

**Иванов С.И.¹, Лавров А.П.¹, Саенко И.И.¹,
Иванов Д.В.², Одноблюдов М.А.¹, Царук А.А.²**

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт прикладной астрономии РАН

Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов

Приведены результаты экспериментальных исследований основных характеристик передатчиков, промышленно выпускаемых аналоговых волоконно-оптических линий передачи СВЧ радиосигналов с полосой частот до 18 ГГц. Измерения проведены для передатчиков двух типов: с внутренней модуляцией интенсивности излучения по току инжекции лазера с резонатором Фабри-Перо и с внешней модуляцией в интерферометре Маха-Цендера интенсивности излучения DFB лазера. Были измерены как оптические спектры модулированного излучения на выходе передатчиков, так и соответствующие спектры радиосигналов на выходе фотоприемных модулей аналоговых линий.

Ключевые слова: аналоговая волоконно-оптическая линия передачи, радиофотоника, модулятор Маха-Цендера, модуляция интенсивности, динамический диапазон, оптический спектр

1. Введение. Аналоговые волоконно-оптические (ВО) линии передачи СВЧ сигналов и их компоненты находят все более широкое применение при создании современных радиоэлектронных систем различного назначения (радиолокация, радиомониторинг, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами и др.) [1-3]. Большой интерес вызывает применение компонентов радиофотоники (аналоговой СВЧ фотоники) при решении задач диграммоформирования в многоэлементных фазированных антенных решетках СВЧ диапазона [1, 4-6]. Во многих радиопотонных системах в качестве «основы» можно выделить одноканальную ВО линию передачи широкополосных радиосигналов, параметры которой определяют достижимые характеристики всей системы. В данной статье рассматриваются ВО линии, работающие по принципу IM-DD (intensity modulation – direct detection), параметры которых в первую очередь определяются характеристиками передатчиков. В статье приведены экспериментальные исследования характеристик выпускаемых промышленно модулей передатчиков двух типов: на основе лазера с резонатором Фабри-Перо с прямой (внутренней) модуляцией интенсивности – фирмы Дилаз и на основе DFB лазера с внешней модуляцией интенсивности в модуляторе Маха-Цендера – фирмы Emcore.

2. Модуль передатчика из состава ВО линии Дилаз. Нами исследовался передающий оптический модуль (ПОМ) типа ДМПО131-23 из состава широкополосной ВО линии Дилаз, включающей также и микроволновый InGaAs PIN фотоприёмник типа ДФДМШ40-16 [7]. Структурная схема ПОМ приведена на рис. 1. В состав модуля помимо самого лазерного диода ЛД входят фотодиод обратной связи ФД, термoeлектрический микроохладитель (элемент Пельтье) ТЭО, терморезистор Тр, используемые для стабилизации оптических и электрических параметров лазерного диода, ВЧ плата согласования (входной импеданс 50 Ohm) для передачи сигнала от входного СВЧ разъема к лазерному диоду с узлом развязки по постоянной и переменной составляющим тока накачки лазерного диода. В комплект ПОМ входит также драйвер питания, обеспечивающий постоянную температуру и среднюю мощность лазерного диода за счет поддержания постоянных величин сопротивления терморезистора Тр и фототока фотодиода ФД, встроенных в ПОМ. Среди основных можно

указать такие характеристики ПОМ [7]: длина волны излучения λ – от 1.28 до 1.35 μm ; ширина огибающей спектра $\Delta\lambda < 6 \text{ nm}$; ток накачки лазерного диода $I_L < 90 \text{ mA}$, средн. 60 mA; оптическая мощность в волокне $P_{\text{ОПТ}} > 4 \text{ mW}$, средн. 9 mW; диапазон частот модуляции – от 0.1 до 16000 MHz; относит. интенсивность шума $RIN < -140 \text{ dB/Hz}$.

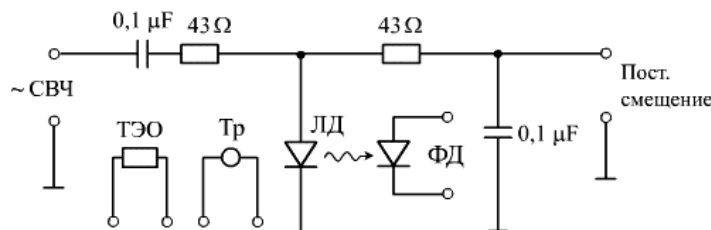


Рис. 1. Электрическая схема передающего модуля ДМПО131-23.

3. Модуль передатчика из состава ВО линии Emcore. Вторые исследованные модули – это специализированные радиофотонные модули (приемник и передатчик), образующие широкополосную RoF линию OTS-2-18 (Emcore) [8]. Структурная схема ПОМ типа OTS-2T/S5-.5018-xx-10-FA представлена на рис. 2. Модуляция интенсивности осуществляется во внешнем по отношению к лазеру интегрально-оптическом модуляторе Маха-Цендера.

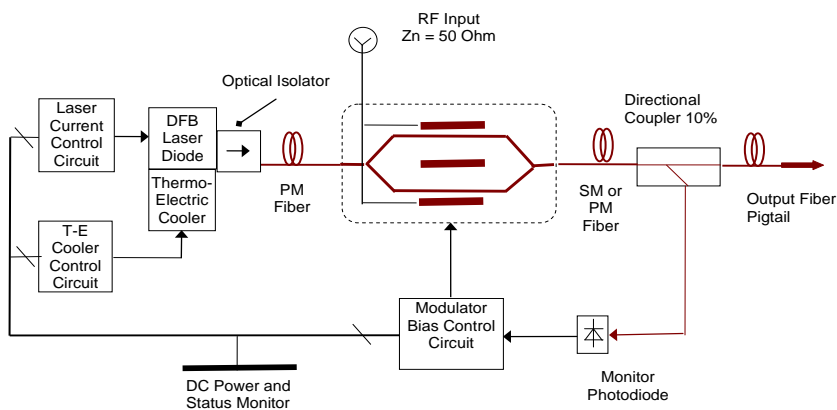


Рис. 2. Структурная схема передатчика OTS-2-18 Emcore

Модули передатчика и приемника имеют встроенную систему стабилизации режимов работы: мощности лазера, его температуры (на основе элемента Пельтье), рабочей точки модулятора Маха-Цендера, в обоих модулях системы стабилизации включают также и минивентильеры. Выполненные нами ранее исследования показали необходимость стабилизации рабочей точки модулятора Маха-Цендера [5]. Длина волны излучения DFB-лазера «привязана» к сетке ИТУ, в нашем случае 1554,33 нм (канал 30 сетки 100 GHz), что важно при разработке систем с применением технологии DWDM. Приемный модуль после фотодетектора имел дополнительный СВЧ усилитель с коэффициентом усиления $G_{\text{АМП}} \approx 15 \text{ dB}$. Среди основных можно указать следующие характеристики ПОМ [8]: длина волны излучения λ (по сетке ИТУ) – от 1530 до 1562 nm; ширина линии DFB лазера $\Delta\nu \approx 10 \text{ MHz}$; ток накачки лазерного диода I_L средн. 360 mA; оптическая мощность в волокне $P_{\text{ОПТ}} = 10 \pm 1 \text{ dBm}$; полуволновое напряжение модулятора $U_{\pi} \approx 5.7 \text{ V}$; диапазон частот модуляции – от 0.05 до 18 GHz; относит. интенсивность шума RIN средн. -140 dB/Hz.

На рис. 3 и 4 представлены вид макета ВО линии с компонентами Дилаз и внутренний вид передатчика OTS-2-18, соответственно.



Рис. 3

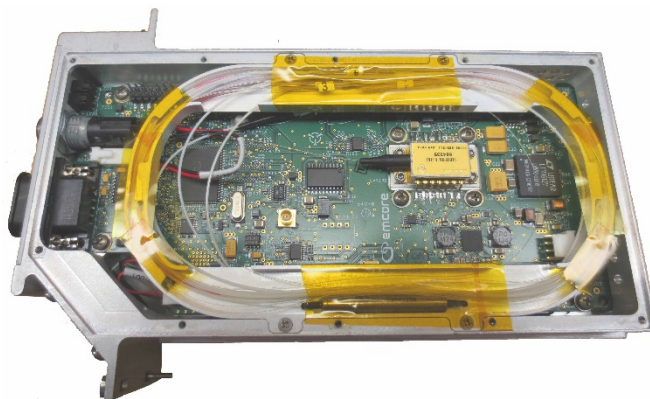


Рис. 4

4. Измерение основных характеристик. На рис. 5 и 6 приведены АЧХ и ФЧХ в виде $|S_{21}(f)|$ и $\Delta\varphi(f) = \arg[S_{21}(f)]$ для линий Дилаз и Emcore малой длины, измерения векторным анализатором R&S ZVA40, уровень СВЧ мощности $P_{IN} = 1 \text{ mW}$. Коэффициент передачи $G_{FL} \approx -33 \text{ dB}$ при неравномерности $\pm 2 \text{ dB}$ в рабочем диапазоне частот до 16 GHz для линии Дилаз, и $G_{FL} \approx -6 \text{ dB}$ при неравномерности $\pm 2 \text{ dB}$ в диапазоне частот до 18 GHz для линии Emcore, а с вычетом дополнительного усиления G_{AMP} ее коэффициент передачи $G_{FL} \approx -21 \text{ dB}$. Наши измерения показали, что отклонения ФЧХ от линейной зависимости больше для линии Дилаз, и они существенно возрастают на верхних рабочих частотах вблизи 16 GHz . При измерениях ФЧХ определены временные задержки внутри модулей, связанные с длиной внутренних волоконных трактов. Для модулей Emcore (как готовых покупных изделий) задержки составили 17.4 ns для передатчика и 15.6 ns для приемника. Эти величины имеют разброс от экземпляра к экземпляру, и их необходимо учитывать (корректировать) в радиоэлектронных системах, работающих по принципу true-time-delay. Следует отметить малое отклонение характеристик нескольких образцов ПОМ Emcore друг от друга, как $|S_{21}(f)|$, так и $\arg[S_{21}(f)]$ (после вычитания линейной компоненты групповой задержки).

На рис. 7 представлена зависимость КСВн (SWR) по входу обоих типов ПОМ. Согласование с трактом 50 Ohm для ПОМ Дилаз значительно хуже: в нашем макете на частотах выше 9 GHz КСВн > 3 , в то время как для ПОМ Emcore КСВн < 1.5 на всех рабочих частотах. Измерения амплитудных характеристик позволяют определить максимальную и минимальную входные мощности, и отсюда – динамический диапазон линий. В качестве максимальной входной мощности можно взять точку компрессии коэффициента передачи, например, по уровню 1 dB – $P_{IN 1dB}$, а в качестве минимальной – уровень шума на выходе фотоприемного модуля $P_{N 1Hz}$ (приведенный к полосе 1 Hz , измерение анализатором спектра при $P_{IN} = 0$), пересчитанный на вход: $P_{IN MIN} = P_{N 1Hz}/G_{FL}$. Тогда динамический диапазон можно определить как $DR = P_{IN 1dB}/P_{IN MIN}$.

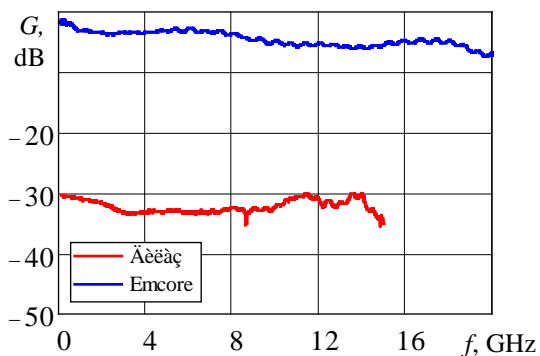


Рис. 5. АЧХ линий Дилаз и Emcore

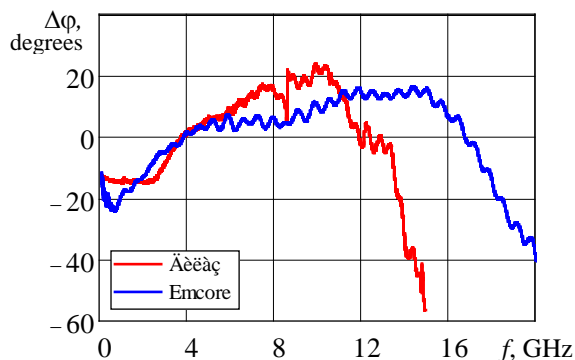


Рис. 6. ФЧХ линий Дилаз и Emcore

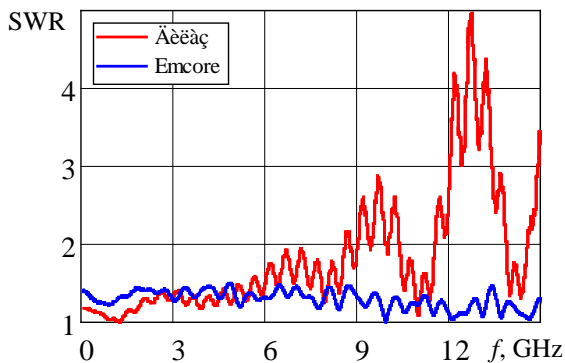


Рис. 7. Изменение КСВн по входу двух линий

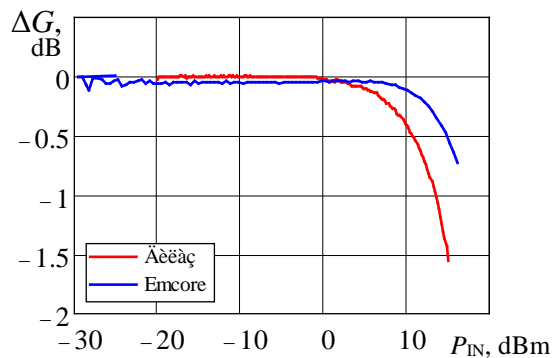


Рис. 8. Отклонения амплитудных характеристик от линейных зависимостей

На рис. 8 приведены отклонения ΔG (в dB) амплитудных характеристик линий от линейных зависимостей, измерения на частоте 14 GHz для Дилаз и 10 GHz для Emcore. Отметим, что точка компрессии $P_{IN\ 1dB} = 16.5$ dBm для Emcore практически не зависит от частоты, в то время как для Дилаз такая зависимость проявляется: в диапазоне изменения входной мощности до +15 dBm точка компрессии наблюдается на частотах выше 10 GHz, например, $P_{IN\ 1dB} = 13.6$ dBm@14 GHz. Для линии Emcore минимальный входной уровень $P_{IN\ MIN}$, приведенный к полосе 1 Hz, составил -144 dBm, т. о. динамический диапазон линии оценивается величиной $DR = 16.5 - (-144) = 160$ dB [9]. Для линии Дилаз уровень $P_{IN\ MIN}$ составил -168 dBm на частоте 1 GHz и -153 dBm на частоте 14 GHz, т. о. динамический диапазон DR линии составил 165.6 dB на частоте 14 GHz.

Характеристики ПОМ дополнительно исследовались с помощью оптического анализатором спектра OSA-20 (Yenista): были измерены спектры излучения ПОМ при разном уровне мощности P_{IN} модулирующего СВЧ сигнала на частотах выше 10 GHz. На рис. 9 для примера показан спектр ПОМ Дилаз при сигнале с $f = 12$ GHz, $P_{IN} = 4$ dBm. Разрешение OSA-20 составляет 19 pm, а отсчеты спектра берутся с шагом 2 pm. Лазер с резонатором Фабри-Перо имеет несколько одновременно генерируемых продольных мод, как это видно в его спектре. Огибающая спектра имеет ширину около xx nm.

В спектре помимо оптических несущих с частотами ν , присутствуют дополнительные спектральные составляющие – верхние и нижние боковые частоты $\nu \pm f$, $\nu \pm 2f$, уровень которых зависит от величины входного модулирующего сигнала. Составляющие с частотами $\nu \pm 2f$ вызваны нелинейностью зависимости оптической мощности P_{OPT} лазера от его тока накачки I_L (с учетом передаточной характеристики ВЧ платы согласования в ПОМ).

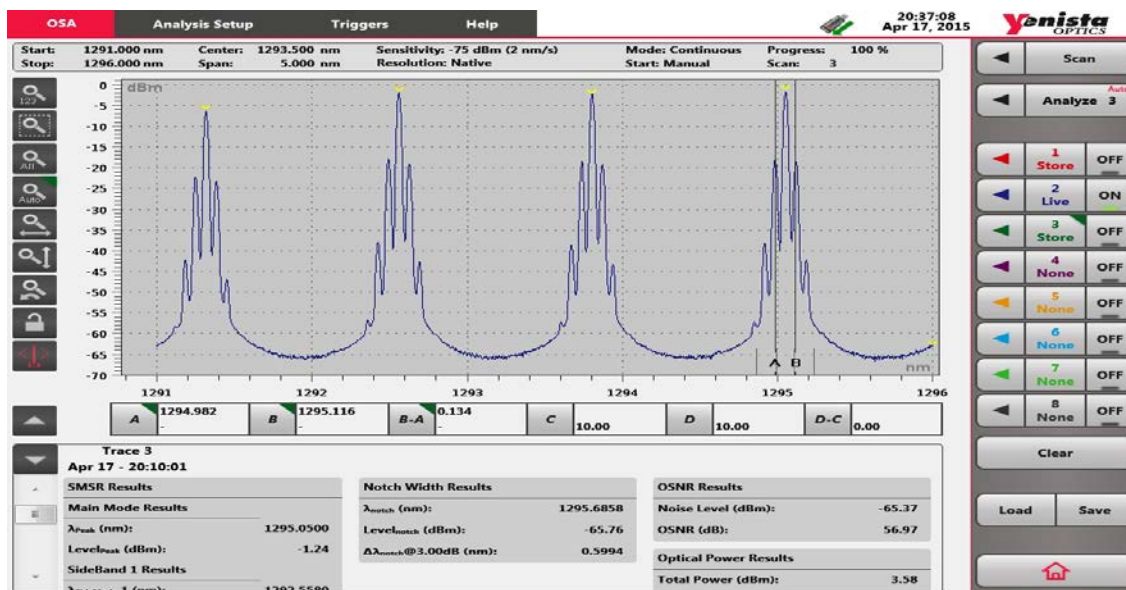


Рис. 9. Спектр излучения ПОМ Дилаз

Измерения уровня боковых составляющих от входной мощности P_{IN} позволяют оценить глубину модуляции m интенсивности оптической несущей: m составляет несколько процентов при $P_{\text{IN}} = 1 \text{ mW}$. Измерения спектральных компонент в спектре излучателя были выполнены и для ПОМ Emcore, что позволило независимо оценить величину полуволнового напряжения U_{π} модулятора Маха-Цендера на частотах выше 12 GHz [10].

Авторы выражают благодарность специалистам ООО «Роде и Шварц Рус» за предоставление возможности проведения ряда СВЧ измерений с применением приборов SMW200A и FSW26, а также ООО «Специальные системы» за предоставление возможности проведения измерений с применением анализатора OSA-20 Yenista.

Библиографический список

1. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и её применение. – М.: АКТЕОН. – 2012.
2. Seeds A.J., Williams K.J. Microwave photonics. // J. Lightwave Technology. – 2006. – V.24. – №12. – pp. 4628-4641.
3. Царук А.А., Вытнов А.В., Иванов Д.В. Методы обеспечения опорной частотой аппаратуры радиотелескопа. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. – Вып. 32. – С. 71-76.
4. Малышев С.А., Чиж А.Л., Микитчук К.Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе. // Сборник статей IV Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С. 10-18.
5. Lavrov A.P., Ivanov S.I., Saenko I.I. Investigation of analog photonics based broadband beamforming system for receiving antenna array. // LNCS – 2014. – vol. 8638. – pp. 647-655. (Springer).
6. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Оптоволоконная система формирования диаграммы направленности широкополосной приемной ФАР. // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82. – № 3. – С. 13-22.
7. Высокочастотный лазерный модуль ДМПО131-23. <http://www.dilas.ru/pom/dmpo131-23.php>.
8. 50 MHz to 18 GHz Unamplified Microwave Transport System. <http://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/Optiva-OTS-2-18GHz-Unamplified.pdf>.
9. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Характеристики сверхширокополосных радиопотонных линий передачи СВЧ сигналов. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей IV Всероссийской конференции. Том 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С.289-293.
10. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I. Investigation of Key Components of Photonic Beamforming System for Receiving Antenna Array. // LNCS – 2015. – vol. 9247. – pp. 679-688. (Springer).