

Совершенствование лазерных дальномеров с безопасной для глаз человека энергией импульса

В. В. БЕСОГОНОВ

Институт механики Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия, e-mail: vbessog@mail.ru

Рассчитаны характеристики лазерного дальномера с длиной волны 1,54 мкм, имеющего энергию импульса излучения меньше безопасного для глаза человека порогового значения. Приведены два примера фотоприёмных устройств с повышенной чувствительностью. Предложена система накачки активного элемента лазера линейками лазерных диодов, что позволяет повысить коэффициент полезного действия лазерного излучателя и снизить энергетическую нагрузку на активный элемент.

Ключевые слова: лазерный дальномер, линейка лазерных диодов, фотоприёмное устройство.

The characteristics of laser range finder with a wavelength of 1,54 μm , having the pulse energy less than safe threshold for human vision were designed. Two examples of photodetectors with high sensitivity are shown. The system of pumping of laser active element by laser diode lines is proposed that allows to increase the efficiency of the laser emitter and to reduce the energy load on the active element.

Key words: laser rangefinder, laser diodes line, photodetector.

Лазерный дальномер (ЛД) — прибор для измерения расстояний. Широко применяется при топографической съёмке, в инженерной геодезии, военном деле, промышленности, навигации, астрономических исследованиях, фотографии и других областях. Работа ЛД основана на допущении о постоянстве скорости распространения электромагнитного излучения в среде, что позволяет рассчитать расстояние между лазером и интересующим объектом как результат произведения скорости распространения излучения в среде на время, за которое излучение проходит указанное расстояние. Различают три метода измерения дальности в зависимости от того, какой характер модуляции лазерного излучения используется в дальномере: импульсный, фазовый или их комбинация.

Сущность импульсного метода состоит в том, что объекту посылается зондирующий импульс, запускающий временной счётчик в дальномере. При возвращении отражённого объектом импульса временной счётчик останавливается и по временному интервалу (задержке отражённого импульса) определяется расстояние до объекта.

При фазовом методе дальнометрирования лазерное излучение модулируется по какому-либо закону с помощью модулятора (например, электрооптического кристалла, изменяющего параметры под воздействием электрического сигнала). Часто используют синусоидальный сигнал частотой 10–150 МГц (измерительная частота). Отражённое излучение попадает в приёмную оптику, фотоприёмник, и выделяется модулирующий сигнал. В зависимости от дальности до объекта изменяется фаза отражённого сигнала относительно фазы сигнала в модуляторе. Рассчитывается разность фаз, и вычисляется расстояние до объекта.

Минимальное влияние на органы зрения человека и животных оказывает излучение с длиной волны 1,54 мкм, на которой безопасный порог энергии импульса излучения для глаз человека составляет порядка 8 мДж. Для сравнения при излучении с длиной волны 1,06 мкм безопасный порог для зрения человека составляет всего порядка 0,1 мДж. В дополнение к сказанному выше, длина волны 1,54 мкм лежит в диапазоне «окна прозрачности» атмосферы. Все

это определяет возможность широкого использования излучения с длиной волны 1,54 мкм. Лазерные дальномеры с накачкой лазерными диодами в настоящее время начинают разрабатывать и использовать с целью обеспечения их безопасной эксплуатации [1]. Основное преимущество использования излучения с длиной волны 1,54 мкм — возможность получения импульсов с энергией, достаточной для дальномера, но при этом не превышающей безопасного порогового значения для зрения человека. При дальностях измерения 5–10 км необходимо оценивать энергию импульса, энергетические параметры системы накачки, оптические характеристики излучающих и принимающих излучение систем, изменения характеристик активной среды и системы накачки при повышенных температурных нагрузках.

Основные технические характеристики лазерного дальномера. Рассмотрим ЛД с длиной волны 1,54 мкм и безопасной для глаз человека энергией импульса, накачиваемый лазерными диодами, работающий в диапазоне температур – 50... + 65 °С, определяющий дальность до объекта на расстояниях 5–10 км. Основные технические характеристики современных лазерных дальномеров ЛД-154 (НИИ "Полус" им. М. Ф. Стелымаха), ЛД-54 (НПК ГОИ им. С. И. Вавилова), ЛДБГ1-Т (ПО УОМЗ) с твёрдотельным активным элементом и оптической накачкой приведены в табл. 1.

Все выпускаемые в настоящее время ЛД оборудованы лампой накачки с широким или непрерывным спектром, что является одной из причин их невысокого коэффициента полезного действия.

В качестве источника накачки активного элемента применим одну или несколько линеек лазерных диодов, например АТС-Q70. Существуют две основные среды, позволяющие на длине волны 1,54 мкм создавать твёрдотельные лазеры, — эрбиевое стекло с ионами иттербия (ЛГС-ХМ) и кристалл калий-гадолиниевого вольфрамата, активированный неодимом ($\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$). Выходная энергия импульса 8 мДж в дальномерах ЛД-154, ЛД-54, ЛДБГ1-Т с активной средой $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ обеспечивается ламповой накачкой с энергией 7–8 Дж. Кристалл $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ обладает большим

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики дальномеров с длиной волны 1,54 мкм

Характеристика	ЛД-154	ЛД-54	ЛДБГ1-Т	Предлагаемый прибор
Дальность измерения, м	200–4000	200–5500	200–5000	200–10000
Активный элемент	KGd(WO ₄) ₂ :Nd ³⁺	KGd(WO ₄) ₂ :Nd ³⁺	KGd(WO ₄) ₂ :Nd ³⁺	ЛГС–ХМ
Выходная энергия импульса, мДж	5–8	7–8	8	6
Накачка	Ламповая	Ламповая	Ламповая	Линейка лазерных диодов
Энергия накачки, Дж	7	8	7	0,4
Длительность импульса по уровню 0,5, нс	30±5	20	20	20
Расходимость излучения на выходе из телескопа, мрад	0,7	0,6	0,6	0,47
Температурный диапазон, °С	–50...+60	–50...+60	–50...+60	–50...+60

коэффициентом усиления и более высокой прочностью, но ионы Nd³⁺ имеют очень узкие полосы поглощения. Это приводит к необходимости стабилизации температуры линеек лазерных диодов, так как при изменении температуры на 1 °С длина волны излучения данных линеек изменяется на 0,33 нм [2]. Также существуют сложности при юстировке лазера ввиду того, что у ионов Nd³⁺ доминирующим переходом является переход, соответствующий длине волны 1,06 мкм. Поэтому длина резонатора должна быть пропорциональна $1,54N/2$ и одновременно не должна быть пропорциональна $1,06N_1/2$, где N , N_1 – целые числа. Чем больше разница ближайших значений $1,54N/2$ и $1,06N_1/2$, тем лучше.

С учётом перечисленного выше в качестве активной среды используем ЛГС–ХМ без хрома. В силу того, что лазер на эрбиевом стекле работает по трёхуровневой схеме генерации, концентрация ионов эрбия для минимизации пороговой энергии накачки должна быть как можно ниже. Эффективная передача энергии с квантовым выходом люминесценции более 0,9 при концентрации эрбия порядка 10^{19} см³ достигается при концентрациях иттербия более $2 \cdot 10^{21}$ см³. При высоких энергиях возбуждения по мере накопления ионов Er³⁺ в метастабильном состоянии во время действия импульса накачки эффективность безизлучательного переноса возбуждения в паре ионов Yb³⁺–Er³⁺ существенно падает. При использовании в макете в качестве активной среды ЛГС–ХМ и двух линеек лазерных диодов АТС-Q70 выходная энергия импульса 6 мДж была получена при энергии накачки 0,4 Дж. При этом повышается коэффициент полезного действия лазерного излучателя, значительно снижается энергетическая нагрузка на активный элемент и появляется возможность увеличения частоты следования импульсов дальномера. Применение линеек лазерных диодов позволит существенно сократить не только габаритные размеры излучателя и его массу, но и потребляемую средствами накачки мощность. Хорошо известная структурная схема дальномера приведена в источнике [3].

Работа импульсного ЛД осуществляется следующим

образом. Работа ЛД активирует блок управления. При подаче команды по линии связи блок управления активирует систему подачи питания на линейку лазерных диодов, и происходит генерация лазерного излучения, поступающего в передающую оптическую систему. Она формирует излучение на объекте. Полупрозрачное зеркало можно не использовать, а на опорный фотодетектор направлять часть излучения, которая отражается от передающей оптической системы. В опорном фотодетекторе оптический сигнал преобразуется в электрический и, поступая в измеритель временных интервалов, формирует сигнал «Старт».

Отражаясь диффузно от цели, излучение попадает на приёмную оптическую систему, которая фокусирует его на фотоприёмное устройство. В данном устройстве оптический сигнал преобразуется в электрический и поступает на пороговый детектор, отсеивающий шумы. Далее сигнал поступает на измеритель временных интервалов, в котором формируется команда «стоп» и необходимая для пользователя информация выводится на индикатор дальности.

В качестве фотоприёмника целесообразно применять лавинный фотодиод (ЛФД). Работа ЛФД основана на лавинном пробое, который возникает, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Это позволяет получить высокую чувствительность и большое усиление сигнала фотодиода. Отечественной промышленностью освоены ЛФД на основе германия, оптимальные для работы в ЛД с длиной волны 1,06 мкм. При их использовании в составе дальномеров, работающих на длине волны 1,54 мкм, возникают следующие трудности: при температуре ниже –30 °С диапазон длин волн безопасных дальномеров соответствует краю полосы собственного поглощения германия, и чувствительность приёмников при этих температурах существенно снижается; при повышенных температурах в германии невозможно обеспечить достаточно высокий коэффициент умножения.

Условия сопряжения ЛД с оптической схемой, имеющей сравнительно невысокое пропускание и ограниченный диаметр приёмного зрачка, требуют обеспечения высокой

чувствительности порядка 10^{-8} Вт фотоприёмного устройства (ФПУ) во всем температурном диапазоне при длительности импульса 20–30 нс, т. е. в несколько раз выше, чем в серийных ФПУ, например ФПУ-20.

Рассмотрены два направления построения ФПУ с повышенной чувствительностью: введение в состав ФПУ с германиевым ЛФД системы термостабилизации ЛФД на основе двухкаскадного элемента Пельтье TEC2-19006; использование ЛФД на основе соединения InGaAs, обеспечивающего коэффициент умножения не менее 10 без термостабилизации.

С помощью макета ФПУ с термохолодильником, стабилизирующим температуру лавинного фотодиода в диапазоне 5–8 °С, в сочетании с усовершенствованием схемы электронного усиления, получены следующие параметры: нагрузка 300 Ом, 10 пФ; длительность выходного импульса 10–60 нс; время выхода термохолодильника на режим 2 с. Недостатками данного макета ФПУ являются постоянное потребление мощности термохолодильником, а также необходимость системы термостабилизации и радиатора массой не менее 100 г.

Более простым конструктивно и имеющим меньшую массу оказался вариант ФПУ на основе InGaAs G8931-20 («Hamamatsu», Япония). Экспериментальный образец подобного ФПУ обеспечил такие же параметры, как германиевый ЛФД с термостабилизацией, но образцу не требуется термохолодильник. Недостатками этого варианта являются большая стоимость ЛФД и отсутствие отечественного аналога.

Сравнительные характеристики рассмотренных вариантов ФПУ приведены в табл. 2.

Оценка энергии излучения импульса лазера. В оптико-электронных системах допустимы только два конкретных решения: «сигнал есть» и «сигнала нет». При этом возможны только две ситуации – сигнал поступил на вход ФПУ, либо сигнал отсутствует. В каждой из этих ситуаций система может принять любое из указанных решений – «сигнал есть», либо «сигнала нет», так что возникает четыре комбинации.

1. Сигнал отсутствует. Решение – «сигнала нет». Принято правильное решение об отсутствии сигнала.

2. Сигнал не поступил. Решение – «сигнал есть». Это ошибочное решение называют «ложной тревогой».

3. Сигнал поступил. Решение – «сигнала нет». Это ошибочное решение называют «пропуск сигнала».

4. Сигнал поступил. Решение – «сигнал есть». Принято правильное решение о наличии сигнала.

Найдём минимальную мощность сигнала $U_{\min}$, которую может распознать система исходя из вероятности «ложной тревоги» $P_{\text{л.т}} \leq 0,01$. Согласно [3], задав значение шума $U_{\text{ш}}$ равным $1 \cdot 10^{-9}$ Вт, вычислим минимальную мощность сигнала $U_{\min} = 3,115 \cdot 10^{-9}$ Вт из следующего уравнения:

$$P_{\text{л.т}} = \left\{ U_{\text{ш}} / \left[U_{\min} (2\pi)^{1/2} \right] \right\} \exp[-U_{\min}^2 / (2U_{\text{ш}}^2)].$$

При вероятности правильного обнаружения сигнала $P_{\text{пр}} \geq 0,99$ [3], считая известными $U_{\text{ш}} = 1 \cdot 10^{-9}$ Вт и $U_{\min} = 3,115 \cdot 10^{-9}$ Вт, определим необходимый полезный сигнал $U_{\text{н.с}}$ на входе в приёмный канал из формулы

$$P_{\text{пр}} = 1 - U_{\text{ш}} / [(U_{\text{н.с}} - U_{\min})(2\pi)^{1/2}] \exp[-(U_{\text{н.с}} - U_{\min})^2 / (2U_{\text{ш}}^2)].$$

Округлив вычисленное значение $U_{\text{н.с}} = 6,23 \cdot 10^{-9}$ Вт до $7 \cdot 10^{-9}$ Вт, получим отношение сигнал–шум 7:1. Расчёты показали, что для чёткого распознавания пороговым детектором сигнала при заданных вероятностях «ложной тревоги» $P_{\text{л.т}} \leq 0,01$ и правильного обнаружения сигнала $P_{\text{пр}} \geq 0,99$ необходимо превысить мощность излучения на входе в приёмный канал в 7 раз. Выбрав в качестве фотоприёмника указанные в табл. 2 изделия с пороговой чувствительностью $5 \cdot 10^{-9}$ Вт, найдём минимальную мощность распознаваемого системой сигнала $35 \cdot 10^{-9}$ Вт.

Пропускание оптической системы дальномера. Передающая и принимающая оптические системы ЛД имеют высокие коэффициенты пропускания (например, не менее 90 %), но необходимо учесть встраивание дальномера в различные оптические системы. Например, пропускание четырехлинзового телескопа Галилея передающего канала и трехлинзовой системы принимающего канала одного ЛД (Красногорский завод им. С. А. Зверева) составляют 91%. При наличии в оптических системах защитных стёкол, светофильтров и оптических элементов их пропускание обычно не превышает 40 %.

Поэтому общее пропускание излучения через передающую и принимающую оптическую системы ЛД с учётом возможности его встраивания в другие системы составит 33 %.

Точное определение дальности до объекта требует селекции сигналов приёмника, так как в поле зрения приёмника попадают отражённые сигналы не только от самих объектов, но и от стоящих рядом и находящихся между излучателем и объектом. Одним из основных способов селекции является метод

Т а б л и ц а 2

Технические характеристики фотоприёмников

Характеристика	ФПУ-20	ФПУ-20 + элемент Пельтье	ЛФД G8931-20
Рабочая длина волны, мкм	1,064–1,57	1,064–1,570	0,95–1,7
Спектральный диапазон чувствительности по уровню 0,5, мкм	0,9–1,57	0,9–1,57	0,95–1,7
Тип фотодиода	Ge ЛФД	Ge ЛФД	InGaAs
Длительность лазерного импульса, нс	9–50	9...50	0,1–10
Диаметр чувствительной площадки, мкм	150	150	200
Пороговая чувствительность на длине волны 1,54 мкм и при длительности импульса 20 нс, Вт	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Диапазон температур окружающей среды, °С	5–8	–50...+65	–50...+65
Масса фотоприёмника, г	70	70+250	1
Потребляемая мощность, Вт	$P_{\text{ф}}$	$P_{\text{ф}} + 72$	$P_{\text{ф}}$

стробирования (выделения) некоторого интервала на временной оси измерения, при котором можно получать сигнал в узком диапазоне расстояний. Также можно измерять дальность по первому, последнему или сигналу максимальной мощности от объекта. Применение этих способов позволяет отфильтровать сигналы от посторонних объектов. Часто удобно использовать комбинированную систему селекции целей, в которой оператор сам сможет выбирать, каким образом выделять сигнал от объекта и контролировать корректность определённого системой расстояния.

Оценим необходимую мощность излучения лазера для измерения дальности до объекта. После прохождения излучением оптической системы до объекта и обратно необходимая мощность примет значение:

$$U_1 = U_{\min} / R_{\text{онт}} = 1,067 \cdot 10^{-7} \text{ Вт},$$

где $U_{\min} = 35 \cdot 10^{-9}$ Вт – минимальная мощность сигнала, распознаваемого системой (для импульса 20 нс); $R_{\text{онт}} = 0,33$ – коэффициент пропускания оптической системы ЛД.

Технические характеристики твёрдотельных ЛД обычно рассчитывают на измерение расстояния до объекта типа «танк» размером 2×3 м на расстоянии 5 км и крупногабаритного объекта на расстоянии 10 км. При этом диаметр лазерного пучка может быть как меньше (объект назовём серой бетонной стеной), так и больше размеров объекта (в этом случае задают размеры диаметра лазерного пучка и объекта). По отношению площади пучка к площади объекта рассчитывается коэффициент перекрытия пучка объектом, который в рассматриваемом случае для «танка» больше единицы, а для «бетонной стены» меньше единицы.

Так как длина волны $\lambda = 1,54$ мкм находится в окне прозрачности атмосферы, поглощение сигнала минимальное и коэффициент пропускания сигнала в атмосфере вычислим по формуле

$$\alpha = (3,91/S_m)(0,55/\lambda)^{0,583\sqrt{S_m}},$$

где S_m – метеорологическая дальность видимости.

Мощность излучения после прохождения атмосферной трассы до объекта и обратно получили следующим образом: $U = U_0(e^{-2\alpha l})$, где U_0 – мощность пучка на выходе из лазера; l – расстояние от лазера до объекта; α – коэффициент пропускания сигнала в атмосфере.

Выберем для расчёта диаметр приёмной оптической системы 60 мм, угловой размер крупногабаритного объекта 15', расходимость пучка излучения 1,6' (найдена экспериментально с применением оптической системы с увеличением 10х телескопа Галилея в качестве передающей), допущение о диффузном рассеивании падающего на поверхность объекта светового излучения с коэффициентом отражения 0,1 от «танка» и 0,2 от «бетонной стены». Тогда при $S_m = 10$ км и объекте типа «танк» на расстоянии 5 км мощность излучения лазера должна быть не меньше $2,8 \cdot 10^5$ Вт. При крупногабаритном объекте, расстоянии 10 км и $S_m = 20$ км мощность излучения лазера должна быть не меньше $1,3 \cdot 10^5$ Вт.

Таким образом, с учётом оптических потерь на прохождение излучения от прибора до приёмника и поглоще-

ния в оптических элементах, необходимая мощность излучения лазера составляет не больше $3 \cdot 10^5$ Вт. При этом энергия излучения, выходящего из лазера, при длительности импульса 20 нс равна 6 мДж, что меньше 8 мДж – безопасного порога для глаз человека. Поэтому использование твёрдотельных лазеров с накачкой мощными лазерными диодами может использоваться не только в системах обеспечения безопасности, когда человек находится на расстояниях до 700 м [1], но и в ЛД для измерения дальности на расстояниях 5–10 км от интересующего наземного объекта.

Заключение. Излучение лазера с длиной волны 1,54 мкм может эффективно использоваться в ЛД с техническими характеристиками, не уступающими существующим, но с энергией импульса излучения меньше 8 мДж – безопасного порога для зрения человека.

Рассмотрены два примера построения ФПУ с повышенной чувствительностью в диапазоне температур окружающей среды $-50...+65$ °С. Предложены системы с применением как отечественных комплектующих, так и зарубежных.

Показано, что для чёткого распознавания пороговым детектором сигнала при вероятностях «ложной тревоги» $P_{\text{лт}} \leq 0,01$ и правильного обнаружения сигнала $P_{\text{пр}} \geq 0,99$ необходимо превысить мощность излучения на входе в приёмный канал в 7 раз по сравнению с пороговой чувствительностью лазерного фотодиода.

Рассчитана необходимая мощность излучения лазера с учётом пропускания излучения через передающую, принимающую оптическую систему ЛД. Учтена возможность его встраивания в другие системы. Оценена мощность излучения лазера для измерения дальности до объекта с учётом метеорологической дальности видимости, возможных соотношений размеров объекта и пучка лазерного излучения в зоне объекта.

Предложена система накачки активного элемента линейками лазерных диодов, что позволит повысить коэффициент полезного действия лазерного излучателя и одновременно снизить энергетическую нагрузку на активный элемент. При этом возможно увеличение частоты следования импульсов ЛД, сокращение габаритных размеров излучателя, его массы и потребляемой мощности.

Л и т е р а т у р а

1. Волков В. Г. Твёрдотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 142–181.
2. Сторощук О. Б. Высокоэффективный неохлаждаемый импульсно-периодический лазер на активном элементе из кристалла $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ с повышенной частотой следования импульсов излучения // Исследовано в России. 2002. Т. 5. С. 671–681.
3. Малашин М. С., Каминский Р. П., Борисов Ю. Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983.

Дата принятия: 31.01.2017.