

# ВЛИЯНИЕ ШУМОВ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

## INFLUENCE OF NOISE OF A PHOTO RECEIVING DEVICE AND A FIBER OPTICAL AMPLIFIER ON THE SENSITIVITY THRESHOLD OF A PHOTO RECEIVING DEVICE

Авторы: *Нагребецкий Вадим Константинович (Академия ФСО России)*

Аннотация: Немаловажной частью сетей передачи данных являются волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). Основной вклад в общий шум ВОСП создают шумы фотоприемного устройства (ФПУ). Несмотря на то, что шумовые свойства ВОУ в последнее время исследованы достаточно подробно, в литературе недостаточно освещены вопросы влияния шумов ВОУ на помехозащищенность системы передачи, нет методики для учёта совместного влияния шумов ФПУ и ВОУ на порог чувствительности, недостаточно изучены вопросы влияния оптической фильтрации и каскадирования числа оптических усилителей на помехозащищенность ВОСП.

Ключевые слова: волоконно-оптический усилитель (ВОУ), коэффициент шума, коэффициент усиления.

Annotation: *Fiber-optic transmission systems (FOTS) are an important part of data transmission networks. The main contribution to the total FOTS noise is made by the noise of the photodetector (PD). Despite the fact that the noise properties of HEU have recently been studied in sufficient detail, the issues of the influence of HEU noise on the noise immunity of the transmission system are insufficiently covered in the literature, there is no method for taking into account the combined effect of the noise of the PDA and HEU on the sensitivity threshold, and the issues of the influence of optical filtering and cascading are not sufficiently studied. the number of optical amplifiers for FOTS noise immunity.*

Keywords: *fiber optic amplifier (FOA), noise figure, gain.*

### Коэффициент усиления ВОУ

Коэффициент усиления ВОУ на единицу длины определяется как:  $g = \sigma_c(N_2 - N_1)$ . Коэффициент усиления зависит от частоты входного сигнала, от длины усилителя, от длины волны накачки, от легирующих примесей входящих в состав сердцевины ОВ. Всё это приводит к тому, что спектр усиления имеет сложную форму с характерным пиком в области 1530 - 1535 нм и плавным участком в диапазоне 1540 - 1560 нм. Разность усиления на длинах 1530 и 1550 нм в типичном усилителе составляет ~ 10 дБ при максимальном усилении ~ 40 дБ. Математически коэффициент усиления

$g(\omega)$  можно получить путём вычисления среднего в зависимости от распределения частоты атомного перехода:

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_h(\omega, \omega_a) f(\omega_a) d\omega_a \quad (1.1)$$

где  $g_h(\omega, \omega_a)$  - однородное расширение профиля усиления и  $f(\omega_a)$  - функция распределения, которая зависит от состава стекла в сердцевине ОВ. Для однородно расширенной среды можно записать коэффициент усиления:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T_2^2 + P_c / P_{нас}} \quad (1.2)$$

где  $g_0$  - максимальное значение оптического коэффициента усиления, обусловленное уровнем накачки усилителя,  $\omega$  - оптическая частота входного сигнала,  $\omega_a$  - частота атомного перехода,  $P_c$  и  $P_{нас}$  - оптическая мощность усиливаемого сигнала и мощность насыщения,  $T_2$  - время релаксации диполя.

### Шумы ВОУ

ВОУ уменьшают отношение сигнал / помеха в усиливаемом сигнале благодаря спонтанному излучению добавляемому к сигналу в процессе усиления. Спектральная плотность шума вызванного спонтанным излучением равна.

$$S_{сп} = (G - 1) n_{сп} h\nu \quad (1.3)$$

где  $n_{сп}$  - коэффициент спонтанного излучения или коэффициент инверсии:

$$n_{сп} = N_2 / (N_2 - N_1) \quad (1.4)$$

Мощность шума спонтанной эмиссии равна:

$$P_{сп} = (G - 1) n_{сп} h\nu \Delta f_{сп} \quad (1.5)$$

где  $\Delta f_{сп}$  - ширина полосы частот спонтанного излучения. Эффект спонтанного излучения вызывает флуктуацию усиливаемого сигнала,

которая преобразуется в флуктуацию тока в процессе фото детектирования.

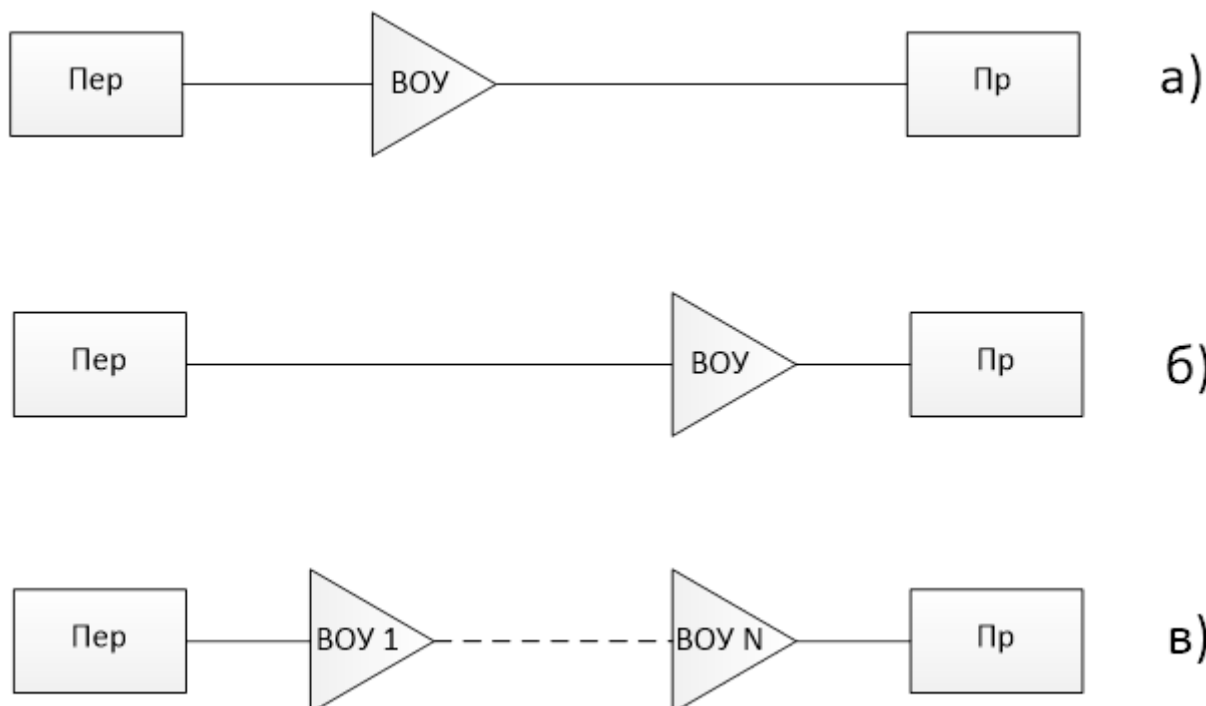


Рисунок 1 Схемы использования ВОУ в ЛТ: а) в качестве усилителя мощности, б) в качестве предусилителя, с) в качестве линейных усилителей.

#### *Использование ВОУ в качестве усилителя мощности на передаче*

Усилитель мощности или " booster " (рис. 1 а) включается сразу за передающим лазером. Он позволяет снизить требования к лазеру передачи, даёт возможность работать при относительно небольших оптических мощностях, что уменьшает нелинейные искажения.

Оптический сигнал на входе ВОУ:  $P_{пер}(t)$ . Сигнал на выходе ВОУ:  $GP_{пер}(t) + P_{сн}$ . На входе приёмника оптический сигнал будет равен:

$$P_c(t) = [GP_{пер}(t) + P_{сн}] / a \quad (1.6)$$

где под "а" понимается коэффициент затухания всего оптического тракта в размах.

Оптический предварительный усилитель (рис. 1 б) позволяет увеличить уровень сигнала на приёме. Это даёт возможность увеличить длину усилительного участка, либо уменьшить требования к электронному усилителю (к собственным шумам). Оптический сигнал на выходе передатчика  $P_{пер}(t)$ . Сигнал на входе ВОУ будет равен:  $P_{пер}(t) / a$ . Сигнал на выходе ВОУ (на входе приёмника):

$$P_c(t) = \frac{P_{\text{пер}}(t)G}{a} + P_{\text{сп}} \quad (1.7)$$

### Использование ВОУ в качестве линейных усилителей

ВОУ используются в качестве линейных усилителей (рис. 1 в) в протяжённых (магистральных) линиях связи. Они успешно конкурируют с электронными регенераторами и вытесняют их. Особенно перспективно применение ВОУ в многоканальных системах (системах со спектральным уплотнением), где один ВОУ применяется для усиления всех каналов (в случае электронных регенераторов, на каждый канал необходимо отдельное устройство). Основные проблемы, возникающие при использовании большого числа линейных усилителей - это накопление шумов связанных с усиленной спонтанной эмиссией. В многоканальных системах основные проблемы связаны с неравномерностью спектра усиления ВОУ и с возникновением перекрёстных искажений между каналами. Оптический сигнал на выходе передатчика:

$$P_{\text{пер}}(t),$$

на входе ВОУ 1 сигнал равен:

$$P_{\text{пер}}(t)/a_1,$$

на выходе ВОУ 1:

$$P_{\text{пер}}(t)G_1/a_1 + P_{\text{сп1}},$$

на входе второго ВОУ сигнал равен:

$$P_{\text{пер}}(t)G_1/a_1 + P_{\text{сп1}}/a_2,$$

на выходе ВОУ 2:

$$P_{\text{пер}}(t)G_1/a_1 + P_{\text{сп1}}/a_2 + P_{\text{сп2}},$$

на входе ВОУ 3:

$$\{P_{\text{пер}}(t)G_1/a_1 + P_{\text{сп1}}/a_2 + P_{\text{сп2}}\}/a_3,$$

где  $a_i$  - коэффициент затухания оптического ЛТ на  $i$  - том участке,  $i=1,2... N, N + 1$ ;  $N$  - число усилителей,  $G_i$  - коэффициент усиления  $j$  - го усилителя,  $j = 1, 2 ... N$ ;  $P_{\text{спj}}$  - мощность шума спонтанной эмиссии  $j$  - го усилителя. При условии:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_2 = \dots = a_{n+1} = a, \\ G_1 &= G_2 = \dots = G_n = G, \\ P_{\text{сп1}} &= P_{\text{сп2}} = \dots = P_{\text{спn}} = P_{\text{сп}} \end{aligned}$$

оптический сигнал на входе приёмника будет равен:

$$P_c(t) = \frac{P_{\text{пер}}(t)G^n}{a^{n+1}} + \sum_{k=0}^{n-1} (G/a)^k P_{\text{сп}}/a \quad (1.8)$$

где  $a$  - коэффициент затухания оптического линейного тракта одного усилительного участка,  $G$  - усиление одного ВОУ. Если принять условие, что усиление каждого ВОУ компенсирует затухание длины усилительного участка, т. е.  $a_i = G_j$ , то формула (1.8) преобразуется в простое выражение:

$$P_c(t) = [P_{пер}(t) + NP_{сп}] / a \quad (1.9)$$

Из выражения (2.18) следует, что спектральная плотность шума связанная со спонтанной эмиссией в ВОУ линейно увеличивается с ростом числа усилителей.

*Отношение сигнал/помеха, приведённое ко входу предварительного усилителя*

Действующий ток на выходе ФД будет равен:

$$i = S(GP_{пп} + S_{сп} \Delta f_0) \quad (1.11)$$

Отношение сигнал/помеха ( $S / N$ ) на входе электронного усилителя:

$$\frac{S}{N} = \frac{SGP_{пп}}{\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_0^2}} \quad (1.12)$$

Отношение сигнал/помеха позволяет оценить помехозащищённость системы при известном значении мощности сигнала на приёме. Задавая определённое значение отношения ( $S/N$ ) можно определить порог чувствительности приёмного устройства, приведённый ко входу электронного усилителя.

Проанализируем шумы, стоящие в знаменателе. При использовании узкополосного оптического фильтра шумы биений сигнал - СЭ значительно превосходят все остальные шумы, при этом  $\sigma_1^2 \gg \sigma_0^2$ . С учётом этого, можно записать :

$$\frac{S}{N} = \frac{SGP_{пп}}{\sqrt{\sigma_1^2}} \quad (1.13)$$

Среднеквадратическая мощность шума для сигнального импульса "1" будет равна:

$$\sigma_1^2 = 2ei\Delta f_{эл} + \sigma_{с-сэ}^2 + \sigma_{с-сэ}^2 + \sigma_{ост}^2 \quad (1.14)$$

Под  $\sigma_{ост}^2$  понимаются тепловые шумы нагрузки, Среднеквадратическая мощность шума для "0" будет равна:

$$\sigma_0^2 = 2eSS_{сн}\Delta f_0\Delta f_{эл} + \sigma_{с-сэ}^2 + \sigma_{ост}^2 \quad (1.15)$$

После подстановки и возведения в квадрат получим:

$$(S/N)^2 = \frac{(SGP_{пр})^2}{2ei\Delta f_{эл} + \sigma_{с-сэ}^2 + \sigma_{с-сэ}^2 + \sigma_{ост}^2} \quad (1.16)$$

Решая квадратное уравнение относительно  $P_{пр}$ , можно найти порог чувствительности приёмного устройства:

$$P_{пр}^2 - bP_{пр} - c = 0 \quad (1.17)$$

Для упрощения расчётов примем  $(G - 1) \sim G$ , это справедливо для больших значений  $G$ . Тогда, используя  $\sigma_{сэ-сэ}^2 = S^2 4n_{сн}(G - 1)^2 (hv)^2 \Delta f_{эл} \Delta f_0$

$$b = 2 \left(\frac{S}{N}\right)^2 \left(\frac{e}{SG} + 2n_{сн}hv\right) \Delta f_{эл} \quad (1.18)$$

$$c = \left(\frac{S}{N}\right)^2 \left\{ \frac{2en_{сн}hv\Delta f_0\Delta f_{эл}}{SG} + 4(n_{сн}hv)^2 \Delta f_{эл} \Delta f_0 + \frac{\sigma_{ост}^2}{(SG)^2} \right\} \quad (1.19)$$

Второй член уравнения (1.15) содержит сумму среднеквадратических значений дробового шума сигнала и шума биений сигнал - спонтанная эмиссия, умноженную на  $(S/N)^2 / (SG)^2$ , а третий член состоит из суммы среднеквадратических значений дробового шума спонтанной эмиссии, шума биений СЭ - СЭ и электронных шумов схемы, умноженной на тот же множитель.

Порог чувствительности оптического приёмного устройства, приведённый ко входу электронного усилителя равен:

$$P_{пр} = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4c}}{2} \quad (1.20)$$

Оптимизация коэффициента усиления ВОУ

Из анализа следует, что дробовой шум сигнала и спонтанной эмиссии уменьшается с включением ВОР в  $G$  раз, электронные шумы схемы  $\sigma_{\text{ост}}^2$  уменьшаются в  $G^2$  раз, шумы, связанные с биениями сигнал - СЭ, СЭ - СЭ не зависят от усиления ВОР.

Слагаемое  $b$  минимально при выполнении условия:  $e / SG \ll 2 n_{\text{сп}} h\nu$ . Относительно  $G$  это можно записать как:

$$G \gg e/2Sn_{\text{сп}}h\nu \quad (1.21)$$

При выполнении условия (2.29), слагаемое  $b$  можно записать в виде:

$$b = 4\left(\frac{S}{N}\right)^2 n_{\text{сп}} h\nu \Delta f_{\text{эл}} \quad (1.22)$$

Из формулы (1.22) следует, что  $b$  определяется коэффициентом спонтанного излучения  $n_{\text{сп}}$  усилителя и не зависит от коэффициента усиления  $G$ . Коэффициент  $c$  принимает минимальное значение при условии:

$$4(n_{\text{сп}}h\nu)^2 \Delta f_{\text{эл}} \Delta f_0 > \frac{2en_{\text{сп}}h\nu \Delta f_{\text{эл}} \Delta f_0}{GS} + \sigma_{\text{ост}}^2 / (SG)^2 \quad (1.23)$$

Из (1.23) можно найти значение  $G$ , при котором выполнялось бы данное условие:

$$G^2 - \frac{Gx}{y} - z/y > 0 \quad (1.24)$$

где:  $x = 2en_{\text{сп}}h\nu \Delta f_{\text{эл}} \Delta f_0$ ,  $y = 4(n_{\text{сп}}h\nu)^2 \Delta f_{\text{эл}} \Delta f_0$ ,  $z = \sigma_{\text{ост}}^2 / S^2$

При выполнении (1.24) для слагаемого  $c$  можно записать:

$$c = 4(S/N)^2 (n_{\text{сп}}h\nu)^2 \Delta f_{\text{эл}} \Delta f_0 \quad (1.25)$$

При вычислении (1.24) видно, что величина  $Gx/y$  намного меньше  $z/y$  или  $Gx \ll z$ . Это означает, что дробовой шум связанный со спонтанной эмиссией много меньше электронных шумов схемы. Для этого случая можно записать:  $G^2 \gg z/y$ . Тогда, выражение для  $G$  упростится и будет выглядеть так:

$$\sigma_{\text{ост}}^2 / \sigma_{\text{СЭ-СЭ}}^2 \ll 1 \quad (1.26)$$

### Требование к полосе пропускания оптического фильтра

При выполнении условий (1.22) и (1.24) порог чувствительности ФПУ не зависит от коэффициента усиления  $G$ . Порог чувствительности приёмного модуля принимает, минимальное значение, когда шумы связанные с биениями СЭ - СЭ меньше шумов биений сигнал - СЭ. Это можно записать так:

$$b^2 \gg 4c \quad (1.27)$$

Используя (1.23) и (1.25), перепишем (1.27) и окончательно получим:

$$\Delta f_0 / \Delta f_{эл} \ll (S/N)^2 \quad (1.28)$$

Из (1.28) следует, что отношение оптической полосы пропускания фильтра к электрической полосе пропускания должно быть меньше квадрата отношения сигнал/помеха.

### Выводы

Включение ВОУ уменьшает в  $G$  раз дробовые шумы сигнала и спонтанной эмиссии и в  $G^2$  раз уменьшает электронные шумы схемы (1.19). При выполнении условий (1.21) и (1.24) порог чувствительности не зависит от коэффициента усиления  $G$  и определяется шумами биений сигнал - СЭ , СЭ - СЭ . При выполнении условия (1.28) порог чувствительности приёмного устройства будет минимально возможным и определяется шумом биений сигнал - спонтанная эмиссия. Он будет равен:

$$P_{пр} = 4(S/N)^2 n_{сп} h\nu \Delta f_{эл} \quad (1.29)$$

При использовании ВОУ в качестве линейного усилителя порог чувствительности такой же, как в случае усилителя мощности. Но выбор коэффициента усиления в случае линейного усилителя не ограничен сверху, как в случае усилителя мощности.

### Библиографический список

1. ГОСТ 2.119-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эскизный проект.



2. Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко. Волоконно-оптические кабели и линии связи –М.: Компания Эко-Трендз. 2012г.

3. И.И. Гроднев, А.Г. Мурадян, А.Г. Шарафутдинов и др. Волоконно-оптические системы передачи и кабели –М.: Компания Эко-Трендз. 2010г.