

**Р.Р. Агишев, Л.Р. Айбатов, Ю.Е. Польский**

## **НЕПРЕРЫВНЫЙ ИК-ЛИДАР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Представлены оценки предельных характеристик ЛЧМ-непрерывных лидаров. Проведен сопоставительный анализ различных методов контроля окружающей среды. Рассмотрены энергетические и точностные характеристики анализируемых систем. Обсуждаются принципы построения непрерывных лидаров.

### **Введение**

В настоящее время не ослабевает интерес к использованию лазеров для дистанционного контроля микроконцентраций различных газов в атмосферном воздухе. Весьма важным является анализ содержания углеводородов, особенно предельных углеводородов: метана, этана, пропана, бутана и т.д., которые очень широко применяются на практике.

Однако внедрение лазерных систем дистанционного зондирования окружающей среды ограничивается экспериментальными проектами и лабораторными макетами. Дело в том, что традиционный путь контроля состояния окружающей среды и дистанционного химического анализа загрязнений атмосферы основан на использовании импульсных лидарных систем. Извлечение информации о распределении параметров атмосферы по дальности в таких системах осуществляется по уровню принятого фотодетектором сигнала в момент времени, определяемый задержкой рассеянного сигнала относительно зондирующего импульса [1, 2]. Применяемые в них мощные импульсные лазеры имеют высокую стоимость, громоздкую и ненадежную систему накачки, генерируют мощные импульсные помехи и требуют водяного охлаждения.

Однако существует альтернативный подход к построению лидарных систем, обусловленный энергетической эквивалентностью импульсного лидара с высокой пиковой мощностью и малой длительностью импульса и непрерывного лидара с малой средней мощностью излучения и большим временем наблюдения. Во втором случае используемые непрерывные газовые лазеры значительно дешевле, а контроль дальности производится путем измерения разности частот излучаемого и принимаемого сигналов или разности фаз.

### **2. Возможности и ограничения подобных систем**

Одним из наиболее распространенных и широко применяемых непрерывных лазеров является He–Ne-лазер. Наличие у него двух близких переходов  $\lambda_0 = 3,3922$  ( $3 s_2 - 3 p_4$  Ne) и  $\lambda_1 = 3,3912$  мкм ( $3 s_2 - 3 p_2$  Ne), совпадающих с основной полосой поглощения многих углеводородов, стимулирует разработку на этой основе дистанционных систем контроля. Обсудим возможности и ограничения, присущие таким системам.

Прежде всего отметим, что фоновая концентрация  $\text{CH}_4$  в сухом воздухе при атмосферном давлении и температуре 273 К в городских условиях колеблется на уровне  $N_b = 1$  ppm, или  $4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, а сечение поглощения  $\text{CH}_4$  на длине волны 3,3912 мкм  $\sigma_{\text{abs}}$  равно  $10^{-18}$  см<sup>2</sup>. Поэтому коэффициент ослабления зондирующего лазерного излучения, вызванный поглощением в  $\text{CH}_4$ , можно оценить величиной  $\alpha = N_b \sigma_{\text{abs}} = 4$  км<sup>-1</sup>. Согласно [5] при нормальных условиях, и даже при относительной влажности около 100%, вклад паров воды не превышает 1/20 от вклада фоновой концентрации  $\text{CH}_4$ . Следовательно, на длине волны наиболее сильной линии He–Ne-лазера в спектральной области 3,39 мкм ослабление излучения в атмосфере, более прозрачной, чем слабый туман (метеорологическая дальность видимости  $V > 1$  км), определяется поглощением в метане. В тумане ( $V = 0,2 \dots 1$  км) следует учитывать вклад метана и рассеяния.

### 2.1. Метод дифференциального поглощения

Рассмотрим характеристики системы контроля метана, основанной на методе дифференциального поглощения [6, 7]. Мощность сигнала, отраженного от топографического объекта, может быть представлена в виде

$$P = G P_0 A g \exp(-2\alpha R) t / \pi R^2, \quad (1)$$

где  $G$  – геометрический фактор;  $P_0$  – мощность зондирующего излучения;  $A$  – площадь приемного объектива;  $g$  – альbedo топографического объекта;  $t$  – коэффициент пропускания оптической системы и фильтров;  $R$  – дальность действия.

Не вдаваясь в физическую природу явлений, собственные шумы приемников излучения, не охлаждаемых до криогенных температур (например, фоторезисторы PbSe), определяют пороговую мощность при прямом детектировании следующим образом:

$$P_i = \sqrt{S \Delta F} / D^* \approx 10^{-9} \text{ Вт}. \quad (2)$$

Уровень фоновой радиации дневного неба оценим по известному из [8] соотношению

$$P_b = \pi B_\lambda \Delta\lambda A t \theta^2 / 4, \quad (3)$$

где  $B_\lambda$  – спектральная яркость фона неба;  $\Delta\lambda$  – ширина полосы пропускания интерференционного фильтра;  $\theta$  – плоский угол поля зрения приемника. В предположении  $B_\lambda = 10^{-1} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$ ,  $\Delta\lambda = 0,06 \text{ мкм}$ ,  $\theta = 3 \text{ мрад}$ ,  $A = 0,01 \text{ м}^2$  будем иметь  $P_b \approx 10^{-10} \text{ Вт}$ .

Как видно, даже для полосы частот в 10 Гц собственные шумы фотодетектора преобладают над фоновыми. Таким образом, отношение сигнал-шум на входе фотодетектора, как следует из (1) и (2), равно

$$S / N = G P_0 A g t \exp(-2\alpha R) D^* / \pi R^2 \sqrt{S \Delta F} = 10^3 [\text{км}^2] \exp(-2\alpha R) / R^2.$$

Для дальностей 0,1 и 1 км отношение сигнал-шум при мощности лазера около 0,01 Вт равно соответственно  $4,5 \cdot 10^4$  и 0,33.

### 2.2. Лидарный метод ДПиР

При контроле утечек газа лидарным методом дифференциального поглощения и рассеяния (ДПиР) уравнение измерения имеет вид

$$P = G E c A \beta \exp(-2\alpha R) t / R^2, \quad (4)$$

где  $G$  – геометрический фактор;  $E$  – энергия излучения лазера;  $\beta$  – объемный коэффициент рассеяния;  $\beta = i_\pi \alpha$ ;  $i_\pi$  – индикатриса рассеяния под углом  $\pi$ . Для пологих индикатрис рассеяния с погрешностью, не превышающей  $\pm 20\%$ , достаточной для оценочных расчетов, согласно [2] можно принять

$$i_\pi = 0,02 \alpha^{-0,43}. \quad (5)$$

Тогда

$$P = 0,01 E G c A \alpha^{0,57} \exp(-2\alpha R) t / R^2. \quad (6)$$

#### 2.2.1. Режим прямого детектирования

Минимально регистрируемый сигнал в режиме прямого детектирования определяется так же, как и в предыдущем случае, с той лишь разницей, что необходима значительно большая

полоса пропускания аппаратуры  $\Delta F$  для обеспечения требуемой разрешающей способности по дальности. Для  $\sqrt{S} = 0,1$  мм,  $D^* = 5 \cdot 10^{10}$  см  $\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$  и  $\Delta F = 7,5$  МГц ( $\Delta R = 10$  м)  $P_{\min} = 5 \cdot 10^{-10}$  Вт. Отношение сигнал-шум в этом случае для  $V = 10$  км равно

$$S/N = E c \beta A t \exp(-2\alpha R) D^* / 2 \sqrt{S} \Delta F R^2 \approx 2,5 \cdot 10^3 [\text{км}^2 / \text{Дж}] \cdot E \cdot \exp(-2\alpha R) / R^2. \quad (7)$$

Приняв коэффициент различимости равным 10, для дальностей 0,1 и 1 км минимальная энергия  $E$  зондирующего излучения равна соответственно 0,44 и 1670 Дж.

### 2.2.2. Режим гетеродинного детектирования

При гетеродинном детектировании уровень минимально регистрируемого сигнала

$$P_{\min} = \hbar c \Delta F / \eta \lambda, \quad (8)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\eta$  – квантовая эффективность приемника излучения. Необходимая полоса частот в этом случае значительно снижается, так как требуется выделить лишь спектр сигнала биений принятого и излученного сигналов, и  $\Delta F = 10$  кГц. Для  $\eta = 0,1$   $P_{\min} = 3 \cdot 10^{-15}$  Вт.

Отношение сигнал-шум в режиме гетеродинирования

$$S/N = E A t \beta \exp(-2\alpha R) \eta \lambda / 2 h \Delta F R^2 = 2 \cdot 10^8 [\text{км}^2 / \text{Дж}^{-1}] \cdot E \cdot \exp(-2\alpha R) / R^2. \quad (9)$$

На дальностях 0,1 и 1 км  $E_{\min} = 10^{-10}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$  Дж соответственно. В табл. 1 представлены характеристики лидаров, реализующих рассмотренные методы измерений.

Таблица 1

Тип лидара	Характеристики					
	$\Delta F$ , Гц	Фотодетектор	$D^*$ , см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$	$T$ , К	$\sqrt{S}$ , мм	$P_{\min}$ , Вт
Дифференциальное поглощение	$10^2$	PbSe	$10^9$	293	1	$10^{-9}$
ДПиР, прямое детектирование	$7,5 \cdot 10^6$	CdHgTe	$5 \cdot 10^{10}$	80	0,1	$5 \cdot 10^{-10}$
ДПиР, гетеродинное детектирование	$10^4$	PbSe	$10^9$	293	1	$3 \cdot 10^{-15}$

Ослабление принимаемого сигнала, вызванное утечками  $\text{CH}_4$ , можно учесть в соответствии с табл. 2 с помощью экспоненциального множителя и фактора дальности  $\exp(-2\tau_b) / R^2$ , где  $\tau_b = N_b \sigma_{\text{abs}} R$ ;  $N_b$  – фоновая концентрация метана.

Таблица 2

$R$ , км	$10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$10^0$	$3,2 \cdot 10^0$
$\exp(-2\tau_b)/R^2$	$10^4$	$7,8 \cdot 10^2$	$4,5 \cdot 10^1$	$8,0 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-13}$

### 3. Элементы теории непрерывных лидаров

При использовании частотного метода обработки в атмосферу излучается непрерывный сигнал, частота несущей или поднесущей которого изменяется чаще всего по линейному закону [3]. Для неподвижной цели на дальности  $R$  частота биений принимаемого и излученного сигналов

$$f_R = 2 R \Delta F F_m / c, \quad (10)$$

где  $\Delta F$  – девиация частоты;  $F_m$  – частота модуляции.

Разрешающая способность по дальности определяется как

$$\Delta R = c \Delta F_f / 4 \Delta F F_m, \quad (11)$$

где  $\Delta F_f$  – полоса пропускания фильтра. Величина  $\Delta R$  не может быть лучше  $\Delta R = c / 4 \Delta F$ , т.е. определяется девиацией частоты. Минимальная дальность также зависит только от  $\Delta F$  и определяется точно так же. При этом среднеквадратическая методическая ошибка измерения дальности

$$\sigma_R = c \Delta F_f / 8 \sqrt{3} F_m \Delta F. \quad (12)$$

Оценим тактические параметры лидара, задавшись следующими величинами:  $F_m = 200$  Гц,  $\Delta F = 7,5$  МГц,  $f_{\max} = 10$  кГц,  $\Delta F_f = 400$  Гц. Тогда максимальная дальность  $R_{\max} = 1$  км. Минимальная дальность и скачок показаний дальномера  $R_{\min} = 10$  км. Потенциальная разрешающая способность  $\Delta R = 10$  м. Число каналов анализатора  $n = 25$ . Среднеквадратическая методическая ошибка  $\sigma_R = 6$  м.

### 3.1. Нестабильность частоты и нелинейность закона модуляции

Оценим влияние нестабильности модулирующей поднесущей и нелинейности закона модуляции на выбор периода модуляции и периода накопления. Из (10) следует, что ошибка определения частоты биений, вызванная нестабильностью поднесущей, равна

$$\Delta f_{R_{us}} = 4 \Delta R_{us} \Delta F / c T_m, \quad (13)$$

где  $\Delta R_{us}$  – ошибка измерения дальности из-за нестабильности поднесущей. С другой стороны, нестабильность частоты  $\Delta F_{us} / \Delta T$  за время  $2R/c$  может в худшем случае вызвать изменение частоты биений на величину

$$\Delta f_{R_{us}} = 2 R \Delta F_{us} / c \Delta T. \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует, что

$$\Delta F_{us} / \Delta T = 2 \Delta R_{us} / R \Delta F / T_m. \quad (15)$$

Поэтому за период модуляции для максимальной дальности абсолютная нестабильность не должна превысить величины

$$\Delta F_{us} \leq 2 \Delta R_{us} / R \Delta F / T_m. \quad (16)$$

Потребуем для определенности  $\Delta R_{us} \leq 0,1 \Delta R$ . Тогда

$$\Delta F_{us} \leq 0,2 \Delta R / R_{\max} \Delta F. \quad (17)$$

Рассмотрим влияние нелинейности закона модуляции поднесущей на точность определения текущей дальности. Из (10) следует, что при линейной ЛЧМ  $\Delta F / T_m = U_0 = \text{const}$ . Очевидно,  $\Delta f_{R_{nl}} = 4 R \Delta U / c$ , где  $\Delta U / U_0$  – относительное отклонение от линейности (относительная нелинейность). Нетрудно получить, что  $\Delta R_{nl} = R \Delta U / U_0$ .

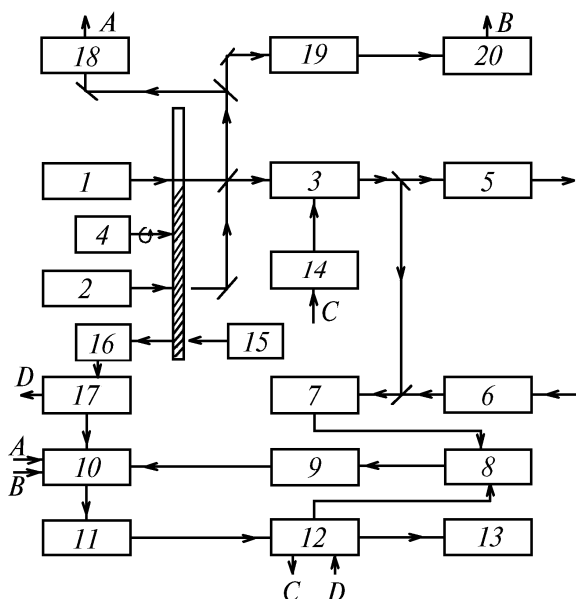
Для определения требований к линейности частотной модуляции пусть  $\Delta R_{\max nl} = 0,1 \Delta R$ . В этом случае

$$\Delta U / U_0 = 0,1 \Delta R / R_{\max}. \quad (18)$$

## 4. Экспериментальный макет газоанализатора

Макет ЛЧМ-ИК-лидара обеспечивал регистрацию атмосферных неоднородностей на расстоянии более 100 м. Лидар включает в себя (рисунок) излучающий блок, в котором использованы два He–Ne-лазера 1 и 2, генерирующих в области 3,39 мкм. Модуляция излучения осуществляется с помощью электрооптического модулятора на кристалле Ge 3. Приемная оптика построена на базе зеркального телескопа 6 с фокусным расстоянием около 1 м и диаметром 150 мм. В качестве детектора ИК-излучения 7 использован фоторезистор на PbSe с термоэлектрическим охлаждением. На выходе фотоприемного устройства установлен анали-

затор спектра 8, сигналы с выхода которого детектируются 9, преобразуются в цифровую форму 11 и передаются для алгоритмической обработки в микроЭВМ 12.



Экспериментальная установка: 1, 2 – He-Ne-лазеры, 3 – электрооптический модулятор, 4 – прерыватель, 5 – коллиматор, 6 – телескоп, 7 – PbSe-фоторезистор, 8 – анализатор спектра, 9 – детектор, 10 – мультиплексор, 11 – аналого-цифровой преобразователь, 12 – микрокомпьютер, 13 – дисплей, 14 – ЛЧМ-генератор, 15 – светодиод, 16 – германиевый фотодиод, 17 – синхронизатор, 18, 20 – пиродетекторы, 19 – ячейка  $\text{CH}_4$

## Заключение

Таким образом, описанная система представляется очень привлекательной, поскольку непрерывные газовые лазеры в десятки раз дешевле мощных импульсных твердотельных лазеров. Поэтому исследования и разработки непрерывных лидарных систем могут открыть новые перспективы дистанционного мониторинга атмосферы, например, методами лазерно-индуцированной флуоресценции, дифференциального поглощения и рассеяния и т.д.

1. Польский Ю.Е. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. №8. С. 3–13.
2. Агишев Р.Р. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. М.: Машиностроение, 1994. 128 с.
3. Агишев Р.Р., Айбатов Л.Р., Иванов А.Н., Ильин Г.И., Польский Ю.Е. // IX Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1987. Ч. 2. С. 112–116.
4. Попов А.И., Садчихин А.В. // Журнал прикладной спектроскопии. 1991. Т. 55. №3. С. 426–430.
5. Abdullin R.M., Boiko S.A., Kotelnikov S.B., Popov A.I. // XV International Laser Radar Conference. Part 2. July 23–27, 1990. Tomsk. P. 108–112.
6. Межерис Р.М. Лазерное зондирование атмосферы. М.: Мир, 1987. 380 с.
7. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
8. Koreika N.S., Bordan'a J. // Proceedings of the IEEE. 1970. V. 58. №10. P. 1571–1577.
9. Barton D.K., Ward H.R. Handbook of radar measurement. New Jersey: Prentice Hall, 1969.
10. Hulme K.F. // Optical and Laser Technology. 1982. V. 14. №4. P. 231–215.

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию  
25 июля 1994 г.

R.R. Agishev, L.R. Aybatov, Ju.E. Pol'sky. **CW-IR-Lidar for Remote Monitoring of the Natural Gas Leaks.**

The assessments of limiting characteristics of CW-IR-lidar are presented in the paper as well as a comparison of different ways of the environment monitoring.

The energetics and accuracy characteristics of the systems under study are also observed. Principles of the CW-lidars designing are discussed.