

Потенциальные возможности систем лазерного зондирования атмосферы при широкой изменчивости оптико-физических характеристик: безразмерно-параметрическое моделирование

Р.Р.Агишев

В рамках обобщения подходов к моделированию атмосферных лидаров расширены возможности методологии безразмерно-параметрического анализа. Разработанный подход упрощает анализ отношения сигнал/шум и потенциальных возможностей существующих и вновь разрабатываемых систем мониторинга при широкой изменчивости атмосферно-оптических условий и большом разнообразии современных лидаров. Обсуждается его применимость к задачам зондирования атмосферы, экологического мониторинга и лидарной навигации при обеспечении безопасности для глаз, помехоустойчивости и надежности.

Ключевые слова: лазерное дистанционное зондирование, лидар, атмосфера, оптико-физические параметры, отношение сигнал/шум, дальность действия, безопасность для глаз, точность измерений, помехоустойчивость.

1. Введение

При исследованиях состояния атмосферы особое место занимают лазерные методы бесконтактного мониторинга, обеспечивающие возможность получения данных с высокой оперативностью и на значительных пространственных масштабах, а также возможность выявления динамики их изменений. Предложенные достаточно давно лидарные методы дистанционного зондирования [1–4] используют рассеяние и поглощение лазерного излучения исследуемыми компонентами. За последние десятилетия появились сотни лидарных систем, варианты конструкций и практической реализации которых сильно различаются, что обуславливает как многообразие параметров передающих и приемных трактов, так и достигнутые пределы детектирования, дальности действия и т. п.

Современные тенденции таковы, что разработчики систем постепенно отказываются от экстенсивных подходов. Как перспективный класс систем зондирования успешно реализуются построенные на основе лазерных диодов микролидары [5, 6], безопасные для глаз [7–9], и модулированные непрерывные лидары [10, 11], альтернативные импульсным. Другой тренд – это применение многоволновых лидаров [12, 13], способных зондировать среду в широком спектральном диапазоне, используя эффекты упругого и комбинационного рассеяния и поглощения. В лидарных приемниках, работающих как в аналоговом режиме, так и в режиме счета фотонов [14–18], применяются быстродействующие фотодетекторы [9, 17–20], приемные модули на их основе со встроенными блоками усиления, цифровой обработки и управления [19, 20] и т. д.

Традиционные подходы к анализу соотношений между эхо-сигналами зондирования, внешним фоном и внутренними шумами сложились достаточно давно. Детальные

описания базируются на использовании строгих моделей фотодетекторов [21–25], которые требуют учета значительного числа специфических параметров самых разных фотоприемников. В то же время, базируясь на упомянутых подробных и глубоко обоснованных подходах, приведенное ко входу отношение сигнал/шум ρ для обобщенной системы прямого фотодетектирования с внутренним усилением в присутствии внутренних и внешних шумов может быть представлено в следующей компактной форме [16, 18, 26, 27]:

$$\rho = \frac{\sqrt{N}P_s}{\sqrt{P_q(P_s + P_b) + P_n^2}}, \quad (1)$$

где P_s , P_q , P_n , P_b – мощности принимаемого сигнала, квантовых и внутренних шумов и фоновой помехи; N – число циклов накопления.

Отношение сигнал/шум – это привычный и наиболее часто применяемый на практике критерий эффективности лидарного инструмента. Критерий сигнал/шум является интегральным, поскольку включает в себя параметры лидарного инструмента, исследуемого атмосферного объекта, среды распространения, внешней фоновой радиации. В этом состоит удобство критерия сигнал/шум, т.к. он учитывает результат совместного влияния очень многих факторов.

Однако интегральность критерия является и его слабым местом, поскольку иногда оказывается весьма сложным разделить факторы и оценить их влияние по отдельности, чтобы облегчить задачу для разработчика и пользователя. Совершенно очевидно, что сопоставление эффективностей разных лидарных систем и их потенциальных возможностей будет корректным, только если условия проведения эксперимента, включающие в себя, кроме аппаратурных, оптико-физические параметры исследуемой среды и внешнего фонового излучения, фактор дальности и др., будут сходными. В отсутствие критической оценки влияния различных факторов в отдельности, оценить эффективность подсистем лидара и измерительного инструмента в целом очень трудно [16, 28–30]. Поэтому

Р.Р.Агишев. Казанский государственный энергетический университет, Россия, 420066 Казань, ул. Красносельская, 51; e-mail: ravil_agishev@mail.ru

Поступила в редакцию 5 ноября 2016 г., после доработки – 9 января 2017 г.

при формулировке критериев всесторонней оценки потенциала конкретного лидарного инструмента полезно закладывать в них универсальность и безразмерность, чтобы обеспечить применимость критериев в разных условиях функционирования и в различных приложениях мониторинга атмосферы.

При традиционной оценке потенциала и сравнении лидарных систем в условиях многообразия целей и задач мониторинга и встречающихся атмосферно-оптических ситуаций для упрощения анализа часто приходится принимать различные допущения [31–33], которые, как правило, основываются на обычно используемых предположениях о той или иной взаимосвязи характеристик приемного тракта и существенном превышении одних шумов над другими. В результате достоверность оценок и качество сопоставлений оказываются невысокими из-за ограниченного набора ситуаций, в которых они реально применимы. При этом за формальными алгоритмами и «игрой» с разновидностями их аналитического и графического представления зачастую теряется физический смысл.

Другим ограничением традиционных подходов к анализу потенциала систем лазерного дистанционного зондирования является несколько абстрагированный учет влияния фоновой помехи, темновых и иных шумов лидарного приемника [14, 18, 26] – только как источников избыточных шумов; при этом зачастую оказываются забытыми характеристиками зондируемой среды, параметры лидарного инструмента и т. д. Предлагаемый нами подход позволяет преодолеть такие ограничения.

Наконец, в последние годы созданы международные сети атмосферных исследований, объединяющие научные коллективы в университетах-партнерах, такие как EARLINET-1 и EARLINET-2 (European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology), ACTRIS-1 и ACTRIS-2 (Aerosols, Clouds & Trace Gases Research InfraStructure), CLOUDNET, SPALINET и др. На регулярной основе проводятся совместные сессии по дистанционному зондированию параметров атмосферы, в тесном взаимодействии анализируются и публикуются полученные результаты [19, 20, 34]. Сети включают в себя множество лабораторий и рабочих групп в разных странах, причем в большинстве из них используются лидары, не произведенные серийно. Инструменты различаются по структуре, конструкции и комплектации, но в то же время очевидно, что в рамках сетей необходимо обеспечивать гомогенность результатов как возможность адекватного сравнения данных, получаемых на разных станциях. В связи с этим участниками сетей неоднократно высказывалось пожелание о разработке эффективной методологии оценки потенциала лидаров, которая позволила бы сопоставлять разнообразные инструменты зондирования атмосферы, от микролидаров до систем, использующих сверхмощные импульсные лазеры.

Ниже обсуждаются вопросы выбора и обобщения критериев, которые могут применяться для оценки потенциала и эффективности лидаров для широкого круга задач дистанционного зондирования атмосферы и экологии. Эти критерии должны быть удобными в качестве основы методологии сравнения и для обоснованного выбора инструмента для конкретных приложений.

Цель работы – дальнейшее развитие и расширение методологии безразмерно-параметрического моделирования лазерных систем дистанционного зондирования [15–17, 28–30, 35–37] для максимального обобщения критериев

и упрощения анализа потенциала существующих и вновь разрабатываемых систем, а также для обеспечения возможности комплексного и эффективного сравнения приемопередатчиков разных лидаров при широкой изменчивости атмосферно-оптических условий мониторинга и большом разнообразии подходов к построению систем зондирования и используемой инструментальной базы.

2. Методология

Наш подход предназначен для анализа и комплексного сопоставления систем зондирования атмосферы и предусматривает обобщение, модификацию и упрощение традиционно используемых алгоритмов для оценки отношения сигнал/шум и точности измерений вдоль измерительной трассы. Эти алгоритмы преобразуются и далее обрабатываются таким образом, что отдельные компоненты отношения сигнал/шум, определяемые «дальностным» профилем реально принимаемого системой лидарного эхо-сигнала и источниками шумов и помех разной природы, представляются нормированными на мощность опорного сигнала. Считается, что вводимый нами опорный эхо-сигнал стимулирован и принят приемопередатчиком этого же лидара с опорной дальности при зондировании тщательно подобранного опорного атмосферного объекта (в качестве которого выбрана молекулярная атмосфера), проводимом в присутствии фонового излучения неба с опорной яркостью.

При этом с помощью простого и физически прозрачного набора безразмерных параметров ставится задача связать и алгоритмически объединить важнейшие компоненты лазерного зондирования, а именно: компоненты приемопередающей системы, исследуемой среды и окружающего фонового излучения, которые совместно определяют потенциал лидара и его возможности как инструмента дистанционного мониторинга. Такой подход существенно облегчает количественное сравнение характеристик разных лидаров, заранее предлагая обобщенную оценку их потенциала на основе вводимых безразмерных параметров. Он также способен наглядно демонстрировать возможности и ограничения конкретных систем, как действующих, так и вновь разрабатываемых, придавая результатам простой физической смысл и наглядность.

Яркость излучения неба как источника фоновой помехи также нормируется на опорную яркость фоновой помехи, выбираемую в качестве нижнего предела типичного диапазона яркостей неба для средних широт, которая, как минимум, присутствует на чувствительной площадке фотоприемника лидара.

2.1. Опорная среда и дальность. Опорная яркость фона

Рассмотрим случай моностатического зондирования лидаром обратного рассеяния, когда оптический излучатель и приемная система расположены в непосредственной близости друг от друга. Пространственное изменение оптических параметров атмосферы на трассе зондирования связано с мощностью обратно рассеянного излучения известным соотношением, называемым уравнением лазерного зондирования, или лидарным уравнением [1–3], которое в приближении однократного рассеяния имеет вид

$$P_s(\lambda, R) = 1/2 G(R) \xi(\lambda) c E(\lambda) A_D \beta_\pi(\lambda, R) T^2(\lambda, R) R^{-2}, \quad (2)$$

где

$$T(\lambda, R) = \exp\left[-\int_0^R \alpha(\lambda, r) dr\right]; \quad (3)$$

E – энергия импульса излучателя; c – скорость света; λ – длина волны; R – текущая дальность зондирования; A_D – площадь приемного объектива; $\beta_\pi = \sigma_v i_\pi$ – объемный коэффициент обратного рассеяния; σ_v – объемный показатель рассеяния; i_π – лидарное отношение, или модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла π ; α – объемный показатель ослабления; ξ – пропускание приемной оптической системы; $G(R)$ – геометрический фактор лидара, характеризующий интегралом перекрытия зондирующего пучка и поля зрения приемника (при полном перекрытии $G(R) = 1$); T – коэффициент пропускания, или прозрачность атмосферы.

2.1.1. Молекулярная атмосфера как опорная среда.

Опорный эхо-сигнал. Для оценки потенциала лидарного инструмента и корректного сопоставления эффективности технических решений, использованных при разработке различных инструментов, в качестве критерия сравнения и оценки полезно выбрать обобщенный параметр или систему параметров лидара. С одной стороны, такой параметр должен характеризовать саму измерительную систему. С другой стороны, для удобства практического применения надлежащим образом подобранный критерий сравнения разных лидарных инструментов должен включать в себя параметры некоторого стандартного рассеивающего объекта исследований и типичной среды распространения. Роль такого универсального тест-объекта с успехом может сыграть молекулярная атмосфера, стандартные параметры которой являются общепринятыми. Например, часто считают, что на $\lambda = 0.55$ мкм объемный показатель ослабления стандартной молекулярной атмосферы при нормальных условиях $\alpha_0 = 0.0116$ км⁻¹, а индикатриса рассеяния молекулярной атмосферы $i_{\varphi 0} = 3(1 + \cos^2\varphi)/16\pi$ [38, 39], причем для угла рассеяния $\varphi = \pi$ значение индикатрисы принимают равным $3/8\pi$.

Использование такой среды в качестве опорной имеет несколько преимуществ:

1. Сравнение лидарных эхо-сигналов, принятых от стандартизованного тест-объекта, в отсутствие атмосферной изменчивости обеспечивает прямое и простое сопоставление потенциалов лидаров.

2. Сравнение лидарных эхо-сигналов, пришедших от произвольного атмосферного объекта и нормированных на сигналы опорной молекулярной атмосферы, дает прямую оценку чувствительности измерений, достигаемой каждой системой.

3. Сравнение опорных эхо-сигналов с сигналами, обусловленными различными состояниями атмосферы вдоль трассы зондирования (например, слоями с высокой концентрацией аэрозоля и т. п.), позволяет непосредственно оценивать влияние атмосферного ослабления сигналов вдоль трассы зондирования на потенциальные возможности лидарных измерений.

2.1.2. *Опорный эхо-сигнал молекулярной атмосферы и опорная дальность.* В качестве опорного выберем эхо-сигнал лидара обратного рассеяния $P_{s0}(\lambda, R_0)$, принятый на длине волны зондирования λ с некоторой опорной дальности R_0 для стандартных условий молекулярной атмосферы. Опорную дальность R_0 можно рассматри-

вать как естественную линейную шкалу, которая может быть или не быть существенной для исследуемой системы. Тогда

$$P_{s0}(\lambda, R_0) = 1/2 \xi(\lambda) c E(\lambda) A_D \beta_{\pi 0}(\lambda, R_0) T_0^2(\lambda, R_0) R_0^{-2}. \quad (4)$$

Показатель ослабления чистой атмосферы [26, 27], когда метеорологическая дальность видимости S_m превышает 10 км, можно представить в виде $\alpha(\lambda) = (\lambda/0.55)^{-q} (3.91/S_m)$, где $q = 0.585 S_m^{1/3}$; λ взято в мкм, а S_m – в км.

Отметим, что нормировка дальности действия R лидарного инструмента на некоторое опорное расстояние R_0 до тест-объекта позволяет использовать безразмерный фактор дальности $r = R/R_0$, удобный для сопоставления результатов. Абсолютное значение R_0 может выбираться по-разному в зависимости от конкретных условий применения лидара.

2.1.3. *Опорная яркость фона неба.* При проведении атмосферно-оптических измерений прием эхо-сигналов, несущих информацию о свойствах среды, осуществляется в присутствии фоновой засветки. Если при лабораторных измерениях, как правило, удается устранить источники фонового излучения или скомпенсировать их действие, то в естественной атмосфере интенсивность фона может быть очень высокой, и бороться с фоновой помехой значительно труднее. Под фоновым излучением обычно подразумевают поступающие в оптический приемник фотоны в виде потока или разрешаемых во времени отдельных фотонов, которые препятствуют правильному приему эхо-сигналов, не связаны с эхо-сигналами по своей природе и спектр которых лежит в пределах полосы чувствительности приемника. По месту возникновения и происхождению фоновое излучение обычно относят к внешним естественным помехам. Защита от фоновых помех является одной из важных задач, решаемых в процессе выделения полезной информации при лидарных измерениях [14, 27, 32, 38, 39].

Условия естественного освещения под открытым небом определяются тремя основными источниками: Солнцем, которое является подвижным и практически точечным первичным источником; небом, т. е. атмосферой, рассеивающей солнечный свет; земными покровами, которые отражают падающий на них свет Солнца и неба. Вследствие движения Солнца и изменения состояния атмосферы и земных покровов световое поле, создаваемое этими источниками, непрерывно изменяется во времени. Поэтому естественная освещенность неба является сложной функцией времени, имеющей стохастический характер.

Основной источник свечения дневного неба в области спектра с длинами волн менее 3 мкм – рассеянное солнечное излучение. Оценивая яркость Солнца как $B_{S\lambda} = 2hc^2/(\lambda^5 \{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1\})$, иногда принимают, что на длине волны 0.5 мкм цветовая температура Солнца составляет 6500 К, а его средняя яркость в видимом диапазоне – 2×10^9 кд/м² [2, 21, 40]. Обычно ее считают равной 10^{-5} от яркости Солнца, причем яркость дневного неба в большой степени зависит от положения Солнца на небе и высоты места наблюдения над уровнем моря.

Аналогично введенным выше опорному эхо-сигналу P_{s0} и опорной дальности R_0 введем опорную яркость фона неба $B_{0\lambda}$. На средних широтах в интервале длин волн 0.3–1.1 мкм (от УФ до ближнего ИК диапазона)

типичный диапазон яркостей фона дневного неба $B_\lambda = 10^6 - 3 \times 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [21, 26, 27]. Примем опорную яркость неба $B_{0\lambda}$ равной $10^6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, что примерно в 300 раз меньше максимальной яркости фона на средних широтах. При этом будем считать распределение яркости фона по длинам волн соответствующим спектру солнечного излучения.

Регистрируемая на длине волны зондирования λ мощность фона неба определяется только его яркостью и параметрами приемной системы конкретного лидара. Фон неба с опорной яркостью $B_{0\lambda}$, выбираемой как нижний предел типичного диапазона яркостей для средних широт, создает на чувствительной площадке фотоприемника конкретного лидара фоновый поток мощностью [14, 18, 21]

$$P_{b0}(\lambda) = B_{0\lambda} \xi(\lambda) A_D \Omega \Delta\lambda(\lambda), \quad (5)$$

которую будем называть опорной мощностью фона. Здесь Ω – телесный угол поля зрения приемной системы; $\Delta\lambda$ – полоса пропускания спектрального фильтра. Такой уровень фоновой помехи, как минимум, присутствует на входе фотодетектора, и поэтому его необходимо принимать во внимание при анализе потенциала лидара как источник избыточных шумов приемника. В свою очередь, мощность фоновой засветки произвольной яркости можно представить в виде

$$P_b(\lambda) = \frac{B_\lambda}{B_{\lambda 0}} P_{b0}(\lambda) = b_{\text{rel}} P_{b0}(\lambda), \quad (6)$$

где

$$b_{\text{rel}} = B_\lambda / B_{0\lambda} \quad (7)$$

– относительная яркость фона неба.

3. Безразмерно-параметрическая модель лидарной системы как инструмент оценки потенциала и эффективности лидара

Проведем нормировку всех компонент уравнения (1) на введенный опорный эхо-сигнал молекулярной атмосферы (4) (N – число циклов накопления):

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P_s \sqrt{N}}{\sqrt{P_q (P_s + P_b) + P_n^2}} \\ &= \frac{\sqrt{N} P_s / P_{s0}}{\sqrt{(P_q / P_{s0}) (P_s / P_{s0} + P_b / P_{s0}) + P_n^2 / P_{s0}^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

3.1. Нормированный эхо-сигнал

Из соотношений (2)–(4) получим отношение мощностей эхо-сигнала и опорного сигнала:

$$\begin{aligned} P_s(\lambda, \alpha, R) / P_{s0}(\lambda, \alpha_0, R_0) &= [\beta_\pi(\lambda, R) / \beta_{\pi 0}(\lambda, R_0)] \\ &\times [T(\lambda, \alpha, R) / T(\lambda, \alpha_0, R_0)]^2 (R_0 / R)^2. \end{aligned}$$

Введем обозначения: $Q = \beta_\pi(\lambda, R) / \beta_{\pi 0}(\lambda, R_0) = i_\pi(\lambda, R) \alpha(\lambda, R) \times [i_{\pi 0}(\lambda, R_0) \alpha_0(\lambda, R_0)]^{-1}$ (здесь $\alpha = \alpha_0$) и $W = T(\lambda, \alpha, R) / T(\lambda, \alpha_0, R_0)$. Во многих случаях справедливо выражение $\beta_\pi(\lambda) = 0.019 \times$

$\alpha^{0.57}(\lambda)$ (α взято в км^{-1}) [27, 38, 39], причем в молекулярной атмосфере $\beta_{\pi 0}(\lambda) = (3/8\pi) \alpha_0(\lambda)$. Объединим параметры Q , W и r в нормированный лидарный сигнал

$$\Pi \equiv P_s / P_{s0} = Q W^2 r^{-2}, \quad (9)$$

который характеризует относительную атмосферно-оптическую ситуацию (оптическую «погоду») вдоль трассы зондирования с учетом квадрата дальности, приведенную к состоянию молекулярной атмосферы, принятой за опорную. При оценках диапазона изменений нормированного эхо-сигнала Π для аэрозольного лидара обратного рассеяния в однородной атмосфере можно считать, что $\Pi = [\beta_\pi(R) / \beta_{\pi 0}(R_0)] \exp[-2(\alpha R - \alpha_0 R_0)] (R_0 / R)^2$.

Информация о Международной шкале видимости, дающей представление о связи метеорологической дальности видимости S_m с прозрачностью T и объемным показателем ослабления атмосферы α при разных условиях наблюдения, представлена в Приложении 1.

3.2. Парциальные отношения сигнал/шум

Введем парциальные отношения сигнал/шум S_q , S_{b0} , S_n , понимаемые как частные показатели ухудшения чувствительности (потенциала) системы зондирования, обусловленные дробовыми шумами сигнала и фоновой помехи, а также внутренними шумами фотодетектора:

$S_q = P_{s0} / P_q$ – парциальное отношение мощностей опорного сигнала и квантового шума детектора, приведенного ко входу;

$S_n = P_{s0} / P_n$ – парциальное отношение мощностей опорного сигнала и внутреннего шума детектора;

$S_{b0} = P_{s0} / P_{b0}$ – парциальное отношение мощностей опорного сигнала и опорного фона.

Целесообразность введения парциальных отношений S_q , S_n , S_{b0} и параметра Π состоит в том, что с их использованием можно учесть различные источники внутренних и внешних шумов, присущих конкретной системе, и связать эти шумы с параметрами зондируемой среды. При этом системные шумы и их влияние будут рассматриваться не сами по себе, а в сопоставлении с опорным эхо-сигналом, принятым с опорной дальности и сформированным в результате зондирования референтной атмосферы конкретным лидаром при воздействии фоновой помехи с опорной яркостью, которая, как минимум, присутствует на входе фотодетектора. Анализ будет проводиться с использованием параметров приемопередатчика лидарной системы и являться, таким образом, «привязанным» к конкретному инструменту дистанционного зондирования атмосферы.

3.3. Степень превышения избыточными шумами лидарного приемника его квантовых шумов

Проведем простые преобразования отношения сигнал/шум, используя (8) и учитывая (7):

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\sqrt{N} P_s / P_{s0}}{\sqrt{(P_q / P_{s0}) (P_s / P_{s0} + P_b / P_{s0}) + P_n^2 / P_{s0}^2}} \\ &= \frac{\Pi \sqrt{N}}{\sqrt{S_q^{-1} (\Pi + b_{\text{rel}} / S_{b0}) + S_n^{-2}}} = \frac{\Pi \sqrt{N} \sqrt{S_q}}{\sqrt{\Pi + S_q / S_n^2 + b_{\text{rel}} / S_{b0}}}. \end{aligned}$$

С целью упрощения выражения и с учетом параметров конкретной приемопередающей системы введем обобщающий параметр

$$A = b_{\text{rel}}/S_{b0} + S_q S_n^{-2} \quad (10)$$

как безразмерную характеристику шумов лидара в присутствии фоновой помехи, превышающих квантовый шум и нормированных на виртуальный опорный сигнал. В результате получим простое выражение для оценки приведенного ко входу отношения сигнал/шум лидарной системы:

$$\rho = \frac{\Pi \sqrt{N} \sqrt{S_q}}{\sqrt{\Pi + A}} = \frac{\sqrt{\Pi N S_q}}{\sqrt{1 + A/\Pi}}, \quad (11)$$

применимое для любых инструментов лазерного зондирования.

Достоинством формы представления отношения сигнал/шум в виде (11) является очевидность того, что при больших по сравнению с параметром A значениях нормированного эхо-сигнала Π (при малых отношениях A/Π) достигаются лучшая точность зондирования, поскольку реализуются большие отношения сигнал/шум вдоль трассы, и предельная чувствительность лидара. В свою очередь, при $A > \Pi$ избыточные системные шумы существенно превышают квантовые, ухудшая точность.

Как упоминалось во Введении, при оценке потенциальных возможностей лидарных систем для упрощения анализа обычно предполагают, что чувствительность приемника ограничивается квантовым шумом, мощность которого $P_q = 2hcF\Delta f/(\lambda\eta)$ иногда рассматривается в качестве своего рода шкалы для оценки уровней сигнала, фоновой помехи и внутреннего шума, поскольку все они зависят от длины волны λ , коэффициента шума F , полосы пропускания Δf и квантовой эффективности η приемника. Адаптируя упомянутые подходы к выражениям (10) и (11), легко видеть, что при учете только квантового шума введенный нами A -фактор равен нулю, а отношение сигнал/шум ρ в этом случае оказывается равным $\sqrt{S_q \Pi} \sqrt{N}$. Очевидно, что избыточные шумы, превышающие квантовые шумы реального фотоприемника, при этом не принимаются во внимание.

Для яркости ночного неба, учитываемой в оценках в качестве минимальной, и в предположении, что $b_{\text{rel}} = 1$, выделим важное слагаемое A -параметра, характеризующего шумы приемника в присутствии фона:

$$A_0 = S_q/S_n^2 + S_{b0}^{-1}. \quad (12)$$

Тогда для яркости дневного неба

$$A = A_0 + (b_{\text{rel}} - 1)/S_{b0}. \quad (13)$$

Как следует из (12), безразмерный параметр A_0 обусловлен дробовыми и внутренними шумами приемника и минимальным уровнем присутствующей фоновой помехи. Он является исходной мерой избыточных шумов лидарного приемника по отношению к неизбежно присутствующему квантовому шуму сигнала. Параметр A_0 , рассчитанный заранее, еще до проведения экспериментов по зондированию, предоставляет количественную информацию о том, насколько значимо влияние избыточных шумов по сравнению с квантовым шумом сигнала

для конкретной приемопередающей системы при яркости окружающего фона, равной опорной.

При наличии реальной фоновой помехи, интенсивность которой в b_{rel} раз превышает опорную (при которой $b_{\text{rel}} = 1$), уровень избыточных шумов определяется выражением (13).

Возвращаясь к формуле (11) и учитывая (13), получаем для отношения сигнал/шум при зондировании среды, выбранной нами в качестве опорной, и приеме сигнала с опорной дальности в присутствии окружающего фона неба с опорной яркостью, когда $Q = 1$, $W = 1$, $r = 1$ (т.е. $\Pi = 1$) и $b_{\text{rel}} = 1$, выражение

$$\rho = \frac{\sqrt{S_q N \Pi}}{\sqrt{1 + A/\Pi}} = \frac{\sqrt{S_q N}}{\sqrt{1 + A_0}}. \quad (14)$$

3.4. Безразмерный системный параметр L_0 как обобщающая и универсальная характеристика потенциала лидара

Следуя (14), введем безразмерный системный параметр L_0 как отношение сигнал/шум, достигаемое при приеме эхо-сигнала с опорной дальности при зондировании референтной атмосферы без накопления ($N = 1$) и учете опорной яркости фона неба:

$$L_0 \equiv \rho(\Pi = 1, b_{\text{rel}} = 1, N = 1) = \sqrt{S_q/(1 + A_0)}. \quad (15)$$

При этом L_0 дает возможность прогнозировать отношение сигнал/шум, достигаемое при приеме сигнала с опорной дальности. Введение параметра L_0 как алгоритмической совокупности парциальных отношений сигнал/шум различной природы, характеризующих присущие конкретному лидару системные шумы, позволяет оценивать потенциал и сравнивать возможности разных измерительных систем на предварительном этапе, еще до проведения дистанционных измерений.

Как отмечалось выше, использованные ранее подходы к нормировке лидарных сигналов и шумов на квантовый или иной шум [14–17, 22, 27–30, 35–40] удобны при сравнении разных источников шума. Однако их тонкое место – это некое отвлеченное рассмотрение шумов и как бы независимый анализ принимаемого сигнала и шумов. Введенные нами парциальные отношения S_q , S_n , S_b , входящие в выражение для A_0 (12), и ключевой системный параметр L_0 «привязывают» шумы к потенциалу конкретных лидарных инструментов и к их способности зондировать опорную среду на опорной дальности, что делает эффективной оценку реальной значимости параметров и удобным сравнение.

Более того, введение нормированного эхо-сигнала Π , непрерывно «отслеживающего» изменчивость оптико-физических свойств атмосферы вдоль зондируемой трассы и включающего в себя фактор дальности, позволяет провести обоснованную классификацию и полноценный учет шумовых характеристик конкретной лидарной системы. Действительно, только при надлежащим образом проведенном сопоставлении с лидарным сигналом, который определяется конкретной оптической погодой и дальностью, входящими в Π -параметр, системные шумы можно считать, например, приемлемо низкими или слишком высокими.

Тогда отношение сигнал/шум на выходе лидарного приемника удобно представить в виде выражения

$$\rho = \frac{\sqrt{S_q \Pi} \sqrt{N}}{\sqrt{1 + [A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}] \Pi^{-1}}} = L_0 \Pi \sqrt{N} \frac{\sqrt{1 + A_0}}{\sqrt{\Pi + A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}}}, \quad (16)$$

из которого в безразмерной форме легко проследить, какие факторы и каким образом влияют на результирующее отношение сигнал/шум при зондировании произвольного атмосферного объекта, и сравнить его с опорным отношением сигнал/шум, характеризуемым L_0 – первым множителем в (16).

Из общих соображений понятно, что точность измерений тем выше, чем меньше шумы приемника и фоновая помеха. Однако из (16), в частности, видно, что избыточные системные шумы (задаваемые безразмерными параметрами A_0 и $(b_{rel} - 1)/S_{b0}$) влияют на отношение сигнал/шум, чувствительность и дальность действия лидара так же, как и оптико-физические характеристики зондируемого объекта, которые определяют нормированный эхо-сигнал Π . Их значимость может быть несущественной или, напротив, высокой в зависимости от состояния оптической погоды вдоль трассы мониторинга. Именно в этом заключается существенное отличие полученного результата от нередко используемых упрощающих оценок, в которых влияние свойств зондируемого объекта оказывается завуалированным принимаемыми предположениями, существенно сужающими набор возможных атмосферно-оптических сред и ситуаций.

На рис.1 представлены зависимости введенного обобщенного системного параметра L_0 от фактора избыточных шумов A_0 , определяемого при учете только опорного уровня фона, т. е. при $b_{rel} = 1$, для различных значений S_q . Видно, что фотодетекторы с низким уровнем избыточных шумов ($A_0 < 0.5$) практически не влияют на потенциал системы, который задается только парциальным отношением опорного сигнала к квантовым шумам, поскольку согласно (15) в этом случае $L_0 \approx \sqrt{S_q}$.

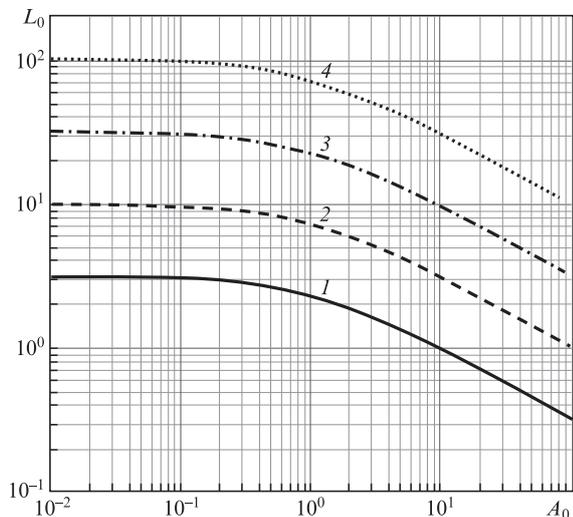


Рис.1. Зависимости $L_0(A_0)$ при $S_q = 10$ (1), 10^2 (2), 10^3 (3) и 10^4 (4).

«Шумящие» приемники ($A_0 \gg 1$), напротив, способны во много раз уменьшить потенциал лидара. Попутно отметим, что из (16) хорошо видно, что при использовании шумящих фотодетекторов внешняя фоновая помеха не так заметна, хотя в любом случае значимость ее вклада сопоставляется со вкладом безразмерного параметра эхо-сигнала Π . Влияние реальной фоновой помехи (при $b_{rel} \gg 1$), которая может существенно ухудшить точность измерений, будет рассмотрено ниже.

3.5. Влияние избыточных шумов на отношение сигнал/шум

Вернемся к безразмерной параметризации отношения сигнал/шум (11). Знаменатель в формуле (11) характеризует ухудшение точности измерений избыточными шумами приемника, превышающими квантовые, которые обусловлены темновым током, а также присутствием на чувствительной площадке лидарного фотодетектора фоновой засветки, в наибольшей степени вызванной рассеянным солнечным излучением. Назовем эту величину безразмерным фактором уменьшения отношения сигнал/шум избыточными шумами Φ_{ex} :

$$\Phi_{ex} = \left(\frac{\Pi}{\Pi + A} \right)^{1/2} = \left[\frac{\Pi}{\Pi + A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}} \right]^{1/2} = \left[1 + \frac{A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}}{\Pi} \right]^{-1/2}. \quad (17)$$

В каких пределах фактор фона может ухудшать отношение сигнал/шум и точность дистанционных измерений, показано на рис.2 в виде зависимостей Φ_{ex} от отношения

$$\frac{P_b}{P_{s0}} = \frac{A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}}{\Pi}$$

для различных оптико-физических условий зондирования и шумовых свойств фотодетекторов. Из рис.2 очевидно, что значимость и степень влияния как внутренних шумов приемника, так и фоновой помехи являются не абсолютными, а зависят от оптико-физических свойств зондируемого объекта, которые совместно с фактором дальности определяют Π -параметр. Действительно, при $\Pi \gg 1$ влияние избыточных шумов детектора и фона практически не заметно (кривые 3). По мере уменьшения Π влияние фоновой помехи возрастает, причем, сопоставляя зависимости для $A_0 \ll 1$ (рис.2,а) и $A_0 \gg 1$ (рис.2,б), легко видеть, что на малошумящие фотодетекторы фон влияет гораздо сильнее: фактор избыточных шумов Φ_{ex} обуславливает довольно резкое уменьшение результирующего отношения сигнал/шум уже при сравнительно невысоком уровне фоновой помехи. На шумящие детекторы заметно влияет лишь достаточно интенсивный фон ($P_b/P_{s0} > 1$).

Отметим, что в факторе избыточных шумов Φ_{ex} можно выделить ночную (Φ_n) и дневную (Φ_d) компоненты, определяемые параметрами A_0 и A , а также нормированным сигналом Π :

$$\Phi_{ex} = \Phi_n \Phi_d, \quad \Phi_n = \frac{\sqrt{\Pi}}{\sqrt{\Pi + A_0}}, \quad \Phi_d = \frac{\sqrt{\Pi + A_0}}{\sqrt{\Pi + A}}.$$

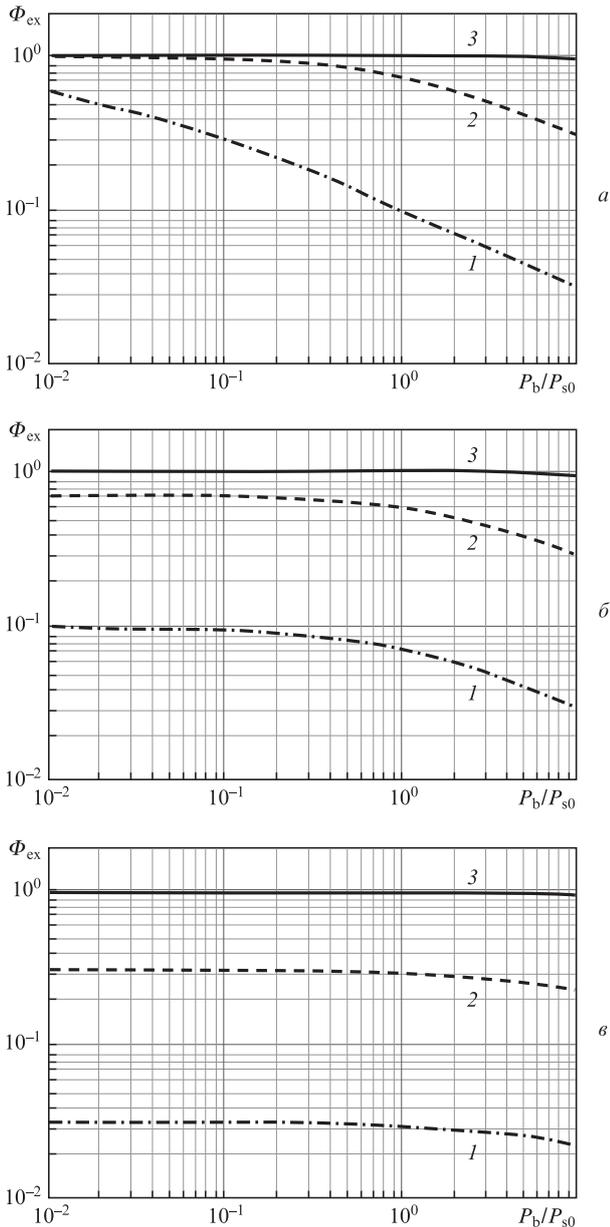


Рис.2. Фактор избыточных шумов Φ_{ex} в зависимости от отношения P_b/P_{s0} при $\Pi = 10^{-2}$ (1), 1 (2) и 10^2 (3) и $A_0 = 10^{-2}$ (а), 1 (б) и 10 (в).

3.6. Оценка отношения сигнал/шум при регистрации сигналов в режиме счета фотонов

При энергетическом приеме сигнал на выходе фотодетектора в зависимости от интенсивности принимаемого потока фотонов может представлять собой последовательность импульсов, наложенных друг на друга, или «редкую» последовательность разрешаемых и не наложенных друг на друга импульсов, которые нетрудно сосчитать [14, 18, 21, 38]. В первом случае средняя плотность импульсного потока $\bar{\gamma}$, определяемая числом импульсов в единицу времени \bar{n} , которые регистрируются за время, равное временному разрешению фотоприемника τ_{res} , велика: $\bar{\gamma} = \bar{n}\tau_{res} \gg 1$, где $\tau_{res} \approx \Delta f^{-1}$. Этот режим, при котором воспроизводится огибающая оптического сигнала, называют аналоговым, или токовым. Оценки отношения сигнал/шум вида (1), (8) и связанные с ними оценки подразумевают такой режим регистрации принимаемых сигналов обратного рассеяния.

При приеме слабых сигналов плотность импульсного потока мала ($\bar{\gamma} \ll 1$) и огибающая принимаемого лидарного сигнала не может быть воспроизведена. Фотодетектор способен регистрировать отдельные фотоэлектроны, т.е. работать в режиме счета фотонов, который еще называют дискретным. Подсчет входных сигналов на фоне внутренних и внешних шумов проводится по числу одноэлектронных импульсов n за время измерения Δt . С помощью усилителя и дискриминатора они преобразуются в последовательность стандартных импульсов, а их количество регистрируется счетчиком.

Принято считать, что число регистрируемых лидарной системой фотонов сигнала n_s и фотонов окружающего фона n_b , а также число темновых импульсов n_d описываются пуассоновской статистикой случайных процессов [14, 21, 27]. Поскольку такие процессы имеют равные математические ожидания M и дисперсии σ^2 ($M = \sigma^2$), то их значения для величин n_s, n_b и n_d за время наблюдения Δt определяются выражениями

$$M_s = \sigma_s^2 = \eta v_s \Delta t, \quad M_b = \sigma_b^2 = \eta v_b \Delta t, \quad M_d = \sigma_d^2 = v_d \Delta t,$$

где v_s, v_b, v_d – средние скорости счета фотонов сигнала, фотонов фона и темновых импульсов фотодетектора соответственно. При этом $v_i = P_i/E_0 = P_i \lambda / (hc)$, где $i = s, b, d$; E_0 – энергия кванта.

Полное число отсчетов $n_{tot} = n_s + n_b + n_d$ за время наблюдения Δt также является случайной величиной. Выражения для среднего значения числа отсчетов и дисперсии трех независимых пуассоновских процессов имеют вид

$$M_{tot} = M_s + M_b + M_d, \\ \sigma_{tot}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_b^2 + \sigma_d^2 = \eta v_s \Delta t + \eta v_b \Delta t + v_d \Delta t.$$

Отношение сигнал/шум ρ , рассчитываемое как отношение среднего числа M_s принятых фотонов сигнала к его среднеквадратичному отклонению σ_{tot} от общего числа фотонов за время наблюдения Δt , представимо в виде

$$\rho = \frac{M_s}{\sigma_{tot}} = \frac{\eta v_s \Delta t}{\sqrt{\eta v_s \Delta t + \eta v_b \Delta t + v_d \Delta t}},$$

или

$$\rho = \frac{\eta v_s \sqrt{\Delta t}}{\sqrt{\eta v_s + \eta v_b + v_d}}. \tag{18}$$

При накоплении результатов N циклов зондирования $M_{iN} = NM_i$ ($i = s, b, d$), $\sigma_{totN}^2 = N\sigma_{tot}^2$ [15, 36] и

$$\rho = \eta v_s \sqrt{N \Delta t} / \sqrt{\eta v_s + \eta v_b + v_d}. \tag{19}$$

В режиме счета фотонов амплитуда каждого импульса с фотодетектора сравнивается с порогом дискриминатора и считаются только те импульсы, амплитуда которых превысила порог. Вследствие статистической природы импульсы иногда могут следовать с очень малым интервалом, так что они становятся неразличимыми дискриминатором. Это приводит к потере событий, или к просчетам, обусловленным конечным временем разрешения устройств регистрации. Поэтому рассматривают так называемое «мертвое» время τ_{dd} , которое применительно

к счету фотонов обычно понимается как минимальный интервал времени, в течение которого два близких события могут быть сосчитаны как два отдельных события [14, 18, 27].

Выделяют два типа мертвого времени: парализуемое/продлевающееся и непарализуемое/непродлевающееся [27, 41]. В парализуемом случае одиночный фотон инициирует «расширяемое» следующим фотоном, пришедшим в течение времени τ_{dd} , мертвое время, которое уменьшает наблюдаемую скорость счета фотонов

$$v_{ob} = v_a \exp(-v_a \tau_{dd}), \tag{20}$$

где v_a – фактическая скорость счета фотонов. В непарализуемой системе «запускаемое» одиночным фотоном мертвое время не расширяется следующим фотоном, и

$$v_{ob} = v_a / (1 + v_a \tau_{dd}). \tag{21}$$

При лидарных измерениях чаще используются непарализуемые фотоприемники, для которых скорректированную скорость счета легко получить из (21):

$$v_a = v_{ob} / (1 - v_{ob} \tau_{dd}). \tag{22}$$

При этом выражения (20)–(22) применимы для сравнительно малых скоростей счета, когда $v_a \tau_{dd} < 1$.

4. Структура безразмерно-параметрической модели лидарной системы и результаты моделирования

4.1. Структурная схема безразмерно-параметрической модели

Как следует из (9) и (16), (17), отношение сигнал/шум, приведенное ко входу лидарного приемника, для $N = 1$ можно представить в следующем безразмерно-параметрическом виде:

$$\rho = \frac{\Pi \sqrt{S_q}}{\sqrt{\Pi + A}} = \Pi \sqrt{\frac{S_q}{1 + A_0}} \sqrt{\frac{1 + A_0}{\Pi + A}} = \Pi L_0 \sqrt{\frac{1 + A_0}{\Pi + A}},$$

или

$$\rho = \sqrt{\Pi S_q} \frac{\sqrt{\Pi}}{\sqrt{\Pi + A}} = \sqrt{\Pi S_q} \Phi_{ex}. \tag{23}$$

Введение нормированного лидарного сигнала $\Pi = QW^{2-r-2}$ позволяет при аналитическом прогнозировании уйти от необходимости рассмотрения многочисленных частных случаев и комбинаций. Поэтому обе формы выражения (23) представлены как произведение пяти независимых безразмерных сомножителей, каждый из которых имеет свою собственную природу.

Структура безразмерно-параметрической модели лидара, представленная на рис.3, показывает взаимосвязь между нормированными системными параметрами L_0 ,

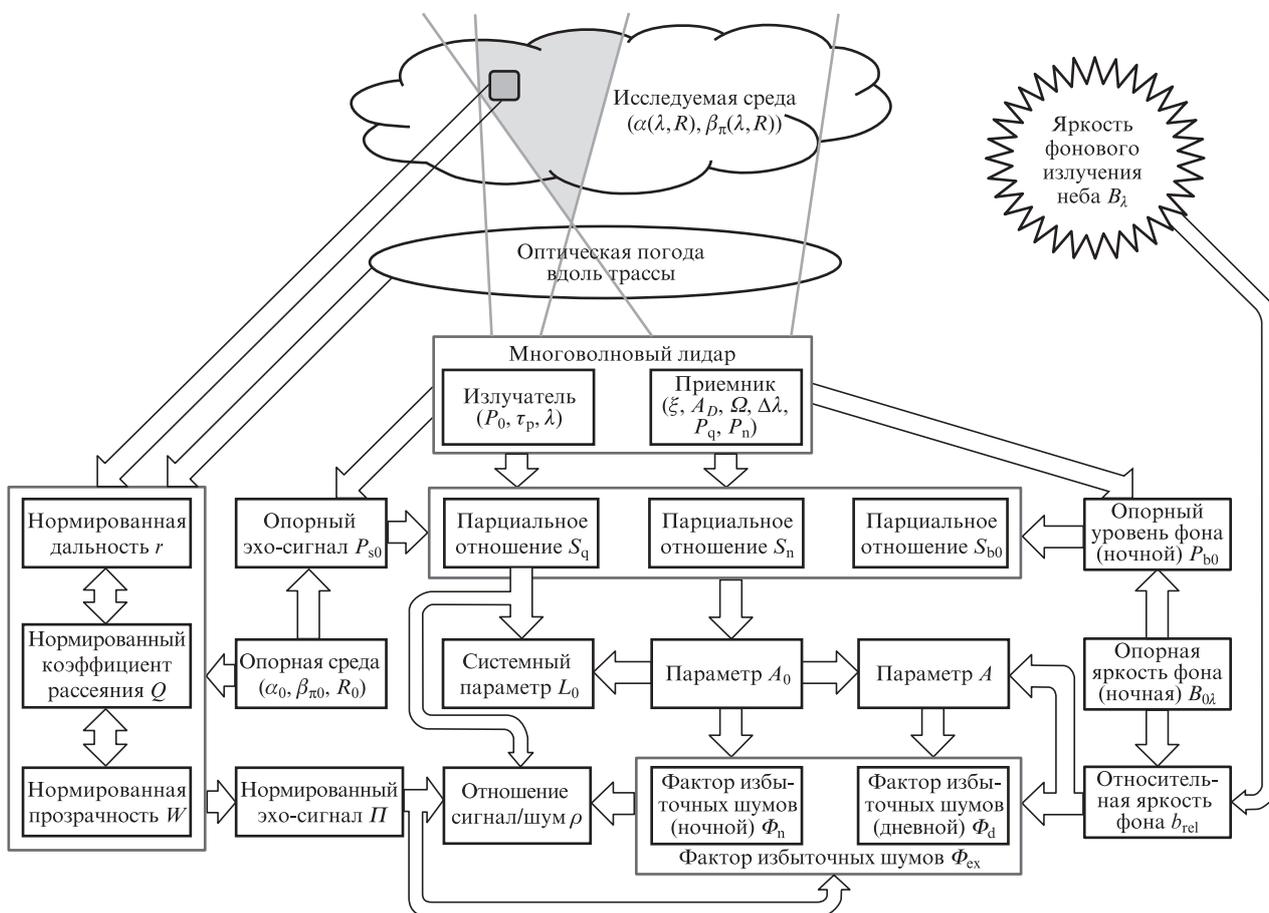


Рис.3. Структура безразмерно-параметрической модели лидарной системы.

Φ_{ex} , Q , W , r и компонентами измерительной системы, включая состояние зондируемого атмосферного объекта, лидарный передатчик и приемник, помехи, опорную среду, опорную дальность и опорную яркость фона.

4.2. Результаты безразмерно-параметрического моделирования систем лазерного дистанционного зондирования атмосферы

Проанализируем, насколько сильным может оказаться влияние яркой фоновой помехи, обусловленной рассеянным излучением неба. Согласно оценкам (16) влияние фоновой помехи (как и влияние внутренних шумов) сказывается на чувствительности лидарного приемника не напрямую, а опосредованно, через оптико-физические параметры исследуемой среды. Иначе говоря, позитивная особенность безразмерно-параметрического подхода заключается в том, что фон может оцениваться как «сильный» и как «слабый» по отношению к конкретному лидару, который зондирует конкретный объект окружающего воздуха. Рассмотрим рис.4, где зависимости отношения сигнал/шум от относительной яркости фона представлены для различных значений A_0 и Π .

Из рис.4,б видно, что шумящие фотодетекторы ($A_0 \gg 1$) существенно менее чувствительны к действию фоновой помехи: отношение сигнал/шум на их выходе снижается только при очень интенсивном фоне неба. Напротив, мал шумящие детекторы ($A_0 \ll 1$) в сравнительно прозрачной атмосфере ($\Pi \ll 1$) заметно теряют чувствительность уже при малых уровнях фоновой помехи (рис.4,а). В то же время видно, что по величине отношения сигнал/шум и чувствительности шумящие приемники с большими A_0 уступают приемникам с невысокими внутренними шумами уже при очень слабом фоне.

Для сравнения оценим уменьшение чувствительности и отношения сигнал/шум на выходе лидарного приемника под влиянием фоновой засветки относительно их уровней при опорной яркости, используя следующее соотношение:

$$\Phi_b^{SNR} = \frac{\rho(b_{rel})}{\rho(b_{rel} = 1)} = \sqrt{\frac{\Pi + A_0}{\Pi + A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}}}$$

Перепишем уравнение (11) для нормированного лидарного сигнала $P_s/P_{s0} = \Pi$ в виде

$$S_q N \Pi^2 - \rho^2 \Pi - \rho^2 A = 0. \tag{24}$$

Тогда пороговая чувствительность для заданного отношения сигнал/шум ρ

$$\begin{aligned} \Pi_{thr} &= \frac{\rho^2}{2S_q N} \left(1 + \sqrt{1 + 4S_q A N / \rho^2} \right) \\ &= \frac{\rho^2}{2L_0^2 (A_0 + 1) N} \left[1 + \sqrt{1 + 4(L_0^2 N / \rho^2)(A_0 + 1)A} \right], \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Pi_{thr} &= \frac{\rho^2}{2L_0^2 (A_0 + 1) N} \\ &\times \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4(L_0^2 N / \rho^2)(A_0 + 1)[A_0 + (b_{rel} - 1)/S_{b0}]} \right\}. \tag{25} \end{aligned}$$

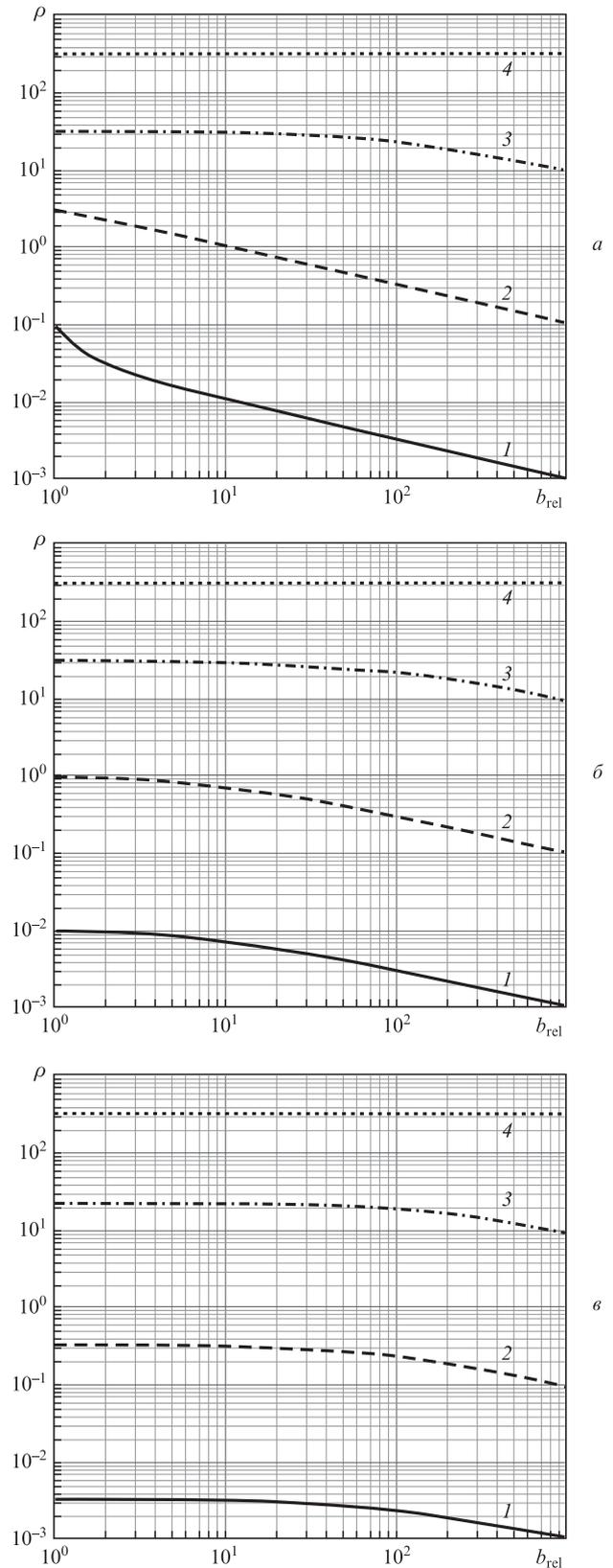


Рис.4. Зависимости отношения сигнал/шум от относительного уровня фоновой помехи b_{rel} при $S_q = 100$, $\Pi = 10^{-3}$ (1), 10^{-1} (2), 10 (3) и 10^3 (4) для $A_0 = 10^{-2}$ (а), 1 (б) и 10 (в).

Для сравнительно прозрачной исследуемой среды, когда $W^2 \approx 1$ (например, $W^2 > 0.9$ достижимо при $\alpha R < 0.05$), можно записать (см. Приложение 2) $\Pi \approx Qr^{-2}$, откуда $r \approx \sqrt{Q/\Pi}$. Поэтому максимальную дальность зондирования

для заданного отношения сигнал/шум ρ можно представить в виде

$$r_{\max} = \frac{L_0}{\rho} \left\{ \frac{2(A_0 + 1)NQ}{1 + \sqrt{1 + 4(L_0^2 N / \rho^2)(A_0 + 1)[A_0 + (b_{\text{rel}} - 1)/S_{\text{b0}}]}} \right\}^{1/2},$$

или

$$r_{\max} = \frac{\sqrt{S_q}}{\rho} \left\{ \frac{2NQ}{1 + \sqrt{1 + 4(S_q N / \rho^2)[A_0 + (b_{\text{rel}} - 1)/S_{\text{b0}}]}} \right\}^{1/2}.$$

4.3. Уменьшение дальности действия лидара под влиянием интенсивной фоновой засветки

Влияние фоновой засветки на дальность действия лидара для $N = 1$ и $\rho = 1$ можно оценить из следующего соотношения:

$$r_b = \frac{r_{\max}(b_{\text{rel}})}{r_{\max}(b_{\text{rel}} = 1)} = [1 + \sqrt{1 + 4L_0^2 A_0(A_0 + 1)}]^{1/2} \times \{1 + \sqrt{1 + 4L_0^2(A_0 + 1)[A_0 + (b_{\text{rel}} - 1)/S_{\text{b0}}]}\}^{-1/2}. \quad (26)$$

Разную чувствительность шумящих и слабошумящих приемных систем лидаров к фоновой засветке, задаваемой как $b_{\text{rel}} = B_\lambda/B_{0\lambda}$, иллюстрирует рис.5. Согласно (26) шумящие ($A_0 \geq S_{\text{b0}}^{-1}$) фотодетекторы ($A_0 = 10$) реагируют только на очень сильный фон неба, тогда как при $A_0 \ll S_{\text{b0}}^{-1}$ малошумящие фотодетекторы ($A_0 = 10^{-2}$) чувствительны уже к сравнительно невысоким его уровням.

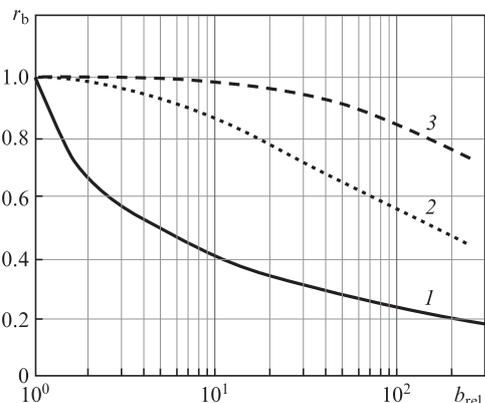


Рис.5. Дальность действия лидаров в зависимости от фоновой засветки при $A_0 = 10^{-2}$ (1), 1 (2) и 10 (3), $S_{\text{b0}} = 10$.

4.4. Безразмерно-параметрический подход к оценке потенциала лидаров с ФЭУ, ЛФД и Si-ФЭУ в качестве фотодетекторов

Прежде всего отметим, что в современных лидарных системах [5, 6, 8–20, 26–32, 34–39, 41], применяемых в области спектра от УФ до ближнего ИК диапазона, наиболее чувствительными и поэтому типичными фотодетекторами являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), лавинные фотодиоды (ЛФД) и твердотельные кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ). Как было определено в (12), безразмерный параметр A_0 характеризует влияние квантовых и внутренних шумов приемника и минимального уровня фоновой помехи. Проследим

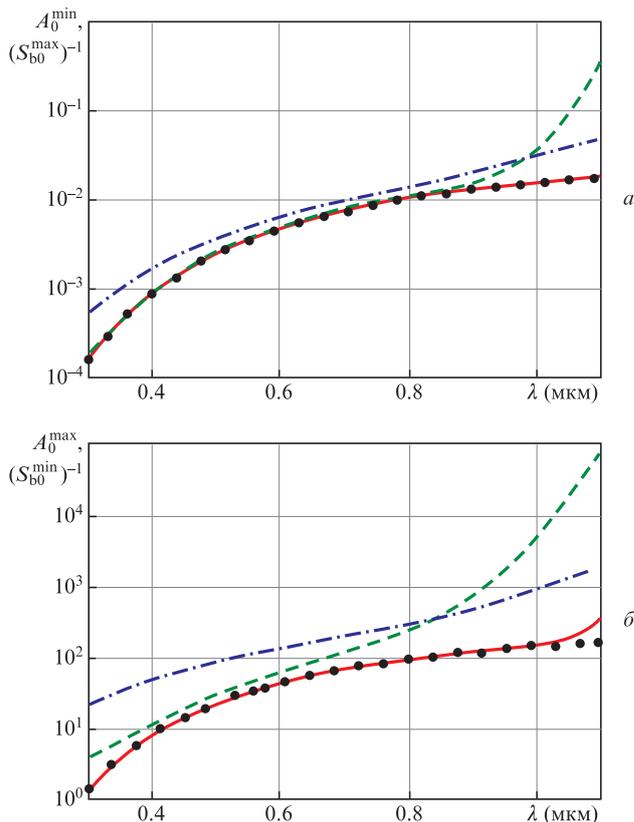


Рис.6. Спектральные зависимости параметра A_0 для ФЭУ (сплошные кривые), ЛФД (штрих-пунктирные кривые) и Si-ФЭУ (штриховые кривые), а также верхних (а) и нижних (б) пределов обратного парциального отношения $S_{\text{b0}}^{-1} = P_{\text{s0}}/P_{\text{b0}}$ (точки).

спектральные изменения A_0 как меры шумов лидарного приемника, превышающих квантовый шум, в диапазоне длин волн 0.3–1.1 мкм.

На рис.6 показаны результаты моделирования поведения A_0 , адаптированные к спектральным и энергетическим характеристикам ФЭУ, ЛФД и Si-ФЭУ. Также на рис.6 приведены спектральные зависимости обратной величины ранее введенного нами парциального отношения опорного сигнала к опорному уровню фоновой помехи $S_{\text{b0}} = P_{\text{s0}}/P_{\text{b0}}$, не зависящего от типа фотодетектора.

Сопоставление уровней избыточных шумов трех типов высокочувствительных фотодетекторов, влияние которых описывает параметр A_0 , показывает, что нижний предел A_0 (характеризующий малошумящие фотодетекторы) практически во всех случаях близок к уровню ограничения, определяемому минимальным уровнем опорной фоновой помехи. Принимая во внимание вариативность параметров моделей промышленно выпускаемых ФЭУ, ЛФД и Si-ФЭУ, можно отметить, что шумящие ФЭУ во всем спектральном диапазоне имеют более низкий уровень избыточных шумов, чем два других типа приемников.

Комплексное влияние оптико-физических параметров исследуемой среды, яркости фоновой помехи и обобщенных параметров лидарного передатчика на чувствительность измерений и реализуемое отношение сигнал/шум иллюстрирует рис.7. Из большой серии результатов проведенных модельных расчетов выбраны и показаны несколько дальностных профилей достигаемого отношения сигнал/шум с компенсацией фактора дальности при зондировании модельного объекта (профили в верхней части рис.7,а–в) в окружающем воздухе разной опти-

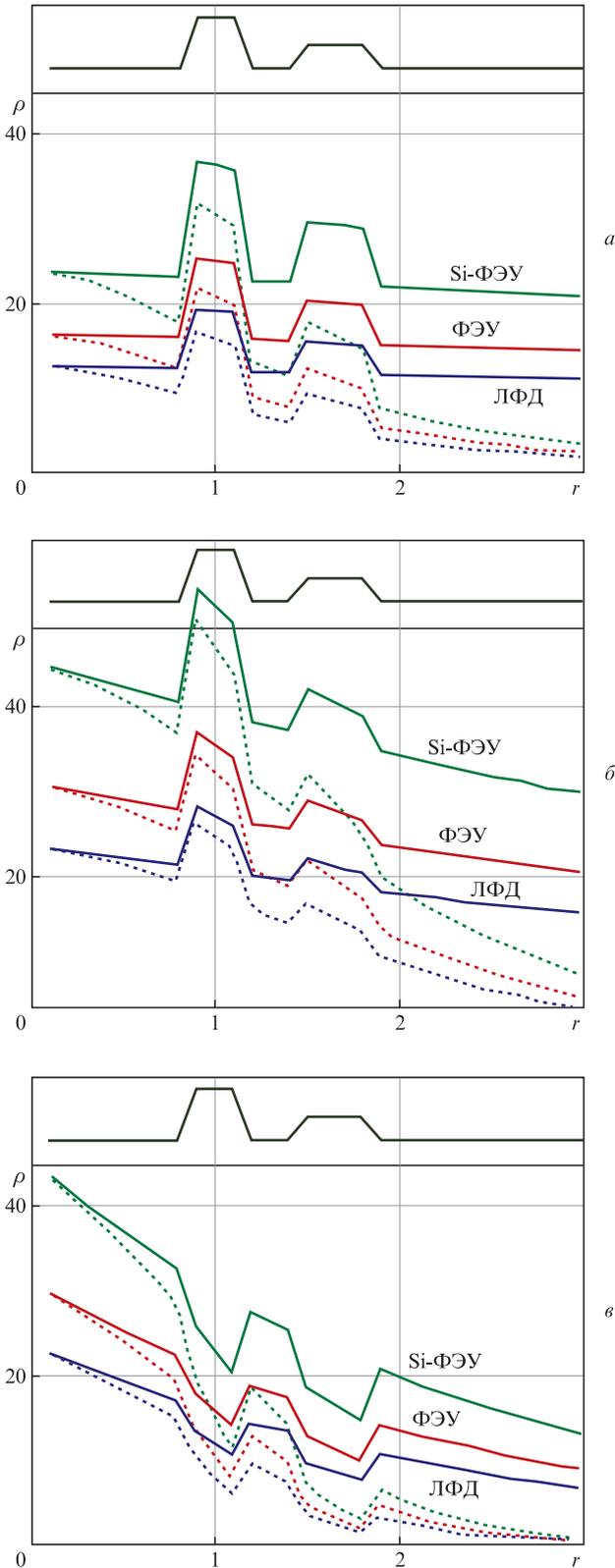


Рис.7. Иллюстрация искажения дальностных профилей отношения сигнал/шум фоновой помехой в случае зондирования объекта в окружающей атмосфере разной оптической плотности для $S_m = 100$ (а), 30 (б) и 10 км (в) при использовании в качестве фотодетекторов ФЭУ (системный параметр $L_0 = 10.9$; красные кривые), ЛФД ($L_0 = 8.3$; синие кривые) и Si-ФЭУ ($L_0 = 15.9$; зеленые кривые). Сплошные кривые – опорный уровень фона ($b_{rel} = 1$), штриховые – интенсивный фон ($b_{rel} = 300$). Коричневые кривые в верхней части каждого рисунка – модельные профили. Цветной вариант рис.7 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

ческой плотности. При проведении модельных экспериментов на $\lambda = 532$ нм учтена специфика шумовых параметров высокочувствительных приемников – ФЭУ, ЛФД и Si-ФЭУ.

Видно, что с уменьшением метеорологической дальности видимости S_m , во-первых, согласно (11)–(13) и рис.4 растет отношение сигнал/шум. Во-вторых, с ростом произведения ar (с уменьшением прозрачности вдоль трассы зондирования) увеличивается степень ослабления сигнала на пути от лидара до объекта и обратно, что, соответственно, ведет к уменьшению сигнала и отношения сигнал/шум. Наконец, из рис.7,в видно, что с ростом фактора Π влияние внутренних шумов разных фотодетекторов уменьшается (отношение A_0/Π становится много меньшим единицы) и дальностные профили отношения сигнал/шум сближаются, отражая только фоновые искажения, одинаковые для всех детекторов.

4.5. Сопоставление реальных лидарных систем

На рис.8 представлены результаты сопоставления лидаров А и В [36], основные параметры которых приведены в Приложении 3. Безразмерные параметры этих лидаров, вычисленные согласно предложенной выше методике, даны в табл.1. При $\Pi = 1$ определяются обобщенные параметры L_{0A} и L_{0B} , прогнозирующие потенциал лидаров А и В при зондировании опорной среды. Значениям $b_{rel} = 1, \sim 17$ и 300 отвечают результаты моделирования для лидаров А и В, зондирующих атмосферу при слабом, среднем и ярком фоне неба и при широких вариациях ее оптико-физических параметров (параметр Π).

Из рис.8 следует, что лидар А имеет больший потенциал по сравнению с лидаром В ($L_{0A} \approx 100, L_{0B} \approx 20$). Видно, что при интенсивном фоне неба (например, при $b_{rel} = 300$) лидар А способен принимать с заданной точно-

Табл.1.

Лидар	S_q	S_n	S_{b0}	A_0	L_0
А	10^4	1.5×10^3	1.8×10^3	5×10^{-3}	98.4
В	4×10^2	4.3×10^4	3.5×10^4	3×10^{-5}	20.1

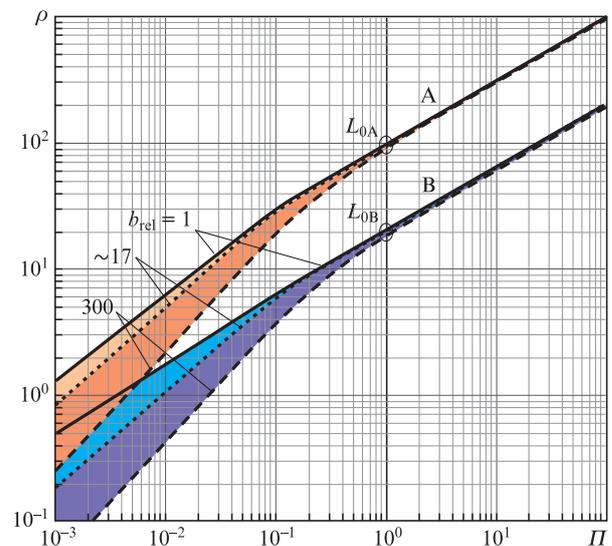


Рис.8. Зависимости $\rho(\Pi)$ для лидаров А и В, зондирующих одну и ту же атмосферу при различных яркостях окружающей фоновой помехи b_{rel} .

стью (например, при $\rho = 10$) примерно в 10 раз более слабые эхо-сигналы, чем лидар В. При этом дальность действия r_b лидара А при воздействии фона с яркостью b_{rel} от 1 до 100 уменьшается согласно (26) от 1.00 до 0.55, а лидара В – от 1.00 до 0.77.

5. Заключение

На основе развития и расширения методологии безразмерной параметризации в настоящей работе проведено обобщение характеристик лазерных систем зондирования атмосферы. Примененный подход позволил прогнозировать, какими могут быть характеристики самых разных атмосферных лидаров обратного рассеяния – от микролидаров до мощных систем. Разработана структура безразмерно-параметрической модели лидарной системы зондирования атмосферы. Показаны потенциально реализуемые диапазоны изменений отношения сигнал/шум и чувствительности систем дистанционного зондирования в условиях широкой изменчивости оптической погоды, при которых используются лидары: от кристалльно чистой

молекулярной атмосферы до туманов, снега и дождя. Проанализированы разнообразные условия воздействия помех фона дневного неба, которые в яркий солнечный день могут очень сильно ограничить возможности лидарных систем.

Принципиальное отличие предлагаемой методологии от традиционно принятых подходов заключается в том, что формирование на основе введенных опорных параметров всего лишь нескольких тщательно обоснованных безразмерных параметров и последующее их использование позволяют уверенно прогнозировать важнейшие потенциальные характеристики конкретного лидара в конкретных условиях зондируемой трассы и при конкретной яркости фона неба. Например, можно прогнозировать изменчивость отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника лидарной системы при зондировании выбранного участка атмосферы в интересующем нас диапазоне дальностей под определенным углом к Солнцу, формирующим оцениваемую яркость фона. Можно также прогнозировать дальность действия лидарной системы, опираясь на предложенные параметры и алгоритмы, и т. д.

Приложение 1. Международная шкала видимости для разных условий наблюдения

S_m (км)	$T(R = 1 \text{ км})$	$\alpha(\lambda = 0.55 \text{ мкм})$ (км ⁻¹)	Условия наблюдения	Характеристика видимости
< 0.05	< 10 ⁻³⁴	> 78.24	Очень сильный туман	Очень плохая
0.05–0.20	3 × 10 ⁻⁹ –10 ⁻³⁴	19.56–78.24	Сильный туман, очень густой снег	Плохая
0.2–0.5	4 × 10 ⁻⁴ –3 × 10 ⁻⁹	7.824–19.56	Умеренный туман или сильный снег	
0.5–1.0	0.020–4 × 10 ⁻⁴	3.912–7.824	Слабый туман, умеренный снег или сильная дымка	
1–2	0.141–0.020	1.956–3.912	Умеренный снег, очень сильный дождь или умеренная дымка	Средняя
2–4	0.376–0.141	0.978–1.956	Слабый снег, сильный дождь или слабая дымка	
4–10	0.676–0.376	0.391–0.978	Умеренный дождь, очень слабый снег или слабая дымка	Хорошая
10–20	0.823–0.676	0.196–0.391	Без осадков или слабый дождь	
20–50	0.823–0.925	0.078–0.196	Чистый воздух без осадков	Очень хорошая
> 50	> 0.925	< 0.078	Совершенно чистый воздух	Исключительная

Приложение 2. Диапазоны изменений параметров среды и фона неба, используемые при моделировании

Метеорологическая дальность видимости S_m (км)	0.1–100
Объемный показатель рассеяния/ослабления атмосферы (км ⁻¹)	0.03–1.00
Дальность зондирования R (км)	0.1–30
Яркость фонового излучения дневного неба B_2 (Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·м ⁻¹).	10 ⁶ –3 × 10 ⁸

Приложение 3. Типичные диапазоны изменений параметров атмосферных лидаров, используемые при моделировании

	Лидар А	Лидар В
Энергия зондирующего излучения E (Дж)	0.15	0.13
Расходимость пучка излучения θ (рад)		
Диаметр пучка излучения d (мм)		
Длительность зондирующего импульса τ_p (нс)		
Частота следования импульсов f_{rep} (Гц)	10	20
Площадь приемного объектива A_D (м ²)	0.03	0.09
Фокусное расстояние приемного телескопа F_1 (м)		
Коэффициент пропускания приемной оптической системы ξ	0.50	0.08
Угол поля зрения приемного телескопа θ (рад).	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁻³
Полоса пропускания оптического фильтра $\Delta\lambda$ (нм)	10	1

Полоса пропускания приемной системы Δf (МГц)	10–100	10	20
Пространственное разрешение лидара ΔR (м)3–30		
Квантовая эффективность типичных фотодетекторов η	0.10–0.85	0.77	0.046
Коэффициент шума фотодетектора F :			
ФЭУ	1.2–1.5		1.5
ЛФД4–10	5.0	
Si-ФЭУ	1.1–1.5		
Коэффициент внутреннего усиления фотодетектора M_d :			
ФЭУ	$.3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$		
ЛФД	40–200		
Si-ФЭУ	$10^6 - 4 \times 10^6$		
Темновой ток фотодетектора I_d (А):			
ФЭУ	$10^{-10} - 10^{-9}$		
ЛФД	$10^{-9} - 10^{-8}$		
Si-ФЭУ	$10^{-7} - 10^{-6}$		
Приведенная мощность внутренних шумов фотодетектора NEP (Вт·Гц ^{-1/2})	$f(F, \Delta f, \lambda, \eta, I_d, M_d)$	3×10^{-14}	5×10^{-16}
Мощность квантовых шумов фотодетектора P_q (Вт)	$f(F, \Delta f, \lambda, \eta)$	4.83×10^{-11}	4.86×10^{-10}
Мощность внутренних шумов фотодетектора P_n (Вт)	$10^{-12} - 10^{-9}$	3×10^{-10}	5×10^{-12}
Опорная дальность R_0 (км)	1		
Опорный показатель ослабления молекулярной атмосферы α_0 (км ⁻¹)	0.0116 ($\lambda = 0.55$ мкм)		
Мощность опорного сигнала P_{s0} (Вт)	$f(E_0, A_D, \xi, \alpha_0, R_0, \lambda)$	4.72×10^{-7}	1.97×10^{-7}
Опорная яркость фонового излучения неба $B_{0\lambda}$ (Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·м ⁻¹)	10^6		
Мощность опорной фоновой помехи P_{b0} (Вт)	$f(A_D, \xi, \Delta\lambda, \theta)$	2.65×10^{-10}	5.66×10^{-12}

- Зуев В.Е. *Лазер-метеоролог* (Л.: Гидрометеоздат, 1974).
- Лазерный контроль атмосферы*. Под ред. Э.Хинкли (М.: Мир, 1979).
- Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование: Основы и применения* (М.: Мир, 1987).
- Bunkin A., Voliak K. *Laser Remote Sensing of the Ocean. Methods and Applications* (New York: Wiley & Sons, 2001).
- Pershin S., Linkin V., Bukharin A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1752**, 293 (1992).
- Moussavi M., Abdalati W. *Int. J. Remote Sens.*, **35** (13), 5263 (2014).
- Бухарин А.В., Першин С.М. *Оптика атмосферы и океана*, **7** (4), 521 (1994).
- Cao N., Zhou X., Li S., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **80** (3), 109 (2009).
- Pershin S., Lyash A., Makarov V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7355**, 051 (2009).
- Agishev R., Gross B., Moshary F., Gilerson A., et al. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **81** (5), 695 (2005).
- Campbell J., Lin B., Nehrir A., et al. *Opt. Lett.*, **39** (24), 6981 (2014).
- Papayannis A., Ancellet G., Pelon J., et al. *Appl. Opt.*, **29** (4), 467 (1990).
- Veselovskii I., Whiteman D., Korenskiy M., et al. *Atmos. Chem. Phys.*, №15, 1647 (2015).
- Osche G. *Optical Detection Theory for Laser Applications* (New York: Wiley, 2011).
- Agishev R., Comeron A., Bach J., et al. *Opt. Laser Technol.*, **49**, 86 (2013).
- Агишев Р.Р. *Лидарный мониторинг атмосферы* (М.: Физматлит, 2009).
- Agishev R., Comeron A., Gilerson A. *Eur. Phys. J.: Laser Radar Ser.*, **119**, 2509 (2016).
- Saleh B., Teich M. *Fundamentals of Photonics* (New York: Wiley, 2011).
- Mona L., Arboledas A., Amiridis V., et al. *Eur. Phys. J.: Laser Radar Ser.*, **119**, 1902 (2016).
- Rappalardo G., Amodeo A., Apituley A., Comeron A., et al. *Atmos. Meas. Tech.*, №7, 2389 (2014).
- Росс М. *Лазерные приемники* (М.: Мир, 1969).
- Minkoff J. *Signal Processing Fundamentals and Applications for Communication and Sensing Systems* (Norwood: Artech House, 2002).
- Игнатов А.Н. *Оптоэлектронные приборы и устройства* (М.: Эко-Трендз, 2006).
- Розеншер Э., Винтер Б. *Оптоэлектроника* (М.: Техносфера, 2006).
- Keiser G. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice* (New York: McGraw-Hill, 2010).
- Fukuchi T., Shiina T. *Industrial Applications of Laser Remote Sensing* (Sharjah: BenthamSci, 2012).
- Kovalev V., Eichinger W. *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods* (New York: Wiley-Interscience, 2004).
- Agishev R., Gross B., Moshary F., Gilerson A., et al. *Opt. Lasers Eng.*, **44** (8), 779 (2006).
- Agishev R., Gross B., Moshary F., Gilerson A., et al. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **80** (6), 765 (2005).
- Agishev R., Comeron A., Gross B., Gilerson A., et al. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **79** (2), 255 (2004).
- Krekov G.M., Matvienko G.G. *Atmos. Oceanic Opt.*, **23** (10), 835 (2010).
- Molebny V., Kamerman G., Steinvall O. *Electron. Nanotechnol.*, №3, 185 (2011).
- Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. *Лазеры и экологический мониторинг атмосферы* (СПб.: Лань, 2013).
- Apituley A., Freudenthaler V., Comeron A., et al. *Proc. IEEE*, **2**, 414 (2008).
- Agishev R., Comeron A., Rodriguez A., et al. *Appl. Opt.*, **53** (12), 3164 (2014).
- Comeron A., Agishev R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9242**, 1 (2014).
- Rodriguez A., Rocadenbosch F., Sicard M., et al. *IOP Conferences Series: Earth and Environmental Science*, **28**, 13 (2015).
- Rees W. *Physical Principles of Remote Sensing* (Cambridge: Cambridge University Press, 2012).
- Weitkamp C. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere* (Berlin: Springer, 2005).
- Кауль Б.В. *Оптика атмосферы*, **2** (2), 211 (1989).
- Donovan D., Whiteway J., Carswell A. *Appl. Opt.*, **32** (33), 6742 (1993).