

Р.Р. Агишев, Р.К. Сагдиев

## Теоретическое описание LD-WM-CW-ладара

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию 17.07.2000 г.

Проводится анализ ряда теоретических моделей непрерывного ладара на лазерном диоде. Представлены результаты численного моделирования LD-WM-CW-ладара. Даны рекомендации по выбору параметров модуляции лазерного излучения.

В настоящее время при измерениях на открытых трассах одним из наиболее чувствительных и избирательных является спектроскопический метод газоанализа, основанный на модуляции длины волны (WM) излучения лазерного диода (LD) в пределах контура поглощения исследуемого газа. При всех своих достоинствах этот метод не позволяет проводить измерения с пространственным разрешением.

Традиционно в моностатических лидарах с пространственным разрешением используют импульсный метод локации. Недостатком метода является использование мощных импульсных твердотельных или газовых лазеров, которые имеют высокую стоимость, создают импульсные помехи, громоздки, часто требуют водяного охлаждения.

При реализации непрерывных (CW) модуляционных лазерных локаторов – ладаров – появляется возможность построить более дешевые, легкие и компактные системы. Существующие непрерывные аэрозольные ладары, работающие на одной длине волны, не позволяют определять газовый состав атмосферы. Непрерывные ладары на основе метода дифференциального поглощения и рассеяния обеспечивают измерения пространственного распределения концентрации газа. Однако они проигрывают методам модуляционной спектроскопии в концентрационной чувствительности, поскольку измерение концентрации производится только по двум точкам контура поглощения газа.

Таким образом, для исследований газового состава атмосферы весьма перспективным является создание ладара, позволяющего использовать достоинства непрерывных локационных методов зондирования и современных модуляционных методов спектроскопии.

В настоящей статье проводится теоретический анализ непрерывного спектроскопического ладара с пространственным разрешением (LD-WM-CW-ладара) на лазерном диоде [1, 2]. Функциональная схема LD-WM-CW-ладара показана на рис. 1.

Существуют несколько математических моделей описания модуляционных методов спектроскопии [3–5]. Однако все они построены для случая частотной модуляции излучения простым гармоническим сигналом. Проведем анализ математических моделей LD-WM-CW-ладара на основе разработки теоретических основ и описания особенностей взаимодействия частотно-модулированного лазерного излучения с анализируемым газом на открытой атмосферной трассе.

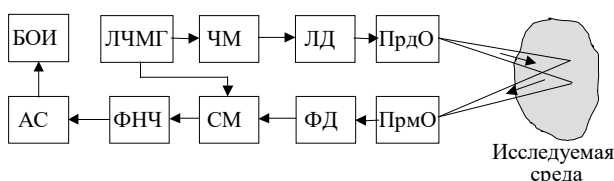


Рис. 1. Функциональная схема непрерывного спектроскопического ладара с пространственным разрешением. ЛЧМГ – генератор колебаний с линейным изменением частоты; ЧМ – частотный модулятор; ЛД – лазерный диод; ПрдО – передающая оптика; ПрмО – приемная оптика; ФД – фотодетектор; СМ – смеситель; ФНЧ – фильтр низких частот; АС – анализатор спектра; БОИ – блок обработки информации

Один из подходов аналитического описания LD-WM-CW-ладара основан на описании текущей частоты лазерного излучения и взаимодействии этого излучения с исследуемым газом [3, 5]:

$$T_L = \exp \left\{ -2\tau \gamma_L^2 / [(\nu(t) - \nu_0)^2 + \gamma_L^2] \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $T_L$  – спектральное пропускание излучения исследуемым газом для лоренцевского контура линии поглощения;  $\nu_0$  – центральная частота линии поглощения газа;  $\nu(t)$  – текущая частота зондирующего излучения;  $\gamma_L$  – полуширина контура поглощения исследуемого газа;  $\tau = \int_0^R N(r) \sigma dr$  –

оптическая толщина пути, проходимого лазерным лучом;  $N(r)$  – концентрация исследуемого газа,  $R$  – расстояние до исследуемого участка трассы;  $\sigma$  – сечение поглощения исследуемого газа в центре линии.

Анализ такой модели LD-WM-CW-ладара проведен в работе [1]. Эта модель позволяет выявить основные свойства системы и получить в аналитическом виде выражения для определения пространственного распределения концентрации исследуемого газа. Однако упомянутый метод описания LD-WM-CW-ладара справедлив только для случаев, когда ширина контура поглощения исследуемого газа намного больше девиации частотной модуляции лазерного излучения по линейному закону, обеспечивающей пространственное разрешение измерений.

Другой метод описания LD-WM-CW-ладара основан на рассмотрении взаимодействия спектральных состав-

ляющих зондирующего излучения с контуром поглощения исследуемого газа [5–7]. Этот подход позволяет учесть эффекты, возникающие в ситуациях, когда девиация линейного изменения частоты излучения становится сравнимой с полушириной контура поглощения  $\gamma_L$ .

Согласно этому подходу электромагнитное поле модулированного излучения представляется в виде

$$E(t) = E_0 \exp [i\varphi(t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E(n w_m) \exp (i n w_m t), \quad (2)$$

где  $E_0$  – амплитуда электромагнитного поля;  $\varphi(t) = \int_0^t \nu(t') dt'$  – зависимость фазы электромагнитного поля от времени;  $i$  – мнимая единица;  $w_m$  – частота модуляции.

После взаимодействия излучения, описываемого выражением (2), с исследуемым газом напряженность электромагнитного поля эхосигнала будет иметь вид [5]:

$$E_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E(n w_m) \exp (i n w_m t) T_L(n w_m). \quad (3)$$

Здесь

$$T_L(\nu) = \exp [-\delta(\nu) - i\phi(\nu)] \quad (4)$$

– комплексная функция пропускания, характеризуемая коэффициентом поглощения излучения  $\delta(\nu)$  и сдвигом фазы излучения  $\phi(\nu)$ .

Различное поглощение спектральных составляющих оптического излучения, описываемого выражением (3), приводит к появлению периодического изменения во времени интенсивности излучения  $I_T(t)$ , пропорционального квадрату модуля напряженности электромагнитного поля.

Сигнал на выходе фотодетектора пропорционален интенсивности падающего на него излучения, описываемого выражением [6]:

$$I_T(t) = c (E_T(t)^* E_T(t))/8\pi, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света;  $E_T(t)^*$  – комплексно сопряженная функция для  $E_T(t)$ .

Временная зависимость тока фотодетектора была рассчитана при помощи численных методов моделирования. В численных расчетах в модель закладывались модулированные по частоте колебания электромагнитного поля излучения лазера длительностью в один период линейного изменения частоты  $T_m$  согласно выражению (2). Далее при помощи быстрого преобразования Фурье находился спектр этих колебаний. Затем вычислялся спектр колебаний электромагнитного поля после его взаимодействия с газом согласно выражению (3). После этого моделировался процесс фотодетектирования, описываемый выражением (5).

На рис. 2 показан спектр принятого эхосигнала как результат взаимодействия электромагнитного поля модулированного излучения с исследуемым газом, полученный при численном моделировании для различных соотношений девиации линейного изменения частоты и ширины контура поглощения газа.

На рис. 3 изображены сигналы на выходе фотодетектора при приеме эхосигнала, имеющих спектры, которые представлены на рис. 2.

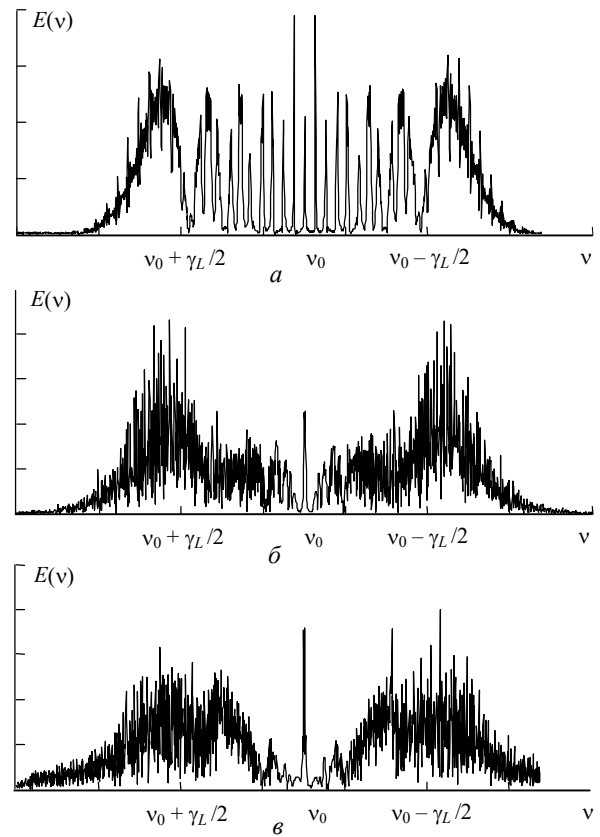


Рис. 2. Расчет спектра эхосигнала после взаимодействия с исследуемым газом: а – девиация линейного изменения частоты  $W = 0,01 \gamma_L$ ; б –  $W = 0,3 \gamma_L$ ; в –  $W = \gamma_L$

Следует учесть, что полуширина контура поглощения  $\gamma_L$  различных газов при нормальных атмосферных условиях составляет величину порядка нескольких гигагерц (например, для аммиака в области 1,5 мкм около 3 ГГц) [1]. Для обеспечения пространственного разрешения измерений порядка единиц метров необходима девиация линейного изменения частоты в несколько десятков мегагерц. Таким образом, ситуация, когда девиация линейного изменения частоты намного меньше ширины контура поглощения исследуемого газа ( $W \ll \gamma_L$ ), является типичной для LD-WM-CW-ладара.

Как видно из рис. 3, взаимодействие частотно-модулированного электромагнитного поля LD-WM-CW-ладара с контуром поглощения газа приводит к появлению на выходе фотодетектора сигнала с линейным изменением частоты.

В случаях, когда девиация поднесущей становится сравнимой с полушириной контура поглощения  $W \approx \gamma_L$  (рис. 3, б, в), происходит изменение амплитуды сигнала в течение периода линейного изменения частоты  $T_m$ , т.е. появляется дополнительная амплитудная модуляция огибающей колебаний. Период этой модуляции равен периоду линейного изменения частоты  $T_m$ . Наличие паразитной амплитудной модуляции объясняется тем, что в течение периода  $T_m$  с линейным изменением частоты изменяются участки контура поглощения, с которыми взаимодействуют спектральные составляющие зондирующего излучения.

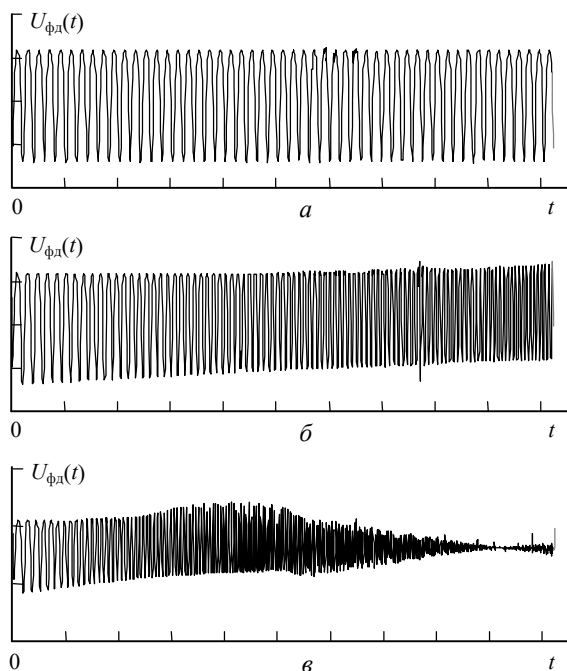


Рис. 3. Расчет сигналов на выходе фотодетектора: *a* – девиация линейного изменения частоты  $W = 0,01 \gamma_L$ ; *б* –  $W = 0,3 \gamma_L$ ; *в* –  $W = \gamma_L$

Паразитная амплитудная модуляция приводит к увеличению ширины спектра дальномерных частот для разрешаемых по дальности участков трассы зондирования и, таким образом, к ухудшению пространственного разреше-

ния измерений по дальности. Ситуация, когда девиация поднесущей сравнима с полушириной контура поглощения  $W \approx \gamma_L$ , может возникнуть при попытках измерить пространственное распределение газа с очень узкой шириной контура поглощения с высоким пространственным разрешением менее 1 м.

При девиации поднесущей, которая намного меньше, чем полуширина контура поглощения газа  $W \ll \gamma_L$  (рис. 3, *a*), что является типичной ситуацией для НСПР-ладара, амплитуда колебаний с линейным изменением частоты на выходе фотодетектора неизменна в течение всего периода линейной модуляции  $T_m$ .

1. *Агисhev P.P., Сагдиев P.K.* Моделирование частотно-модулированного лазера с лазерным диодным излучателем // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2000. № 1. С. 5–10.
2. *Агисhev P.P., Айбатов Л.Р., Власов В.А., Сагдиев P.K.* Дистанционное бесконтактное обнаружение утечек аммиака в цеховых условиях // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 70–74.
3. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
4. *Silver J.A.* Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods // Appl. Opt. 1992. V. 31. N 6. P. 707–717.
5. *Supplee J.M., Whittaker E.A., Lenth W.* Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 27. P. 6294–6302.
6. *Wang L.G., Riris H., Carlisle C.B., Gallagher T.F.* Comparison of approaches to modulation spectroscopy with GaAlAs semiconductor lasers: application of water vapor // Appl. Opt. 1988. V. 27. N 10. P. 2071–2077.
7. *Агисhev P.P.* Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. М.: Машиностроение, 1994. 128 с.

*R.R. Agishev, R.K. Sagdiev. Theoretical description of LD-WM-CW-ladar.*

A series of theoretical models of LD-CW-ladar is under analysis. The results of numerical simulation of the LD-WM-CW-ladar are presented. Some recommendations on choosing the modulation parameters of laser radiation are proposed.