

Измерение частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией

Д.Ю. Сидлеров, К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в данной статье исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени с использованием волоконных брэгговских решеток. Построена аналитическая модель схемы, реализующей данный метод. Проведено математическое моделирование и изложен принцип измерения частоты СВЧ-сигналов на основе предложенной схемы.

Ключевые слова: измерение частоты СВЧ-сигналов, режим реального времени, волоконная брэгговская решетка

1. Введение

В системах радиолокации и радиоэлектронной борьбы частота является одним из наиболее значимых параметров СВЧ-сигнала, позволяющим идентифицировать и классифицировать его источник. В таких системах анализ частоты СВЧ-сигнала необходимо осуществлять в режиме реального времени и в широком диапазоне частот [1]. Радиотехнические системы измерения частоты СВЧ сигналов обладают малым временем измерения менее 1 мкс, однако такие системы имеют узкий диапазон измеряемых частот. Реализация измерения в широком диапазоне частот осуществляется переходом к сложным системам с многоканальной архитектурой, что приводит к увеличению стоимости и массогабаритных параметров таких устройств [2]. Применение оптических методов обработки СВЧ-сигналов в устройствах измерения частоты позволяет значительно расширить диапазон измеряемых частот, а также упростить их архитектуру [3].

В волоконно-оптических системах измерения частоты СВЧ-сигналов широко распространены методы измерения на основе хроматической дисперсии в оптическом волокне. Их существенным недостатком является большое время измерения, связанное с задержкой в оптическом волокне большой длины [4]. В данной работе исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией, позволяющий устранить значительно уменьшить время измерения.

2. Результаты и обсуждение

Измерение частоты СВЧ-сигналов в волоконно-оптических системах осуществляется путем преобразования частоты СВЧ-сигналов в величину, поддающуюся измерению более простыми методами. Структурная схема волоконно-оптического устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией показана на рисунке 1. В данной схеме оптическая несущая, генерируемая лазерным диодом, поступает на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера, где модулируется по интенсивности исследуемым СВЧ-сигналом, поступающим на вход

модулятора. К выходу модулятора подключен оптический усилитель на легированном эрбием волокне, предназначенный для компенсации потерь в волоконно-оптических компонентах и на разделении оптического сигнала. На выходе усилителя оптический модулированный сигнал разделяется оптическим разветвителем на опорный и несколько измерительных каналов. Опорный канал состоит из СВЧ-фотодиода, выполняющего оптоэлектронное преобразование, и датчика СВЧ-мощности. Измерительный канал состоит из волоконной брэгговской решетки, подключенной через оптический циркулятор, СВЧ-фотодиода и датчика СВЧ-мощности. Волоконная брэгговская решетка, используемая в составе измерительного канала, является фазовым фильтром, воздействующим на спектральные компоненты огибающей модулированного оптического сигнала. Воздействие такого фазового фильтра вызывает частотно зависимое изменение мощности на выходе СВЧ-фотодиода, которую регистрирует датчик СВЧ-мощности. Таким образом, частоте исследуемого СВЧ-сигнала, поступающего на вход устройства, сопоставляются определенные значения СВЧ-мощности, регистрируемые на выходе СВЧ-фотодиодов. Сигналы на выходе датчиков СВЧ-мощности оцифровываются и подвергаются цифровой обработке, результатом которой является оценка частоты исследуемого СВЧ-сигнала.

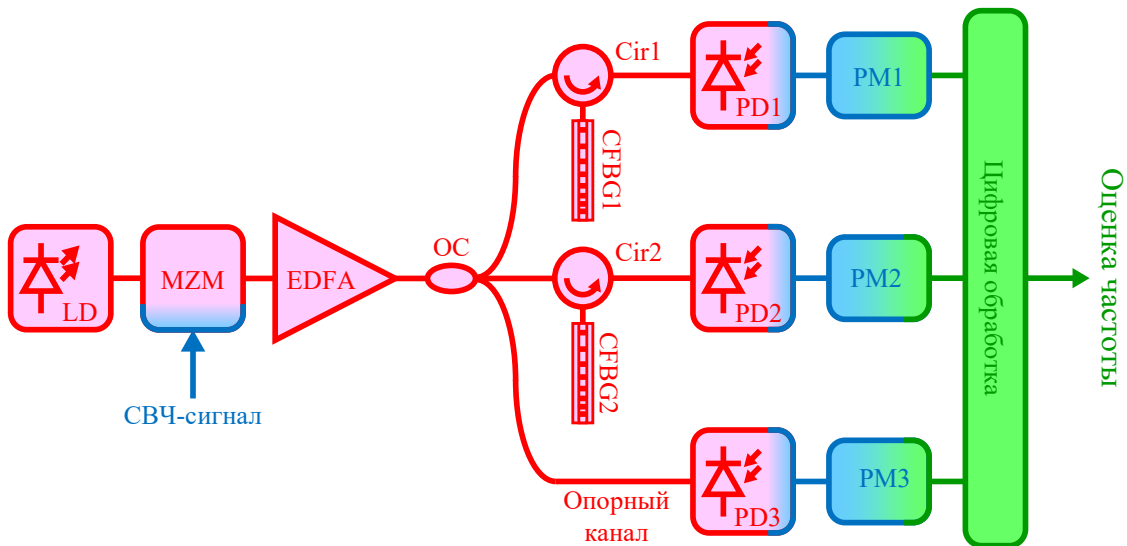


Рисунок 1. Структурная схема устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией: LD – лазерный диод, MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, EDFA – оптический усилитель на легированном эрбием волокне, OC – оптический разветвитель, Cir – оптический циркулятор, CFBG – волоконная брэгговская решетка с высокой хроматической дисперсией, PD – СВЧ-фотодиод, PM – датчик СВЧ-мощности

Электрическое поле модулированного по интенсивности оптического сигнала на выходе электрооптического модулятора Маха-Цендера, работающего в режиме малых сигналов, можно записать в следующем виде [5]:

$$E_{MZM}(t) \approx \frac{\sqrt{T_{MZM} P_{LD}}}{2} \left[1 + e^{j\varphi_{MZM}} + j\beta e^{j2\pi f_{RF} t} \frac{e^{j\varphi_{MZM}} - 1}{2} + j\beta e^{-j2\pi f_{RF} t} \frac{e^{j\varphi_{MZM}} - 1}{2} \right] e^{j2\pi f_{LD} t}, \quad (1)$$

где T_{MZM} – коэффициент оптических потерь модулятора Маха-Цендера, P_{LD} , f_{LD} – выходная оптическая мощность и частота излучения лазерного диода, соответственно, φ_{MZM} фаза смещения модулятора Маха-Цендера, f_{RF} – частота исследуемого СВЧ-сигнала, $\beta = \pi V_{RF}/V_{\pi}$ – глубина модуляции, V_{RF} – амплитуда исследуемого СВЧ-сигнала V_{π} – полуволновое напряжение модулятора Маха-Цендера.

После усиления и разделения на несколько каналов оптический сигнал поступает на вход волоконных брэгговских решеток, где его огибающая испытывает воздействие хроматической дисперсии. Фазовый сдвиг, который хроматическая дисперсия вносит в спектральные компоненты огибающей сигнала, можно описать путем разложения постоянной распространения в ряд Тейлора относительно оптической несущей [6]. Учитывая только компоненту разложения, описывающую искажения, вносимые хроматической дисперсией, сигнал на выходе волоконных брэгговских решеток принимает вид:

$$E_{MZM}(t) \approx \frac{\sqrt{T_{MZM} G k T_{FBG} P_{LD}}}{2} \left[\begin{aligned} &1 + e^{j\varphi_{MZM}} + j\beta \frac{e^{j\varphi_{MZM}} - 1}{2} e^{j2\pi f_{RF} t} e^{-j\pi c D f_{RF}^2 / f_{LD}^2} + \\ &+ j\beta \frac{e^{j\varphi_{MZM}} - 1}{2} e^{-j2\pi f_{RF} t} e^{-j\pi c D_i f_{RF}^2 / f_{LD}^2} \end{aligned} \right] e^{j2\pi f_{LD} t}, \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления оптического усилителя, k – коэффициент деления оптического разветвителя, T_{FBG} – оптические потери в волоконной брэгговской решетке, D – хроматическая дисперсия брэгговской решетки в измерительном канале, c – скорость света в вакууме.

Далее сигналы из измерительных и опорного каналов поступают на вход СВЧ-фотодиодов. Пренебрегая постоянной составляющей фототока и гармониками более высокого порядка, СВЧ-мощность, измеряемую на выходе СВЧ-фотодиодов, можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_m &\approx S_{PD}^2 R_{PD}^2 P_{opt}^2 \beta^2 \cos^2(\pi c D f_{RF}^2 / f_{LD}^2) / 4, \\ P_{ref} &\approx S_{PD}^2 R_{PD}^2 P_{opt}^2 \beta^2 / 4, \end{aligned} \quad (3)$$

где P_m – СВЧ-мощность на выходе измерительного канала, а P_{ref} – опорного, S_{PD} – токовая чувствительность СВЧ-фотодиода (предполагается практически идентичной для каждого канала), R_{PD} – сопротивление нагрузки СВЧ-фотодиода, P_{opt} – мощность оптического сигнала на входе СВЧ-фотодиода.

Затем СВЧ-мощность, полученная в измерительных каналах, нормируется на СВЧ-мощность, полученную в опорном канале. В результате для каждого измерительного канала получаем нормированный коэффициент передачи, который устанавливает взаимосвязь между СВЧ-мощностью на его выходе и частотой исследуемого СВЧ-сигнала. Нормированный коэффициент передачи явно не зависит от уровня входной мощности исследуемого СВЧ-сигнала и для измерительного канала принимает вид:

$$p(f_{RF}) = P_m / P_{ref} = \cos^2(\pi c D f_{RF}^2 / f_{LD}^2). \quad (4)$$

Таким образом на основе полученных нормированных коэффициентов передачи осуществляется оценка частоты. На основе параметров системы, приведенных в таблице 1, было проведено математическое моделирование, в результате были получены нормированные коэффициенты передачи в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц для измерительных каналов с разным уровнем хроматической дисперсии, которые показаны на рисунке 2. Нормированный коэффициент передачи, полученный для измерительного канала А, имеющего высокий уровень хроматической дисперсии, имеет большую крутизну характеристики, что обеспечивает более высокое разрешение при измерении частоты, однако, периодичность полученной кривой в рассматриваемом диапазоне частот вносит неоднозначность в измерение.

Нормированный коэффициент передачи, полученный для измерительного канала Б с более низким уровнем хроматической дисперсии, имеет низкую крутизну

характеристики, но при этом монотонно убывает во всем рассматриваемом диапазоне частот. Оценка частоты исследуемого СВЧ-сигнала выполняется следующим образом. На основе СВЧ-мощности, измеренной в канале с меньшим уровнем хроматической дисперсии, определяется истинный диапазон частоты исследуемого СВЧ-сигнала. Затем на основе СВЧ-мощности, измеренной в канале с высоким уровнем хроматической дисперсии, оценивается частота исследуемого СВЧ-сигнала.

Таблица 1. Параметры, используемые при моделировании схемы

Параметр	Значение	Описание
T_{MZM}	3 дБ	оптические потери модулятора
P_{LD}	10 дБм	оптическая мощность лазерного диода
f_{LD}	194 ТГц (1550 нм)	частота генерации лазерного диода
V_{π}	6 В	полуволновое напряжение модулятора
φ_{DC}	90°	фаза смещения модулятора
f_{RF}	2 – 18 ГГц	диапазон входных СВЧ-частот
G	10 дБ	коэффициент оптического усиления
k	0.33	коэффициент деления оптического разветвителя
T_{FBG}	3 дБ	оптические потери брэгговской решетки
D	165 и 660 пс	уровень хроматической дисперсии брэгговской решетки
S_{PD}	0.6 А/Вт	токовая чувствительность СВЧ-фотодиодов
R_{PD}	50 Ом	сопротивление нагрузки СВЧ-фотодиода

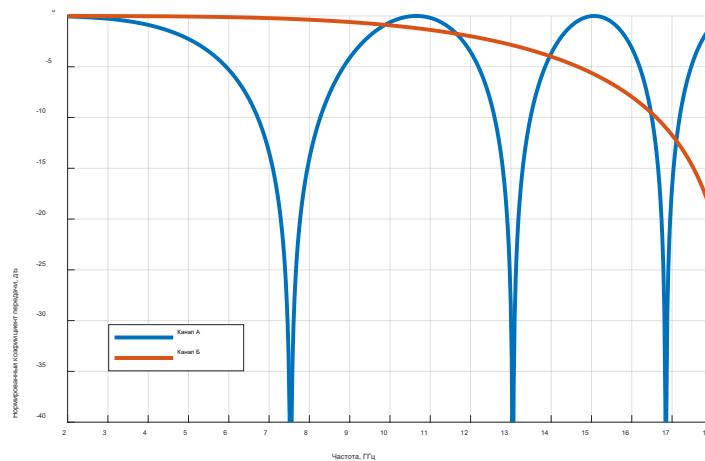


Рисунок 2. Нормированные коэффициенты передачи в измерительных каналах с разным значением хроматической дисперсии

Основной вклад в ошибку измерения на основе нормированных коэффициентов передачи вносит неопределенность измерения с помощью детекторов СВЧ-мощности. На рисунке 3 приведена ошибка измерения частоты с помощью устройства на основе волоконных брэгговских решеток, рассчитанная при неопределенности измерения СВЧ-мощности 0.05 дБ. Как видно из приведенного рисунка при частотах около 2 ГГц ошибка измерения составляет около 350 МГц и спадает до 50 МГц при частотах около 4 ГГц, что объясняется тем, что в начале данного участка частот нормированный коэффициент передачи измерительного канала с высоким уровнем дисперсии характеризуется малой крутизной. Это эквивалентно снижению эффективного разрешения по частоте, следует отметить, что с ростом частоты крутизна нормированного коэффициента передачи возрастает вследствие чего возрастает и эффективное разрешение по частоте и снижается ошибка измерения. Этим же механизмом обусловлено увеличение ошибки измерения в области частот около 11, 15 и 18 ГГц.

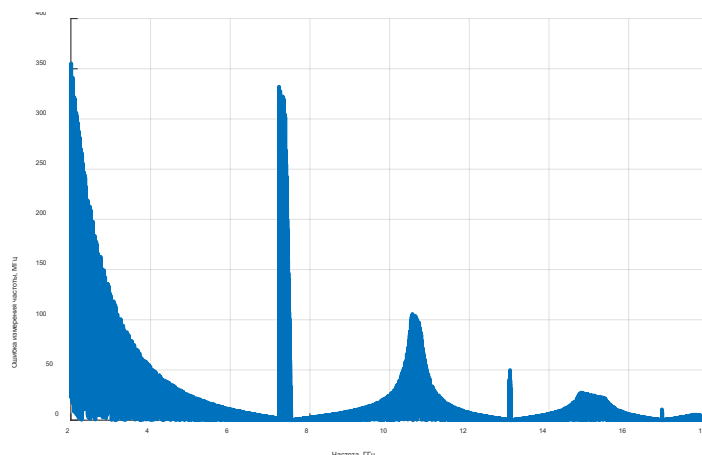


Рисунок 3. Ошибка измерения частоты с помощью устройства на основе волоконных брэгговских решеток, рассчитанная при неопределенности измерения СВЧ-мощности 0.05 дБ

Также стоит отметить еще ряд областей, в которых ошибка измерения частоты несколько более высокая: вблизи частот 8, 13 и 17 ГГц. В указанных областях нормированный коэффициент передачи измерительного канала минимален, поэтому имеется два значения оценки частоты, которые близко расположены к ее истинному значению и вследствие этого трудноразличимы. Для снижения ошибки измерения частоты можно использовать дополнительный измерительный канал с существенно отличающейся накопленной дисперсией.

3. Заключение

В данной статье предложена схема устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией и проведено ее математическое моделирование. Брэгговские решетки, являющиеся ключевым элементом схемы, позволяют реализовать преобразование «частота – СВЧ-мощность». На основе данного принципа показана возможность измерения частоты в диапазоне от 2 до 18 ГГц с ошибкой измерения менее 350 МГц. Дальнейшая работа направлена на создание макета устройства и экспериментальное исследование его характеристик.

Список литературы

1. Байлов В., Плаксиенко В. Средства радиоэлектронного наблюдения: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ, 2009. – 104 с.
2. Егоров, Н. Мгновенное измерение частоты: методы и средства / Н. Егоров, В. Кочемасов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2017, № 5. – С. 136-141.
3. Frequency measurement technology / I. Llamas-Garro et al // London: Artech House, 2018. – 207 p.
4. Nazemosadat, E. Broadband microwave frequency measurement using a heterogeneous multicore fiber / E. Nazemosadat, S. García, I. Gasulla // Proceedings of 2022 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Orlando, 2022. – P. 1-4.
5. Electro-optic modulation for photonic networks / T. Kawanishi // Tokyo: Springer, 2022. – 240 p.
6. Fiber optic communications: fundamentals and applications / S. Kumar, M. Jamal Deen // Canada: Wiley, 2014. – 569 p.