

Анализ шумов в модели распределенного волоконно-оптического датчика температуры на основе рассеяния Рамана

И.Л. Хазиев, М.В. Дашков

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара*

Аннотация: В данной работе показано, что доминирующим фактором, ограничивающим метрологические характеристики в реальных распределенных волоконно-оптических датчиках температуры на основе рассеяния Рамана (РВОДТР), являются шумы фотоприёмного устройства (ФПУ), которые вносят существенный вклад в процесс зашумления сигнала. Исследования проводились на примере модели РВОДТР с учетом шумов ФПУ, в качестве которого был выбран лавинный фотодиод (ЛФД). Проведен анализ основных типов шумов ЛФД, включая как основные шумы ФПУ, так и характерные только для ЛФД, оценено их влияние на отношение сигнала-шум (ОСШ). Приведены графики зависимости влияния шумов для РВОДТР, выведенные из соотношения ОСШ, и сделаны выводы о преобладании одних шумов над другими при разных условиях, исходя из их природы возникновения.

Ключевые слова: Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе рассеяния Рамана, лавинный фотодиод, дробовой шум, темновой шум, тепловой шум, амплитудный шум, отношение сигнал/шум, закон распределения случайных величин.

Введение

Важнейшим этапом в процессе моделирования РВОДТР является воспроизведение характеристик сигнала обратного рассеяния модели с учетом шумов ФПУ. Стоит обратить на шумы такого рода особое внимание, так как они вносят значительный вклад в зашумленность сигнала и, как следствие, сильно ухудшают метрологические характеристики РВОДТР. Причем одни типы шумов могут преобладать над другими в ФПУ при определенных условиях.

Шумы ФПУ

В приемниках оптического сигнала, или ФПУ, шум создает проблему относительно главных метрологических характеристик датчика, а именно – точности, разрешения. Шум также влияет на динамический диапазон сигнала, регистрируемого ФПУ. Будучи составляющей сигнала, шум

меняется стохастически, по этой причине он становится основной помехой для передачи информации [1]. Такие виды шумов, как шум темнового тока, тепловой шум, дробовой шум – являются доминирующими в ФПУ, или фотодиодах. Кроме того шум может возникнуть из-за недостаточной разрядности АЦП (этот шум не учитывается при моделировании) (рис.1).

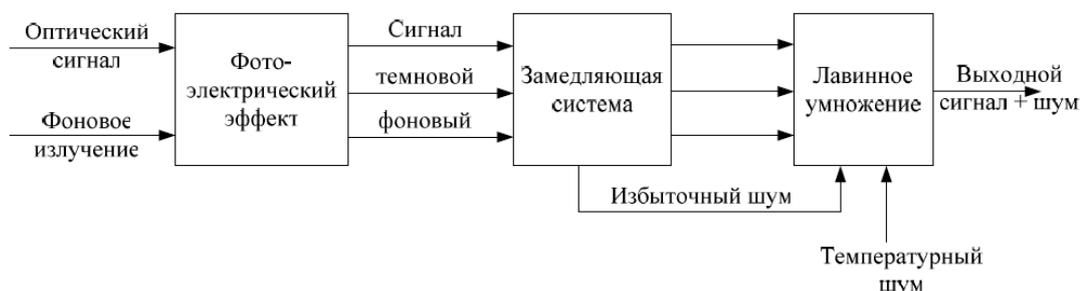


Рис.1. – Источники шумов лавинного фотодиода

Модель РВОДТР с шумами ФПУ

Покажем на примере модели РВОДТР вклад шумов ФПУ, в нашем случае ЛФД, в зашумленность сигнала обратного рамановского рассеяния. Модель взята из работы [2]. Прежде чем проводить анализ шумов ЛФД в модели РВОДТР необходимо, узнать какие основные типы шумов существуют в таком ФПУ и какие законы распределения случайных величин они имеют.

Известно, что генерация электронов ЛФД под воздействием падающих с постоянным темпом фотонов распределена по случайному закону во времени и подчиняется статистике Пуассона. Эта статистика, во взаимодействии с регистрацией оптического излучения, важна для определения минимального уровня обнаружимого сигнала и предельной чувствительности РВОДТР.

Основными шумами на выходе фотодетектора ЛФД являются следующие типы шумов [3,4]: далее будет описан каждый из них.

Дробовый шум характерен для потоков дискретных частиц и является случайным и независимым процессом, т.е. марковским потоком, описываемым распределением (законом) Пуассона. Примерами процессов, в которых проявляется дробовой шум, является излучение абсолютно черного тела, ток носителей заряда в *p-n*-переходах, тепловая генерация носителей заряда, ток термоэлектронной эмиссии.

Таким образом, дробовой шум фотодетектора обусловлен тем, что электрический ток (направленный поток носителей заряда), флуктуирует во времени. Он проявляется в диодах при обратном смещении. Шум является белым для всех практически важных частот[5].

Дробовые шумы оцениваются среднеквадратическим значением:

$$\sigma_n^2 = i_n^2 = 2 \cdot e \cdot I_{ph} \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{ph}, \quad (1)$$

где I_{ph} – ток насыщения диода при обратном смещении; e – заряд электрона; ΔF_{ph} – эквивалентная ширина полосы частот; $F(M)$ – коэффициент шума лавинного умножения, учитывающий увеличение дробовых шумов ЛФД из-за нерегулярного характера процесса умножения. Для большинства ЛФД с достаточной точностью для практических расчетов $F(M)$ находится по формуле:

$$F(M) = M^x, \quad (2)$$

где x – показатель степени.

Темновые шумы ЛФД, среднеквадратическое значение которых равно[3]:

$$\sigma_{dark}^2 = i_{dark}^2 = 2 \cdot e \cdot i_d \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{ph}, \quad (3)$$

где i_d – среднее значение темнового тока.

Собственные шумы (тепловые) фотоприемников обусловлены тепловыми флуктуациями электронов в резисторах и имеют нормальный закон распределения. Спектр таких шумов равномерный, т.е. представляет

собой так называемый «белый шум». Тепловой шум существует во всех типах ФПУ [5]. Собственные шумы электронных схем ЛФД имеют среднеквадратическое значение равно

$$i_{therm}^2 = \sigma_{therm}^2 = \frac{4k_B T}{R_L} \Delta F_{ph}, \quad (4)$$

где k_B – постоянная Больцмана; T – температура по шкале Кельвина; R_L – сопротивление нагрузки.

Среднеквадратическое значение токов суммарных шумов равно[3,4]:

$$\sigma_N^2 = i_N^2 = i_{therm}^2 + i_{dark}^2 + i_n^2. \quad (5)$$

Более полное исследование влияния шумов на сигнал обратного рассеяния для конкретных ЛФД в системы РВОДТР было проведено в статье [6].

Помимо анализа основных шумов для достижения поставленной цели необходимо вывести соотношение ОСШ для РВОДТР, так как этот параметр, по которому можно судить о преобладании того или иного типа шума, также он в значительной степени влияет на метрологические характеристики системы РВОДТР.

Помехозащищенность, полезного электрического сигнала от зашумленного на выходе ФПУ определяется ОСШ, которое представляется в виде

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_N^2} = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2. \quad (6)$$

Важной характеристикой ФПУ является величина ОСШ на выходном сопротивлении нагрузки, определяемая как [1]. Из соотношения (7) можно определить преобладание шумов ФПУ одних перед другими. Так, график функции при двух различных предельных значениях показан на рис. 2.

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_N^2} = \frac{\left(\frac{\eta e P_s}{h\nu_0}\right)^2}{\left(\frac{2\eta e^2}{h\nu_0}\right)(P_s + P_B)\Delta F_{opt} + 2e i_{d} \Delta F_{opt} + \left(\frac{4k_B T}{R_L}\right)\Delta F_{opt} + \left(\alpha \frac{\eta e P_s}{h\nu_0}\right)^2} \cdot (7)$$

где η – вероятность того, что под воздействием фотона с энергией $h\nu_0$ в приемнике образуется электрон e ; λ_0 – длина волны свободного пространства; h – постоянная Планка; P_s – оптическая мощность падающего луча; P_B – мощность фонового излучения; ΔF_{opt} – ширина полосы пропускания фотодиода; α – коэффициент амплитудного шума.

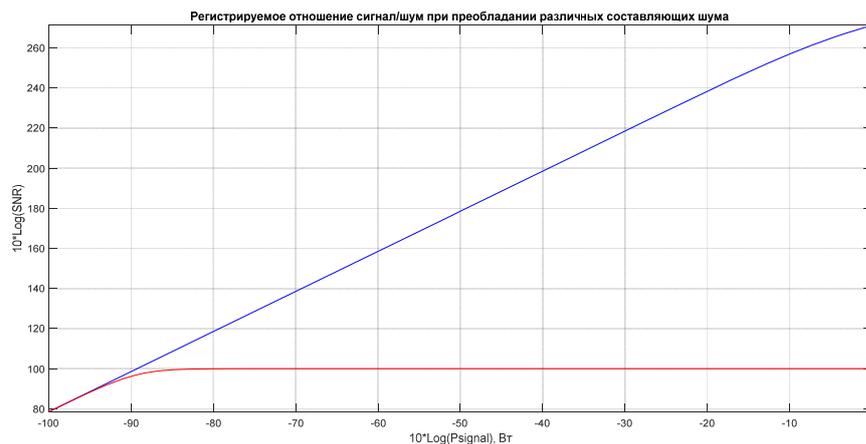


Рис.2 – ОСШ при преобладании различных составляющих шума

В этом случае предполагается, что длина волны 820 нм при $\eta = 0,8$, $\Delta F_{opt} = 1$, $P_B = 0$, $i_{dark} = 70$ нА и $R_L = 1$ кОм и др. данные по умолчанию, выставленные в модели [2]. На рисунке представлены два графика, один при α , равном нулю, и другой при $\alpha = 10^{-6}$. При очень низких уровнях мощности преувалирует вклад теплового шума (постоянный для данной мощности сигнала). В этой области ОСШ возрастает как квадрат регистрируемой оптической мощности (рис.2, где показана линия от -100 до -90 дБ на оси абсцисс). Однако при $P_s \sim 0,001$ мкВт уже начинает доминировать вклад или

амплитудного, или дробового шума. В первом случае ОСШ продолжает возрастать, но уже пропорционально величине оптического сигнала, а не ее квадрату (рис.2, где показана синяя линия по оси абсцисс от -90 до 0 дБ). В случае доминирования амплитудного шума увеличение мощности оптического излучения, падающего на ФПУ, не приводит более к улучшению ОСШ, поскольку любое увеличение оптической мощности влечет за собой соответствующее увеличение шума, поэтому, ОСШ остается постоянным (рис.2, где показана красная линия по оси абсцисс от -90 до 0 дБ).

Рассматривая ОСШ РВОДТР, в нашем случае ФПУ – это ЛФД, выражение (7) будет таким

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_N^2} = \frac{\left(\frac{\eta e P_s}{h\nu_0}\right)^2}{\left(\frac{2\eta e^2}{h\nu_0}\right)(P_s + P_B)\Delta F_{opt} + 2e i_d M^2 F(M)\Delta F_{opt} + \left(\frac{4k_B T}{R_L}\right)\Delta F_{opt}}. \quad (8)$$

Здесь в (8) пропущен член, связанный с амплитудным шумом. Существует два отличия. Во-первых, любой ток, генерируемый в процессе детектирования, умножается на коэффициент усиления ЛФД – M . Во-вторых, лавинный процесс усиления вдобавок увеличивает вклад шума за счет параметра $F(M)$, на который умножается постоянный ток. Параметр $F(M)$ может колебаться от 1 до M в зависимости от используемого материала проводника и величины M [1].

Моделирование шумов ЛФД в РВОДТР

Известно, что биномиальное распределение, как и распределение Пуассона, в случае больших значений n переходит в нормальное распределение. Когда $\sigma^2 = \bar{n}$, где \bar{n} – средняя (большая) частота больших

значений (как это имеет место для распределения Пуассона), то нормальное распределение называют распределением Гаусса [5].

В оптических системах связи при расчете ОСШ полагают, что все источники шумов имеют нормальное (гауссово) распределение плотности вероятности, а шумы от разных источников аддитивны [5]. Это необходимо учитывать при моделировании шумов ЛФД.

Моделирование сенсорных систем с заданными параметрами очень популярно и активно используется в работах [7-9]. Моделирование шумов ЛФД с помощью модели РВОДТР проводилось в среде моделирования MATLAB. Результаты моделирования шума ЛФД можно увидеть на рис. 3-4.

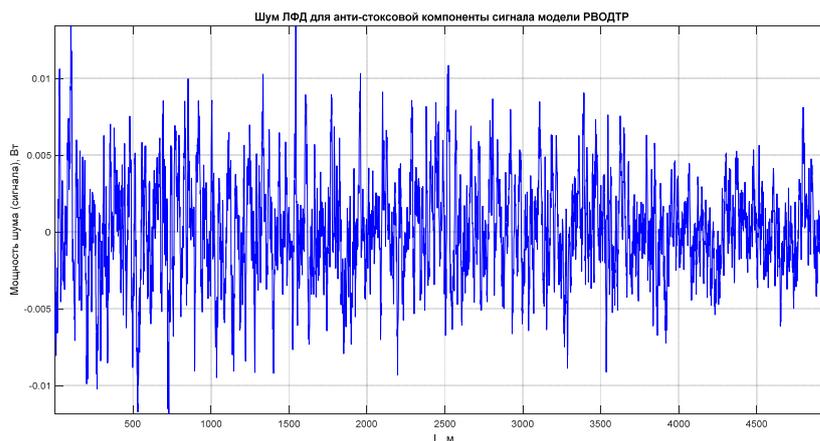


Рис.3 – Зашумленный сигнал только с анти-стоксовой компонентой

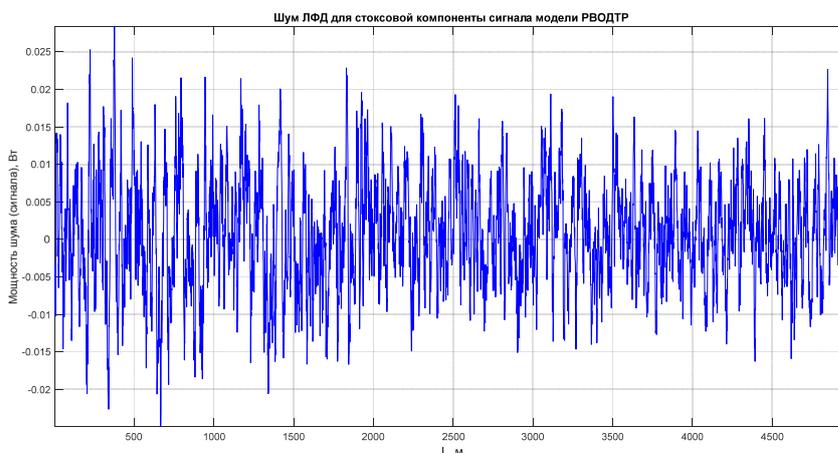


Рис.4 – Зашумленный сигнал только со стоксовой компонентой

Если предположить, что будет проведена статистическая обработка этих шумов (рис.3-4), то можно сказать, что шумы подчиняется гауссову закону распределения мощности сигнала обратного рассеяния РВОДТР [10]; по результатам моделирования видно, что преобладающим из шумов является дробовой шум, который имеет распределение Пуассона [5]. А так как значения n велики, то распределение Пуассона становится нормальным.

Заключение

Таким образом, шумы ЛФД сильно искажают сигнал РВОДТР, оценить их влияние возможно с помощью полного анализа ОСШ. Из приведенных результатов моделирования видно, что шумы позволяют нам определить, как необходимо выставлять параметры сигнала, чтобы сигнал не потерялся в шумах ЛФД, а также – что распределение дробового шума при больших n переходит в нормальное, а сами шумы являются доминирующими. Способы минимизации влияния дробовых шумов подробно изложены в работах [11-16], в которых информационный сигнал переносится в область с минимальным влиянием токовых и дробовых шумов. Однако, все они предназначены для работы с непрерывными лазерами. В этих обстоятельствах, оставляя схему РВОДТР неизменной, можно предложить организовать сбор информации в них аналогично бриллюэновским системам с помощью отдельного зондирующего источника и фильтров на основе ВБР. Подтверждением данному предположению могут явиться работы, посвященные комбинированной рамановско-бриллюэновско-рэлеевской внутрискважинной телеметрии [17-20].

Литература

1. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.

2. Хазиев И.Л., Дашков М.В. Модель распределённого волоконно-оптического датчика температуры // XXIV Российская НТК ППС ПГУТИ. – Самара, 2017. С. 15.
 3. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Сайрус Системс, 1999. – 664 с.
 4. Иванов В.И., Адамович Л.В. Волоконно-оптические системы передачи. – Самара: ПГУТИ, 2006. – 72 с.
 5. Войцеховский А.В. и др. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2013. – 560 с.
 6. Farahani M.A. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing // Lightwave Technol. 1999. Vol. 17. pp. 1379-1391.
 7. Сахабутдинов А.Ж. и др. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с пи-сдвигом. Постановка задач моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5002.
 8. Мисбахов Рус.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4343.
 9. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток // Инженерный вестник Дона. 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.
 10. Hashemian H.M., Jin Jiang. Using the noise analysis technique to detect response time problems in the sensing lines of nuclear plant pressure transmitters // Progress in Nuclear Energy. 2010. Vol. 52. pp. 367–373.
-

11. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Dual port MZM based optical comb generator for all-optical microwave photonic device // Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 799202.

12. Natanson O.G., et al. Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures // Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.

13. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application // Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.

14. Morozov O.G. RZ, CS-RZ and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions // Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.

15. Морозов О.Г. и др. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием. Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.

16. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур // Инженерный вестник Дона. 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.

17. Морозов О.Г. и др. Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 10. С. 83-90.

18. Феофилактов С.В., Черепанов Д.А. Перспективы применения комбинированных внутрискважинных волоконно-оптических измерительных систем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 239.

19. Morozov O.G., et al. Software defined down-hole telemetric systems: training course // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9533. P. 953311.

20. Морозов О.Г. и др. Радиопотонные полигармонические системы для исследования контура усиления Мандельштама-Бриллюэна // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3-2. С. 55-61.

References

1. Udd, E. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber optic sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2008. 520 p.

2. Khaziev I.L. XXIV Rossijskaya NTK PPS PGUTI (Proc. of XXIV Russian conference of PSUTI educators and scientists). Samara, 2017. P. 15.

3. Ivanov A.B. Volokonnaya optika: komponenty`, sistemy` peredachi, izmereniya [Fiber optics: components, transmission systems, measurements]. Moscow: Sajrus Systems, 1999. 664 p.

4. Ivanov V. I. Volokonno-opticheskie sistemy` peredachi [Fiber optic transmission systems]. Samara: PSUTI, 2006. 72 p.

5. Voitsekhovskii A.V., et al. Fizicheskie osnovy` poluprovodnikovoj fotoelektroniki [Physical bases of semiconductor photoelectronics]. Tomsk: TSU, 2013. 560 p.

6. Farahani M. A. Lightwave Technol. 1999. Vol. 17. pp. 1379-1391.

7. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

8. Misbakhov Rus.Sh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

9. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.

10. H.M. Hashemian, Jin Jiang. Progress in Nuclear Energy. 2010. Vol. 52. pp. 367–373.



11. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. p. 799202.
12. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
13. Il'In G.I., Morozov O.G., Il'In A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.
14. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
15. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.
16. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
17. Morozov O.G., et al. Nelinejnyj mir. 2014. Vol. 12. no. 10. pp. 83-90.
18. Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 4. C. 239.
19. Morozov O.G., et al. Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9533. P. 953311.
20. Morozov O.G., et al. Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2015. Vol. 18. no. 3-2. pp. 55-61.