

Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений

И.А. Разенков*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.04.2012 г.

Предлагается проект безопасного для глаз лидара высокого спектрального разрешения, работающего на длине волны 532 нм. Абсолютная калибровка обеспечивается наличием молекулярного канала, в котором фильтрация аэрозольного сигнала осуществляется кюветой с парами иода. В передатчике расширение лазерного пучка через приемный телескоп обеспечит высокую термомеханическую стабильность конструкции, что позволит установить малое поле зрения и существенно снизить уровень фоновой засветки. Показана детальная оптическая схема приемопередатчика, в которой для повышения стабильности передающая и приемная части располагаются по разные стороны оптической скамьи. Дается описание лазера, и приводятся характеристики системы. Проведен расчет лидарных сигналов и ошибок измерений, который показал, что для достижения 10%-й точности при определении аэрозольного коэффициента обратного рассеяния и оптической толщины в пределах тропосферы время осреднения сигнала должно быть не более 1 мин. Предлагаемая система должна работать непрерывно и автономно.

Ключевые слова: лидар высокого спектрального разрешения, молекулярное рассеяние, атмосферный аэрозоль; high spectral resolution lidar, molecular scattering, atmospheric aerosol.

1. Постановка задачи

Аэрозольный лидар — это прибор, действие которого основано на рассеянии излучения на молекулах и частицах. Лидар состоит из импульсного лазера и приемного телескопа и предназначен для дистанционного обнаружения частиц в атмосфере и определения коэффициентов рассеяния [1, 2]. Для непрерывных наблюдений предпочтительно использовать лазер с диодной накачкой, у которого частота повторения импульсов высокая, а энергия импульсов низкая. Лидар, в котором применяется лазер, имеющий частоту повторения импульсов несколько кГц и энергию импульсов менее миллиджоуля, называют «микроразрешенным лидаром» (англ. micropulse lidar). Такие системы безопасны для глаз человека.

Наиболее известным микроимпульсным безопасным для глаз лидаром является разработка NASA начала 90-х гг. XX в. [3]. Эту систему назвали MPL, и ее продажей занималась фирма SESI. Десятки таких лидаров работают по всему миру в составе лидарной сети (MPL-Net). В лидаре MPL расширение лазерного пучка осуществляется через приемный 18-см телескоп (Кассегрен), который является и передатчиком и приемником. В первых образцах телескоп был собран в алюминиевой трубе, поэтому положение фокуса было чувствительно к изменениям

температуры в помещении. Изменение температуры на 10 °С приводило к ошибке измерений коэффициента обратного рассеяния на 50% и более [4].

Лазер лидара MPL имеет длину волны 532 нм или близкую, частота повторения импульсов 2500 Гц, энергия импульсов 10 мкДж. Поле зрения составляет 100 мкрад. В качестве антенного переключателя используются светоделительный куб и деполаризатор. Такой антенный переключатель не позволяет регистрировать кросскомпоненту эхосигнала и определять деполаризацию, и при передаче половина посылаемой в атмосферу мощности не используется. В руководстве к лидару MPL (Micropulse Lidar Handbook, 2006) [5] в разделе «абсолютная калибровка» написано, что «абсолютная калибровка измеренного профиля является проблематичной».

Для лидара обычная процедура калибровки установления зависимости между показаниями прибора и измеряемой величиной не подходит, так как лидар регистрирует эхосигнал P_{Σ} , равный сумме молекулярного P_m (рассеяние Рэлея) и аэрозольного P_a (рассеяние Ми) сигналов. Проблема калибровки лидара решается только при наличии молекулярного приемного канала.

Запишем лидарное уравнение для мощности эхосигнала (суммарный приемный канал) в виде

$$P_{\Sigma}(r) = P_m(r) + P_a(r) = \\ = P_{\eta\Sigma} G(r) \frac{A}{r^2} \frac{c \Delta t_{\eta}}{2} (\beta_m(r) + \beta_a(r)) \exp(-2\tau(r)), \quad (1)$$

* Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru).

где r – расстояние; P – средняя мощность лазерного импульса длительностью $\Delta t_{\text{л}}$; η_{Σ} – эффективность приемника; $G(r)$ – геометрическая функция лидара; A – площадь приемного телескопа; c – скорость света; $\beta_m(r)$ – коэффициент обратного молекулярного рассеяния; $\beta_a(r)$ – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; $\tau(r) = \int_0^r \alpha(r') dr'$ – оптическая

толща атмосферы; $\alpha(r)$ – коэффициент ослабления. Если пренебречь поглощением излучения, то коэффициент $\alpha(r)$ есть сумма коэффициентов полного молекулярного $\alpha_m(r)$ и полного аэрозольного $\alpha_a(r)$ рассеяния.

В уравнении (1) есть две неизвестные величины – коэффициенты обратного $\beta_a(r)$ и полного $\alpha_a(r)$ аэрозольного рассеяния. Связь между этими коэффициентами не является универсальной, поэтому для решения уравнения (1) при зондировании простым аэрозольным лидаром ее обычно задают на основе разного рода моделей [6, 7], и *результат будет зависеть от выбора модели*.

Для калибровки лидара, т.е. для определения абсолютной величины коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $\beta_a(r)$, нужно использовать коэффициент молекулярного рассеяния $\beta_m(r)$, который можно рассчитать, если известна температура воздуха [8]. Должен быть измерен и соответствующий коэффициенту $\beta_m(r)$ молекулярный сигнал $P_m(r)$. Выражение для молекулярного эхосигнала $P_m(r)$ от выражения (1) будет отличаться отсутствием $\beta_a(r)$ и наличием η_m вместо η_{Σ} , характеризующим эффективность приемника в молекулярном канале:

$$P_m(r) = P\eta_m G(r) \frac{A}{r^2} \frac{c\tau}{2} \beta_m(r) \exp(-2\tau(r)). \quad (2)$$

Выражение для аэрозольного коэффициента обратного рассеяния $\beta_a(r)$ можно получить из отношения сигналов (1) и (2), умноженного на $\beta_m(r)$:

$$\beta_a(r) = \beta_m(r) \left(\frac{\eta_m P_{\Sigma}(r)}{\eta_{\Sigma} P_m(r)} - 1 \right). \quad (3)$$

Можно сказать, что аэрозольный лидар калибруется по молекулярному рассеянию. При этом лидар как средство для измерения атмосферных характеристик будет проградуирован в законных единицах в Международной системе единиц СИ, которая обеспечивает единообразие применяемых единиц для всех областей науки и техники.

Профиль оптической плотности атмосферы $\tau(r)$ определяется из формулы (2) логарифмированием отношения молекулярного сигнала $P_m(r)$ к коэффициенту молекулярного рассеяния $\beta_m(r)$:

$$\tau(r) = -\frac{1}{2} \ln \left[\frac{P_m(r) G(r_0) \beta_m(r_0)}{P_m(r_0) G(r) \beta_m(r)} \right], \quad (4)$$

где r_0 – дистанция вблизи лидара (~ 100 м); $P_m(r_0)$, $G_m(r_0)$ и $\beta_m(r_0)$ – нормировочные значения.

Есть два типа лидарных систем, способных регистрировать молекулярный сигнал, – это лидар

комбинационного рассеяния [9] и лидар высокого спектрального разрешения [10]. Системы первого типа часто называют «рамановскими». Они регистрируют сигнал, частота которого существенно сдвигается благодаря комбинационному рассеянию Рамана–Мандельштама, и в этом сигнале содержится примерно 0,1% всей рассеянной молекулами энергии. Такие системы относительно простые, но при этом громоздкие, так как из-за малого сечения рамановского рассеяния вынуждены иметь мощный лазер и телескоп большего размера. Рамановский лидар не может быть безопасным для глаз.

Лидар высокого спектрального разрешения регистрирует сигнал рэлеевского рассеяния, спектр которого уширяется благодаря эффекту Доплера при рассеянии на хаотически движущихся молекулах и эффекту Мандельштама–Бриллюэна при рассеянии на флуктуациях плотности. Величина уширения очень мала и составляет единицы гигагерц в видимой области спектра. Но в этом сигнале содержится примерно 99,9% всей рассеянной молекулами энергии [8]. Такие системы сложные, но при этом более компактные и, с нашей точки зрения, более перспективные. Впервые рэлеевский лидарный молекулярный сигнал был зарегистрирован в 1970 г. [11].

В лидаре высокого спектрального разрешения входящий сигнал разделяется на две части. Первая часть регистрируется детектором «суммарного канала». Из второй части сигнала с помощью режекторного фильтра (кювета с парами иода) удаляется аэрозольный сигнал, и затем сигнал регистрируется детектором «молекулярного канала». В видимой области спектра доплеровский сдвиг составляет менее 0,01 нм (8 ГГц). Техническая реализация метода возможна только с помощью *импульсного одночастотного лазера с инжектором* с узким спектром излучения [12].

Очевидно, что для непрерывных наблюдений предпочтительней лидар высокого спектрального разрешения. Мы полагаем, что современный аэрозольный лидар для непрерывных наблюдений должен удовлетворять следующим требованиям: 1) абсолютная калибровка по молекулярному рассеянию; 2) безопасность для глаз; 3) высокая термомеханическая стабильность конструкции; 4) непрерывная работа в течение продолжительного времени (месяцы и годы); 5) автономная работа, когда контроль и получение данных производится через Интернет; система должна быть (6) компактной и (7) экономически целесообразной. Наличие перечисленных свойств позволит существенно расширить области применения лидара. С пользой такой лидар можно использовать при проведении экспедиций на суше, на корабле и самолете; для научных наблюдений в удаленных и трудно доступных местах, на метеостанциях, в городах, в аэропортах для непрерывного контроля облачной обстановки и дальности видимости и т.д.

2. Выбор конструкции

Существуют два основных способа создания лидарного приемопередатчика (трансивера). Первый

способ – самый распространенный, когда лазерный пучок, минуя приемную часть системы, посылается в атмосферу. При этом оси пучка и приемного телескопа могут находиться рядом (биаксиальная схема) или быть совмещены (коаксиальная схема). Второй способ предполагает совместное использование телескопа, когда происходит расширение лазерного пучка с помощью приемного телескопа [13], который является и принимающим одновременно. На рис. 1 в упрощенном виде показаны коаксиальные приемопередатчики с независимым расширением пучка и с расширением через приемный телескоп.

Конструктивно элементы в системе первого типа крепятся на раме 1, а в системе второго типа на оптическом столе 2. Оценим влияние градиента температуры $\Delta t = t_2 - t_1 = 1^\circ\text{C}$, возникающего на краях обеих конструкций, на угол рассогласования $\Delta\xi$ осей передатчика и приемника. Пусть рама 1 и стол 2 – алюминиевые, т.е. коэффициент теплового расширения $\alpha = 22 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$. Рама 1 первой системы имеет высоту h и ширину w 1 м. Правый край рамы в результате теплового расширения ($t_2 > t_1$) поднимется на величину $\alpha\Delta th = 22 \text{ мкм}$. Зеркало 8 при этом повернется на угол $\alpha\Delta th/w = 22 \text{ мкрад}$ против часовой стрелки, а отраженный от него лазерный луч сместится на угол в 2 раза больше. Зеркала 8 и 9 работают как перископ, поэтому зеркало 9 просто повернет луч вверх ровно на 90° , но смещение при этом останется. В итоге лазерный луч отклонится влево от оси телескопа на угол

$$\Delta\xi_1 = 2\alpha\Delta th/w = 44 \text{ мкрад.} \quad (5)$$

Пусть в системе второго типа стол имеет стандартную толщину $d = 60 \text{ мм}$. Если одна сторона стола имеет большую температуру, чем другая, то ее размер в результате теплового расширения увеличивается и стол выгибается в сторону, которая теплее. На рис. 1, б верх стола теплее, чем низ, на

$\Delta t = t_2 - t_1 = 1^\circ\text{C}$ и поэтому стол выгнется кверху и радиус кривизны стола [14]:

$$R_t = d/(\alpha\Delta t) = 2,73 \text{ км.} \quad (6)$$

Пусть луч от лазера до коллиматора распространяется над столом 2 на расстояние $l = 0,5 \text{ м}$. Стол можно представить как часть выпуклой сферы, а луч при этом распространяется по касательной. Тогда угол отклонения луча

$$\Delta\xi_2' = l/R_t = 183 \text{ мкрад.} \quad (7)$$

Далее пучок расширяется коллиматором и телескопом. При расширении пучка его расходимость понижается во столько же раз, во сколько он расширился. Угол отклонения пучка от оси коллиматора тоже уменьшается в такое же количество раз. Пусть увеличение коллиматора $M_c = 10^\times$ и увеличение телескопа $M_t = 20^\times$. Элемент 7 на рис. 1 может быть представлен зеркалом, установленным под углом 45° по отношению к столу, поэтому луч лазера придет на это зеркало под углом немного больше 45° и, следовательно, отклонится вправо по отношению к оси телескопа. С учетом (7)

$$\Delta\xi_2 = \Delta\xi_2'/(M_c M_t) = l\alpha\Delta t/(dM_c M_t) = 0,9 \text{ мкрад.} \quad (8)$$

Полученные оценки рассогласования осей (5) и (8) показывают, что система второго типа с расширением пучка через приемный телескоп к влиянию температурных градиентов в 48 раз менее чувствительна, чем система первого типа. Такая большая разница обусловлена наличием M_c и M_t в формуле (8), т.е. большим расширением пучка. Можно утверждать, что вторая схема на рис. 1, б *термомеханически более стабильна*. Оказывается, что существенное увеличение размера лазерного пучка в случае его расширения через приемный телескоп делает

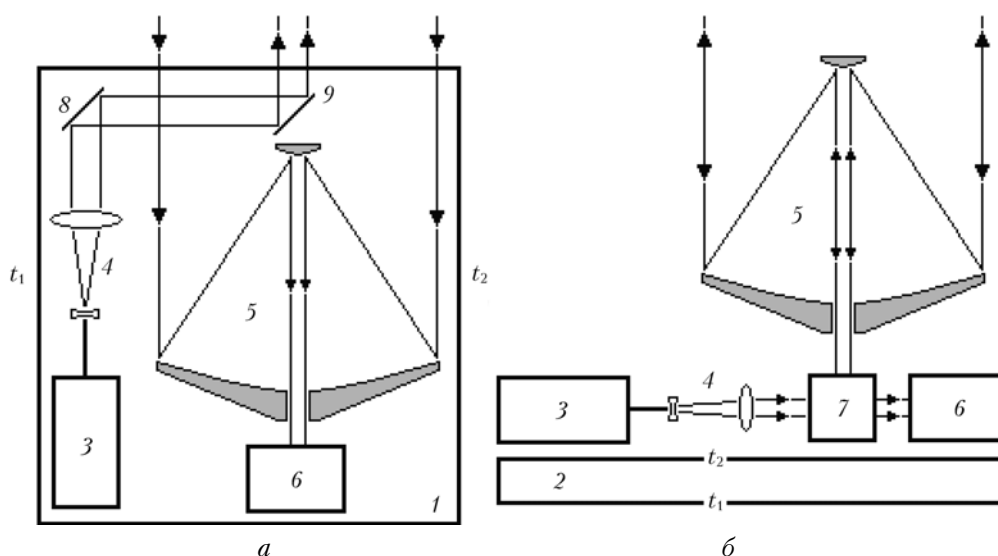


Рис. 1. Схема стандартного лидарного коаксиального трансивера (а) и схема с расширением лазерного пучка через приемный телескоп (б): 1 – рама; 2 – оптический стол; 3 – лазер; 4 – коллиматор; 5 – телескоп; 6 – детектор; 7 – антенный переключатель; 8 и 9 – плоские зеркала

систему в целом гораздо менее чувствительной к деформациям конструкции при возникновении градиентов температуры и непропорционального теплового расширения ее элементов.

В работе [15] описан современный самолетный лидар высокого спектрального разрешения NASA, созданный для калибровки космического лидара CALIPSO. Лидар сделан по схеме (рис. 1, а) с независимыми передатчиком и приемником. Он имеет систему подстройки положения оси передатчика относительно оси приемника. Авторы отмечают, что за время полета угол рассогласования оптических осей мог достигать 150 мкрад по обеим координатам из-за «предположительно термоупругих эффектов в системе». Система подстройки (англ. boresight system) обеспечивала точность 10 мкрад.

Почему более стабильные системы второго типа с расширением пучка через приемный телескоп не получили широкого распространения? Можно показать, что если в такой системе энергия лазерного импульса превышает 1 мДж, то рассеянный на оптике внутри лидара свет может повредить фотодетектор. При создании лидаров обычно использовались и используются твердотельные лазеры с ламповой накачкой. У таких лазеров частота следования импульсов составляет 10 Гц или немного больше. При средней выходной мощности 1 Вт энергия одного импульса равна 1 Вт/10 Гц = 100 мДж. В этом случае имеем 100-кратное превышение порога повреждения детектора. Значит, схема на рис. 1, б применяться не может.

Двадцать лет назад появились лазеры с диодной накачкой, в которых накачка рабочего тела происходит непрерывно. Поэтому частота повторения импульсов определяется частотой срабатывания затвора и может достигать десятков килогерц. Пусть частота повторения импульсов лазера с диодной накачкой равна 5 кГц, тогда при средней выходной мощности 1 Вт энергия одного импульса равна 1 Вт/5 кГц = 0,2 мДж, что в 5 раз меньше порога повреждения детектора. Из вышесказанного становится ясно, что для создания лидара с расширением пучка через приемный телескоп обязательно использование лазера с диодной накачкой, чтобы не повредить фотодетекторы.

Есть еще один очень важный момент. При одинаковой выходной мощности повышение частоты следования импульсов с 10 Гц до 5 кГц приводит к снижению энергии зондирующих импульсов в 500 раз. Двадцатикратное расширение лазерного пучка в телескопе дает дополнительное 400-кратное понижение плотности излучения на выходе лидара. В итоге при повышении частоты следования импульсов с 10 Гц до 5 кГц и дополнительном расширении пучка в 20 раз плотность излучения снижается в 200 000 раз! И тогда появляется реальная возможность создавать системы, безопасные для глаз человека.

3. Безопасность для глаз

Оценим безопасную для глаз допустимую мощность лазерного излучения на выходе из лидара.

Средняя мощность определяется энергией зондирующих импульсов E_0 и частотой их следования f . Максимальное значение частоты повторения лазерных импульсов определяется условием нахождения только одного зондирующего импульса в пределах атмосферы, чтобы избежать неопределенности при регистрации рассеянного излучения. Если предположить, что аэрозоль отсутствует на высотах H_{\max} выше 30 км, то частоту импульсов f можно выбрать по формуле

$$f = c/(2H_{\max}) = 5 \text{ кГц}, \quad (9)$$

где коэффициент «2» появился из-за распространения света туда и обратно.

Теперь оценим необходимые энергетические характеристики лазера при создании безопасных для глаз систем. Расчет проведем для видимого спектра. Согласно стандарту [16], принятому в США, максимальная допустимая экспозиция MPE_s для одиночного импульса длительностью от 1 нс до 18 мкс для длин волн от 400 до 700 нм составляет

$$MPE_s = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2. \quad (10)$$

Для случая, когда имеем дело с последовательностью импульсов n , величина MPE_s корректируется и новое значение MPE_m согласно [16] определяется по формуле

$$MPE_m = MPE_s n^{-1/4}. \quad (11)$$

Количество импульсов n определяется исходя из того, что глазу требуется 0,25 с для закрывания. При частоте следования импульсов 5 кГц величина $n = 1250$. Тогда с учетом выражений (10) и (11) получим

$$MPE_m = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/см}^2. \quad (12)$$

Итак, MPE_m — это максимально допустимая плотность энергии лазерного импульса на выходе телескопа при частоте повторения импульсов 5 кГц.

Теперь определим энергию лазерного импульса. Для этого нам нужно знать распределение энергии по сечению пучка на выходе телескопа. Рассмотрим задачу для двух типов пучков — равномерного и гауссова. Запишем выражение для распределения энергии в общем виде

$$E(x, y, beam) = MPE_m \exp\left[-2beam\left(\frac{x^2 + y^2}{D_{tel}^2}\right)\right], \quad (13)$$

где x и y — декартовы координаты, совмещенные с оптической осью телескопа; D_{tel} — диаметр телескопа, а параметр $beam$ определяет тип пучка следующим образом:

$$beam = \begin{cases} 0 & \text{— равномерное распределение,} \\ 1 & \text{— гауссово распределение.} \end{cases} \quad (14)$$

Из выражения (13) следует, что плотность энергии не может превышать величину MPE_m . Показатель «2» в выражении (13) означает, что для гауссова пучка на краю телескопа интенсивность понижается в e^2 раз.

Чтобы определить максимальную допустимую энергию импульса E_0 , нужно проинтегрировать выражение (13) по поверхности телескопа. Это проще сделать, если перейти к полярным координатам ρ и φ :

$$E_0 = \frac{MPE_m}{4} \times \int_{R_{block}}^{R_{tel}} \int_0^{2\pi} E(\rho \cos(\varphi), \rho \sin(\varphi), beam) \rho d\varphi d\rho, \quad (15)$$

где R_{block} – радиус крепления вторичного зеркала телескопа, блокирующий центральную часть главного зеркала с радиусом R_{tel} . Максимально допустимая мощность лазерного излучения на выходе лида составляет

$$P_0 = fE_0. \quad (16)$$

Выражения (13), (15) и (16) позволяют рассчитать максимально допустимую энергию отдельного импульса E_0 и среднюю мощность P_0 на выходе системы. Данные для телескопов диаметром 20, 30, 40 и 50 см для обоих типов пучка приведены в таблице. Размер блока R_{block} полагался равным 20% от радиуса телескопа R_{tel} .

Безопасная для глаз максимально разрешенная энергия импульсов и средняя мощность при частоте следования 5 кГц

Диаметр телескопа, см	Энергия импульса, мкДж		Мощность на выходе, мВт	
	равн. пучок	гаусс. пучок	равн. пучок	гаусс. пучок
20	25	11	127	56
30	57	25	286	127
40	101	45	507	225
50	159	70	793	352

Для телескопа диаметром 40 см энергия импульса гауссова пучка составляет 45 мкДж, а средняя выходная мощность 225 мВт.

4. Блок-схема лидара

Рассмотрим устройство лидара высокого спектрального разрешения на уровне упрощенной блок-схемы, показанной на рис. 2.

Лидар состоит из трех основных частей – передающей, принимающей и калибровочной. Заметим, что здесь имеются в виду аппаратные калибровки, которые не следует путать с калибровкой по молекулярному рассеянию. В понятие аппаратной калибровки включаются как непрерывный контроль ряда характеристик (например, контроль частоты лазера), так и периодические процедуры (например, сканирование по частоте для определения пропускания каналов). Частота лазерного излучения должна совпадать с максимумом поглощения фильтра в молекулярном канале для эффективного удаления аэрозольного сигнала. Ниже мы остановимся на особенностях конструкции лазера и управления его излучением. Интерферометр необходим для калибровки частотной оси при сканировании. Заметим, что хорошо себя зарекомендовала конструкция интерферометра на основе одноимодовых световодов [17].

Рассмотрим передатчик. Передающая часть пересекается с приемной, так как имеет общий телескоп. Передатчик состоит из лазера и двух расширителей пучка – линзового и зеркального коллиматоров. В качестве зеркального коллиматора служит приемный телескоп. Мы полагаем, что телескоп должен быть именно коллиматором, т.е. афокальным. Такая схема имеет ряд преимуществ: ее легче настраивать, а лазерный пучок не нужно фокусировать. В качестве афокального телескопа может быть выбрана схема Мерсена или Далла–Кирхема [14]. Кроме телескопа для передатчика и приемника общим является

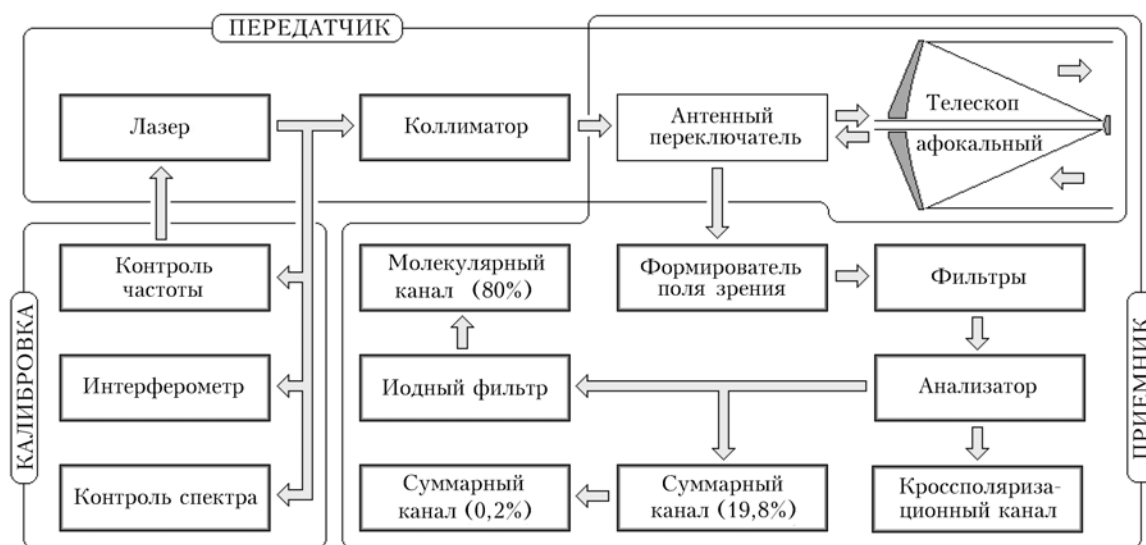


Рис. 2. Упрощенная блок-схема лидара высокого спектрального разрешения

антенный переключатель, который отводит в сторону принимаемый сигнал.

Приемник кроме телескопа и антенного переключателя включает в себя 4 приемных канала. Отметим, что в предложенной схеме все входящее излучение проходит через единый формирователь поля зрения, который состоит из линзы и апертурной диафрагмы. Далее пучок коллимируется и направляется на фильтры, отсекающие фон неба. Хорошо рекомендовали себя системы, в которых установлен интерференционный фильтр совместно с интерферометром Фабри–Перо. В лидарах Висконсинского университета [18] полуширина пропускания интерферометра Фабри–Перо составляет 0,08 нм, а интерференционного фильтра – 0,35 нм. После фильтров располагается анализатор – поляризационный элемент, который разделяет излучение с взаимно перпендикулярными поляризациями.

Кроссполяризационный канал регистрирует сигнал, поляризация которого повернута на угол 90° относительно поляризации излучения лазера. Кросс-канал необходим для определения коэффициента деполаризации [7]. Сигнал с основной поляризацией светоделителями делится на 3 неравные части, чтобы в условиях чистой атмосферы сигналы в молекулярном и основном суммарном каналах были близкими по величине. В молекулярный канал, состоящий из фильтра и детектора, направляется 80% потока, 19,8% направляется в основной суммарный канал и 0,2% – в дополнительный. Дополнительный суммарный канал необходим при наличии плотных облаков, когда сигнал в основном суммарном канале насыщается. Заметим, что все детекторы должны работать в режиме счета фотонов.

5. Телескоп

Ответим на вопрос – какого размера нам нужен приемный телескоп? Может показаться, что чем телескоп больше, тем лучше, так как можно принять больше рассеянных фотонов. С точки зрения эффективности системы в целом это не совсем так. Дело в том, что не каждый пришедший на телескоп фотон дойдет до фотодетектора. Кроме того, нужно учитывать еще фоновую засветку от неба, определяющую отношение «сигнал-шум». Для борьбы с фоновой засветкой можно и нужно уменьшать поле зрения ϕ приемника, тем более что выбранная нами стабильная конструкция приемопередатчика позволяет это сделать. Тогда возникает следующий вопрос – как сильно мы можем сузить поле зрения ϕ ? Что является его как бы ограничителем снизу? Мы полагаем, что это *атмосферная турбулентность*. Наш опыт показывает, что поле зрения нежелательно делать меньше 100 мкрад, так как это приводит к заметному, более 10%, уменьшению эхосигнала из-за «развала» лазерного пучка вследствие турбулентности в дневное время. Иными словами, ошибка 10% – это как бы тот предел, с которым мы еще можем согласиться. И этой ошибке примерно соответствует поле зрения $\phi = 100$ мкрад.

Теперь, когда мы определились с полем зрения приемника ϕ , обратимся к геометрической функции лидара $G(r)$, которая в качестве множителя присутствует в уравнении зондирования (1). Фактор $G(r)$ – это аппаратная характеристика, которая определяет, какая часть фотонов, пришедших на апертуру приемного телескопа, будет зарегистрирована детектором. Геометрический фактор нормирован и монотонно изменяется от малого значения вблизи лида до единицы на некотором удалении. На рис. 3 слева схематично показаны телескоп с полем зрения ϕ и пример типичного распределения аэрозоля в тропосфере, взятый произвольно на сайте лидарной группы Висконсинского университета [19]. Расходимость лазерного пучка будем считать близкой к нулю.

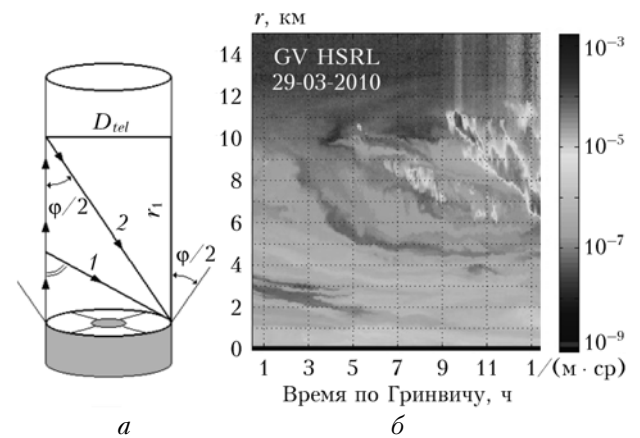


Рис. 3. Схема зондирования (а): D_{tel} – диаметр приемного телескопа, ϕ – поле зрения приемника, r_1 – высота полного перехвата; б – пример лидарных данных в виде пространственно-временного распределения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, взятый на сайте [19]

Рассмотрим два фотона 1 и 2, которые в зондирующем пучке распространяются по левому краю (рис. 3) и рассеиваются на правый край телескопа.

Можно утверждать, что первый фотон не дойдет до детектора, так как угол его прихода на телескоп больше, чем $\phi/2$, т.е. первый фотон оказался за пределами поля зрения приемника. Угол прихода второго фотона точно равен $\phi/2$, и этот фотон попадет на детектор. Не анализируя сейчас подробно вид функции $G(r)$, можно утверждать, что, начиная с высоты r_1 , все фотоны, пришедшие на апертуру телескопа, дойдут до детектора. Это означает полный перехват рассеянных фотонов ($G(r \geq r_1) = 1$).

Чтобы выбрать размер телескопа D_{tel} , нужно определиться с высотой r_1 , т.е. решить, начиная с какой высоты r_1 должен происходить полный перехват рассеянных фотонов. На малых высотах это и невозможно, и не нужно – там сигнал и так большой. Если выбрать r_1 за пределами тропосферы, то система потеряет свою эффективность как раз там, где происходят интересные процессы (рис. 3, б). Опыт подсказывает, что значение r_1 должно быть в диапазоне от 8 до 10 км. Из рис. 3, а следует, что

$$D_{tel} = r_1 \phi / 2. \quad (17)$$

Полагая $\varphi = 10^{-4}$ рад и $r_1 = 8$ км, получаем $D_{tel} = 40$ см. Для $r_1 = 10$ км диаметр приемного телескопа D_{tel} составит 50 см.

Получается, что не следует применять телескопы диаметром больше 50 см, так как при малых полях зрения их эффективность снижается из-за потерь, связанных с уменьшением геометрического фактора. Если поле зрения φ увеличить, то моментально в квадрате возрастет шумовая фоновая засветка, что также нежелательно. *Атмосфера Земли на самом деле тонкая, и поэтому применение крупногабаритной оптики при зондировании с Земли не нужно.*

Какой тип телескопа выбрать? Известны две зеркальные афокальные конструкции — телескоп Мерсена и телескоп Далла–Кирхема (Dall–Kirkham) [14], которые для нашей задачи мы считаем равнозначными, так как в лидаре поле зрения мало. Внеосевые aberrации, свойственные телескопу Далла–Кирхема (эллипс-сфера), влияния не оказывают. Телескоп Мерсена (парабола-парабола) по определению является апланатическим. Стоит отметить, что телескоп Далла–Кирхема легче настраивать, так как вторичное зеркало сферическое. Заметим, что внутри лидара все пучки коллимированы, поэтому положение телескопа становится не критичным, что также существенно облегчает процесс сборки и настройки.

6. Лазер

Для лидара высокого спектрального разрешения требуется одночастотный импульсный лазер. Длина волны излучения принципиального значения не имеет. Однако мы полагаем, что наиболее выгодно использовать ИАГ-лазер с неодимом с длиной волны 532 нм (вторая гармоника), чтобы применять

фильтр на парах иода в молекулярном канале. Дело в том, что иод имеет сильные линии поглощения в видимой части спектра. Можно сказать, что линия иода 1109 (532,2602 нм) пользуется популярностью [12, 20, 21], так как не имеет сильных «соседей» вокруг. Полуширина этой линии 1,8 ГГц. Кювета длиной 30 см с парами иода при температуре 28 °С на частоте линии 1109 имеет пропускание менее 10^{-4} . То есть она эффективно подавляет аэрозольный сигнал в молекулярном канале. Оригинальный способ управления частотой лазера также был разработан для лазера с длиной волны 532 нм [22]. Можно сказать, что имеется положительный опыт, который не позволяет отказаться от использования «зеленого» лазера на неодиме. Ниже приведены основные параметры лазера.

Длина волны (линия иода 1109)	532,26 нм
Диапазон перестройки частоты	± 15 ГГц
Профиль пучка	TEM ₀₀
Дрожание частоты	< 30 МГц
Ширина спектра линии излучения	< 100 МГц
Чистота спектра	> 5000 : 1
Длительность импульса	< 50 нс
Частота повторения импульсов	5 кГц
Средняя мощность	1 Вт
Поляризация	линейная
Продолжительность работы	> 10000 ч

Чистота спектра означает отношение мощности основной гармоники к мощности всех остальных гармоник. Типичная упрощенная схема лазера приведена на рис. 4, а.

Это классический способ построения одночастотного импульсного оптического генератора с внутрирезонаторным преобразованием частоты. Накачка осуществляется лазерным диодом 6 через верхний торец ИАГ-кристалла 8, поэтому зеркало 11 должно быть дихроическим, т.е. пропускать 808 нм и отражать

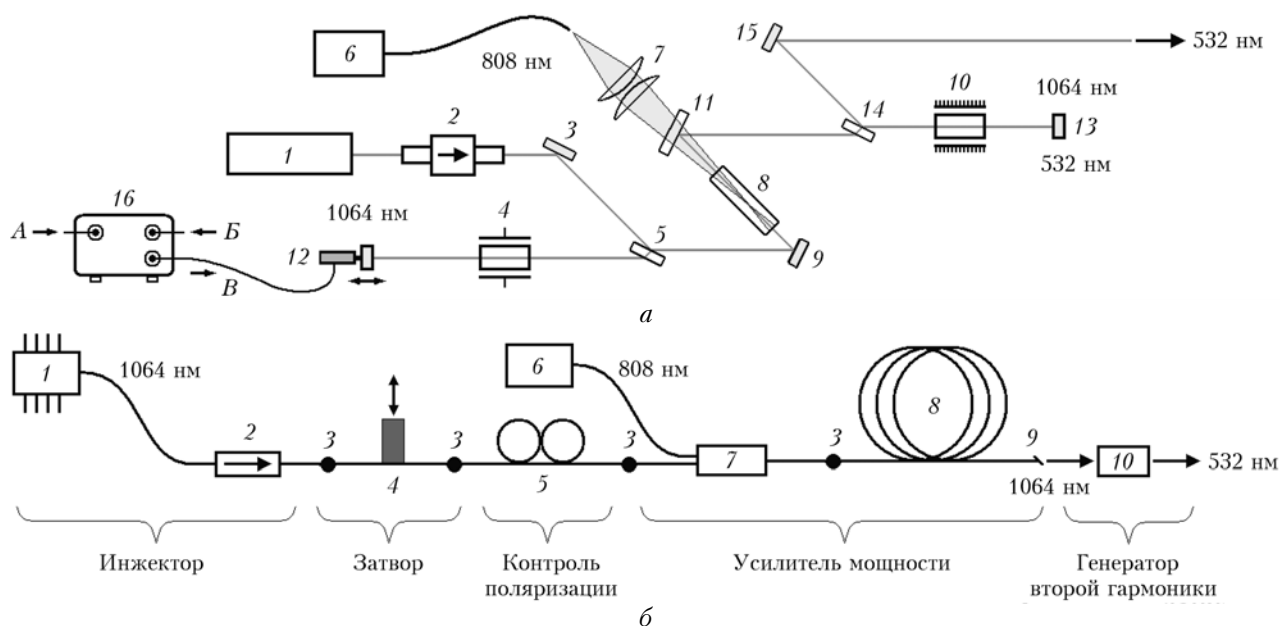


Рис. 4. Упрощенные схемы импульсных одночастотных ИАГ-лазеров (532 нм): а — «классическая» схема; б — схема световодного лазера

1064 нм. Резонатор основного лазера имеет форму зигзага, где 12 и 13 – концевые зеркала. Непрерывное излучение инжектора 1 постоянно присутствует в резонаторе основного лазера и поступает туда через изолятор 2, зеркало 3 и пластинку 5, которая установлена под углом Брюстера. Электрооптический затвор 4 открывает резонатор, изменяя поляризацию пучка. Генератор второй гармоники 10 находится справа внутри резонатора. Зеркало 13 должно одинаково хорошо отражать длины волн 532 и 1064 нм. Светоделитель 14 выводит из резонатора излучение с длиной волны 532 нм и пропускает 1064 нм. Зеркало 15 выводит из лазера.

Лазер будет генерировать одну моду только в случае точного соответствия длины резонатора длине волны излучения инжектора 1 (целое число полу-волн). Для этого левое концевое зеркало 12 укрепляется на пьезокристалл и управляется контроллером 16. На два входа контроллера поступают импульс с затвора (вход А) и импульс с выхода лазера (вход Б). Задача контроллера 16 – анализировать и уменьшать задержку (англ. built-up time), т.е. интервал между импульсами А и Б. Минимальная задержка означает, что размер резонатора настроен на длину волны инжектора. С выхода В контроллера 16 управляющее напряжение поступает на пьезокристалл 12. В данной схеме управление частотой инжектора 1 происходит независимо от работы контроллера 16 путем изменения его температуры. Задача контроллера 16 – успевать отслеживать изменения частоты инжектора 1, подстраивая резонатор главного лазера.

На рис. 4, б приведена схема волоконного одно-частотного импульсного лазера, предложенная автором. Возможно, что лазеры такого типа появятся в ближайшее время. Схема лазера типа «инжектор-усилитель» (англ. MOPA = master oscillator power amplifier). Подобные схемы волоконных лазеров были созданы в последнее время [23, 24]. В качестве инжектора 1 на рис. 4, б нужно применить полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (англ. DFB = distributed feedback laser), с узким спектром и возможностью перестройки частоты. Для защиты инжектора 1 от возможных отражений добавлен изолятор 2. Цифрой 3 обозначены соединения, получаемые способом сращивания при расплавлении. Затвор 4 можно создать с использованием пьезокерамики.

Пьезоэлектрическое сжатие световода вызывает эффект двойного лучепреломления, в результате чего изменяется состояние поляризации света [24]. Поляризационный контроллер 5 задает состояние поляризации и должен настраиваться вместе с затвором 4. Мультиплексор 7 (англ. WDM = wavelength division multiplexing) объединяет излучение инжектора (1064 нм) с излучением накачки (808 нм) от лазерного диода 6. Далее все это поступает в световод 8 с двумя оболочками, в середину которого добавлен неодим. Излучение диода 6 поглощается неодимом, а затем излучение инжектора 1 в световоде 8 усиливается. Конец 9 световода 8 отполирован под углом

Брюстера, чтобы уменьшить отражение. Нелинейный кристалл 10, например КТР, преобразует ИК-излучение лазера с длиной волны 1064 нм в 532 нм.

7. Оптическая схема

Выше говорилось, что деформация оптической скамьи под действием температурных градиентов будет смещать оптические оси передатчика и приемника. Если передатчик и приемник расположить на одной поверхности скамьи, как показано на рис. 1, б, то оси передатчика и приемника будут всегда смещаться в противоположные стороны. В работе [25] показано, что при расположении передатчика и приемника по разные стороны скамьи (рис. 5) оси будут смещаться в одном направлении. Исходя из этого, предлагается передатчик и калибровочную часть расположить на верхней поверхности оптической скамьи, а всю приемную часть на нижней.

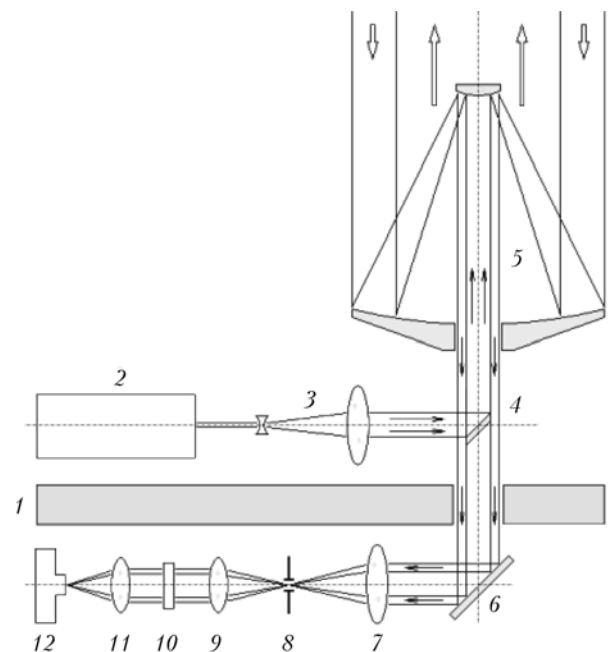


Рис. 5. Упрощенная схема приемопередатчика лидара, у которого центральная часть телескопа работает на передачу, а внешняя – на прием: 1 – скамья; 2 – лазер; 3 – коллиматор; 4 – плоское зеркало эллиптической формы; 5 – телескоп; 6 – зеркало; 7 – фокусирующая линза; 8 – поляевая диафрагма; 9 – коллимирующая линза; 10 – фильтр; 11 – линза; 12 – детектор

Центральная часть телескопа 5 (рис. 5) работает на передачу, а внешняя – на прием. Зеркало 4 представляет собой простой антенный переключатель. Заметим, что в качестве переключателя можно использовать светоделительную пластинку или тонкопленочный поляризатор в паре с четвертьволновой пластинкой [26]. Разделение телескопа на передающую и принимающую части позволит существенно уменьшить количество рассеянного на оптике лазерного излучения, которое неизбежно попадает на детекторы. Возможное расположение всех основных оптических элементов лидара показано на рис. 6.

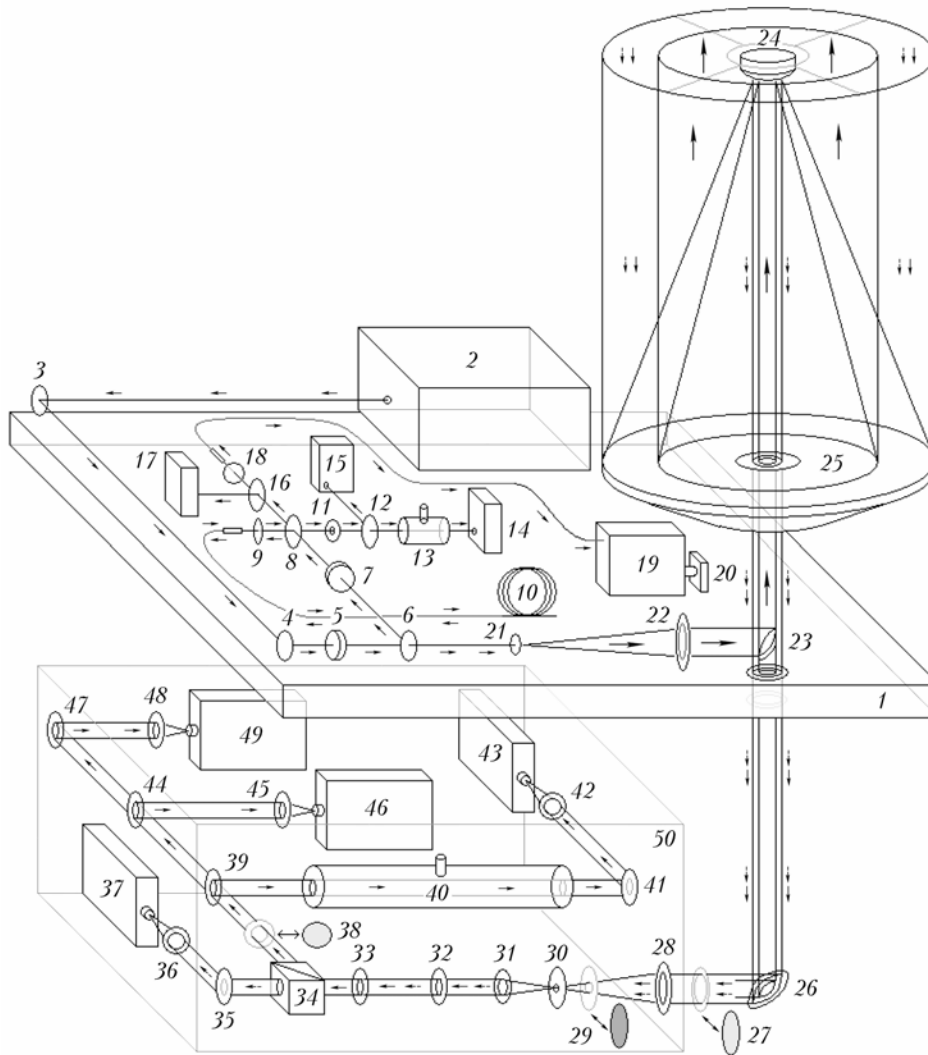


Рис. 6. Оптическая схема лидара

Рациональное двухстороннее использование оптической скамьи 1 позволит всю систему сделать более компактной.

Рассмотрим, как работает оптическая схема лидара (рис. 6). Передатчик состоит из лазера 2, коллиматора 21, 22 и телескопа 24, 25. Позиции 3, 4 и 23 – плоские зеркала. Полуволновая пластинка 5 поворачивает плоскость поляризации и регулирует количество энергии, которое отражает светоделитель 6. Это примерно 10 мВт мощности, которой достаточно для управления частотой лазера. При этом используется вынужденное рассеяние Манделъштата–Бриллюэна в одномодовом световоде 10, которое смещает частоту излучения. Эта методика [22, 26] реализуется в работе элементов 7–15. Светоделитель 16 часть излучения направляет на измеритель энергии 17, который регистрирует энергию зондирующих импульсов. Линза 18 отправляет свет в интерферометр 19, данные которого регистрируются камерой 20.

Уходящий линейно поляризованный лазерный импульс расширяется дважды: коллиматором 21, 22 ($10\times$) и телескопом 24, 25 ($20\times$). Прием рассеянного излучения осуществляется внешним кольцом теле-

скопа. Это излучение проходит через отверстие в столе и зеркалом 26 направляется в приемный ящик 50. В этом ящике на входе располагается фокусирующая линза 28 и далее коллимирующая линза 31. Диафрагма 30 задает поле зрения для всех каналов, 32 – интерференционный фильтр, 33 – полуволновая пластинка для настройки положения плоскостей поляризации относительно куба 34. Кроссканал представлен поворотным зеркалом 35, линзой 36 и детектором 37; 39 и 44 – светоделители. В молекулярном канале имеются иодный фильтр 40, зеркало 41, линза 42 и детектор 43, в суммарных каналах – зеркало 47, линзы 45 и 48, детекторы 46 и 49. Заметим, что иодный фильтр должен быть изготовлен особым способом, чтобы его характеристики не зависели от температуры. Это означает, что при повышении температуры кристаллический иод целиком переходит «голодным» (англ. starved). Методику изготовления «голодного» иодного фильтра мы здесь не приводим.

Нейтральные светофильтры 27 и 38 нужны при проведении аппаратных калибровок, чтобы ослабить рассеянный свет от лазера, который поступает из

передающего канала и используется при проведении частотного калибровочного сканирования (один раз в сутки). Затвор 29 закрывает все детекторы. Управление фильтрами и затвором осуществляется через компьютер. На схеме не показан еще один фильтр фоновой засветки – интерферометр Фабри–Перо, но он может быть добавлен и установлен между элементами 32 и 33. Ниже приведены основные характеристики приемника.

Афокальный телескоп	
Далла–Кирхема или Мерсена	400 мм
Увеличение телескопа	20 [×]
Поле зрения	100 мкрад
Полуширина интерференционного фильтра	0,3 нм
Пропускание интерференционного фильтра	70%
Полуширина иодного фильтра	1,8 ГГц
Пропускание иодного фильтра (центр линии 1109)	10 ⁻⁴
Квантовая эффективность детекторов	
Perkin–Elmer SPCM-AQR-12	60%
Пространственное разрешение	7,5 м
Временное разрешение	1 с

8. Модельные оценки

Уравнение (2) для молекулярного сигнала может быть переписано для числа принимаемых фотонов $N_m(r)$ в виде

$$N_m(r) = N_0 \eta_m k_{opt} G(r) (A/r^2) \Delta r \beta_m(r), \quad (18)$$

где N_0 – число фотонов в одном лазерном импульсе; k_{opt} – пропускание оптического тракта; Δr – величина одного строба системы регистрации. Средняя мощность лазерного излучения P_0 , безопасная для глаз, согласно таблице, приведенной в разделе 3, для 400-мм телескопа равна 225 мВт, и энергия одного импульса $E_0 = 45$ мкДж. Число фотонов в лазерном импульсе N_0 определяется делением энергии E_0 на энергию кванта и равно $1,2 \cdot 10^{14}$. Квантовая эффективность детектора фирмы Perkin Elmer 60%.

Профиль коэффициента обратного молекулярного рассеяния $\beta_m(r)$ рассчитывался на основе моделей для температуры и давления [2, 8]. Для геометрического фактора $G(r)$ использовалась модель автора

$$G(r) = \frac{2(r/r_1)^2}{1 + (r/r_1)^4}. \quad (19)$$

Здесь r_1 – параметр, зависящий от размера приемопередатчика. Для телескопа диаметром 400 мм параметр $r_1 = 10$ км и для $r > r_1$ фактор $G(r) \equiv 1$. Выражение (19) при малых r пропорционально $\sim r^2$. Это обусловлено конструкцией трансивера, когда передача и прием осуществляются через один телескоп.

Параметр k_{opt} включает в себя пропускания интерференционного фильтра (0,5), светоделительной пластинки (0,8), иодного фильтра (0,25) и общее пропускание системы (0,3). В итоге пропускание оптического тракта k_{opt} равно 0,03.

Оценим относительную погрешность определения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния. Предположим, что атмосфера чистая, сигнал аэрозольного рассеяния примерно равен сигналу молекулярного рассеяния и погрешности полностью не зависят друг от друга. Тогда, дифференцируя выражение (3), получим относительную погрешность коэффициента аэрозольного рассеяния

$$\delta\beta_a = \sqrt{2} \delta N_m, \quad (20)$$

где δN_m – относительная погрешность регистрации сигнала. Лидарные сигналы представляют собой случайные величины, которые подчиняются статистике Пуассона. При этом выражение для относительной погрешности δN_m зависит от количества накопленных в каждом стробе фотонов $N_m(r)$:

$$\delta N_m(r) = \frac{1}{\sqrt{N_m(r)}}. \quad (21)$$

Выражение (18) определяет число принятых фотонов в одном стробе за один выстрел лазера. Если накопление сигналов осуществляется в течение Δt секунд, то формула (21) принимает вид

$$\delta N_m(r) = \frac{1}{\sqrt{\Delta t f N_m(r)}} \quad (22)$$

и относительная погрешность коэффициента аэрозольного рассеяния запишется

$$\delta\beta_a(r) = \sqrt{\frac{2}{\Delta t f N_m(r)}}. \quad (23)$$

На рис. 7, а показаны высотный профиль сигнала без накопления (кривая 1, шкала слева), рассчитанный по формуле (18), и относительные погрешности определения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (кривые 2–5, шкала справа), рассчитанные по формуле (23), для интервалов осреднения 1, 10, 100 и 1000 с.

Если считать, что 10%-я точность нас устроит, то для указанных интервалов осреднения максимальная высота зондирования соответственно составит 3,5; 13; 21 и 29 км. С практической точки зрения интервал накопления в пределах 1 мин представляется оптимальным.

Выражение для относительной погрешности оптической толщи $\tau(r)$ получается дифференцированием (4):

$$\delta\tau(r) = \frac{1}{\sqrt{\Delta t f N_m(r) \ln(\Delta t f N_m(r))}}. \quad (24)$$

Формула (24) учитывает только погрешности регистрации сигнала и соответствует высокой прозрачности атмосферы. На рис. 7, б показаны высотный профиль сигнала без накопления (кривая 1, шкала слева), рассчитанный по формуле (18), и относительные погрешности определения оптической толщи (кривые 2–5, шкала справа), рассчитанные по формуле (24) для интервалов осреднения 1, 10, 100 и 1000 с. При 100-секундном интервале осреднения

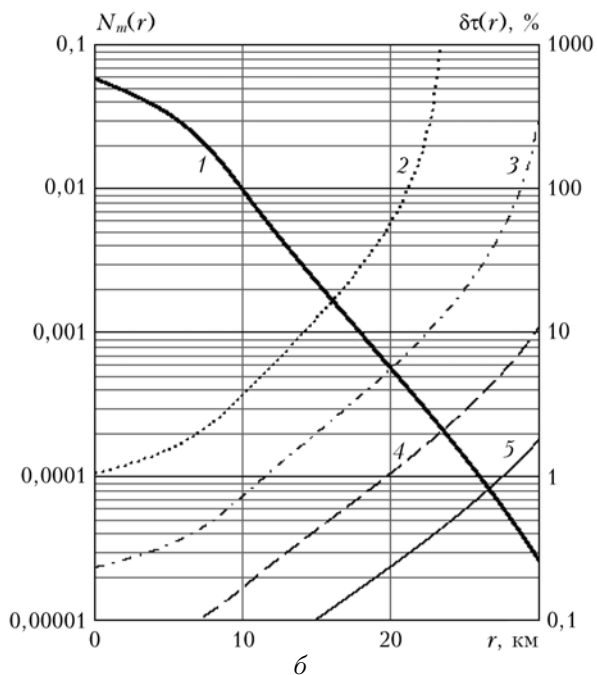
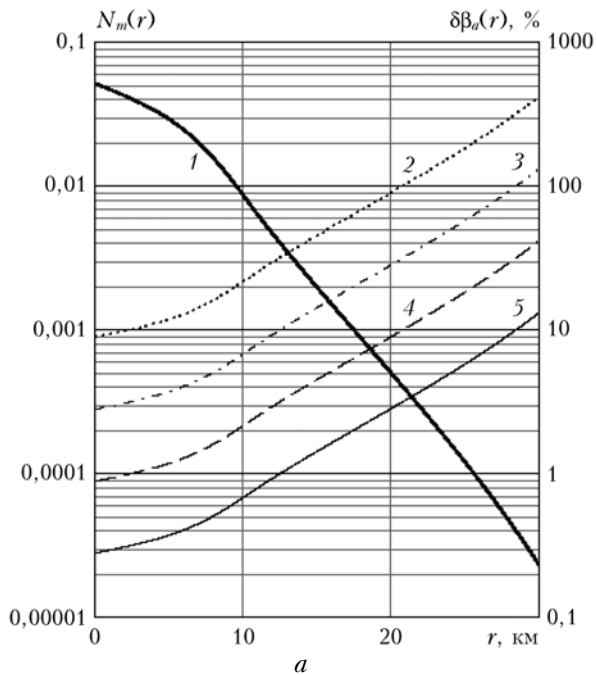


Рис. 7. Погрешности определения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (а) и оптической толщи (б). Кривая 1 – молекулярный эхосигнал (шкала слева), кривые 2, 3, 4 и 5 (шкала справа) соответствуют интервалам накопления 1, 10, 100 и 1000 с соответственно

погрешность на конце трассы 30 км составит 10%, а при 10-секундном интервале ошибка 10% будет на дальности 23 км.

Заключение

Рассмотрен проект лидара высокого спектрального разрешения, удовлетворяющий следующим критериям современного аэрозольного лидара. Лидар

должен быть калиброванным по молекулярному рассеянию и безопасным для глаз. Система должна работать постоянно и автономно, а конструкция системы предусматривает дистанционное управление всеми узлами через Интернет. Изложенный подход нацелен на создание стабильной оптико-механической конструкции, которая должна настраиваться один раз и не требовать подстроек в дальнейшем.

Пример окончательного дизайна лидара, описанного в статье, показан на рис. 8.

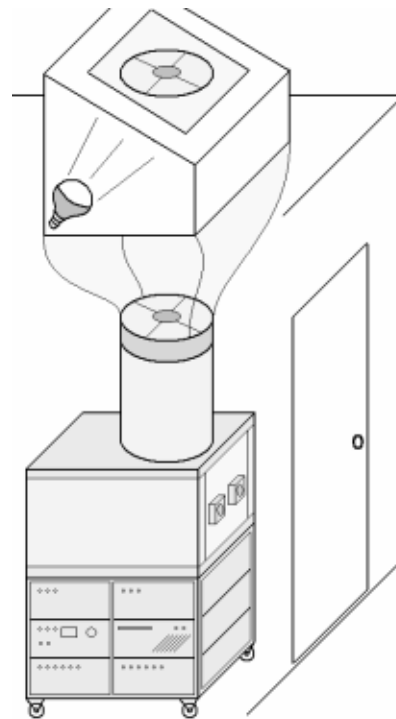


Рис. 8. Общий вид лидара

Весь лидар собирается на общей раме в виде одного модуля. Телескоп устанавливается сверху и имеет форму трубы, выполненной из композитных материалов с низкими коэффициентами теплового расширения. Оптическая скамья располагается в верхней части рамы и хорошо изолируется толстыми термозащитными панелями. Постоянная температура внутри лидара поддерживается термоэлектрическими элементами, расположенными на боковых стенках. Вся электроника, включая блоки питания, блоки управления и компьютер, располагается в нижней части рамы. Лидар располагается в небольшом помещении типа контейнера, имеющем окно в крыше.

Заметим, что частичное блокирование окна дождем или снегом не искажает данные, как это происходит с простыми лидарами. Дело в том что согласно формуле (3) коэффициент аэрозольного рассеяния определяется из отношения сигналов и поэтому результат не чувствителен к частичному блокированию окна каплями дождя, снегом или пылью. При необходимости дизайн всей системы может быть изменен.

Заметим, что система регистрации должна включать четыре 20-МГц счетчика фотонов, а интервал

накопления, определяющий временное разрешение, равняется 1 с (5000 выстрелов). Управление лидаром должно осуществляться через компьютер. Обязателен доступ к лидару через Интернет. Программное обеспечение лидара должно состоять из нескольких блоков, которые обеспечат получение и архивирование данных, аппаратные калибровки, контроль характеристики лидара в реальном времени, передачу на сервер и обработку записанных данных.

В предложенной конструкции стабильного лазерного приемопередатчика лидара высокого спектрального разрешения использован опыт, приобретенный в течение ряда лет в лидарной группе Висконсинского университета (США), возглавляемой Е. Eloranta [19, 25–27]. Это касается схемы стабилизации частоты лазера, фильтрации аэрозольного сигнала в молекулярном канале фильтром на парах иода, применения интерферометра Фабри–Перо в приемнике и проч. Основная идея заключается в том, чтобы аэрозольный лидар нового поколения стал калиброванным прибором, непрерывно и корректно определяющим оптические атмосферные параметры.

1. *Measures R.M.* Laser Remote Sensing. Florida: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
2. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere* / Editor Claus Weitkamp. Berlin: Springer, 2005. 443 p.
3. *Spinhirne J.D.* Micro pulse lidar // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, iss. 1. P. 48–55.
4. *Stewart S.A., Welton E.J., Berkoff T.A.* Solutions to Overlap Temperature Sensitivity in Micro Pulse Lidars // 25st Int. Laser Radar Conference, July 5–9. 2010. P. 907–910, St. Petersburg, Russia.
5. URL: <http://www.sesi-md.com/miro-pulse-lidar.html>
6. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. Wiley-IEEE, 2004. 616 p.
7. *Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П.* Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 293–299.
8. *Young A.* Rayleigh scattering // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 533–535.
9. *Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Wandinger U., Althausen D., Mattis I., Müller D.* Day-time operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry–Perot interferometer // Appl. Opt. 2005. V. 44, iss. 17. P. 3593–3603.
10. *Shipley S.T., Tracy D.H., Eloranta E.W., Tauger J.T., Sroga J.T., Roesler F.L., Weinman J.A.* High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1. Theory and instrumentation // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 23. P. 3716–3724.
11. *Fiocco G., Beneditti-Michelangeli G., Maischberger K., Madonna E.* Measurement of temperature and aerosol to molecule ratio in the troposphere by optical radar // Nature Phys. Science. 1971. V. 229. P. 78–79.
12. *Piironen P., Eloranta E.W.* Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter // Appl. Opt. 1994. V. 19, N 3. P. 234–236.
13. *Harms J., Lahmann W., Weitkamp C.* Geometrical compression of lidar return signals // Appl. Opt. 1978. V. 17, N 7. P. 1131–1135.
14. *Максумов Д.Д.* Астрономическая оптика. Изд. 2-е. Л.: Наука, 1979. 395 с.
15. *Hair J.W., Hostetler C.A., Cook A.L., Harper D.B., Ferrare R.A., Mack T.L., Welch Wayne, Izquierdo L.R., Hovis F.E.* Airborne High Spectral Resolution Lidar for profiling aerosol optical properties // Appl. Opt. 2008. V. 47, N 36. P. 6734–6753.
16. American National Standard Z136. 1–1993.
17. *Wang Z.G.* Wavelength compensation in fused fiber couplers: Ph.D. Dissertation, 1996. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
18. *Razekov I.A., Eloranta E.W., Hedrick J.P., Holz R.E., Kuehn R.E., Garcia J.P.* A High Spectral Resolution Lidar Designed for Unattended Operation in the Arctic // 21st Int. Laser Radar Conference, July 8–12, Quebec, Canada, 2002. P. 57–60.
19. URL: <http://lidar.ssec.wisc.edu>
20. *Forkey J.N.* Development and demonstration of filtered Rayleigh scattering – a laser based flow diagnostic for planar measurement of velocity, temperature and pressure: Ph.D. dissertation. Princeton University, 1996.
21. *Hair J.W., Caldwell L.M., Krueger D.A., She C.-Y.* High spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters: measurement of atmospheric-state and aerosol profiles // Appl. Opt. 2001. V. 40, N 30. P. 5280–5294.
22. *Eloranta E.W., Razekov I.A.* Frequency locking to the center of a 532 nm iodine absorption line by using stimulated Brillouin scattering from a single-mode fiber // Opt. Lett. 2006. V. 31, N 5. P. 598–600.
23. *Alvarez-Chavez A., Offerhaus H.L., Nilsson J., Turner P.W., Clarkson W.A., Richardson D.J.* High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser // Opt. Lett. 2006. V. 25, N 1. P. 37–39.
24. *Wei Shi, Petersen E.B., Nguyen D.T., Zhidong Yao, Arturo Chavez-Pirson, Peyghambarian N., Jirong Yu.* 220 μ J monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at 2 μ m by using highly T_m -doped germanate fibers // Opt. Lett. 2011. V. 36, N 18. P. 3575–3577.
25. *Razekov I.A., Eloranta E.W., Razekov I.I.* Stable Coaxial Lidar Transceiver // 25st Int. Laser Radar Conference, July 5–9, 2010. St. Petersburg, Russia. P. 195–198.
26. *Разекков И.А., Eloranta E.W., Hedrick J.P., Garcia J.P.* Арктический лидар высокого спектрального разрешения // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 94–102.
27. *Razekov I.I., Eloranta E.W., Lawson M., Garcia J.P.* Mobile High Spectral Resolution Lidar // 26st Int. Laser Radar Conference, June 25–29, 2012. Porto Heli, Greece.

I.A. Razekov. Aerosol lidar for continuous atmospheric measurements.

The project of the eye-safe High Spectral Resolution Lidar with a wavelength of 532 nm is proposed. Absolute calibration is provided by the molecular channel with iodine cell cavity for filtration of the aerosol signal. Transmitter has a laser beam expansion via receiving telescope to have a design with high thermo-mechanical stability to install small field-of-view and substantially reduce background sky noise. A detailed optical diagram of the transceiver is provided by the transmitter and receiver located on different sides of the optical bench. Characteristics of the laser and the system are given. Calculated lidar returns and errors of measurements are estimated. To have ten percent accuracy in troposphere, the aerosol backscattering and optical depth time of averaging should be from ten seconds to one minute. Proposed system must run continuously and be unattended.