

В.М. Дубягин, Н.А. Шефер

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ

Описываются тенденции развития экологических лидаров. Обосновывается необходимость разработки газоаэрозольного мобильного УФ-лидара, предназначенного для зондирования источников загрязнений. Обсуждаются проблемы, возникающие при создании такого лидара. Приводится оригинальная методика решения проблемы пропусканий и рассматриваются некоторые аспекты этой проблемы при использовании 4-й гармоники АИГ-неодимового лазера.

Введение

По мере расширения индустриальной деятельности экологический контроль загрязнений атмосферы становится все более актуальным [1]. Одним из эффективных приборов, работающих в сети экологических станций, может стать лидар.

Основными загрязнителями атмосферы, как известно [2], являются пыль, аэрозоль, газовые выделения. Их основная масса расположена в приземном слое атмосферы и, более того, вблизи от источников выбросов. Поэтому важнейшим первоочередным этапом полного контроля загрязнений является зондирование газоаэрозольных выделений источников — труб предприятий, карьеров, автодорог и так далее.

Тенденции развития экологических лидаров

За время своего существования лидары постоянно совершенствовались с целью более полного удовлетворения требований практических приложений, в том числе — экологического [3, 4]. Появился класс лидаров упругого рассеяния (УР), способных зондировать пылевую и аэрозольную фракции [5]. Обычно эти лидары изготавливались [6] в стационарном варианте и дальность их действия достигала нескольких километров. Для зондирования газовых загрязнителей параллельно развивались два направления, основанные на использовании явлений резонансного поглощения и комбинационного рассеяния (КР) [7, 8]. Успешное развитие первого направления привело к созданию класса трассовых газоанализаторов [9], определяющих среднюю концентрацию зондируемого газа на трассе от лазера до отражателя, и класса лидаров дифференциального поглощения или DIAL-лидаров [10], обладающих пространственным разрешением. Лидары дифференциального поглощения, как правило, предназначались для зондирования на дальности в сотни метров или единиц километров только одного газового загрязнителя. Конечно, при использовании перестраиваемых лазеров эти лидары способны зондировать и несколько загрязнителей, но стоимость такой аппаратуры высока [11].

Эффект КР первоначально использовался при создании лидаров спонтанного комбинационного рассеяния (СКР). Эти лидары оказались эффективными на дальности в десятки и сотни метров, и то — только при зондировании сильно загрязненных объемов [12]. Однако они позволяли контролировать сразу несколько загрязнителей. Сейчас ведутся разработки по созданию лидаров резонансного комбинационного рассеяния (РКР) [13], которые, как ожидается, будут иметь большую дальность действия, но позволят зондировать, как правило, только один газовый компонент. Еще один класс лидаров, предназначенный для зондирования газовых загрязнителей и использующий явление резонансной флуоресценции, нашел весьма ограниченное применение на приземных трассах из-за низкой эффективности [14].

Все перечисленные лидары имеют те или иные недостатки, не позволяющие оперативно комплексно контролировать многочисленные широко разбросанные источники выбросов. Поэтому назрела необходимость создания нового класса лидаров — мобильных, недорогих, способных с расстояния в сотни метров в любом направлении в любое время суток эффективно зондировать одновременно индустриальный аэрозоль и несколько газовых загрязнителей.

Комплексный газоаэрозольный лидар наиболее просто реализовать, объединив в одной аппаратуре функции лидара УР и лидара СКР. Тогда в передающей аппаратуре достаточно иметь любой лазер с одной произвольной длиной волны, а в приемной — спектральный прибор типа тройного монохроматора с набором фильтров, ослабителей и детекторов, позволяющих вести регистрацию в счетнофотонном режиме [12] КР-сигналов и сигнала УР. Размещение такого лидара на шасси автомобиля и обеспечение его системой сканирования, как показала практика [15], не вызывает особых затруднений. Для работы лидара в любое время суток необходимо использовать лазер с длиной волны в диапазоне от 250 до 280 нм [8]. В настоящее время, вследствие своей надежности, простоты, малой стоимости, наибольшее распространение получил твердотельный АИГ-неодимовый лазер с преоб-

разованием в 4-ю гармонику (266 нм) [3, 4, 7], хотя возможно применение и эксимерного лазера или лазера на красителях [8].

Чтобы обеспечить высокую эффективность работы предлагаемого комплексного экологического лидара, необходимо решить некоторые проблемы.

Проблемы комплексного лазерного экологического зондирования

Обычно [3] при определении счетной концентрации зондируемого газа в качестве репера служит атмосферный азот. При этом предполагается, что его концентрация точно известна и равна фоновой. Однако на выходе источников выбросов, как правило, мы имеем дело с высокотемпературной агрессивной средой [1]. Для таких сред концентрация азота должна определяться [16] с учетом измеренных непосредственно во время сеанса зондирования давления и температуры в среде и химических реакций типа $N_2O + O \rightarrow N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$.

Применение УФ-лазера приводит к сужению диапазона длин волн СКР газов среды, расположению этого диапазона вблизи от зондирующей длины волны и на границе спектральной чувствительности известных типов ФЭУ [17]. Все это налагает определенные требования на характеристики используемых спектральных приборов и ФЭУ. Этим требованиям удовлетворяют тройной монохроматор [18], имеющий коэффициент подавления на несмещенной длине волны $\sim 10^{12}$, пропускание на длинах волн СКР $\sim 4\%$, линейную дисперсию $0,25 \div 0,75$ нм/мм, ширину выделяемой полосы ~ 20 см⁻¹ и ФЭУ-106 [17], обладающий квантовой эффективностью $\sim 0,3$ в области > 160 нм, коэффициентом усиления $\sim 10^7$, интенсивностью темпового тока $20 \div 100$ Гц.

Количественные измерения концентраций загрязняющих газов требуют знания сечений КР этих газов. Хотя относительные сечения СКР уже измерены [4] для многих газов, однако их использование в случае УФ-возбуждения требует осторожности. Дело в том, что ряд газов, например O_2 , O_3 , NO_2 , SO_2 , C_6H_6 , HNO_3 , H_2O_2 , N_2O_5 и другие, имеют линии или полосы поглощения в УФ-диапазоне и для них наблюдается РКР, сечение которого может на порядки превосходить сечение СКР [7]. Так, резонансное увеличение сечения при возбуждении на 266 нм равно 1,95 для O_2 и 150 для C_6H_6 . В настоящее время существует (обзор дан в [7]) несколько полумпирических методик, позволяющих оценить величины сечений КР любых газов для любых длин волн возбуждения. Вследствие сложности, малой точности и надежности этих методик требуются дополнительные измерения сечений КР газов для УФ-лазеров. Кроме того, для высокотемпературных зондируемых сред для сечения следует вводить поправку, связанную с различной заселенностью основного уровня при разных температурах [14].

В формулы для оценок концентраций зондируемых газов и аэрозоля входят [12] отношения пропускания на длине волны СКР азота к пропусканиям на длинах волн СКР газов и к пропусканию на лазерной длине волны, что требует как можно более точного задания этих отношений. В случае УФ-зондирования источников выбросов эта проблема стоит весьма остро по нескольким причинам. Во-первых, в диапазоне 250–300 нм находятся [19] сильные электронные полосы поглощения многих газов. Во-вторых, концентрации этих газов и аэрозоля у источников настолько велики [1, 2, 20], что даже на расстоянии в десятки метров значения пропускания существенно отличаются от единицы. В-третьих, вещество в выбросах не является «серым» для УФ-излучения, то есть проявляется сильная спектральная зависимость поглощения [14]. В-четвертых, из-за нестационарности источников и возмущающего действия атмосферы концентрации газов и аэрозоля в выбросах имеют сложное пространственно-временное распределение [1]. До сих пор отношения пропусканий либо грубо задавались равными единице, либо априорно оценивались с помощью модельных коэффициентов аэрозольного ослабления и рэлеевского рассеяния и модельных профилей концентраций поглощающих газов [8]. Очевидно, что такое решение проблемы в рассматриваемом случае даст неудовлетворительную точность результатов измерений. Поэтому нами была разработана [21] специальная методика учета пропусканий, пользуясь которой можно получить эффективные алгоритмы обработки сигналов комплексного экологического зондирования.

Методика апостериорного учета пропусканий

В основе методики лежит возможность извлечения почти всей необходимой априорной информации непосредственно из лидарных данных, полученных специально сконструированным приемником по специальной схеме зондирования. Приемник должен иметь каналы: аэрозольный, азотный, зондируемых газов и, возможно, некоторых поглощающих. Лидар располагается с наветренной стороны от источника выбросов на таком расстоянии, чтобы первые зондируемые стробы попадали в относительно чистую атмосферу.

Концентрации зондируемых $M_1, \dots, M_i, \dots, M_J$ и поглощающих $L_1, \dots, L_j, \dots, L_J$ газов, воздуха M_v , и аэрозоля M_a в каждом k -м стробе находятся совместным решением любым итерационным методом системы нелинейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1^{(k)} \sim F_1(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}); \\ \vdots \\ M_I^{(k)} \sim F_I(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}); \\ L_1^{(k)} \sim \varphi_1(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}); \\ \vdots \\ L_j^{(k)} \sim \varphi_j(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}); \\ M_B^{(k)} \sim \phi(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}); \\ M_a^{(k)} \sim f(M_B^{(1)}, \dots, M_B^{(k)}; M_a^{(1)}, \dots, M_a^{(k)}; L^{(1)}, \dots, L^{(k)}). \end{array} \right.$$

Здесь $F_1, \dots, F_I, \dots, F_I, \varphi_1, \dots, \varphi_j, \dots, \varphi_j, f$ и ϕ — функциональные зависимости соответствующих отношений пропусканий и пропускания на длине волны СКР азота от концентраций воздуха, аэрозоля, поглощающих газов в первых k стробах.

В качестве начального приближения в k -м стробе берется значение концентрации, полученное путем экстраполяции концентраций, уже оцененных в предыдущих стробах. В первом стробе начальным приближением служит задаваемое значение фоновой концентрации. В зависимости от типа источника выбросов число поглощающих газов, подлежащих учету, различно, но обычно не превышает десяти. Поэтому реализация такого числа КР-каналов не вызовет особых затруднений. Кроме того, часто поглощающие газы одновременно являются и зондируемыми, что значительно упрощает алгоритм обработки.

Аспекты проблемы пропусканий при зондировании на 266 нм

При использовании 4-й гармоники АИГ-неодимового лазера длины волн КР всех атмосферных газов лежат в диапазоне от 270 до 300 нм. В этом диапазоне имеют спектры поглощения (см. таблицу) следующие газы, перечисленные по мере уменьшения сечения поглощения: O_3 [22], SO_2 [23, 24], HO_2NO_2 [25], NO_5 [26], NO_2 [25], H_2O_2 [26], HNO_3 [27], C_3H_6O [28], Cl_2 [29], HNO_2 [30], $C_2H_2O_2$, C_2H_4O [28], ClO , ClO_3 , $ClOO$, $ClONO$, $ClNO_2$, $BrONO_2$, $ClNO$, $ClONO_2$, $HOCl$, CF_2Br_2 , $COCl_2$, CH_3Br , $HClO_4$ [31].

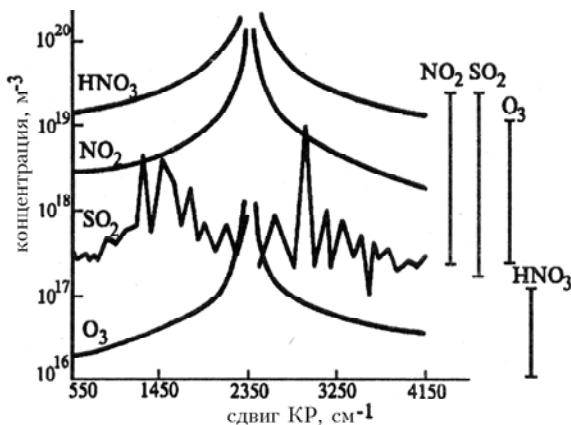


Рис. 1. Максимально допустимые концентрации поглощающих газов O_3 , SO_2 , NO_2 , HNO_3 в зависимости от сдвига КР. Вертикальные линии — диапазоны изменения концентраций от фоновой сельской до загрязненной городской

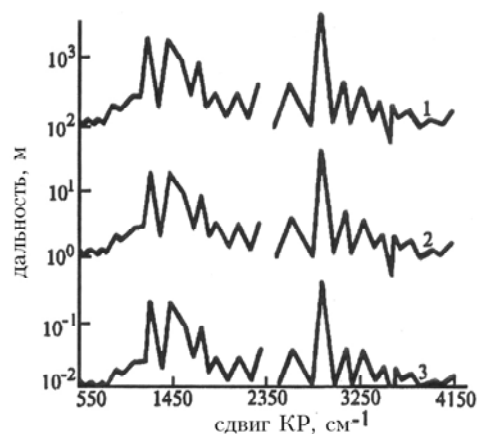


Рис. 2. Максимально допустимые (1%-я ошибка) из-за поглощения SO_2 дальности в зависимости от сдвига КР для трех зондируемых сред: городская атмосфера (1); шлейф выбросов (2); исток трубы ТЭЦ (3)

Определяющую роль в проблеме пропусканий играют не столько абсолютные значения сечений, сколько их разности на соответствующих длинах волн, а еще точнее — разности коэффициентов поглощения. В этом смысле наиболее важными являются O_3 , SO_2 , NO_2 , HNO_3 . Это иллюстрирует рис. 1, где приведены концентрации этих газов, дающие однопроцентную систематическую ошибку в оценке концентрации зондируемых газов на трассе в один километр. Видно, что необходимо учитывать поглощение озоном при зондировании практически всех газов даже в фоновой атмосфере, двуокисью серы при зондировании многих газов в фоновой и всех газов в загрязненной атмосфере, двуокисью азота при зондировании почти всех газов в загрязненной атмосфере, азотной кислотой при

зондировании источников загрязнений. Учет поглощения другими газами может понадобиться только при зондировании источников выбросов.

Т а б л и ц а

Сечения поглощения газов, м²

Длина волны, нм	SO ₂	O ₃	NO ₂	HNO ₃	H ₂ O ₂
269,9	3,70E-23	7,90E-22	3,12E-24	1,63E-24	3,56E-24
270,0	3,60E-23	7,91E-22	3,13E-24	1,63E-24	3,55E-24
270,3	2,80E-23	7,78E-22	3,18E-24	1,62E-24	3,50E-24
270,9	3,50E-23	7,53E-22	3,29E-24	1,59E-24	3,41E-24
271,3	3,00E-23	7,38E-22	3,35E-24	1,57E-24	3,35E-24
271,6	3,48E-23	7,24E-22	3,41E-24	1,56E-24	3,29E-24
271,8	3,10E-23	7,16E-22	3,45E-24	1,55E-24	3,26E-24
272,6	4,70E-23	6,82E-22	3,59E-24	1,51E-24	3,13E-24
273,1	4,40E-23	6,62E-22	3,68E-24	1,49E-24	3,05E-24
274,1	8,30E-23	6,22E-22	3,86E-24	1,44E-24	2,89E-24
274,7	5,30E-23	5,98E-22	3,97E-24	1,41E-24	2,80E-24
275,2	6,50E-23	5,78E-22	4,08E-24	1,39E-24	2,72E-24
275,9	4,60E-23	5,53E-22	4,28E-24	1,36E-24	2,64E-24
276,7	6,90E-23	5,24E-22	4,52E-24	1,31E-24	2,53E-24
277,7	6,20E-23	4,85E-22	4,84E-24	1,26E-24	2,39E-24
278,3	8,20E-23	4,64E-22	5,02E-24	1,23E-24	2,31E-24
278,9	6,25E-23	4,46E-22	5,19E-24	1,20E-24	2,24E-24
279,5	8,90E-23	4,34E-22	5,39E-24	1,17E-24	2,16E-24
280,0	5,40E-23	4,19E-22	5,54E-24	1,14E-24	2,09E-24
281,0	9,80E-23	3,83E-22	5,83E-24	1,09E-24	2,00E-24
281,8	5,40E-23	3,51E-22	6,06E-24	1,05E-24	1,94E-24
282,6	9,90E-23	3,21E-22	6,29E-24	1,00E-24	1,87E-24
283,4	5,70E-23	2,95E-22	6,53E-24	9,61E-25	1,80E-24
283,6	6,70E-23	2,88E-22	6,58E-24	9,51E-25	1,78E-24
284,6	1,12E-22	2,59E-22	6,87E-24	8,98E-25	1,69E-24
285,8	5,70E-23	2,28E-22	7,18E-24	8,38E-25	1,59E-24
287,5	1,12E-22	1,90E-22	7,59E-24	7,56E-25	1,45E-24
288,3	6,80E-23	1,76E-22	7,76E-24	7,19E-25	1,38E-24
289,2	1,08E-22	1,59E-22	7,99E-24	6,73E-25	1,30E-24
290,2	7,60E-23	1,43E-22	8,22E-24	6,28E-25	1,22E-24
290,6	1,09E-22	1,35E-22	8,36E-24	6,09E-25	1,20E-24
291,6	5,60E-23	1,18E-22	8,66E-24	5,67E-25	1,15E-24
292,5	1,00E-22	1,05E-22	8,93E-24	5,3 E-25	1,10E-24
293,3	4,90E-23	9,57E-23	9,15E-24	4,99E-25	1,06E-24
294,0	1,50E-22	8,70E-23	9,37E-24	4,68E-25	1,02E-24
294,2	8,80E-23	8,48E-23	9,43E-24	4,59E-25	1,01E-24
294,6	1,01E-22	8,06E-23	9,55E-24	4,43E-25	,990E-24
295,5	4,20E-23	7,19E-23	9,87E-24	4,11E-25	9,43E-25
296,4	1,12E-22	6,42E-23	1,02E-23	3,84E-25	8,96E-25
297,4	3,20E-23	5,67E-23	1,06E-23	3,54E-25	8,44E-25
298,2	1,08E-22	5,13E-23	1,10E-23	3,3E-25	8,02E-25
299,1	3,90E-23	4,62E-23	1,13E-23	3,04E-25	7,57E-25
269,9	1,52E-23	2,87E-23	2,20E-25	3,79E-25	9,51E-26
270,0	1,52E-23	2,80E-23	2,20E-25	3,80E-25	9,81E-26
270,3	1,51E-23	2,77E-23	2,24E-25	4,05E-25	1,16E-25
270,9	1,48E-23	2,71E-23	2,32E-25	4,54E-25	1,51E-25
271,3	1,46E-23	2,68E-23	2,37E-25	4,83E-25	1,74E-25
271,6	1,45E-23	2,64E-23	2,42E-25	5,11E-25	1,98E-25
271,8	1,44E-23	2,62E-23	2,44E-25	5,28E-25	2,12E-25
272,6	1,40E-23	2,54E-23	2,55E-25	5,93E-25	2,79E-25
273,1	1,38E-23	2,49E-23	2,62E-25	6,34E-25	3,22E-25
274,1	1,34E-23	2,39E-23	2,75E-25	7,16E-25	4,02E-25

Длина волны, нм	SO ₂	O ₃	NO ₂	HNO ₃	H ₂ O ₂
274,7	1,31E-23	2,33E-23	2,83E-25	7,65E-25	4,61E-25
275,2	1,29E-23	2,28E-23	2,90E-25	8,06E-25	5,10E-25
275,9	1,26E-23	2,22E-23	2,99E-25	8,60E-25	5,74E-25
276,7	1,22E-23	2,14E-23	3,10E-25	9,25E-25	6,40E-25
277,7	1,17E-23	2,03E-23	3,24E-25	1,01E-24	7,50E-25
278,3	1,15E-23	1,97E-23	3,32E-25	1,06E-24	8,14E-25
278,9	1,12E-23	1,92E-23	3,39E-25	1,11E-24	8,68E-25
279,5	1,09E-23	1,85E-23	3,48E-25	1,16E-24	9,32E-25
280,0	1,07E-23	1,80E-23	3,55E-25	1,2 E-24	9,81E-25
281,0	1,02E-23	1,72E-23	3,71E-25	1,36E-24	1,12E-24
281,8	9,84E-24	1,66E-23	3,84E-25	1,49E-24	1,24E-24
282,6	9,45E-24	1,59E-23	3,97E-25	1,62E-24	1,37E-24
283,4	9,07E-24	1,53E-23	4,09E-25	1,74E-24	1,51E-24
283,6	8,97E-24	1,51E-23	4,13E-25	1,78E-24	1,55E-24
284,6	8,49E-24	1,43E-23	4,29E-25	1,94E-24	1,76E-24
285,8	7,98E-24	1,35E-23	4,48E-25	2,13E-24	2,03E-24
287,5	7,30E-24	1,25E-23	4,75E-25	2,40E-24	2,39E-24
288,3	7,00E-24	1,20E-23	4,87E-25	2,52E-24	2,68E-24
289,2	6,62E-24	1,14E-23	5,02E-25	2,67E-24	2,97E-24
290,2	6,25E-24	1,08E-23	5,18E-25	2,84E-24	3,12E-24
290,6	6,11E-24	1,05E-23	5,28E-25	2,94E-24	3,19E-24
291,6	5,80E-24	9,88E-24	5,50E-25	3,18E-24	3,47E-24
292,5	5,53E-24	9,30E-24	5,70E-25	3,40E-24	3,77E-24
293,3	5,29E-24	8,82E-24	5,87E-25	3,58E-24	4,03E-24
294,0	5,06E-24	8,34E-24	6,03E-25	3,76E-24	4,36E-24
294,2	5,00E-24	8,21E-24	6,07E-25	3,81E-24	4,39E-24
294,6	4,87E-24	7,96E-24	6,16E-25	3,90E-24	4,45E-24
295,5	4,60E-24	7,43E-24	6,36E-25	4,12E-24	4,59E-24
296,4	4,32E-24	6,95E-24	6,56E-25	4,34E-24	4,80E-24
297,4	4,01E-24	6,41E-24	6,78E-25	4,58E-24	5,16E-24
298,2	3,76E-24	5,98E-24	6,95E-25	4,77E-24	5,48E-24
299,1	3,49E-24	5,52E-24	7,14E-25	4,97E-24	5,72E-24
269,9	2,65E-26	1,09E-24	9,01E-23	2,16E-23	3,41E-23
270,0	2,74E-26	1,10E-24	9,03E-23	2,15E-23	3,40E-23
270,3	3,29E-26	1,12E-24	9,15E-23	2,12E-23	3,38E-23
270,9	4,38E-26	1,17E-24	9,38E-23	2,05E-23	3,35E-23
271,3	5,25E-26	1,20E-24	9,52E-23	2,02E-23	3,33E-23
271,6	6,21E-26	1,22E-24	9,66E-23	1,98E-23	3,30E-23
271,8	6,75E-26	1,24E-24	9,74E-23	1,96E-23	3,29E-23
272,6	9,49E-26	1,30E-24	1,01E-22	1,87E-23	3,24E-23
273,1	1,13E-25	1,34E-24	1,03E-22	1,82E-23	3,21E-23
274,1	1,51E-25	1,42E-24	1,06E-22	1,71E-23	3,15E-23
274,7	1,84E-25	1,47E-24	1,09E-22	1,64E-23	3,12E-23
275,2	2,15E-25	1,51E-24	1,11E-22	1,59E-23	3,09E-23
275,9	2,63E-25	1,56E-24	1,14E-22	1,54E-23	3,07E-23
276,7	3,21E-25	1,62E-24	1,17E-22	1,47E-23	3,03E-23
277,7	3,98E-25	1,70E-24	1,22E-22	1,38E-23	2,99E-23
278,3	4,58E-25	1,75E-24	1,25E-22	1,33E-23	2,97E-23
278,9	5,28E-25	1,79E-24	1,27E-22	1,29E-23	2,95E-23
279,5	6,02E-25	1,84E-24	1,30E-22	1,23E-23	2,92E-23
280,0	6,57E-25	1,88E-24	1,32E-22	1,19E-23	2,90E-23
281,0	8,21E-25	1,96E-24	1,34E-22	1,13E-23	2,86E-23
281,8	9,82E-25	2,02E-24	1,36E-22	1,08E-23	2,83E-23
282,6	1,18E-24	2,09E-24	1,38E-22	1,03E-23	2,80E-23
283,4	1,39E-24	2,15E-24	1,40E-22	9,79E-24	2,76E-23
283,6	1,45E-24	2,17E-24	1,41E-22	9,67E-24	2,76E-23
284,6	1,74E-24	2,24E-24	1,43E-22	9,05E-24	2,72E-23
285,8	2,10E-24	2,34E-24	1,44E-22	8,41E-24	2,65E-23
287,5	2,60E-24	2,47E-24	1,44E-22	7,58E-24	2,55E-23
288,3	2,43E-24	2,53E-24	1,44E-22	7,21E-24	2,51E-23

Длина волны, нм	SO ₂	O ₃	NO ₂	HNO ₃	H ₂ O ₂
289,2	2,34E-24	2,61E-24	1,44E-22	6,75E-24	2,45E-23
290,2	2,47E-24	2,64E-24	1,44E-22	6,31E-24	2,39E-23
290,6	2,51E-24	2,65E-24	1,44E-22	6,14E-24	2,38E-23
291,6	2,61E-24	2,69E-24	1,43E-22	5,78E-24	2,34E-23
292,5	3,55E-24	2,85E-24	1,43E-22	5,46E-24	2,30E-23
293,3	3,95E-24	2,93E-24	1,43E-22	5,19E-24	2,27E-23
294,0	3,92E-24	2,98E-24	1,42E-22	4,92E-24	2,24E-23
294,2	3,92E-24	2,98E-24	1,42E-22	4,85E-24	2,23E-23
294,6	3,76E-24	2,98E-24	1,42E-22	4,70E-24	2,22E-23
295,5	3,51E-24	2,98E-24	1,41E-22	4,43E-24	2,17E-23
296,4	3,27E-24	2,98E-24	1,38E-22	4,21E-24	2,12E-23
297,4	2,88E-24	2,93E-24	1,36E-22	3,96E-24	2,06E-23
298,2	2,97E-24	3,14E-24	1,34E-22	3,75E-24	2,01E-23
299,1	3,48E-24	3,14E-24	1,31E-22	3,54E-24	1,96E-23
269,9	3,74E-23	1,36E-23	6,22E-24	4,50E-22	1,59E-24
270,0	3,73E-23	1,36E-23	6,20E-24	4,50E-22	1,58E-24
270,3	3,68E-23	1,35E-23	6,16E-24	4,51E-22	1,55E-24
270,9	3,59E-23	1,33E-23	6,07E-24	4,52E-22	1,49E-24
271,3	3,53E-23	1,32E-23	6,03E-24	4,53E-22	1,45E-24
271,6	3,48E-23	1,30E-23	5,98E-24	4,53E-22	1,41E-24
271,8	3,45E-23	1,30E-23	5,95E-24	4,54E-22	1,39E-24
272,6	3,32E-23	1,27E-23	5,84E-24	4,55E-22	1,31E-24
273,1	3,24E-23	1,25E-23	5,77E-24	4,56E-22	1,26E-24
274,1	3,08E-23	1,21E-23	5,63E-24	4,58E-22	1,15E-24
274,7	2,99E-23	1,19E-23	5,54E-24	4,59E-22	1,09E-24
275,2	2,91E-23	1,17E-23	5,47E-24	4,60E-22	1,04E-24
275,9	2,83E-23	1,15E-23	5,38E-24	4,60E-22	9,70E-25
276,7	2,73E-23	1,13E-23	5,27E-24	4,60E-22	8,85E-25
277,7	2,60E-23	1,10E-23	5,12E-24	4,60E-22	7,74E-25
278,3	2,52E-23	1,08E-23	5,04E-24	4,60E-22	7,10E-25
278,9	2,45E-23	1,06E-23	4,96E-24	4,60E-22	6,52E-25
279,5	2,37E-23	1,05E-23	4,87E-24	4,60E-22	5,83E-25
280,0	2,31E-23	1,03E-23	4,80E-24	4,60E-22	5,30E-25
281,0	2,26E-23	1,03E-23	4,84E-24	4,56E-22	4,84E-25
281,8	2,21E-23	1,02E-23	4,87E-24	4,53E-22	4,47E-25
282,6	2,17E-23	1,02E-23	4,90E-24	4,50E-22	4,10E-25
283,4	2,13E-23	1,02E-23	4,94E-24	4,46E-22	3,74E-25
283,6	2,12E-23	1,02E-23	4,94E-24	4,46E-22	3,64E-25
284,6	2,06E-23	1,01E-23	4,98E-24	4,42E-22	3,18E-25
285,8	2,00E-23	1,01E-23	5,05E-24	4,38E-22	2,71E-25
287,5	1,93E-23	1,00E-23	5,15E-24	4,35E-22	2,10E-25
288,3	1,89E-23	9,96E-24	5,20E-24	4,34E-22	1,83E-25
289,2	1,85E-23	9,92E-24	5,25E-24	4,32E-22	1,49E-25
290,2	1,81E-23	9,88E-24	5,31E-24	4,29E-22	1,18E-25
290,6	1,79E-23	9,87E-24	5,35E-24	4,28E-22	1,12E-25
291,6	1,77E-23	9,83E-24	5,43E-24	4,24E-22	9,76E-26
292,5	1,74E-23	9,79E-24	5,50E-24	4,20E-22	8,50E-26
293,3	1,72E-23	9,76E-24	5,56E-24	4,17E-22	7,45E-26
294,0	1,70E-23	9,73E-24	5,62E-24	4,14E-22	6,40E-26
294,2	1,69E-23	9,72E-24	5,64E-24	4,13E-22	6,12E-26
294,6	1,68E-23	9,71E-24	5,67E-24	4,12E-22	5,56E-26
295,5	1,66E-23	9,67E-24	5,74E-24	4,08E-22	4,30E-26
296,4	1,63E-23	9,63E-24	5,81E-24	4,07E-22	4,44E-26
297,4	1,61E-23	9,59E-24	5,89E-24	4,05E-22	4,04E-26
298,2	1,59E-23	9,56E-24	5,96E-24	4,04E-22	3,72E-26
299,1	1,56E-23	9,53E-24	6,02E-24	4,02E-22	3,38E-26
269,9	3,73E-26	4,25E-24	3,03E-26	5,13E-22	5,60E-22

Длина волны, нм	SO ₂	O ₃	NO ₂	HNO ₃	H ₂ O ₂
270,0	3,70E-26	4,21E-24	3,00E-26	5,11E-22	5,60E-22
270,3	3,60E-26	4,08E-24	2,94E-26	5,01E-22	5,56E-22
270,9	3,41E-26	3,81E-24	2,82E-26	4,80E-22	5,47E-22
271,3	3,30E-26	3,65E-24	2,75E-26	4,68E-22	5,41E-22
271,6	3,19E-26	3,49E-24	2,68E-26	4,56E-22	5,36E-22
271,8	3,12E-26	3,40E-24	2,64E-26	4,49E-22	5,33E-22
272,6	2,87E-26	3,05E-24	2,48E-26	4,22E-22	5,21E-22
273,1	2,71E-26	2,82E-24	2,38E-26	4,05E-22	5,14E-22
274,1	2,39E-26	2,37E-24	2,18E-26	3,71E-22	4,99E-22
274,7	2,20E-26	2,10E-24	2,06E-26	3,50E-22	4,90E-22
275,2	2,08E-26	1,93E-24	1,96E-26	3,36E-22	4,80E-22
275,9	2,00E-26	1,79E-24	1,83E-26	3,21E-22	4,66E-22
276,7	1,90E-26	1,62E-24	1,67E-26	3,03E-22	4,47E-22
277,7	1,78E-26	1,40E-24	1,46E-26	2,80E-22	4,23E-22
278,3	1,70E-26	1,28E-24	1,34E-26	2,66E-22	4,10E-22
278,9	1,64E-26	1,16E-24	1,23E-26	2,54E-22	3,97E-22
279,5	1,56E-26	1,03E-24	1,10E-26	2,39E-22	3,82E-22
280,0	1,50E-26	9,22E-25	1,00E-26	2,28E-22	3,71E-22
281,0	1,40E-26	8,50E-25	9,50E-27	2,12E-22	3,52E-22
281,8	1,32E-26	7,93E-25	9,10E-27	2,00E-22	3,36E-22
282,6	1,24E-26	7,36E-25	8,70E-27	1,87E-22	3,21E-22
283,4	1,16E-26	6,79E-25	8,30E-27	1,75E-22	3,05E-22
283,6	1,14E-26	6,64E-25	8,20E-27	1,72E-22	3,01E-22
284,6	1,04E-26	5,93E-25	7,70E-27	1,56E-22	2,82E-22
285,8	9,52E-27	5,07E-25	7,10E-27	1,42E-22	2,61E-22
287,5	8,50E-27	3,86E-25	6,25E-27	1,25E-22	2,32E-22
288,3	8,05E-27	3,32E-25	5,88E-27	1,18E-22	2,19E-22
289,2	7,48E-27	2,64E-25	5,40E-27	1,08E-22	2,03E-22
290,2	6,94E-27	2,05E-25	4,94E-27	9,88E-23	1,88E-22
290,6	6,76E-27	2,00E-25	4,76E-27	9,52E-23	1,83E-22
291,6	6,36E-27	1,89E-25	4,36E-27	8,72E-23	1,71E-22
292,5	6,00E-27	1,79E-25	4,00E-27	8,00E-23	1,60E-22
293,3	5,70E-27	1,70E-25	3,70E-27	7,40E-23	1,51E-22
294,0	5,40E-27	1,61E-25	3,40E-27	6,80E-23	1,42E-22
294,2	5,32E-27	1,59E-25	3,32E-27	6,64E-23	1,40E-22
294,6	5,16E-27	1,55E-25	3,16E-27	6,32E-23	1,35E-22
295,5	4,80E-27	1,44E-25	2,80E-27	5,60E-23	1,24E-22
296,4	4,44E-27	1,36E-25	2,72E-27	5,16E-23	1,16E-22
297,4	4,04E-27	1,26E-25	2,52E-27	4,56E-23	1,06E-22
298,2	3,72E-27	1,18E-25	2,36E-27	4,08E-23	9,80E-23
299,1	3,38E-27	1,09E-25	2,19E-27	3,56E-23	8,94E-23

Одним из параметров, существенно сказывающихся на проблеме пропусканий, является дальность зондирования. Очевидно, что в некоторых случаях можно располагать мобильный лидар на столь малых дальностях от зондируемого объема, чтобы отношение пропусканий было близко к единице. Однако, как показывает рис. 2, эти случаи сводятся только к зондированию фоновой или загрязненной атмосферы но никак не к зондированию источников выбросов. Так, влияние одного только SO₂ достаточно велико на расстоянии сотен метров в городской атмосфере, единиц метров в шлейфе выбросов, единиц сантиметров в истоке трубы ТЭЦ.

Заклучение

Несмотря на долгую историю своего существования и успешную демонстрацию своих возможностей, до сих пор лидары не нашли достаточно широкого применения на практике. Связано это с научно-исследовательской нацеленностью созданных образцов. Однако сейчас, когда проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, настало время создания первых серийных лидаров. Для экологических целей, по нашему мнению, в качестве одного из них мог бы стать мобильный газоаэрозольный лидар, предназначенный для комплексного зондирования источников выбросов.

Как показано, существуют все необходимые предпосылки для создания такого лидара. Требуется лишь детальное рассмотрение аппаратных вопросов и разработка на основе предложенной методики эффективных алгоритмов обработки сигналов.

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
2. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 248 с.
3. Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
4. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
5. Зуев В.Е., Самохвалов И.В., Кауль Б.В. и др. Лазерное зондирование индустриального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
6. Захаров В.М., Костко О.К. Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 222 с.
7. Костко О.К., Портасов В.С., Хаттатов В.У., Чаянова Э.А. Применение лазеров для определения состава атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 215 с.
8. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности /Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
9. Лазерный абсорбционный анализ и его приложение в геологии, геофизике и экологии /Под ред. А.И. Попова. М.: Энергоиздат, 1982. 60 с.
10. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоздат. 1983. 280 с.
11. Долгий С.И., Зуев В.В., Смирнов С.В., Шубин С.Ф. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 5. С. 515–521.
12. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 312 с.
13. Руссо Д., Фридман Ж., Вильямс П. // Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях. М.: Мир, 1982. С. 247–309.
14. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 320 с.
15. Вайнер Ю.Г., Малявкин Л.П., Назаров И.М. и др. //Метеорология и гидрология. 1980. № 12. С. 39–47.
16. Даничкин С.Л., Дубягин В.М., Скляднева Т.К. // XI симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО РАН, 1992.
17. Одноэлектронные фотоприемники /С.С. Ветохин, И.Р. Гулаков, А.Н. Перцев и др. М.: Энергоиздат, 1986. 160 с.
18. Вайнер Ю.Г., Кольянов С.Ф., Танана К.В. // Спектроскопия комбинационного рассеяния света. М.: ИС РАН, 1978. С. 68–69.
19. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н. Спектроскопия атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 248 с.
20. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 192 с.
21. Дубягин В.М., Шефер Н.А. // XI симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО РАН, 1992.
22. Справочник по геофизике // М.: Наука. 1965. 572 с.
23. Brasington D.J. // Appl. Optics. 1981. № 20. P. 3774–3779.
24. Thompson V.A., Hardeck P., Reeves R.R. //J. of Geophys. Research. 1963. V. 68. № 24. P. 6431–6436.
25. The Stratosphere. Present and Future /NASA Ref. Publ. 1979. 432 p.
26. Baulch D.L. //J. Phys. Chem. 1980. V. 9. № 2. P. 295–471.
27. Johnson H.S., Graham R. //J. Phys. Chem. 1973. V. 77. № 1. P. 62–63.
28. Катаев М.Ю., Мицель А.А., Тинчурина Э.Г. //Изв. вузов. Сер. Физика. 1985. № 10. Деп. в ВИНТИ. № 4063-85.
29. Seery D.J., Britton D. // J. Phys. Chem. 1964. V. 68. № 8. P. 2263–2266.
30. Johnson H.S., Graham R. // Canad. J. Chem. 1974. V. 52. № 8. P. 1415–1423.
31. Александров Э.Л., Кароль И.Л., Ракипова Л.Р. и др. Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 168 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
21 октября 1992 г.

V. M. Dubyagin, N. A. Shefer. **Tendencies and Problems of the Laser Sounding of the Atmosphere Pollutions.**

The tendency of the ecological lasers evolution is described. The necessity is justified to develop the mobile gas-aerosol UV-lidars designed for sounding the pollution sources. The problems are discussed connected with such lasers production. An ingenious method to solve the transmission problem is presented and some aspects of the problem at the use of the fourth harmonic of the neodymium-doped YAG-laser are discussed.