

ЛИДАРЫ

Новые возможности
для атмосферных исследований

Т. Корнеева

Сегодня для исследований атмосферы Земли, ее газового состава, перемещения воздушных масс применяются все новые и новые технологии. Одна из них - лидары наземного, воздушного, космического базирования. Опыт западных стран свидетельствует об успешном использовании этой не так давно сугубо военной технологии в задачах экологического мониторинга, управления воздушным движением и т.п. Отметим, что для России проблемы применения лидаров в мирных целях не менее актуальны...

В 60—70-е годы лидары, — лазерные локаторы, работающие в видимом или ближнем ИК-диапазонах волн, — в основном использовались в военной технике. Сегодня они с успехом применяются для решения многих задач, например для мониторинга состояния атмосферы, измерения скорости ветра и т.п. Установленные в районах аэропортов, лидары измеряют ветровые сдвиги на летном поле, завихренность следа самолета и другие атмосферные параметры, знать которые необходимо для обеспечения безопасности взлета и посадки. Хорошие результаты дает применение таких систем для измерения дальности, доплеровской скорости и при формировании изображений объектов, находящихся на летном поле.

Так, один из лидаров, выпущенных германской фирмой DLR, установлен в аэропорту Франкфурта между двумя взлетно-посадочными полосами, расположенными близко друг к другу. Он измеряет скорость воздушных вихревых следов от двигателей самолета, приближающегося к одной посадочной полосе, а также перемещения воздуха над другой полосой, вызванного его приближением. Такая информация использовалась службой управления воздушным движением для обеспечения безопасной посадки самолетов по двум полосам.

По всей территории Англии установлен компактный робастный лазерный измеритель доплеровской скорости с коническим сканированием, разработанный британской фирмой DRA Malvern. Информация о скорости ветра, получаемая с помощью этих устройств, существенно дополняет данные метеозондов.

В 1994—1995 годах в аэропорту Хитроу (Лондон) проходил испытания ла-

зерный измеритель скорости. В числе прочих задач он должен был определять вихревые следы от двигателя самолета и их распространение ветром по летному полю на высоте 30—150 метров. Интересно отметить, что в ходе испытаний был обнаружен неожиданный эффект — возвращение воздушного вихря почти с исходной мощностью в область глиссады примерно через 70 секунд после прохода самолета.

Импульсный когерентный лидар на углекислом газе французской фирмы Laboratoire de Meteorologie Dynamique (LMD) применяется для измерения параметров атмосферы и скорости ветра. Дальность действия прибора в горизонтальном направлении — около 12 километров, в вертикальном — вплоть до тропопаузы. Основной аппаратуры лидара служит импульсный CO₂-лазер с поперечной накачкой, одномодовым излучением и длиной волны 10,6 мкм. Для расширения луча используется 17-см телескоп Кассегрена со смещенной осью. Управление лучом осуществляется с помощью двухзеркального сканера. Отраженный сигнал собирается тем же телескопом и преобразуется гетеродином. Сдвиг частоты составляет 30 МГц. Принимаемый сигнал оцифровывается восьмиразрядным осциллографом с частотой выборки 100 МГц. Для хранения данных используется компьютер.

Высокую точность при измерении малых доплеровских сдвигов частоты обеспечивает разработанный в Лаборатории атмосферных исследований НАСА доплеровский лидар, использующий краевой эффект. В устройстве частота излучения лазера выбирается на границе полосы пропускания оптического фильтра с высоким спектральным разрешением. При этом не-

большие сдвиги частоты значительно изменяют амплитуду измеряемого сигнала. Доплеровские смещения частоты сигнала, вызванные ветровыми перемещениями, определяются по разности частоты излучения и частоты принимаемого сигнала, отраженного от атмосферы. В лидаре использован импульсный твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом (Nd:YAG-лазер). Длина волны излучения — 1064 нм, длительность импульса — 15 нс, ширина полосы — 40 МГц. Отраженные сигналы собираются телескопом диаметром 0,4 м с полем зрения 0,2 мрад. Сканирующая оптика позволяет направлять луч в секторе от 30 до 120° по углу места и от 0 до 360° — по азимуту. Лидарная установка прошла натурные испытания, в ходе которых измерялись ветровые сдвиги на высотах от 200 до 2000 метров. Интервал измерений по вертикали составлял 22—26 метров. Результаты измерений скорости ветра сопоставлялись с данными метеозондов. Расхождение не превысило 1 м/с, а разброс результатов при 10 измерениях оказался менее 0,4 м/с. Специалисты Лаборатории атмосферных исследований отмечают, что столь высокая точность измерений предоставляет уникальные возможности для изучения турбулентных процессов в нижних слоях атмосферы. Помимо научных исследований прибор можно с успехом применять для высокоточных измерений ветровых сдвигов и микротурбулентностей в районе аэропортов.

В последние годы растет интерес ученых к изучению газового состава атмосферы Земли. Их внимание особенно привлекает озон как наиболее важный химически активный газ. Озон, находящийся в стратосфере, защищает

устойчивых к
того опасного
бной подавлять
по тончайшему
ерны, которые
я, но и очагом
ное облучение
том числе и
тики. Диаметр
руководитель
ции лазерных
ером на длине
эффективная,
лабораторный
актерий были
от — Геннадий
относительно
0 тыс. долл.
ва.

медицина
духе

иджест

медицинских
популярность в
специалистов
влияют мощная,
дствие, легкая
возможность
фейс.

о-медицинская
астера (Париж,
я медицинская
ский институт
т акушерства и
им. акад. Н.Н.
льный кожно-

Министерстве

Собств. инф.

ктор
о-
фонных
ратов
больниц

ОВОСТИ

биосферу Земли от вредного влияния ультрафиолетового излучения Солнца. В то же время большие концентрации озона в тропосфере способствуют развитию парникового эффекта и образованию фотохимического смога, что отрицательно воздействует на животный и растительный мир планеты, а также на здоровье людей. Как показывают наблюдения, с начала 70-х годов каждые 10 лет концентрация озона в тропосфере увеличивается примерно на 10% и на столько же снижается в нижних слоях стратосферы. Это говорит о крайней важности тщательного исследования данных процессов.

Высокую точность измерения концентрации озона в тропосфере обеспечивают лидары дифференциального поглощения — наземные или размещаемые на самолетах. Они зондируют пространство с помощью двух лучей на разных частотах, по-разному поглощаемых озоном. Концентрацию озона в пространстве вычисляют по разнице амплитуд двух разнесенных по времени отраженных сигналов, которые собираются одним или несколькими телескопами. В таких лидарах особенно важно правильно выбрать частоты излучения, которые, кроме различного поглощения в озоне, должны иметь минимальное молекулярное и партикулярное поглощение.

Наземный лидар дифференциального поглощения с диапазоном сканирования частоты излучения лазера от 286 до 292 нм создан специалистами Национальной лаборатории океанических и атмосферных исследований и Института изучения окружающей среды (США, шт. Колорадо). Поскольку на характеристики излучения влияет состояние атмосферы, в частности облачность, лидар установили на высоте 2,7 километра над уровнем моря. В состав установки включены два идентичных лазера на красителе, накачка производится от Nd:YAG-лазера. Лазеры возбуждаются последовательно с интервалом 400 мкс. Сигналы детектируются двумя автономными системами, оптимизированными для приема сигналов с разных высот, и после обработки в специальных фильтрах поступают на фотоэлектронные умножители. Во время испытаний лидар работал непрерывно более суток, при этом отклонение длины волны излучения не превысило 0,01 нм. Исследования проводились на высотах от четырех кило-

метров над уровнем моря до уровня нижней стратосферы (примерно 12 километров). Шаг измерений по высоте составлял менее километра. Точность определения концентрации озона в тропосфере при ясной погоде для данной установки оказалась не хуже 10%. Лидар находится в эксплуатации с 1993 года.

В последнее время лидарные установки все чаще устанавливают на самолетах для обнаружения ветровых потоков и измерения их скорости, определения истинной воздушной скорости летательного аппарата и других параметров. Кроме того, бортовые лидары используют в системах отслеживания рельефа местности и предупреждения о препятствиях. Одной из первых лазерных систем самолетного базирования стала система измерения истинной воздушной скорости LATAS (Laser True Airspeed System) производства английской фирмы Royal Signals and Radar Establishment (RSRE). В модернизированном варианте эта система применяется и сегодня. LATAS размещается в носовой части самолета. В ее состав входит лазер на углекислом газе с выходной мощностью 4 Вт, поляризационная оптика на четверть- и полуволновых пластинах, а также детектор на теллуриде кадмия и ртути с полосой 100 МГц. Для измерения воздушной скорости лидар фокусируют на расстояние 30—100 м перед носовой частью самолета, для измерения ветрового сдвига — на 250—300 м. Точность измерения скорости — 0,2 м/с.

На многих воздушных судах, в частности на транспортных самолетах "Каравелла", истребителях "Мираж", вертолетах "Пума", установлен доплеровский лидар Crouzet производства французской фирмы Crouzet SA. В его основе — CO₂-лазер, излучающий непрерывный сигнал с выходной мощностью 3 Вт, диодный детектор с шириной полосы 200 МГц, выполненный на теллуриде кадмия и ртути, поляризационная волновая пластина и пластина Брюстера. Частота гетеродина задается при двойном прохождении луча через ячейку Брэгга. В системе использован телескоп Далла-Кирхама с эффективной апертурой 7,5 см. Принимаемые сигналы обрабатываются спектр-анализатором на ПАВ. Интервал измерения доплеровских скоростей составляет -25...+400 м/с, а дальность измерения — 10—100 м. Общий вес системы Crouzet — около 250 кг.

По заказу правительств Франции и Великобритании консорциум фирм Dassault Electronique (Франция) и GEC Marconi (Великобритания) разрабатывает когерентный лазерный авиационный локатор CLARA (Coherent Laser Airborn Radar), работающий в диапазоне 10 мкм. Система предназначена для предупреждения о препятствиях, отслеживания рельефа местности, а также измерения воздушной скорости самолета и наведения на цель. Аппаратура, включающая CO₂-лазер, сканер, процессор обработки сигналов и данных, размещается в контейнере под фюзеляжем. Обнаружение, классификация и отображение объектов производятся в реальном времени. Система CLARA проходила испытания на борту самолетов A6-E, HS748 и "Торнадо".

Доплеровский лидар для измерения скорости ветра WIND (Wind Infrared Doppler Lidar) разрабатывают французские фирмы CNRS и CNES и в сотрудничестве с германской DLR. В основе системы — лазер на углекислом газе с поперечной накачкой, формирующий одномодовое излучение. Лазер имеет выходную согласующую оптику с Гауссовой отражательной способностью, что позволяет выделить полезный сигнал на фоне поперечных мод высокого порядка, а также на фоне эхо-сигналов от целей с большой отражательной способностью. В системе использован телескоп Далла-Кирхама со смещенной осью (диаметр свободной апертуры — 20 см, коэффициент расширения апертуры — 15). Фокусное расстояние регулируется от 200 м

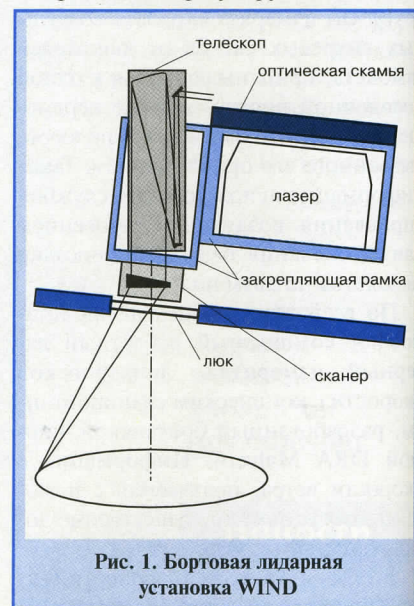


Рис. 1. Бортовая лидарная установка WIND

ств Франции и сорциум фирм (Франция) и Британия) разный лазерный CLARA (Coherent), работающий система предна- ждения о пре- ия рельефа ме- рения воздуш- а и наведения , включающая процессор обра- зных, размещает- юзеляжем. Об- ация и отобра- зводятся в ре- система CLARA на борту само- Горнадо”.

для измерения (Wind Infrared атьвают фран- и CNES и в со- кой DLR. В ос- на углекислом нкой, формиру- лчение. Лазер сующую оптику сной способно- выделить полез- оперечных мод также на фоне с большой отра- гью. В системе Дала-Кирхама диаметр свобод- , коэффициент — 15). Фокус- руется от 200 м



до предельного значения. Летные испытания лидара проходили на борту самолета Falcon 20 (рис. 1). Во время испытаний производилось коническое сканирование в секторе 30° от надира. Период сканирования — 20 или 30 сек, частота повторения импульсов лазера — 4 или 10 Гц. Хорошие характеристики были получены при средней энергии излучения 360 мДж и частоте повторения 4 Гц.

Успешно прошла испытания бортовая лидарная установка, разработанная специалистами Лаборатории им. братьев Райт ВВС США. Система предназначена для трехмерного измерения распределения скорости ветра по высоте (ветрового профиля) в реальном времени. Такие сведения важны для повышения точности десантирования и сбрасывания груза с самолета, увеличения вероятности поражения цели при ракетных и артиллерийских стрельбах. Сигнал, излучаемый лазером, отражается от перемещающихся по ветру частиц пыли и воздушных аэрозолей. Скорость ветра определяется путем измерения доплеровских сдвигов сигналов, отраженных от этих частиц. Сканирование лазерного луча — коническое, что позволяет производить измерения в различных направлениях. Размещение лидара в грузовом отсеке самолета показано на рис. 2. Измерение ветрового профиля с помощью этой системы позволило повысить точность приземления при десантировании в 2—10 раз.

Широкие возможности для изучения атмосферы Земли, проведения различных метеорологических и климатологических исследований открывают лидары космического базирования. Больших успехов в этой области достигли специалисты исследовательского центра Longley (НАСА). Они создали немало наземных и авиационных лидарных систем для изучения атмосферных аэрозолей и водяных паров, облаков, озоновых дыр. В частности, в рамках программы LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) разработана первая в мире лидарная установка для изучения Земли из космоса. С помощью установки LITE изучалась структура облаков, процессы образования облачности, находящиеся в атмосфере аэрозоли, в том числе антропогенного происхождения, определялась высота



Рис. 2. Бортовая лидарная установка для измерения ветрового профиля

приземного слоя атмосферы, измерялось горизонтальное распределение температуры и плотности воздушных слоев на высотах от 25 до 40 км, анализировались процессы отражения лазерного излучения от земной и морской поверхностей.

LITE имеет традиционную конструкцию лидара прямого обнаружения: передающий лазерный блок, блок оптической юстировки и приемный блок. Передатчиком служит Nd:YAG-лазер с накачкой лампой-вспышкой. Для резервирования в передающем блоке установлены два идентичных квантовых генератора, из которых в рабочем состоянии находится только один. Передатчик одновременно формирует гармоники излучения с длиной волны 1064, 532 и 355 нм. Излучаемая мощность на этих частотах составляет 470, 560 и 160 мДж, соответственно. Блок оптической юстировки содержит поворотную призму для поддержания оптической центровки выходного лазерного луча и угла зрения приемника. В составе приемного блока — телескоп диаметром 1 м, оптические устройства передачи сигнала и электронные устройства предварительной обработки. Для разделения принимаемого сигнала на три частотные составляющие используется дихроичный расщепитель. В каналах обработки сигналов длин волн 532 и 355 нм установлен ударопрочный фотоэлектронный умножитель, для сигналов 1064-нм диапазона используется кремниевый лавинный фотодиод. В устройстве предусмотрены также узкополосные интерференционные фильтры и апертурный диск, которые служат для реконфигурации приборов при работе в

дневное и ночное время. Размер дневной апертуры составляет 1,1 мрад, ночной — 3,5 мрад. После прохождения фотоприемников и фильтров сигналы поступают в электронный усилитель и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Ширина полосы усилителя — 2,1 МГц. АЦП — 12-разрядный, с тактовой частотой 10 МГц. Период стробирования данных — 550 мкс. Электронные устройства обработки включают также резисторную схему, установленную после первого каскада усиления. Схема обеспечивает подавление сигнала в пределах 0—63 дБ. Благодаря этому сильный сигнал, отраженный от плотных облаков или поверхности Земли, не выходит за рамки динамического диапазона 12-разрядных АЦП. Основные вычислительные операции производит быстродействующий сигнальный процессор. Масса аппаратуры составляет 990 кг. Потребляемая мощность в рабочем состоянии — 3,1 кВт, в резервном — 560 Вт. Мощность излучения лазера и расходимость луча выбираются таким образом, чтобы интенсивность лазерного пучка на поверхности Земли была значительно ниже принятых санитарных норм.

Собранные космическим лидаром LITE данные передавались на Землю двумя потоками: с низкой (~20,8 кбит/с) и высокой (~2 Мбит/с) скоростью передачи. Первый поток транслировался через систему связи S-диапазона, второй — через систему телеметрической связи.

По мнению специалистов, испытания лидаров LITE в космических условиях прошли успешно. В ходе эксперимента собран большой объем высокоточной информации, на основании которой сформирована общедоступная база данных о состоянии атмосферы. Эксперимент подтвердил возможность применения лидаров в длительных орбитальных полетах. Ожидается, что новые разработки лазеров с диодной накачкой позволят снизить потребляемую мощность, что даст возможность устанавливать лидары на небольших спутниках.

Applied Optics, 1997, v.36, N12, p. 2568—2583;
N24, p. 5976—5983
Proceedings of the IEEE, 1996, v.84, N2, p. 164—179;205—222
Aviation Week & Space Technology, 1996, v.144, N7, p.44