

Применение метода кодирования зондирующего импульса 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: Современные системы распределенного контроля температуры используются сегодня повсеместно, в частности, в телеметрии нефтяных и газовых скважин. Так при создании для этих целей распределенного волоконно-оптического датчика температуры на основе рассеяния Рамана (РВОДТР) всегда остается актуальной задача улучшения его метрологических характеристик. Они в свою очередь определяются известным отношением ОСШ (отношения сигнала к шуму, SNR от англ. *Signal-to-Noise Ratio*). Для достижения поставленной цели предлагается использовать перспективный метод увеличения ОСШ в РВОДТР, основанный на кодировании зондирующего сигнала датчика кодовыми последовательностями Адамара (симплекс-кодирование). Для этого проводится численный эксперимент по реализации указанного метода кодирования с использованием модели РВОДТР и учетом шумов фотоприемного устройства (ФПУ). В статье приводятся результаты моделирования, подтверждается эффективность метода кодирования и формулируются выводы по результатам моделирования.

Ключевые слова: распределенный волоконно-оптический датчик температуры, рассеяние Рамана, фотоприемное устройство, шум, отношение сигнал-шум, кодирование оптического импульса, код Адамара, симплекс-кодирование.

Введение

Важнейшими метрологическими характеристиками систем распределенного контроля температуры (РВОДТР, DTS от англ. *distributed temperature sensing*) являются пространственное, температурное разрешение и разрешение по дискретизации [1]. В свою очередь главный параметр, определяющий температурное и пространственное разрешение в РВОДТР это ОСШ. Следовательно, для повышения температурного и пространственного разрешения необходимо уменьшить уровень шума в оцифрованном сигнале. Только после этого можно проводить дальнейшую обработку сигнала для нахождения значения измеренной температуры и дистанции, на которой происходит изменение температуры [2].

Широко известно, что уменьшить уровень шума до оцифровки сигнала

не представляется возможным, поэтому предлагаются самые разные варианты увеличения ОСШ, однако они имеют ряд ограничений: увеличение мощности зондирующего импульса приводит к росту нелинейных эффектов; увеличение длительности импульса зонда улучшает ОСШ сигнала и соответственно улучшает динамический диапазон, но ухудшает пространственное разрешение рефлектометра; увеличение количества усреднений не обходится без временных затрат.

Предпринимаются различные меры по улучшению ОСШ, например, методы фильтрации и обработки сигналов, их результаты описаны в работе [3], и методы DTS этому не исключение [4, 5].

Поэтому актуальной задачей для моделирования РВОДТР становится поиск такого подхода, с помощью которого можно достичь «компромисса» между температурным разрешением и пространственной разрешающей способностью.

Численный эксперимент по реализации метода симплекс-кодирования в рамановском волоконно-оптическом датчике температуры

Одним из таких подходов, который позволяет уменьшить ОСШ для измеряемого сигнала, является кодирование посылаемого в волоконную линию сигнала с последующим декодированием сигнала обратного (рамановского) рассеяния. Существует множество различных техник кодирования, но наиболее распространена, так называемая, техника симплекс-кодирования [6-8].

Симплекс-кодирование основано на кодах Адамара, которые относятся к локально декодируемым кодам (коды исправляющие ошибки). Суть кодирования с помощью кодов Адамара заключается в равномерном «размазывании» закодированной информации по всем кодовым словам.

Таким образом, слово, закодированное локально декодируемым кодом, можно восстановить при потере значительной части закодированных данных.

Для того чтобы показать, как реализуется метод симплекс-кодирования на кодах Адамара, проводится численный эксперимент для следующих 2 случаев:

- без кодирования оптического импульса;
- с кодированием зондирующего импульса кодовыми последовательностями – симплекс-кодами.

Исходными данными для эксперимента послужили характеристики и параметры из реальной схемы OTDR, а также готовая модель ОБ [9].

Алгоритм работы эксперимента последовательно изложен на рис. 1.

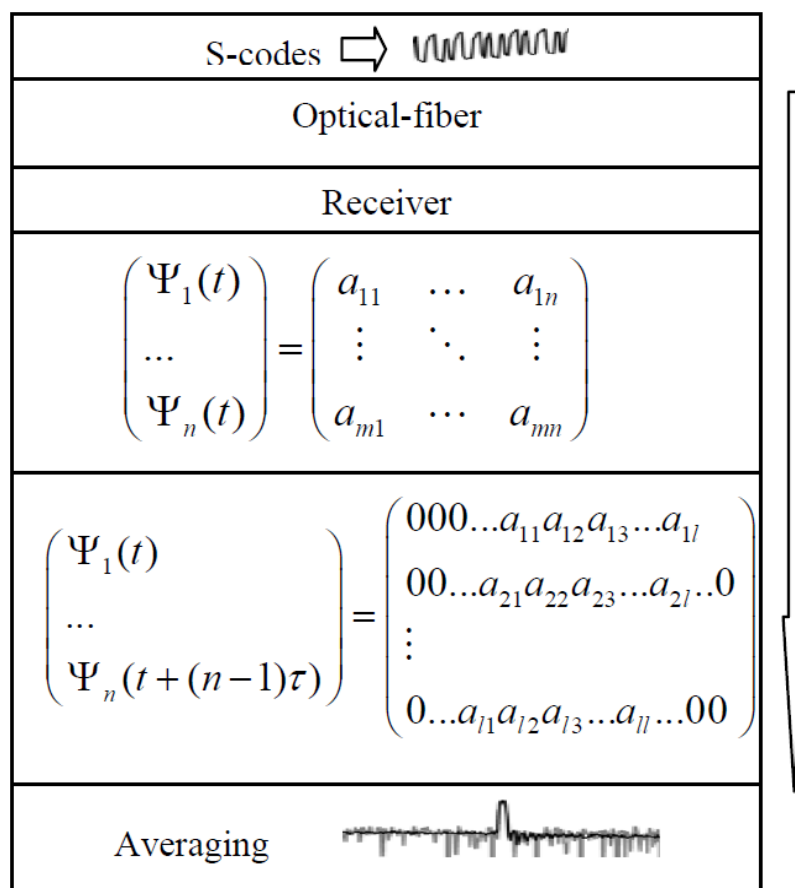


Рис. 1. – Алгоритм численного эксперимента: формирование симплекс-кодов (S-codes), ввод оптического излучения в ОБ (Optical-fiber), прием ФПУ (Receiver), усреднение результатов (Averaging) [5]

Так, численное моделирование проводилось для участка оптического волокна, находящегося при температуре 20⁰С. Согласно описанной выше математической модели формировались сигналы стоксовой и антистоксовой компоненты и на основе их отношения определялась температура. Шумы фотоприемного устройства моделировались белым гауссовым шумом с характеристиками [10].

Моделирование производилось для случая зондирования стандартным сигналом (одиночный импульс) и при использовании симплекс кода различной длины. Для обеспечения одинаковых условий усреднение для случая стандартного сигнала выбиралась эквивалентной количеству импульсов в одном кодовом слове симплекс метода.

В результате оценивалась погрешность измерения температура по критерию 2σ . Результаты численного эксперимента приведены на рис. 2-4.

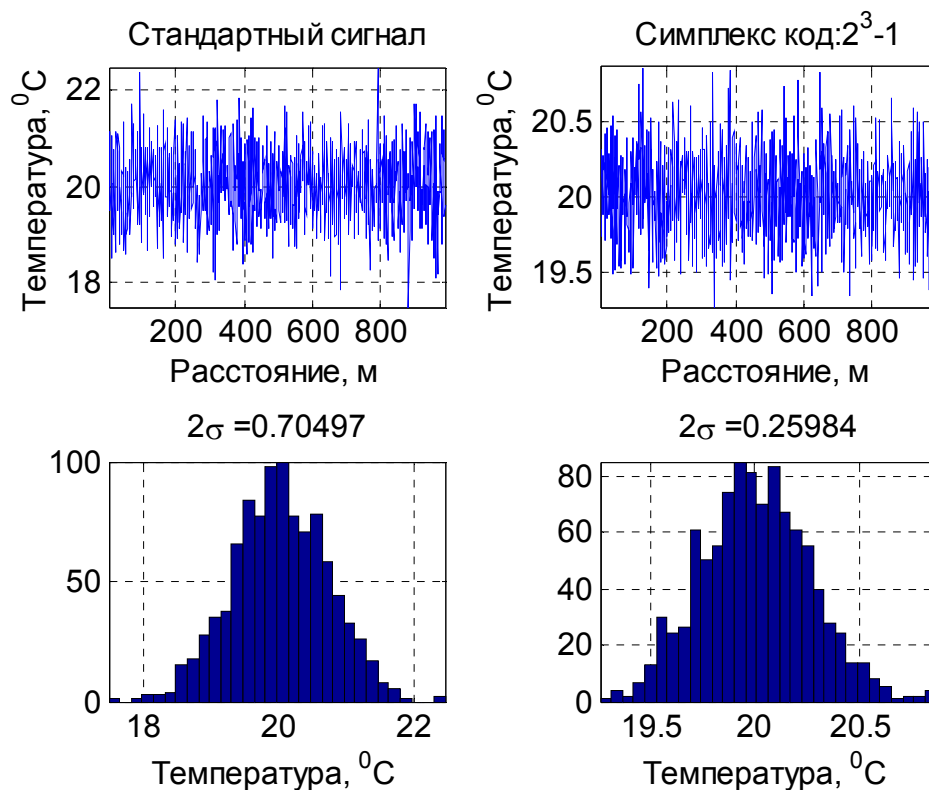


Рис. 2. – Результаты измерения температуры при использовании стандартного сигнала и симплекс-кода с $N = 7$

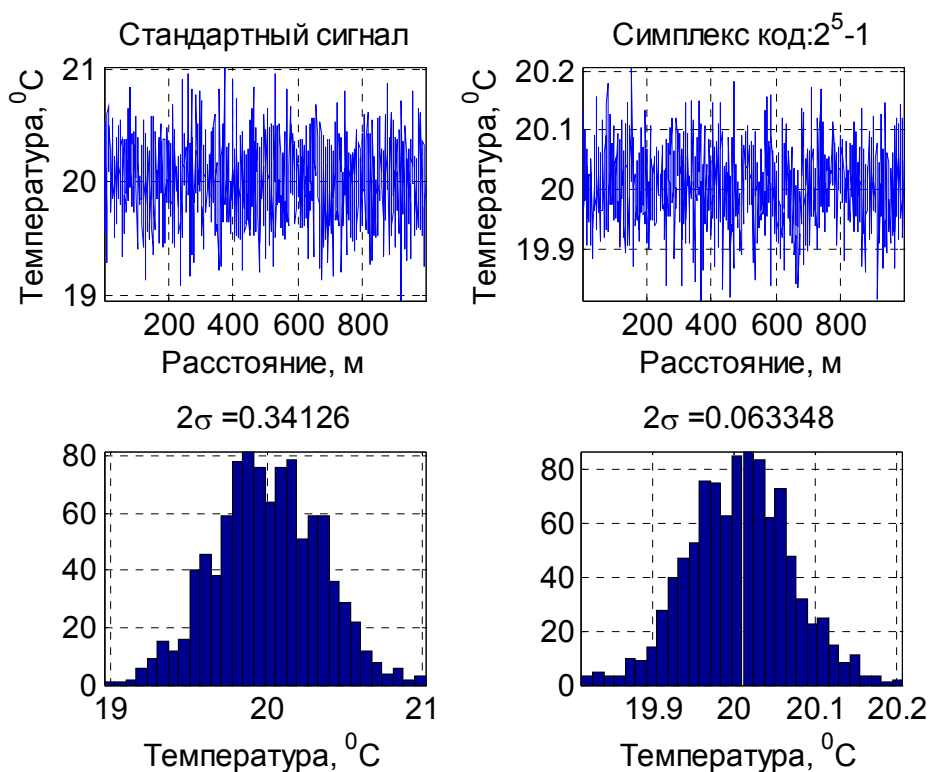


Рис. 3. – Результаты измерения температуры при использовании стандартного сигнала и симплекс-кода с $N = 31$

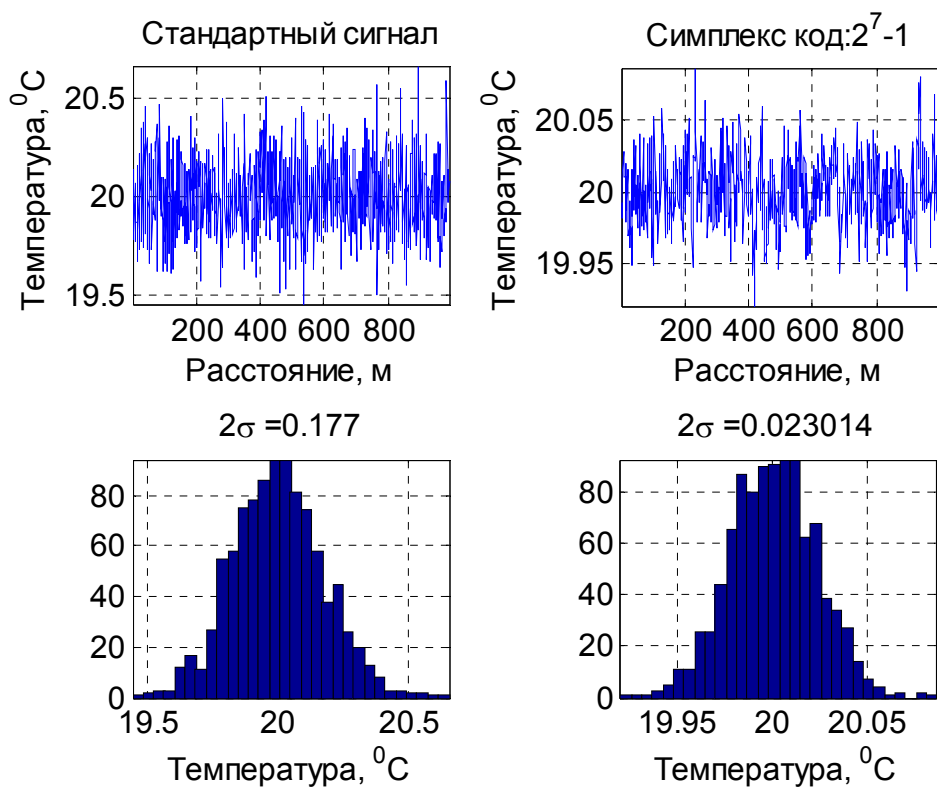


Рис. 4. – Результаты измерения температуры при использовании стандартного сигнала и симплекс-кода с $N = 127$

Зависимости погрешности измерения температуры, полученные в результате численного моделирования, и кодового усиления от длины используемой кодовой последовательности представлены на рис. 5-6.

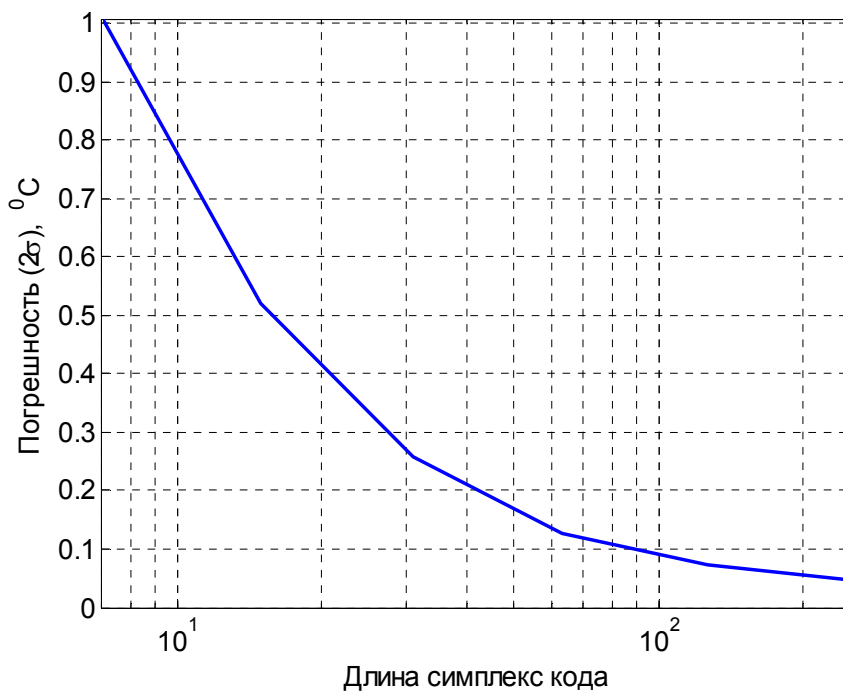


Рис. 5. – Зависимость погрешности измерения температуры от длины кодового слова

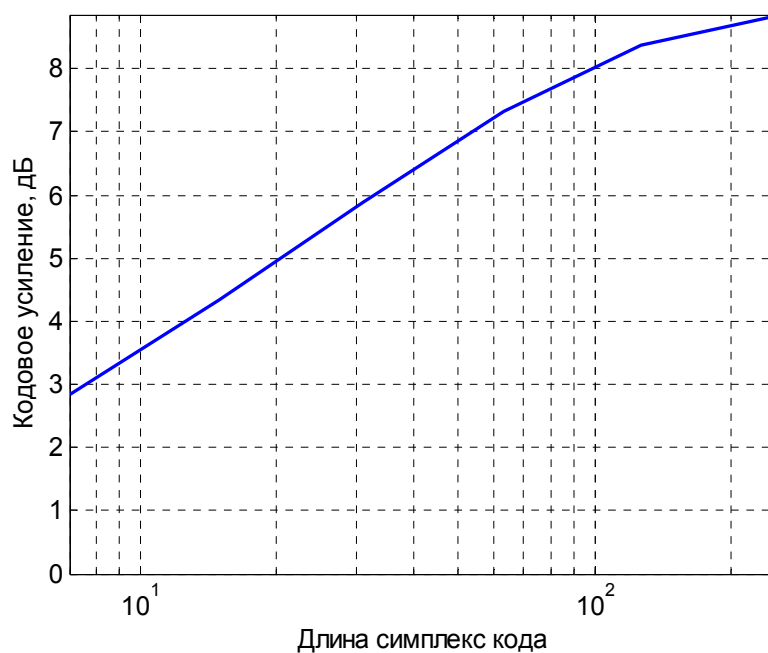


Рис. 6. – Зависимость кодового усиления от длины кодового слова

Из рис. 5-6 виден существенный выигрыш в метрологических характеристиках при увеличении кодового слова.

В дальнейших исследованиях предложено использовать сложную структуру считывания рамановского спектра за счет формирования адресных фильтров [5, 11], использования двухчастотных симметричных или трехчастотных ассиметричных методов зондирования широкополосных рамановских компонент [4, 12-16] и ортогональных дискретных вытянутых сфероидальных функций Слепяна для кодирования импульсов зондирования в РВОДТР [17]. Указанные меры могут привести к увеличению ОСШ измерений.

Заключение

Таким образом, из приведенных результатов моделирования видно, что эффективность метода симплекс-кодирования с использованием кодов Адамара во многом зависит от длины кодового слова. Результаты дают значительные улучшения ОСШ и уменьшения погрешности измеряемой температуры на участках локализации (нагрева). Предложены новые методы кодирования, фильтрации и считывания кодированной информации, ранее не применявшиеся в технике РВОДТР.

Литература

1. Bolognini G. Hartog A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications // Optical Fiber Technology. 2013. Vol. 19. No. 6. pp. 678–688.
2. Fiber optic distributed temperature sensing systems // AP Sensing. URL: sumitomoelectricusa.com/products/fiber-optic-distributed-temperature-sensing-systems.
3. Мисюра В.В., Мисюра И.В. Обработка и фильтрация сигналов. Современное состояние проблемы // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2130.

4. 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.

5. 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.

6. Soto M. A., Taki M., Bolognini G. Simplex-coded BOTDA sensor over 120-km SMF with 1-m spatial resolution // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. Vol. 20. pp. 108-111.

7. Soto M.A. et al. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range // Opt. Lett. 2010. Vol. 2. pp. 259-261.

8. Bolognini G. Performance enhancement of Raman-based distributed temperature sensors using simplex codes // Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. 2006. pp. 1751-1752.

9. Хазиев И.Л., Дашков М.В. Модель распределённого волоконно-оптического датчика температуры // XXIV Российская НТК ППС ПГУТИ. 2018. С. 15.

10. Хазиев И.Л., Дашков М.В., Иванов А.А. Повышение отношения сигнала/шум распределённого волоконно-оптического датчика температуры // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2018». 2018. С. 222.

11. Сахабутдинов А.Ж. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных



брэгговских решеток с π -сдвигом. Результаты моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ magazine/archive/ n2y2018/5004.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Triana A., Pastor D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences // Proc. SPIE. V. 10231. P. 102310H.

References

1. Bolognini G., Hartog A. Optical Fiber Technology. 2013. Vol. 19. No. 6. pp. 678-688.

2. Fiber optic distributed temperature-sensing systems. AP Sensing. URL: sumitomoelectricusa.com/products/fiber-optic-distributed-temperature-sensing-systems.



3. Misiura V.V., Misiura I.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2130.
 4. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №2.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5002.
 5. Misbakhov Rus.Sh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
 6. Soto M. A., Taki M., Bolognini G. IEEE Photon. Technol. Lett. 2012.
Vol. 20. pp. 108-111.
 7. Soto M.A. et al. Opt. Lett. 2010. Vol. 2. pp. 259-261.
 8. Bolognini G. Optical Fiber Communication Conference and the National
Fiber Optic Engineers Conference. 2006. pp. 1751-1752.
 9. Khaziev, I.L. XXIV Rossijskaya NTK PPS PGUTI. 2017. P. 15.
 10. Khaziev, I.L. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya
molodyh uchenyh, aspi-rantov i studentov «Prikladnaya ehlektrodinamika,
fotonika i zhivye sistemy-2018». 2018. P. 222.
 11. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №2.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5004.
 12. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V.
7992. P. 799202.
 13. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
 14. Il'In G.I., Morozov O.G., Il'In A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P.
91560M.
 15. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
 16. Morozov O.G., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4.
URL: [ivdon.ru/magazine/ archive/n4y2017/4587](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587).
 17. Triana A., Pastor D. Proc. SPIE. V. 10231. P. 102310H.
-