

# Оптическая стабилизация усилителей мощности для ВОЛС

**А.Ю.Игуменов**, к.ф.-м.н., доцент МФТИ, инженер-исследователь ООО "Т8" / igumenov.au@mipt.ru,  
**С.Н.Лукиных**, инженер 1-й категории ООО "Т8 НТЦ", инженер МГУ им. М. В.Ломоносова,  
**О.Е.Наний**, д.ф.-м.н., заместитель генерального директора по науке ООО "Т8",  
проф. МГУ им. М. В.Ломоносова,  
**В.Н.Трещиков**, д.т.н., генеральный директор ООО "Т8", с.н.с. Фрязинского филиала ИРЭ  
им. В.А.Котельникова РАН

УДК 535.2, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.118.2.56.61

Исследована возможность оптической стабилизации коэффициента усиления эрбиевого волоконного усилителя с удаленной накачкой (ROPA) и распределенного ВКР-усилителя. Основой рассматриваемых систем оптической стабилизации является активный спектрально-селективный резонатор, генерирующий излучение на одном из не используемых спектральных каналов усилителя. Показано, что для ROPA предложенная система дает возможность поддерживать коэффициент усиления постоянным при изменении температуры, числа и мощности каналов. Для распределенного ВКР-усилителя обеспечивается постоянный коэффициент усиления при изменении числа каналов, постоянная выходная мощность при изменении потерь в линии.

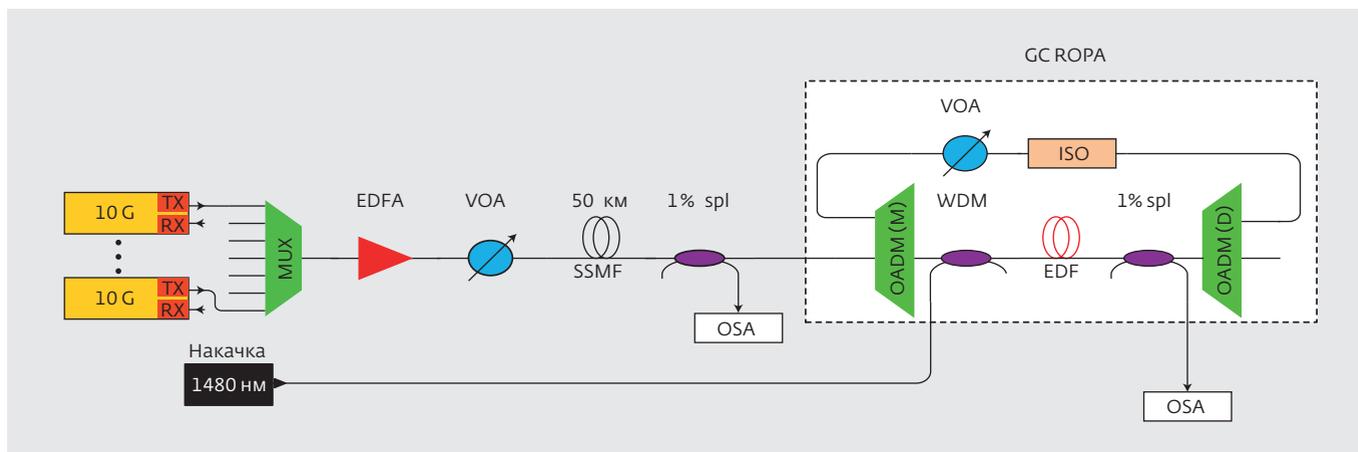
## Введение

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) со спектральным мультиплексированием (DWDM-системы) [1, 2] занимают ключевые позиции в условиях современных высоких требований к скорости, дальности и безопасности передачи данных. Для увеличения дальности работы и пропускной способности ВОЛС необходимы исследования линейных и нелинейных эффектов в оптическом волокне (ОВ), а также усовершенствование каналов образующего и усилительного оборудования.

Наиболее распространены в современных ВОЛС эрбиевые усилители (EDFA) и усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) (рамановские усилители, RAU) [3, 4]. В ходе эксплуатации линии связи количество работающих DWDM-каналов может

изменяться в результате планового их подключения/отключения или аварий на линии. Изменение числа каналов приводит к изменениям коэффициента усиления (КУ), сопровождающимся нежелательными переходными процессами (флуктуациями мощности) [5]. Поэтому для управления этими вариациями КУ необходима стабилизация усиления [6, 7].

Для стабилизации EDFA, размещенного в пункте обслуживания (LocEDFA), используется электрическая упреждающая регулировка [8–10]. В реальных ВОЛС для увеличения максимальной длины пролетов и оптического отношения мощности сигнала к мощности шума совместно с LocEDFA используются усилители с удаленной оптической накачкой (Remote Optically Pumped Amplifier, ROPA). Для функционирования ROPA



**Рис.1.** Схема экспериментальной установки. 10G TX – каналы транспондера; MUX – мультиплексор; EDFA – сосредоточенный эрбиевый усилитель; VOA – переменный аттенюатор; SSMF 50 км – стандартное одномодовое волокно длиной 50 км; 1% spl – оптический сплиттер 1/99%; OSA – анализатор оптического спектра; OADM (M/D) – мультиплексор/демультиплексор ввода/вывода; WDM – спектрально-селективный сплиттер; EDF – оптическое волокно, легированное ионами эрбия; ISO – оптический изолятор; накачка 1480 нм – лазер накачки с длиной волны 1480 нм

не требуется электропитание, и они устанавливаются вне пунктов обслуживания [3, 4, 11–16], что и затрудняет их электрическую стабилизацию. Для таких усилителей используется оптическая стабилизация (ОС) коэффициента усиления, осуществляемая путем создания резонатора на одной из рабочих частот усилителя и достижения в этом резонаторе генерации, которая стабилизирует коэффициент усиления (в англоязычной литературе используется термин All-Optical Gain Clamping, или GC) [17–18].

Возможность использования ОС для стабилизации распределенных ВКР-усилителей исследована значительно меньше. В [19] описано осуществление ОС в распределенном ВКРУ (РспВКРУ) с использованием линейного резонатора, образованного двумя волоконными брэгговскими решетками (ВБР), но отсутствуют подробные исследования его особенностей, таких как искажение спектра КУ каналом генерации и границы применимости в реальных ВОЛС. В [20] рассказано о реализации ОС РспВКРУ на основе линейного резонатора, образованного двумя фарадеевскими зеркалами, проведены спектральные исследования усилителя, работающего в режиме ОС, исследованы различные способы подстройки мощности накачки.

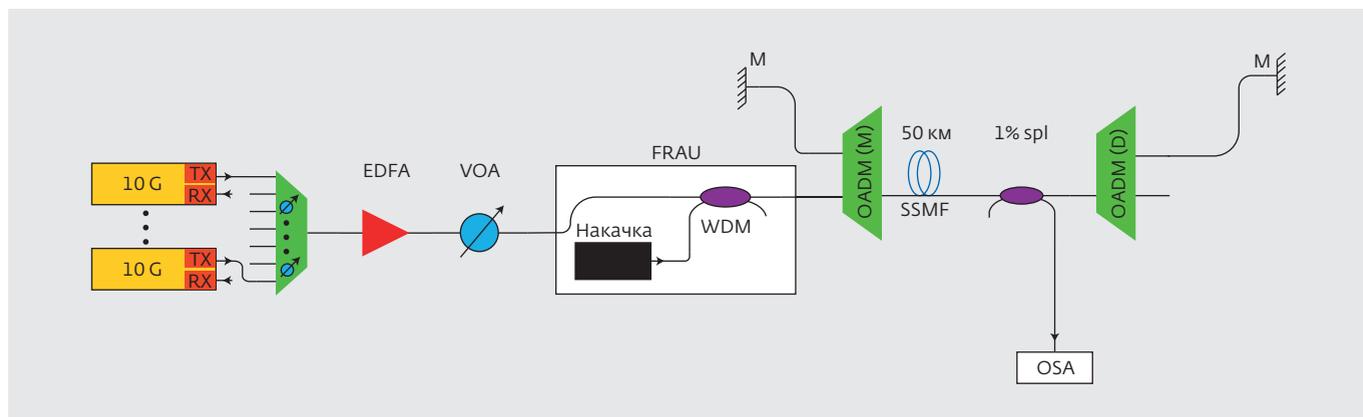
В данной работе проведены исследования систем оптической стабилизации ROPA и распределенного ВКР-усилителя. Показано, что оптическая стабилизация ROPA эффективно подавляет вариации коэффициента усиления рабочих спектральных каналов при изменениях

мощности лазера накачки, полной мощности входного сигнала, температуры активного волокна. ОС распределенного ВКР-усилителя уменьшает неравномерность спектра усиленных сигналов и вариации КУ при изменении мощности лазеров накачки. Предложен алгоритм автоподстройки мощности накачки, позволяющий уменьшить перекося спектра КУ каналом генерации и снизить энергопотребление усилителя.

### Экспериментальная установка

Для реализации оптической стабилизации коэффициента усиления ROPA активное эрбиевое волокно усилителя помещается в резонатор лазера, генерирующего на нерабочей длине волны. Как известно, коэффициент усиления лазера в режиме генерации равен потерям в резонаторе: если на активный элемент лазера подать внешнее излучение на негенерирующей длине волны, то выходная мощность лазера изменится, а коэффициент усиления останется прежним. Лазерное излучение, таким образом, обеспечивает постоянство коэффициента усиления. Уменьшение общей мощности входящего оптического сигнала автоматически компенсируется увеличением лазерной мощности и наоборот.

Стенды по исследованию оптической стабилизации собраны на основе DWDM-платформы "Волга" производства компании "Т8". В экспериментах по ОС ROPA (см. рис.1) в качестве источников излучения использовались каналы транспондера 21–26 стандартизированной Международным союзом электросвязи (МСЭ) сетки



**Рис.2.** Схема экспериментальной установки. 10G TX – DWDM-передатчики; MUX – мультиплексор; EDFA – сосредоточенный эрбиевый усилитель; VOA – переменный аттенюатор; FRAU – блок накачки ВКР-усилителя (ВКРУ), содержащий лазер накачки с устройством попутного (со-направленного с сигналом) ввода излучения накачки в волоконную линию; М – фарадеевские зеркала; SSMF 50 км – стандартное одномодовое волокно длиной 50 км; 1% spl – оптический сплиттер 1/99%; OSA – анализатор оптического спектра; OADM (M/D) – мультиплексор/демультиплексор ввода/вывода; WDM – спектрально-селективный сплиттер

частот [21] с длинами волн 1560,61; 1559,79; 1558,98; 1558,17; 1557,36; 1556,56 нм. Каналы транспондера TP объединяются мультиплексором WDM и через EDFA подаются в линию. После прохождения 50 км оптического волокна SMF-28 сигнал поступает в ROPA. В качестве источника накачки ROPA используется лазер с длиной волны 1480 нм, излучение которого подводится по дополнительному волокну с целью исключения ВКР-усиления сигнала. Лазер, стабилизирующий коэффициент усиления EDFA, работает на длине волны 1561,42 нм (канал 20). Кольцевой резонатор, создающий селективную обратную связь, образован парой мультиплексоров ввода/вывода (OADM), соединенных пассивным участком и активным участком, содержащим EDF. Пассивный участок кольцевого резонатора содержит изолятор, пропускающий излучение в сторону первого OADM, и аттенюатор EXFO LTB8 для варьирования потерь в резонаторе. Для визуализации спектра излучения использовался анализатор оптического спектра (Optical Spectrum Analyzer, OSA) Anritsu MS9740A при его подключении после катушки ОБ (входной сигнал) и между активным волокном и вторым OADM (спектр усиленного сигнала и канала генерации).

При мощности накачки EDFA, обеспечивающей превышение порогового коэффициента усиления, запускается генерация на длине волны неиспользуемого канала. В результате КУ EDFA на частоте генерации лазера стабилизируется на пороговом значении,

определяемом потерями в резонаторе. Это позволяет управлять КУ с помощью переменного аттенюатора.

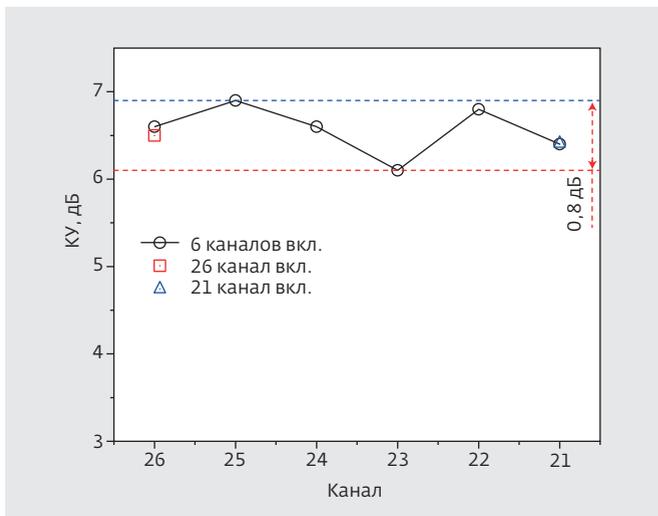
Для осуществления оптической стабилизации коэффициента усиления распределенного ВКР-усилителя при помощи фарадеевских зеркал М создается линейный резонатор (рис.2). Потери мощности при отражении от зеркал составляют 0,2 дБ, потери мощности на мультиплексоре, OADM (M), и демультиплексоре, OADM (D), ввода-вывода – 1 дБ. Использование широкополосного зеркала обеспечивает возможность выбрать длину волны генерации с помощью OADM.

При усилении распределенного ВКР-усилителя, превышающем потери резонатора, возникает генерация на резонансной частоте, задаваемой мультиплексорами ввода-вывода (OADM (M)/OADM (D)).

## Результаты экспериментов

### Оптическая стабилизация ROPA

Зависимость коэффициента усиления ROPA от входной мощности исследовалась путем выключения нескольких каналов и контролем мощности оставшихся. Мощность входного сигнала в этом эксперименте изменялась от 1,6 до 9,9 дБм, потери в аттенюаторе устанавливались равными 4 дБ, при этом порог генерации не превышал 21,5 дБм. На рис.3 приведены КУ каналов в схеме с оптической стабилизацией, когда включены все шесть каналов или только один. Мощность накачки была установлена на уровне 24,9 дБм, варьируемые потери в аттенюаторе – 4 дБ.



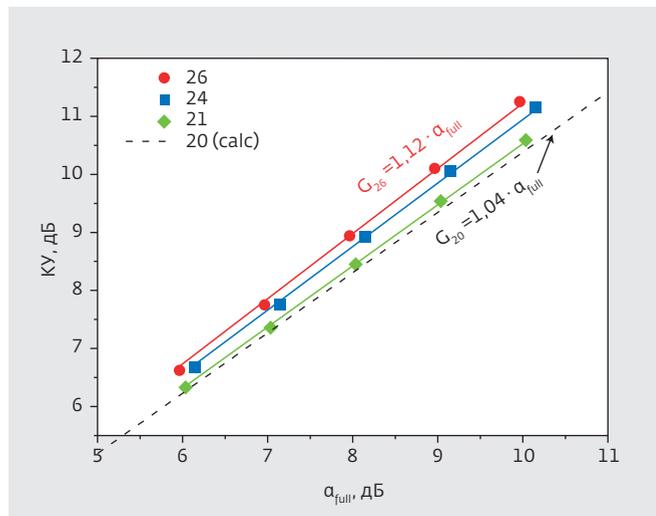
**Рис.3.** Спектр коэффициентов усиления ROPA в режиме ОС при отключении каналов

Из рис.3 видно, что при выключении пяти из шести каналов и уменьшении полной входной мощности более чем на 8 дБ, КУ оставшегося канала практически не изменяется. Таким образом, ОС эффективно стабилизирует коэффициенты усиления отдельных каналов при изменении входной мощности. При отключении пяти из шести каналов суммарная мощность сигнальных каналов и канала генерации сохраняется: входная мощность падает на 8,1 мВт, а мощность канала генерации увеличивается на 8,2 мВт.

Зависимость коэффициента усиления ROPA от величины полных потерь  $\alpha_{full}$  в резонаторе (суммарные потери переменного аттенюатора (VOA), OADM, изолятора, патч-корда) при генерации на 20 канале показана на рис.4. Мощность накачки была установлена на уровне 24,6 дБм, входная мощность – 12,6 дБм.

Графики на рис.4 аппроксимированы линейной функцией, угловые коэффициенты которой близки к 1, а константы пересечения зафиксированы на значении 0 дБ. Аппроксимирующие функции хорошо ложатся на экспериментальные для всех каналов. Таким образом, зависимости на рис.4 соответствуют ожидаемым зависимостям, проходящим через начало координат, а диапазон подстройки коэффициента усиления определяется возможностью варьирования потерь в резонаторе и может составлять более 10 дБ.

Температурные испытания проведены путем помещения кассеты с активным волокном в промышленную климатическую камеру "тепло-холод-влажность" Еспес SH-662 и варьирования температуры от –40 до 50 °С. Установлено, что коэффициенты

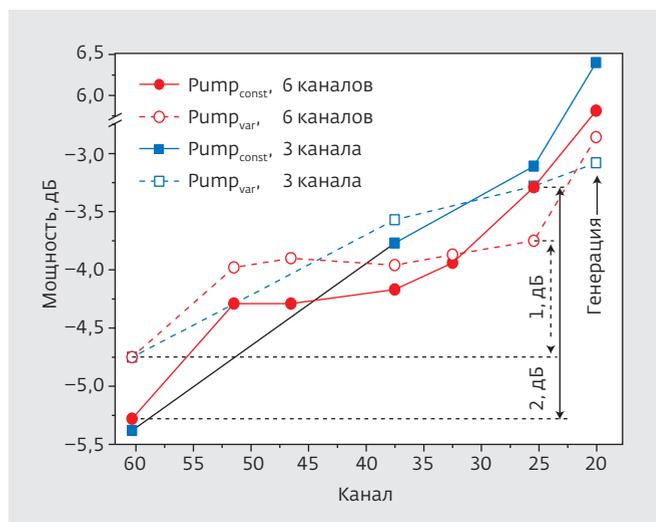


**Рис.4.** Зависимость коэффициента усиления G ROPA от величины полных потерь в резонаторе  $\alpha_{full}$  при генерации на 20-м канале

усиления каналов с учетом погрешности не зависят от температуры активного волокна, в то время как без оптической стабилизации КУ ROPA может варьироваться на десятки дБ при изменении температуры.

**Оптическая стабилизация ВКР-усилителя**

На рис.5 приведены спектры мощностей каналов после прохождения 50 км SSMF (расположение



**Рис.5.** Спектр мощностей сигнальных каналов при включенном ВКР-усилителе.  $Pump_{const}$  – постоянная мощность накачки 27 дБм,  $Pump_{var}$  – режим автоподстройки мощности накачки. Приведены спектры при шести и трех включенных сигнальных каналах, отмечен 20-й канал генерации

**Таблица 1.** Неравномерность спектров сигнальных каналов (дБ) в разных режимах ОС

Режим	6 каналов	3 канала
GS-off	2,3	2,7
GS-on	2,0	2,3
GS-mod	1,0	1,5

OSA, представленное на рис.2) с включенным ВКР-усилителем в режиме ОС.

При отключенной ОС ВКР-усилитель вносит существенный перекося спектра исходного сигнала – 2,3 дБ для шести каналов и 2,7 дБ для трех каналов. Как видно из рис.5, ОС при постоянной мощности накачки ВКР-усилителя уменьшает перекося спектра до 2 дБ для шести каналов и 2,3 дБ для трех каналов.

Для уменьшения искажения спектра мощностей сигнальных каналов каналом генерации предложен алгоритм стабилизации коэффициента усиления РспВКРУ по мощности генерации. В исходную схему добавлен измеритель мощности, на который через оптический сплиттер выводится 1% мощности в канале генерации вблизи первого фарадеевского зеркала. Используя это значение, осуществляется автоматическая подстройка мощности в канале генерации вблизи порогового значения –3 дБм, что в среднем на 1 дБ выше уровня сигнальных каналов. В режиме постоянной мощности накачки  $P_{pump} = 27$  дБм мощность в канале генерации составляла 5,8 и 6,4 дБм при включенных шести и трех каналах, соответственно. На рис.5 спектры мощностей каналов в режиме автоподстройки мощности накачки обозначены  $P_{mp, var}$ .

Для наглядности перекося спектров в разных режимах ОС приведены в табл.1. Режим автоподстройки мощности накачки обозначен GS-mod.

Из табл.1 видно, что в режиме автоподстройки мощности накачки неравномерность спектров уменьшается до 1 дБ для шести каналов и 1,5 дБ для трех. Таким образом, предложенный режим автоподстройки мощности накачки сохраняет преимущества чисто оптической стабилизации КУ, такие как быстродействие и простота оптической схемы. При этом он позволяет уменьшить перекося спектра КУ каналом генерации, а также является более энергоэффективным, чем классический Gain Clamping в силу уменьшения мощности накачки РспВКРУ.

## Заключение

Реализованы системы оптической стабилизации ROPA и РспВКРУ на основе спектрально-селективного резонатора с генерацией на длине волны одного из неиспользуемых каналов.

Проведенные исследования показали эффективность работы оптической стабилизации ROPA в условиях изменяющейся интегральной мощности входного сигнала, температуры активного волокна. Оптическая стабилизация позволяет уменьшить неравномерность спектра усиления РспВКРУ и вариации КУ при изменении мощности лазеров накачки.

Предложенный алгоритм автоподстройки мощности накачки РспВКРУ позволяет уменьшить перекося спектра КУ каналом генерации и сделать ОС более энергоэффективной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Akasaka Y.** et al. Hybrid Amplification Approach Towards Wideband Optical Communications // J. Lightwave Technol. 2023. Vol. 41. No. 3. PP. 815–821.
2. **Wang Y.** et al. Ultra-Broadband Bismuth-Doped Fiber Amplifier Covering a 115-nm Bandwidth in the O and E Bands // J. Light Technol. 2021. Vol. 39. No. 3. PP. 795–800.
3. **Конышев В.А.** и др. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 12. С. 1102–1113.
4. **Леонов А.В.** и др. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. № 1. С. 27–50.
5. **Sun Y.** et al. Fast power transients in WDM optical networks with cascaded EDFAs // Electron. Lett. 1997. Vol. 33. No. 4. PP. 313–314.
6. **Bakar A.A.A.** et al. Single-stage gain-clamped L-band EDFA with C-band ASE saturating tone // Laser Physics. 2009. Vol. 19. No. 5. PP. 1026–1029.
7. **Aozasa S.** et al. Novel Gain Spectrum Control Method Employing Gain Clamping and Pump Power Adjustment in Thulium-Doped Fiber Amplifier // J. Lightwave Technol. 2008. Vol. 26. No. 10. PP. 1274–1281.
8. **Vijayakumar N.** et al. A feed forward method for stabilizing the gain and output power of an erbium-doped fiber amplifier // Microwave Opt. Technol. Lett. 2009. Vol. 51. PP. 2156–2160.
9. **Bianciotto A.** et al. EDFA gain transients: experimental demonstration of a low cost electronic control // IEEE Photonics Technol. Lett. 2003. Vol. 15. PP. 1351–1353.

10. **Dung J.** et al. Gain stability in a distributed Raman amplifier for a wavelength-division multiplexing system // Optical Engineering. 2010. Vol. 49. No. 4. P. 045003.
11. **Ahuja B.** et al. Statistical Analysis for Semiconductor Optical Amplifier for 16×10Gbps and 8×10Gbps DWDM Transmission Systems having In-line Compensating Fiber // International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering. 2020. Vol. 10. No 7. PP. 265–272.
12. **Mustafa F.M.** et al. A reduced power budget and enhanced performance in a wdm system: a new fbg apodization function // Opt. Quantum Electron. 2022. Vol. 54. No. 471. PP. 1–15.
13. **Olonkins S.** et al. Investigation of in-line distributed Raman amplifiers with co and counter-propagating pumping schemes // Progress in Electromagnetic Research Symposium, Shanghai, 2016. PP. 3773–3777.
14. **Zhang T.** et al. Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping // IEEE Photonics Technology Letters. 2005. Vol. 17. No. 6. PP. 1175–1177.
15. **Putrina J.** Comparison of discrete and distributed in-line Raman amplifiers in a 16 channel DWDM transmission system // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall, Singapore, 2017. PP. 236–241.
16. **Islam M.N.** Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-systems and Systems. Springer, 2007. 428 p.
17. **Liang T.C.** et al. All-optical gain-clamped L-band erbium-doped fiber amplifier with two feedback-loop lasing wavelengths // Opt. Eng. 2005. Vol. 44. No. 11. P. 115001.
18. **Игуменов А.Ю.** и др. Полностью оптическая стабилизация коэффициента усиления волоконного усилителя с удаленной оптической накачкой // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 6. С. 484–489.
19. **Weil H.** et al. Use of Bragg gratings to achieve gain clamping in distributed fiber Raman amplifiers // Proc. SPIE, Optical Fibers and Passive Components. 2004. Vol. 5279. PP. 73–76.
20. **Игуменов А.Ю.** и др. Оптическая стабилизация распределенного волоконного усилителя на вынужденном комбинационном рассеянии // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 4. С. 652–657.
21. МСЭ-Т. G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en> (дата обращения 14.03.2024).



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:**



Шалимов А.С.

## Случайные процессы

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 142 с.

ISBN 978-5-94836-685-2

**Цена 840 руб.**

Учебное пособие посвящено изучению теоретических и практических вопросов в области теории случайных процессов. Рассмотрены теоретические аспекты законов распределения и моментных функций, преобразования Фурье, корреляционных функций и спектральной плотности случайных процессов, а также линейных и нелинейных преобразований случайных величин. Каждая глава сопровождается примерами решения типовых задач, большая часть которых сосредоточена в последней главе – «Линейные и нелинейные преобразования случайных величин».

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 01.03.04 «Прикладная математика» и 11.03.01 «Радиотехника», а также для аспирантов и инженеров, занимающихся исследованиями в области разработки цифровых фильтров.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru); [sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)