

# Исследование потерь сверхвысокочастотного сигнала в радиофотонной линии передачи

И. Ю. Таценко<sup>1</sup>, А. Б. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Исследовались амплитудно-частотные характеристики радиофотонной линии передачи, в которой использовался фотодетектор с высоким фототоком. Предложен метод определения частотной зависимости чувствительности фотодетектора.

**Ключевые слова:** радиофотоника, фотодетектор, радиофотонная линия передачи

## 1. Введение

В последние годы радиофотоника стала актуальным направлением развития науки и техники. В частности, большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование радиофотонных линий передачи [1,2]. Помимо непосредственной передачи радиосигнала такие линии передачи можно использовать в устройствах генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов [3], сканирующих приемниках [4], для оптического усиления [5] и др.

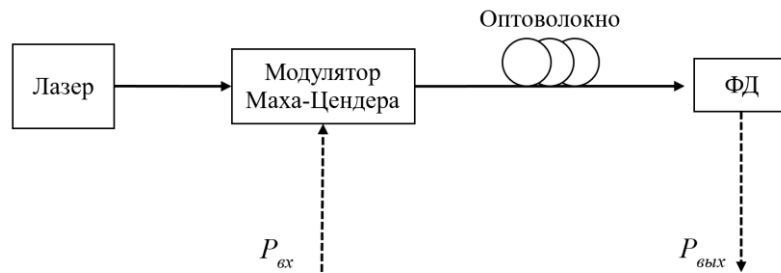
Радиофотонная линия передачи (РФЛП) состоит из лазера, электрооптического модулятора, оптоволоконной линии задержки и фотодетектора. За счёт использования одномодового оптоволокна достигаются низкие потери оптического излучения с длиной волны порядка 1550 нм. Использование быстродействующих фотодетекторов и электрооптических модуляторов позволяет реализовать радиофотонные системы с рабочей полосой частот до десятков ГГц.

Известно, что потери СВЧ сигнала в РФЛП уменьшаются с ростом мощности лазерного излучения. Типичные фотодетекторы, выпускаемые промышленностью, выдерживают на входе оптическое излучение в несколько десятков милливатт. Для уменьшения потерь необходимо использовать фотодетекторы с высоким фототоком, выдерживающие повышенную мощность оптического излучения.

Целью работы является экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик радиофотонной линии передачи при различной мощности используемого оптического излучения, а также исследование частотной зависимости чувствительности фотодетектора.

## 2. Экспериментальное исследование РФЛП

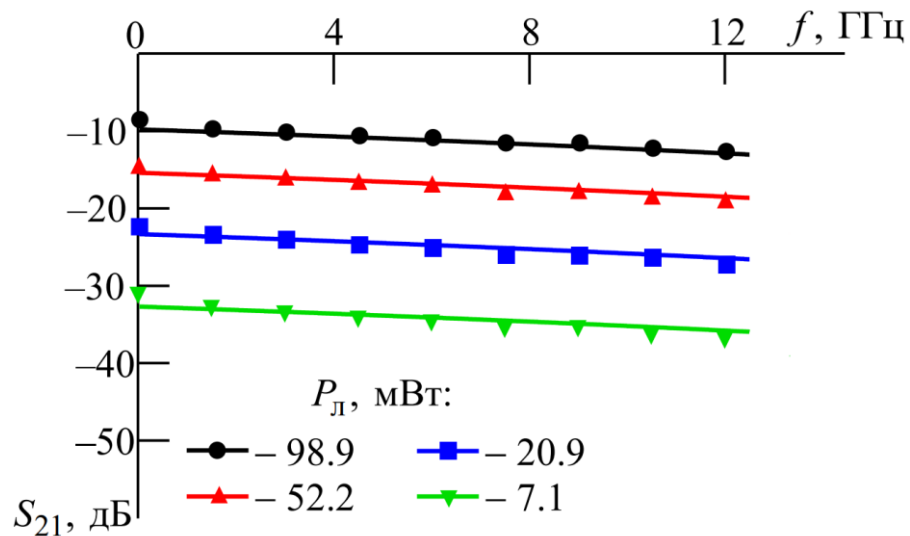
При проведении экспериментов измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) радиофотонной линии передачи при модуляции оптической несущей СВЧ радиосигналом. Блок-схема экспериментального макета показана на рисунке 1. Схема состоит из лазера номинальной мощности 100 мВт и длиной волны излучения 1550 нм, электрооптического модулятора Маха-Цендера, оптоволоконной линии задержки длиной 2 км, фотодетектора «Пром-17», производства АО «НИИ «Полус» им. Стельмаха». Модулятор Маха-Цендера имел полуволновое напряжение  $V_{\pi}$  равное 1.6 В, верхнюю граничную частоту 30 ГГц и оптические потери в максимуме коэффициента передачи 4.5 дБ. В эксперименте СВЧ-выход фотодетектора был нагружен на сопротивление 50 Ом, равное его волновому сопротивлению.



**Рисунок 1.** Блок-схема радиофотонной линии передачи.

Измерения проводились следующим образом. Излучение с лазера поступает на модулятор Маха-Цендера. Оптическое излучение, модулированное СВЧ сигналом, проходит через оптоволоконно и подается на фотодетектор, на выходе которого возникает электрический сигнал сверхвысокой частоты, пропорциональный интенсивности оптического излучения. С помощью векторного анализатора цепей измеряется коэффициент передачи СВЧ сигнала  $S_{21}$  от управляющего входа модулятора до выхода фотодетектора. Рабочая точка модулятора находится в квадратуре, так как это позволяет передавать радиосигнал с минимальными искажениями.

На рисунке 2 маркерами представлены экспериментальные АЧХ линии передачи, полученные при различных мощностях лазера. Измерения проводились в рабочей полосе частот фотодетектора от 0 до 12 ГГц. Из графиков видно, что с ростом частоты в диапазоне 0-12 ГГц коэффициент передачи СВЧ сигнала плавно уменьшается. Такое поведение обусловлено уменьшением чувствительности фотодетектора. Измерения также показали, что при увеличении мощности излучения лазера передаточная характеристика смещается вверх, так как мощность СВЧ сигнала на выходе фотодетектора пропорциональна интенсивности оптического излучения.



**Рисунок 2.** Амплитудно-частотные характеристики РФЛП при различных мощностях излучения лазера: маркеры - эксперимент, линии - теория.

Для определения зависимости чувствительности фотодетектора от частоты были рассчитаны АЧХ линии передачи. При этом выходная мощность фотодетектора рассчитывалась по формуле [2]:

$$P_{\text{вых}} = R(P_{\text{лаз}} S J_1(\frac{\pi V_{\text{rf}}}{V_{\pi}}) \sin(\frac{\pi V_{\text{см}}}{V_{\pi}}))^2, \quad (1)$$

где  $R=50$  Ом – сопротивление, на которое нагружен фотодетектор,  $P_{\text{лаз}}$  – мощность лазера,  $S=0.8$  А/Вт – чувствительность фотодетектора,  $V_{\text{rf}}$  – напряжение модулирующего сигнала,  $V_{\pi}=1.6$  В – полуволновое напряжение модулятора, а  $V_{\text{см}}$  – напряжение смещения рабочей точки. Коэффициент передачи определялся как отношение выходной СВЧ мощности фотодетектора к СВЧ мощности, поданной на управляющий вход модулятора Маха-Цендера. Зависимость чувствительности фотодетектора от частоты была найдена путем сопоставления рассчитанных и экспериментальных АЧХ.

Сопоставление показало, что с увеличением частоты от 0 до 12 ГГц чувствительность фотодетектора снижается от значения 0.8 А/Вт до 0.56 А/Вт. Учитывая, что коэффициент передачи оптического тракта уменьшается линейно, можно получить приближенную частотную зависимость чувствительности фотодетектора в данном диапазоне. Зная, что при нулевой частоте чувствительность фотодетектора равна 0.8 А/Вт, а при частоте 12 ГГц она равна 0.56 А/Вт, нетрудно получить следующее линейное выражение для частотной зависимости чувствительности фотодетектора:

$$S(f) = 0.8 - 0.2 \cdot 10^{-10} f. \quad (2)$$

Рассчитанные зависимости АЧХ линии передачи показаны линиями на рисунке 2. Сопоставление теории и эксперимента показывает, что выражение (2) довольно хорошо описывает чувствительность фотодетектора в диапазоне частот от нуля до 12 ГГц.

### 3. Заключение

В работе были исследованы АЧХ радиофотонной линии передачи при различных мощностях лазера. Исходя из экспериментальных данных найдена теоретическая зависимость чувствительности фотодетектора от частоты. Показано, что повышение мощности лазера до 100 мВт позволяет уменьшить потери СВЧ сигнала в линии передачи примерно до 10 дБ. Предложен метод определения частотной зависимости чувствительности фотодетектора.

Авторы выражают благодарность В. В. Щербакову (АО «Центр ВОСПИ») за предоставленное оптическое волокно, а также А. В. Иванову (АО «НИИ «Полюс» им. Стельмаха») за предоставленный фотодетектор для проведения исследований.

Исследование выполнено при частичной поддержке **Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Госзадание” № 0788-2020-0005 (FSEE-2020-0005)) и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках молодёжного конкурса инновационных проектов.**

#### Список литературы

1. Ackerman E. I. et. al. «Signal-to-Noise Performance of Two Analog Photonic Links using Different Noise Reduction Techniques», IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii. p. 51, (2007)
2. Петров А. Н. и др. «Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора», ЖТФ, 85, С. 131, (2015)
3. Устинов А.Б., Никитин А.А., Калиникоз Б.А. «Электронно-перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный генератор сверхвысокочастотных сигналов», ЖТФ, 85, С. 136-140, (2015)
4. Ghelfi P. et. al. «A Fully Photonics-Based Coherent Radar System», Nature, 507, p. 341, (2014)
5. Muniz A. L. M. et. al. «All-Optical RF Amplification toward Gpbs Communications and Millimeter-Waves Applications», Microwave and Opt. Tech. Lett., 59, p. 2185, (2017)