

Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора

© А.Н. Петров,^{1,2} А.В. Тронеv,^{2,3} В.В. Лебедев,² И.В. Ильичев,² Е.Н. Величко,^{1,3} А.В. Шамрай^{1,2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики (НИУ ИТМО),
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: alexey-pr@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 20 октября 2014 г.)

Предложен способ повышения коэффициента передачи аналоговой волоконно-оптической линии при смещении рабочей точки внешнего модулятора в сторону минимума пропускания. Способ основан на увеличении контраста сигнала за счет подавления постоянной составляющей и использовании волоконного эрбиевого усилителя вблизи насыщения. Продемонстрировано повышение коэффициента передачи (до 5 dB) по сравнению с работой в квадратурной рабочей точке. Исследованы зависимости увеличения коэффициента нелинейных искажений при смещении модулятора из квадратурной рабочей точки. Прирост нелинейных искажений при условиях наблюдения максимального коэффициента передачи составил не более 0.5%. Разработана теоретическая модель, описывающая данные эффекты. Теоретические зависимости находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Введение

В последние годы наблюдается повышение интереса к вопросам передачи аналоговых ВЧ- и СВЧ-сигналов по волоконным линиям связи [1]. Новые функциональные возможности и значительные преимущества оптических систем обусловлены как широкой полосой пропускания, низкими потерями в оптическом волокне и малыми габаритными размерами, так и высокой устойчивостью к интерференционным помехам. Данные параметры определяют широкий круг перспективных практических применений, включающих распределение высокочастотной несущей, фазированные антенные решетки и др. [2].

Важнейшими характеристиками волоконно-оптических систем передачи радиочастотных сигналов являются коэффициент передачи линии, отношение амплитуды радиочастотного сигнала на входе системы (оптического модулятора) к мощности на выходе после фотодетектора, типично составляющий от -20 до -30 dB [3]. При этом при низких потерях в оптическом волокне ~ 0.5 dB/km столь низкая величина коэффициента передачи обусловлена прежде всего коэффициентом электрооптического преобразования (переноса радиосигнала на оптическую несущую) и обратным преобразованием оптического сигнала в радиочастотный. Одним из путей решения данной проблемы в случае использования внешнего модулятора является повышение мощности оптической несущей [4] и преобразование энергии оптического излучения в радиочастотный сигнал. Однако данный подход имеет фундаментальные

ограничения, связанные с нелинейными оптическими эффектами в волокне (прежде всего ВРМБ и ВКР) [5], а также принципиальной технологической проблемой создания широкополосного оптического фотоприемника с высоким током насыщения [6].

В данной работе рассматриваются возможности повышения коэффициента передачи радиочастотного сигнала по аналоговой оптической линии связи в случае ограничения по току насыщения фотоприемника. Как было показано в [7,8], смещение рабочей точки электрооптического модулятора в квадратуру (подачей половины полуволнового напряжения) для широкополосных сигналов дает максимальный коэффициент передачи ВЧ-сигнала и спектральный диапазон, свободный от паразитных составляющих сигнала (SFDR), вызванных нелинейностью модуляции. Однако для относительно узкополосных сигналов (меньше одной октавы) гармоники основного сигнала, генерируемые нелинейностями системы, не пересекаются с диапазоном основного сигнала и могут быть легко отфильтрованы впоследствии. При этом путем выбора оптимальной рабочей точки модулятора возможно существенно увеличить контраст модуляции и одновременно снизить среднюю оптическую мощность, ведущую к насыщению фотоприемника. В работе [9] было показано, что смещение модулятора из квадратуры может улучшить отношение сигнал-шум и SFDR для систем с ограниченным дробовым шумом. В [10] исследовались нелинейные искажения (ID3 и SFDR) для оптических линий с внешней модуляцией, однако изменение коэффициента передачи при смеще-

нии рабочей точки из квадратуры описано не было. В [11,12] авторы показали, что в узкополосных линиях смещение рабочей точки из квадратуры к минимуму характеристики приводит к увеличению SFDR. В [2] было исследовано влияние смещения рабочей точки на коэффициент передачи при наличии в линии эрбиевого усилителя мощности, работающего вблизи насыщения. Было показано, что максимальный коэффициент передачи достигается при смещении рабочей точки из квадратуры к минимуму характеристики. Однако влияние такого смещения на нелинейные искажения в сигнале изучено не было.

Задачей данной работы является исследование влияния положения рабочей точки внешнего электрооптического модулятора на характеристики оптической линии передачи радиосигналов типа точка–точка, включающей волоконно-оптический эрбиевый усилитель мощности с целью определения оптимальных параметров, обеспечивающих максимальный коэффициент передачи при сохранении приемлемого уровня нелинейных искажений.

1. Макет оптоволоконной линии передачи радиочастотных сигналов

На рис. 1 приведена схема исследуемого макета волоконно-оптической линии передачи радиосигналов. В качестве источника оптической несущей был использован полупроводниковый лазер с центральной длиной волны 1551 nm и регулируемой выходной мощностью до 20 mW. В качестве внешнего электрооптического модулятора использовался опытный образец интегрально-оптического модулятора Маха–Цендера на основе ниобата лития с полуволновым напряжением 6 V, шириной полосы модуляции до 6 GHz и оптическими потерями 5 dB. На модулятор независимо подавались напряжение смещения в диапазоне ± 20 V, определяющее рабочую точку, и сигнал с генератора сигналов синусоидальной формы на относительно низкой радиочастоте до 100 MHz. Амплитуда сигнала на радиочастоте регулировалась в диапазоне 0–1 V. После прохождения модулятора оптический сигнал подавался на вход эрбиевого

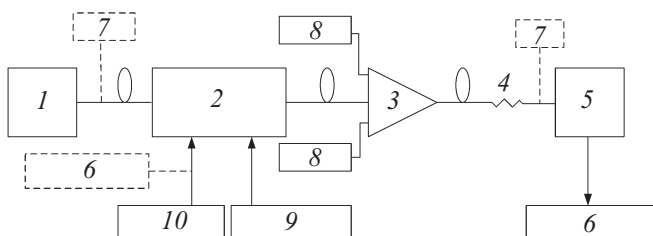


Рис. 1. Схема волоконно-оптической линии передачи радиочастотных сигналов: 1 — лазер, 2 — электрооптический модулятор, 3 — эрбиевый волоконно-оптический усилитель мощности, 4 — аттенюатор, 5 — фотодиод, 6 — осциллограф, 7 — измеритель мощности, 8 — лазер накачки, 9 — источник питания, 10 — генератор.

волоконного усилителя мощности с накачкой на длине волны 980 nm, осуществляемой одновременно с двух сторон активного волокна (попутно и встречно). Мощность насыщения и коэффициент передачи волоконно-оптического усилителя могли регулироваться путем изменения тока лазерных диодов накачки, а также мощности излучения полупроводникового лазера. Усиленный оптический сигнал преобразовывался в электрический сигнал широкополосным фотоприемником (ДФДМШ40-16 от НПФ „Дилаз“) с чувствительностью 0.7 A/W и полосой частот 16 GHz, значительно превышающей частоту передаваемого радиочастотного сигнала. Данный фотоприемник имел достаточно низкую величину тока насыщения ~ 10 mA. Для устранения данного недостатка и моделирования случая передачи оптических сигналов большой мощности, что обеспечивает высокие значения коэффициента передачи, перед фотоприемником устанавливался оптический аттенюатор с коэффициентом ослабления ~ 10 dB. Введение данного оптического аттенюатора эквивалентно увеличению тока насыщения фотоприемника до уровня порядка 100 mA, соответствующего лучшим мировым образцам. Полученный на выходе линии электрический сигнал на радиочастоте регистрировался с помощью цифрового осциллографа, имеющего функцию вычисления преобразования Фурье.

2. Экспериментальные результаты

В экспериментах регистрировалась относительная амплитуда первой гармоники, используемая для вычисления зависимости коэффициента передачи, а также относительные амплитуды второй и третьей гармоник, позволяющие оценить влияние нелинейных искажений.

На первом этапе были проведены исследования влияния напряжения смещения (положения рабочей точки) на коэффициент передачи для схемы без эрбиевого усилителя при мощности лазерного излучения на входе системы 20 mW и амплитуде модулирующего радиосигнала 0.5 V на частоте 97 MHz (рис. 2).

В данном случае оптимальным положением рабочей точки модулятора (по коэффициенту передачи и нелинейным искажениям) является квадратура.

Малое значение амплитуды модулирующего сигнала по сравнению с полуволновым напряжением модулятора выбиралось для обеспечения малых нелинейных искажений. Полученные результаты полностью совпали с характеристиками из [2,7], максимальный коэффициент передачи и минимальные нелинейные искажения наблюдаются в точке квадратуры, когда косинусоидальная передаточная функция модулятора имеет максимальную крутизну. Полученное в данных экспериментах максимальное значение коэффициента передачи составляло -20 dB. Столь низкая величина коэффициента передачи объясняется дополнительными оптическими потерями в нашей волоконно-оптической линии, а также низкой

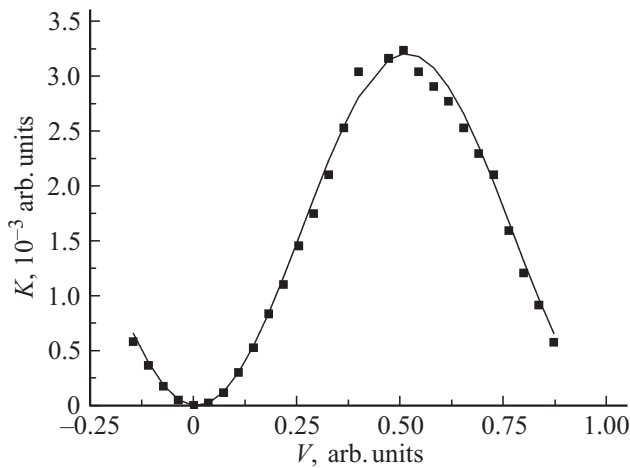


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи первой гармоники ВЧ-сигнала в зависимости от нормированного приведенного напряжения смещения $V = (V_0 - V_{\min})/V_{\text{pbias}}$, без эрбиевого усилителя мощности. Квадраты — экспериментальные данные, сплошная линия — теоретическая зависимость [2,7].

эффективностью электрооптического и оптоэлектрического преобразований и хорошо согласуется с теоретическими оценками, учитывающими этот факт. Коэффициент передачи может быть увеличен до уровня -3 dB за счет увеличения мощности оптического излучения на входе до 200 mW. Дальнейшему увеличению коэффициента передачи препятствует насыщение фотоприемника. Таким образом, в данных условиях именно фотоприемник является ограничивающим фактором получения высокого коэффициента передачи. Увеличение входной оптической мощности никак не влияет на зависимости коэффициента передачи и коэффициента нелинейных искажений от положения рабочей точки модулятора — по-прежнему оптимальные условия достигаются в точке квадратуры.

Далее нами было предложено использовать для увеличения оптической мощности дополнительное оптическое усиление на эрбиевом усилителе на выходе из модулятора. Следует выделить два режима работы такого усилителя [13] — малосигнальный и насыщение. Малосигнальный режим характеризуется малой мощностью излучения на входе и при относительно большой мощности накачки (токе на диодах накачки). Режим насыщения при заданной мощности накачки характеризуется относительно высокой оптической мощностью на входе и практически независимой от входной мощности выходной мощностью. На рис. 3 представлена типичная передаточная характеристика используемого волоконного эрбиевого усилителя. Явно выделяются два режима: малосигнальный, характеризующийся линейной зависимостью выходной мощности от входной с коэффициентом передачи, зависящим от тока накачки, и режим насыщения с постоянной выходной мощностью, определяемой мощностью накачки. Величина входной мощности, при которой наблюдается переход из мало-

сигнального режима в режим насыщения, тем выше, чем выше мощность накачки, также с ростом мощности накачки увеличивается коэффициент усиления на линейном малосигнальном участке.

При использовании эрбиевого усилителя мощности удалось повысить коэффициент передачи почти на 20 dB при поддержании рабочей точки в квадратуре.

В случае работы модулятора в точке квадратуры максимальный достижимый коэффициент передачи не отличается от полученного при увеличении оптической мощности на входе модулятора и определяется насыщением фотоприемника при высоких значениях мощности накачки. Отличием конфигурации с оптическим усилением после модулятора является дополнительное насыщение оптического усилителя при низкой мощности накачки. Это приводит к тому, что мощность насыщения оптического усилителя будет определять максимальный достижимый коэффициент передачи, что подтверждается уменьшением величины максимального достижимого коэффициента передачи при снижении тока на диодах накачки, которое не может быть компенсировано увеличением входной оптической мощности. Оптимальным с точки зрения энергопотребления является тот случай, когда мощность насыщения на выходе оптического усилителя совпадает с границей насыщения фотоприемника.

Отдельно был исследован случай, когда оптический усилитель намеренно выставлялся в насыщение за счет увеличения входной оптической мощности. При этом, как это было показано ранее в [2], наблюдается значительное увеличение коэффициента передачи при смещении рабочей точки модулятора из квадратуры в сторону уменьшения пропускания. В оптимальных условиях увеличение максимального коэффициента передачи при смещении рабочей точки составляло до 5 dB относительно максимального коэффициента передачи при работе модулятора в квадратуре (рис. 4).

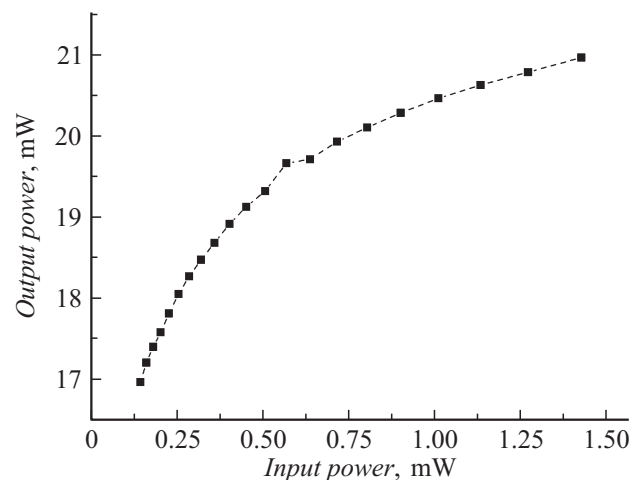


Рис. 3. Зависимость оптической мощности на выходе эрбиевого усилителя от входной оптической мощности. Длина волны сигнала 1531 nm, суммарная мощность накачки 100 μ W на длине волны 978 nm.

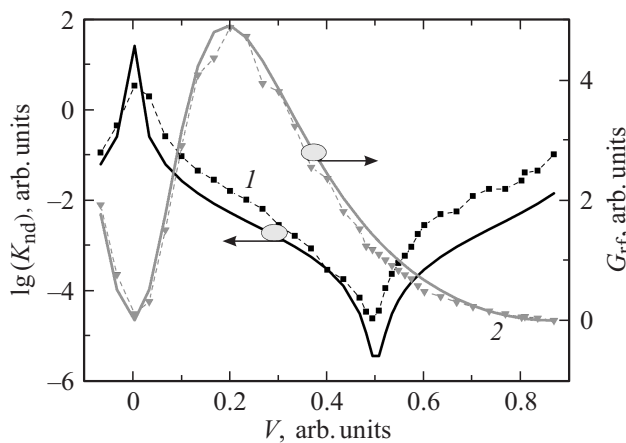


Рис. 4. 1 — Зависимость коэффициента нелинейных искажений K от нормированного приведенного напряжения смещения $V = (V_0 - V_{\min})/V_{\pi bias}$. Квадраты — экспериментальные точки (пунктирная кривая приведена для удобства восприятия), сплошная кривая — теоретический расчет. 2 — Зависимость коэффициента передачи первой гармоники ВЧ-сигнала G_{rf} от нормированного приведенного напряжения смещения $V = (V_0 - V_{\min})/V_{\pi bias}$. Треугольники — экспериментальные точки (пунктирная кривая приведена для удобства восприятия), сплошная кривая — теоретический расчет.

Однако следует отметить, что смещение из квадратуры (центра линейного участка передаточной функции модулятора на основе интерферометра Маха–Цендера) неизбежно ведет к росту нелинейных искажений, которые очень важны при передаче аналоговых сигналов. В качестве мониторинга нелинейных искажений в ходе экспериментов регистрировались относительные амплитуды второй и третьей гармоники. На рис. 4 одновременно с зависимостью коэффициента передачи от положения рабочей точки представлена также зависимость коэффициента нелинейных искажений, вычисленного по формуле:

$$K_{nu} = \frac{\sqrt{P_2^2 + P_3^2}}{P_1}, \quad (1)$$

где P_n — мощность n гармоники сигнала.

Из рис. 4 видно, что в оптимальных условиях, обеспечивающих максимальный прирост коэффициента передачи (при относительном смещении рабочей точки порядка $0.5U_{\pi bias}$), достаточно низкий уровень (0.5%) нелинейных искажений может быть обеспечен.

3. Обсуждение результатов

Вначале хотелось бы сказать несколько слов о частоте и полосе модулирующего сигнала. Экспериментальные результаты были получены на синусоидальных сигналах с частотами до 100 МГц. Данное ограничение было связано с используемым генератором, в случае если

генератор и вообще электроника не являются ограничивающим фактором, максимальная частота определяется минимальной шириной полосы устройств, входящих в волоконно-оптический тракт. В используемом нами макете в порядке возрастания: модулятор — 6 GHz, фотоприемник — 16 GHz, эрбиевый усилитель — несколько ТГц. Отметим, что, как будет показано далее, эффект увеличения коэффициента передачи при смещении рабочей точки модулятора из квадратуры связан с процессами, происходящими в оптическом усилителе, имеющем огромную ширину полосы. Поэтому даже при выходе за полосу модулятора и фотоприемника данный эффект будет наблюдаться, но относительно более низкого значения коэффициента передачи в квадратуре.

В случае передачи сложных сигналов, имеющих конечную спектральную полосу, используемое в предлагаемом методе смещение рабочей точки модулятора из квадратуры, находящейся в середине линейного участка косинусоидальной передаточной функции модулятора, будет неизбежно приводить к возникновению нелинейных искажений. С этой целью нами были проведены измерения относительных амплитуд второй и третьей гармоник. Эксперименты показали, что вполне приемлемый коэффициент нелинейных искажений может быть получен. Здесь мы хотели бы отметить, что во многих практических применениях, например в радиолокации, где волоконно-оптические линии начинают широко использоваться для построения так называемых фотонных АФАР, радиосигнал имеет высокую частоту несущей (например, 10 или 30 GHz) при относительно низкой полосе (≤ 1 GHz). В этом случае компоненты, связанные с генерацией второй гармоники, могут быть легко отфильтрованы. В нелинейные искажения основной вклад будут вносить интермодуляционные компоненты третьего порядка, например, $(2f_1 - f_2)$. Пересчитанный для этого случая коэффициент нелинейных искажений становится еще ниже.

Для более глубокого понимания механизма повышения коэффициента передачи за счет смещения рабочей точки модулятора и вывода из насыщения оптического усилителя рассмотрим физические принципы, лежащие в его основе. Наиболее простым прямым методом повышения коэффициента передачи при работе внешнего модулятора на основе интерферометра Маха–Цендера в квадратурной рабочей точке является увеличение оптической мощности (как использованием более мощных лазеров и оптических усилителей на входе модулятора, так и путем усиления промодулированного оптического сигнала усилителем после модулятора). По сути это закачивание энергии в радиочастотный сигнал из оптического излучения за счет преобразования на фотоприемнике. Данный метод ведет к квадратичному возрастанию коэффициента передачи, однако имеет два основных недостатка. Во-первых, он имеет низкую энергетическую эффективность (КПД), поскольку большой процент энергии оптического излучения остается в оптической несущей, т. е. на нулевой частоте радиосигнала.

Более того, высокая мощность оптической несущей приводит к насыщению фотоприемника, причем насыщение фотоприемника является основным ограничивающим фактором при возрастании ширины полосы пропускания по причине необходимости уменьшения емкости фотоприемного элемента и, как следствие, площади поверхности.

В данной работе исследован метод, основанный на повышении контраста модуляции и подавлении нулевой гармоники (оптической несущей). Зависимость коэффициента передачи электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха–Цендера детально изучена в [7]

$$\begin{aligned} P_{MZ}(t) &= \frac{P_{laser}}{2} \cos\left(\pi V_{bias}/V_{\pi bias} + \frac{\pi}{V_{\pi}} V_{rf} \sin(\omega t)\right) \\ &= \frac{P_{laser}}{2} \left(1 - J_0\left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}}\right) \cos\left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}}\right)\right. \\ &\quad + 2J_1\left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}}\right) \sin\left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}}\right) \sin \omega t \\ &\quad - 2J_2\left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}}\right) \cos\left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}}\right) \cos(2\omega t) \\ &\quad \left.+ 2J_3\left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}}\right) \sin\left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}}\right) \sin 3\omega t - \dots\right), \quad (2) \end{aligned}$$

где $P_{MZ}(t)$ — мощность на выходе модулятора Маха–Цендера, P_{laser} — выходная мощность лазера, J_0, J_1, J_2, J_3 — функции Бесселя первого рода 0, 1, 2 и 3 порядков соответственно; V_{π} — полуволновое напряжение RF электродов модулятора, $V_{\pi bias}$ — полуволновое напряжение DC электродов модулятора, V_{bias} — напряжение смещения рабочей точки модулятора, V_{rf} — напряжение модулирующего сигнала на RF входе модулятора, ω — частота модулирующего сигнала. При смещении из точки квадратуры в сторону закрытия (минимума пропускания) постоянная составляющая падает существенно быстрее первой гармоники, что приводит к росту глубины модуляции, одновременно мы учитываем появление второй и третьей гармоник. Сигнал после модулятора попадает в волоконно-оптический эрбиевый усилитель, коэффициент усиления которого зависит от входной оптической мощности [13]

$$G_{edfa} = \frac{G_0}{1 + (G_0(P_{mz}/P_{max}))^{\alpha}}, \quad (3)$$

где G_0 — коэффициент усиления малого сигнала, P_{mz} — оптическая мощность на выходе из модулятора, P_{max} — максимальная выходная мощность усилителя в режиме насыщения, α — эмпирический параметр, близкий к единице. В приближении малой амплитуды модуляции мощность на выходе модулятора может быть оценена

как мощность нулевой гармоники

$$\langle P_{mz} \rangle = \frac{P_{laser}}{2} [1 - J_0(\pi V_{rf}/V_{\pi}) \cos(\pi V_{bias}/V_{\pi bias})], \quad (4)$$

где P_{laser} — выходная мощность лазера, J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Формула (3) описывает насыщение усилителя при увеличении оптической мощности на его входе. При смещении в сторону минимума коэффициента пропускания модулятора коэффициент становится равным коэффициенту усиления малого сигнала, который монотонно растет с ростом мощности накачки. Мощности гармоник модулирующего сигнала на выходе фотодетектора будут пропорциональны квадрату их амплитуд, таким образом

$$\begin{aligned} P_1 &= R \left(G_{edfa} P_{laser} S J_1 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2 \\ P_2 &= R \left(G_{edfa} P_{laser} S J_2 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \cos \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2 \\ P_3 &= R \left(G_{edfa} P_{laser} S J_3 \left(\frac{\pi V_{rf}}{V_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} \right) \right)^2, \quad (5) \end{aligned}$$

где P_n — мощность n гармоник сигнала, S — чувствительность фотодетектора, R — сопротивление, на которое нагружен фотодетектор (50Ω).

На рис. 4 одновременно представлены теоретические кривые коэффициента передачи и коэффициента нелинейных искажений макета волоконно-оптической линии, рассчитанные по формулам (5) и (1) с использованием параметров усилителя, определенных из измеренных зависимостей коэффициента передачи оптической мощности ($G_0 = 200$, $P_{laser} = 0.2 \text{ mW}$, $P_{max} = 5 \text{ mW}$, $V_{\pi bias} = 13.8 \text{ V}$, $V_{\pi} = 6.5 \text{ V}$, $V_{rf} = 0.65 \text{ V}$, $\alpha = 1$). Наблюдается хорошее согласие теоретических зависимостей с экспериментальными данными. Отметим, что эффект от смещения рабочей точки тем выше, чем выше коэффициент малосигнального усиления оптического усилителя, а также меньше входная амплитуда радиосигнала.

В практических применениях не менее важным, чем относительная величина коэффициента передачи, является абсолютное значение мощности радиосигнала на выходе фотоприемника, поэтому задача повышения тока насыщения фотоприемника все еще остается актуальной. Кроме того, для полного описания системы и сравнения предложенного оптического метода повышения коэффициента передачи с традиционным использованием электронного усилителя на выходе фотоприемника необходимо провести исследования шумовых характеристик системы, что выходит за рамки данной работы.

Заключение

Проведены исследования зависимости коэффициента передачи волоконно-оптической аналоговой линии связи

и коэффициента нелинейных искажений от смещения рабочей точки внешнего модулятора на основе интерферометра Маха—Цендера. Показано, что использование оптического усилителя после внешнего модулятора в режиме, близком к насыщению, позволяет получить за счет смещения рабочей точки прирост в максимальном значении коэффициента передачи порядка 5 dB по отношению к ограниченному насыщением значению при работе в квадратуре. Наблюдаемый при этом рост нелинейных искажений находится на приемлемом уровне (не более 0.5%).

Полученные результаты интересны для бурно развивающегося в последние годы направления радиофотоники, использующего оптические методы для генерации, передачи преобразования и обработки аналоговых радиочастотных сигналов.

Используемый в исследованиях экспериментальный образец модулятора был разработан и изготовлен в рамках федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.“ (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0055, RFMEFI60414X0055).

Список литературы

- [1] *Urlick V., Rogge M., Bucholtz F., Williams K.* // *Electron. Lett.* 2006. Vol. 42. N 9. P. 552–553.
- [2] *Sisto M.M., LaRochelle S., Rusch L.A.* // *J. Lightw. Technol.* 2006. Vol. 24. N 12. P. 4974–4982.
- [3] *Betts G.E., Cox C.H., Ray K.G.* // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1990. Vol. 2. P. 923–925.
- [4] *Marpaung D., Roeloffzen C., Heideman R., Leinse A. et al.* // *Laser Photon. Rev.* 2012. Vol. 6. N 6. P. 1–30.
- [5] *Агровал Г.* Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
- [6] *Kato K.* // *Transact. Microw. Theor. Techn.* 1999. Vol. 47. N 7. P. 1265–1281.
- [7] *Kolner B.H., Dolfi D.W.* // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 26. N 17. P. 3676–3680.
- [8] *Ackerman E., Wanuga S., Kasemset D., Daryoush A.S., Samant N.R.* // *IEEE Trans. Microw. Theor. Tech.* 1993. Vol. 41. N 8. P. 1299–1306.
- [9] *Kolner B.H., Bloom D.M.* // *IEEE J. Quantum Electron.* 1986. Vol. 22. N 1. P. 79–93.
- [10] *Bulmer C.H., Burns W.K.* // *J. Lightw. Technol.* 1984. Vol. 2. N 4. P. 512–521.
- [11] *Farwell M.L., Chang W.S.C., Huber D.R.* // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1993. Vol. 5. N 7. P. 779–782.
- [12] *Nichols L.T., Williams K.J., Esman R.D.* // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1997. Vol. 45. N 8. P. 1384–1389.
- [13] *Zhang X., Mitchell A.* // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2000. Vol. 12. N 1. P. 28–30.