

DOI: 10.17516/1999-494X-0372

УДК 62-503.5

## Adaptive Regulation of the Spectral Component of the Radiation Power of a Multiwave Laser System

Anton A. Koziratsky<sup>a</sup>,  
Roman G. Hilchenko<sup>b</sup> and Evgeny M. Shutko<sup>\*b</sup>

*<sup>a</sup>Joint-Stock Company «Concert «Sozvezdie»  
Voronezh, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Military Education and Research Centre of Military-Air Forces  
«Military-Air Academy Named After Professor N.E. Zhukovsky  
and Yu.A. Gagarin»  
Voronezh, Russian Federation*

Received 14.10.2021, received in revised form 11.01.2022, accepted 06.02.2022

**Abstract.** This article presents a method for increasing the energy efficiency of systems using laser radiation for information transmission by automatically selecting a rational radiation power. A model of the process of adaptive adjustment of the spectral component of the radiation power of a multiwave laser system has been developed based on the analysis of the magnitude of the optical signal reflected from the retroreflector in order to ensure the required level of laser radiation power for reliable information transmission by each separate channel. In the software environment MATLAB Simulink, on the basis of the mathematical apparatus of the theory of automatic control, an imitation of the process under study was made and the adequacy of the proposed model was confirmed. The model implies the possibility of its correction by changing the amplifying and inertial properties of the circuit elements to describe particular cases of the functioning of a multiwave laser system.

**Keywords:** multiwave laser system, retroreflector, spectral power component, interference environment, adaptive power control, transfer function.

Citation: Koziratsky, A. A., Hilchenko, R. G. and Shutko E. M. Adaptive regulation of the spectral component of the radiation power of a multiwave laser system. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(1), 45–57. DOI: 10.17516/1999-494X-0372

# Адаптивная регулировка спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы

А.А. Козирацкий<sup>а</sup>, Р.Г. Хильченко<sup>б</sup>, Е.М. Шутько<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Акционерное общество «Концерн «Созвездие»

Российская Федерация, Воронеж

<sup>б</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил

«ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Российская Федерация, Воронеж

**Аннотация.** В данной статье представлен способ повышения энергетической эффективности систем, использующих для передачи информации лазерное излучение, путем автоматического выбора рациональной мощности излучения. Разработана модель процесса адаптивной регулировки спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы на основе анализа величины отраженного от ретрорефлектора оптического сигнала в интересах обеспечения требуемого уровня мощности лазерного излучения для надежной передачи информации каждым отдельно взятым каналом. В программной среде MATLAB Simulink, на основе математического аппарата теории автоматического управления, произведена имитация исследуемого процесса и подтверждена адекватность предложенной модели. Модель подразумевает возможность ее коррекции путем изменения усиливающих и инерционных свойств элементов схемы для описания частных случаев функционирования многоволновой лазерной системы.

**Ключевые слова:** многоволновая лазерная система, ретрорефлектор, спектральная составляющая мощности, помеховая обстановка, адаптивное управление мощностью, передаточная функция.

Цитирование: Козирацкий, А. А. Адаптивная регулировка спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы / А. А. Козирацкий, Р. Г. Хильченко, Е. М. Шутько // Журн. Сиб. федер. унта. Техника и технологии, 2022, 15(1). С. 45–57. DOI: 10.17516/1999-494X-0372

## Введение

Одним из возможных путей решения задачи организации многоканальной линии передачи информации (команд управления) с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) является использование лазерного излучения. Особую актуальность приобретает решение данной задачи в условиях сложной электромагнитной обстановки и деструктивного воздействия средств РЭБ противника [1].

Такая линия передачи может быть реализована на основе использования нескольких лазерных излучателей с выделением для каждого канала своей части спектра [2; 3].

Однако для радиотехнических систем такого типа большое значение имеет рациональный выбор мощности генерируемого излучения, необходимого для реализации эффективного управления БПЛА, так как влияние среды распространения и характеристики приемных устройств для различных длин волн могут значительно различаться.

Одним из подходов к разрешению указанной трудности служит реализация регулировки мощности излучения под реальные помеховые условия организации линии связи [4].

Целью настоящей работы является разработка модели процесса адаптивной регулировки спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы в интересах обеспечения требуемого уровня мощности лазерного излучения для надежной передачи информации каждым отдельно взятым каналом.

Применение многоволновой лазерной системы позволяет сформировать пучок оптического излучения путем пространственного сложения лучей системы лазерных излучателей с различными длинами волн [5]. Оптический пучок, состоящий из нескольких отдельных промодулированных в соответствии с собственным сообщением лазерных лучей, образует многоканальную линию передачи информации. При этом предполагается, что составляющие пучок лучи, имея различные длины волн, не взаимодействуют при распространении на трассе, а также при переломлении.

Формирование единого потока оптического излучения реализуется при помощи системы формирующей оптики (ФО), представляющей собой сложную структуру из специально подобранных оптических элементов (линз, призм, зеркал и др.). Упрощенная схема формирования пучка оптического излучения посредством ФО представлена на рис. 1.

В зависимости от характеристик среды распространения, фоно-помеховой обстановки, а также чувствительности светочувствительных элементов приемного устройства уровень мощности излучения, обеспечивающий качественную передачу информации, для разных длин волн ЛИ может существенно различаться [6, 7]. Для надежного функционирования канала передачи информации необходима предварительная настройка (регулировка) уровня мощности излучения в зависимости от характеристик приемника и реальных условий распространения лазерного излучения. Кроме того, при организации передачи информации между подвижными субъектом и объектом управления такая регулировка должна стать периодической и выполняться автоматически.

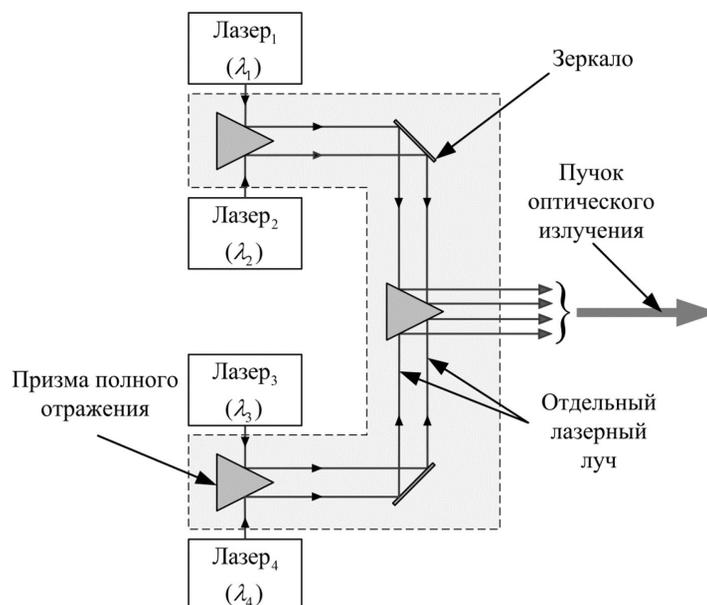


Рис. 1. Схема формирования единого потока оптического излучения

Fig. 1. Scheme of the formation of a single stream of optical radiation

Для реализации регулировки спектральной составляющей мощности излучения необходимо передающую сторону обеспечить информацией об уровне мощности излучения на принимающей стороне. Для этого оптическая часть принимающей стороны (БПЛА) должна включать устройство переотражения оптического излучения в обратном направлении с минимальными потерями на рассеяние и поглощение. В качестве такого устройства может выступать ретро-рефлектор, обеспечивающий переотражение излучения к его источнику, в широких диапазонах направлений и длин волн [8].

### Описание процесса адаптивной регулировки спектральной составляющей мощности

Весь процесс адаптивной регулировки спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы может быть представлен в виде замкнутой процедуры формирования управляющего воздействия на регулятор мощности источника лазерного излучения на основе оценки мощности отраженного от РР сигнала.

Структура процесса передачи информации на основе многоволновой лазерной системы с реализацией адаптивного управления мощностью излучения каждого отдельно взятого канала передачи информации может быть представлена в виде схемы, показанной на рис. 2.

Генерируемые лазерные лучи (промодулированные в соответствии с собственным передаваемым сообщением) посредством формирующей оптики собираются в единый пучок оптического излучения.

Считаем, что угол расходимости итогового пучка с выхода ФО и углы расходимости отдельных лазерных лучей примерно равны. Оптическое излучение, пройдя через толщу атмосферы, поступает на вход приемника оптического излучения (ПОИ), где происходит его дальнейшая

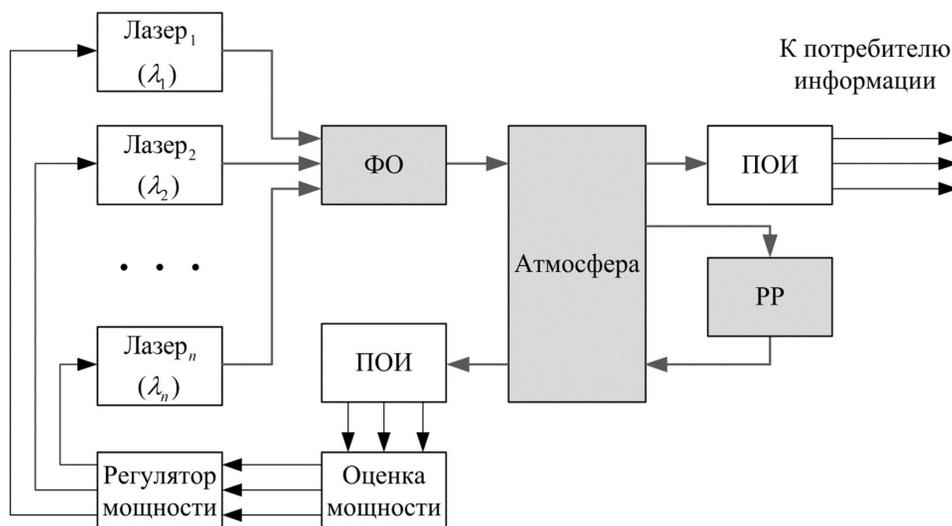


Рис. 2. Схема функционирования многоволновой лазерной системы с адаптивной регулировкой спектральной составляющей мощности

Fig. 2. Scheme of functioning of a multi-wavelength laser system with adaptive control of the spectral power component

обработка. Кроме того, пучок оптического излучения частично отражается от РР и поступает на вход ПОИ, размещенного на передающей стороне. Далее выполняется оценка спектральной составляющей мощности излучения переотраженного лазерного пучка и формируются оценочные значения мощности излучения на принимающей стороне для каждого канала передачи информации. После чего в соответствии с оценочным значением формируется управляющее воздействие для регулировки мощности отдельно для каждого лазера.

Ниже приведены известные [9, 10] выражения для определения величины светового потока для случаев лазерной связи  $\Phi_{лс}$  (соответствующего величине прямого сигнала на принимающей стороне) и локации  $\Phi_{лл}$  (соответствующего величине отраженного от РР сигнала на передающей стороне), описывающие случай, когда распределение интенсивности излучения в пучке подчинено закону Гаусса, а объект локации представляет собой эталонный катафот (ретрорефлектор):

$$\Phi_{лс}(\lambda_i) = \Phi_o(\lambda_i) \cdot \frac{2 \cdot S_{вх зр}}{D^2 \omega_{пер}} \cdot \tau_{прд} \tau_{прм} \tau_{атм}(\lambda_i) \cdot \cos \beta \cdot \exp[-8(r / \theta_{прд} D)^2];$$

$$\Phi_{лл}(\lambda_i) = \Phi_o(\lambda_i) \cdot \frac{4 \cdot S_{рр} S_{вх зр}}{\pi \theta_{рр}^2 D^4 \omega_{пер}} \cdot \tau_{прд} \tau_{прм} \tau_{атм}^2(\lambda_i) \rho_{рр} \cdot \cos^2 \beta \cdot \exp[-8(r / \theta_{прд} D)^2];$$

где  $\Phi_o(\lambda_i)$  – поток излучения (с длиной волны  $\lambda_i$ ) на выходе передатчика;  $S_{вх зр}$  – площадь входного зрачка приемника;  $S_{рр}$  – площадь объекта облучения (ретрорефлектора);  $D$  – текущая дальность;  $\omega_{пер}$  – телесный угол пучка передатчика (размер пятна излучения на выходе из передатчика в плоскости перетяжки);  $\theta_{рр}$  – расходимость пучка, отраженного от РР;  $\theta_{прд}$  – расходимость пучка передатчика;  $\rho_{об}$  – коэффициент отражения РР;  $\beta$  – угол между направлением падающего луча и нормалью к облучаемой поверхности;  $r$  – расстояние от оси пучка до центра объектива (ретрорефлектора);  $\tau_{прд}$  – коэффициент пропускания передающей оптической системы;  $\tau_{прм}$  – коэффициент пропускания принимающей оптической системы;

$$\tau_{атм}(\lambda_i) = \exp(-D \cdot \sigma(\lambda_i)),$$

– коэффициент пропускания (прозрачность) атмосферы на длине волны  $\lambda_i$ ;  $\sigma(\lambda_i)$  – показатель ослабления атмосферы на длине волны  $\lambda_i$ .

Используя данные выражения, при определенных допущениях можно получить выражение для оценки значения потока излучения на принимающей стороне, основывающееся на оценочном значении дальности и измеренных значениях потока излучения, отраженного от ретрорефлектора и принятого передающей стороной.

В частности, предполагается, что на приемной и передающей сторонах используются идентичные приемники оптического излучения с равными площадями входного зрачка и коэффициентами пропускания оптической системы, а сами приемники и передатчик позиционируются таким образом, что пучок лазерного излучения падает по нормали к облучаемой поверхности (приемной апертуре).

Кроме того, будем считать, что оптическая система передатчика позволяет обеспечить одновременное облучение приемника и РР таким образом, что при условии равенства их площадей ( $S_{прм} = S_{рр}$ ) световые потоки, приходящиеся на приемник и РР, равны.

Считая, что площадь ретрорефлектора ( $S_{pp}$ ), расходимость формируемого им пучка ( $\theta_{pp}$ ) и коэффициент отражения ( $\rho_{об} \approx 1$ ) известны, итоговое выражение для оценки светового потока излучения на принимающей стороне будет иметь вид

$$\tilde{\Phi}_{лс}(\lambda_i) = \Phi_{лс}(\lambda_i) \cdot \frac{\pi \theta_{pp}^2 D^2}{2 \cdot S_{pp} \rho_{pp}} \cdot \exp(D \cdot \sigma(\lambda_i)).$$

В блоке регулятора мощности (рис. 2) оценочные значения мощности каждого отдельного лазерного луча сравниваются с пороговыми значениями, выбираемыми из априорно известных значений мощности, необходимых для обеспечения надежной передачи информации по каждому каналу.

По выражению видно, что для получения оценочного значения мощности излучения на принимающей стороне на передающей стороне должны быть априорно известны характеристики РР ( $S_{pp}$ ,  $\theta_{pp}$ ,  $\rho_{pp}$ ) и показатель ослабления атмосферы ( $\sigma$ ), а также реализовано измерение расстояния между передатчиком и приемником.

### Моделирование описанного процесса регулирования

Поскольку каждый элемент схемы, представленной на рис. 2, обладает усиливающими или ослабляющими свойствами, а также временными параметрами (время реакции, время задержки), их описание возможно с использованием математического аппарата теории автоматического управления в виде различных звеньев передаточной цепи [10]. Особый интерес представляет аperiодическое звено, передаточная функция которого имеет вид

$$W_i(s) = \frac{K_i}{sT_i + 1};$$

где  $K_i$  – коэффициент передачи  $i$ -го элемента схемы, описывающий его энергетические свойства (КПД, коэффициенты усиления или ослабления);  $T_i$  – постоянная времени  $i$ -го элемента схемы, описывающая его временные свойства (время реакции на входное воздействие);  $s$  – оператор Лапласа.

Тогда модель исследуемого процесса представим в форме передаточных функций, показанной на рис. 3 [12, 13].

Постоянное напряжение питания  $S_{пит}$  задает начальный уровень сигнала (режим холостого хода (ХХ)), запускает оптический квантовый генератор, обозначенный на схеме передаточной функцией  $W_{лаз}(s)$ , обеспечивая генерацию лазерного излучения.

Стабилизация уровня мощности оптического сигнала достигается компенсацией его скачкообразных изменений (например, вследствие нестабильности цепей питания), для чего в схему включена обратная связь  $W_{ос}(s)$ . Она состоит из фоточувствительного элемента, выполняющего функцию оценивающего звена  $W_{оц}(s)$ , и устройства формирования корректирующего сигнала  $W_{кор}(s)$ , соответствующего управляющему воздействию с выхода усилителя  $W_{ум}(s)$ .

Отдельные лазерные лучи посредством формирующей оптики  $W_{фо}(s)$  собираются в единый пучок, излучаемый в направлении принимающей стороны.

Проходящий через толщу атмосферы  $W_{атм}(s)$  пучок лазерного излучения отражается от ретрорефлектора  $W_{отр, PP}(s)$ , а также находящихся на трассе распространения посторонних элементов  $W_{отр, пост.}(s)$ .

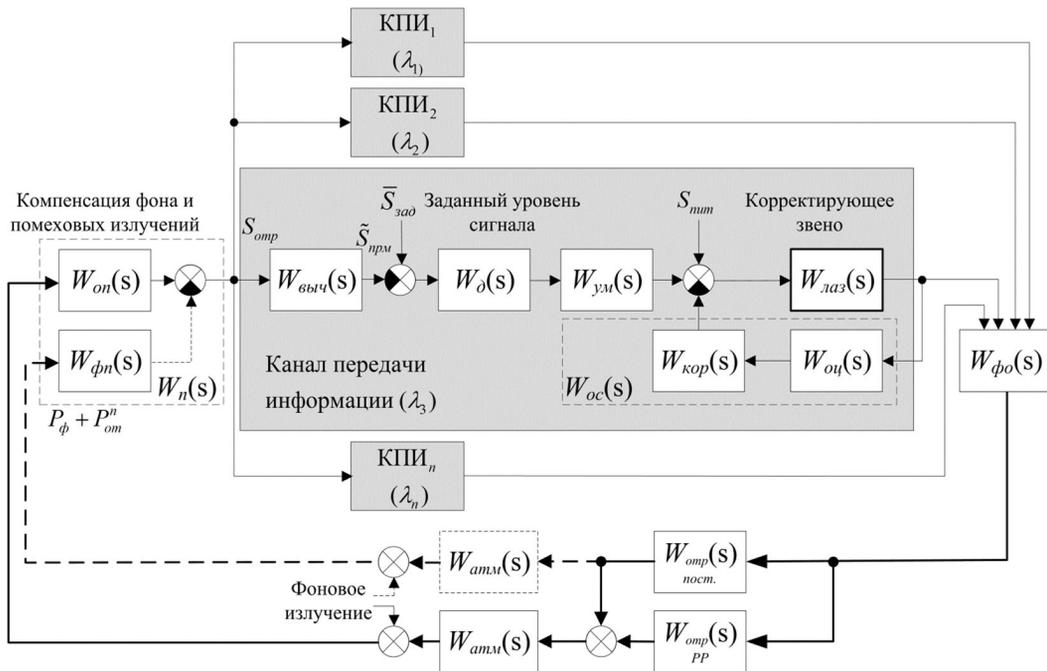


Рис. 3. Модель процесса функционирования многоволновой лазерной системы с адаптивной регулировкой спектральной составляющей мощности в форме передаточных функций

Fig. 3. Model of the process of functioning of a multi-wavelength laser system with adaptive control of the spectral power component in the form of transfer functions

Отраженный сигнал в виде аддитивной смеси с фоновым шумом атмосферы поступает на вход оптического приемника  $W_n(s)$ , на выходе которого имеем электрический сигнал  $S_{отр}$ , пропорциональный уровню мощности принятого оптического излучения, на каждой длине волны  $\lambda_i$ , соответствующей  $i$ -му каналу передачи информации. Приемник оптического излучения может быть представлен двухканальной схемой (основной  $W_{он}(s)$  и фоновым приемником  $W_{фн}(s)$ ) для компенсации помеховых и шумовых сигналов.

Полученный сигнал  $S_{отр}$  поступает на вход вычислительного устройства  $W_{выч}(s)$ , в котором в соответствии с выражением формируется оценочное значение мощности излучения, определенной длины волны  $\lambda_i$ , на принимающей стороне  $\tilde{S}_{прм}$ .

После вычитания сигнала  $\tilde{S}_{прм}$  из заранее задающего значения  $\bar{S}_{зад}$ , величина которого соответствует целевой мощности излучения, обеспечивающей требуемую надежность передачи информации, их разность поступает на вход амплитудного дискриминатора  $W_d(s)$ , чувствительного к знаку и величине входного воздействия. В дискриминаторе формируется управляющее воздействие, которое после усиления  $W_{ум}(s)$  аддитивно смешивается с сигналом холостого хода ( $S_{шум}$ ).

Таким образом, представленная модель включает в себя два контура обратной связи. Большой контур отвечает за адаптивное управление мощностью под изменяющиеся условия распределения оптического сигнала, а малый – служит для обеспечения стабильности работы источника ЛИ.

Основной вклад в затухание оптического сигнала обеспечивают его потери на пути распространения, связанные с состоянием атмосферы. Коэффициент передачи атмосферы, имитирующий

ослабление излучения на трассе, представляется коэффициентом пропускания атмосферы [9], который динамически изменяется в соответствии с выражением

$$K_{атм}(\lambda_i) = t_{атм}(\lambda_i, D(t)) = \exp\{-\sigma(\lambda_i)(D_0 \pm \mathcal{G} \cdot t)\},$$

где  $D_0$  – начальное расстояние от лазера до эталонного отражателя;  $\mathcal{G}$  – скорость взаимного сближения (удаления) лазера и отражателя;  $t$  – время моделирования.

Постоянная времени атмосферы имитирует потери времени прохождения пучка оптического излучения сквозь толщу среды распространения и также функционально связана с дальностью:

$$T_{атм} = 2 \frac{D_0 \pm \mathcal{G}t}{c},$$

где  $c$  – скорость света, а удвоение частного учитывает факт двойного прохождения оптического сигнала до отражателя и обратно.

Коэффициент передачи РР может быть получен из выражения

$$K_{pp} = \frac{4 \cdot S_{pp} \rho_{pp}}{\pi \theta_{pp}^2 D^2},$$

откуда, в свою очередь, коэффициент передачи вычислителя

$$K_{выч} = \frac{1}{K_{pp} \cdot K_{атм}}$$

В целях исследования эффективности адаптивного управления мощностью лазерного излучения в программной среде MATLAB Simulink было произведено имитационное моделирование данного процесса на основе структурной схемы модели (рис. 4). Исходными данными моделирования, представленными в табл. 1, выбраны значения коэффициентов передачи и постоянных времени цепи, приближенно отвечающих реальным характеристикам входящих в модель элементов и воспроизводящих процесс оптической локации в нормальных условиях.

Питание лазера обеспечивается напряжением  $S_{пит} = 50$  В, целевое значение уровня сигнала на принимающей стороне, начальная дальность, а также показатель ослабления атмосферы изменялись в ходе моделирования в диапазонах:  $\bar{S}_{зад} = 0,2-1$  Вм,  $D_0 = 1-15$  км,  $\sigma(\lambda_i) = 0,05-0,5$ .

Аддитивное помеховое воздействие фонового излучения элементов атмосферы, космических и наземных объектов моделируется при помощи суммирования отраженного излучения с сигналом шумового генератора в виде «белого» шума с математическим ожиданием  $m = 100$  мВт и среднеквадратическим отклонением величиной  $\sigma = 50$  мВт.

Начало функционирования модели в интересах повышения наглядности переходных процессов намеренно задерживается относительно момента начала моделирования на десять микросекунд.

На рис. 4 приведен график изменения мощности лазерного излучения на выходе одного из лазеров. На графике отчетливо видны переходные процессы адаптации, связанные с работой малого (а) и большого (б) контуров обратной связи.

По результатам имитационного моделирования работы нескольких оптических квантовых генераторов с различными длинами волн и различными значениями чувствительности прием-

Таблица 1. Исходные данные имитационного моделирования исследуемого процесса лазерной локации

Table 1. Initial data of simulation of the studied laser ranging process

№ п/п	Наименование элемента	Коэффициент передачи	Постоянная времени, мкс
1	Дискриминатор	$K_d = 2$	$T_d = 0,125$
2	Усилитель мощности	$K_{ум} = 10$	$T_{ум} = 0,15$
3	Лазер	$K_{лаз} = 0,2$ Вт/В	$T_{лаз} = 0,5$
4	Оценочный элемент схемы обратной связи	$K_{оц} = 0,2$ В/Вт	$T_{оц} = 0,25$
5	Корректор обратной связи	$K_{кор} = 10$	$T_{кор} = 0,125$
6	Формирующая оптика	$K_{фо} = 1$	$T_{фо} = \delta(t)^*$
7	Ретрорефлектор	$K_{рр} = 0,95$	$T_{рр} = \delta(t)^*$
8	Посторонние отражатели	$K_{пост} = 0,05$	$T_{пост} = \delta(t)^*$
9	Атмосфера	$K_{атм} = 0,075^{**}$	$T_{атм} = 20^{**}$
10	Основной приемник излучения	$K_{он} = 20$ В/Вт	$T_{прм} = 0,5$
11	Фоновый приемник излучения	$K_{фп} = 20$ В/Вт	$T_{прм} = 0,5$
12	Вычислитель	$K_{выч} = 2^{***}$	$T_{прм} = 0,5$

\* $\delta(t)$  – дельта функция,

\*\* – параметры атмосферы могут изменяться в процессе моделирования вследствие изменения дальности от излучателя до ретрорефлектора (см. (6), (7)),

\*\*\* – коэффициент передачи в общем случае определяется из выражения (9).

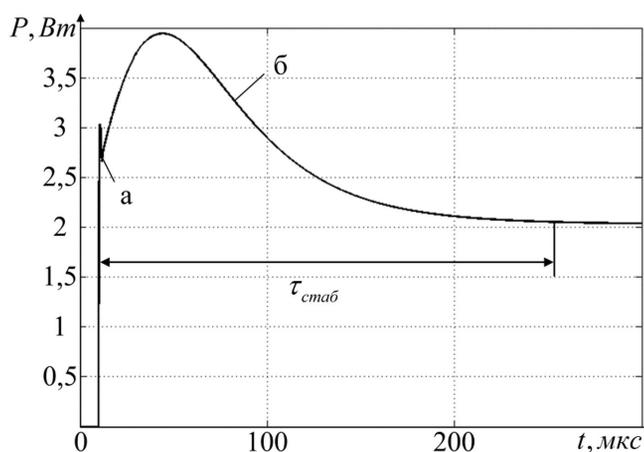


Рис. 4. Переходной процесс адаптации уровня мощности формируемого квантовым генератором излучения

Fig. 4. Transient adaptation of the power level of the radiation generated by the quantum generator

ников оптического излучения получены зависимости мощности излучения на принимающей стороне для различных значений целевого уровня сигнала (рис. 5).

Для оценки влияния ослабляющих свойств атмосферы на работоспособность предложенной системы была имитирована работа нескольких оптических квантовых генераторов с различными длинами волн и значениями показателей ослабления атмосферы для них. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

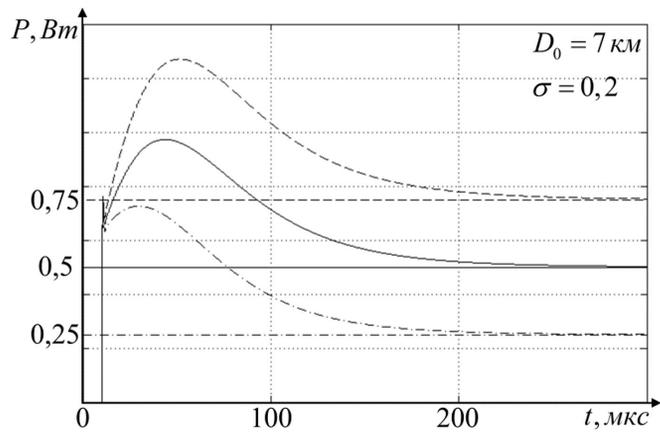


Рис. 5. Адаптация мощности излучения на принимающей стороне для значений целевой мощности  $\bar{S}_{сад} = 0,75; 0,5; 0,25$  Вт

Fig. 5. Adaptation of the radiation power on the receiving side for the values of the target power  $\bar{S}_{сад} = 0,75; 0,5; 0,25$  W

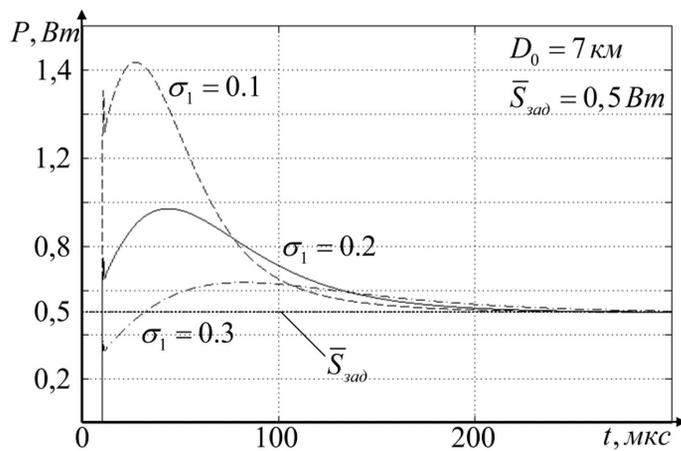


Рис. 6. Адаптация мощности излучения на принимающей стороне для различных значений показателя ослабления атмосферы

Fig. 6. Adaptation of the radiation power on the receiving side for different values of the atmospheric attenuation index

Также посредством полученной модели было исследовано влияние изменения расстояния между передатчиком и приемником на работу многоволновой лазерной системы (рис. 7).

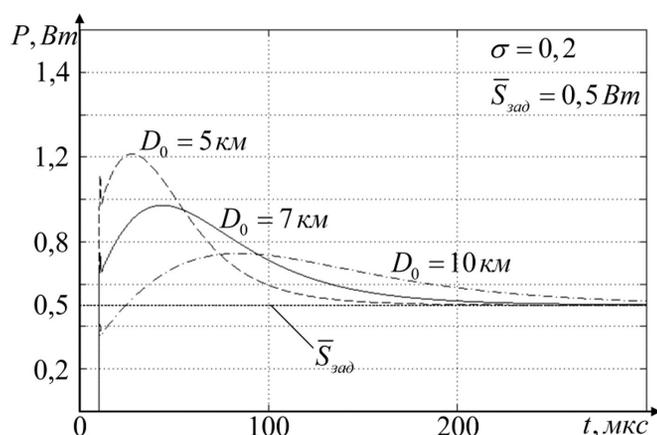


Рис. 7. Адаптация мощности излучения на принимающей стороне для различных значений начального расстояния

Fig. 7. Adaptation of the radiation power on the receiving side for different values of the initial distance

### Заключение

Анализ приведенных графиков указывает на адекватность и работоспособность предложенной модели многоволновой лазерной системы управления БПЛА, поскольку, независимо от изменения условий моделирования, система стремится перейти в устойчивое состояние, обеспечивающее надежную передачу информации.

Таким образом, применительно к предложенному способу реализации многоканальной линии передачи информации (линии управления) на основе многоволновой лазерной системы разработана модель процесса адаптивного управления, позволяющая осуществлять регулировку спектральной составляющей мощности излучения многоволновой лазерной системы, основываясь на величине переотраженного от эталонного отражателя оптического сигнала в условиях помех, в интересах рационального выбора мощности генерируемого излучения.

Принцип адаптации реализован на основе применения математического аппарата теории автоматического управления, что позволило представить цикличность исследуемого процесса в виде двух замкнутых контуров. Потери излучения (сигнала), связанные с затуханием в атмосфере, расходимостью луча, КПД лазера и другие, заданы в модели значениями коэффициентов передачи, а инерционные свойства элементов модели – значениями постоянной времени цепи звеньев передаточной функции.

Полученная модель подразумевает возможность ее коррекции путем изменения усиливающих и инерционных свойств элементов схемы для описания частных случаев лазерной локации.

### Список литературы / References

- [1] Тихонов Р.И., Бубенщиков Ю.Н. Практический опыт испытаний комплексов с беспилотными летательными аппаратами в условиях информационно-технических воздействий, *Военная мысль*, 2019, 6, 118–124 [Tikhonov R. I., Bubenshchikov Yu. N. Practical experience of testing complexes with unmanned aerial vehicles in conditions of information and technical influences, *Voennaya mys'*, 2019, 6, 118–124 (in Russian)].

[2] Климков Ю.М., Хорошев М.В. *Лазерная техника*. М.: МИИГ А и К, 2014. 143 с. [Klimkov Yu.M., Khoroshev M.V. *Laser technology*, Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet geodezii i kartografii, 2014, 143 p. (in Russian)]

[3] Солдатов А.Н., Васильева А.В., Ермолаев А.П., Полунин Ю.П., Сидоров И.В., Филонов А.В. Исследовательская лазерная установка для резонансной абляции материалов. *Оптика атмосферы и океана*, 2006, 19(2), 172–177 [Soldatov A.N., Vasilyeva A.V., Ermolaev A.P., Polunin Yu.P., Sidorov I.V., Filonov A.V. Research laser facility for resonant ablation of materials. *Optics of Atmosphere and Ocean*, 2006, 19(2), 172–177 (in Russian)]

[4] Нагалин А.В., Хильченко Р.Г., Шутько Е.М. Модель процесса адаптивного управления мощностью излучения лазера в условиях помех по величине отраженного от ретрорефлектора оптического сигнала. *Радиотехника*, 2021, 85(1), 13–20 [Nagalin A.V., Khilchenko R.G., Shutko E.M. Model of the process of adaptive control of the laser radiation power under interference conditions by the magnitude of the optical signal reflected from the retroreflector. *Radiotekhnika* 2021, 85(1), 13–20 (in Russian)]

[5] Козирацкий А.А. Модель процесса приема и формирования сигнала от бортового ретропроектора при облучении многоволновым гауссовским пучком. *Вестник ВВА*, 2021, 43 (1), 285–293 [Koziratsky A.A. Model of the process of receiving and shaping a signal from an onboard retro projector under irradiation with a multiwave Gaussian beam. *Vestnik VVA*, 2021, 43 (1), 285–293 (in Russian)]

[6] Мусьяков М.П., Миценко И.Д., Ванеев Г.Г. *Проблемы ближней лазерной локации*. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2000. 295 с. [Musyakov M.P., Mitsenko I.D., Vaneev G.G. *Problems of near laser ranging*, Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni N.E. Bauman, 2000, 295 p. (in Russian)]

[7] Глушков А.Н., Козирацкий Ю.Л., Меркулов Р.Е. Адаптивное управление моментом излучения лазерной энергии при подавлении оптико-электронных средств. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2019, 1, 81–87 [Glushkov A.N., Koziratsky Yu.L., Merkulov R.E. Adaptive control of the moment of emission of laser energy when suppressing optoelectronic devices. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 1, 81–87 (in Russian)]

[8] Денисов М.М. Закон отражения лазерного излучения от ретрорефлектора, установленного на космическом аппарате. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2010, 15(4), 33–38 [Denisov M.M. The law of reflection of laser radiation from a retroreflector installed on a spacecraft. *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2010, 15 (4), 33–38 (in Russian)]

[9] Агишев Р.Р. *Лазерное зондирование окружающей среды: методы и средства*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 264 с. [Agishev R.R. *Laser sensing of the environment: methods and means*, Moscow, FIZMATLIT, 2019, 264 p. (in Russian)]

[10] Климков Ю.М. *Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами*. М.: Советское радио, 1978. 264 с. [Klimkov Yu.M. *Basics of calculating optoelectronic devices with lasers*. Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 264 p. (in Russian)]

[11] Будников С.А., Гревцев А.И., Иванцов А.В., Кильдюшевский В.М., Козирацкий А.Ю., Козирацкий Ю.Л., Кушев С.С., Лысыков В.Ф., Паринов М.Л., Прохоров Д.В. *Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения*. М.: Радиотехника, 2013. 232 с [Budnikov S.A., Grevtsev A.I., Ivantsov A.V., Kildyushevsky V.M., Koziratsky A. Yu., Koziratsky

Yu.L., Kushchev S.S., Lysikov V.F., Parinov M.L., Prokhorov D.V. *Information conflict models of search and detection tools*, Moscow, Radiotekhnika, 2013, 232 p. (in Russian)]

[12] Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Радио и связь, 1986. 512 с. [Gonovskiy I.S. *Radiotechnical circuits and signals*, Moscow, Radio i svyaz, 1986, 512 p. (in Russian)]

[13] Коновалов Г.В. *Радиоавтоматика*. М.: Радиотехника, 2003. 288 с. [Konovalov G.V. *Radio automatics*, Moscow, Radiotekhnika, 2003, 288 p. (in Russian)]