляции в амплитудную, возникают специфические нелинейные искажения. Будем считать, что на вход ЭОМ поступают 2 гармонических сигнала одинаковой амплитуды и разных частот Ω_1 и Ω_2 . Тогда средняя мощность света на выходе ЭОМ согласно методике из [8] составит:

$$P_{\pm} = P_0 |J_0(m)J_1(m)|^2, \quad (6)$$

где $J_0(\cdot)$, $J_1(\cdot)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно.

Средний ток фотодиода получим в следующем виде:

$$I_{\pm} = S_{\lambda} P_{\pm}. \quad (7)$$

Мощность полезного сигнала на частоте Ω_1

$$\text{или } \Omega_2: P_S = (0.5)P_0 |J_0(m)J_1(m)|^2.$$

Мощность интермодуляционных составляющих третьего порядка на частоте $2\Omega_1 - \Omega_2$ или

$$2\Omega_2 - \Omega_1: P_{\text{ИМ}} = 0.5P_0 |J_1(m)J_2(m)|^2, \text{ где } J_2(\cdot) - \text{ функция Бесселя первого рода второго порядка.}$$

Подставив (6) в (7) и (5), получим:

$$\langle I \rangle = \sqrt{2eBS_{\lambda}P_0} |J_0(m)J_1(m)|. \quad (8)$$

Минимальное значение дисперсии шумов на выходе фотоприемника достигается при равенстве дробовых шумов и интермодуляционных составляющих. Это позволяет определить максимальный индекс фазовой модуляции в ЭОМ. Учитывая асимптотику функций Бесселя при $m \ll 1$, получим:

$$m = 2 \left[8eB / (S_{\lambda} P_0) \right]^{1/6}. \quad (9)$$

В качестве минимального сигнала примем сигнал, мощность которого превышает уровень шумов в 2 раза (на 3 дБ). С учетом (8) получим динамический диапазон устройства:

$$DR = 10 \lg \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt[3]{\left(\frac{S_{\lambda} P_0}{8eB} \right)^2} \right]. \quad (10)$$

Значение выходного тока фотодиода ограничено значением I_{max} , которое не может превышать амплитуды отклика полезного сигнала. Добавив это условие к (9), получим:

$$DR = 10 \lg \left(\frac{1}{4\sqrt{2}} \frac{I_{\text{max}}}{eB} \right).$$

Индекс модуляции, обеспечивающий такой динамический диапазон:

$$m = 2 \left(\sqrt[4]{\frac{2eB}{I_{\text{max}}}} \right).$$

Выражение (10) показывает, что динамический диапазон устройства определяется параметрами фотодиода: максимальным выходным током и

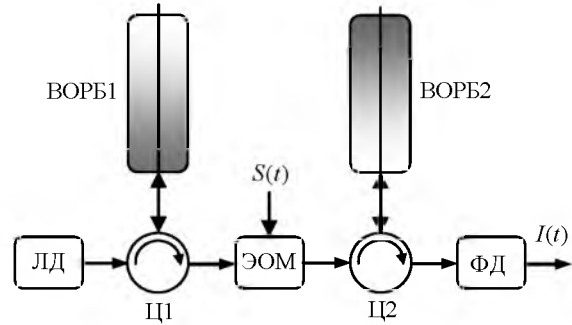


Рис. 2

полосой обрабатываемых частот. В частности, для полосы частот 100 ГГц и максимального тока фотодиода 1 мА получим $DR = 40$ дБ и $m = 0.15$ рад.

Описанный спектроанализатор может быть выполнен на основе оптических волокон с положительной и отрицательной дисперсиями (см. рис. 1) и на основе волоконно-оптических отражательных решеток Брэгга [4] (рис. 2). Устройство на рис. 2 работает следующим образом. Короткий световой импульс от лазерного диода ЛД поступает на оптический циркулятор Ц1 и далее в отражательную волоконно-оптическую решетку Брэгга ВОРБ1. Отраженный сигнал через циркулятор направляется в электрооптический модулятор ЭОМ. Волоконно-оптическая решетка обладает линейно изменяющимся по длине периодом отражательной структуры, в результате сигнал на входе ЭОМ представляет собой ОЛЧМ-импульс. В ЭОМ свет модулируется по амплитуде сигналом $S(t)$ и поступает на второй циркулятор Ц2, а затем на вторую решетку Брэгга ВОРБ2, развернутую встречно по отношению к ВОРБ1. В результате сигнал, поступающий на фотодиод ФД, представляет собой световой импульс, промодулированный по амплитуде амплитудным спектром анализируемого сигнала $S(t)$. Ток на выходе фотодиода пропорционален спектру мощности анализируемого радиосигнала.

Рассмотренное устройство представляет собой спектроанализатор параллельного типа, работающий в реальном времени. Спектроанализатор позволяет анализировать сигналы с полосой частот до 100 ГГц и разрешением по частоте 100...200 МГц. Число элементов разрешения в спектре может составлять несколько сотен. Динамический диапазон устройства 40...50 дБ. Такой спектроанализатор может быть применен при параллельном спектральном анализе радиосигналов миллиметрового диапазона в реальном времени. Применение средств фотоники к спектральному анализу радиосигналов позволяет получить характеристики устройств, недостижимые другими способами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Спектральный анализ радиосигналов средствами радиофотоники // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 4. С. 11–15.
2. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов / под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. В. Дмитриева. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.
3. Акустооптические процессоры спектрального типа / под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
4. Chao Wang. Dispersive Fourier Transformation for Versatile Microwave // Photonics. 2014. Vol. 1, iss. 4. P. 586–612.
5. Photonic Approach for Microwave Spectral Analysis based on Fourier Cosine Transform / Yun Wang, Hao Chi, Xianmin Zheng, Xiaofeng Jin // Optics let. 2011. Vol. 36, № 19. P. 3897–3899.
6. Применение элементов фотоники в специальной аппаратуре / И. Ю. Денисюк, Л. Н. Аснис, М. И. Фокина, Н. О. Собошук. СПб.: Изд-во СПбГУИТМО, 2008. 122 с.
7. Оптические устройства в радиотехнике: учеб. пособие для вузов / под. ред. В. Н. Ушакова. 2-е изд. испр. и доп. М.: Радиотехника, 2009. 264 с.
8. Бондаренко В. С., Зоренко В. П., Чкалова В. В. Акустооптические модуляторы света. М.: Радио и связь, 1988. 136 с.

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

Spectrum Analyzer Based on Dispersive Fiber

Functioning of spectrum analyzer based on optical chirp-transform is observed. Optical elements with frequency dispersion are used to perform spectrum analysis. Scheme and attainable characteristics are presented.

Fourier transform, spectrum analysis, dispersive elements, chirp-transform

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

УДК 621.391

В. П. Климентьев, А. Б. Сергиенко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка состояния восходящего канала в системе множественного доступа с разреженным кодированием

Рассмотрено влияние ошибки оценки состояния восходящего канала с неселективными блоковыми замираниями на помехоустойчивость некодированной и кодированной систем множественного доступа с разреженным кодированием, относящихся к неортогональным системам множественного доступа. Приведены результаты исследования дисперсии ошибки оценки канала по неортогональным пилот-сигналам. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что требуемая точность оценки канала зависит от длины кодового блока. Выполнено сравнение полученных результатов с границей Крамера-Рао.

Система мобильной связи, неортогональный множественный доступ, множественный доступ с разреженным кодированием, оценка канала, турбокод, пилот-сигналы

К требованиям будущих стандартов мобильной связи пятого поколения (5G) относятся повышение спектральной эффективности, увеличение скорости передачи данных, уменьшение задержек, а также обеспечение работы с огромным числом одновременно находящихся в сети пользователей [1]. Так, 5G-системы должны поддерживать до 100 млрд одновременных соединений, скорость передачи данных порядка нескольких десят-

ков мегабит в секунду в расчете на одного пользователя и очень малые задержки (порядка 1 мс). Одним из применений данной технологии является Интернет вещей (Internet of Things – IoT). Коммерческое внедрение систем пятого поколения намечено к 2020 г., поэтому в настоящее время проводится множество исследований, направленных на решение перечисленных проблем.