

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ВОСП-СРК

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ВОСП-СРК

THE RECEIVING DEVICE'S SENSITIVITY ANALYSIS FOR WDM FOTS

Аннотация. Проанализирована чувствительность оптических приемных устройств прямого детектирования на основе *p-i-n*-фотодиода (ФД), лавинного ФД без и с предварительным оптическим усилителем (ПОУ) по критерию отношения оптических сигнал-шум. Получены аналитические выражения и численные данные о чувствительности упомянутых приемных устройств с шириной полосы пропускания 0,1...40 ГГц. Оценено увеличение длины участка регенерации волоконно-оптических систем передачи при использовании лавинного ФД и ПОУ+*p-i-n*-ФД относительно случая применения *p-i-n*-ФД.

Анотація. Проаналізована чутливість оптичних приймальних пристроїв прямого детектування на основі *p-i-n*-фотодіода (ФД), лавинного ФД без та з попереднім оптичним підсилювачем за критерієм відношення оптичних сигнал-шум. Отримані аналітичні вирази і числові дані щодо чутливості згаданих приймальних пристроїв з шириною смуги пропускання 0,1...40 ГГц. Оцінено збільшення довжини ділянки регенерації волоконно-оптичних систем передачі при використанні лавинного ФД та ПОУ+ *p-i-n*-ФД відносно випадку застосування *p-i-n*-ФД.

Summary. Comparison sensitivity of basic optical receivers of direct detecting is made: on *p-i-n*-photodiode; the avalanche photodiode, with the fiber-optic preamplifier (EDFA – erbium-doped fiber amplifiers) usage parameter optical signal-to-noise ratio (OSNR). The analytical expressions and numerical data concerning sensitivity optical receivers with bandwidth from 0,1 up to 40 GHz are obtained. Is made estimations of increase of length of a regenerator section optical systems transmission at usage avalanche photodiode and EDFA +*p-i-n*-photodiode receiver.

Проблема улучшения чувствительности приемных оптоэлектронных модулей (ПРОМ) прямого детектирования волоконно-оптических систем передачи ВОСП, в частности, ВОСП со спектральным разделением каналов (ВОСП-СРК) не снята с повестки дня для систем дальней связи. В качестве приемников излучения применяют *p-i-n*-фотодиоды (ФД) и лавинные ФД (ЛФД) из InGaAs, а в широкополосных электронных усилителях (ЭУ) – СВЧ биполярные или полевые транзисторы из GaAs с затвором Шоттки.

Идея увеличения длины участка регенерации ВОСП при помощи оптических усилителей (ОУ) не нова [1, 2]. Оптические усилители устанавливаются в обслуживаемых пунктах – на передающей (усилители мощности) или (и) на приемной стороне предварительные ОУ (ПОУ), а также в линии – линейные ОУ. Такие технические решения широко используются для пассивных оптических сетей, городских оптических сетей и подводных прибрежных сетей связи.

В работе [3] приведены расчеты парциального вклада шумов и чувствительности, а также экспериментальные данные приемной системы ПОУ + *p-i-n*-ФД для случая атмосферной оптической линии передачи. В литературных источниках есть численные оценки и экспериментальные данные, однако нет аналитических выражений для расчета чувствительности приемной системы ПОУ + *p-i-n*-ФД с учетом мультипликативных шумов оптического сигнала. Цель настоящей работы – восполнить указанный пробел.

Структурная схема анализируемого приемного устройства, состоящего из предварительного ОУ (ПОУ) 1 и ПРОМ с *p-i-n* либо лавинным ФД (*p-i-n*-ПРОМ или ЛФД-ПРОМ) 3, приведена на рис. 1. Фильтры 2 и 4 – полосовой и нижних частот – ограничивают ширину полосы пропускания в оптическом $\Delta\nu$ и электрическом Δf диапазонах спектра соответственно, причем при модуляции интенсивности света $2\Delta f \leq \Delta\nu$, R и R^1 (Receiver) – контрольные точки, в которых ИТУ-Т рекомендует измерять параметры ПРОМ.

ОУ на основе оптического волокна (ОВ) легированного эрбием (erbium-doped fiber amplifiers – EDFA) характеризуют коэффициентами усиления по мощности K_p и шума $K_{ш}$ соответственно в рабочей полосе оптических частот $\Delta\nu$, лежащей в C ($\lambda = 1530...1565$ нм) и L ($\lambda = 1565...1625$ нм) диапазонах работы одномодового ОВ. Полупроводниковые ОУ могут работать в O -диапазоне (1260...1360 нм). Усиление фототоков выполняет малошумящий ЭУ.

Под чувствительностью ПРОМ понимают минимальную оптическую мощность (или ее уровень, дБм) на его входе, при которой обеспечивается заданное качество приема. Для ВОСП-СРК таким параметром является отношение мощностей оптических сигнал-шум (*OSNR – optical signal-to-noise ratio*) [2, 4]. Значение *OSNR* ограничивают мультипликативные (квантовые шумы оптического сигнала) и аддитивные (дробовые и тепловые шумы ПРОМ). В случае применения ЛФД к ним добавляются шумы лавинного умножения [2,5,6]. Тепловой шум создают зистор нагрузки ФД и активные элементы ЭУ.

При анализе чувствительности ПРОМ (правая часть схемы на рис. 1) среднеквадратическое значение суммарного эквивалентного шумового тока, приведенное к входу ЭУ [5], пересчитываем в мощность оптических шумов $P_{oшR1}$ в точке R^1 . Здесь эту мощность сопоставляем с мощностью принимаемого оптического сигнала P_o , при которой обеспечивается требуемое значение *OSNR*.

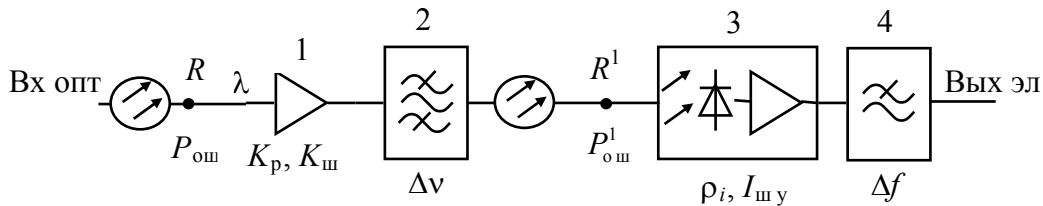


Рисунок 1 – Структурная схема приемного устройства с ПОУ

Используя методику [2] для ПРОМ с ЛФД, в точке R^1 получаем

$$OSNR_1 = \frac{P_o}{P_{oшR1}} = \frac{P_o \rho_i \bar{M}}{\sqrt{2q(\rho_i P_{oш} + I_{то}) \bar{M}^{2+d} + I_{шy}^2} \Delta f}, \quad (1)$$

где P_o и $P_{oш}$ – оптическое и оптическое среднее во времени значение оптической мощности соответственно, Вт; ρ_i и $\rho_i \bar{M}$ – токовый отклик приемника излучения в нелавинном и лавинном режимах соответственно, А/Вт; \bar{M} – среднее во времени значение коэффициента лавинного умножения; q – заряд электрона, $I_{то}$ – объемная составляющая темнового тока ФД в нелавинном режиме, А; d – показатель избыточного шума ЛФД, $I_{шy}$ – шумовой ток усилителя; $I_{шy}$, А/ $\sqrt{\Gamma_{ц}}$ – спектральная плотность (СП) эквивалентного шумового тока ЭУ (включающая шумы сопротивления нагрузки ФД).

Выражение (1) дает значение *OSNR* для *p-i-n*-ФД при условии $\bar{M} = 1$. Первое слагаемое в знаменателе дроби (1) представляет мультипликативные шумы оптического сигнала, вторые два слагаемых – аддитивные. Значение $P_{oш} = P_o/2$ и $P_o/4$ для NRZ и RZ форматов передачи соответственно*. Поскольку значение *OSNR*₁ зависит как от P_o , так и от $\sqrt{P_o}$, следуя [6] преобразуем соотношение (1) в квадратное уравнение относительно искомой оптической мощности P_o , при которой обеспечивается требуемое значение *OSNR*

$$aP_o^2 + bP_o + c = 0. \quad (2)$$

Выражения для расчета коэффициентов этого уравнения приведены в табл. 1. Сопоставление парциального вклада составляющих мощности шума ПРОМ для случая приема цифровых сигналов позволяет сделать следующие выводы. Для ПРОМ с *p-i-n*-ФД мультипликативные шумы и шумы темнового тока пренебрежимо малы, значение *OSNR* ограничивается аддитивным шумом усилителя, и формула (1) принимает вид $OSNR_1 \approx P_o \cdot \rho_i / \sqrt{I_{шy}^2} \cdot \Delta f$. В случае применения ЛФД вклад мультипликативных и аддитивных шумов сопоставим, и при расчетах следует применять точную формулу (1).

При анализе приемной системы с ПОУ эквивалентные оптические шумы ПРОМ с *p-i-n* (или ЛФД) из точки R^1 пересчитываются в точку R , где суммируются с шумами ПОУ. В этой точке мощность суммарных оптических шумов сопоставляется с мощностью оптического сигнала P_o .

*При условии равновероятного следования символов 1 и 0 и полного выключения лазера в режиме передачи символа 0.

Мощность шумов усиленного спонтанного излучения ПОУ [4, 7], приведенная к точке R,

$$P_{oш\text{ ПОУ}} = h\nu \cdot (K_{ш} - 1/K_p) \cdot \Delta\nu \approx h\nu \cdot K_{ш} \cdot \Delta\nu, \text{ Вт},$$

где h – постоянная Планка, ν и $\Delta\nu$ – центральная частота и ширина полосы спектрального канала соответственно.

Мощность оптических шумов ПРОМ с p - i - n -ФД (выражение в знаменателе формулы (1) для $\bar{M} = 1$), пересчитанная из точки R^1 в точку R, с учетом увеличения принимаемой фотодиодом оптической мощности в K_p раз,

$$P_{oш} = P_{oш\text{ R}1}/K_p = \sqrt{[2q(\rho_i P_{o\text{ ср}} K_p + I_{\text{то}}) + \bar{I}_{ш\text{ y}}^2] \Delta f} / (\rho_i K_p), \text{ Вт}.$$

Суммарная мощность оптических шумов в точке R (см. рис. 1)

$$P_{oш\text{ R}} = P_{oш\text{ ПОУ}} + P_{oш\text{ R}1}, \text{ Вт}.$$

Отношение оптических сигнал-шум в точке R

$$OSNR_2 = \frac{P_o}{P_{oш\text{ R}1}} = \frac{P_o}{h\nu K_{ш} \Delta\nu + \sqrt{[2q(\rho_i P_{o\text{ ср}} K_p + I_{\text{то}}) + \bar{I}_{ш\text{ y}}^2] \Delta f} / \rho_i K_p}. \quad (3)$$

Выражение (3) преобразуем в уравнение вида (2) (формулы для расчета его коэффициентов приведены в табл. 1) относительно искомой оптической мощности, при которой обеспечивается требуемое значение $OSNR_2$. Положительный корень уравнения (2) дает искомое значение P_o для ПРОМ с ФД или для комбинации ПОУ + ПРОМ с p - i - n -ФД, обеспечивающее требуемое значение $OSNR$. Отметим, что в знаменателе формулы (3) значение члена мультипликативного шума (первое слагаемое под корнем) сравнимо со значением членов, обусловленных аддитивным шумом.

Таблица 1 – Выражения для расчета коэффициентов уравнения (2)

Вариант ПРОМ	Коэффициенты уравнения (2)			c
	a	b		
		NRZ-код	RZ-код	
p - i - n -ФД	$\rho_i^2 (OSNR_1)^{-2}$	$-q\rho_i \Delta f$	$-q\rho_i \Delta f / 2$	$-(2qI_{\text{то}} + \bar{I}_{ш\text{ y}}^2) \Delta f$
ЛФД	$(\rho_i \bar{M})^2 (OSNR_1)^{-2}$	$-q\rho_i \Delta f \cdot \bar{M}^{2+d}$	$-q\rho_i \Delta f \cdot \bar{M}^{2+d} / 2$	$-(2qI_{\text{то}} \cdot \bar{M}^{2+d} + \bar{I}_{ш\text{ y}}^2) \Delta f$
ПОУ + ПРОМ p - i - n -ФД	$(OSNR_2)^{-2}$	$-\frac{2h\nu K_{ш} \Delta\nu}{OSNR_2} - \frac{q\Delta f}{\rho_i K_p}$	$-\frac{2h\nu K_{ш} \Delta\nu}{OSNR_2} - \frac{q\Delta f}{2\rho_i K_p}$	$(h\nu K_{ш} \Delta\nu)^2 - [(2qI_{\text{то}} + \bar{I}_{ш\text{ y}}^2) \Delta f] / \rho_i^2 K_p^2$

Чувствительность приемных устройств будем сопоставлять с *квантовым пределом чувствительности* [5] идеального квантового усилителя (ИКУ), имеющего СП мощности шумов $h\nu$ (Вт/Гц) [7]. Квантовый предел и максимальное отношение мощностей оптических сигнал-шум для ИКУ в полосе $\Delta\nu = 2\Delta f$

$$P_o = OSNR_{\text{ИКУ}} / 2h\nu \cdot \Delta f; OSNR_{\text{ИКУ}} = P_o / 2h\nu \cdot \Delta f.$$

Результаты расчетов чувствительности приемных устройств в зависимости от ширины полосы пропускания оптического и электрического сигналов приведены в табл. 2 для следующих условий: цифровая передача данных в формате NRZ; длина волны оптической несущей $\lambda = c/\nu \approx 1310$ или 1550 нм; $K_{ш} = 2,8$ (4,5 дБ); $OSNR_1 = OSNR_2 = OSNR_{\text{ИКУ}} = 10$ (10 дБ), для p - i - n -ФД $\rho_i = 0,8$ А/В и $I_t = 10$ нА; для ЛФД $\bar{M} = 10$, $d = 0,75$, $I_{\text{то}} = 10$ нА в нелавинном режиме; СП эквивалентного шумового тока ЭУ 8 пА/√Гц [8]. Отметим, что приведенные в табл. 2 экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с расчетными. Проанализируем полученные результаты:

1. Замена в ПРОМ p - i - n -ФД на ЛФД целесообразна [2] при скорости передачи, превышающей 155 Мбит/с (уровень STM-1 и выше). При такой замене теоретическое улучшение чувствительности на 8,8 дБ хорошо совпадает с экспериментально достигнутым на 9 дБ при скорости 2,5 Гбит/с (STM-16). Для скорости 10,0 Гбит/с (STM-64) совпадение хуже – теория дает улучшение на 7,6 дБ, а эксперимент – на 11,7 дБ [2]. При такой замене длина участка регенерации по затуханию

увеличивается примерно на 20 и 30 км (для STM-16, STM-64) при коэффициенте затухания одномодового ОВ 0,4 и 0,25 дБ/км на $\lambda = 1310$ и 1550 нм соответственно.

2. Применение ПОУ для $\Delta f \leq 1$ ГГц не целесообразно (и по техническим, и по экономическим причинам) – максимальный выигрыш относительно ПРОМ с ЛФД составляет 3,6...9 дБ. Для широкополосных приложений ($\Delta f \geq 1$ ГГц) ПОУ позволяет улучшить чувствительность на 20...15 дБ (относительно ПРОМ с *p-i-n*-ФД), что эквивалентно увеличению длины участка регенерации на 40 и 70 км (на $\lambda = 1310$ и 1550 нм) для $\Delta f = 1...40$ ГГц. Отметим, что чувствительность приемной системы ПОУ + ПРОМ с *p-i-n*-ФД для $\Delta f = 40$ ГГц на 7,5 дБ хуже квантового предела чувствительности.

Таблица 2 – Уровень чувствительности (дБм) приемных устройств в зависимости от ширины полосы пропускания оптического и электрического сигнала для $OSNR = 10$

Ширина полосы пропускания электрического сигнала Δf , ГГц		0,1	1,0	2,5	10,0	40,0
1. <i>p-i-n</i> -ПРОМ ($\rho_i = 0,8$ А/В, $I_T = 10$ нА)	Расчет	-30,0	-25,0	-23,0	-20,0	-16,8
	Эксперимент	-33,0 ^{A)}	-	-23,0 ^{L)}	-20,0 ^{L)}	-
2. ЛФД-ПРОМ ($\bar{M} = 10$, $d = 0,75$)	Расчет	-39,7	-34,18	-31,76	-27,65	-22,77
	Эксперимент	-	-	-32,0 ^{L)}	-28,0 ^{O)}	-
Ширина полосы пропускания оптического сигнала $\Delta \nu$, ГГц		12,5			50,0	100,0
3. ПОУ, $K_p = 10^2$	Расчет	-42,5	-41,14	-39,83	-36,5	-32,0
4. ПОУ, $K_p = 10^3$		-43,28	-43,09	-42,92	-37,5	-32,4
ПОУ, $K_p = 10^3$	Эксперимент	-	-48,0 ^{F)}	-	-33,4 ^{F)}	-
5. ИКУ, $\Delta \nu = 2\Delta f$	Расчет	-65,9	-53,9	-51,95	-45,9	-39,9

Примечание: Индексами ^{A), L), D), F) и O)} обозначены результаты для ПРОМ компаний Alcatel, Lucent и Discovery [4], Fidler [2] и Oki Electric Industry соответственно [9].

В статье проведен анализ чувствительности приемных устройств ВОСП с учетом мультипликативного (квантового) шума оптического сигнала. Выполнен расчет и сравнение с экспериментальными данными чувствительности широкополосных приемных устройств систем дальней связи с шириной полосы пропускания линейного тракта 0,1...40 ГГц. Показано, что применение в ПРОМ InGaAs лавинного ФД (взамен *p-i-n*-ФД) позволяет увеличить длину участка регенерации примерно на 20...30 км. Более чем двукратный выигрыш (44...70 км) достигается при использовании предварительного оптического усилителя на входе ПРОМ с *p-i-n*-ФД.

Полученные выше аналитические соотношения справедливы для одноканальных (одноволновых) ВОСП и систем передачи с СРК по одномодовым ОВ с использованием эрбиевых или полупроводниковых ПОУ.

Литература

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов. [2-е изд., исправ.] – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера. 2003. – 440 с.
3. Fidler F. Optical Communications from High-Altitude Platforms / Dissertation / Technischen Universitat Wien, Fakultat fur Elektrotechnik und Informationstechnik Wien, 2007. – 168 p.
4. Убалдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убалдуллаев. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
5. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи: учебник для вузов / В.И. Корнейчук, Т.В. Макаров., И.П. Панфилов. – К.: Техніка, 1994. – 388 с.
6. Корнейчук В.И. Анализ чувствительности приемников оптической связи / В.И. Корнейчук // Радиоэлектроника, Известия вузов СССР. – 1981. – т. XXIV. – № 8. – С. 2-9.
7. Оливер Б.М. Тепловые и квантовые шумы / Б.М. Оливер // ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. – № 5. – С. 507-527.
8. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические измерения./ В.И. Корнейчук, И.П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 1999. – 323 с.
9. Oki Electric Industry. OC48 Optical Receiver for DWDM OAR25310 Series. Document Number QPS-2001-008. – 8 p.