

# Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 681.128.56  
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.129-137

Дата поступления: 03.09.2019  
Дата принятия: 02.10.2019

## Преобразователь чирп→амплитуда на базе эрбиевого волоконно-оптического усилителя для управления радиофотонными системами

И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, Л.З. Янтилина, А.Р. Гизатулин

Уфимский государственный авиационный технический университет  
450008, Российская Федерация, г. Уфа  
ул. К. Маркса, 12

В статье предложен принцип преобразования чирпированного импульсного сигнала в амплитудно-модулированный сигнал (в рамках каждого информационного импульса) на базе волоконно-оптического эрбиевого усилителя. Проанализирована возможность использования традиционных EDFA для данной задачи. Найдены параметры эрбиевой среды усилителя, обеспечивающей указанное преобразование. Выполнена оценка параметров преобразователя.

*Ключевые слова:* радиофотонные системы, чирп, функция изменения мгновенной длины волны излучения, волоконно-оптический усилитель, легирование редкоземельными элементами.

### Введение

В последнее время активно развиваются радиофотонные системы, частным случаем которых являются телекоммуникационные сегменты Radio-over-Fiber (RoF), для которых актуально выполнять управление радиоизлучением фазированной антенной решетки (ФАР). Для того, чтобы не использовать дополнительного канала для управления, т. е. сэкономить телекоммуникационный ресурс, предлагается для управления ФАР (в частности – для настройки формы радиопелестка) задействовать чирпирование оптических информационных импульсов [1]. В таком подходе весомым элементом является преобразователь чирп → амплитуда, который в настоящее время (в явном виде) не представлен ни на телекоммуникационном рынке, ни в литературе. Поэтому в настоящей статье ставится задача разработки метода данного преобразования и оценка параметров выполняющего его преобразователя.

В самом общем случае подобное преобразование может выполняться любым спектрально избирательным устройством. Но при решении рассматриваемой технической задачи следует учесть, что, во-первых, величина смещения  $\Delta\lambda$  – достаточно малая величина, и не должна попадать в соседний  $\lambda$ -канал xWDM. Во-вторых, не хотелось бы применять многопроходные (например, многолучевые интерференционные) устройства – ввиду

как возможного искажения чирпа (иными словами – функции изменения мгновенной длины волны излучения или ФИМД-параметра<sup>1</sup>) в них, так и импульсного сигнала (действием интерференции [2; 3]). Кроме того, желательно, чтобы б указанное преобразование выполнялось линейной схемой. Поэтому в качестве такого преобразователя предлагается рассмотреть волоконно-оптический усилитель (ВОУ), основанный на применении ОВ, легированного редкоземельными элементами, например, EDFA, со спектральной характеристикой на рис. 1.

Но использовать в рассматриваемой задаче какую-либо известную модификацию EDFA [2] не представляется возможным главным образом ввиду того, что этот световод в основном совершенствовался на предмет получения широкого плато (полки) характеристики, рис. 1, в рабочей (телекоммуникационной) области длин волн: диапазоны S, C, C+L. Кроме того, в существующих EDFA присутствует эффект характерного изменения амплитудного уровня полки при включении даже одной сигнальной составляющей. Это означает, что преобразование ФИМД → амплитуда при  $\Delta\lambda_{\max} \leq 0,0005$  нм, во-первых, фактически не приведет к обнаружимому изменению амплитуды (в ТС-диапазоне), и, во-вторых, более существенно

<sup>1</sup> В многопроходных устройствах каждая спектральная составляющая может проходить различный путь и, тем самым, приобретать индивидуальный фазовый набег, что не желательно в решаемой задаче

на характеристику преобразования будет сказываться амплитудное значение сигнала, а не значение мгновенной длины волны. Представленная здесь величина  $\Delta\lambda_{\max}$  получена из условия минимального (допустимого) смещения радиочастоты в случае chirпированного оптического сигнала в RoF-сегменте.

Поэтому ставится задача расчета параметров, характеризующих свойства ВОУ, и актуальных для применения последнего в качестве преобразователя ФИМД  $\rightarrow$  амплитуда, основываясь на предположении, что такой световод может быть получен при эрбиевом легировании кварцевого стекла.

### 1. Расчет параметров ВОУ на базе квазистационарной модели EDFA

Итак, требуется обеспечить следующее: 1) минимизацию изменения уровня усиления при изменении амплитуды сигнала, 2) получение физических параметров эрбиевого ВОУ таких, которые для преобразования ФИМД  $\rightarrow$  амплитуда при  $\Delta\lambda_{\max} \leq 0,0005$  нм обеспечат заметное (фиксируемое) для современных считывающих устройств соответствующее обнаружение изменения амплитуды сигнала на выходе ВОУ, и 3) выполнение оценки влияния искажающих факторов (изменений температуры, появление шума ASE).

Для решения первой подзадачи предложено рабочую длину волны (относительно которой и производится ее изменение на  $\Delta\lambda_{\max}$ ) выбрать не произвольной из ТС-диапазона, а установить равной  $\lambda_0 = 1535$  нм. Согласно [4; 5], на этой длине волны сигнала спектр усиления выбранного материала примерно совпадает со спектром сечения испускания при  $P_{980} = 100$  мВт, что в свою очередь означает минимальное изменение коэффициента усиления при небольшом (существенно меньше, чем в режиме насыщения) увеличении мощности сигнала. Это особенно характерно для фтор-содержащих эрбие-иттербиевых волокон [6]. То есть при включении сигнала на этой длине волны блуждание «вверх-вниз» усилительной характеристики минимально.

Следует заметить, что для существующих EDFA на этой длине волны усилительная характеристика, как правило, имеет вид полки. Но в решаемой задаче в этой области надо получить значительный ее наклон, что и обеспечит удовлетворительную спектральную избирательность усиления для ФИМД-сигнала (вторая подзадача).

Сначала исследуем стационарную модель ВОУ типа EDFA, которая описывает изменение мощности сигнала  $P_s$  в зависимости от усредненных во времени параметров среды, а также с учетом изменения мощности накачки  $P_{980}$  и мощности шума ASE [7]:

$$\left\{ \begin{aligned} W_{12}(z) &= \frac{\alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta)}{h\nu_0 \varepsilon} P_s(\lambda, z) + \\ &+ \frac{[P_{ASE}^-(\lambda, z) + P_{ASE}^+(\lambda, z)]}{h\nu_0 \varepsilon} \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta), \\ W_{21}(z) &= \frac{g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta)}{h\nu_0 \varepsilon} P_s(\lambda, z) + \\ &+ \frac{[P_{ASE}^-(\lambda, z) + P_{ASE}^+(\lambda, z)]}{h\nu_0 \varepsilon} \times \\ &\times g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta), \quad \varepsilon = \frac{\pi b_{eff}^2 N}{A_0 z \tau}, \\ R_{12}(z) &= \frac{\alpha_{12}(\lambda_{980}, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta)}{h\nu_{980} \varepsilon} \times \\ &\times P_{980}(\lambda, z), \quad N_1(z) = 1 - N_2(z), \\ N_2(z) &= \frac{W_{12} + R_{12}}{W_{12} + R_{12} + W_{21} + \frac{1}{\tau \Delta\nu}}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

и

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_{980}(z)}{dz} &= -\alpha_{12}(\lambda_{980}, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) \times \\ &\times N_1 P_{980}(z) - \bar{\alpha} P_{980}(z), \\ \frac{dP_{ASE}^\pm(z)}{dz} &= \pm P_{ASE}^\pm(z) \left[ g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) N_2(z) - \right. \\ &- \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) N_1(z) \left. \right] \pm \\ &\pm 2g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) N_2(z) h\nu_{980} \Delta\nu \mp \bar{\alpha}(\lambda) P_{ASE}^\pm(z), \\ \frac{dP_s(\lambda, z)}{dz} &= P_s(\lambda, z) \left[ g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) N_2(z) - \right. \\ &- \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) N_1(z) - \bar{\alpha}(\lambda) \left. \right]. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В (1) и (2) использованы следующие обозначения:  $N$  – общая концентрация ионов эрбия;  $N_1(z)$  и  $N_2(z)$  – относительные концентрации ионов эрбия на уровне 1 и 2 соответственно (по отношению к общей концентрации ионов эрбия);  $z$  – координата вдоль легированного ОВ;  $R_{12}(z)$ ,  $W_{12}(z)$  и  $W_{21}(z)$  – вероятности переходов внешних электронов в атомах эрбия с уровня 1 на уровень 2 (либо – с 2 на 1), вызванные поглощением фотонов накачки, сигнала и шумов ASE;  $\varepsilon$  – параметр насыщения;  $\alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta)$  и  $g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta)$  – коэффициенты поглощения и усиления среды соответствен-

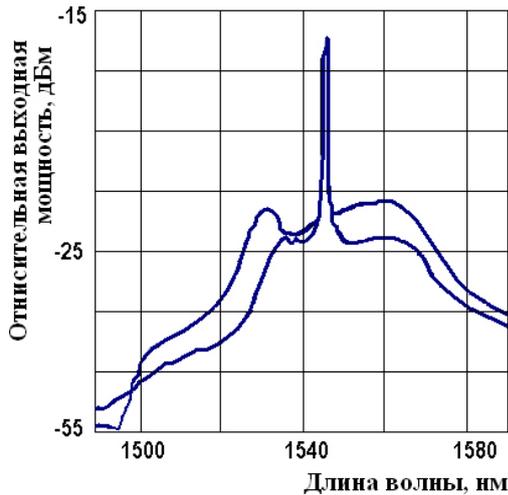


Рис. 1. Амплитудно-спектральная характеристика усилителя EDFA при наличии (нижняя кривая) одной сигнальной несущей и в отсутствии ее (верхняя кривая) [2]

но, определяющиеся средним значением для ВОУ  $\langle N_{2,0} \rangle$ , т. е. возбужденностью среды, зависящим от входного уровня накачки  $P_{980,0}$ , и зависящие от температуры  $\Theta$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) &= \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \infty) \times \\ &\times \exp\left[\frac{v_{12}(\lambda)}{K\Theta}\right]; \\ g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \Theta) &= \\ &= g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \infty) \times \exp\left[\frac{v_{21}(\lambda)}{K\Theta}\right]; \\ \alpha_{12}(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \infty), v_{12}(\lambda), g_{21}^*(\lambda, \langle N_{2,0} \rangle, \infty), v_{21}(\lambda) \end{aligned}$$

– коэффициенты, задаваемые по известным зависимостям перечисленных функций;  $K$  – постоянная Больцмана; символ «\*» означает, что не учитываются переходные процессы внутри квантовомеханической системы (предполагается, что длительность подобных процессов более, чем на порядок меньше, чем длительность импульса сигнала), т. е. модель является стационарной;  $b_{eff}$  – эффективный радиус распределения ионов эрбия;  $A_0$  – эффективная площадь модового пятна распространяющегося в ОВ излучения;  $P_{980}$ ,  $P_{ASE}$  и  $P_s$  – соответственно мощности накачки, шума ASE и сигнала;  $\tilde{\alpha}$  – коэффициент, учитывающий потери излучения, не вызванные поглощением ионами эрбия;  $\tau$  – усредненное время жизни оптического электрона (для иона эрбия) на уровне 2;  $\Delta\nu$  – спектральная ширина полосы сигнала (для  $P_s$ ); знаком  $\pm$  обозначено прямое (сонаправленное) и противоположное (противонаправленное) прохождение  $P_{ASE}$ . При этом предполагается, что  $P_{980}$  и  $P_s$  распространяются сонаправленно (общ-

ность модели сохранится и для противонаправленного распространения, изменятся лишь знаки в соответствующих уравнениях системы (2)). Предполагается также, что свойства среды не зависят от направления распространения указанных сигналов. Модель (1), (2) справедлива для ненасыщенного режима работы ВОУ (т. е. свойства среды не зависят от  $P_s$ ), что соответствует рассматриваемой технической задаче.

На базе модели (1), (2) проведено исследование 1): оценка влияния температуры  $\Theta$  на основные параметры эрбиевой среды  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $\alpha_{12}$  и  $g_{21}^*$  и на выходное значение  $P_s(z=L)$ , определяющая необходимость последующего учета температуры при моделировании. В рамках исследования 2) выполнялось нахождение (подбор) таких параметров эрбиевой среды, а также входного значения мощности накачки  $P_{980}$  и длины ВОУ  $L$ , при которых на длине волны входного сигнала  $\lambda_0 = 1535$  нм получалась бы наибольшая крутизна усилительной характеристики в области хотя бы ее среднего усиления. Иными словами, что бы можно было определиться с рабочей точкой такого ВОУ и взять его за основу для преобразователя ФИМД → амплитуда.

Для выполнения расчетов был использован символьный математический симулятор<sup>2</sup> Maple 12. Параметры эрбиевой среды, используемые в качестве изначальных при моделировании, были взяты из материалов [6], основные из которых представлены на рис. 2, и из [7; 8] – для изучения влияния температуры  $\Theta$ . В результате изучения характера зависимостей  $\alpha_{12}(\Theta)$  и  $g_{21}^*(\Theta)$  выяснилось, что при перепадах температур в пределах 200 градусов (расчеты проводились для градусов Кельвина) отличие указанных параметров ВОУ не превосходили 1%. В связи с чем решено было далее параметр  $\Theta$  не учитывать.

Далее, как упоминалось выше, исследовалась форма усилительной характеристики  $G(\lambda)$  в виде обобщенного (интегрального) параметра ВОУ, который предложено было получить из соотношения (справедливого для ненасыщенного режима работы ВОУ):

$$\left\langle \frac{dP_s(z, \lambda)}{dz} \right\rangle \Big|_{0 \leq z \leq L} = P_s(z=0, \lambda) G(\lambda). \quad (3)$$

Параметр  $G$  может быть определен из (3) после того, как найдена величина  $P_s$  в результате ре-

<sup>2</sup> Данный симулятор предоставляется после регистрации студентам и аспирантам в режиме демонстрационной версии бесплатно сроком на 4 недели; <http://www.maplesoft.com/>

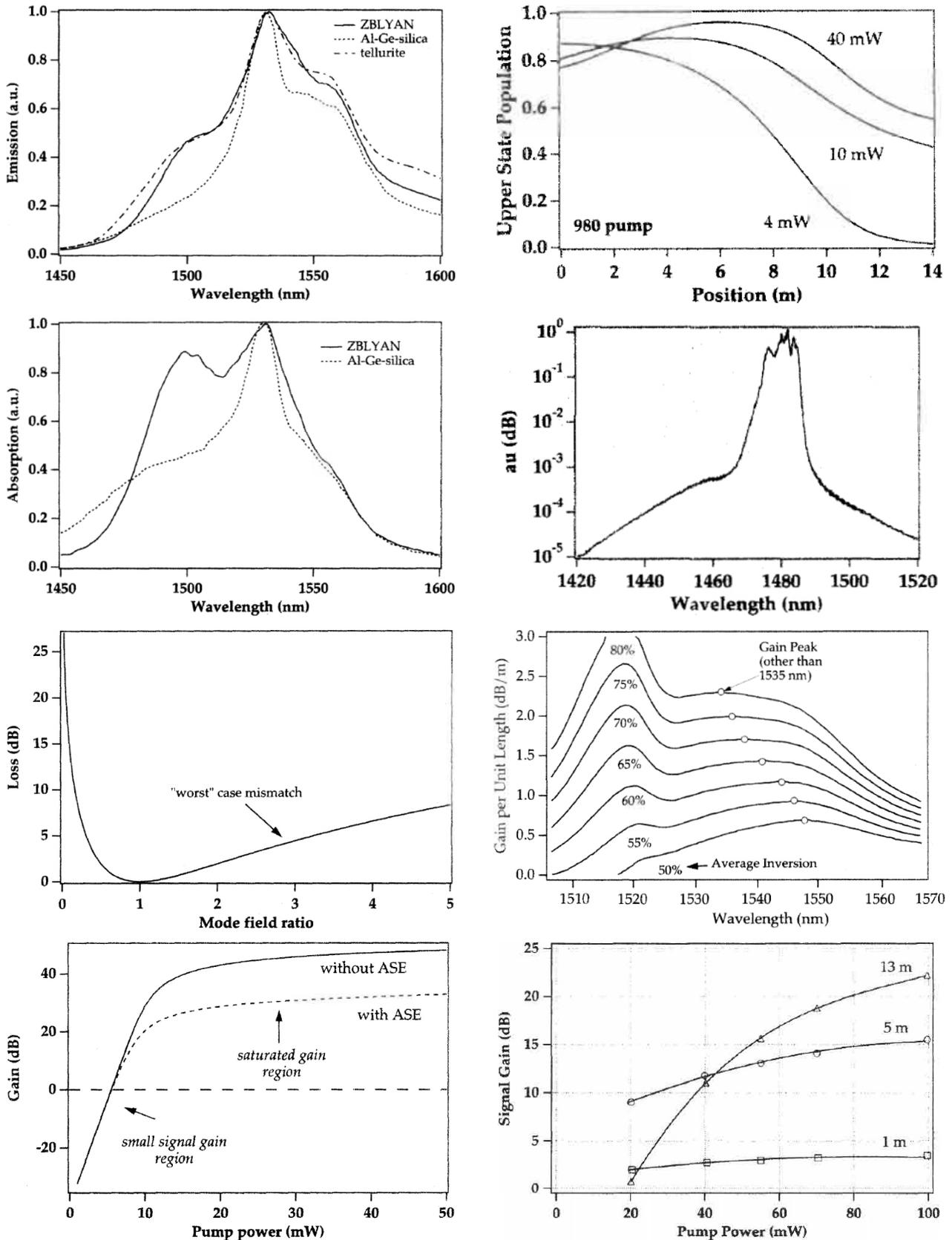
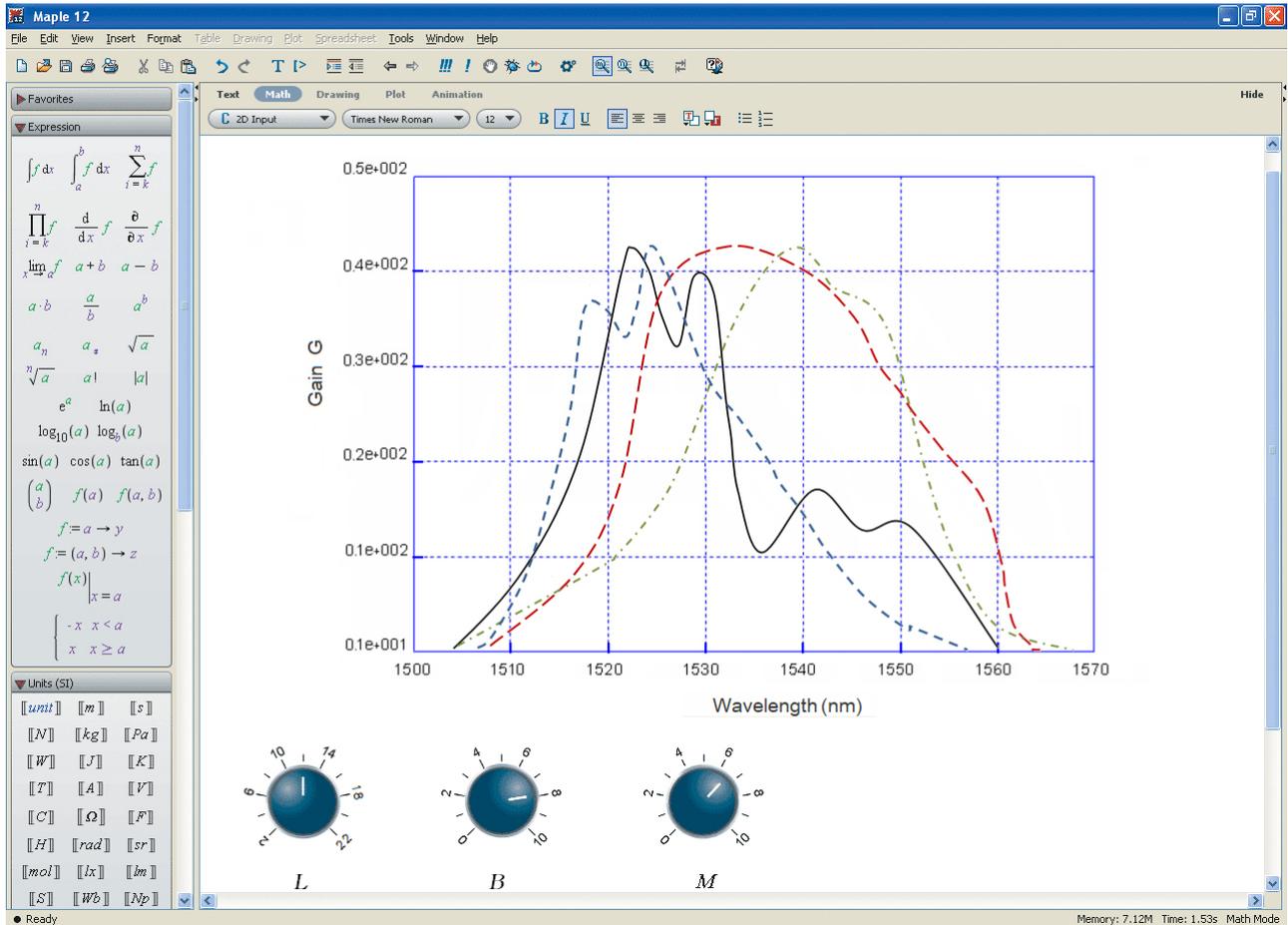


Рис. 2. Параметры эрбиевых оптоволокон [6], принятые в расчетах

шения (1) и (2). Поэтому в расчетах было принято:  $P_{s,0} = 1$  мВт. Кроме того,  $P_{ASE,0}$  выбиралось в соответствии с данными из [6], и определялось исходя из  $P_{980,0}$ . Кроме того, так как от  $P_{980,0}$  зависит

$\langle N_{2,0} \rangle$ , определяющая в свою очередь коэффициенты в (1) и (2), то расчеты решено было проводить следующим образом: задаться входным значением накачки  $P_{980,0}$ , определить исходя из него (а также



**Рис. 3.** Рассчитанная спектральная зависимость усиления эрбиевых ВОУ с различными параметрами: на рисунке выставлены значения  $L$ ,  $B$  и  $M$  для итоговой кривой (сплошная линия, которая по результатам счета была принята в качестве рабочей точки ВОУ, входящего в основу преобразователя ФИМД → амплитуда). Через  $B$  обозначена величина  $b_{eff}^2/A_0 \cdot 10^7$ ; через  $M$  обозначено  $\langle N_2 \rangle \times 10$ . Широкая пунктирная кривая соответствует случаю  $\langle N_2 \rangle = 0,4$ ; правее от нее -  $\langle N_2 \rangle = 0,3$  при  $L = 15$  м

исходя и из данных, представленных в [6] коэффициенты в (1), (2), далее в результате решения этих систем – найти  $P_s(z)$  и в конечном итоге – определить  $G$  из (3). Изначально для расчетов была принята стандартная накачка  $P_{980,0} = 100$  мВт.

В результате данного исследования выяснилось следующее:  $G(\lambda)$  очень существенно определяется величиной  $\langle N_2 \rangle$ , которая в свою очередь значительно определяется накачкой. Так максимально широкая полка получается при  $\langle N_2 \rangle \cong 0,4$ . При уменьшении  $\langle N_2 \rangle = 0,3$  и меньше, максимум спектра усиления и пологая область смещается в длинноволновую область – на 1550 и на более длинные волны, рис. 3. При этом полка становится узкой (самый правый максимум на рисунке) и уменьшается ее высота (что б сохранить высоту прежней требуется увеличивать накачку или длину  $L$ ). Но на выбранной длине волны (1535 нм) наклон усилительной характеристики в данном случае с желаемой крутизной не получается – кривая остается достаточно полой. А при значительной на-

качке возрастают шумы и потери (которые, кстати, тоже начинают расти уже при  $L > 15$  м). Наоборот, при увеличении  $\langle N_2 \rangle > 0,5$  (вплоть до 0,61...0,63) максимум  $G(\lambda)$  смещается в область коротких длин волн, и крутизна характеристики в желаемой спектральной области растет значительно. На  $\langle N_2 \rangle$  существенно влияет соотношение  $b_{eff}^2/A_0$ . Наиболее подходящий случай, т. е.  $\langle N_2 \rangle = 0,65$  получается при  $b_{eff}^2/A_0 = 8 \cdot 10^{-7}$  м [9; 10].

## 2. Уточнение параметров преобразователя с учетом динамического характера изменения $N_2$

Итак, расположение, ширина и наклон полки корректируется параметрами самого ВОУ (включая его длину) и значением накачки. От значения накачки зависит также и выбираемая длина волны сигнала  $\lambda_0$ . Значение коэффициента усиления  $G$  для данной  $\lambda$  существенно зависит от расположения максимума усиления (в той области, где име-

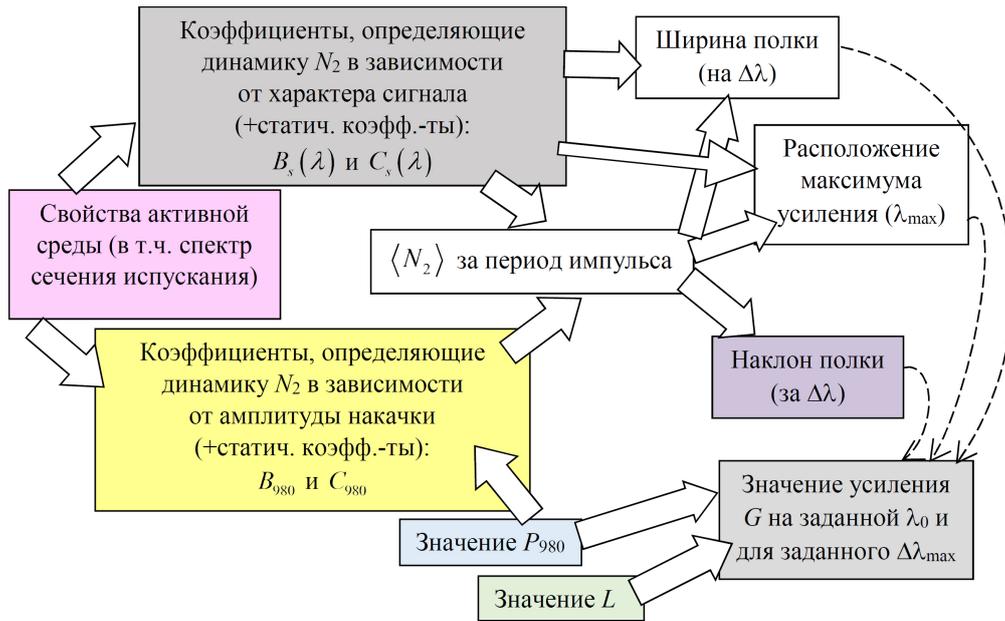


Рис. 4. Взаимосвязь параметров ВОУ в расчетах

ет место минимум или близкое к нему усиление, даже при значительной накачке трудно получить хороший результат) и расположением пологой области (полки) [9; 10].

Поэтому исходя из выполненного пересчета (подбора параметров) решено было остановиться на значениях  $\langle N_2 \rangle = 0,65$ ,  $b_{eff}^2/A_0 = 8 \cdot 10^{-7}$  м,  $P_{980,0} = 110$  мВт (что допустимо в телекоммуникациях [2]),  $L = 12$  м и  $\lambda_0 = 1532$  нм.

Но полученные значения (приведенные выше, которым соответствует сплошная кривая на рис. 3) не позволяли непосредственно ответить на вопрос: каким же будет изменение амплитуды  $\Delta P$  импульсного сигнала (в пределах импульса) при изменении длины волны ФИМД-сигнала на величину  $\Delta\lambda_{\max} = 0,0004 \dots 0,0005$  нм. Одна из причин указанного, по мнению авторов, следующая: модель эрбиевого ВОУ с соотношениями (1), (2) представлена для статического сигнала  $P_s$  (или близкого к статическому), т. е. когда длительность изменения  $P_s$  много больше, чем времена физических процессов, происходящих в системе (рассматриваемом ВОУ). Так, например, параметр  $\tau$  в (1) при проведении расчетов был выбран равным  $10^{-9}$  с [4]<sup>3</sup>, а длительность импульса  $T_0$  в современных абонентских радиоэфирных системах передачи также составляет порядок  $10^{-9}$  с. Поэтому получение значения  $\Delta P$  описанным выше способом (фактически путем подбора параметров ВОУ на базе (1), (2)) не представлялось целесообразным. Решено было воспользоваться симулятором сигналов, прошедших EDFA, таким как GainMaster

FiberCore<sup>4</sup>. Однако для его корректной работы потребовалось задать (кроме статических) динамические параметры усилителя для желаемого режима. Поэтому дополнительно к изученной модели ВОУ совместно с (2) было рассмотрено соотношение для  $N_2$  [11]:

$$\frac{dN_2(z=z_\zeta, t)}{dt} = P_s(\lambda, z=z_\zeta, t) \times \left[ 1 - \exp(B_s(\lambda)N_2(z=z_\zeta, t) - C_s(\lambda)) \right] + P_{980}(z=z_\zeta) \left[ 1 - \exp(B_{980}N_2 - C_{980}) \right] - \frac{N_2(z=z_\zeta, t)}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\zeta$  – номер шага по  $z$  (согласно [11], расчет проводится для каждой точки по длине ВОУ отдельно),  $B_s(\lambda)$ ,  $B_{980}$ ,  $C_s(\lambda)$  и  $C_{980}$  – характеризуют физические динамические свойства ВОУ.

Фактически ставилась задача получения результатов расчета (рис. 3), но с учетом зависимой от времени  $N_2$ . Поэтому в расчетах решено было использовать систему уравнений (2) с учетом соотношений  $N_1(z) = 1 - N_2(z)$  и (3), и с учетом уравнения (4), в котором требовалось в конечном итоге определить коэффициенты  $B_s(\lambda)$ ,  $B_{980}$ ,  $C_s(\lambda)$  и  $C_{980}$ , соответствующие выбранному режиму по рис. 3. Для определенности с коэффициентом  $g_{21}$ , входящим в (2) – решено было его пересчитывать в виде  $g_{21}(\lambda, \langle N_2 \rangle)$  для каждого рассчитанного  $\langle N_2 \rangle$  (находить по таблицам из [4]). Структуру расчетов поясняет рис. 4.

<sup>3</sup> Вообще говоря, согласно указанному источнику информации, значение  $\tau \geq 10^{-9}$  с, и должен выбираться порядка  $10^{-8}$  с

<sup>4</sup> Указанный симулятор распространяется бесплатно после регистрации на сайте <https://www.fibercore.com/product/gainmaster-simulation-tool>

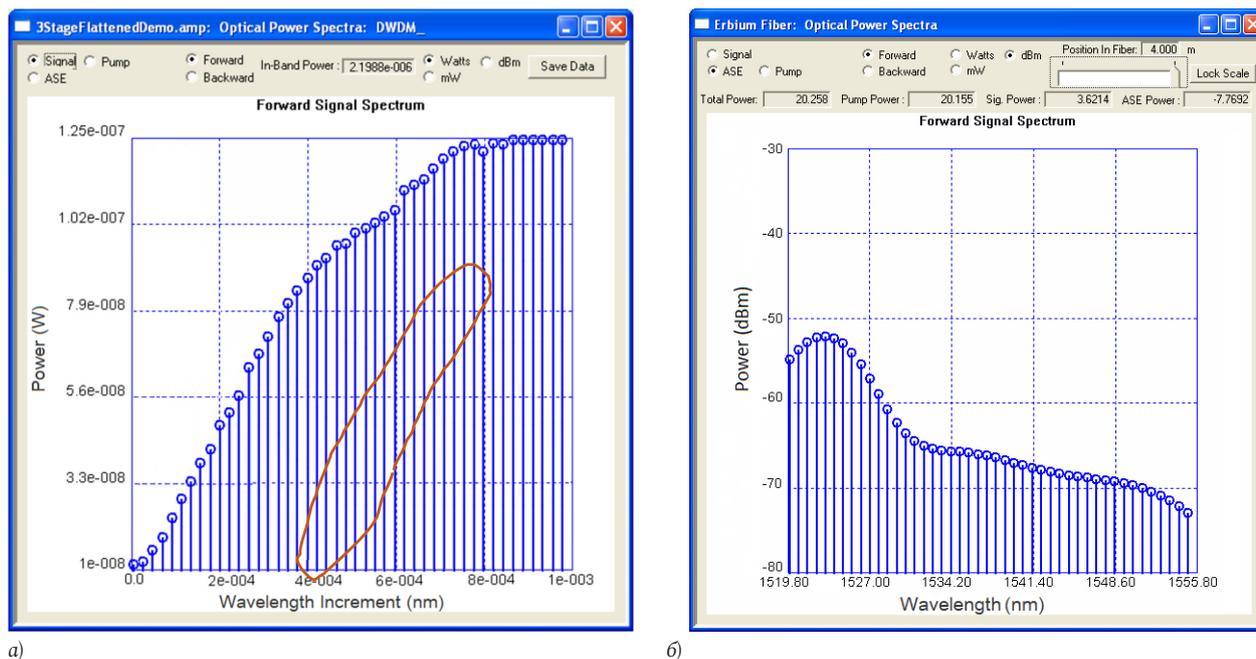


Рис. 5. Результаты симуляции: а) изменение сигнала (кривой очерчена рабочая область); б) значение шума ASE для эрбиевого ВОУ с параметрами, актуальными для создания преобразователя ФИМД → амплитуда

В результате выполнения расчетов с подстройкой параметров системы под  $G(\lambda)$ , соответствующей сплошной кривой на рис. 3, получены значения коэффициентов для  $\lambda = 1532$  нм:  $B_s(\lambda) \cong 4,581$ ,  $B_{980} \cong 2,854$ ,  $C_s(\lambda) \cong 1,45$  и  $C_{980} \cong 0,274$ . Далее все запрашиваемые программным симулятором GainMaster FiberCore параметры эрбиевого ВОУ, а также и параметры сигнала<sup>5</sup> ( $P_{s,0}$ ,  $\lambda_0$ ,  $T_0$  – значение длительности импульса) были задействованы для выполнения симуляции. На рис. 5 представлен результат симуляции – изменение уровня сигнала<sup>6</sup> для значения  $\Delta\lambda$ , актуального при разработке преобразователя ФИМД → амплитуда (а), и значения шума ASE, полученного для эрбиевого ВОУ с заданными параметрами (включая накачку на входе ВОУ), который может быть применен в

<sup>5</sup> Параметр  $\Delta\lambda_{\max}$ , свойственный рассматриваемому ФИМД-сигналу непосредственно задействовать для расчетов на симуляторе не удалось. Поэтому для корректности отображения результата счета в отношении решаемой задачи было предложено использовать (по оси абсцисс) не значение длины волны излучения  $\lambda$ , как на рис. 2, а величину ее изменения, что позволял данный симулятор

<sup>6</sup> Скачкообразное изменение графика связано, скорее всего, с неточностью счета программы

перечисленном преобразователе. Так, согласно расчетам, преобразователь ФИМД → амплитуда в найденном диапазоне параметров обеспечивает преобразование:

$$\Delta P_s \cong 2,275 \cdot 10^{-4} \text{ [Вт/нм]} \times \Delta\lambda. \quad (5)$$

## Заключение

В статье предложен принцип преобразования chirпированного импульсного сигнала в амплитудно-модулированный сигнал на базе волоконно-оптического эрбиевого усилителя в предположении, что перечисленный световод описывается общими соотношениями, справедливыми для EDFA. На базе стационарной модели процессов преобразования сигналов в EDFA получены базовые параметры преобразователя, а с учетом динамического характера изменения  $N_2$  выполнено их уточнение. При использовании специализированного симулятора определена передаточная функция предложенного преобразователя и возможный уровень шума в системе.

## Список литературы

1. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчета его параметров / А.Х. Султанов [и др.] // Компьютерная оптика. 2015. Вып. 39. № 5. С. 728–737. DOI: <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737>.
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус-Системс, 1999. 670 с.
3. Виноградова И.Л., Султанов А.Х. Статистический подход к описанию интерферометров Фабри-Перо как элементов многолучевой интерференции в линиях связи // Радиотехника. 2000. № 1. С. 45–49.
4. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM-системы. М.: Техносфера, 2017. 352 с.

5. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers / ed. by M.J.F. Digonnet. Boca Raton: CRC Press, 2001. 798 p.
6. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. Boston: Academic Press, 2011. 460 p.
7. Чаймарданов П.А., Былина М.С. Новая методика расчета оптического усилителя EDFA с многоканальными источниками сигналов и накачек // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. Вып. 3. С. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.10308>.
8. Былина М.С., Чаймарданов П.А. Новая методика измерения параметров оптических волокон, легированных ионами эрбия // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-2-6-19>.
9. Янтилина Л.З., Виноградова И.Л., Султанов А.Х. Математическая модель распространения chirpированного оптического сигнала в RoF // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 2. С. 71–78.
10. Управление время-частотной характеристикой оптического импульса в системах передачи radio-over-fiber с использованием модулятора Маха-Цендера / А.В. Воронкова [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2018. № 3. С. 269–275.
11. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab / P. Alekhya [et al.] // International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7. № 2. P. 279–281. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS020151>.

## References

1. Sultanov A.H. et al. A method for connecting antenna radiators RoF using an optical device and method of calculation of its parameters. *Komp'yuternaja optika*, 2015, no. 39, pp. 728–737. DOI: <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737>. [In Russian].
2. Ivanov A.B. *Fiber Optics: Components, Transmission System, Measurements*. Moscow: Kompanija Sajrus-Sistems, 1999, 670 p. [In Russian].
3. Vinogradova I.L., Sultanov A.H. A statistical approach to the description of Fabry-Perot interferometers as elements of multipath interference in communication lines. *Radiotekhnika*, 2000, no. 1, pp. 45–49. [In Russian].
4. Listvin V.N., Treschikov V.N. *DWDM-System*. Moscow: Tehnosfera, 2017, 352 p. [In Russian].
5. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. Ed. by M.J.F. Digonnet. Boca Raton: CRC Press, 2001, 798 p.
6. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. Boston: Academic Press, 2011, 460 p.
7. Chajmardanov P.A., Bylina M.S. The new method of calculating the EDFA optical amplifier with multi-channel signal sources and the pump waves. *Nauchno-tehnicheskie ведомosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.10308>. [In Russian].
8. Bylina M.S., Chajmardanov P.A. A new method of measuring parameters of optical fiber doped with erbium ions. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-2-6-19>. [In Russian].
9. Jantilina L.Z., Vinogradov I.L., Sultanov A.Kh. Mathematical model of propagation of a chirped optical signal in the RoF. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 71–78. [In Russian].
10. Voronkova A.V. et al. Management time-frequency characteristic of the optical pulse transmission systems in radio-over-fiber modulator using a Mach-Zehnder. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 269–275. [In Russian].
11. Alekhya P. et al. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 279–281. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS020151>.

UDC 681.128.56

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.129-137

Received: 03.09.2019

Accepted: 02.10.2019

## Chirp-to-amplitude converter based on an erbium fiber optic amplifier for radio-photon systems control

I.L. Vinogradova, A.Kh. Sultanov, L.Z. Yantilina, A.R. Gizatulina

Ufa State Aviation Technical University

12, K. Marx Street

Ufa, 450008, Russian Federation

The article proposes the principle of converting a chirped pulse signal into an amplitude-modulated signal (within each information pulse) based on a fiber-optic erbium amplifier. The possibility of using traditional EDFA for this task is analyzed. The parameters of the erbium medium of the amplifier providing the indicated conversion are found. The parameters of the converter have been evaluated.

Keywords: radio photon systems, radio-over-fiber, chirp, instantaneous wavelength change function, fiber optic amplifier, rare-earth doped.

**Виноградова Ирина Леонидовна**, 1970 г. р., доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 1992 г. окончила Уфимский авиационный институт (ныне УГАТУ) по специальности «Информационно-измерительная техника».

*Область научных интересов:* волоконная оптика, телекоммуникационные системы, математическая обработка сигналов, широкополосные системы передачи, антенная техника.

*E-mail:* vil-4@mail.ru

**Султанов Альберт Ханович**, 1950 г. р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. В 1973 г. окончил Новосибирский электротехнический институт связи (ныне Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики) по специальности «Многоканальная электросвязь».

*Область научных интересов:* помехоустойчивая обработка сигналов, обработка аэрокосмических изображений, разработ-

ка и проектирование оптоэлектронных устройств и оптических систем передачи информации.

*E-mail:* tks@ugatu.ac.ru

**Гизатулин Азат Ринатович**, 1992 г. р., ассистент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 2016 г. окончил УГАТУ по направлению подготовки магистров «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

*Область научных интересов:* волоконная оптика, телекоммуникационные системы.

*E-mail:* azat\_poincare@mail.ru

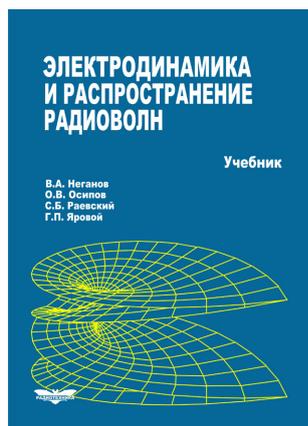
**Янтилина Лилия Зуфаровна**, аспирант кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.

*Область научных интересов:* волоконная оптика, телекоммуникационные системы.

*E-mail:* kleo-bai@mail.ru

**Неганов, В.А.**

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)

ББК 22.3

Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

*Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.*