

Исследование полосно-пропускающего радиотонного СВЧ-фильтра с фазово-амплитудным преобразованием оптического сигнала

И.Ю. Таценко¹, А.В. Шамрай², С.И. Степанов³, А.Б. Устинов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

³ Центр научных исследований и высшего образования Энсенада

Аннотация: в данной работе исследован перестраиваемый радиотонный СВЧ-фильтр с фазово-амплитудным преобразованием оптического сигнала, реализующимся за счёт последовательного соединения электрооптического фазового модулятора и оптического фильтра. Экспериментально продемонстрирована перестройка полосы пропускания за счёт изменения частоты несущего оптического излучения. Описан метод расчёта АЧХ исследуемого СВЧ-фильтра. Предложен способ уменьшения потерь в полосе пропускания исследуемого СВЧ-фильтра.

Ключевые слова: радиотоника, перестраиваемый СВЧ-фильтр, ацетиленовая газовая ячейка

1. Введение

В последнее время радиотоника является одним из интенсивно развивающихся направлений в радиотехнике [1-4]. Устройства на основе принципов радиотоники нашли применение для генерации [5,6], передачи [7,8] и обработки СВЧ-сигналов [9,10]. В частности, большой интерес вызывает разработка и исследование радиотонных СВЧ-фильтров [2,10-15]. Принцип работы радиотонных СВЧ-фильтров заключается в переносе СВЧ-сигнала на оптическую несущую и последующей фильтрации гармоник оптического сигнала.

Целью настоящей работы является исследование полосно-пропускающего радиотонного СВЧ-фильтра с фазово-амплитудным преобразованием оптического сигнала, а также определение способов снижения потерь в полосе пропускания фильтра.

2. Исследование характеристик перестраиваемого радиотонного СВЧ-фильтра

Блок-схема экспериментального макета перестраиваемого радиотонного СВЧ-фильтра представлена на рисунке 1. Макет состоит из лазера с перестраиваемой длиной волны излучения в диапазоне 1527.6 – 1565.5 нм, фазового модулятора с полуволновым напряжением 5 В, ацетиленовой газовой ячейки с максимумом поглощения на длине волны 1530.37 нм, оптоволокну, соединяющего газовую ячейку с фотодетектором и фотодетектора с чувствительностью 0.8 А/Вт в диапазоне 0-12 ГГц и сопротивлением нагрузки 50 Ом, оптические потери при распространении в фазовом модуляторе и газовой ячейке составили около 5 дБ.

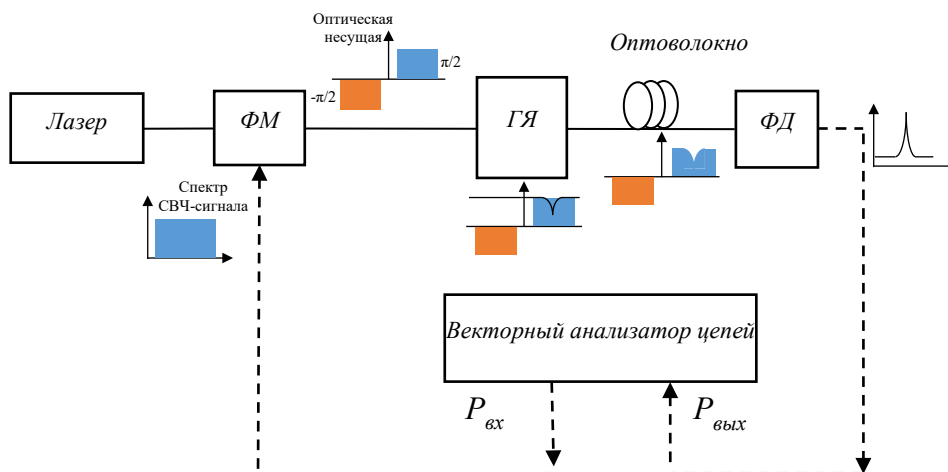


Рисунок 1. Блок-схема экспериментального макета перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра. ФМ – электрооптический фазовый модулятор, ГЯ – ацетиленовая газовая ячейка, ФД – фотодетектор. На вставках показаны спектры сигнала на соответствующих участках радиофотонного СВЧ-фильтра.

Принцип работы исследуемого фильтра заключается в следующем. На вход фазового модулятора подается непрерывное оптическое излучение мощностью 8.45 дБм (7 мВт), где оно модулируется СВЧ-сигналом с векторного анализатора цепей. На выходе фазового модулятора появляются две полосы оптических частот относительно несущей, которые находятся в противофазе. За счёт использования ацетиленовой газовой ячейки можно осуществить демодуляцию фазомодулированного сигнала при отстройке частоты оптической несущей вне линии поглощения ацетилена [16]. Газовая ячейка используется для подавления одной из боковых гармоник на частоте $f_c - f_{GC}$, где f_c – частота оптической несущей, f_{GC} – центральная частота поглощения ацетиленовой газовой ячейки. Из-за подавления одной из боковых гармоник фазомодулированного сигнала, на выходе газовой ячейки возникает биение интенсивности оптического излучения с частотой $f_c - f_{GC}$. Оптическое излучение с частотой биения $f_c - f_{GC}$ подается на фотодетектор, на выходе которого формируется СВЧ-сигнал с частотой $f_c - f_{GC}$. Такая схема имеет максимум передаточной характеристики на частоте $f_c - f_{GC}$, что соответствует центральной частоте пропускания фильтра. Перестройка центральной частоты полосы пропускания осуществляется за счёт отстройки частоты лазерного излучения от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки.

На рисунке 2 сплошными линиями представлены экспериментальные АЧХ радиофотонного СВЧ-фильтра, полученные при различных отстройках частоты (в диапазоне 4-12 ГГц) лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки. В ходе эксперимента использовалась наиболее интенсивная линия поглощения Р9 с центральной частотой поглощения 195,895 ТГц (1530,37 нм). Из полученных результатов видно, что центральная частота пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра соответствует отстройке частоты излучения лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки. Полоса пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра определяется шириной линии поглощения ацетиленовой газовой ячейки (около 500 МГц), при давлении газа 8 мм. рт. ст. Коэффициент передачи радиофотонного СВЧ-фильтра составил порядка -30 дБ.

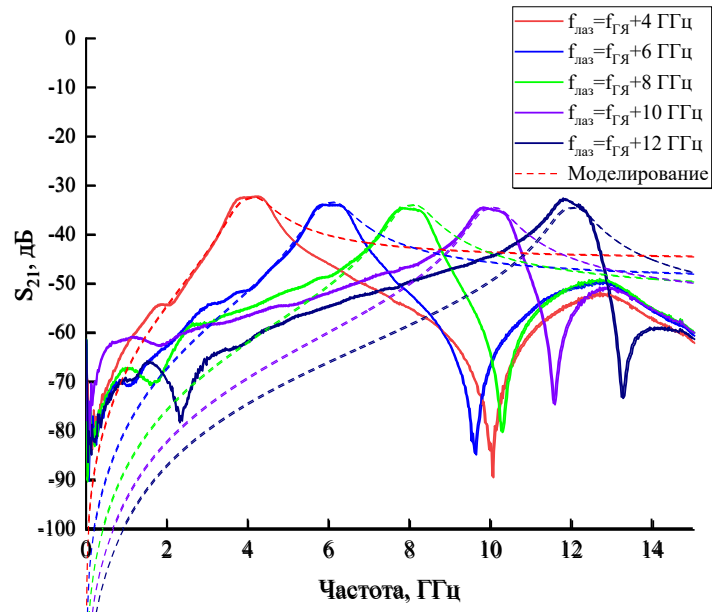


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики радиофотонного СВЧ-фильтра при различных отстройках частоты лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки.

На рисунке 2 пунктирными линиями показаны результаты численного моделирования коэффициента передачи радиофотонного СВЧ-фильтра. Коэффициент передачи радиофотонного СВЧ-фильтра рассчитывался как: $S_{21} = 10 \log(P_{out}/P_{in})$, где P_{in} – мощность СВЧ-сигнала, подаваемого на СВЧ-вход электрооптического фазового модулятора, а P_{out} – мощность СВЧ-сигнала на выходе фотодетектора, которая рассчитывалась следующим образом:

$$P_{out} = R \left[2ST\eta P_{opt} J_0(m) J_1(m) \left| \overline{g(\omega_c)} g(\omega_c + \omega_m) - g(\omega_c) \overline{g(\omega_c + \omega_m)} \right| \right]^2, \quad (1)$$

где R – сопротивление нагрузки фотодетектора, S – чувствительность фотодетектора, T – пропускание оптоволокна, η – оптические потери в фазовом модуляторе, P_{opt} – мощность оптического излучения на входе фазового модулятора, $m = \pi V_m / V_\pi$, V_m – амплитуда модулирующего сигнала, V_π – полуволновое напряжение фазового модулятора, J_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка, ω_c и ω_m – циклические частоты оптической несущей и модулирующего СВЧ-сигнала, $g(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи ацетиленовой газовой ячейки на частоте ω , описываемый выражением:

$$g(\omega) = \exp \left(-\frac{\alpha_0 L}{2} \left(\frac{1 + i \frac{\omega - \omega_0}{\delta\omega}}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\delta\omega} \right)^2} \right) \right), \quad (2)$$

где $\alpha_0 L$ – максимальный показатель поглощения газовой ячейки, α_0 – показатель поглощения на центральной частоте линии поглощения, L – длина газовой ячейки, $\delta\omega$ – полуширина линии поглощения. При моделировании АЧХ $\alpha_0 L$ была равна 3, а значение $\delta\omega$ было равно 250 МГц.

Из графиков, представленных на рисунке 2, видно, что результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Таким образом, представленная математическая модель позволяет рассчитывать АЧХ

радиофотонного СВЧ-фильтра и оценивать величину потерь, вносимых фильтром в полосе пропускания.

Полученные результаты показывают, что исследованный фильтр имеет относительно высокие потери в полосе пропускания (около -30 дБ). Для того чтобы уменьшить потери, можно предложить использовать лазер с более высокой мощностью излучения. На рисунке 3 показаны результаты математического моделирования АЧХ перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра при использовании лазеров с мощностями 100 и 300 мВт. Результат моделирования показывает, что увеличение мощности лазера до 100 мВт снижает потери в полосе пропускания фильтра до -10 дБ, а увеличение мощности лазера до 300 мВт снижает потери в полосе пропускания фильтра до 0 дБ. Однако, чтобы использовать такой лазер с относительно высокой мощностью излучения в схеме радиофотонного фильтра необходимо использовать фотодетектор с высоким фототоком [8].

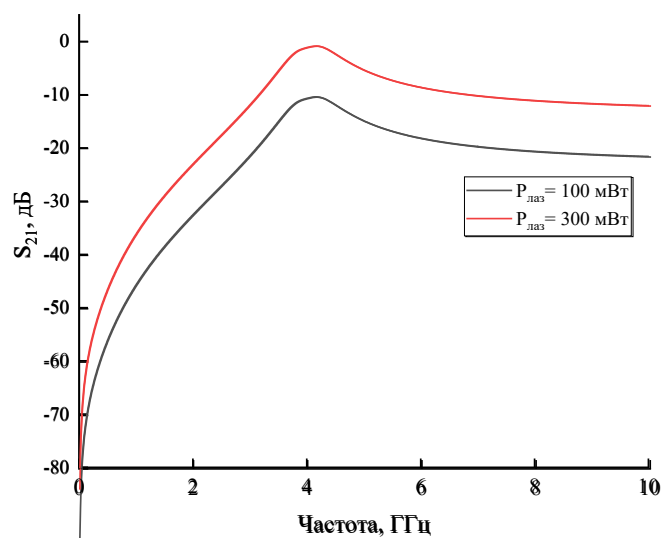


Рисунок 3. Результат моделирования АЧХ радиофотонного фильтра при повышенной мощности излучения лазера.

3. Заключение

В ходе работы были исследованы АЧХ перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки. Экспериментально продемонстрирована перестройка полосы пропускания исследуемого фильтра. Перестройка полосы пропускания такого фильтра осуществлялась за счёт изменения частоты несущего оптического излучения. Предложен метод расчёта АЧХ исследуемого СВЧ-фильтра. Минимальные потери в полосе пропускания фильтра составили около -30 дБ в полосе перестройки центральной частоты 4-12 ГГц. Одним из возможных способов снижения потерь в полосе пропускания является использование лазера с повышенной мощностью излучения и фотодетектора с высоким фототоком. Для расширения полосы перестройки можно предложить использование более широкополосных электрооптических модуляторов и фотодетекторов.

Работа в СПбГЭТУ выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках «Мегагранта» (соглашение № 075-15-2021-609).

Список литературы

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds //Nature photonics. – 2007. – Т. 1. – №. 6. – С. 319.

2. Yao J. Photonics to the rescue: A fresh look at microwave photonic filters //IEEE Microwave Magazine. – 2015. – Т. 16. – №. 8. – С. 46-60.
3. Muniz A. L. M. et al. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications //Microwave and Optical Technology Letters. – 2017. – Т. 59. – №. 9. – С. 2185-2189.
4. Noque D. F. et al. Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier //Optics Communications. – 2018. – Т. 414. – С. 191-194.
5. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems //IEEE journal of Quantum Electronics. – 1996. – Т. 32. – №. 7. – С. 1141-1149.
6. Ustinov A. B. et al. A tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1. – С. 012015.
7. Li W., Yao J. Dynamic range improvement of a microwave photonic link based on bi-directional use of a polarization modulator in a Sagnac loop //Optics Express. – 2013. – Т. 21. – №. 13. – С. 15692-15697.
8. Таценко И. Ю. и др. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23. – №. 4. – С. 48-56.
9. Capmany J. et al. Microwave photonic signal processing //Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Т. 31. – №. 4. – С. 571-586.
10. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics //Nature photonics. – 2019. – Т. 13. – №. 2. – С. 80-90.
11. Xue W. et al. Widely tunable microwave photonic notch filter based on slow and fast light effects //IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Т. 21. – №. 3. – С. 167-169.
12. Yan Y., Yao J. A tunable photonic microwave filter with a complex coefficient using an optical RF phase shifter //IEEE Photonics Technology Letters. – 2007. – Т. 19. – №. 19. – С. 1472-1474.
13. Yao J., Wang Q. Photonic microwave bandpass filter with negative coefficients using a polarization modulator //IEEE Photonics Technology Letters. – 2007. – Т. 19. – №. 9. – С. 644-646.
14. Marpaung D. et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity //Optica. – 2015. – Т. 2. – №. 2. – С. 76-83.
15. Long Y., Wang J. Ultra-high peak rejection notch microwave photonic filter using a single silicon microring resonator //Optics express. – 2015. – Т. 23. – №. 14. – С. 17739-17750.
16. Diaz J. et al. Self-reference shot-noise-limited phase demodulator with 1530 nm acetylene absorption line //Results in Optics. – 2022. – Т. 9. – С. 100316.