

Б.В. Кауль

**АНТЕННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ**

Приводятся параметры антенного комплекса станции высотного лазерного зондирования атмосферы ИОА СО РАН. Комплекс является составной частью большого многофункционального лидара, который в настоящее время находится в стадии развития. Главный элемент комплекса — параболическое зеркало диаметром 2205 мм. При проектировании комплекса помимо основной цели — увеличение потолка зондирования и скорости сбора информации — были приняты во внимание:

- многофункциональность, как возможность одновременной реализации методов, основанных на регистрации упругого рассеяния лазерного излучения нескольких частот, включая метод дифференциального поглощения, и методов, использующих комбинационное рассеяние света;
- работа в условиях повышенного фона светлых ночей летнего периода и фона, создаваемого источниками света в городе;
- сложные климатические условия зимнего периода.

В статье обсуждаются исходные предпосылки и меры, предпринятые для достижения вышеуказанных целей.

1. Введение

Исследования средней и верхней атмосферы методами лазерного зондирования требуют большого энергетического потенциала лидара. Этому интуитивно понятному термину можно придать вполне определенный количественный смысл на основе подхода, изложенного в [1, 2]. Согласно [2] величина $F(\rho)$, обратная времени, которое необходимо для получения сигнала с заданным отношением сигнал/шум ξ от слоя атмосферы протяженностью Δr , определяется формулой

$$F(\rho) = \rho \Delta r \xi^{-2} K_1 [1 + B_\lambda K_2 / \rho + K_3 / \rho]^{-1}, \quad (1)$$

где B_λ — спектральная яркость фона, а K_1, K_2, K_3 — обобщенные параметры лидара. Аргументом функции $F(\rho)$ является обобщенная характеристика атмосферной цели:

$$\rho(r) = \beta_\pi(r) T^2(r) / r^2, \quad (2)$$

где $\beta_\pi(r)$ — коэффициент обратного рассеяния; $T^2(r)$ — пропускание интервала трассы зондирования $[0, r]$.

Обобщенные параметры лидара выражаются через его технические характеристики следующими формулами:

$$K_1 = 2E f S \eta / h\nu (1 + \kappa^{-1}); \quad (3)$$

$$K_2 = \Omega \Delta \lambda / cE; \quad (4)$$

$$K_3 = h\nu n_T / c\eta ES (\kappa^2 + \kappa), \quad (5)$$

где c — скорость света; $h\nu$ — энергия кванта; E — энергия импульса лазера; f — частота повторения лазерных импульсов; S — площадь приемной антенны; η — общее пропускание оптических элементов лидара, включая потери на передающей антенне; κ — квантовая эффективность фотодетектора; Ω — телесный угол раскрытия приемной антенны; $\Delta \lambda$ — ширина пропускания спектрального селективного элемента; n_T — средняя частота темновых импульсов фотодетектора.

Энергетическим потенциалом лидара естественно назвать величину K_1 которая определяет $F(\rho)$ в отсутствие фона ($B_\lambda = 0$) и собственных шумов детектора ($n_T = 0$) при единичных параметрах цели ρ , пространственном разрешении Δr и отношении сигнал/шум ξ .

Таким образом, энергетический потенциал лидара характеризует частоту возобновления сведений о цели, ограниченную квантовыми флуктуациями оптического сигнала. Это принципиальный предел возможностей лидара. Степень приближения к этому пределу определяется условиями:

$$B_\lambda K_2 / \rho \ll 1; \quad K_3 / \rho \ll 1. \quad (6)$$

Приведенные формулы (1)–(6) дают наглядное представление о влиянии того или иного технического параметра на функциональные возможности лидара и удобны в использовании при проектировании лидаров. В частности, из беглого анализа формул (3)–(6) видно, что единственной технической характеристикой, влияющей сразу на все три обобщенных параметра, является энергия лазерного импульса E . Ее повышение увеличивает энергетический потенциал K_1 и уменьшает факторы внешнего K_2 и внутреннего K_3 шумов.

Увеличение площади приемной антенны — один из возможных путей повышения энергетического потенциала лидара. Но сразу заметим, что это далеко не самый оптимальный путь в части финансовых затрат. К тому же он ведет к росту веса и габаритов, непропорциональных достигаемому увеличению фактора K_1 . Вследствие отмеченных причин использование антенн большого диаметра может рассматриваться как приемлемое решение при отсутствии иных путей повышения энергетического потенциала. Ясно, что лидары с диаметром приемного зеркала более 1 м будут оставаться достаточно уникальными, и целесообразно позаботиться о том, чтобы с их помощью можно было решать несколько задач, то есть придать им свойство многофункциональности. Последнее важно с точки зрения комплексного применения методов лазерного зондирования для исследования взаимосвязей между значениями различных параметров не взаимодействия между компонентами атмосферы.

2. Оптическая схема и параметры антенного комплекса

При проектировании комплекса в качестве исходного параметра был задан диаметр зеркала, который определялся возможностями производства и составил 2,205 м. Остальные параметры явились результатом компромисса между финансовыми и производственными возможностями и необходимостью создать многофункциональный лидар с приемлемой устойчивостью к влиянию фоновых засветок и климатических воздействий.

Многофункциональность достигается применением оптической схемы, в основу которой положен принцип многолепестковой диаграммы направленности [3]. Оптическая схема представлена на рис. 1.

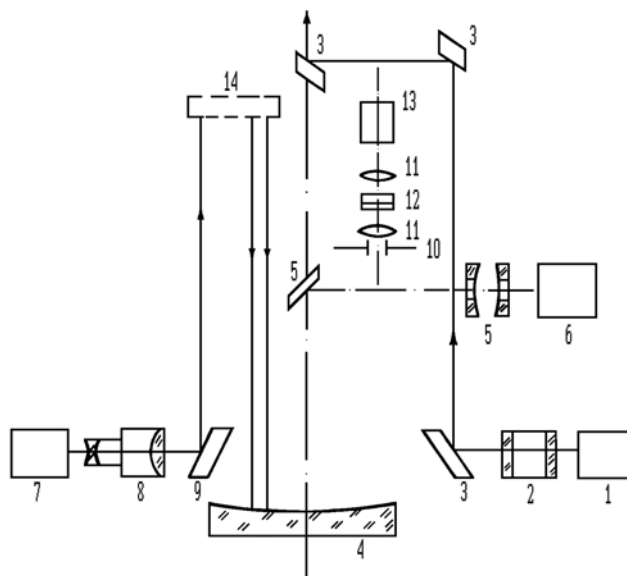


Рис. 1. Оптическая схема антенного комплекса: 1 — лазерный передатчик аксиального канала; 2 — герметизированный оптический ввод излучения в шахту антенного комплекса; 3 — отклоняющие зеркала; 4 — главное зеркало приемной антенны; 5 — отклоняющие и согласующие зеркала для освещения щели монохроматора; 6 — монохроматор; 7 — лазерный передатчик одного из шести возможных неаксиальных каналов; 8 — коллиматор излучения, выполняющий также функцию герметизированного оптического ввода излучения в шахту; 9 — отклоняющее зеркало; 10 — полевая диафрагма; 11 — линзы; 12 — интерференционный фильтр; 13 — фотодетектор; 14 — узел переброски излучения для юстировки неаксиальных каналов

Семилепестковая диаграмма направленности получается вследствие того, что в фокальной плоскости главного зеркала 4 на окружности, описанной вокруг главного фокуса, установлено шесть полевых диафрагм 10. Седьмой диафрагмой (диафрагмой аксиального канала) является щель монохроматора 6, излучение на которую направляется посредством системы зеркал 5. Излучение лазерного передатчика аксиального канала 1 системой зеркал 3 направляется вдоль главной оптической оси приемной антенны, а оси лазерных пучков передатчиков шести неаксиальных каналов 7 зеркалами 9 отклоняются в меридиональной плоскости главного зеркала на $0,5^\circ$ от его главной оптической оси. В соответствии с таким расположением диаграмм направленности передатчиков изображения бесконечно удаленных рассеивающих объемов атмосферы оказываются на окружности, где установлены диа-

фрагмы полей зрения приемников. Детекторы расположены непосредственно за фокальной плоскостью, что позволяет избежать потерь излучения и увеличить устойчивость к разъюстировкам за счет исключения «лишних» оптических элементов. Для обслуживания блока детекторов при наладочных и юстировочных работах в конструкции антенного комплекса предусмотрена выдвижная площадка для оператора. В выдвинутом положении она затеняет около 20% площади антенны. При обычной работе она убирается. Затенение антенны блоком детекторов составляет 4%. Для установки диаграммы направленности лазерного передатчика в направлении, соответствующем положению сопряженной с ним полевой диафрагмы, в оптической схеме предусмотрен узел переброски излучения 14. Узел выполнен в виде рейки, вращающейся вокруг оптической оси главного зеркала. Во время юстировки рейка устанавливается в меридиональной плоскости главного зеркала, проходящей через центр диафрагмы и центр апертуры лазера. Часть лазерного пучка перехватывается узлом 14, на входе которого формируются два луча, параллельных входящему пучку. Юстировка состоит в том, что изменением положения нормали зеркала 9 добиваются такого положения, когда пучки, отраженные от главного зеркала, перекрещиваются в центре диафрагмы 10.

Исходя из принятого принципа построения оптической схемы, выскажем некоторые соображения относительно требований, которые следует предъявить к параметрам главного зеркала.

Если исходить из формулы (4), то следует предъявлять максимально жесткие требования к качеству изготовления оптической поверхности. Этот подход содержит в себе потенциальную возможность осуществить очень узкие диаграммы направленности и тем самым добиться высокой пространственной селекции фона. Но несколько обстоятельств накладывают ограничения на реализацию этой возможности и требуют разумного компромисса.

Во-первых, поскольку оптическая схема предполагает использование внеосевых пучков, следует иметь в виду, что изображение рассеивающего объема будет искажено аберрациями. Во-вторых, для шести неаксиальных каналов при чрезмерно узких диаграммах направленности могут получиться неприемлемо большие теневые и переходные зоны. Но это затруднение можно преодолеть. Более существенно то, что высокие требования к качеству зеркала и реализация предельно узких диаграмм направленности значительно повышают стоимость как самого зеркала, так и механической конструкции, поскольку в этом случае следовало бы позаботиться о придании ей достаточной жесткости по отношению к температурным и прочим дрейфам.

При выборе кривизны поверхности зеркала мы стремились сохранить приемлемый размер аберрационного кружка размытия при разнесении диаграмм направленности, достаточном для размещения детекторов в прямом фокусе. Анализ аберраций показывает, что для параболического зеркала при небольших отклонениях от главного фокуса наибольшее действие оказывает кома. Размер максимального диаметра комы d_k определяется следующей формулой:

$$d_k = 3D^2L/16f^2,$$

где D — диаметр зеркала; f — фокусное расстояние; L — отклонение в фокальной плоскости изображения точечного источника от главного фокуса.

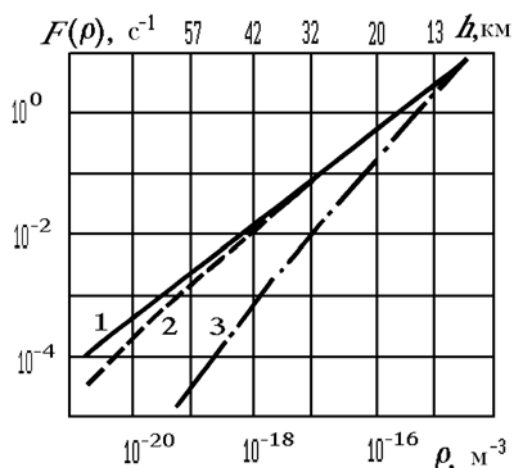


Рис. 2. Семейство характеристик лидача $F(\rho, B)$ при работе с лазером, у которого $E = 1$ Дж и $f = 1$ Гц. Обобщенные параметры лидача при этом имеют значения: $K_1 = 2,75 \cdot 10^{17} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $K_2 = 7,07 \cdot 10^{-19} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм} \cdot \text{м}^{-1}$; $K_3 = 2,31 \cdot 10^{-24} \text{ м}^{-3}$ при следующих технических параметрах антенного комплекса: $S = 3,6 \text{ м}^2$; $\eta = 0,3$; $\Omega = 2,12 \cdot 10^{-7} \text{ ср}$ ($\varphi = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$); $\Delta\lambda = 10^{-3} \text{ мкм}$, квантовой эффективности детектора $\kappa = 0,05$ и средней скорости поступления темновых импульсов 10^2 с^{-1} . Кривая 1 — $B_\lambda = 10^{-6}$; 2 — $B_\lambda = 10^{-3}$; 3 — $B_\lambda = 10^0 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср} \cdot \text{м}^{-2}$

Поскольку диаметр зеркала определен, а уменьшение размера L лимитируется размерами детекторов и сопутствующих им конструкций, остается один параметр f — увеличение которого минимизи-

рует кому, но его размер ограничивается вертикальными размерами шахты, в которой размещается антенный комплекс.

Исходя из вышеизложенных соображений, величина фокусного расстояния была задана 10 м, а реально изготовителем было выдано 10,07 м. Радиус окружности, на которой располагаются центры полевых диафрагм (размер L), составил 87,5 мм. Соответственно максимальный диаметр комы равен 0,75 мм, что было сочтено приемлемым. Поэтому изготовителю зеркала не ставилась задача получить кружок размытия изображения точечного источника менее 750 мкм, что существенно сократило и удешевило процесс полировки. Реальный кружок размытия получился около 500 мкм. Таким образом, предельные ширины диаграмм направленности, обусловленные аберрациями, составляют $5 \cdot 10^{-5}$ рад для аксиального и $7,5 \cdot 10^{-5}$ рад для неаксиальных каналов.

Реально используемые в настоящее время минимальные ширины диаграмм направленности почти на порядок больше и составляют $3 \cdot 10^{-4}$ рад. Это позволяет обходиться без специальных мер по стабилизации взаимного положения диаграмм приемников и передатчиков при суточных колебаниях температуры. Но возможность существенного выигрыша в пространственной селекции фона за счет более узких диаграмм направленности остается. На будущее планируются меры по реализации этой возможности.

Как было отмечено выше, пригодность лидара для решения той или иной задачи можно характеризовать функцией $F(\rho)$, описываемой формулой (1). Для иллюстрации возможностей создаваемого лидара на рис. 2 приведена эта характеристика, рассчитанная в предположении, что энергия импульса лазера равна 1 Дж, а частота повторения 1 Гц. Остальные технические параметры взяты близкими к тем, которые в настоящее время реализованы или могут быть реализованы на том или ином канале. Их значения приведены в подрисуночной подписи. При расчете приведенной на рис. 2 функции отношение сигнал/шум взято $\xi = 100$, а пространственное разрешение $\Delta r = 100$ м. При иных значениях этих параметров приведенные на графике значения $F(\rho)$ следует умножить на коэффициент $\kappa = 10^{2\xi - 2} \Delta r$.

В верхней части рис. 2 для наглядности приведена шкала высот, соответствующая значениям обобщенного параметра цели ρ , когда, в качестве таковой выступает стандартная молекулярная атмосфера. Как можно видеть из рисунка, рэлеевское рассеяние с высоты 70 км можно регистрировать с отношением сигнал/шум = 100 и пространственным разрешением 100 м, если время накопления составляет $2 \cdot 10$ с. При увеличении интервала интегрирования от 100 м до 1 км время сокращается до 200 с, что вполне приемлемо. Для зондирования высот до 100 км с тем же отношением сигнал/шум нужно примерно на порядок повысить среднюю мощность лазера. Если ограничиться отношением сигнал/шум = 10 и пространственным разрешением 1 км, то эти высоты достижимы и при энергетике лазера, взятой в расчете, то есть $E = 1$ Дж, $f = 1$ Гц. Как можно видеть, влияние фона на уровне 10^{-3} Вт/мкм \cdot м 2 \cdot ср, что соответствует примерно лунной ночи, не очень значительно (кривая 2). Влияние фона на уровне 1 Вт/мкм \cdot м 2 \cdot ср (кривая 3), что примерно соответствует яркости фона в предвосходное и послезаходное время, таково, что время накопления увеличивается на порядок, если высота зондирования составляет 40 км. Причем оно остается в приемлемых пределах. Конечно, нужно помнить, что при зондировании в светлое время должен быть использован детектор, который способен работать при большом уровне засветок.

3. Геометрический фактор антенного комплекса

Следствием большой апертуры приемного зеркала и значительного фокусного расстояния является существование протяженных теневых и переходных зон, в которых первоначально происходит нарастание сигнала, а затем убывание, непропорциональное квадрату расстояния. Теневая зона аксиального канала возникает из-за экранирования однократно рассеянного излучения блоком детекторов. Ее протяженность при ширинах диаграмм приемника и передатчика соответственно $3 \cdot 10^{-4}$ и $1,5 \cdot 10^{-4}$ рад и начальном диаметре лазерного пучка 0,15 м составляет около 550 м. Следующая за теневой переходная зона обусловлена виньетированием полевой диафрагмой лучей, падающих на зеркало под углом $\psi > d/2f$, где d — диаметр диафрагмы, а также виньетированием вследствие перемещения изображения рассеивающего объема вдоль оптической оси из фокальной плоскости пространства по направлению к фокусу. При фокусном расстоянии 10 м это смещение имеет заметную величину (около 1 мм) при удалении рассеивающего объема на 100 км. При удалении на 1 км смещение изображения за фокальную плоскость составит около 100 мм. Виньетирование будет отсутствовать при выполнении условия

$$f(\varphi + D/r) < d,$$

где f — фокусное расстояние; φ — угол расходимости лазерного пучка; D — диаметр зеркала; r — удаление рассеивающего объема; d — диаметр диафрагмы. При диаметре диафрагмы 3 мм и $\varphi = 1,5 \cdot 10^{-4}$ рад условие начинает выполняться для $r = 15$ км и выше. Смещение диафрагмы за фокальную плоскость позволяет уменьшить протяженность переходной зоны. Этот эффект демонстрируется на рис. 3, где приведены геометрические факторы аксиального канала при диафрагме, помещенной в фокальной плоскости и смещенной на 10 мм за фокальную плоскость. Заметим, что геометрический фактор $G(r)$ определяется как отношение

$$G(r) = \omega'(r) / \omega(r),$$

где $\omega'(r)$ — эффективный телесный угол; $\omega(r) = \pi D^2 / 4r^2$.

Расчет проведен с использованием предположения о равномерном распределении энергии по сечению лазерного пучка. Поэтому реальный геометрический фактор будет несколько отличаться от приведенного.

Для неаксиальных диаграмм теневые и переходные зоны обуславливаются радиальным и осевым перемещением изображения рассеивающего объема по мере его движения вдоль трассы. При тех же ширинах диаграмм направленности приемника и передатчика ($\psi = 3,0 \cdot 10^{-4}$, $\varphi = 1,5 \cdot 10^{-4}$) теневая зона оканчивается на удалении 5,3 км, а переходная на 16 км.

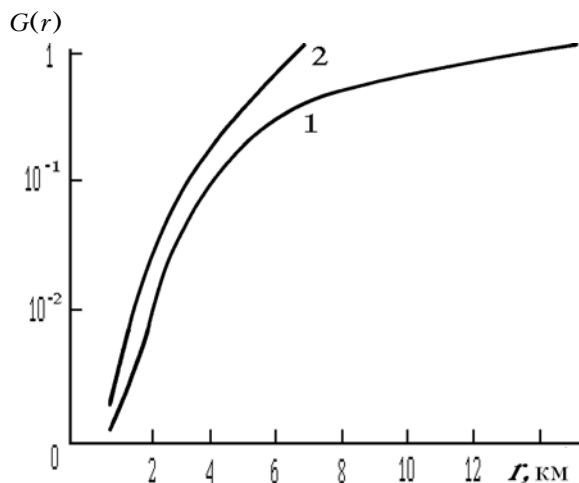


Рис. 3. Геометрическая функция аксиального канала: 1 — диафрагма помещена в фокальной плоскости; 2 — диафрагма смещена вдоль оси на 10 мм в зафокальное пространство

Столь протяженные теневые и переходные зоны имеют как положительный, так и отрицательный аспекты. Недостаток заключается в том, что значение геометрического фактора в переходной зоне трудно контролировать. Если даже его удастся рассчитать или измерить, то небольшие разъюстировки резонатора лазера, влекущие за собой изменение распределения энергии по сечению пучка, или малые смещения взаимного расположения диаграмм направленности приемника и передатчика, могут существенно повлиять на вид функции $G(r)$. По этой причине на высотах, соответствующих переходной зоне, возникают затруднения, если интерпретация результатов требует прямого решения уравнения лазерного зондирования. Это затруднение снимается, когда реализуются методы дифференциального поглощения и СКР, поскольку они используют отношение двух сигналов. В этом случае на первый план выступает преимущество длиннофокусной системы с протяженной переходной зоной. Оно заключается в уменьшении динамического диапазона сигнала и исключении мощных засветок детекторов. Положительным моментом является отмеченная выше возможность управления геометрической функцией путем осевого смещения диафрагмы. Поскольку аксиальный канал проектировался для исследования тропосферы методом СКР, полученные характеристики переходной зоны близки к оптимальным. Неаксиальные каналы предполагается использовать для зондирования озона на высотах 20—50 км, многочастотного зондирования аэрозолей, определения температуры и плотности воздуха на высотах до 80÷100 км. Для исключения влияния мощных засветок от нижерасположенных слоев предполагается использование электромеханической отсечки до высот 15÷20 км. Поэтому протяженные теневые и переходные зоны неаксиальных каналов не имеют принципиального значения.

4. Особенности конструкции

Расположение станции высотного зондирования в районе с суровыми зимами учтено в конструкции антенного комплекса и здания, в котором он располагается. Оптические элементы передающих антенн, блока детекторов и юстировочных приспособлений объединены металлической фермой, опирающейся на бетонный моноблок, который служит основанием для каретки главного зеркала. Моноблок опирается на песчано-гравийную подушку и полностью развязан от элементов конструкции здания. Вся конструкция размещается в шахте 6×6 м, которая хорошо термоизолирована от окружающих отапливаемых помещений и соединена с ними герметизированными тамбурными входами. Расположение шахты внутри отапливаемого здания и термоизоляция верхней части бетонного моноблока гарантируют фундамент антенного комплекса от подвижек, связанных с промерзанием грунта.

Для выравнивания температуры в шахте с температурой наружного воздуха, она оборудована принудительным наддувом. Главное зеркало изготовлено из ситала марки СО 115М, обладающего малым коэффициентом теплового расширения. Зеркало опирается на 18 опор системы Лассела, кото-

рая помимо основной функции — разгрузки зеркала — позволяет компенсировать разность температурного расширения зеркала и оправы. Лазерные передатчики, аппаратура регистрации сигналов и прочая вспомогательная аппаратура находятся за пределами шахты в отапливаемых помещениях. Лазерное излучение вводится в шахту либо через герметизированные оптические люки 2 (см. оптическую схему), либо через коллиматоры 6, которые вставлены в герметизированные люки в стене шахты. В коллиматорах и оптических люках предусмотрены подогрев и осушка воздуха для предотвращения запотевания оптических поверхностей.

5. Заключение

Опытная эксплуатация антенного комплекса показала, что принятых мер достаточно для обеспечения его работоспособности. К настоящему времени созданы и испытаны каналы для зондирования плотности воздуха и аэрозольной стратификации на длинах волн 532 и 694 нм. Реализован канал для зондирования профилей температуры по вращательному спектру комбинационного рассеяния. Продолжаются работы по расширению функциональных возможностей лидара и совершенствованию его систем.

Автор считает приятной обязанностью отметить, что строительство описанного выше комплекса, как составной части Станции лазерного зондирования атмосферы, осуществлялось по инициативе академика В.Е. Зуева при его оперативном руководстве и содействии. Разработка проведена в СКБ НП «Оптика» СО РАН и большинство технических решений принадлежит его сотрудникам Н.А. Агапову, С.А. Даничкину, И.Г. Половцеву, Э.Б. Цхаю и другим.

Работа по созданию на базе антенного комплекса многофункционального лидара и его опытная эксплуатация проведены коллективом лаборатории высотного зондирования атмосферы.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 185 с.
2. Кауль Б.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 2. С. 211—215.
3. А. с. № 1345861 СССР МКИ G01W1/00. Кауль Б.В. Многоволновой лидар для зондирования атмосферы.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
17 декабря 1991 г.

B. V. Kaul. An Antenna Complex for Laser Sounding of the Upper Atmospheric Layers.

Parameters of the antenna complex of the station for high-altitude laser sounding of the atmosphere constructed at the Institute of atmospheric optics, SB of the USSR Academy of Sciences, Tomsk, are described. The complex is a part of a big multifunctional lidar, which is being under development now as the principal instrument of the station. The main element of the antenna complex is a parabolic mirror with the diameter of 2205 mm. In addition to obvious goals of increasing the range of sounding and the rate of successive soundings, the development of this complex was initially aimed at providing the following proper ties of the lidar:

- multifunctionality, i. e., the possibility of performing measurements of the elastic scattering at several wavelengths simultaneously based on the use of different lidar techniques, including DIAL method, as well as the possibility of making Raman-lidar measurements of some atmospheric parameters.
- capability of operation under the conditions of enhanced background noise from the sky during short nights of summer period as well as of the background from a city located nearby.
- capability of operation under severe climatic conditions of Siberian winters.

The premisses and measures undertaken to reach the above mentioned goals are discussed in the paper.