

Исследование нелинейных искажений в оптоволоконной линии с положительным коэффициентом передачи СВЧ-сигнала

И.Ю. Таценко, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе исследовано влияние мощности оптического излучения на точку однодецибелльной компрессии, гармонические искажения и динамический диапазон по помехам оптоволоконной линии передачи сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала. Показано, что увеличение мощности оптического излучения приводит к уменьшению мощности однодецибелльной компрессии и увеличению гармонических искажений. Повышение мощности оптического излучения не приводит к изменению динамического диапазона по помехам.

Ключевые слова: оптоволоконно, оптоволоконная линия передачи, нелинейные искажения, интермодуляционные искажения.

1. Введение

В последние годы все больший интерес вызывает передача аналоговых и цифровых сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов по оптоволоконной линии передачи (ОВЛП) [1-6]. К основным преимуществам ОВЛП можно отнести, малые размеры и вес устройств, низкие потери оптического излучения в оптоволокне, а также возможность реализации широких полос пропускания каналов (десятки-сотни ГГц). Стандартная ОВЛП содержит следующие компоненты: лазер, электрооптический модулятор, одномодовое оптоволоконно и фотодетектор. Входной СВЧ-сигнал, подаваемый на управляющий вход электрооптического модулятора, модулирует по амплитуде оптическую несущую. Модулированный оптический сигнал распространяется в оптоволоконной линии задержки и приходит на фотодетектор. Фотодетектор преобразует оптический сигнал в электрический. За счет низких потерь в оптоволокне передача радиосигналов по оптоволокону является более предпочтительной, по сравнению с коаксиальными кабелями.

Важными задачами при создании ОВЛП является повышение коэффициента передачи СВЧ-сигнала и передача сигнала на большие расстояния без искажений. Известно, что если амплитуда СВЧ сигнала, подаваемого на вход электрооптического модулятора, приближается к полуволновому напряжению модулятора, то из-за нелинейности передаточной характеристики модулятора на выходе ОВЛП могут появляться гармонические искажения и компрессия одночастотного сигнала, а также интермодуляционные искажения.

Целью настоящей работы является исследование влияния мощности оптического излучения на компрессию, гармонические искажения и интермодуляционные искажения СВЧ-сигнала, передаваемого в ОВЛП с положительным коэффициентом передачи.

2. Измерение амплитудно-частотных характеристик ОВЛП

Блок-схема экспериментального макета ОВЛП представлена на рисунке 1. Экспериментальный макет состоит из лазера (1) с регулируемой мощностью до 1 Вт на длине волны излучения 1550 нм, электрооптического модулятора Маха-Цендера (2)

с полуволновым напряжением 1.6 В и оптическими потерями около 5 дБ, оптоволокна (3) длиной 1 км и фотодетектора (4) с номинальной чувствительностью 0.8 А/Вт в диапазоне 0-10 ГГц и максимальным фототоком 90 мА.

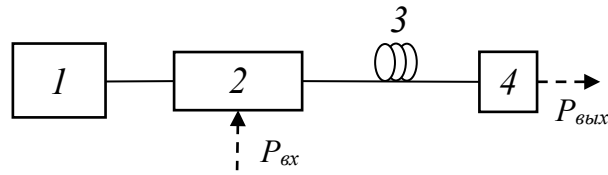


Рисунок 1. Блок-схема экспериментального макета ОВЛП: 1 – лазер, 2 – электрооптический модулятор, 3 – оптоволокно, 4 – фотодетектор.

На первом этапе работы исследовалось влияние мощности лазера на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ОВЛП. Ее измерение проводилось с помощью векторного анализатора цепей. На рисунке 2 показаны результаты измерений АЧХ при различной мощности оптического излучения, подаваемого на оптический вход электрооптического модулятора. Видно, что с увеличением мощности лазера потери в ОВЛП уменьшаются. Это находится в хорошем соответствии с результатами, которые были показаны в работе [4]. При увеличении мощности лазера до 25.4 дБм коэффициент передачи ОВЛП становится положительным в диапазоне частот 0 10 ГГц.

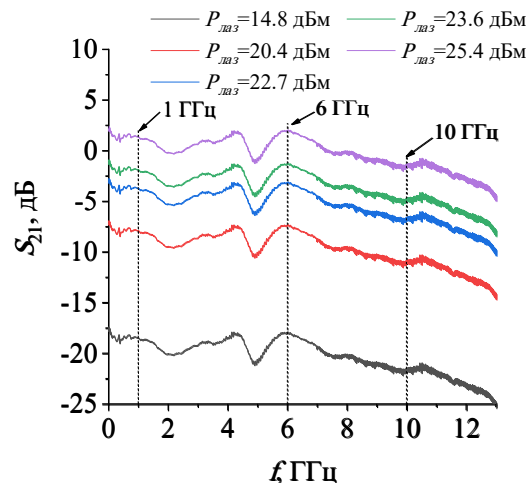


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики ОВЛП при различной мощности лазера.

3. Измерение однодецибелльной компрессии в ОВЛП

На следующем этапе работы проводились исследования, направленные на определение входной мощности, при которой возникает однодецибелльная компрессия выходного СВЧ сигнала. Измерения проводились при мощности оптического излучения 20.4 дБм и 25.4 дБм, что соответствовало коэффициенту передачи ОВЛП около -10 дБ и 0 дБ, соответственно. Результаты измерений представлены на рисунке 3.

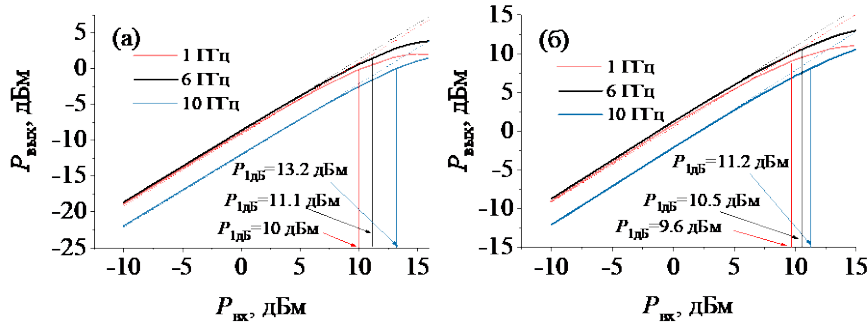


Рисунок 3. Передаточные характеристики по мощности ОВЛП при мощности лазера 20.4 дБм (а) и 25.4 дБм (б).

Из полученных результатов видно, что с увеличением частоты входного СВЧ-сигнала, происходит сдвиг точки однодецибелльной компрессии в сторону более высоких значений входной мощности (см. рисунок 3). Так при частоте входного СВЧ-сигнала 1 ГГц однодецибелльная компрессия сигнала возникает при входной мощности СВЧ-сигнала равной 10 дБм, а при частоте 10 ГГц значение мощности СВЧ-сигнала, при которой возникает однодецибелльная компрессия, увеличивается до 13.2 дБм.

4. Исследование гармонических искажений в ОВЛП

Далее было проведено исследование гармонических искажений в ОВЛП. Спектр СВЧ-сигнала с гармоническими искажениями показан на рисунке 4(а). На вход ОВЛП был подан сигнал мощностью 10 дБм на частоте 1 ГГц, а на выходе наблюдались кратные гармоники вплоть до 5 ГГц. На рисунке 4(б, в) представлены результаты измерения гармонических искажений в ОВЛП. Из полученных результатов видно, что увеличение мощности оптического излучения приводит к значительному увеличению мощности гармоники на удвоенной частоте. Из рисунка 4 (г) видно, что при мощности лазера 20.4 дБм, коэффициент гармонических искажений составляет около 0.1%. Увеличение мощности лазера до 25.4 дБм приводит к более сильному росту коэффициента гармонических искажений, что показано кружками на рисунке 4 (г). Максимальное значение коэффициента гармонических искажений составило 0.72%.

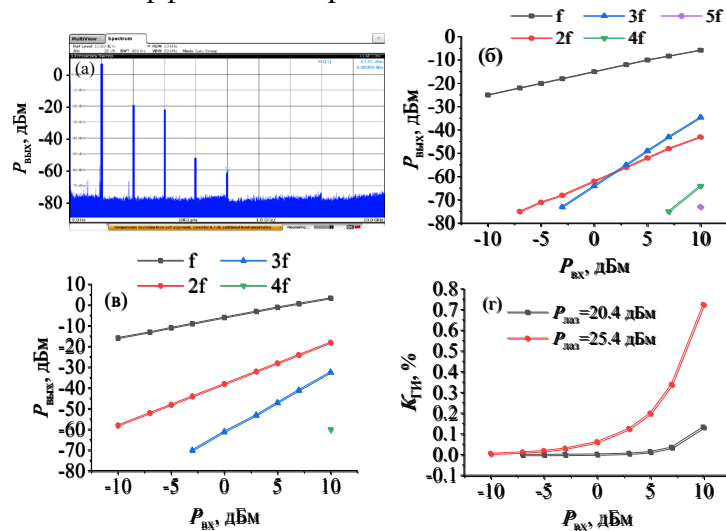


Рисунок 4. Типичный спектр выходного сигнала с гармоническими искажениями (а). Результаты измерения гармонических искажений в ОВЛП при мощности лазера 20.4 дБм (б) и 25.4 дБм (в). Зависимость коэффициента гармонических искажений от мощности входного СВЧ-сигнала (г).

5. Исследование интермодуляционных искажений в ОВЛП

Исследование интермодуляционных искажений является важным этапом исследований ОВЛП, так как интермодуляционные искажения определяют параметры SFDR и OIP3. Типичные зависимости выходной мощности основных и интермодуляционных гармоник от мощности входных СВЧ-сигналов на частотах $f_1=2$ ГГц, $f_2=2.5$ ГГц при мощности лазера 20.4 дБм и 25.4 дБм представлены на рисунке 5. При мощности оптического излучения 20.4 дБм SFDR составил около 85.5 дБ, при увеличении мощности лазера до 25.4 дБм значение SFDR практически не изменилось, это обусловлено тем, что с ростом мощности оптического излучения увеличивается вклад RIN-шума в общий уровень шума в ОВЛП.

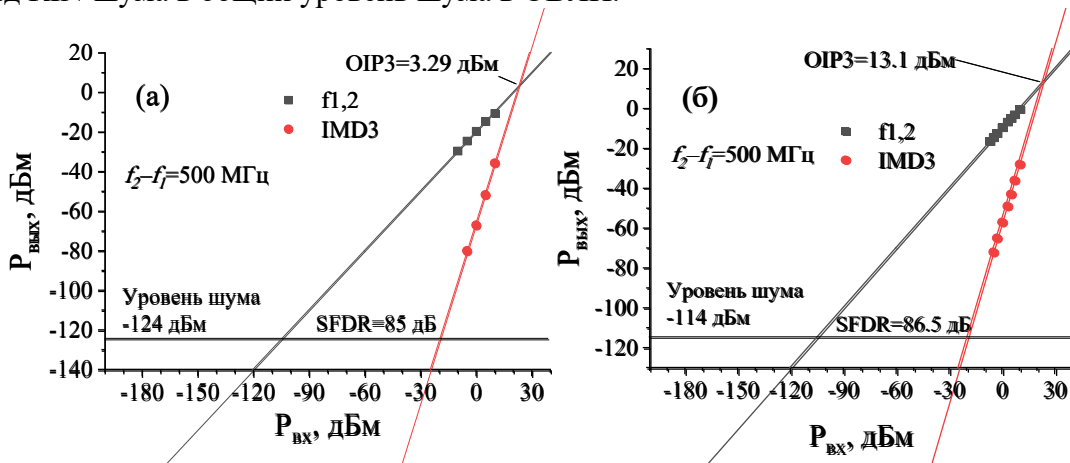


Рисунок 5. Зависимости выходной мощности основных и интермодуляционных гармоник от входной мощности СВЧ-сигнала. Мощность лазера (а) 20.4 дБм, (б) 25.4 дБм. Значками обозначены экспериментальные данные, сплошная линия – линейная экстраполяция экспериментальных данных для определения OIP3.

6. Заключение

Из представленных в работе результатов можно оценить влияние мощности лазера на нелинейные искажения СВЧ-сигнала в ОВЛП. Показано, что увеличение мощности лазера позволяет увеличить коэффициент передачи ОВЛП, но при этом уменьшается значение точки однодецибелной компрессии и увеличиваются гармонические искажения. Поэтому при проектировании ОВЛП необходимо учитывать влияние мощности лазера для того, чтобы получить необходимый коэффициент передачи с нужным уровнем гармонических искажений и компрессии сигнала.

Исследование влияния мощности лазера на интермодуляционные искажения СВЧ-сигнала в ОВЛП показало, что при увеличении мощности лазера динамический диапазон по помехам практически не изменяется. Таким образом, за счет использования лазера с относительно высокой мощностью оптического излучения можно увеличить коэффициент передачи ОВЛП без ухудшения динамического диапазона по помехам.

Одним из возможных способов улучшения характеристик ОВЛП является использование фотодетектора с более высоким фототоком, что позволит уменьшить гармонические искажения и дополнительно увеличить коэффициент передачи ОВЛП. Кроме того, использование лазера с более низким RIN-шумом позволит увеличить динамический диапазон по помехам за счет уменьшения уровня выходного шума.

Работа частично поддержана **Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант FSEE-2020-0005).**

Список литературы

1. Петров А. Н. и др. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора //Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 5. – С. 131-136.
2. 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.
3. Noque D. F. et al. Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier //Optics Communications. – 2018. – Т. 414. – С. 191-194.
4. Tatsenko I. Y. et al. Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber //Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. – 2020. – Т. 23. – №. 4. – С. 48-56.
5. Sánchez E. et al. Modeling amplified arbitrary filtered microwave photonic links and systems //Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 10. – С. 14757-14772.
6. Li P. et al. Microwave photonic link to transmit four microwave vector signals on a single optical carrier based on coherent detection and digital signal processing //Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 5. – С. 6690-6699.