

УДК 621.396.624

## ВЛИЯНИЕ ШУМА ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА НА ПРИЕМ СИГНАЛОВ С ТРАНСФОРМИРОВАННЫМ СПЕКТРОМ

В.Н. УРЯДОВ, Я.В. РОЩУПКИН, В.Ю. БУНАС, А.С. ЗЕЛЕНИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 26 апреля 2016

Проведен анализ влияния шумов предусилителя на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) на отношение сигнал/шум при приеме линейных сигналов с трансформированным спектром. Произведена оценка зависимости коэффициента усиления усилителя ВРМБ от мощности накачки, а также связанного с ним процесса возникновения шума спонтанной эмиссии. Показано, что влиянием данного шума при большом коэффициенте усиления можно пренебречь.

*Ключевые слова:* оптический приемник, вынужденное рассеивание Мандельштама-Бриллюэна, волоконно-оптическая система передачи.

### Введение

Для повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) в волоконно-оптических системах можно использовать метод трансформации спектра сигнала и оптического усиления несущей, который подробно рассматривается в работе [1]. Суть данного метода заключается в переносе спектра информационного сигнала из области низких частот в область более высоких, с тем чтобы в процессе оптической модуляции создать некоторый защитный интервал между несущей и копиями информационного сигнала. В той же работе отмечается, что наиболее приемлемым способом такого смещения является использование предварительного линейного кодирования информационного сигнала перед оптической модуляцией и, в частности, применяя линейные коды вида 1В2В и mВnВ. В результате применения любого из вышеперечисленных линейных кодов, после модуляции спектр оптического сигнала будет содержать несущую на частоте  $\nu_{\text{нес}}$  и две боковые полосы, разнесенные относительно несущей на некоторый интервал, величина которого зависит от вида линейного кода.

Практическая реализация приемника с усиленной оптической несущей требует наличия локального узкополосного усилителя, который должен обеспечивать усиление только части спектра в окрестности несущей. Наилучшим образом для данных целей подходит распределенный оптический усилитель на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), который обладает узкой полосой усиления (десятки МГц), значительным коэффициентом усиления (порядка 30 дБ, [2]) и где в качестве усилительной среды для ВРМБ выступает сама оптическая линия связи.

### Теоретический анализ

Значение коэффициента усиления  $K_y$  усилителя ВРМБ в произвольной точке волокна  $z_0$  можно вычислить используя подход расчета мощности обратной (стоксовой) волны, которая распространяется в противоположном направлении по отношению к вводимой волне накачки лазера со стороны приемника и, как показано в статье [3], определяется выражением

$$K_y = \exp \left\{ -\alpha_c z_0 + \gamma_0 \frac{P_n}{A_{\text{эфф}} \alpha_n} [1 - \exp(-\alpha_n z_0)] \right\}, \quad (1)$$

где  $\alpha_c$  и  $\alpha_n$  – постоянные затухания оптической линии для стоксовой волны и волны накачки,  $\gamma_0$  – пиковый коэффициент усиления ВРМБ,  $P_n$  – мощность лазера накачки, вводимая в волокно со стороны приемника,  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь сечения волокна.

Пиковый коэффициент усиления ВРМБ зависит от физических параметров и конструктивных особенностей волокна, а также от спектральных характеристик излучения лазера накачки и дается выражением [4]:

$$\gamma_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c \lambda_n^2 \rho_0 V_a (\Delta\nu_n + \Delta\nu_B)}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель преломления среды,  $p_{12}$  – продольный акустооптический коэффициент,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda_n$  – длина волны излучения лазера накачки,  $\rho_0$  – плотность материала,  $V_a$  – скорость движения акустических фононов в кварце,  $\Delta\nu_n$  и  $\Delta\nu_B$  – спектральная ширина излучения лазера накачки и усиления ВРМБ на полувысоте.

Результаты экспериментального измерения  $\Delta\nu_B$  для различных типов волокон, таких как SMF, NZDS, DCF и пр., показывают, что при выборе усилительной среды для узкополосного усиления с ВРМБ, наилучшими значениями обладают стандартные одномодовые волокна с несмещенной дисперсией – SMF (рек. МСЭ-Т G.652). Так при вводе оптического излучения выше определенного порога на длине волны 1550 нм и с шириной излучения 2 МГц в волокнах SMF обеспечивается минимальная спектральная ширина усиления  $\Delta\nu_B \approx 11,4$  МГц [2]. Можно сделать вывод, что при выборе лазера накачки с узкой шириной излучения, пиковое усиление используемого в качестве усилительной среды SMF волокна, а следовательно и коэффициент усиления ВРМБ усилителя будет зависеть от величины  $\Delta\nu_B$ , поскольку  $\Delta\nu_n \ll \Delta\nu_B$ .

На рис. 1 приведено несколько зависимостей коэффициента усиления  $K_y$  от мощности лазера накачки  $P_n$  с длиной волны излучения  $\lambda_n = 1550$  нм и различной шириной спектра излучения:  $\Delta\nu_n = 2, 100, 300$  и  $1000$  МГц. Расчеты производились при следующих типовых значениях кварцевого SMF-волокна: постоянные затухания оптической линии в прямом и обратном направлениях полагались равными  $\alpha_n = \alpha_c$ ,  $\alpha_n = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , эффективная площадь сечения волокна  $A_{\text{эфф}} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ , показатель преломления среды  $n = 1,47$ , продольный акустооптический коэффициент кварцевого волокна  $p_{12} = 0,264$ , скорость движения акустических фононов в кварце  $V_a = 5960$  м/с, плотность материала  $\rho_0 = 2,201$  г/см<sup>3</sup>, спектральная ширина на полувысоте в режиме усиленного излучения  $\Delta\nu_B = 11,4$  МГц. При использовании данных параметров пиковый коэффициент усиления ВРМБ, вычисленный по формуле (2), составляет  $\gamma_0 \approx 5 \cdot 10^{-11}$  м/Вт.

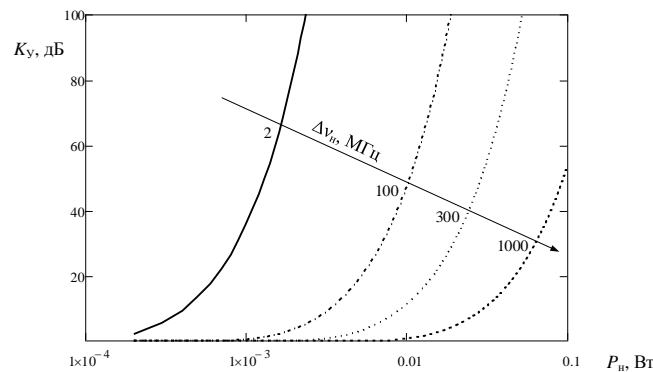


Рис. 1. График зависимости  $K_y$  от мощности накачки  $P_n$

Семейство зависимостей (рис. 1) показывает, что для достижения одного и того же усиления требуется либо использовать дорогостоящие узкополосные лазеры, либо вводить более высокий уровень мощности в волокно. В современных SMF-волокнах предельный уровень вводимой мощности может быть достигнут при 2 Вт [5]. До данного порога возникают нелинейные явления, такие как комбинационное рассеяние, самомодуляция и пр. [4], а при превышении порога может произойти плавление сердцевины оптического волокна и повреждение линии связи. Еще более жесткие требования по уровню вводимой мощности накладываются для систем DWDM.

Как это было получено в [1], величина ОСШ приемника сигналов с трансформированным спектром будет определяться параметрами модуляции сигнала, усилителя и фотодетектора

$$SNR = \frac{(K_y P_c K_{МИ})^2 \left( \frac{\eta q}{h \nu_{нес.}} \right)^2}{2q \frac{\eta q}{h \nu_{нес.}} \frac{K_y^2 P_c}{2} B}, \quad (3)$$

где  $P_c$  – мощность сигнала,  $K_{МИ}$  – коэффициент модуляции интенсивности,  $\eta$  – квантовая эффективность фотодетектора,  $q$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $\nu_{нес.}$  – частота несущей оптического излучения,  $B$  – скорость передачи.

Формула (3) справедлива для достаточно больших значений коэффициента усиления, а именно  $K_y > 10^3$ , за счет чего в шумовой составляющей ОСШ будут доминировать дробовые шумы несущего колебания над тепловыми шумами, которые здесь не учитываются. С другой стороны, когда используется нелинейный усилитель типа ВРМБ, то возникает необходимость также учитывать его собственный шум, который вызван спонтанной эмиссией фотонов, движущихся в сторону приема. Таким образом, на вход приемника поступает шумовая волна совместно с усиленной несущей и неусиленными боковыми составляющими информационного сигнала, поэтому формула (3) с учетом шума спонтанной эмиссии примет вид

$$SNR = \frac{(K_y P_c K_{МИ})^2 \left( \frac{\eta q}{h \nu_{нес.}} \right)^2}{2q \frac{\eta q}{h \nu_{нес.}} \frac{K_y^2 P_c}{2} B + P_{ш.Б}}, \quad (4)$$

где  $P_{ш.Б}$  – полная мощность шума спонтанной эмиссии от ВРМБ усиления.

Для определения полной мощности шума спонтанной эмиссии будем использовать подход, который подробно изложен в [3]. Ниже дано конечное выражение

$$P_{ш.Б} = K_T \cdot h \nu_c \cdot G_{эфф}(P_H) \cdot B_{эфф}(P_H), \quad (5)$$

где  $K_T$  – количественный коэффициент термической эмиссии фотонов,  $\nu_c$  – частота стоксовой волны,  $G_{эфф}(X)$  – эффективный коэффициент усиления спонтанной эмиссии, который зависит от мощности накачки  $X$ ,  $B_{эфф}(X)$  – эффективная ширина полосы спонтанной эмиссии, зависящая от мощности накачки  $X$ .

Расчет составляющих выражения (5) следует производить по формулам:

$$K_T = \frac{kT}{h \nu_B}, \quad (6)$$

$$G_{эфф}(P_H) = \left( \frac{\gamma_0 P_H}{A_{эфф} \alpha_H} \right)^{-1} \cdot \exp \left( \frac{\gamma_0 P_H}{A_{эфф} \alpha_H} - 1 \right), \quad (7)$$

$$B_{эфф}(P_H) = \frac{\sqrt{\pi} \Delta \nu_B}{2} \left( \frac{\gamma_0 P_H}{A_{эфф} \alpha_H} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура усилительной среды в К,  $\nu_B$  – частота смещения Бриллюэна.

Для типичных параметров SMF-волокна на длине волны излучения лазера накачки  $\lambda_n = 1550$  нм, частота смещения Бриллюэна составит  $\nu_B = 11,25$  ГГц [4]. При комнатной температуре  $T = 300$  К значение коэффициента термической эмиссии фотонов составит  $K_T = 555$  (6).

На рис. 2 приведены зависимости шумовых составляющих приемника от мощности накачки (линия 1 – дробовый шум, линия 2 – шум спонтанной эмиссии, линия 3 – тепловой шум). Расчет шумовых составляющих приемника производился для типового лазера накачки с шириной спектра излучения  $\Delta\nu_n = 300$  МГц, что существенно превышает величину  $\Delta\nu_B$  для SMF, при этом пиковый коэффициент усиления ВРМБ составит  $\gamma_0 = 1,85 \cdot 10^{-12}$  м/Вт; скорость цифрового потока – 10 Гбит/с. Также на рис. 2 приведен уровень тепловых шумов, которые возникают в усилительной среде (волокне) при комнатной температуре с использованием приведенных выше параметров. Влияние данного шума в общий вклад ОСШ крайне мало и составляет  $\approx 1$  пВт. Как видно из рис. 2, для относительно небольших уровней накачки  $P_n$  шум спонтанного излучения будет существенным по сравнению с дробовым шумом усиленной несущей, поэтому для оценки ОСШ следует пользоваться уточненной формулой (4). При больших уровнях накачки можно использовать упрощенную формулу (3).

По полученной зависимости можно также определить мощность накачки, при которой дробовый шум будет увеличиваться быстрее, чем шум спонтанной эмиссии. Для приведенных параметров это соответствует величине  $P_n > 26$  мВт ( $K_y = 41,3$  дБ).

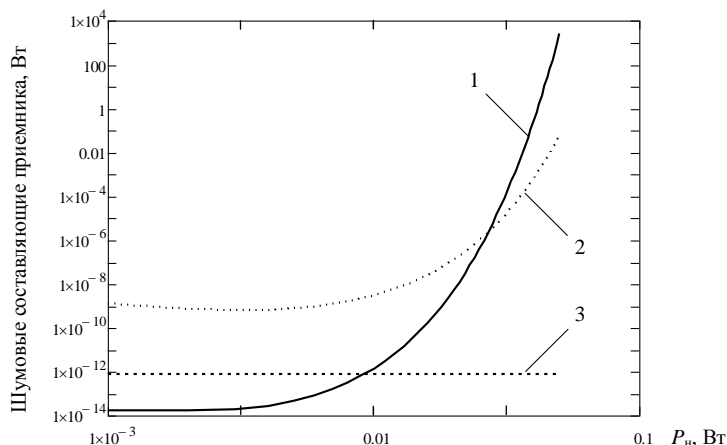


Рис. 2. График зависимости шумовых составляющих приемника от мощности накачки  $P_n$

На рис. 3 приведено семейство зависимостей ОСШ от мощности накачки лазера для различной ширины спектра излучения с учетом и без учета шума спонтанной эмиссии.

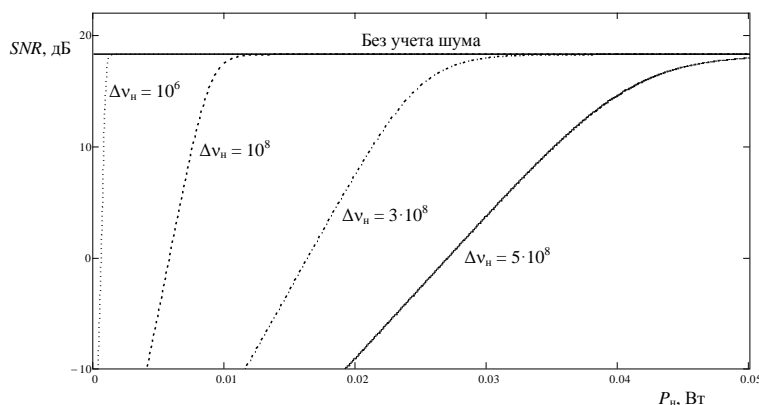


Рис. 3. График зависимости ОСШ от мощности накачки  $P_n$

Данные зависимости позволяют видеть, что максимальная мощность накачки, при которой шумом спонтанной эмиссии можно пренебречь, зависит от ширины излучения лазера накачки. Погрешность расчета без учета составляющей этого шума может достигать 20 дБ для различных параметров применяемого лазера накачки: ширины спектральной линии излучения и мощности накачки.

### **Заключение**

Для получения высокого усиления в оптическом приемнике линейного сигнала с трансформированным спектром требуется выбирать лазер накачки с шириной излучения близкой или меньшей линии Бриллюэна. При использовании более дешевого широкополосного лазера накачки необходимо увеличивать его мощность.

Отрицательной стороной применения предусилителя ВРМБ является наличие дополнительного шума спонтанной эмиссии, который для значений коэффициента усиления  $K_{\nu} < 30$  дБ в общем случае приводит к ухудшению ОСШ. Учет данного шума необходим для повышения точности расчетов чувствительности приемника, использующего вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна для усиления линейных сигналов.

## **INFLUENCE OF THE STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING PREAMPLIFIER NOISE ON RECEIVING THE TRANSFORMED SPECTRUM SIGNALS**

V.N. URYADOV, Y.V. ROSHCHUPKIN, V.Y. BUNAS, A.S. ZELENIN

### **Abstract**

An analysis of the influence of preamplifier noise with effect of stimulated Brillouin scattering (SBS) in the SNR on receiving the transformed spectrum signals was presented in this paper. The dependence of the SBS amplifier gain of the pump and the spontaneous emission noise was estimated. It is shown that impact of noise in case of high gain is negligible.

*Keywords:* optical receiver, stimulated Brillouin scattering, fiber-optic transmission system.

### **Список литературы**

1. Урядов В.Н., Рошчупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 11–16.
2. Yeniau A., Delavaux J.-M., Toulouse J. // J. Lightwave Technol. 2002. Vol. 20, № 8. P. 1425–1432.
3. Smith R.G. // Appl. Opt. 1972. Vol. 11, № 11. P. 2489–2494.
4. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М., 1996.
5. Портнов Э.Л. // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. 2013. № 8. С. 96–98.