

УДК 621.378:551.508

Лазерный газоанализатор для мониторинга источников газовых загрязнений

Городничев В. А.^{1,*}, Еременко Л. Н.¹,

Федотов Ю. В.¹, Белов М. Л.¹,

Назаров В. В.¹

* gorod@bmgtu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена задача разработки информационного обеспечения лазерного измерителя для рутинного газоанализа источников антропогенных газовых загрязнений, за которыми ведется постоянное наблюдение. Описаны алгоритм оперативного поиска длин волн измерения и алгоритм восстановления концентраций газов из лазерных многоспектральных измерений, учитывающие априорную информацию о контролируемом источнике газовых загрязнений и не требующие большого объема вычислений. Методом математического моделирования показана эффективность работы описанных алгоритмов поиска длин волн измерения и количественного анализа газовых выбросов.

Ключевые слова: лазерный измеритель, алгоритм поиска спектральных каналов, алгоритм количественного анализа газовой смеси

Введение

В настоящее время в атмосферу Земли выбрасывается большое количество газовых загрязнителей, многие из которых оказывают сильное влияние на химические, биологические и физические процессы в природе. Поэтому проблема загрязнения земной атмосферы и гидросферы занимает все более важное место не только во внутренней, но и во внешней политике государств. Это проявляется в сфере международных соглашений по охране окружающей среды.

Для разработки мероприятий по охране окружающей среды важна объективная информация о количественно оценке фактического содержания газовых загрязнителей в атмосфере.

Для мониторинга источников газовых загрязнений и количественного измерения содержания газовых загрязнителей требуется создание высокочувствительных быстродействующих газоанализаторов.

Лазерные газоанализаторы (на основе различных эффектов взаимодействия лазерного излучения с газами) являются наиболее эффективными для дистанционного или неконтактного измерения содержания газовых загрязнителей в земной атмосфере [1-12].

1. Постановка задачи

При мониторинге конкретных источников антропогенных газовых загрязнений (за которыми ведется постоянное наблюдение из-за возможных выбросов загрязняющих веществ) лазерный газоанализатор должен периодически проводить стандартный (рутинный) анализ выбросов этих источников газовых загрязнений.

На сегодняшний день накоплен достаточно большой объем данных по концентрациям газовых загрязнителей на различных металлургических, химических, нефтехимических и т.п. производствах.

Обработка этих данных позволяет получить априорную информацию о статистических характеристиках концентраций газовых загрязнителей (средних значениях и стандартных среднеквадратических отклонениях концентраций). Эта априорная информация упрощает разработку информационного обеспечения лазерного газоанализатора для рутинного измерения состава газовых смесей.

Лазерный газоанализатор для периодического рутинного анализа должен проводить автоматизированные измерения количественного состава атмосферного воздуха в производственном помещении и (или) на территории предприятия.

Информационное обеспечение лазерного газоанализатора должно включать в себя базу данных с коэффициентами поглощения загрязняющих веществ (характерных для потенциальных источников загрязнений) на возможных длинах волн измерения (заполненную для конкретного излучателя лазерного измерителя), а также алгоритмы оперативного поиска длин волн измерения и алгоритмы количественного анализа газовых смесей.

В настоящее время разработаны различные приборы для лазерного газоанализа (см., например, [1-12]). Однако, многие важные для практики вопросы, связанные с разработкой информационного обеспечения лазерного газоанализатора для рутинных измерений остаются неясными. Наиболее важными из этих вопросов являются разработка алгоритма оперативного поиска длин волн измерения и алгоритма количественного газоанализа, учитывающего априорную информацию о контролируемом источнике загрязнений.

Цель работы - разработка информационного обеспечения лазерного измерителя для рутинного газоанализа источников антропогенных газовых загрязнений, за которыми ведется постоянное наблюдение.

2. Алгоритм поиска длин волн измерения

Если априорно известен состав газовых загрязнителей (для конкретного источника загрязнений), то поиск длин волн источника излучения, используемого в лазерном измерителе, может быть осуществлен заранее (до начала проведения измерений) оператором, работающим с лазерным газоанализатором.

Выбор длин волн измерения лазерного газоанализатора (когда измерения проводятся методом дифференциального поглощения и для определения концентрации одного газа требуется проведение лазерных измерений на двух длинах волн) проводится по следующей методике [12]:

1. Для каждого газа, входящего в состав газовой смеси, выбирается две длины волны измерения, расположенные близко друг от друга, так что разность коэффициентов поглощения на этих длинах волн была по возможности наибольшей. При этом на выбранных двух длинах волн коэффициенты поглощения остальных компонент газовой смеси были по возможности наименьшими.

2. При выборе длин волн измерения предпочтение отдается длинам волн с большей интенсивностью излучения лазерного источника, используемого в измерителе.

Описанная методика хорошо работает, однако, чем больше компонент в газовой смеси, тем сложнее становится работа оператора по выбору набора длин волн измерения. Кроме того, не всегда (например, из-за срочности проведения мониторинга) выбор набора длин волн измерения оператором может быть осуществлен заранее. Поэтому важной является задача оперативного поиска длин волн измерения.

Задача разработки алгоритма поиска спектральных каналов измерения для анализируемой газовой смеси является сложной и неоднозначной.

Наиболее приемлемой (по отсутствию грубых ошибок и оперативности работы) является разработанная на основе математического моделирования эвристическая методика [12], требующая небольшого объема вычислений.

На первом этапе для каждого газа выбираются такие две длины волны, для которых изменение коэффициента поглощения является по возможности максимальным, затем эти пары длин волн для каждого газа ранжируются в соответствии с параметром стоимости F (конкретное выражение для параметра стоимости может быть и другим):

$$F(i, j_{on}, j_{off}) = (1 - \beta) \cdot [P_0(j_{on}) \cdot k(i, j_{on}) - P_0(j_{off}) \cdot k(i, j_{off})] - \beta \cdot \sum_{l \neq i} [P_0(j_{on}) \cdot k(l, j_{on}) + P_0(j_{off}) \cdot k(l, j_{off})], \quad (1)$$

где

i - номер газа в газовой смеси;

j_{on} , j_{off} - номера длин волн пары для i -ого газа (j_{on} - длина волны, на которой коэффициент поглощения газовой компоненты максимален; j_{off} - длина волны, на которой коэффициент поглощения газовой компоненты минимален);

$k(i, j)$ - коэффициент поглощения i -ого газа на j -ой длине волны;

β - некоторый параметр (в общем случае подбираемый для каждой смеси), учитывающий влияния других газовых компонент смеси на параметр стоимости F для i -ой газовой компоненты.

На втором этапе отбираются пары длин волн измерения, для которых параметр стоимости F максимален.

На рис.1 показан пример работы описанного эвристического алгоритма и алгоритма, основанного на максимуме информационного расстояния [12], для газовой смеси, состоящей из двух компонент - аммиака и фреон 113.

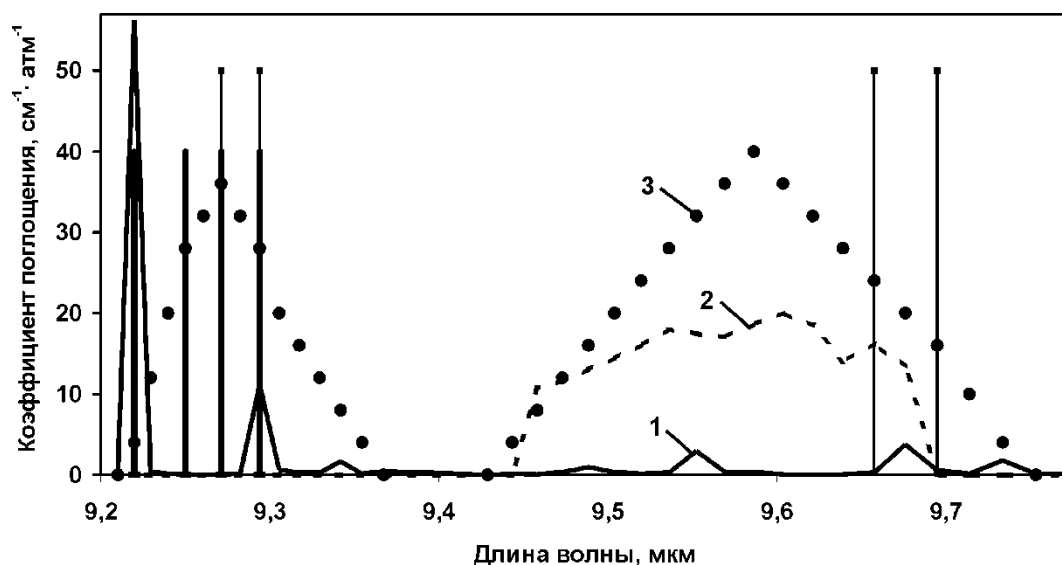


Рис.1 Пример работы эвристического алгоритма

На рисунке кривые 1, 2 – спектры поглощения аммиака и фреона 113, соответственно; 3 - зависимость мощности CO_2 лазера от длины волны излучения. Найденные длины волн измерения показаны на рисунке толстыми вертикальными линиями для алгоритма, основанного на максимуме информационного расстояния, и тонкими вертикальными линиями - для эвристического алгоритма.

Из рисунка 1 видно, что только длины волн измерения, выбранные по эвристическому алгоритму, удовлетворяют условиям для длин волн газоанализатора и поэтому хорошо подходят для определения количественного состава этой газовой смеси.

Таким образом, описанный алгоритм поиска длин волн измерения может быть использован для лазерного газоанализатора, предназначенного для задач оперативного газоанализа выбросов источников антропогенных газовых загрязнений.

3. Алгоритм количественного анализа газовых смесей

Проводя измерения на выбранных длинах волн можно (используя результаты этих многоспектральных измерений) восстановить значения концентраций компонент в выбросах источников антропогенных газовых загрязнений

Пусть атмосферный воздух, содержащий газы-загрязнители, содержит K газовых компонент и многоспектральные лазерные измерения проводятся на M длинах волн. В этом случае задача восстановления количественного состава смеси газов из результатов многоспектральных лазерных измерений сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (см., например, [12]). В матричной форме эта система уравнений имеет вид (считается, что ширина линий генерации лазера, используемого в газоанализаторе, много меньше ширины линий поглощения анализируемых газов):

$$Wx = k_a + Kc = y, \quad (2)$$

где

W - матрица размерностью $M \times M$;

x - M -мерный вектор (K компонент этого вектора соответствуют концентрациям газов смеси, остальные – коэффициентам неселективного ослабления);

K - матрица размерностью $M \times K$ коэффициентов поглощения газов в анализируемой смеси;

y - M -мерный вектор измеряемых приведенных сигналов (показателей поглощения атмосферного воздуха);

c - K -мерный искомый вектор концентраций газов;

k_a - M -мерный вектор коэффициентов неселективного ослабления.

В матричном уравнении (2) неизвестными величинами (которые необходимо восстановить) являются компоненты вектора c (концентрации газов) и компоненты вектора k_a (коэффициенты неселективного ослабления).

В общем случае система уравнений (2) не может быть решена, так как число неизвестных больше, чем число уравнений. Чтобы уменьшить число неизвестных для определения концентрации одного газа обычно измерения выполняются на двух очень близких по спектру лазерных длинах волн (λ_{on} - длине волны, на которой поглощение исследуемым газом максимально, и λ_{off} - длине волны, на которой поглощение исследуемым газом практически отсутствует). Число неизвестных сокращается, поскольку коэффициенты неселективного ослабления на длинах волн λ_{on} и λ_{off} для каждого газа считаются равными.

В идеальном случае (когда отсутствует шум измерения) количественный состав газовой смеси (атмосферного воздуха с газовыми загрязнителями) можно восстановить, используя обратную матрицу W^{-1} (если детерминант матрицы не равен нулю). Однако, при реальных измерениях (когда присутствует шум измерения) правая часть уравнения (2) всегда содержит случайную ошибку, обусловленную погрешностями измерения, шумами аппаратуры и т.п. Таким образом, в (2) вместо y имеем:

$$\tilde{y} = y + \xi,$$

где

ξ - M -мерный вектор случайных ошибок y .

В условиях шума измерения обратный оператор матричного уравнения (2) может быть неустойчивым (малые случайные ошибки данных измерений могут приводить к большим выбросам восстановленных концентраций газов).

Преодолеть эту трудность можно используя (при решении матричного уравнения (2)) алгоритмы обработки, основанные на методах решения некорректных математических задач (см., например, [12-15]).

Среди методов решения некорректных математических задач наиболее подходящим для рутинного анализа конкретных источников газовых загрязнений является метод, основанный на байесовской оценке концентраций газовых компонент [15].

Байесовская оценка искомого вектора $\mathbf{x}$ для уравнения лазерного газоанализа (2) находится при следующих предположениях [15]:

1. Вектор случайных ошибок ξ имеет нормальный закон распределения, нулевое среднее значение и корреляционную матрицу V_ξ , и некоррелирован с измеряемым сигналом.

2. Искомый вектор $\mathbf{x}$ имеет априорное нормальное распределение с некоторым средним значением $\mathbf{x}_0$ и корреляционной матрицей N_0 .

3. Для матриц V_ξ и N_0 существуют обратные матрицы V_ξ^{-1} и N_0^{-1} .

Байесовская оценка $\mathbf{x}_B$ вектора $\mathbf{x}$ (при использовании матричного уравнения (2) лазерного газоанализа) равна:

$$\mathbf{x}_A = (N_0^{-1} + \mathbf{W}^T V_\xi^{-1} \mathbf{W})^{-1} (\mathbf{W}^T V_\xi^{-1} \tilde{\mathbf{y}} + N_0^{-1} \mathbf{x}_0), \quad (3)$$

где верхний индекс "Т" означает транспонирование матрицы.

Устойчивость байесовской оценки, которая определяется формулой (3), достигается сужением класса возможных решений уравнения (2) и основано на используемой априорной информации об искомом решении (априорное нормальное распределение искомого решения и его первые два момента - среднее значение и корреляционная матрица). Такая априорная информация вполне доступна при рутинном газоанализе конкретных источников загрязнений.

Примеры работы алгоритма, основанного на байесовской оценке концентраций газовых компонент, приведены на рисунках 2-4.

На рисунках 2 – 4 показаны средние (по серии из 100 измерений) погрешности δ восстановления концентрации одной из компонент шестикомпонентной газовой смеси «этилен - углекислый газ – аммиак – метанол – этанол - изопропанол» для среднеквадратического (относительного) значения шума измерения 3 % и среднеквадратических (относительных) значений возможных изменений концентраций компонент газовой смеси 90%.

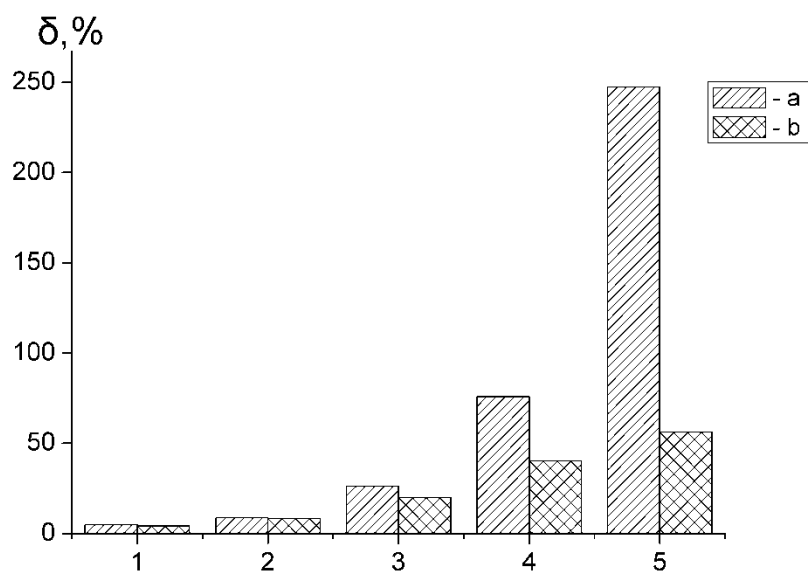


Рис. 2. Погрешности восстановления концентрации этанола. Априорно заданные средние значения концентраций газов на 50% отличаются от их действительных значений.

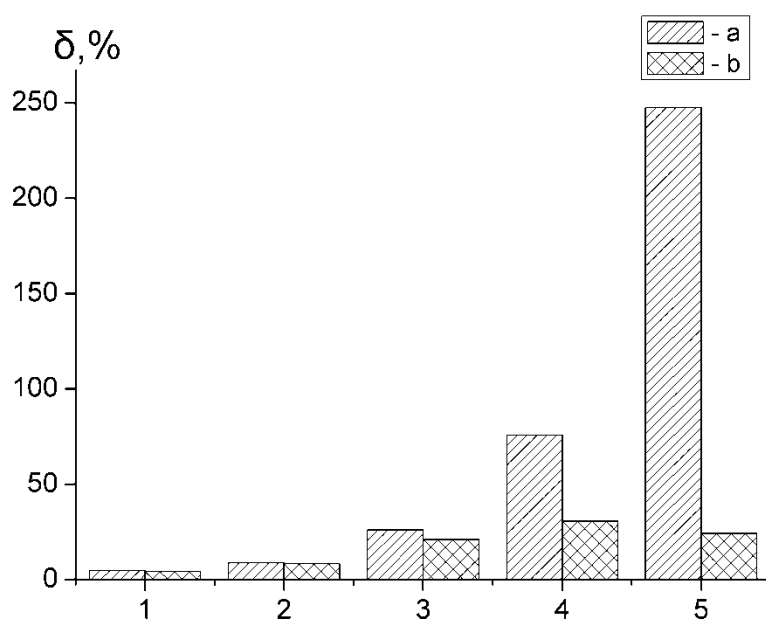


Рис. 3. Погрешности восстановления концентрации этанола. Априорно заданные средние значения концентраций газов совпадают с их действительными значениями.

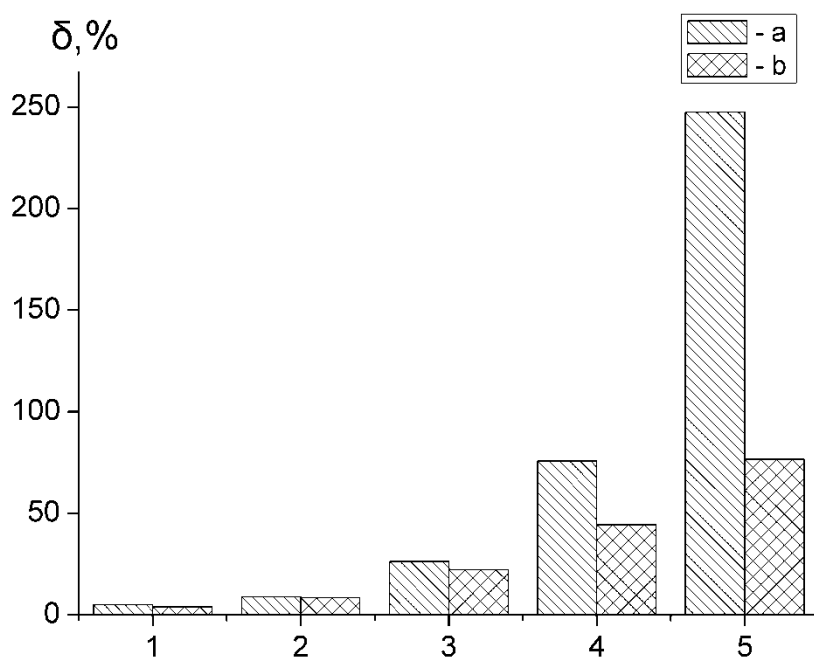


Рис. 4. Погрешности восстановления концентрации этанола. Априорно заданные средние значения концентраций газов отличаются на 90% от их действительных значений.

На рисунке 2 приведены погрешности δ одной компоненты смеси (этанола) при уменьшении концентрации этанола в газовой смеси. Обозначения на рисунке: а – погрешности δ , полученные при использовании обратной матрицы для решения уравнения лазерного газоанализа (2); б – погрешности δ , полученные при использовании байесовской оценки (3); 1- концентрация этанола - $6,6 \cdot 10^{-3}$; 2 - концентрация этанола - $2,2 \cdot 10^{-3}$; 3 - концентрация этанола - $6,6 \cdot 10^{-4}$; 4- концентрация этанола - $2,2 \cdot 10^{-4}$; 5- концентрация этанола - $6,6 \cdot 10^{-5}$ (исходные концентрации газов в смеси «этилен - углекислый газ – аммиак – метанол – этанол - изопропанол» примерно одного порядка: $1,6 \cdot 10^{-3}$ - $9,6 \cdot 10^{-3}$ - $7,3 \cdot 10^{-3}$ - $8,5 \cdot 10^{-3}$ - $6,6 \cdot 10^{-3}$ - $9,2 \cdot 10^{-3}$).

Для рисунка 2 средние значения концентрации газов смеси (при нахождении байесовской оценки концентраций газов) задавались на 50% меньше или больше их действительных значений.

Результаты математического моделирования, приведенные на рисунке 2 показывают:

- если концентрации газовых компонент одного порядка, то метод, основанный использовании обратной матрицы, и метод, основанный использовании байесовской оценки, позволяют восстанавливать концентрацию этанола с небольшими погрешностями;

- если концентрация одного из газов смеси (в нашем случае - этанола) уменьшается, то погрешности определения концентрации этого газа возрастают для обоих методов. Причем для метода, основанного на использовании обратной матрицы, погрешность быстро возрастает до большой величины, а для метода, основанного на использовании байесовской оценки, погрешность возрастает существенно медленнее. Из рисунка видно, что метод, основанный на использовании байесовской оценки, позволяет с приемлемой погрешностью определять концентрацию этанола даже в случае, когда она на два порядка меньше концентрации других газов смеси.

Погрешность δ определения концентраций газов зависит и от отличия задаваемых (при нахождении байесовской оценки) средних значений концентраций газов смеси от их действительных значений. На рисунке 3 приведены результаты математического моделирования в случае, когда средние значения концентрации газов смеси задавались совпадающими с их действительными значениями, а на рисунке 4 – когда средние значения концентрации газов смеси задавались на 90% меньше или больше их действительных значений. Обозначения на рисунках 3 и 4 и условия моделирования те же, что и для рисунка 2.

Сравнение результатов математического моделирования, приведенных на рисунках 2-4, показывает, однако, что зависимость погрешности определения концентраций газов от отличия задаваемых средних значений концентраций газов смеси от их действительных значений достаточно слабо выражена.

Таким образом, алгоритм, основанный на использовании байесовской оценки, позволяет проводить количественный анализ газовых смесей в широком диапазоне концентраций их компонент, при большой неопределенности значений их концентраций и может быть использован в задачах мониторинга источников газовых загрязнений.

Заключение

Рассмотрена задача разработки информационного обеспечения лазерного измерителя для рутинного газоанализа источников антропогенных газовых загрязнений, за которыми ведется постоянное наблюдение. Описаны алгоритм оперативного поиска длин волн измерения и алгоритм восстановления концентраций газов из лазерных многоспектральных измерений, учитывающие априорную информацию о контролируемом источнике газовых загрязнений и не требующие большого объема вычислений. Методом математического моделирования показана эффективность работы описанных алгоритмов поиска длин волн измерения и количественного анализа газовых выбросов.

Список литературы

1. Mei L., Zhao G., Svanberg S. Differential absorption lidar system employed for background atomic mercury vertical profiling in South China // Optics and Lasers in Engineering. 2014. Vol. 55, no. 4. P. 128-135. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2013.10.028](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.10.028)
2. Лазерное зондирование атмосферы // OrdinaryTECH: сайт. Режим доступа: <http://www.ordinarytech.ru/erdets-997-1.html> (дата обращения 20.08.2015).
3. Bratu A.M., Petrus M., Patachia M., Dumitras D.C. Carbon Dioxide And Water Vapors Detection From Surgical Smoke By Laser Photoacoustic Spectroscopy // University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin-Series A-Applied Mathematics and Physics. 2013. Vol. 75, iss. 2. P. 139-146.
4. Бобровников С.М. Центр лазерного зондирования атмосферы // Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН: сайт. Режим доступа: <http://www.iao.ru/ru/structure/scidivs/4/53> (дата обращения 20.08.2015).
5. Ageev B.G., Ponomarev Yu.N., Sapozhnikova V.A. Laser Photoacoustic Method for Disc Tree-Ring Gas Analysis // World Environment. 2012. Vol. 2, no. 2. P. 4-10. DOI: [10.5923/j.env.20120202.02](https://doi.org/10.5923/j.env.20120202.02)
6. Differential absorption LIDAR for the detection and quantification of greenhouse gases // The National Institute of Standards and Technology (NIST): website. Режим доступа: <http://www.nist.gov/pml/electromagnetics/grp05/other-activities.cfm> (дата обращения 20.08.2015).
7. Holthoff E., Bender J., Pellegrino P., Fisher A. Quantum Cascade Laser-Based Photoacoustic Spectroscopy for Trace Vapor Detection and Molecular Discrimination // Sensors. 2010. Vol. 10, no. 3. P. 1986-2002. DOI: [10.3390/s100301986](https://doi.org/10.3390/s100301986)
8. Bageshwar D.V., Pawar A.S., Khanvilkar V.V., Kadam V.J. Photoacoustic Spectroscopy and Its Applications // Eurasian Journal of Analytical Chemistry. 2010. Vol. 5, no. 2. P.187-203.
9. Airborne Differential Absorption Lidar // NPL (UK's National Measurement Institute): website. Режим доступа: <http://www.npl.co.uk/environmental-measurement/research/airborne-differential-absorption-lidar> (дата обращения 20.08.2015).
10. Демтрёдер В. Современная лазерная спектроскопия: пер. с англ. М.: Интеллект, 2014. 1026 с.
11. Elia A., Lugarà P. M., Di Franco C., Spagnolo V. Photoacoustic Techniques for Trace Gas Sensing Based on Semiconductor Laser Sources // Sensors. 2009. Vol. 9, no. 12. P. 9616-9628. DOI: [10.3390/s91209616](https://doi.org/10.3390/s91209616)
12. Городничев В.А. Разработка методов и оптико-электронных средств лазерного оперативного контроля многокомпонентных газовых смесей составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ: дис. ... докт. техн. наук. М., 2009. 307 с.

13. Kaipio J.P., Somersalo E. Classical regularization methods // In book: Statistical and Computational Inverse Problems. Springer New York, 2005. P. 7-48. DOI: [10.1007/0-387-27132-5_2](https://doi.org/10.1007/0-387-27132-5_2)
14. Ольховой А.Ф. Обратные некорректные задачи. Введение в проблематику. Таганрог: Технологический ин-т ЮФУ, 2009. 131 с.
15. Еременко Л.Н. Метод определения количественного состава сложных газовых смесей лазерным оптико-акустическим анализатором: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 142 с.

Laser Gas-Analyser for Monitoring a Source of Gas Pollution

V.A. Gorodnichev^{1,*}, L.N. Eremenko¹,
Yu.V. Fedotov¹, M.L. Belov¹,
V.V. Nazarov¹

*gorod@bmgtu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser meter, search algorithm of spectral channels, algorithm of gas mixture quantified analysis

Currently, the problem of growing air pollution of the Earth is of relevance. Many countries have taken measures to protect the environment in order to limit the negative anthropogenic impacts.

In such a situation an objective information on the actual content of pollutants in the atmosphere is of importance. For operational inspection of the pollutant concentrations and for monitoring pollution sources, it is necessary to create high-speed high-sensitivity gas analysers.

Laser meters are the most effective to provide operational remote and local inspection of gas pollution of the Earth atmosphere.

Laser meter for routine gas analysis should conduct operational analysis of the gas mixture (air). For this a development of appropriate information support is required.

Such information support should include a database with absorption coefficients of pollutants (specific to potential sources of pollution) at possible measuring wavelengths (holding data for a particular emitter of the laser meter) and an efficient algorithms to search the measuring wavelengths and conduct a quantitative analysis of gas mixtures.

Currently, the issues, important for practice and related to the development of information support for the laser gas analyzer to conduct important for practice routine measurements remain unclear.

In this paper we develop an algorithm to provide an operational search of the measuring wavelengths of laser gas analyser and an algorithm to recover quantitatively the gaseous component concentrations of controlled gas mixture from the laser multi-spectral measurements that take into account a priori information about the source-controlled gas pollution and do not require a large amount of computation. The method of mathematical simulation shows the effectiveness of the algorithms described both for search of measuring wavelengths and for quantitative analysis of gas releases.

References

1. Mei L., Zhao G., Svanberg S. Differential absorption lidar system employed for background atomic mercury vertical profiling in South China. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 128-135. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2013.10.028](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.10.028)
2. *Laser sensing of the atmosphere*. OrdinaryTECH: website. Available at: <http://www.ordinarytech.ru/erdets-997-1.html> , accessed 20.08.2015.
3. Bratu A.M., Petrus M., Patachia M., Dumitras D.C. Carbon Dioxide And Water Vapors Detection From Surgical Smoke By Laser Photoacoustic Spectroscopy. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin-Series A-Applied Mathematics and Physics*, 2013, vol. 75, iss. 2, pp.139-146.
4. Bobrovnikov S.M. *Center of Laser Atmosphere Sensing*. V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science: website. Available at: <http://www.iao.ru/ru/structure/scidivs/4/53> , accessed 20.08.2015.
5. Ageev B.G., Ponomarev Yu.N., Sapozhnikova V.A. Laser Photoacoustic Method for Disc Tree-Ring Gas Analysis. *World Environment*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 4-10. DOI: [10.5923/j.env.20120202.02](https://doi.org/10.5923/j.env.20120202.02)
6. *Differential absorption LIDAR for the detection and quantification of greenhouse gases differential absorption LIDAR for the detection and quantification of greenhouse gases*. The National Institute of Standards and Technology (NIST): website. Available at: <http://www.nist.gov/pml/electromagnetics/grp05/other-activities.cfm> , accessed 20.08.2015.
7. Holthoff E., Bender J., Pellegrino P., Fisher A. Quantum Cascade Laser-Based Photoacoustic Spectroscopy for Trace Vapor Detection and Molecular Discrimination. *Sensors*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 1986-2002. DOI: [10.3390/s100301986](https://doi.org/10.3390/s100301986)
8. Bageshwar D.V., Pawar A.S., Khanvilkar V.V., Kadam V.J. Photoacoustic Spectroscopy and Its Applications. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 2010, vol. 5, no. 2, pp.187-203.
9. *Airborne Differential Absorption Lidar*. NPL (UK's National Measurement Institute): website. Available at: <http://www.npl.co.uk/environmental-measurement/research/airborne-differential-absorption-lidar> , accessed 20.08.2015.
10. Demtröder W. *Laser Spectroscopy*. In 2 vols. Springer Berlin Heidelberg, 2008. (Russ. ed.: Demtröder W. *Sovremennaya lazernaya spektroskopiya*. Moscow, Intellekt Publ., 2014. 1026 p.).
11. Elia A., Lugarà P. M., Di Franco C., Spagnolo V. Photoacoustic Techniques for Trace Gas Sensing Based on Semiconductor Laser Sources. *Sensors*, 2009, vol. 9, no. 12, pp. 9616-9628. DOI: [10.3390/s91209616](https://doi.org/10.3390/s91209616)
12. Gorodnichev V.A. *Razrabotka metodov i optiko-elektronnykh sredstv lazernogo operativnogo kontrolya mnogokomponentnykh gazovykh smesei sostavlyayushchikh raketnykh topliv i drugikh toksichnykh veshchestv*. Dokt. dis. [Development of methods and

opto-electronic means of laser operational control of multicomponent gas mixtures the components of rocket fuels and other toxic substances. Dr. dis.]. Moscow, 2009. 307 p. (in Russian, unpublished).

13. Kaipio J.P., Somersalo E. Classical regularization methods. In book: *Statistical and Computational Inverse Problems*. Springer New York, 2005, pp. 7-48. DOI: [10.1007/0-387-27132-5_2](https://doi.org/10.1007/0-387-27132-5_2)
14. Ol'khovoi A.F. *Obratnye nekorrektnye zadachi. Vvedenie v problematiku* [Inverse ill-posed problems. Introduction to the problems]. Taganrog, YuFU Publ., 2009. 131 p. (in Russian).
15. Eremenko L.N. *Metod opredeleniya kolichestvennogo sostava slozhnykh gazovykh smesei lazernym optiko-akusticheskim analizatorom. Kand. dis.* [Method of determining the quantitative composition of complex gas mixtures by laser opto-acoustic analyzer. Cand. dis.]. Moscow, 2010. 142 p. (in Russian, unpublished).