

Ю.Е. Польский

ЛИДАРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье анализируется современное состояние лазерных комплексов как сложных измерительных систем. В качестве основных метрологических характеристик лидарного комплекса выбраны: относительная погрешность измерений, динамический диапазон и разрешающая способность по дальности (времени). Рассмотрена взаимосвязь между основными характеристиками, а также влияние на них отдельных структурных блоков лидарного комплекса. В заключении приводятся основные характеристики отечественных лидарных комплексов.

Современные успехи, так же как и дальнейшее развитие исследований в одной из важнейших областей современной физики — оптике атмосферы, обусловлены созданием и дальнейшим совершенствованием такого мощного инструмента исследований, каким являются лазерные (лидарные) системы дистанционного зондирования атмосферы. Успешное развитие наиболее перспективных методов дистанционного лазерного зондирования атмосферных параметров зависит: 1) от решения соответствующих прямых и обратных задач; 2) от разработки сложнейшей техники — лидаров; 3) от автоматизации процессов зондирования и обработки их результатов в реальном масштабе времени» [1].

Наиболее широкое применение в исследованиях оптических характеристик атмосферы и атмосферного аэрозоля находят лидары, основанные на эффекте упругого рассеяния. Этот класс лидарных систем позволяет получать очень большой объем информации и является, пожалуй, наиболее важным инструментом исследований в атмосферной оптике [1÷6].

«Современные лидары — сложнейшие, полностью автоматизированные комплексы аппаратуры, обеспечивающие программное управление процессом зондирования и обработку его данных в реальном масштабе времени» [1]. Для успешного решения задач атмосферной оптики лидарные комплексы должны обладать определенными метрологическими характеристиками. Так как лидарный комплекс является первичным источником информации об исследуемом объекте (атмосфере) в цепи: измеритель — первичная обработка информации — решение обратных задач оптики атмосферы — определение собственных физических параметров и характеристик атмосферы и атмосферного аэрозоля, то основными метрологическими характеристиками лидарного комплекса являются: 1) дальность действия; 2) точность измерений (относительная погрешность); 3) разрешающая способность. Каждая из этих характеристик лидарных комплексов неоднократно рассматривалась и анализировалась, например, в работах [2–6]. Однако во всех работах, как правило, эти характеристики рассматриваются обособленно, без детального учета их взаимосвязи. Это приводит к тому, что анализ лидарных комплексов как сложных измерительных систем с учетом влияния связей характеристик отдельных структурных блоков на общие метрологические характеристики системы в целом отсутствует. Цель данной работы — рассмотреть взаимосвязь основных метрологических характеристик лидарных комплексов и проанализировать с этих единых позиций современные лидарные комплексы и пути их дальнейшего развития.

Структура лидарного комплекса и его основные характеристики

Типовая структура современного лидарного комплекса приведена на рис. 1. На структурной схеме приведены только те блоки лидара, которые влияют на его основные метрологические характеристики. Основными метрологическими характеристиками лидарного комплекса, как указывалось выше, являются:

- относительная погрешность измерений;
- дальность действия;
- разрешающая способность по дальности.

1. Относительная погрешность измерений ϵ является важнейшей характеристикой комплекса, так как именно она лимитирует точность решения обратной задачи по определению параметров атмосферы по результатам лидарных измерений. Максимальная допустимая величина ϵ должна быть меньше 0,1 [5, 6] во всем диапазоне измеряемых оптических сигналов. Рост ϵ приводит к резкому увеличению ошибки при решении обратной задачи.

2. Дальность действия лидарного комплекса R_{\max} зависит от характеристик фотоприемного устройства (ФПУ), мощности лазерного передатчика (ПЛ), характеристик оптической системы. R_{\max} определяется из решения лидарного уравнения с учетом собственных шумов ФПУ и внешних мешающих факторов. Соответствующие расчетные соотношения для различных условий приема имеют следующий вид [3].

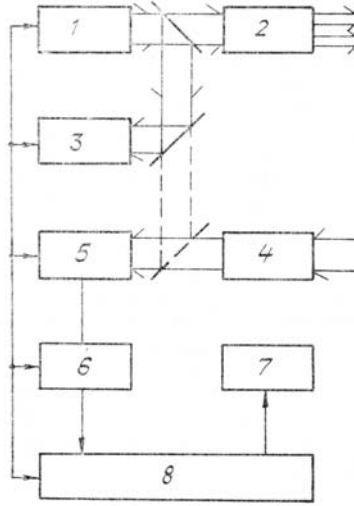


Рис. 1. Обобщенная блок-схема лидарного комплекса: 1 – лазерный передатчик, система накачки и управления лазером; 2 – передающая оптика; 3 – измеритель мощности; 4 – приемная оптика; 5 – фотоприемное устройство (ФПУ); 6 – устройство первичной обработки (АЦП); 7 – система управления пространственным положением лидара; 8 – центральный процессор

Идеальный нешумящий приемник:

$$R_{\max} = \left[\frac{\Delta t}{\kappa^2} \frac{\xi}{\xi + 1} \frac{\eta c E_0 S_0 \sigma_\pi}{hf} \right]^{1/2} \exp [-\tau (R_{\max})]. \quad (1)$$

Ограничение собственными шумами приемника:

$$R_{\max} = \left[\frac{\Delta t}{\kappa^2 n_\tau} \right]^{1/4} \left[\xi \frac{\eta c E_0 S_0 \sigma_\pi}{hf} \right]^{1/2} \exp [-\tau (R_{\max})]. \quad (2)$$

Ограничение фоновой засветкой:

$$R_{\max} = \left[\frac{\Delta t}{B(\lambda) \Delta \lambda \kappa^2 \varphi^2} \frac{\xi}{\xi + 1} \eta S_0 \right]^{1/4} [c \sigma_\pi E_0]^{1/2} \exp [-\tau (R_{\max})], \quad (3)$$

Где $\tau_0(R_{\max}) = \int_0^{R_{\max}} \alpha(R) dR$; S_0 – площадь приемной оптики; E_0 – энергия импульса ЛП; Δt – время накопления сигнала; φ – ширина диаграммы направленности приемной оптики; $B(\lambda)$ – спектральная плотность фоновой засветки; $\Delta \lambda$ – полоса пропускания оптического фильтра; ξ – квантовая эффективность фотокатода; η – коэффициент пропускания оптического тракта; σ_π – коэффициент обратного рассеяния.

Однако необходимо учитывать, что эти соотношения получены при условии, что лидар решает только задачу обнаружения и не включает относительную погрешность измерений ε . Учет ε неизбежно приводит к уменьшению R_{\max} . Поэтому для характеристики лидарного комплекса более информативным параметром является динамический диапазон D , который следует характеризовать как отношение максимального сигнала к его минимальному значению, при которых величина ε не превышает допустимого значения. При этом R_{\max} будет находиться из минимального значения сигнала. Величины R_{\max} и R_{\min} будут определять динамический диапазон сигналов на входе оптической системы ФПУ. В соответствии с [3] и с учетом возможной нестабильности мощности ЛП динамический диапазон D запишем в виде

$$D = 10 \lg \frac{E_{0\max}}{E_{0\min}} + 10 \lg \frac{\sigma_\pi(R_{\min})}{\sigma_\pi(R_{\max})} + 20 \lg \frac{R_{\max}}{R_{\min}} + 20 \lg e \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \alpha(R) dR. \quad (4)$$

Из (4) видно, что D для лидарных комплексов составляет 40 – 140 дБ. [3, 41.

3. Разрешающую способность по дальности лидарных комплексов обычно связывают с полосой пропускания (временем установления ФПУ, длительностью импульса ЛП) и, несколько реже, с быстродействием АЦП, сопрягающим выход ФПУ с системой обработки. При этом, как правило, в большинстве работ не учитывается то, что разрешающая способность неразрывно связана с относительной погрешностью измерений ϵ и динамическим диапазоном. Кроме этих взаимосвязей необходимо также учитывать, что разрядность АЦП определяет минимальную предельно допустимую величину ϵ .

Динамический диапазон, относительная погрешность измерений ϵ и разрешающая способность по времени (дальности ΔT_0) связаны следующими соотношениями [7–11]:

– для линейного ФПУ

$$D = 2\epsilon N; \quad (5)$$

– для линейного ФПУ с переключением каналов

$$D = (2\epsilon N)^k; \quad (6)$$

– для ФПУ с идеальной логарифмической характеристикой (ЛАХ)

$$D = \exp[2\epsilon N], \quad (7)$$

где N – число отсчетов (разрядность АЦП); k – число поддиапазонов.

$$\Delta T_D = \Delta T_{ид} \ln \frac{D}{\epsilon}, \quad \Delta R_D = \Delta R_{ид} \ln \frac{D}{\epsilon}, \quad (8)$$

где $\Delta T_{ид}$ и $\Delta R_{ид}$ разрешающая способность лидара по времени (дальности), обусловленная длительностью импульса ЛП и постоянными времени ФПУ, возможностями устройства первичной обработки сигнала и АЦП. Необходимо также отметить, что значения ϵ и D одновременно накладывают жесткие ограничения и на относительную нестабильность периода выборки системы АЦП лидара:

$$\frac{\Delta t_{выб}}{T_{выб}} \approx \frac{\epsilon}{D}. \quad (9)$$

Последнее соотношение особенно важно учитывать при работе в ближней зоне и при быстрых изменениях сигнала обратного рассеяния. Соотношения (5)–(9) дополняют те требования, которые предъявляются как к лидару, так и к отдельным его блокам, и позволяют рассмотреть вопросы оптимизации всех блоков лидарного комплекса с единых позиций оптимизации метрологических характеристик измерительной системы в целом.

Фотоприемные устройства (ФПУ)

Вопросы оптимизации ФПУ лидарных комплексов рассмотрены наиболее детально (см. [2–4; 7–9; 11–13]) в связи с тем, что влияние именно этого блока лидарного комплекса на его метрологические характеристики особенно велико.

Основные блок-схемы (*a–g*) построения ФПУ современных лидарных комплексов [2–7] приведены на рис. 2. Современные ФД могут обеспечить линейность характеристик с требуемой точностью, в лучшем случае, в $D \leq 60$ дБ. Реальная величина $D \sim 40$ дБ. Линейные электронные схемы обеспечивают D на уровне $20 \div 30$ дБ [3]. Современные быстродействующие АЦП с учетом соотношений (5)–(9) могут обеспечить динамический диапазон ~ 20 дБ. Учитывая это, ФПУ по схеме *a* может обеспечить $D \leq 30$ дБ. Применение фотодетектора совместно с функциональным (логарифмическим) электронным усилителем (схема *b*) позволяет расширить ДД до $40 \div 50$ дБ. Однако применение функциональных схем неизбежно приводит к дополнительным ошибкам, обусловленным погрешностью формирования амплитудной характеристики и ее нестабильностью в процессе эксплуатации. Применение фотодетектора (ФЭУ) в логарифмическом режиме (схема *в*) позволяет достигнуть сжатия динамического диапазона на $40 \div 60$ дБ. Но и в этом случае большую роль играет отклонение реальной амплитудной характеристики от логарифмической, что приводит к увеличению ϵ . Необходимо также учитывать, что в этом режиме резко ухудшается быстродействие ФЭУ, т.е. ухудшается разрешающая способность лидара, и очень сильно влияет на величину ϵ фоновая засветка [3].

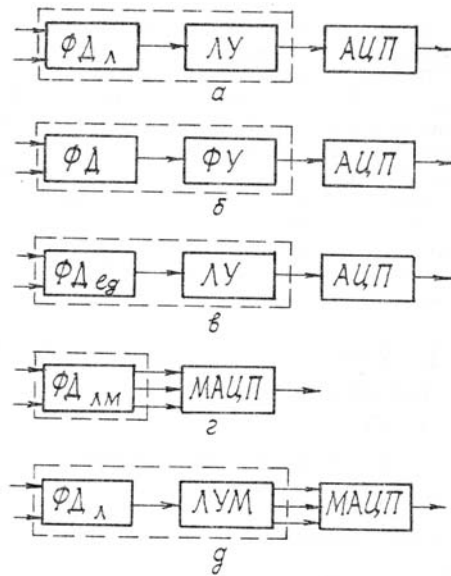


Рис. 2. Типовые блок-схемы ФПУ: ФД_л – фотодетектор с линейной характеристикой; ФД_{lg} – фотодетектор с логарифмической характеристикой; ФД_{лм} – фотодетектор с линейной характеристикой и многими выходами; ЛУ – линейная электронная схема (усилитель); ЛУМ – линейный усилитель с многими выходами; ФУ – функциональный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МАЦП – многоходовый аналого-цифровой преобразователь

На схеме *z* представлено ФПУ, в котором съем сигналов производится с динодов ФЭУ [7; 11]. В схеме *d* используется линейный фотодетектор с низким коэффициентом передачи и линейный усилитель с выходами с промежуточных каскадов усиления. В этих схемах сигнал снимается с динода, для которого амплитудная характеристика сохраняет линейность с ошибкой, не превышающей ϵ . Поэтому в них необходимо применение многоходового АЦП и системы выбора канала. Необходимо остановиться еще на одной особенности работы ФПУ в лидарных комплексах. ФД в ФПУ лидаров работает в трех режимах: токовом, многофотонном и однофотонном (режим счета фотонов). Эти режимы характеризуются существенно различной статистикой шумовых импульсов [4] и динамическим диапазоном. Так, если динамический диапазон ФЭУ сигналов на выходе при работе в токовом режиме составляет до 70 дБ, то в многофотонном режиме он не превышает 30 дБ, а в режиме счета фотонов он равен единице (одноэлектронные импульсы). Учитывая основные соотношения для ошибки измерений, в последних двух случаях уменьшение ϵ возможно лишь за счет накопления сигналов.

Среди методов сжатия Д в ФПУ обычно рассматриваются: ФД с ЛАХ, рассмотренные выше, ФПУ с временной регулировкой усиления (ВАРУ), схемы с «быстродействующей» АРУ и адаптивные ФПУ [3, 4]. Схемы с ВАРУ, как непрерывной, так и ступенчатой, позволяют компенсировать треть слагаемое в (4), однако их возможности этим и ограничены [3]. При создании схем с ВАРУ необходимо учитывать возможность увеличения ошибки за счет погрешности системы управления в разомкнутой системе регулирования, а также изменение регулировочных характеристик ФД при фоновых засветках. Основной проблемой при создании ФПУ с «быстродействующей» АРУ является обеспечение быстродействия, достаточного для компенсации возможных быстрых изменений лидарного сигнала, и обеспечение устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования. Эти факторы резко ограничивают область применения быстродействующей АРУ в лидарах. Адаптивные ФПУ [4] позволяют расширить возможности лидарных комплексов, но при этом главным ограничивающим фактором является время адаптации ФПУ.

Очень сильное влияние на характеристики ФПУ оказывает фоновая засветка ФД, практически неизбежная при работе лидарных комплексов [15]. Ее влияние сказывается на изменении амплитудных и регулировочных характеристик ФД и приводит к увеличению уровня собственных шумов ФД. При расчете шумовых характеристик ФД в режиме многофотонных и однофотонных импульсов необходимо также учитывать увеличение числа шумовых импульсов, обусловленное засветкой ФД сигналом из ближней зоны лидара [3, 14]. Применяемая в лидарных комплексах методика «вычитания» фоновой составляющей при обработке сигналов обратного рассеяния без увеличения ϵ возможна только в ФПУ с линейной амплитудной характеристикой.

В лидарах, работающих в средней инфракрасной области, в качестве ФД применяются охлаждаемые фотодиоды и фотосопротивления, не обладающие внутренним усилением фототока. Поэтому в ФПУ, работающих в этом диапазоне, большую роль играют шумы последующего усилительного устройства. Определенный выигрыш в улучшении метрологических характеристик лидаров в этом диапазоне может дать использование супергетеродинного и гомодинного методов приема рассеянных сигналов за счет уменьшения влияния уровня собственных шумов каскадов, включенных после ФД, а

также существенного улучшения спектральной и пространственной селективности ФПУ [13]. Однако при этом необходимо учитывать квантовую природу света, что делает невозможным работу супергетеродинного и гомодинного приемника в режиме счета фотонов [13]. Необходимо также учитывать доплеровский сдвиг частоты рассеянных сигналов, что неизбежно вызывает резкое расширение полосы пропускания усилительного тракта и соответствующее снижение чувствительности. Поэтому не следует ожидать существенного улучшения метрологических характеристик лидарных комплексов при переводе ФПУ в режим супергетеродинного приема по сравнению с режимом прямого детектирования.

Учитывая вышеизложенное, можно считать, что наиболее полно требованиям, предъявляемым к ФПУ лидарных комплексов по ϵ , D и разрешающей способности, удовлетворяют схемы z и d (рис. 2) с многими промежуточными выходами, в которых D каждого промежуточного каскада может быть сделан достаточно малым, при сохранении линейности амплитудной характеристики каскада, обеспечивающей необходимое значение ϵ .

Передатчики (ПЛ) лидарных комплексов

Передающие устройства лидарных комплексов строятся на основе импульсных лазеров. Так как в большинстве лидаров для увеличения объема получаемой информации используется многоволновое (многочастотное) зондирование, то применяются несколько лазеров [3, 6], умножение частоты лазера [3, 6, 16], переизлучение (перенос частоты) с помощью лазеров на красителях.

К передатчикам лидарных комплексов предъявляются следующие основные требования: 1) генерация на заданных длинах волн; 2) стабильность энергии импульса; 3) стабильность длительности импульса; 4) высокий к.п.д.; 5) работа в импульсно-периодическом режиме. Первое условие наиболее очевидно и всегда учитывается.

Требование стабильности энергии импульса в большинстве работ по лидарным комплексам подменяется условием нормировки принимаемого сигнала к энергии импульса передатчика [5, 6]. Это допущение справедливо лишь для работы ФПУ в режиме счета фотонов (одноэлектронном). В двух других режимах работы ФПУ изменение энергии передатчика будет вызывать изменение D входных сигналов и изменение режима работы ФД. Так, изменение мощности передатчика на $\pm 30\%$ (типичное для твердотельных лазеров со стандартными блоками питания) приводит к изменению D в два раза. При удвоении частоты или переизлучении в лазерах на красителях D увеличивается еще в два раза. Все это в соответствии с (5)–(7) будет увеличивать ϵ , или при сохранении величины ϵ приведет к соответствующей коррекции характеристик ФПУ. Кроме стабилизации энергии передатчика, необходимо стабилизировать длительность импульса генерации.

Основными источниками нестабильности характеристик излучения твердотельных лазеров являются: нестабильность энергии и изменение спектра излучения лампы накачки, нестабильность уровня инверсной населенности в момент включения добротности и т.д. Поэтому одним из важных вопросов при создании лидарных комплексов является создание высокостабильных и высокоэффективных источников накачки твердотельных лазеров, а также встроенных систем контроля и стабилизации параметров импульса генерации. Эти вопросы приобретают еще большее значение при работе в импульсно-периодическом режиме. Вопросы воспроизводимости и стабилизации характеристик излучения газовых лазеров, применяемых в передатчиках лидарных комплексов, еще ждут своего детального исследования и разрешения. В этих лазерах основную роль играет нестабильность параметров разряда. Поэтому и здесь важной является проблема создания источников накачки с высокой воспроизводимостью характеристик активной среды.

В лазерных передатчиках, предназначенных для работы с гетеродинными ФПУ, чрезвычайно важной и в то же время очень сложной проблемой является стабилизация частоты передатчика как внутри импульса, так и от импульса к импульсу, а также вопросы взаимной привязки частот передатчика и гетеродина. Судя по литературным данным [18, 19, 20], наилучшие результаты позволяют получить гибридные лазеры, содержащие в общем резонаторе газоразрядные секции высокого и низкого давления.

Оптические системы лидарных комплексов и системы АЦП

К основным функциям, которые выполняют передающая и приемная оптические системы лидарных комплексов, относятся коллимация излучения передатчика, обеспечение заданной площади S_0 и угла зрения приемника, спектральная и поляризационная селекция сигналов на ФПУ. Требования к этим характеристикам оптических систем обычные и следуют из (1) – (3). При этом в зависимости от вида селекции – спектральная, поляризационная – на выходе оптической системы ФПУ могут устанавливаться несколько ФД секций. Но кроме этих стандартных функций оптические системы позволяют частично улучшить и основные метрологические характеристики лидаров: D и ϵ . Так, применение спецдиафрагм [21] позволяет сжать Див соответствии с (5)–(7) уменьшить ϵ . Следует, однако, учитывать, что применение спецдиафрагм требует большой точности их изготовления, установки и юстировки всей оптической системы лидарного комплекса. Кроме того, в ПЛ при применении спецдиафрагм необходимо контролировать модовую структуру излучения, т.к. ее изменение от импульса к импульсу будет вызывать увеличение ϵ . Оригинальное решение по сжатию D в ближней зоне предложено в [22], где используется опти-

ческая система ПЛ с расщеплением луча лазера (т.е. оптическая система с несколькими выходами). Аналогичный результат может быть получен и при использовании нескольких разнесенных ФПУ. Подобный режим работы с несколькими ФПУ (многоходовый режим приемной оптической системы) предусмотрен в лазерном комплексе «Пихта» (таблица). Необходимо остановиться еще на одной принципиальной особенности многоходовой оптической системы. Обычно в лидарных комплексах для увеличения дальности действия (1)-(3) стремятся увеличить диаметр входного объектива (таблица).

Таблица

Параметры	Типы лидаров						
	«Глория» [2]	«Макет 1» [2]	БГУ [2]	ЛОЗА-3 «Электроника» [3]	МГУ [4]	ЛИК [12]	«ПИХТА» [12]
Длина волны (нм)/ энергия (мДж) (тип лазера)	434/5 488/5 546/4 589/15 694/120 863/55 950/65	532/15 1064/150 (ИЗ-25)	532/15 1064/150 (ИЗ-25)	532/15 692/200 1064/150 (ИЗ-25) (рубин)	347/3 532/15 694/200 1064/150 (ИЗ-25) (рубин)	532/15 1064/150 (ИЗ-25)	532/15 1064/150 (ИЗ-25)
Длительность импульса (нс) Расходимость передатчика (мрад)	25 1,5	20 1	20 1	20 1	20 1	20 1	20 1
Диаметр приемной антенны (м)/тип объектива	0,3/6 2 ÷ 4	0,5/6 2	МТО-1000 — 2	0,3/2 2	0,3/2 —	МТО-1000 7	МТО-1000 7
Δλ, фильтра (нм)	4	2	2	2	3	2	2
Число принимаемых длин волн	1/4	1/2	2/1	1/2	1/3	1/2	6/2
Число объективов/число ФПУ	100	500	8	60	60	10	10
Время выборки min (нс)	256	256	100	256	256	128	128
Число точек выборки	40	40	100	40	40	80	80
Динам. диап. (дБ)	7	10	0,5(АЦП)	10	10	10	10
ε (%)	+	+	—	+	—	—	+
Возможность измерения поляризации	+	+	—	+	—	—	+
Частота зондирующих им- пульсов (Гц)	0,1	50	50	50/0,1	50/0,1	100	100
Контроль энергии/калибровка приемника	+/-	-/+	+/-	+/-	+/-	+/+	+/+

Однако из (3) следует, что в случае ограничения по фону S_0 слабо влияет на R_{\max} , а именно это ограничение наиболее часто встречается в практике применения лидарных комплексов. Если вместо одно-входовой приемной оптической системы большого диаметра применить M -входовую систему с такой же эквивалентной площадью объектива, то выигрыш при некогерентном сложении сигналов с выходов ФПУ в R_{\max} будет пропорционален $M^{1/4}$. Данный выигрыш может быть несколько увеличен за счет статистической обработки сигналов. Выбор числа входов M ограничен сверху снижением принимаемого числа фотонов в каждом канале, при этом относительное снижение числа фотонов в канале может быть даже полезно, т.к. обеспечивает работу ФПУ только в многофотонном или однофотонном режиме.

Системы АЦП в лидарных комплексах служат для оцифровки сигналов с выходов ФПУ и передачи через интерфейс в центральный процессор. Основными требованиями к АЦП являются точность и быстродействие. Как видно из (5)–(9), точность и быстродействие работы АЦП являются величинами взаимосвязанными. Хотелось бы обратить особое внимание на соотношение (9). Выполнение его представляет серьезные технические трудности при одноходовом выполнении АЦП (рис. 2, схемы *a, б, в*).

В то же время прямые расчеты показывают, что эти ограничения относительно легко разрешимы в многоходовых АЦП (рис. 2, схемы *г, д*).

Заключение

В таблице приведены характеристики отечественных лидарных комплексов. Большинство из них представлено единичными экспериментальными образцами. Исключение составляют лишь лидары ЛОЗА–3, промышленное название «Электроника», и лидары Института физики АН БССР, выпущенные небольшой партией опытным производством. Необходимо отметить, что именно эти лидары прошли наиболее строгую метрологическую проверку, в том числе на полигоне Института экспериментальной метеорологии. Как видно из таблицы, почти все решения, рассмотренные выше, в той или иной степени фрагментарно включаются в реальные лидарные комплексы. По-видимому, дальнейшее развитие лидаров должно основываться на комплексном системном подходе с учетом всех видов взаимовлияния отдельных составляющих на основные метрологические характеристики.

В заключение хочу выразить благодарность В.Е. Зуеву, по инициативе которого была написана данная работа, а также А.П. Иванову, Г.И. Ильину, В.И. Козинцеву, И.А. Малевичу, А.И. Холодных и А.П. Чайковскому за предоставленные материалы и полезные обсуждения.

1. Зуев В. Е. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 1. С. 3.
2. Лазерный контроль атмосферы. /Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
3. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозольей. Новосибирск: Наука. 1986. 186 с.
4. Иванов В. И., Малевич И. А., Чайковский А. П. Многофункциональные лидарные системы. Минск: Изд. Минского ун-та. 1986. 286 с.
5. Чайковский А. П. //ЖПС. 1986. Т. 44. № 2. С. 183.
6. Бойченко В. Л., Кузнецов В. И. и др. //Изд. АН СССР. Сер. физич. 1986. Т. 50. № 11, С. 2262.
7. Ильин Г. И., Польский Ю. Е. //В кн.: IV Всес. симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР. 1977. С. 138–140.
8. Ильин Г. И. //В кн.: V Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР. 1979. С. 42–44.
9. Ильин Г. И. //В кн.: V Всес. симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Томск. 1978. Ч. IV. С. 138–140.
10. Абрамов Б. А., Ильин Г. И. //В кн.: VII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР. 1982. Ч. II. С. 226–227.
11. Ильин Г. И., Польский Ю. Е. //В кн.: VI Всес. научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М., 1986. С. 161.
12. Ильин Г. И., Пикулев А. Н., Польский Ю. Е. //В кн.: II Всес. научно-техническая конференция «Проблемы разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния окружающей среды». Казань. 1983. С. 169–172.
13. Росс М. Лазерные приемники. М.: Мир. 1969. 519 с.
14. Ильин В. И., Ильин Г. И., Польский Ю. Е. //Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 1. 214 с.
15. Агишев Р. Р., Ильин Г. И. //В кн.: II Всес. научно-техническая конференция «Проблемы разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния окружающей среды». Казань. 1983. С. 171–173.
16. Агишев Р. Р., Ильин В. И., Ильин Г. И., Польский Ю. Е., Терновсков В. Т. //В кн.: I Всес. научно-техническая конференция «Безопасность полета в условиях опасных внешних воздействий». Киев, 1981. С. 81.
17. Агишев Р. Р., Дорогов Н. В., Ильин Г. И., Пикулев А. Н., Польский Ю. Е. //В кн.: VIII Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР. 1986. Ч. II.
18. Lachambe J. L., Levigne P., Verrault M., Otis G. //IEEE, QE-14. № 3. P. 170.
19. Scolf G., Smit A. L. S. //Opt. Commun. 1984. V. 50. № 5. P. 325–329.
20. Takayasi Fukido, Yoskio Matsuura, Tadatami More. //Appl. Opt. 1984. V. 23. № 12. P. 2026.
21. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь. 1981. 288 с.
22. А. с. № 496524. СССР. Способ оптического зондирования атмосферы //Балин Ю. С., Самохвалов И. В., Шамаев В. С. Опубл. в Б. И. 1975. № 47.

Y u . E . P o l ' s k y . **Lidar Complexes: State-of-the-Art and Outlook.**

A state-of-the-art review of lidar complexes is given. The relative measurement error, dynamic range and space (time) resolution are chosen to be the major metrological characteristics of lidars. The correlation between the above parameters and the contribution to the technical data from individual structural units used in the lidar setup are discussed. Finally, the main performance specifications of the Soviet lidar complexes are listed.