

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.7.01: 535.81

А.И. Абрамочкин, А.А. Тихомиров

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ ЛИДАРА: К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМНЫХ ОБЪЕКТИВОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Рассмотрены различные приемные объективы лидара: линзовые (три типа), зеркальные (два), зеркально-линзовые (три) и многоэлементные составные (два) и проведен их сравнительный анализ по обобщенным критериям качества. Предложенные методика сравнения и диаграмма энергетических и габаритных характеристик позволяют выбрать оптимальный объектив по введенному коэффициенту относительной эффективности или по минимальному продольному габариту (при одинаковых световых диаметрах). Показано, что самыми компактными являются объективы по схеме Манжена, на основе линзы Френеля и многоэлементные составные (в порядке возрастания габарита).

Введение

Приемная система, наряду с лазерным передатчиком, является одной из основных частей лидара, которая определяет его энергетический потенциал [1]. В ее составе выделим: приемный объектив, пространственный и спектральный фильтры, поляризационный элемент и фотодетектор. В качестве приемных объективов используются линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые. Роль пространственного фильтра в большинстве приемных систем лидара играет полевая диафрагма [2–4]. Если для спектральной селекции применяется интерференционный светофильтр, перед ним устанавливается линза Фабри, которая уменьшает угловую расходимость излучения, поступающего на светофильтр. В КР-лидарах [5–7] роль пространственного фильтра выполняет входная щель монохроматора, если последний используется в качестве спектрального фильтра для выделения линий комбинационного рассеяния в принятом излучении.

Многообразие существующих типов приемных систем [5, 8 – 10] требует применения обоснованного подхода при разработке новых лидаров. В работе предлагаются обобщенные критерии оценки качества для сравнительного анализа различных объективов и выбора конкретного типа для проектируемого лидара.

1. Требования, предъявляемые к приемным объективам в лидарах

При разработке приемных систем лидаров в качестве основы использовались схемы объективов телескопов. Несмотря на множество общих характеристик, между ними имеются и существенные отличия. Главным из них является то, что лидарный объектив строит изображение рассеивающего зондируемого объема, перемещающегося со скоростью света

вдоль его оптической оси в пространстве предметов, в то время как телескоп дает изображение удаленного на бесконечность источника излучения. Вследствие этого при приеме лидарных сигналов меняются углы прихода рассеянного излучения на входную апертуру приемного объектива, а в зафокальной области его пространства изображений, сопряженной с областью предметов, происходит продольно-поперечное перемещение изображения рассеивающего объема [2, 3]. В значительной степени это проявляется для лидаров с несомещенными оптическими осями передатчика и приемной системы, имеющей длиннофокусный объектив.

Большинство методов лазерного зондирования основано на анализе энергетических, в том числе поляризационных, характеристик потока обратно рассеянного излучения [5, 8–10]. Поэтому основное требование к приемному объективу лидара – получение и передача на фотодетектор наибольшей части потока этого излучения. В многоволновых лидарах, а также в лидарах, где используются эффекты дифференциального поглощения и комбинационного рассеяния, кроме энергетического, проводится спектральный анализ эхосигнала. В этом случае необходим учет хроматических искажений, вносимых объективом. И наконец, в лидарах для исследования турбулентных характеристик атмосферы [11] важным является получение изображения рассеивающего объема.

По типу размещения лидары можно разделить на стационарные и мобильные. Для первых практически нет ограничений по массогабаритным характеристикам, поэтому в них используются приемные объективы большого диаметра и, соответственно, веса [12, 13]. В наземных мобильных [14, 15] и особенно в аэрокосмических лидарах [16, 17] имеются ограничения по массе и габаритам. Предлагаемая классификация приемных объективов по габаритным размерам представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Тип лидара	Габарит объектива	Диаметр объектива, м
Стационарный	Особо крупный	$\geq 1,0$
	Крупный	$0,5 \div 1,0$
	Средний	$0,3 \div 0,5$
Мобильный	Крупный	$0,3 \div 0,5$
	Средний	$0,2 \div 0,3$
	Малый	$\leq 0,2$

2. Параметры, характеризующие приемный объектив

Приемный объектив характеризуется двумя главными параметрами, входящими в аппаратную постоянную лидарного уравнения: эффективной площадью $S_{\text{эф}}$ и коэффициентом передачи (пропускания) потока излучения K . В целом оценку свойств, качества и эффективности объектива можно провести с помощью ряда характеристик, среди которых, следуя [18], выделим: 1) габаритно-массовые, 2) энергетические, 3) абберационные, 4) спектральные, 5) технико-экономические, 6) эксплуатационные.

Габаритно-массовые характеристики определяют поперечные и продольные размеры объектива и его элементов, их массу и взаимное расположение, положение и размер изображения рассеивающего объема. Основными из них являются: диаметр D_o , фокусное расстояние f и относительное отверстие $A = D_o/f$, где D_c – диаметр входного зрачка. Эквивалентными терминами величины D_c , используемыми в лидарной технике, являются световой диаметр объектива или диаметр входной апертуры. Диаметр D_o превышает размер D_c на толщину оправы.

Фокусное расстояние f определяет размеры изображения рассеивающего объема в плоскости установки пространственного фильтра [2, 3], а также задает продольный габарит объектива L . Вместе с величиной диаметра D_c и расстоянием между оптическими осями передатчика и приемного объектива B величина f входит в соотношения, определяющие геометрический фактор лидара и динамический диапазон принимаемого сигнала [2, 4, 5].

Масса объектива и его составных частей зависит от материалов, используемых для преломляющих и отражающих элементов, металлических оправ и труб и требуемой жесткости конструкции. Поскольку, исходя из прочностных расчетов, толщина зеркал и линз выбирается в долях диаметра, $t = (0,08 \div 0,15) D_o$ [19–22], в первом приближении можно считать, что масса оптических элементов объектива пропорциональна третьей степени его диаметра, $m_o \sim D_o^3$.

Энергетические характеристики определяют свойства приемного объектива как преобразователя потока обратно рассеянного излучения. К ним относятся: светосила (квадрат относительного отверстия), которая пропорциональна его площади, и коэффициент пропускания (передачи) излучения. Последний учитывает потери, связанные с отражением от зер-

кальных поверхностей, с рассеянием и поглощением в линзовых и менисковых элементах. Экранирование потока излучения элементами, расположенными перед главным зеркалом, учитывается введением эффективной площади приемного объектива $S_{\text{эф}}$.

Дополнительно к энергетическим характеристикам следует отнести мощность излучения, рассеиваемую на элементах приемного объектива [23] и снижающую отношение сигнал-шум, а также пространственный угол поля зрения Ω , влияющий на величину этого отношения в присутствии фонового излучения [5]. Однако величину Ω правильнее относить к характеристике приемной системы в целом. Как правило, значение плоского угла поля зрения θ не превышает 3 мрад, за исключением лидаров для исследования эффектов многократного рассеяния, где он может превышать 10 мрад. Оптимизация размеров и формы поля зрения является одной из важнейших мер повышения отношения сигнал-фон на выходе приемной системы лидара [2–5].

Абберационные характеристики служат для оценки качества создаваемого объективом изображения в зависимости от габаритных характеристик, радиуса кривизны отражающей или преломляющей поверхности, толщины и коэффициента преломления оптического материала. Как и в объективах телескопов, в приемных объективах лидаров различают монохроматические и хроматические абберации [19–21]. Первые не зависят от длины волны падающего излучения и возникают вследствие различия в условиях преломления или отражения различных частей пучка излучения. К ним относятся сферическая абберация, кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия. Хроматические абберации обусловлены дисперсией многоволнового излучения в оптических деталях.

Для приемных объективов одноволновых лидаров, имеющих $\theta \leq 3$ мрад, наиболее существенной является сферическая абберация. Ее удобнее всего характеризовать диаметром минимального кружка рассеяния точек изображения, который определяется соотношением

$$\delta_{\text{сф}} = k f A^3, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяемый типом приемного объектива (для сферического зеркала $k = 0,0156$, для плосковыпуклой сферической линзы $k \approx 0,137$ [19, 22]).

Спектральные характеристики определяются рабочим диапазоном длин волн $\lambda_1 \div \lambda_n$ или одной длиной волны λ_0 лидара и налагают ограничения на материал используемого покрытия зеркального объектива либо на материал линз. Для спектрометрических лидаров существенно влияние хроматических аббераций, поэтому применение простых линзовых объективов для них нежелательно, если не использовать хроматизм линзы специально для селекции длин волн в фокальном монохроматоре [24].

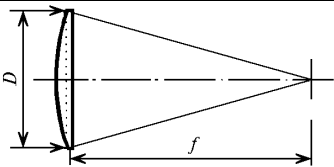
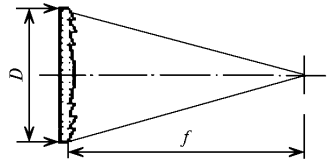
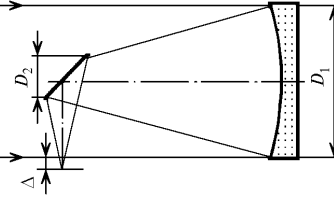
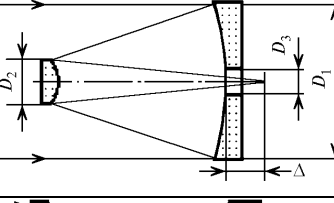
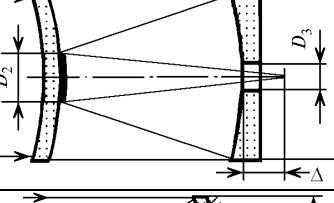
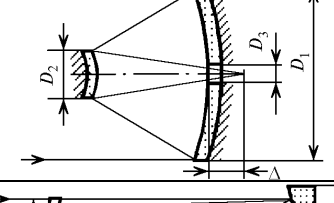
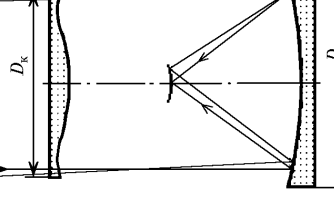
Технико-экономические и эксплуатационные характеристики позволяют оценить качество, надежность и экономичность конструктивного оформления и эффективность данного объектива в процессе эксплуатации.

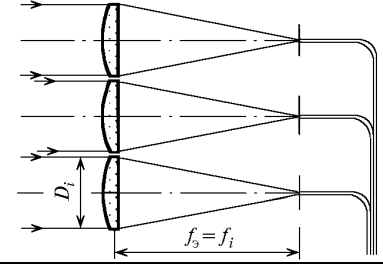
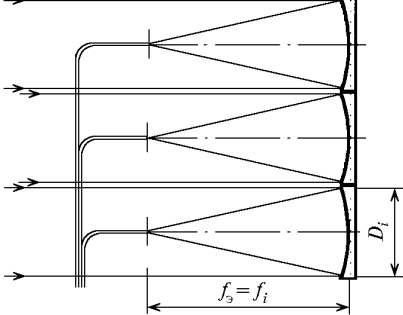
Если габаритные, энергетические и абберационные характеристики определяются при расчете таких параметров лидара, как дальность зондирования, погрешность определения искомого параметра атмосферы, пространственное разрешение и т.п., то технико-

экономические характеристики определяются на основе конкретных технических решений – исполнения объектива с определенными габаритными, энергетическими и абберационными характеристиками. Стоимость объектива зависит как от его диаметра, так и от типа используемого профиля оптической поверхности (сфера, парабола и т.п.), что определяется технологией изготовления. Эксплуатационные характеристики отражают сложность юстировки, проверки качества и технического состояния объектива в процессе работы.

Таблица 2

Сравнительные характеристики приемных объектов лидаров

Тип	Вид, оптическая схема	Параметры
Линзовые		Сферическая (асферическая) линза $A_{\max} = 1/4 (1/2); D_{\max} = 400 \text{ мм};$ $S_{\text{эф}} = \pi D^2/4; K_{\max} = 0,96;$ $\frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,96; m_o \sim D^3; L \approx f;$ $L_{\min} \approx 4,12 D (2,12 D \text{ для асферики})$
		Линза Френеля $A_{\max} = 2,0; D_{\max} = 500 \text{ мм}$ $S_{\text{эф}} = \pi D^2/4; K_{\max} = 0,9;$ $\frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,90; m_o \sim D^3; L \approx f;$ $L_{\min} \approx 0,5 D$
Зеркальные		Схема Ньютона $A_{\max} = 1/4 (1/2); D_{\max} - \text{не ограничен};$ $S_{\text{эф}} = \pi D_1^2 (1 - q^2)/4; K_{\max} = 0,8;$ $q_{\max} = 0,125; \frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,787;$ $m_o \sim D_1^3 (1 + q^3); L \approx f_1 (1 - q) + D_2/2;$ $L_{\min} \approx 3,67 D_1$
		Схема Кассегрена $A_{\max} = 1/8; D_{\max} - \text{не ограничен};$ $S_{\text{эф}} = \pi D_1^2 (1 - q^2)/4; K_{\max} = 0,8;$ $q_{\max} = 0,3; \frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,728;$ $m_o \sim D_1^3 (1 + 2,8 q^3); L \approx f_1 q/\beta;$ $L_{\min} \approx 2,44 D_1$
Зеркально-линзовые		Схема Максутова $A_{\max} = 1/6; D_{\max} - \text{не ограничен};$ $S_{\text{эф}} = \pi D_1^2 (1 - q^2)/4; K_{\max} = 0,75;$ $q_{\max} = 0,3; \frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,682;$ $m_o \sim 2 D_1^3; L \approx f_1 q/\beta; L_{\min} \approx 2 D_1$
		Схема Манжена $A_{\max} = 1,1; D_{\max} - \text{не ограничен};$ $S_{\text{эф}} = \pi D_1^2 (1 - q^2)/4; K_{\max} = 0,72;$ $q_{\max} = 0,3; \frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,655;$ $m_o \sim D_1^3 (1 + q^3); L \approx f_1 q/\beta;$ $L_{\min} \approx 0,31 D_1$
		Схема Шмидта $A_{\max} = 1/2; D_{\max} - \text{не ограничен};$ $S_{\text{эф}} = \pi D_k^2/4; K_{\max} = 0,85;$ $q_{\max} = 0,15; \frac{K S_{\text{эф}}}{m_o} = 0,850;$ $m_o \sim 2 D_1^3; L \approx 2 f;$ $L_{\min} \approx 4,2 D_1$

Тип	Вид, оптическая схема	Параметры
Многоэлементный составной линзовый		<p>Асферические линзы</p> $f_3 = f_i; A_{\text{max}} = 1/2,5; A_3 = \sqrt{n} A_i;$ $S_{\text{эф}} = n S_{\text{эф}i}; K_{\text{max}} = 0,96;$ $L \approx f_i; L_{\text{min}} \approx 2,62 D_i;$ $L_{\text{min}} \approx 0,99 D_3 \text{ (для 7 линз)}$ $\overline{K S_{\text{эф}}} = 0,794$
Многоэлементный составной зеркальный		<p>Параболические зеркала</p> $f_3 = f_i; A_{\text{max}} = 1/2,5; A_3 = \sqrt{n} A_i;$ $S_{\text{эф}} = n S_{\text{эф}i}; K_{\text{max}} = 0,9; q_{\text{min}} = 0,05;$ $L \approx f_i; L_{\text{min}} \approx 2,62 D_i;$ $L_{\text{min}} \approx 0,99 D_3 \text{ (для 7 зеркал)}$ $\overline{K S_{\text{эф}}} = 0,744$

3. Типы приемных объективов, используемых в лидарах

В соответствии с классификацией [19] объективы делятся на линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые. В приемных системах лидаров используются все три типа. Схемы основных из них представлены в табл. 2. Там же приведены некоторые их предельные параметры. Для зеркальных объективов диаметр ограничивается технологическими возможностями изготовления и определяется в соответствии с табл. 1.

Линзовые объективы. Объектив, построенный на основе одиночной линзы со сферическими поверхностями, является наиболее простым для одноволнового лидара. Сферическая абберрация такого объектива может быть снижена путем оптимального выбора радиусов кривизны внешней и внутренней преломляющих поверхностей. Однако величина A при этом ограничена значениями $1/4 \div 1/6$, что увеличивает длину объектива. Доведение A до $1/2$ нежелательно, так как приводит к значительному возрастанию размеров кружка рассеяния (см. соотношение (1)). При этом для исключения виньетирования требуется соответствующее увеличение угла поля зрения приемной системы, что приводит к снижению отношения сигнал-шум при работе в условиях фоновых засветок.

Более практичным является объектив на основе линзы с асферической входной и плоской выходной поверхностями. Относительное отверстие такого объектива может составлять $1/2$, при этом угловой размер кружка рассеяния, создаваемый сферической абберрацией, не превосходит $0,66$ мрад, что вполне приемлемо для использования в приемнике

лидара. В последних моделях мобильных лидаров такие объективы находят широкое применение [16].

Достоинством линзовых объективов из стекла является удобство в эксплуатации, высокое значение коэффициента K , равное $0,92$ и достигающее $0,96$ при просветлении оптических поверхностей для одноволновых лидаров, минимальное количество рассеянного света. Диаметр объектива ограничен $300 \div 400$ мм, что связано с технологией получения качественных оптических заготовок и изготовления самой линзы.

Объективы на основе линз Френеля также использовались в лидарах [25]. Эти линзы более просты в изготовлении, могут иметь существенно меньшую величину сферической абберрации по сравнению с обычными сферическими линзами [21]. Линза Френеля, изготовленная из оргстекла, имеет при одинаковом диаметре D толщину t и массу m_0 , в несколько раз меньшую, чем сферическая или асферическая линзы из стекла или кварца. При этом величина $A \leq 2$ [26]. Вместе с тем линзам Френеля присущ недостаток – большое внутреннее светорассеяние на гранях рисок, что приводит к снижению отношения сигнал-шум. Имеется также некоторое экранирование кольцевыми цилиндрическими поверхностями лучей, наклонных к оптической оси. По этим причинам данные линзы широкого распространения в приемных системах лидаров не получили.

Использование многокомпонентных объективов – дублетов или триплетов, состоящих из двух или трех линз, целесообразно только для многоволновых лидаров с целью исправления хроматических абберраций. Однако это приводит к увеличению габаритно-массовых характеристик, повышению стоимости и не дает преимуществ по сравнению с зеркальными объективами.

Зеркальные объективы. Применение такого объектива позволяет сократить продольный габарит по сравнению с линзовым, имеющим одинаковый диаметр D_c . Кроме того, металлизированное зеркальное покрытие обеспечивает работу в широком спектральном диапазоне, что важно для многоволновых лидаров. Такие объективы нашли широкое применение как в стационарных [12, 13], так и мобильных лидарах [14–17]. Поскольку фокальная поверхность зеркала расположена с той же стороны, откуда поступает поток излучения, часть его экранируется фотодетектором или вторичным зеркалом. Размещение фотодетектора в фокусе применяется только в лидарах с большим диаметром зеркала [13]. Чаще используются двухзеркальные объективы с главным (первичным) зеркалом, имеющим диаметр D_1 и фокусное расстояние f_1 , и вторичным зеркалом с параметрами D_2 и f_2 . Такой объектив характеризуется эквивалентным фокусным расстоянием f_s , которое обычно больше, чем f_1 , а также эквивалентным относительным отверстием $A_s = D_1/f_s$. Вторичное зеркало уменьшает эффективную площадь объектива $S_{эф}$, что учитывается коэффициентом экранировки $q = D_2/D_1$. Величину q , как правило, выбирают не более 0,3, при этом $S_{эф}$ уменьшается менее чем на 10%. Вводят также параметр β , который характеризует изменение сходимости пучка после вторичного зеркала, т.е. изменение относительного отверстия объектива,

$$\beta = A_s/A_1 = f_1/f_s. \quad (2)$$

Фокусные расстояния главного и вторичного зеркал связаны соотношением $f_1/f_2 = (1 - \beta)/q$. Габаритный расчет двухзеркальных систем детально рассмотрен в [19]. Расстояние между вершинами зеркал

$$d = (1 - q)f_1, \quad (3)$$

величина выноса фокальной плоскости за вершину главного зеркала

$$\Delta = [q - \beta(1 - q)]f_s \quad (4)$$

(кроме объектива по схеме Ньютона). В первом приближении (без учета толщины вторичного зеркала) продольный габарит зеркального объектива

$$L \approx f_s q = f_1 q/\beta. \quad (5)$$

Для двух алюминированных поверхностей зеркал в спектральном диапазоне $0,2 \div 1,0$ мкм максимальное значение K равно 0,8 [19]. Центральное отверстие диаметром

$$D_3 = \Delta A_s - 2d [(f_s + \Delta) \operatorname{tg} \theta/2]/(d - \Delta) \quad (6)$$

в главном зеркале обеспечивает свободный проход в фокальную плоскость всех лучей, лежащих в плоском угле θ , без виньетирования.

В зеркальном объективе по схеме Ньютона вторичным является плоское диагональное зеркало, поэтому $f_s = f_1$. В целях минимизации величины q фокальную плоскость выносят за пределы габаритов диаметра D_1 на минимальную величину Δ_H , которая при габаритном расчете определяется из соотношения [19]

$$\Delta_H = [(f_1 - D_1/2) \operatorname{tg} \theta/2] (1 + \operatorname{tg} \theta/2). \quad (7)$$

Значение коэффициента q не должно превышать 0,125. Данный объектив имеет существенный недостаток – увеличение поперечного габарита при значительной величине L , поэтому он широко применялся только в первых лидарах [14, 27, 28], в том числе для построения коаксиальных приемопередающих систем. Наличие диагонального зеркала не позволяет применять объектив в поляризационных лидарах.

Наибольшее распространение в приемниках мобильных лидаров получили объективы по схеме Кассегрена, в которой главное зеркало параболическое, вторичное – гиперболическое. Вынос фокальной плоскости на величину Δ за вершину главного зеркала позволяет размещать позади него пространственный и спектральный фильтры, поляризационные элементы, а также фотодетектор. Схема Кассегрена обеспечивает величину A_s не более 1/8. При этом длина телескопа много меньше его эквивалентного фокусного расстояния, а углы падения лучей на каждое из зеркал невелики, что практически не изменяет поляризацию падающего излучения. Это дает возможность использовать такие приемные объективы в поляризационных лидарах. Применение только двух отражающих поверхностей позволяет повысить величину K .

Схему Грегори, у которой вторичное зеркало располагается за фокальной плоскостью главного, в данном обзоре не рассматриваем, поскольку она имеет существенно большую габаритную длину L по сравнению со схемой Кассегрена.

Зеркально-линзовые объективы. Наиболее распространенной является схема Максудова (менисковый Кассегрен). Объектив состоит из менискового линзового компенсатора и первичного зеркала. Все поверхности сферические, что является существенным преимуществом для технологии изготовления. Для упрощения конструкции вторичное зеркало иногда напыляют на центральную часть мениска. Используя ахроматический мениск [19], можно сделать объектив, работающий в широком спектральном диапазоне. Кроме того, мениск играет одновременно роль защитного стекла, улучшая эксплуатационные характеристики данного объектива, что делает его предпочтительным для мобильных лидаров [15].

Комбинирование зеркальных и линзовых компонентов позволяет получить большую светосилу при лучшем исправлении аберраций, чем у чисто зеркальных объективов. Диаметр мениска в схеме

Максудова равен диаметру главного зеркала, что увеличивает стоимость объектива. П.П. Аргуновым предложена светосильная система апланатического типа, в которой вместо вторичного зеркала установлен корректор, состоящий из ахроматического линзового дублета, имеющего на задней поверхности зеркальное покрытие [19, 29]. При этом все поверхности оптических компонентов являются сферическими. В такой системе при $A_3 = 1/3,3$ одновременно исправлены сферическая aberrация и кома, а также хроматизм для двух длин волн (в табл. 2 данный объектив не приведен).

В схеме Манжена отражающее покрытие наносится на заднюю сторону каждого оптического элемента, что позволяет использовать его преломляющие свойства. Зеркальная линза может быть стабильно ахроматичной с исправленной сферической aberrацией [30]. Основное преимущество такого объектива – сокращение габаритов системы, а также возможность получения малых остаточных aberrаций при больших относительных отверстиях. Величина A_3 может достигать единицы и даже превышать ее [30]. Нанесенные на тыльную поверхность линзы серебряные зеркальные покрытия можно предохранить от атмосферных воздействий защитными пленками. Серебрение увеличивает коэффициент отражения на 7% по сравнению с алюминированным зеркалом. Недостатками объектива являются: технологические трудности изготовления, чувствительность к деформациям и децентровкам. Объектив Манжена использован в российском космическом лидаре [17].

Камера Шмидта. Установка в плоскости входной диафрагмы, совпадающей с центром кривизны сферического зеркала, коррекционной пластинки позволяет исключить ряд aberrаций [19]. Центральная ее часть действует как слабая положительная линза, укорачивая фокусное расстояние параксиальных лучей и лучей внутренних зон, средняя часть является нейтральной, а внешняя действует как слабая отрицательная линза. В результате положение фокусов лучей всех частей смещается, сдвигаясь к вершине зеркала. Камера Шмидта свободна от сферических aberrаций, комы, астигматизма и дисторсии третьего порядка. Хроматизм, остаточная кома и астигматизм, вызываемые наличием коррекционной пластинки, достаточно малы [19]. Чтобы получить невильеируемое линейное поле диаметром $2a$, поперечник зеркала должен превышать диаметр коррекционной пластинки на $4a$, т.е. $D_1 = D_k + 4a$. Центральное экранирование пучка лучей, проходящего через коррекционную пластинку, составит $q = 2a/D_k$. Преимуществом камеры Шмидта является возможность получения большого угла поля зрения, до $6 \div 7^\circ$. Это позволило нам создать на ее основе широкоугольный приемный объектив для метеорологического лидара [31], обеспечивающего измерение скорости ветра по корреляционной методике [8].

Конструкция использованного пространственного фильтра на основе фокона дала возможность регистрировать на одном фотодетекторе эхо-сигналы с трех различных направлений в узких мгновенных полях зрения при общем широком угле поля зрения. Это исключило необходимость вращения массивного приемного объектива, имеющего диаметр $D_1 = 400$ мм.

Составные зеркальные и линзовые системы. Увеличение диаметра приемного объектива, необходимое для повышения энергетического потенциала лидара, приводит к значительному возрастанию его веса и стоимости. Поэтому в последнее время применяется пространственный синтез приемных апертур в составном объективе из расположенных рядом малогабаритных линз или зеркал [32, 33]. Это позволяет существенно уменьшить вес и продольный габарит приемной системы. Такой объектив реализован в КР-лидаре [6].

Из простых геометрических построений можно получить, что для составного объектива, включающего семь малых объективов круглой формы, при плотной упаковке, максимальный коэффициент отношения площадей $\Sigma S_i/S_3 = 0,778$, где S_3 – площадь круга описывающей окружности. При шестигранной форме малых объективов это отношение равно 0,827. Мы не рассматриваем синтезированные адаптивные системы, где решается задача фазового согласования потоков, преобразованных каждым отдельным элементом.

В фокусе каждого зеркала (линзы) устанавливается торец световода, через который принятый поток излучения канализируется к спектральному фильтру или фотодетектору. Относительное отверстие отдельного элемента составного объектива ограничено числовой апертурой используемого световода $A_c \leq 1/2$ [34]. Применение световодов позволяет упростить проблему согласования выходного отверстия объектива со входной щелью спектрального прибора, существующую в КР-лидаре [6, 7]. В этом случае входной торец моноволоконного световода выполняет роль пространственного фильтра. Наличие в приемнике нескольких элементарных систем «объектив – световод» и возможность группировки соответствующим образом выходных концов световодов позволяют производить пространственное преобразование принятого излучения, которое невозможно выполнить никакими другими способами. Другим преимуществом является увеличение значений $S_{эф}$ и A_3 , так как в этом случае эквивалентное фокусное расстояние f_3 остается равным фокусному расстоянию f_i элементарного объектива, а эффективный диаметр (при большом числе объективов n) равен $D_3 \approx \sqrt{n} D_i$. Основными недостатками многоэлементного объектива являются сложность настройки и юстировки оптических осей отдельных объективов, а также дополнительные потери полезного сигнала при вводе излучения в световод и в самом световоде.

4. Критерии оценки эффективности и сравнение приемных объективов

С точки зрения оценки эффективности, при прочих равных параметрах, объективы целесообразно сравнивать по достигаемому значению произведения $KS_{\text{эф}}$ либо по габаритно-массовым характеристикам и стоимости их изготовления при одинаковых величинах $KS_{\text{эф}}$. Основные характеристики рассмотренных выше объективов: максимальная величина относительного отверстия A_{max} , эффективная площадь $S_{\text{эф}}$, максимальный коэффициент передачи K_{max} , коэффициент экранировки q_{max} , коэффициент относительной эффективности $\overline{KS_{\text{эф}}}$, масса объектива m_o (без учета металлических конструкций) и его минимальная длина L_{min} – приведены в табл. 2.

При этом величина $\overline{KS_{\text{эф}}}$ представляет произведение K_{max} и $S_{\text{эф}}$, нормированное на площадь идеального объектива такого же диаметра с $K_{\text{max}} = 1$ и $q = 0$. Для линзового объектива $L_{\text{min}} = f + t \approx D_c (1/A_{\text{max}} + 0,12)$, для зеркального (кроме схемы Ньютона) и зеркально-линзового (кроме схемы Максудова) $L_{\text{min}} \approx f_s q + tq = qD_c (1/A_{\text{max}} + 0,12)$. Для схемы Максудова дополнительно необходимо учитывать продольный размер мениска диаметром, равным D_c .

Рисунок представляет диаграмму эффективности рассмотренных выше объективов. По оси ординат отложены максимально достижимые значения коэффициента относительной эффективности $\overline{KS_{\text{эф}}}$ различных объективов (при одинаковых световых диаметрах D_c), а по оси абсцисс – их минимально возможные продольные габариты L_{min} , выраженные в единицах диаметра. В силу того, что на представленной диаграмме значения D_c объективов приняты одинаковыми, можно, в первом приближении, считать, что объем каждого объектива, а соответственно и его масса (с металлической конструкцией) пропорциональны длине L_{min} . В представленной диаграмме рассмотренные типы объективов распределены по трем группам: 1) особо компактные $L_{\text{min}} \leq D_c$ (схема Манжена, линза Френеля, составной объектив); 2) компактные $L_{\text{min}} = (2 \div 3) D_c$ (схемы Максудова и Кассегрена и асферическая линза); 3) габаритные $L_{\text{min}} \geq 3,5 D_c$ (схема Ньютона, сферическая линза, камера Шмидта).

Диаграмма на рисунке и численные значения предельных параметров, приведенные в табл. 2, позволяют, например, определить, что D_c объектива Манжена надо увеличить в $\sqrt{(KS_{\text{эф}})_{\text{линз}} / (KS_{\text{эф}})_{\text{Манж}}} \approx 1,21$ раза, чтобы его коэффициент относительной эффективности достиг аналогичного значения для просветленного линзового объектива, т.е. в предельном случае линзовый просветленный объектив, имеющий $D_c = 200$ мм,

эквивалентен по величине $\overline{KS_{\text{эф}}}$ объективу Манжена с $D_c = 242$ мм. При этом L_{min} последнего тоже возрастает в 1,21 раза, т.е. увеличится с 62 до 75 мм, но не достигнет величины $L_{\text{min}} = 100$ мм линзы Френеля с $D_c = 200$ мм. Если же, например, диаметр просветленного асферического линзового объектива уменьшить в 1,21 раза, сведя по величине $\overline{KS_{\text{эф}}}$ к объективу Манжена, т.е. сделать равным 165 мм, его L_{min} уменьшится с 424 до 350 мм и станет меньше, чем у объектива Максудова с $D_c = 200$ мм ($L_{\text{min}} = 400$ мм). По предложенной методике аналогичные сравнения можно провести для объективов других типов.

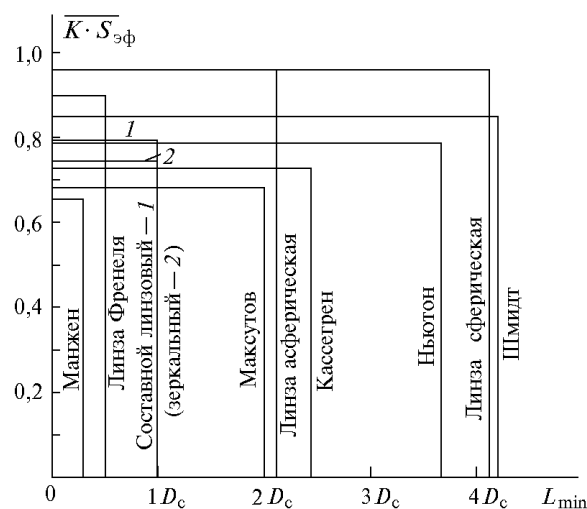


Диаграмма энергетических и габаритных характеристик приемных объективов различных типов

При сравнении эффективности объективов необходимо учитывать, что его стоимость растет, по крайней мере, как D_o^2 или даже как $D_o^{2,7}$ [35]. Вместе с тем следует отметить, что стоимость изготовления зависит от используемых типов материалов, профиля отражающих или преломляющих поверхностей, технологии и возможностей производства и поэтому сложна для сравнительной аналитической оценки. Тем не менее по относительной стоимости изготовления объективы можно примерно расположить в следующий ряд (в порядке возрастания стоимости, при одинаковой величине $D_c \approx 200 \div 300$ мм): схема Ньютона, составной зеркальный, линзовый сферический, линзовый Френеля, составной линзовый асферический, линзовый асферический, схемы Максудова, Кассегрена, Манжена, камера Шмидта.

Заключение

Предложены обобщенные критерии оценки качества лидарных приемных объективов различных типов, проведен их сравнительный анализ и опреде-

лены предельные характеристики объективов. По компактности объективы разделены на три группы: 1) $L_{\min} \leq D_c$, 2) $L_{\min} = (2 \div 3)D_c$, 3) $L_{\min} \geq 3,5 D_c$. Представленные методика и диаграмма энергетических и габаритных характеристик позволяют проводить сравнение эффективности различных типов объективов при проектировании приемопередающих устройств лидаров.

1. Кауль Б.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 2. С. 211–215.
2. Абрамочкин А.И., Даничкин С.А., Тихомиров А.А. // Тезисы докладов V Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. II. Томск: ИОА СО АН СССР, 1978. С. 60–62.
3. Даничкин С.А., Самохвалов И.В. // ОМП. 1979. N 5. С. 5–8.
4. Тихомиров А.А. // Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980. С. 106–114.
5. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
6. Аришинов Ю.Ф., Бобровников С.М. // Региональный мониторинг атмосферы Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 112–130.
7. Аришинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Даничкин С.А. и др. // Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1975. С. 150–153.
8. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности / Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
10. Зуев В.Е., Зуев В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.
11. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 5. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 270 с.
12. Бородавко А.И., Воробей Н.П., Губский В.И. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 3. С. 109–115.
13. Кауль Б.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 4. С. 431–438.
14. Allen R.J., Evans W.E. // Rev. Sci. Instrum. 1972. V. 43. N 10. P. 1422–1432.
15. Балин Ю.С., Тихомиров А.А. // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 16–34.
16. Тихомиров А.А., Шаманаев В.С. // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 58–78.
17. Зуев В.Е., Балин Ю.С., Тихомиров А.А. // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. N 1–2. С. 16–25.
18. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974. 360 с.
19. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 510 с.
20. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. М.: Наука, 1971. 392 с.
21. Вычислительная оптика: Справочник / Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
22. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.
23. Дяченко И.В., Захаров Н.С. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 11. С. 1465–1470.
24. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972. 375 с.
25. Shimizu H., Kobayashi T., Inaba T. // 6-th Intern. Laser Radar Confer. Abstr. Sendai, Japan, 1974. P. 25–26.
26. Карпов В.Г., Курпин А.А., Натаровский С.Н. Расчет растровых оптических систем и оптических элементов Френеля: Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1986. 54 с.
27. Collis R.T.H. // Microwaves. 1969. N 3. P. 94–100.
28. Абрамочкин А.И., Балин Ю.С., Ваулин П.П. и др. // Измерительные приборы для исследования параметров приземных слоев атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1977. С. 5–16.
29. Аргунов П.П. // ОМП. 1965. N 6. С. 15–20.
30. Гаврилов Д.В. // ОМП. 1967. N 6. С. 55–68.
31. Матвиенко Г.Г., Аришинов Ю.Ф., Гришин А.И. и др. // Труды 11-го Симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО РАН, 1993. С. 130–136.
32. Кузилин Ю.Е., Синцов В.Н., Ситник Н.А. // Материалы Всесоюз. научн.-техн. конф. «Современная прикладная оптика и оптические приборы». Ч. 1. Л.: ЛИТМО. 1975. С. 3–6.
33. Современные телескопы / Под ред. Дж. Бербиджа и А. Хьюит. М.: Мир, 1984. 312 с.
34. Кучикян Л.М. Световоды. М.: Энергия, 1973. 176 с.
35. Gascoigne S.B. // J. Physics. 1970. Ser. E. V. E3. N 3. P. 165–172.

Институт оптического мониторинга СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
8 апреля 1998 г.

A.I. Abramochkin, A.A. Tikhomirov. Optimization of Lidar Receiving System. To Estimation of the Efficiency of Receiving Objectives of Various Types.

Various receiving objectives of a lidar are observed: lens (three types), reflecting (two types), three catadioptric lens objectives, and many-element compound one. A comparative analysis of the objectives is conducted over generalized qualitative criteria. The proposed procedure of the comparison as well as the power and clearance diagram allow one to choose an optimal objective over the introduced coefficient of relative efficiency or over minimal longitudinal size (at identical light diameters). It is shown that the most compact objectives are those which are based on Mangene sheme, Fresnel lens, and many-element compound ones (in the order of increasing clearance).