

УДК 551.501

Сравнительный анализ дальности зондирования для различных вариантов аэрозольного лидара

**Иванов С. Е.¹, Филимонов П. А.¹,
Белов М. Л.^{1,*}, Федотов Ю. В.¹,
Городничев В. А.¹**

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена сравнительному анализу дальности зондирования аэрозольного лидара в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах для различных вариантов аэрозольного лидара - для разной частоты повторения лазерных импульсов и разных алгоритмах обработки лазерных локационных сигналов. Показано, что режим приема с накоплением сигналов обеспечивает существенно большую дальность зондирования, чем режим приема без накопления сигналов. Предельная дальность зондирования в режиме накопления сигналов определяется зависимостью энергии в импульсе лазера от частоты повторения.

Ключевые слова: аэрозольный лидар, дальность зондирования, ультрафиолетовый диапазон, видимый диапазон, ближний инфракрасный диапазон

Введение

Создание лазерных систем (систем зондирования, связи, локации), работающих в условиях земной атмосферы, немыслимо без всестороннего учета свойств земной атмосферы. Это обусловлено тем, что атмосфера, ослабляя и искажая лазерные сигналы, вызывая появление различного рода помех на входе приемного устройства, ограничивает технические возможности лазерных локационных систем. Ясно, что в этих условиях успех, как анализа, так и синтеза лазерных систем в значительной мере определяется наличием достоверной информации о состоянии атмосферы и тем, насколько полно учтено влияние земной атмосферы на лазерные сигналы, регистрируемые приемником лазерной системы.

Аэрозольные лидары, предназначенные для оперативного мониторинга атмосферы, позволяют дистанционно определять характеристики атмосферного аэрозоля и облачных образований в атмосфере [1-6].

На сегодняшний день практически все существующие аэрозольные лидары работают при относительно низкой частоте повторения импульсов и с достаточно большой энергии одиночных импульсов. Альтернативой этому является работа с высокой частотой повторения импульсов и с низкой энергией одиночных импульсов.

Данная статья посвящена сравнительному анализу дальности зондирования лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах для различных вариантов лидара (для разной частоты повторения лазерных импульсов и разных алгоритмах обработки лазерных локационных сигналов).

1. Постановка задачи

Одним из первых вопросов, которые решают при проектировании лазерных систем, является определение потенциальной дальности работы лазерной системы (локации, зондирования, связи и т.п.) [7-9].

Дальность работы лазерной системы зависит от ее параметров и используемого в лазерной системе алгоритма обработки лазерных сигналов, и ее можно оценить из условия равенства (для предельной дальности) 'энергетических характеристик полезного лазерного сигнала (приходящего на приемник) и пороговых энергетических характеристик приемника лазерной системы.

На сегодняшний день разные авторы используют разные пороговые энергетические характеристики приемников лазерных систем. В одних работах (см., например, [7,10,11]) используется понятие пороговой мощности приемника, которая сравнивается с мощностью полезного лазерного сигнала, в других (см., например, [12]) - понятие минимально обнаруживаемой энергии приемника, которая сравнивается с энергией регистрируемого лазерного сигнала. Причем существуют различные модификации этих методик для различных типов фотодетекторов.

В данной статье проводится сравнительный анализ дальности зондирования аэрозольного лидара при разных алгоритмах обработки лазерных сигналов. При расчете пороговых энергетических характеристик приемника считается, что в лазерной системе в качестве фотодетектора используется ФЭУ.

2. Расчет пороговой мощности ФЭУ

Наиболее простая формула для пороговой мощности ФЭУ приведена, например, в [7]. При пуассоновской статистике сигнала и шума в условиях фонового излучения неба (рассеянного в атмосфере солнечного излучения) она имеет вид

$$P_{\text{пд}} = \frac{\mu [2e(I_t + I_b)(1 + B)\Delta f]^{\frac{1}{2}}}{S_k}, \quad (1)$$

где

μ -отношение сигнал/шум;

$e=1.6 \cdot 10^{-19}$ [А·с] – заряд электрона;

$(1+B) \approx 2.5$;

Δf – эффективная полоса частот фотоприемного устройства;

S_k – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ;

I_t – темновой ток фотокатода; так как в паспорте ФЭУ приведены значения

темнового анодного тока I_{ta} , то значения I_t рассчитываются по формуле $I_t = \frac{I_{ta}}{M}$, где M

– коэффициент усиления ФЭУ ;

I_b - среднее значение тока, обусловленного солнечной засветкой.

Для приемника лидача с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_b имеет вид [8,9]

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (2)$$

где

L_b - спектральная яркость фонового излучения;

S_r - площадь приемного объектива;

$\pi \alpha_r^2$ - телесный угол поля зрения приемной оптической системы;

$\Delta \lambda$ - полоса пропускания спектрального фильтра;

K_r - коэффициент пропускания оптической системы приемного канала.

Более общая (чем (1)) формула (учитывающая тепловые шумы нагрузочного сопротивления ФЭУ) для порогового потока ФЭУ при регистрации переменного сигнала на уровне постоянной фоновой засветки приведена в [10] для отношения сигнал/шум равного 1. При произвольном отношении сигнал/шум μ эта формула имеет вид

$$P_{\text{пд}} = \frac{\mu [2eM^2(I_t + I_b)(1+B)\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_f}]^{\frac{1}{2}}}{S_a}, \quad (3)$$

где

M - коэффициент усиления ФЭУ; $M = \frac{S_a}{S_k}$;

S_a - анодная чувствительность ФЭУ;

R_f - нагрузочное сопротивление ФЭУ.

3. Расчет минимально обнаруживаемой энергии приемника без накопления

Если фотодетектором является фотоэлектронный умножитель, то в режиме без накопления сигнала для минимально обнаруживаемой (пороговой) энергии $E_{Smin}(\lambda)$ за время детектирования τ_d имеем [12]

$$E_{Smin}(\lambda) = \frac{1}{2} \mu_{min}^2 E(\lambda) \left[1 + \left\{ 1 + \frac{4}{\mu_{min}^2} \left[\frac{E_b^T(\lambda)}{E(\lambda)} + \frac{i_d + i_j}{2eB^*} \right] \right\}^{1/2} \right], \quad (4)$$

где

$$E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda\eta(\lambda)\xi_e}; \quad E_b^T(\lambda) = E_b^N(\lambda) + v_\eta E_b^L(\lambda_L); \quad B^* = \frac{BF_G}{\xi_e}; \quad v_\eta = \frac{\lambda_L \eta(\lambda_L)}{\lambda\eta(\lambda)};$$

$$B = \frac{1}{2\tau_d}; \quad i_j = \frac{2kT}{eG^2\xi_e R_{eq}F_G};$$

$E_b^N(\lambda)$ - импульс энергии естественного фона, пришедший на фотокатод за время детектирования τ_d ;

$E_b^L(\lambda_L)$ - импульс энергии рассеянного лазерного излучения, пришедший на фотокатод за время детектирования τ_d ;

$\eta(\lambda)$ - квантовый выход фотокатода на длине волны λ ;

λ_L - длины волны лазерного источника;

i_d - средний темновой ток фотокатода;

i_j - эффективный ток Джонсона;

G - усиление диодной цепи;

ξ_e - собирательная способность электростатической фокусировки ($\xi_e < 1$);

$F_G = \delta^2$; δ - учитывает флуктуации эмиссии вторичных электронов на динодах и может рассматриваться как параметр усиления шума ($\delta \approx 1$);

R_{eq} , T - эквивалентное сопротивление нагрузки выходной цепи и его абсолютная температура;

k - постоянная Больцмана.

При большом значении шума фона, когда можно пренебречь всеми составляющими шума кроме шума фона, из (3) получим простую формулу [12]

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \{E_b^T(\lambda)E(\lambda)\}^{1/2}. \quad (5)$$

Учтем, что $E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda\eta(\lambda)\xi_e}$, а $E_b^T(\lambda) \cong E_b^N(\lambda) = S_b(\lambda)K_rK_o(\lambda)\Omega_oA_o\tau_d$. Тогда

формула (4) преобразуется к виду [12]

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \left\{ \frac{F_G hc K_o(\lambda) \Omega_o K_r A_o \tau_d S_b(\lambda)}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e} \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

где

$S_b(\lambda)$ - фоновая спектральная яркость неба;

$K_o(\lambda)$ - спектральная функция пропускания приемной системы, которую интерпретируют как эффективную спектральную ширину полосы пропускания;

Ω_o - телесный угол поля зрения приемника;

A_o - эффективная апертура приемника.

Учитывая что $S_k = \frac{e\lambda\eta(\lambda)}{hc}$, $\Omega_o = \pi\alpha_r^2$, $S_b(\lambda) \equiv L_b$, $K_o(\lambda) = \Delta\lambda$, получим, что формула (6) для минимально обнаруживаемой энергии $E_{Smin}(\lambda)$ согласуется (совпадает, если $\frac{F_G}{\xi_e} = 1+B$) с формулой для $P_{\text{пд}} \tau_d$, где пороговая мощность ФЭУ $P_{\text{пд}}$ определяется формулой (1) при условии $I_t \ll I_b$.

4. Расчет минимально обнаруживаемой энергии приемника в режиме накопления

В режиме накопления сигнала (за n накапливаемых лазерных эхо-импульсов) формула для минимально обнаруживаемой (пороговой) энергии $E_{Smin}(\lambda)$ аналогичная формуле (6) имеет вид

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \left\{ \frac{F_G hc K_o(\lambda) \Omega_o K_r A_o \tau_d n S_b(\lambda)}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

5. Расчет энергетических характеристик лазерного сигнала, рассеянного атмосферой

Мощность $P(z)$ лазерного сигнала в прозрачной атмосфере в моностатической коаксиальной схеме зондирования определяется выражением [7,8]

$$P(z) = P_o K_t K_r c \tau_u r_r^2 \beta(z) \chi_\pi(z) T_v(z) G(z) / 8z^2, \quad (8)$$

где

$$G(z) = \frac{\alpha_r^2}{\alpha_r^2 + \alpha_t^2};$$

P_o – мощность излучения лазерного источника;

K_t , K_r – коэффициенты пропускания оптических систем передающего и приемного каналов лидара;

c - скорость света;

τ_u – длительность импульса лазерного источника;

r_r – радиус приемного объектива;

z – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы;

$\chi_\pi(z)$ – индикатриса рассеяния атмосферы в направлении «назад»;

$T_v^{1/2}(z) = \exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x) dx - \int_0^z k(x) dx\right)$ – коэффициент пропускания атмосферы;

$\beta(z)$ –объемный коэффициент аэрозольного рассеяния атмосферы;

$\varepsilon(z)$ – показатель аэрозольного ослабления атмосферы;

$k(z)$ – показатель поглощения атмосферными газами (озоном в УФ диапазоне).

6. Математическое моделирование

В работе проводилась оценка дальности зондирования лидара при разных алгоритмах обработки лазерных сигналов и различной частоте повторения лазерных импульсов для следующих длин волн излучения лазерных источников:

- УФ диапазон: 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);

- видимый диапазон: 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);

- ближний ИК диапазон: 1,064 мкм (первая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом).

Параметры лазерных источников, ФЭУ, оптические характеристики атмосферы и фонового солнечного излучения, используемые в работе, приведены ниже в Таблицах 1-5.

Таблица 1 Характеристики лазеров для разных длин волн [13,14]

λ , мкм	0,355	0,532	1,06
Частота повторения импульсов 10 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	45	200	340
Частота повторения импульсов 20 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	50	145	290
Частота повторения импульсов 30 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	40	110	200
Частота повторения импульсов 50 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	30	75	150
Частота повторения импульсов 100 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	15	50	90
Частота повторения импульсов 200 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	6	20	40
Частота повторения импульсов 1000 Гц			
Энергия в импульсе, мДж	3	5	10

Таблица 2 Спектральная чувствительность ФЭУ [15]

λ , мкм	0,355	0,532	1,06
Спектральная чувствительность, мА/Вт.	80	100	15

Таблица 3 Показатели аэрозольного ослабления атмосферы [16]

λ , мкм	0,355	0,532	1,06
Показатель ослабления, M^{-1} .	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4 Оптическая толща земной атмосферы [16]

λ , мкм	0,355	0,532	1,064
Оптическая толща, отн.ед.	0,915	0,345	0,151

Таблица 5 Спектральная солнечная постоянная [8]

λ , мкм	0,355	0,532	1,064
Спектральная солнечная постоянная, Вт/см ² мкм	0,116	0,196	0,067

Расчеты проводились для горизонтальной трассы зондирования при безоблачной атмосфере и зенитном угле Солнца 45° . Угол расходимости излучения лидара и поле зрения приемной оптической системы полагались равными, соответственно, 1 мрад и 2 мрад, а коэффициенты пропускания передающей и приемной оптических систем – 0,85 и 0,34 (включая пропускание спектрального фильтра). Длительность импульса лазерного источника 7 нс, время детектирования τ_d – 5 нс. Диаметр приемного объектива и ширина спектрального фильтра считались равными 0,3 м и 0,5 нм, а отношение сигнал/шум – 50.

При расчете спектральной яркости фонового излучения для УФ диапазона оптические толщи атмосферы состоят из суммы аэрозольной и молекулярной компонент и оптической толщи поглощения атмосферного озона, а индикатриса рассеяния атмосферы состоят из взвешенной суммы аэрозольной и молекулярной составляющих [14].

Для оценки предельных дальностей зондирования L использовались три разных алгоритма:

- равенство мощности $P(z)$ полезного сигнала и пороговой мощности приемника $P_{\text{пд}}$;

- равенство энергии $E(z)$ полезного сигнала в режиме без накопления (считалось, что $E(z) = P(z) \tau_d$) и минимально обнаруживаемой (пороговой) энергии $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ в режиме без накопления;

- равенство энергии $E(z)$ полезного сигнала в режиме с накоплением (считалось, что $E(z) = n P(z) \tau_d$, где n - число накапливаемых лазерных эхо-импульсов) и минимально обнаруживаемой (пороговой) энергии $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ в режиме с накоплением.

На рисунках 1-3 приведены зависимости предельных дальностей зондирования L от частоты повторения лазерных импульсов для трех длин волн – 0,355 мкм (рисунок 1), 0,532 мкм (рисунок 2) и 1,064 мкм (рисунок 3).

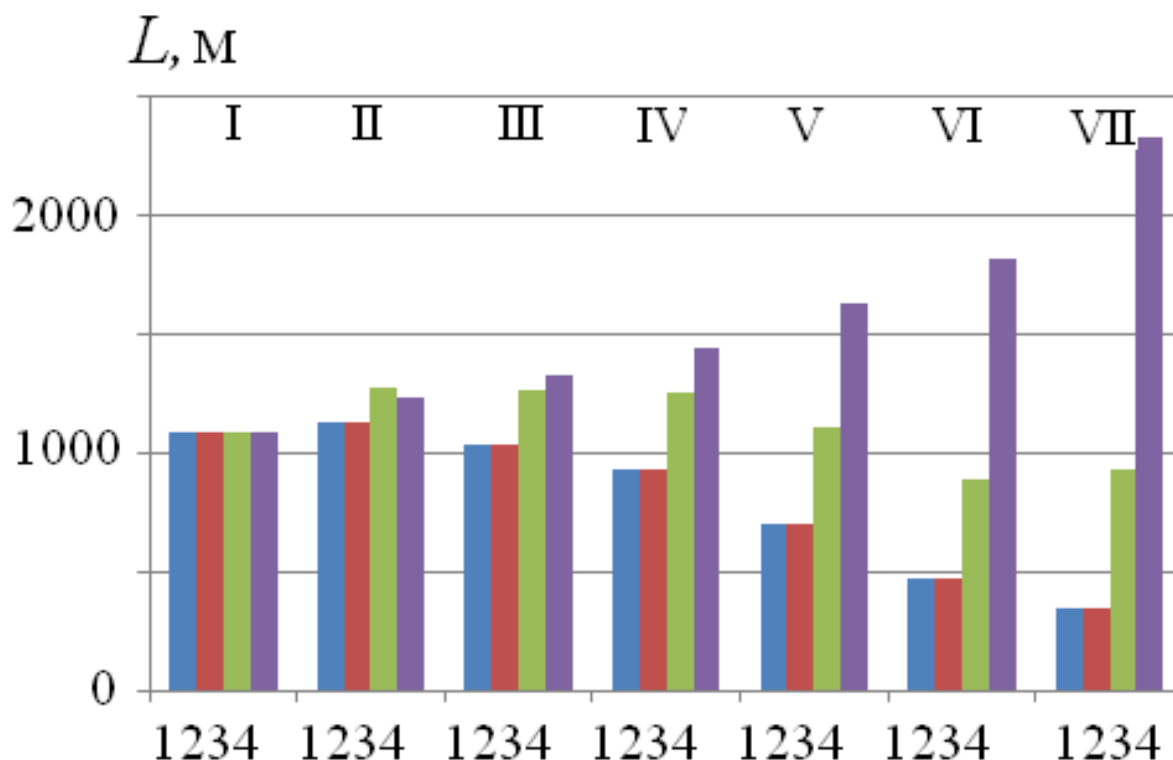


Рис.1. Зависимость предельной дальности зондирования от частоты повторения импульсов для длины волны 0,355 мкм

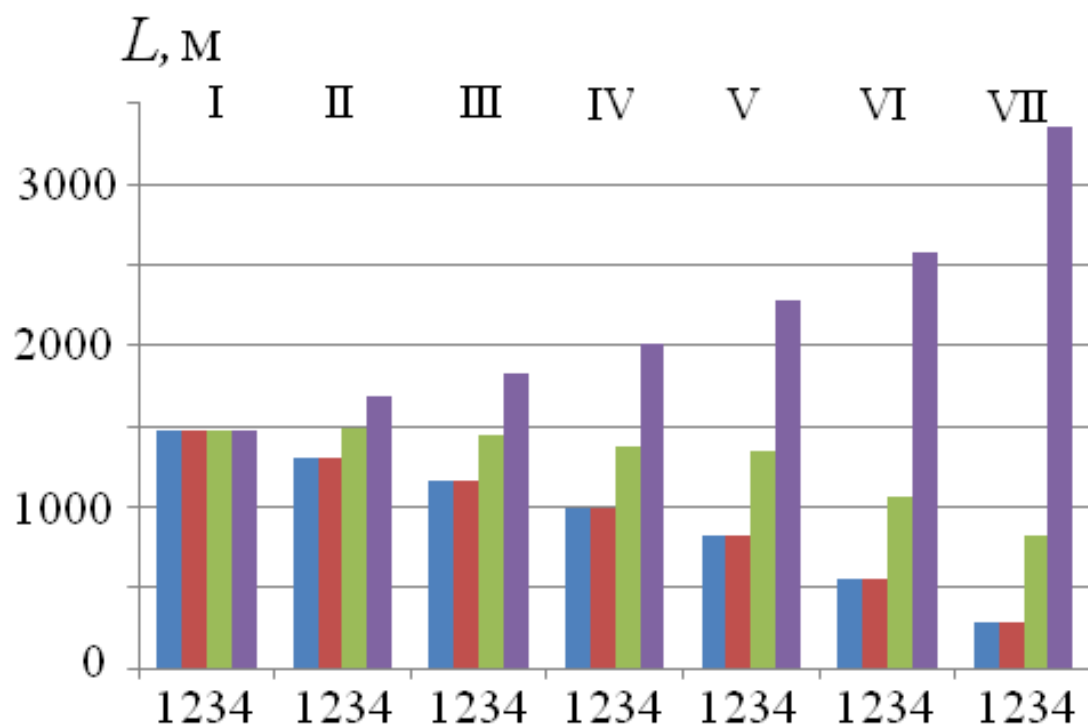


Рис.2. Зависимость предельной дальности зондирования от частоты повторения импульсов для длины волны 0,532 мкм

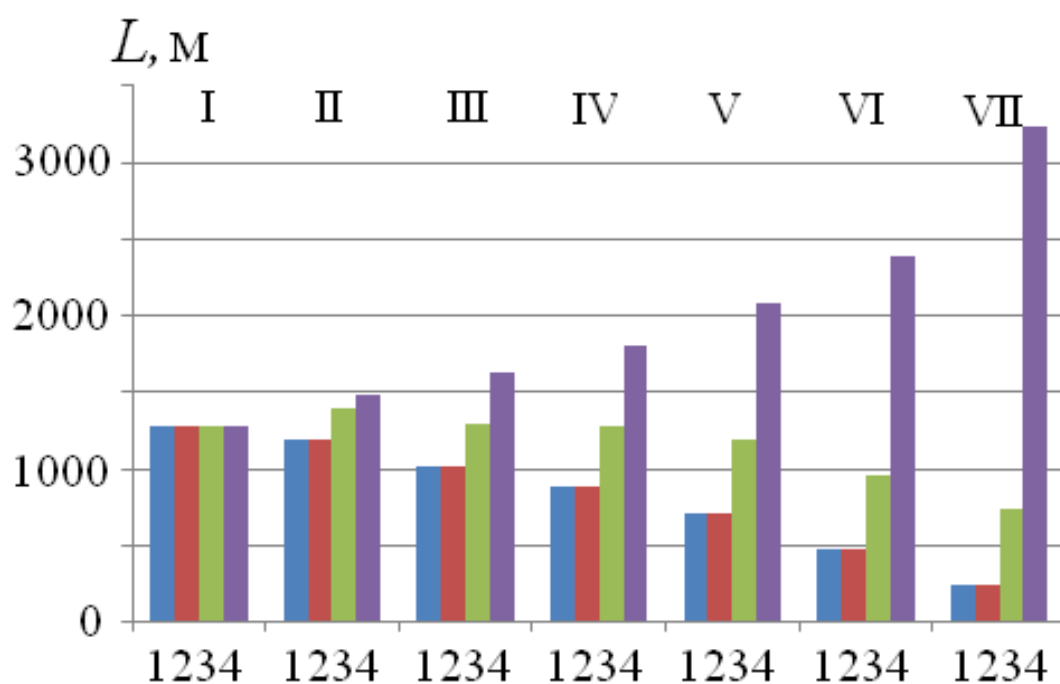


Рис.3. Зависимость предельной дальности зондирования от частоты повторения импульсов для длины волны 1,064 мкм

На всех рисунках I – частота повторения 10 Гц; II - 20 Гц; III - 30 Гц; IV - 50 Гц; V – 100 Гц; VI – 200 Гц; VII – 1000 Гц; столбец 1 – оценка L по равенству мощности $P(z)$ и пороговой мощности $P_{\text{пд}}$; столбец 2 - оценка L по равенству энергии $E(z)$ и пороговой энергии $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ в режиме без накопления; столбец 3 - оценка L по равенству энергии $E(z)$ и пороговой энергии $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ в режиме с накоплением (для рисунков 1-3 время накопления считалось равным 0,1 секунды); столбец 4 - оценка L по равенству энергии $E(z)$ и пороговой энергии $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ в режиме с накоплением (для гипотетического случая, когда энергия в импульсе не зависит от частоты повторения и равна энергии в импульсе при частоте повторения 10 Гц).

Результаты математического моделирования, приведенные на рисунках 1-3 показывают, что:

- режим накопления сигналов обеспечивает существенно большую дальность зондирования, чем режим без накопления сигналов;
- предельная дальность зондирования в режиме накопления сигналов определяется зависимостью энергии в импульсе лазера от частоты повторения;
- в гипотетическом случае, когда энергия в импульсе не зависит от частоты повторения и равна энергии в импульсе при частоте повторения 10 Гц, использование высокой (100, 200, 1000 Гц) частоты повторения приводит в режиме накопления сигналов к значительному увеличению предельной дальности зондирования;
- для конкретных лазеров, параметры которых были взяты при моделировании, использование высокой (100, 200, 1000 Гц) частоты повторения приводит в режиме накопления сигналов к некоторому уменьшению предельной дальности зондирования (что связано с уменьшением энергии в импульсе при повышении частоты повторения); однако, переход на высокую частоту повторения импульсов лазера полезен и в этом случае, так как дает также возможность усреднять по времени высокочастотные флуктуации, связанные с атмосферой.

Заключение

Режим накопления сигналов обеспечивает существенно большую дальность зондирования, чем режим без накопления сигналов. Предельная дальность зондирования в режиме накопления сигналов определяется зависимостью энергии в импульсе лазера от частоты повторения. Использование высокой частоты повторения приводит в режиме накопления сигналов к значительному увеличению предельной дальности зондирования лишь в гипотетическом случае, когда энергия в импульсе не зависит от частоты повторения лазерных импульсов.

Список литературы

1. Аэрозольный лидар CATS // Laser-Portal.ru: Лазерный Портал. Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_956 (дата обращения 20.12.2014).
2. Кобелев В.В. Лазерное зондирование атмосферы // Астрофизическая обсерватория БелГУ: сайт. Режим доступа: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (дата обращения 20.12.2014).
3. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Трехчастотный лидар для зондирования микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 125-130.
4. Алексеев В.А., Ляш А.Н., Першин С.М. Лидарный мониторинг тектонической активности в Тамани по выбросам аэрозолей. Отработка метода // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т.1, вып. 1. С. 356-363. Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf> (дата обращения 20.12.2014).
5. Волков Н.Н. Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 7-9.
6. Лазерные лидарные комплексы // НПП «Адвент»: сайт компании. Режим доступа: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (дата обращения 20.12.2014).
7. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
8. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 573 с.
9. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. Красноярск: Института леса СО РАН, 2007. 230 с.
10. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. СПб.: Папирус, 2003. 527 с.
11. Кугейко М.М. Тема 10. Выбор и расчет параметров элементов лазерно-спектральных систем диагностики рассеивающих сред // Лазерная диагностика и спектроскопия. Минск: БГУ, 2002. С. 221-259. Режим доступа: <http://www.rfe.by/elib/education/download/lazernaja-dagnostika/tema10.pdf> (дата обращения 20.03.2014).
12. Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. J. Wiley & Sons, New York, 1984. 510 p.

13. Nano Series Ultra Compact Pulsed Nd:YAG Lasers. Product Range Specification. Режим доступа: http://www.kenelec.com.au/sitebuilder/products/files/1138/nanorange_specification.pdf (дата обращения 20.12.2014).
14. NL220 series // EKSPLA: company website. Режим доступа: <http://www.ekspla.com/product/nl220-series-nanosecond-q-switched-dpss-ndyag-lasers> (дата обращения 20.12.2014).
15. Photomultiplier tube // Hamamatsu: company website. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/3001/index.html> (дата обращения 20.12.2014).
16. Handbook of Geophysics and space environment / ed. by S.B. Valley. AFCRL, US Airforce, 1965.

Comparative Analysis of Sounding Range for Aerosol Lidar Alternate Designs

S.E. Ivanov¹, P.A. Filimonov¹, M.L. Belov^{1,*},

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

Yu.V. Fedotov¹, V.A. Gorodnichev¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: aerosol lidar, sounding range, ultraviolet band, visible band, near infrared band

The aerosol lidars intended for expeditious monitoring of the atmosphere allow us to define remotely characteristics of atmospheric aerosol and cloudy formations in the atmosphere.

When designing the laser systems, one of the first tasks to be solved is to determine a potential range of laser system operation.

The laser system operation range depends on the algorithm for processing laser signals used in laser system. It can be estimated from an equality condition (for the limit range) between the power characteristics of the useful laser signal (coming to the receiver) and the threshold power characteristics of the laser system receiver.

Today, practically, all the existing aerosol lidars operate with rather low repetition rate and with rather powerful single pulses. An alternative to it is operation with high repetition rate and with a low power of single pulses.

The paper presents comparative analysis of a sounding range for the Aerosol Lidar in UF (0.355 microns), visible (0.532 microns) and near infrared (1.064 microns) spectral ranges for various lidar options (with different repetition rates of laser pulses and different algorithms to process laser locational signals).

To estimate the limit sounding ranges L three different algorithms were used: - equality of useful signal power and threshold power of the receiver; equality of useful signal power in the no-accumulation mode and minimum detected (threshold) power in the no-accumulation mode; equality of useful signal power in the accumulation mode and minimum detected (threshold) power in the accumulation mode.

Results of mathematical modelling show that the signals accumulation mode provides significantly longer sounding range, than the signals no-accumulation mode. The limit sounding range in the mode of signals accumulation is defined by dependence of the laser pulse power on the repetition rate.

References

1. Aerazol'nyy lidar CATS [Aerosol lidar CATS]. Laser-Portal.ru: website. Available at: http://www.laserportal.ru/content_956 , accessed 20.12.2014. (in Russian).
2. Kobelev V.V. *Lazernoe zondirovanie atmosfery* [Laser sensing of the atmosphere]. Astrophysical Observatory of Belgorod State University: website. Available at: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> , accessed 20.12.2014. (in Russian).
3. Burlakov V.D., Dolgiy S.I., Nevzorov A.V. A three-frequency lidar for sensing microstructure characteristics of stratospheric aerosols. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2010, no. 6, pp. 125-130. (English translation: *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 6, pp. 890-894. DOI: [10.1134/S0020441210060230](https://doi.org/10.1134/S0020441210060230)).
4. Alekseev V.A., Lyash A.N., Pershin S.M. Lidar monitoring of tectonic activity in Taman by aerosol emission. Development of the method. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2004, vol.1, no. 1, pp. 356-363. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf> , accessed 20.12.2014. (in Russian).
5. Volkov N.N. Choise of multiwave aerosol lidar parameters for remote atmosphere sounding. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* = *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1 (77), pp. 7-9. (in Russian).
6. Lazernye lidarnye komplekсы [Laser lidar complexes]. Scientific Production Enterprise “ADVENT”: company website. Available at: <http://www.adventspb.ru/science/6/> , accessed 20.12.2014. (in Russian).
7. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical-electronic systems of environmental monitoring of the natural environment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian).
8. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [The basics of pulsed laser location]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 573 p. (in Russian).
9. Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. *Lazernaia lokatsiia zemli i lesa* [Laser location of land and forest]. Krasnoyarsk, Publ. of Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 230 p. (in Russian).
10. Ishanin G.G., Pankov E.D., Chelibanov V.P. *Priemniki izlucheniya* [Radiation detectors]. St. Petersburg, Papirus Publ., 2003. 527 p. (in Russian).
11. Kugeyko M.M. Chapter 10. In: *Lazernaya diagnostika i spektroskopiya* [Laser diagnostics and spectroscopy]. Minsk, Publ. of BSU, 2002, pp. 221-259. Available at: <http://www.rfe.by/elib/education/download/lazernaja-diagnostika/tema10.pdf> , accessed 20.03.2014. (in Russian).
12. Measures R.M. *Laser remote sensing. Fundamentals and applications*. J. Wiley & Sons, New York, 1984. 510 p.

13. Nano Series. Ultra Compact Pulsed Nd:YAG Lasers. Product Range Specification. Available at: http://www.kenelec.com.au/sitebuilder/products/files/1138/nanorange_specification.pdf , accessed 20.12.2014.
14. NL220 series. EKSPLA: company website. Available at: <http://www.ekspla.com/product/nl220-series-nanosecond-q-switched-dpss-ndyag-lasers> , accessed 20.12.2014.
15. Photomultiplier tube. Hamamatsu: company website. Available at: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/3001/index.html> , accessed 20.12.2014.
16. Valley S.B., ed. *Handbook of Geophysics and Space Environment*. Air Force Cambridge Research Laboratories, US, 1965.