

Аронов Л.А., Грачев С.В., Ушаков В.Н.
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

Волоконно-оптический спектроанализатор радиосигналов

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.

Ключевые слова: преобразование Фурье, спектральный анализ, дисперсионные элементы, ЛЧМ-преобразование

Существуют различные схемы спектроанализаторов, осуществляющих спектральный анализ радиосигналов средствами фотоники [1]. В докладе 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. Амплитуда 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 ограничены технологическими причинами в первом случае величиной 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.

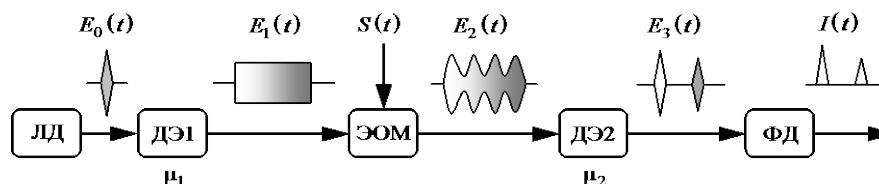


Рис. 1

Устройство работает следующим образом. Короткий световой импульс от полупроводникового лазера ЛД поступает на первый дисперсионный элемент ДЭ1. На выходе ДЭ1 образуется оптический сигнал с линейно изменяющейся частотой (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, 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 $\dot{H}_1(\omega) = \dot{A} \exp(-j\omega T) \exp[-j(\mu_1/2)(\omega - \omega_0)^2]$, 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 $\dot{H}_1(\omega)$:

$\dot{h}_1(t) = D \exp\left[j \frac{(t-T)^2}{2\mu_1}\right] e^{j\omega_0 t}$, где D – произвольная константа. Не нарушая общности, положим $D = 1$.

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:

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

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 $F_S(\omega)$ – спектр анализируемого сигнала. Таким образом, оптический сигнал на входе фотодиода представляет собой оптический ЛЧМ-сигнал (первый сомножитель в (3)), промодулированный по амплитуде и фазе комплексным спектром анализируемого сигнала (второй сомножитель 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:

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

Таким образом, огибающая импульса ЛД выступает в качестве аппаратной функции спектроанализатора.

Ток на выходе фотодетектора пропорционален оптической мощности P_0 :

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

где W_0 – импеданс свободного пространства; S_I – токовая 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 два сигнала, разнесенных по частоте на δF , составит -3 дБ. Если лазерный импульс является Гауссовым (1), разрешение по частоте составляет:

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

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 $17000 \text{ пс}^2/\text{км}$. 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 .

$$I(t) \approx \frac{S_I}{W_0} \left| F_S \left(\frac{t}{\mu} \right) \right|^2 * \text{sinc}(2\pi B t).$$

Поскольку длительность отклика фотодиода, равная $1/B$, существенно больше длительности лазерного импульса τ_0 , функция $\text{sinc}(2\pi B t)$ 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 составит $\delta F = 124$ МГц. Этот результат значительно хуже, чем полученный из (4), но ближе к реально достижимым величинам.

Полоса анализа ΔF определяется полосой рабочих частот ЭОМ в силу значительного различия по величине анализируемых частот и частоты света. По данным [6] полоса рабочих частот ЭОМ может достигать величины 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 дБ. $DR = 10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$, 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

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

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; I_{\pm} – 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 $P_S = P_0 \sin[mS(t)/S_{\max}]$, 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 два 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 составляет:

$$I_{\pm} = SP_{\pm}. \quad (7)$$

Мощность полезного сигнала на частотах Ω_1 или Ω_2 : $P_S = (0.5)P_0 |J_0(m)J_1(m)|^2$.

Мощность интермодуляционных составляющих третьего порядка на частотах $2\Omega_1 - \Omega_2$ или $2\Omega_2 - \Omega_1$: $P_{\text{им}} = 0.5P_0 |J_1(m)J_2(m)|^2$, где $J_2(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода второго порядка.

Подставив (6) в (7) и (5), получим:

$$\langle I \rangle = \sqrt{2eBSP_0} |J_0(m)J_1(m)|. \quad (8)$$

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:

$$m = 2 \left[8eB / (SP_0) \right]^{1/6}. \quad (9)$$

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

$$DR = 10 \lg \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt[3]{\left(\frac{SP_0}{8eB}\right)^2} \right]. \quad (10)$$

Значение выходного тока фотодиода ограничено максимальной величиной I_{\max} , которую не может превышать амплитуда отклика полезного сигнала. Добавив это условие к (9), получим $DR = 10 \lg \left(\frac{1}{4\sqrt{2}} \frac{I_{\max}}{eB} \right)$.

Индекс модуляции, обеспечивающий такой динамический диапазон: $m = 2 \left(4 \sqrt{\frac{2eB}{I_{\max}}} \right)$.

Выражение (10) показывает, что динамический диапазон устройства определяется параметрами фотодиода: максимальным выходным током и полосой обрабатываемых частот. В частности, для полосы частот 100 ГГц и максимальному току фотодиода 1 мА получим $DR = 40$ дБ и $m = 0.15$ рад.

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. Такое устройство может использоваться при параллельном спектральном анализе радиосигналов миллиметрового диапазона в реальном времени.

Библиографический список

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. Изд. 2-е, 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.