



## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Н**астоящее издание является продолжением книги «Лазеры: устройство и действие», вышедшей в издательстве «Лань» в 2016 г.

В учебном пособии представлены описания и примеры реализации современных лазерных технологий, некоторые из которых до сих пор вообще широко не обсуждались. Во многом это определяется большим собственным практическим опытом авторов (преподавателей, научных сотрудников и инженеров Института лазерной техники и технологий, кафедры лазерной техники БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова и НПП «Лазерные системы»), полученным в результате участия в реальных разработках в соответствующих предметных областях.

Цель издания – дать читателю целостное представление о применениях лазеров: от определения подходов к решению реальных задач, оценок условий эксплуатации, выбора технологий, формирования структуры лазерных систем и требований к их функциональным характеристикам, до технической реализации лазерных комплексов, оценки технологических параметров и описания конкретных примеров. При этом мы старались максимально полно показать отечественные достижения в предметной области.

Объединение описаний практически всех наиболее значимых применений лазеров в одной книге представляется особенно полезным в учебнике для широкого набора инженерных специальностей, где читателю с единых позиций дается максимально полное представление о возможностях лазерной техники, достоинствах и преимуществах применения лазеров для решения самых разнообразных задач.

Последний раз книга с подобным названием («Применение лазеров») выходила на русском языке более сорока лет назад. С тех пор как возможности лазеров, так и области их применения существенно расширились.

Несмотря на большое количество вышедших книг по лазерным технологиям, практически все они специализированы на отдельных достаточно узких областях применения и предназначены либо для обеспечения специальных курсов, либо для специалистов, работающих в конкретных направлениях. В то же время в России так и не появилось отдельного учебника или справочника, обобщающего современные представления обо всем многообразии лазерных технологий, в которых применения лазеров рассматриваются по возможности широко. Поэтому мы с коллегами постарались в меру наших сил восполнить этот пробел.

Авторы признательны рецензентам д. т. н., профессору В. П. Вейко и д. физ.-мат. н., профессору Г. Г. Щукину, за внимательное отношение и ценные замечания и предложения.

Авторы искренне благодарны всем коллегам за постоянное интересное творческое сотрудничество, а также внимание, терпение и поддержку во время нашей работы над книгой.

ЧАСТЬ I

**ЛАЗЕРЫ**

**В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

А. В. Чугреев, М. А. Коняев

## ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ I

**С**войства лазерного излучения – малая расходимость пучка света, монохроматичность, когерентность, стабильность частоты колебаний световой волны, большая плотность потока энергии и высокая пиковая мощность импульсов – делают лазерные источники незаменимыми в различных областях науки и техники. К 2015 году более 80 ученых по всему миру стали нобелевскими лауреатами за открытия в области оптики и лазерной физики.

Оптические методы применялись для проведения различных измерений издавна. С появлением лазеров и разработкой новых источников излучения с различными уникальными свойствами, оптические измерения вышли на новый уровень.

В этой части учебного пособия рассматривается использование лазеров для измерения различных параметров и величин, для дистанционного зондирования и для регистрации объемных изображений. Уделено внимание использованию лазеров в метрологии. Приводятся технические характеристики наиболее распространенных приборов, дается описание основных составных элементов.



## ГЛАВА 1

# ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

### 1.1.

#### ЛАЗЕРНАЯ ДАЛЬНОМЕТРИЯ

**О**птические методы позволяют бесконтактно и с высокой точностью проводить измерения расстояний, скорости объектов. Бесконтактные измерения расстояний методом триангуляции проводились еще до нашей эры. Интерферометрические методы контроля перемещений появились сравнительно недавно, два века назад, с развитием представлений о волновой природе света. Появление лазеров существенно расширило возможности оптических методов измерения расстояний и перемещений благодаря особенностям лазерного излучения.

По способу детектирования можно выделить несколько основных методов. Области их применения, обусловленные спецификой метода, варьируются в широких пределах. При измерениях расстояний используются различные принципы и различные физические свойства лазерного излучения. В зависимости от выбранного метода, проведение измерений с помощью лазеров имеет одно или несколько неоспоримых преимуществ, в том числе: высокую точность, дальность действия, быстроту проведения измерений, незаметность и т. д.

Методика измерений выбирается исходя из требуемой дистанции и точности измерений, ограничений по стоимости и надежности оборудования, лазерной безопасности и т. д. Лазерные дальномеры способны проводить измерения с очень большой скоростью (до нескольких миллионов измерений в секунду), либо очень высокой точностью измерений, либо на больших дистанциях и в большом диапазоне дальностей (от очень малых до очень больших расстояний). В некоторых наиболее совершенных устройствах возможно сочетание нескольких этих свойств.

К отдельным преимуществам лазерных методов измерения следует отнести следующие:

- высокая точность измерений;

– бесконтактность измерений и отсутствие ощутимого воздействия на объект измерений;

– высокая скорость получения результатов;

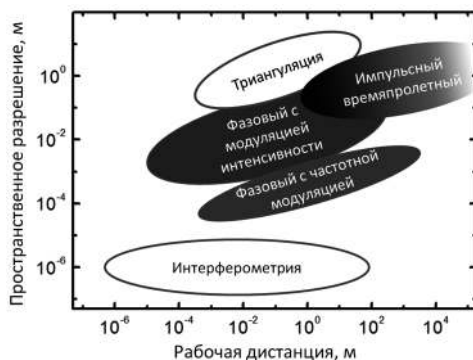
– большая дальность измерений.

Исходя из физических принципов, технологии измерений расстояний оптическими методами можно разбить на *следующие категории*:

- триангуляционные;
- времяпролётные;
- интерферометрические;
- фазового сдвига;
- частотной модуляции.

На рис. 1.1 сравниваются диапазоны измерений и точности различных методов измерения расстояний. Их достоинства и недостатки сведены в табл. 1.1.

*Триангуляция* – геометрический метод, используемый для измерения расстояний. Сам метод оптической триангуляции не обязательно предполагает использование лазеров, но использование лазерного излучения расширяет его возможности. Триангуляционный метод контроля основан на расчете искомого расстояния через соотношения треугольника. Он позволяет измерять как значение расстояния от датчика до контролируемого объекта, так и его относительное изменение. Контролируемое расстояние может иметь масштаб от нескольких микрометров (например, при контроле поверхности кристаллов микроэлектроники) до сотен и тысяч метров (при геодезических применениях). Датчики, использующие принцип триангуляции, широко применяются в промышленности для измерения малых дистанций и формы предметов.



**Рис. 1.1**

Рабочие дистанции и пространственное разрешение (точность измерений) для различных типов дальномеров

*Времяпролётный метод* (или импульсный метод) – основан на измерении времени прохода лазерного импульса от измерительного прибора до цели и обратно. Такие методы обычно используются для измерения больших расстояний, от сотен метров до тысяч километров. Точность устройств для измерения расстояний времяпролётным методом зависит от параметров лазерного импульса, быстродействия электроники фотоприемной схемы, и варьируется от нескольких миллиметров до нескольких метров.

Таблица 1.1

## Методы измерения расстояния

Название метода	Достоинства	Недостатки
<b>Триангуляционный</b>	Простота, надежность, быстродействие, возможно использование недорогих компонентов	Для точных измерений необходима большая оптическая база, т. е. источник излучения и фотоприемник должны быть разнесены в пространстве. По этой причине используется в основном на малых дистанциях
<b>Импульсный время-пролетный</b>	Удобство одновременного измерения дальности до нескольких целей. Простота излучаемых импульсов, длящихся очень малое время, и принимаемых сигналов	Необходимость использования опасных для глаз лазеров с мощными импульсами; невозможность измерения малых дистанций, ограничения по точности
<b>Фазовый</b>	Малая мощность излучения, безопасность, низкая цена	Большое время измерения (не менее нескольких секунд), небольшая дистанция измерений
<b>Метод частотной модуляции</b>	Позволяет измерять малые и большие дальности. С использованием относительно безопасного для глаз непрерывного лазера можно измерять дальности в десятки километров с высокой точностью	Высокие требования к лазерному источнику и фотоприемной электронике, высокая стоимость
<b>Интерферометрический</b>	Контроль перемещений с наибольшей точностью	Используется только для измерения малых расстояний и перемещений

*Интерферометрический контроль* позволяет измерять малые перемещения с точностью до десятых долей длины световой волны. Метод применяется для контроля механических перемещений в прецизионных механических устройствах. К недостаткам метода следует отнести неоднозначность результата измерений при перемещениях больших, чем длина волны света, используемого для измерения, а также малую скорость проведения измерений.

*Метод фазового сдвига* основывается на использовании непрерывного лазерного излучения, модулированного по интенсивности. Этот метод широко используется в недорогих бытовых дальномерах, предназначенных для измерения расстояний до 100 метров. Дальномеры на основе метода фазового сдвига позволяют измерять расстояния с миллиметровой точностью.

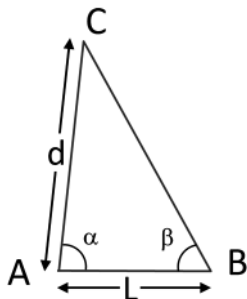
В измерениях *по методу частотной модуляции* варьируется не интенсивность, а частота лазерного излучения. Этот метод меньше подвержен влиянию внешних помех, так как частота света, в отличие от его интенсивности, не меняется при направлении луча на неоднородную поверхность или за счет движения атмосферы. Метод частотной модуляции работает на малых и на больших расстояниях. Однако для дальномеров с частотной модуляцией света нужны лазеры с монохроматическим, изменяющимся по заданному закону излучением, электроприбора высокого класса, и поэтому они весьма дороги.

## 1.2.

### ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД

С помощью простых законов тригонометрии еще в глубокой древности люди научились измерять расстояния до недоступных предметов и высоту сооружений. Тригонометрические построения позволяют рассчитать длины сторон треугольника, если известна другая сторона и углы. Метод триангуляции используется для измерений расстояний, контроля перемещений, анализа формы предметов. Лазер при этом нужен для указания и подсветки точки измерения; использование именно лазера удобно тем, что за счет малой расходимости лазерного луча удается получить достаточную освещенность на удаленной цели.

При триангуляционных измерениях источник лазерного излучения и оптическая система фотоприемника разнесены между собой на некоторое расстояние. Лазер, фотоприемник и объект измерений образуют треугольник с известной стороной и двумя углами при ней. Зная значения углов, можно с достаточной точностью не только определить расстояние до объекта, но и установить его положение в пространстве и отследить перемещение. Принцип триангуляции проиллюстрирован на рис. 1.2.



**Рис. 1.2**  
Использование  
принципа триангуляции  
для измерения расстояний

Пусть источник лазерного излучения расположен в точке *A*. Фотоприемник находится в точке *B*, а точка *C* соответствует местоположению цели. Расстояние до цели *d* вычисляется по известным значениям базы *L* и углов  $\alpha$  и  $\beta$  с использованием уравнения (1.1):

$$d = L \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (1.1)$$

Это уравнение справедливо для плоской или евклидовой геометрии. Результаты расчетов становятся неточными, если расстояния сравнимы с радиусом кривизны Земли. В этом случае ис-

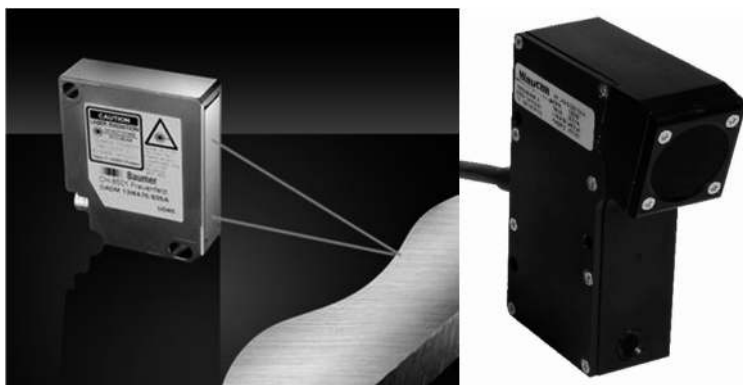


пользуют более сложные уравнения сферической тригонометрии.

Для триангуляционного дальномера используются видимые или инфракрасные источники света. Использование лазера видимого диапазона удобно при настройке. Максимум чувствительности недорогих и эффективных фотодетекторов на кремниевой основе также лежит в видимом диапазоне. Лазерный источник для триангуляции должен иметь высокое качество пучка, чтобы осветить небольшое пятно на большом расстоянии. Также требуется достаточная мощность излучения, особенно для целей с рассеянным отражением.

В портативных триангуляционных датчиках обычно используются наиболее распространенные полупроводниковые лазеры 635 и 650 нм (рис. 1.3). Эти длины волн детектируются относительно недорогими кремниевыми фотоприемными матрицами. Для повышения соотношения сигнал/шум излучение лазера может быть модулировано по интенсивности синхронно с фотоприемником.

Если использование видимого луча нежелательно или недопустимо из-за опасности для глаз, возможно использование инфракрасных лазеров диапазона 1.5 мкм.



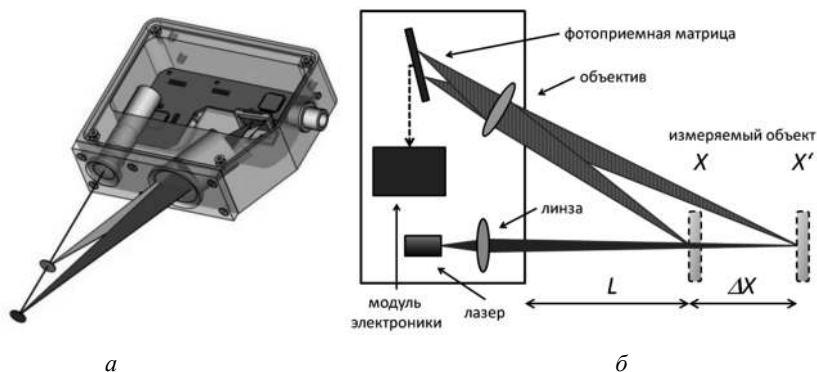
**Рис. 1.3**

Промышленные триангуляционные лазерные дальномеры

Метод триангуляции часто применяется в промышленных датчиках с диапазоном измерений от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Например, он используется для бесконтактного контроля расстояния до обрабатываемых поверхностей, в автоматических сварочных комплексах, поиска неровностей и т. д. Принцип действия такого датчика понятен из рис. 1.4.

Луч лазера, пройдя коллимирующую линзу, освещает точку на поверхности объекта, находящегося в положении  $X$  или  $X'$ . Изображение этой подсвеченной точки собирается с помощью объектива на многоэлементной фотоприемной матрице. В зависимости от удаленности объекта, освещенная точка проецируется

на различных участках матрицы. Из координаты освещенного пикселя матрицы электронный модуль рассчитывает расстояние до поверхности объекта.



**Рис. 1.4**

Конструкция прибора (а) и принцип измерения расстояния до поверхности с помощью лазерного триангуляционного сенсора (б)

Точность измерений определяется геометрией (т. е. базой триангуляции), количеством пикселей матрицы, уровнем шума матрицы и ее динамическим диапазоном измерений, методом обработки сигнала. Точность измерений триангуляционного сенсора может достигать одной тысячной доли измеряемого расстояния.

Быстродействие триангуляционного дальномера зависит от скорости считывания информации с матрицы. При использовании быстрых диодных линеек измерения можно проводить с частотой до нескольких кГц. Высокая скорость измерений позволяет использовать датчик для отслеживания положения движущейся или вибрирующей детали, подстраивать положение лазерной сварочной головки, контролируя положение области расплава и т. д.

### 1.3.

#### ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

Одним из наиболее простых и распространенных способов измерения расстояний и перемещений является метод измерения времени распространения сигнала до объекта и обратно – так называемый метод времени пролета.

Дальномер посылает короткий лазерный импульс и принимает отраженный от цели сигнал (рис. 1.5). Для измерения можно использовать лишь один лазерный импульс.

На этом же принципе измерений основана локация радарными в радиодиапазоне. Основными преимуществами времяпролетного метода являются его быстродействие и большие дистанции измерений.

Зная скорость распространения света в атмосфере и определив временной промежуток между моментами выхода лазерного импульса и прихода отраженного сигнала, можно рассчитать расстояние до цели.

Расстояние  $d$  рассчитывается по формуле:

$$d = 2c \cdot \Delta t, \quad (1.2)$$

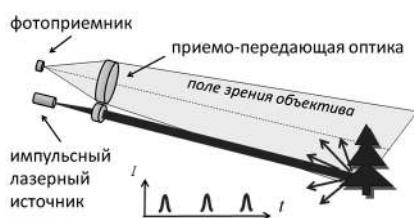
где  $c$  – скорость света,  $3 \cdot 10^8$  м/с,  $\Delta t$  – временной интервал между моментами выхода лазерного импульса и регистрации сигнала.

Поскольку скорость света велика, импульсный времяпролетный метод непригоден для измерения малых расстояний: электроника не успевает обработать сигнал. Для времяпролетных дальномеров существует так называемая «слепая зона» – область пространства непосредственно перед дальномером, в котором определение дальности до объекта невозможно.

Импульсный времяпролетный способ измерения расстояний обычно используется на дистанциях от нескольких десятков метров до нескольких километров, хотя возможно измерение и больших расстояний. Военные времяпролетные дальномеры позволяют мгновенно измерить дистанцию до цели в диапазоне до десятков километров. Максимальная дальность измерений определяется мощностью импульсов, чувствительностью фотоприемной аппаратуры и наличием мешающих факторов, в том числе оптической засветки, атмосферных помех.

Качество лазерного пучка имеет определяющее значение при измерениях на больших дистанциях. Как следует из законов оптики, для того, чтобы получить луч с малой расходимостью, надо расширить пучок лазерного излучения с помощью передающего телескопа. Для увеличения собираемого светового потока увеличивают апертуру принимающего телескопа.

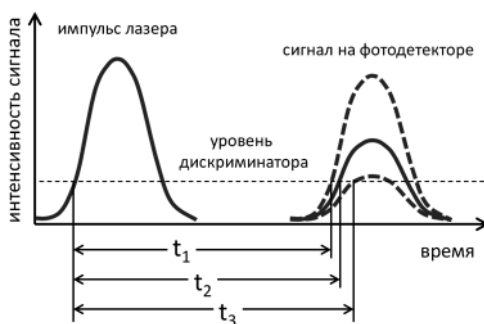
*Максимальная дальность измерений* определяется энергией импульсов лазера, чувствительностью фотоприемника, коэффициентом отражения поверхности цели, интенсивностью фоновой засветки, технологией обработки принимаемого сигнала, статистикой проведения измерений (возможности усреднения результатов одиночных измерений).



**Рис. 1.5**

Основные оптические элементы  
импульсного дальномера  
и временная диаграмма измерений

*Точность измерения расстояния* до цели зависит от крутизны фронтов нарастания или спада лазерного импульса (измеряется временной интервал между соответствующими границами фронтов), скорости обработки сигнала фотоприемником и электронной схемой. Причиной возможных погрешностей является изменения интенсивности принимаемого сигнала и, соответственно, неточность измерения положения фронта импульса. Поскольку момент регистрации отраженного импульса определяется по некоторому уровню сигнала (рис. 1.6), то результат измерения расстояния зависит от отражательной способности цели, ее габаритов и т. д.



**Рис. 1.6**

Погрешности измерения расстояний,  
связанные с флуктуациями интенсивности отраженного сигнала

*Разрешающая способность прибора по дальности* определяется длительностью импульса. Времяпролетный лазерный дальномер может различить два отдельных объекта в том случае, если полученные от них сигналы не перекрываются во времени. Для этого необходимо, чтобы два объекта были разнесены в направлении лазерного луча не меньше, чем на расстояние, равное произведению длительности импульса на скорость света. Обычно используются лазеры с длительностью импульса 0.1...20 нс. Импульс в 0.1 нс имеет пространственную протяженность в воздухе или в вакууме 3 см, 10 нс — около 3 м.

Также минимальное измеряемое расстояние и пространственное разрешение дальномера зависят от быстродействия электроники фотоприемной схемы. Чтобы дальномер работал и на больших, и на малых расстояниях, фотоприемная схема (фотоприемник и электроника) должна обладать большим динамическим диапазоном чувствительности и низким собственным уровнем шумов.

Полученный импульс обрабатывается высокоскоростной электронной схемой, ширина полосы пропускания которой определяет скорость обработки сигнала. В момент выхода лазерного импульса начинается отсчет времени, который закан-

чивается после прихода стоп-импульса, формируемого при приеме отраженного сигнала. Погрешность измерения равна длительности одного такта.

С точки зрения количества тактов, расстояние до цели определяется уравнением:

$$d = cN / 2f_{\text{clk}}, \quad (1.3)$$

где  $N$  – число тактовых импульсов, рассчитанное между сигналами старта и остановки,  $f_{\text{clk}}$  – тактовая частота.

Среди факторов, снижающих точность измерений, необходимо перечислить собственный шум лазера, т. е. нестабильность интенсивности импульсов, джиттер (нестабильность последовательности импульсов во времени, дрожание сигнала). Иные связанные с шумом проблемы могут возникнуть из-за неоднородности рассеяния света на мишени (спекл-эффектов, т. е. наблюдаемой «зернистой» картины отраженного лазерного излучения), неоднородности атмосферы.

В качестве фотоприемников импульсного дальномера обычно используются PIN-фотодиоды или лавинные фотодиоды. В видимом и ближнем ИК-диапазоне это кремниевые фотодиоды, в диапазоне 1.5 мкм – на основе InGaAs. Фотодиод должен обладать высокими частотными характеристиками, т. е. быть способным детектировать форму лазерного импульса без искажений. Для детектирования импульсов длительностью 10 нс требуется фотодиод, время нарастания и спада сигнала которого не превышает 3...5 нс, что соответствует частотной полосе пропускания 200...300 МГц.

Если лазер дальномера работает в видимом диапазоне, то детектирование сигнала может проводиться фотоэлектронными умножителями, которые обладают высокой чувствительностью, быстрым откликом и имеют низкий уровень собственных шумов.

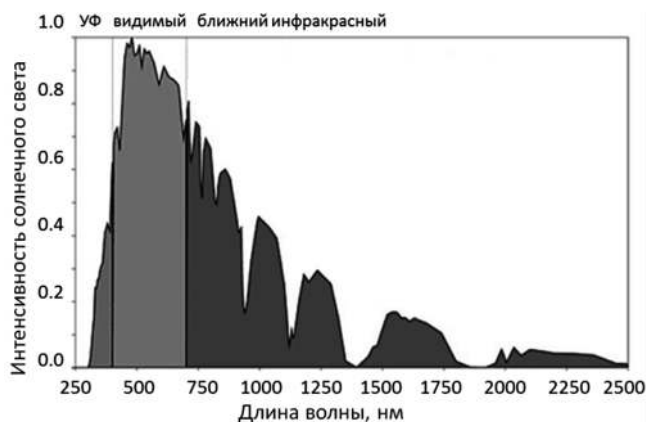
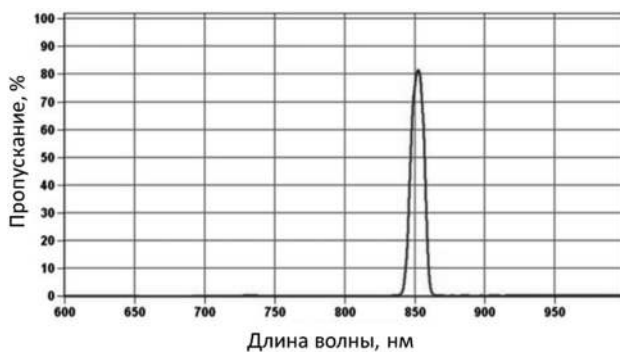
В оптической схеме дальномеров используются полосовые светофильтры (рис. 1.7), пропускающие излучение лазера и блокирующие свет на других длинах волн, – это уменьшает фоновую засветку фотодетектора.

При отражении от диффузно отражающей поверхности световой поток, попадающий на фотоприемник, сильно убывает с увеличением расстояния. Чтобы увеличить уровень сигнала на фотодетекторе, необходимо повышать энергию импульсов лазера и увеличивать апертуру фотоприемной оптики.

Качество лазерного пучка имеет определяющее значение при измерениях на больших дистанциях. Как следует из законов оптики, для того, чтобы получить луч с малой расходимостью, надо расширить пучок лазерного излучения с помощью передающего телескопа. Для увеличения принимаемого светового потока необходимо также увеличивать апертуру принимающего телескопа.

Максимальная дальность измерения расстояния определяется энергией импульсов лазера, чувствительностью фотоприемника, коэффициентом отражения

поверхности, до которой измеряется расстояние, интенсивностью фоновой за- светки, анализом принимаемого сигнала, статистикой проведения измерений (возможности усреднения результатов одиночных измерений).

*a**б**в***Рис. 1.7**

Распределение энергии в спектре солнечного света (а);  
внешний вид полосовых светофильтров (б);  
спектр пропускания полосового светофильтра с центральной длиной волны 850 нм (в)

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)