

Измерение частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов

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

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в данной статье предлагается метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов. Построена аналитическая модель схемы, реализующей исследуемый метод. Изложен принцип измерения частоты СВЧ-сигналов на основе предложенной схемы, а также экспериментально продемонстрирована возможность одновременного измерения частоты нескольких сигналов.

Ключевые слова: измерение частоты СВЧ-сигнала в режиме реального времени, электрооптический модулятор Маха-Цендера, частотно-временное преобразование, радиوفотоника.

1. Введение

В настоящее время существует потребность в системах мониторинга радиоэлектронной обстановки, анализирующих радиочастотный спектр в широкой полосе частот (десятки гигагерц) в режиме реального времени [1]. Устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени предназначены для первоначальной идентификации сигнала и определения частотных диапазонов, на которые стоит сосредоточить более сложные ресурсы спектрального анализа. Из-за узкополосности традиционной радиоэлектронной аппаратуры электронные СВЧ-устройства обладают сложной архитектурой и низким быстродействием для сигналов с шириной полосы более 2 ГГц [2]. Напротив, из-за огромной разности частоты оптической несущей (~200 ТГц) и модуляционной СВЧ-составляющей (~1 – 100 ГГц) в радиопотонных устройствах модулированный оптический сигнал является узкополосным, что существенно упрощает анализ параметров СВЧ-сигналов [3,4].

В радиопотонных устройствах обработки СВЧ-сигналов применяются методы на основе гетеродинирования анализируемого СВЧ-сигнала с опорным сигналом с линейно-частотной модуляцией [5-7]. В качестве нелинейного преобразователя (аналог СВЧ-смесителя) используют электрооптические модуляторы Маха-Цендера, так как вследствие линейности по фазе и нелинейности по амплитуде такого модулятора обеспечивается сверхширокополосное (в полосе свыше 40 ГГц) преобразование по частоте вниз [8]. Анализ сигнала разностной частоты позволяет оценивать параметры произвольного количества неизвестных частотных составляющих анализируемого СВЧ-сигнала во всем диапазоне частот опорного сигнала по принципу преобразования «частота – время»: при совпадении мгновенной частоты опорного и анализируемого сигналов формируется низкочастотный импульс, временное положение которого однозначно связано с частотой неизвестного сигнала. В данной работе исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов, в котором для анализа временного положения сигнала разностной частоты используются частотно-временные преобразования.

2. Принцип работы метода

Структурная схема радиопотонного устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов показана на рисунке 1. Измерение частоты СВЧ-сигналов осуществляется путем преобразования последней в величину, поддающуюся измерению более простыми методами. В предлагаемом методе – это временной интервал.

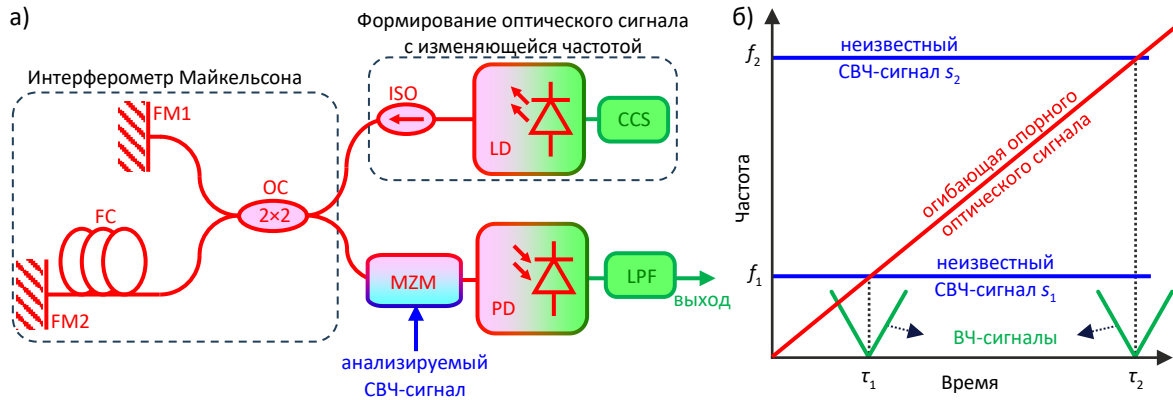


Рисунок 1. Структурная схема устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера (а) и принцип его работы (б): CCS – управляемый источник тока, LD – лазерный диод, ISO – оптический изолятор, OC – оптический разветвитель, FM – зеркало Фарадея, FC – волоконно-оптическая катушка, MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, PD – фотодиод, LPF – низкочастотный фильтр.

Принцип работы метода заключается в следующем. Оптический сигнал с пилообразно изменяющейся частотой формируется одночастотным лазерным диодом, ток инжекции которого изменяется во времени. Затем оптический сигнал с изменяющейся частотой поступает на вход волоконно-оптического интерферометра Майкельсона на основе оптического разветвителя 2×2 , двух зеркал Фарадея и волоконно-оптической катушки, обеспечивающей разницу времен задержки. Интерферометр Майкельсона позволяет сформировать оптический сигнал, в котором в каждый момент присутствуют две составляющие, разность частот между которыми изменяется линейно. Сформированный оптический сигнал в качестве опорного поступает на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера, где гетеродинируется с анализируемым СВЧ-сигналом, поступающим на электрический вход модулятора. Оптический сигнал с выхода модулятора Маха-Цендера поступает на вход СВЧ-фотодиода, к выходу которого подключен фильтр нижних частот. При приеме неизвестных сигналов на выходе фильтра нижних частот формируются импульсы с разностной частотой. При известном линейном законе изменения частоты опорного оптического сигнала, анализ временного положения составляющих выходного сигнала с наименьшей разностной частотой (низкочастотных импульсов) позволяет измерять частоты произвольного числа спектральных составляющих неизвестного СВЧ-сигнала. Для снижения неопределенности измерения частоты для выходного сигнала также можно выполнять расчет частотно-временных распределений.

2. Аналитическая модель

Частота огибающей опорного оптического сигнала изменяется линейно, для комплексной амплитуды поля данного сигнала на входе модулятора Маха-Цендера

справедлива следующая нормировка [9]:

$$|E_{opt}(t)|^2 = P_{ref} \cos(2\pi f_0 t + \mu t^2), \quad (1)$$

где P_{ref} – эквивалентная амплитуда огибающей опорного сигнала, f_0 и $\mu = 2\pi B/T_p$ – начальная частота и коэффициент изменения частоты огибающей опорного сигнала, B и T_p – ширина полосы частот и длительность опорного сигнала.

В качестве аналога СВЧ-смесителя в радиофотонном устройстве используется электрооптический модулятор Маха-Цендера, на электрический вход которого подается анализируемый сигнал. В наиболее простом случае частоту составляющих последнего $s_1, s_2, \dots$ можно приближенно считать постоянной $f_1, f_2, \dots$. Для одной из спектральных составляющих гармонического сигнала $s_1(t)$ с частотой f_1 справедливо следующее представление огибающей сигнала на выходе модулятора Маха-Цендера:

$$P_{opt}(t) = \underbrace{\alpha P_{ref} \cos(2\pi f_0 t + \mu t^2)}_{\text{копия опорного сигнала}} - \underbrace{\gamma P_{ref} \cos(\pi s_1(t) / V_\pi + \varphi_{MZM}) \cos(2\pi f_0 t + \mu t^2)}_{\text{преобразованная составляющая}} \quad (2)$$

где α и γ – параметры модулятора Маха-Цендера, учитывающие оптические потери и контрастность, $s_1(t) = V_1 \cos(2\pi f_1 t)$ – одна из спектральных составляющих анализируемого СВЧ-сигнала с амплитудой V_1 и частотой f_1 , V_π и φ_{MZM} – полувольтное напряжение и фаза смещения модулятора Маха-Цендера.

Огибающая оптического сигнала (2) на выходе модулятора Маха-Цендера содержит ряд комбинационных составляющих, среди которых имеется разностная частота. Если пренебречь суммарными частотами (физически эквивалентно использованию низкочастотного фильтра с шириной полосы пропускания $\Gamma \ll f_1$), электрический сигнал на выходе фотодиода с чувствительностью η и импедансом нагрузки Z можно представить в виде:

$$V_{PD} \approx V_0 \cos(\pi s_1(t) / V_\pi + \varphi_{MZM} - 2\pi f_0 t - \mu t^2), \quad V_0 \triangleq \gamma \eta V_{ref} Z / 2 \quad (3)$$

При учете разложения Якоби-Ангера сигнал с фотодиода с разностной частотой может быть представлен в следующем виде:

$$V_{PD} \approx V_0 J_1(\pi V_1 / V_\pi) \sin(2\pi f_0 t + \mu t^2 - \varphi_{MZM} - 2\pi f_1 t) \quad (4)$$

Низкочастотный импульс формируется на выходе фотодиода в момент времени t_1 , когда частота сигнала (4) оказывается близка к нулевой:

$$f(t_1) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \arg(V_{PD}) \Big|_{t=t_1} = 0 \Rightarrow f_0 - f_1 + \frac{\mu}{\pi} t = 0 \Rightarrow t_1 = \frac{T_p}{2B} (f_1 - f_0) \quad (5)$$

Для нескольких спектральных составляющих k и m анализируемого будут формироваться комбинационные составляющие порядка $(i+j)$, амплитуды которых из-за свойств функций Бесселя для аргументов вблизи 0 удовлетворяют следующему условию:

$$V_{km}^{(ij)} \approx V_0 J_i(\pi V_k / V_\pi) J_j(\pi V_m / V_\pi) \ll V_0 J_1(\pi V_{k,m} / V_\pi), \quad \forall i, j > 0 \quad (6)$$

При учете условия (6) для каждой спектральной составляющей анализируемого сигнала в момент времени, определяемый формулой (5), будет формироваться низкочастотный импульс, из анализа которого возможно рассчитать частоту неизвестной составляющей СВЧ-сигнала. Неопределенность временного положения низкочастотного импульса определяется верхней частотой детектора огибающей $\sim 0.1/T_p$, а при использовании частотно-временного преобразования неопределенность

составляет порядка разрешения по частоте, величина которого, например, при использовании преобразования Фурье с синхронным сжатием, меньше, чем $\sim 2^{-8}/T_p$ [9].

3. Экспериментальная проверка

Для проверки работоспособности предложенного метода был собран макет радиофотонного устройства на основе схемы, показанной на рисунке 1. Следует отметить, что для перестройки частоты оптического сигнала на 10 ГГц достаточно полосу частот изменяющегося тока не более 40 кГц. (методы синтеза временной формы тока приведены в работе [9]). Используется волоконно-оптическая катушка, обеспечивающая разницу времен задержки 140 мкс. Это позволяет сформировать оптический сигнал, в котором в каждый момент присутствуют две составляющие, разность частот между которыми изменяется линейно: частота растет и спадает в диапазоне от 0 до 5 ГГц. На рисунке 2 приведены временное и частотно-временное представления сигнала на выходе радиофотонного устройства измерения частоты на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов, формирующийся при подаче на вход модулятора сигнала с частотами 1.02 и 1.1 ГГц. Видно, что при использовании частотно-временного преобразования удастся разрешать спектральные составляющие анализируемого сигнала с разностью частот 80 МГц, причем время измерения определяется длительностью опорного сигнала (140 мкс в эксперименте).

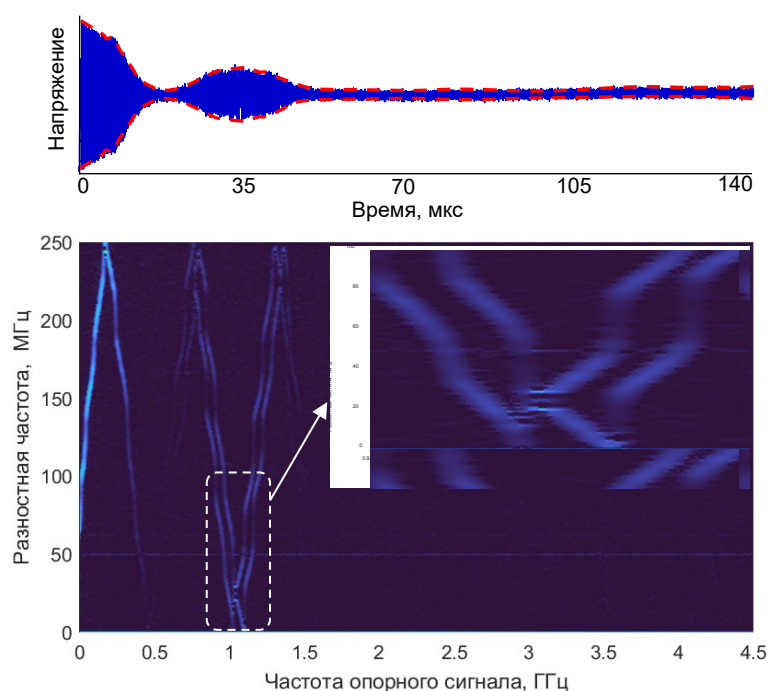


Рисунок 2. Сигнал на выходе радиофотонного устройства измерения частоты на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов, формирующийся при подаче на вход модулятора сигнала с частотами 1.02 и 1.1 ГГц: временное представление (сверху), частотно-временное распределение (снизу), в котором горизонтальная ось времени переопределена в частоты опорного сигнала

Важно, что комбинационные частоты вида (6) не оказывают значимого влияния на процесс измерения частоты.

3. Заключение

В данной статье предложена схема радиофотонного устройства измерения

частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе преобразования частоты во временной интервал с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера с использованием опорных оптических сигналов. Показано, что при совпадении мгновенной частоты опорного и одной из составляющих анализируемого сигналов формируется низкочастотный импульс, временное положение которого однозначно связано с частотой неизвестного сигнала. Экспериментально показана возможность измерения частоты произвольного количества частотных составляющих анализируемого СВЧ-сигнала в диапазоне до 5 ГГц, причем при использовании частотно-временного преобразования удается разрешать спектральные составляющие анализируемого сигнала с разностью частот менее 80 МГц, а время измерения определяется длительностью опорного сигнала (140 мкс в эксперименте).

Список литературы

1. Lu B. et al. Photonic-assisted intrapulse parameters measurement of complex microwave signals // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Т. 36. – №. 17. – С. 3633-3644.
2. Llamas-Garro I. et al. Frequency measurement technology // *Artech House*, 2018. – 207 с.
3. Urick V. et al. Fundamentals of microwave photonics // *John Wiley & Sons*, 2015. – 467 с.
4. Байлов В., Плаксиенко В. Средства радиоэлектронного наблюдения // Таганрог: Изд-во ТТИ, 2009. – 104 с.
5. Zhang B. et al. Microwave frequency measurement based on an optically injected semiconductor laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2020. – Т. 32. – №. 23. – С. 1485-1488.
6. Shi N. et al. A compact multifrequency measurement system based on an integrated frequency-scanning generator // *Applied Sciences*. – 2020. – Т. 10. – №. 23. – С. 8571.
7. Zhu B. et al. Broadband instantaneous multi-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked laser // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2021. – Т. 69. – №. 10. – С. 4576-4583.
8. Kawanishi T. Electro-optic modulation for photonic networks // *Tokyo: Springer*, 2022. – 240 с.
9. Микитчук К.Б. и др. Радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов и методы формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией на их основе // Тр. 12-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург. – 2023. – С. 325-329.