

**С.В. Лазарев**

### **ПОВЫШЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОГЕРЕНТНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО ЛАЗЕРНОГО ПРИЕМА**

Рассмотрены некоторые возможности повышения чувствительности когерентного детектирования оптических сигналов методом внутриврезонаторного лазерного приема, основанные на уменьшении величины относительного уровня накачки за счет изменения внутриврезонаторных потерь, мощности накачки. Экспериментально достигнуто увеличение чувствительности в 8 раз. Другой путь увеличения чувствительности заключается в соответствующем выборе рабочей точки лазера на контуре кривой усиления в месте ее максимального наклона. Экспериментально проанализировано действие рассмотренных механизмов. Получено увеличение чувствительности в 30 раз. Обсуждаются дальнейшие пути ее увеличения.

Когерентные лидары являются основным инструментом для дистанционного лазерного зондирования полей вектора скорости ветра в атмосфере [1 – 3]. Обладая всеми преимуществами когерентного детектирования оптических сигналов – прежде всего чувствительностью и значительной величиной доплеровского сдвига, они имеют также и недостатки, присущие когерентному методу детектирования. Основным источником неприятностей – это искажение волнового фронта вследствие распространения лазерного излучения в атмосфере и при рассеянии на атмосферном аэрозоле.

Учитывая все преимущества когерентных лидаров для дистанционного зондирования ветра, а также и то обстоятельство, что инфракрасные лазеры, используемые в таких лидарах, позволяет выполнять и газоанализ атмосферы, вполне понятно внимание, уделяемое этим системам.

Значительные усилия прикладываются не только к совершенствованию техники когерентных лидаров, но и к разработке новых методов, направленных на повышение возможностей когерентного детектирования. Одним из таких является метод внутриврезонаторного лазерного приема [4–5], позаимствованный из лазерной спектроскопии. Его суть – в использовании передающего лазера в качестве высокоселективного оптического приемного усилителя. Лазерное излучение, рассеянное от атмосферного аэрозоля, топографического объекта и т.д., направляется внутрь лазерного резонатора. Лазер оказывается чрезвычайно чувствительным к <собственному> излучению.

Рассмотрим работу приемопередающего лазера при инъекции слабого оптического излучения в резонатор лазера. При этом будем полагать, что инжектируемое излучение согласовано по волновым и энергетическим параметрам с излучением внутри резонатора.

Динамику генерации будем анализировать с помощью системы балансных уравнений для плотности числа фотонов  $J(\omega, t)$  и плотности инверсной населенности  $N(\omega, t)$ :

$$\begin{aligned} dJ/dt &= \nu J(\omega, t) \{k(\omega, t) - \beta - [2l \ln(r_1 r_2)]^{-1} + (1/2l) \ln [1 + r_{ef} + 2B_c \sqrt{r_{ef}}]\}; \\ dN/dt &= n_0 w_n - [w_n + \nu \sigma J(\omega, t) + \tau^{-1}] N(\omega, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k(\omega, t) = \sigma N(t)$  – коэффициент усиления;  $\beta$  – суммарный коэффициент потерь;  $r_1$  и  $r_2$  – коэффициенты отражения зеркал лазерного резонатора длиной  $l$ ;  $B_c$  – функция когерентности. При диффузном отражении (рассеянии) от внешнего отражателя с индикатрисой  $r_3(\theta)$

$$r_{ef}(\omega) \simeq (R_0/2L)^2 (1 - r_2)^2 (r_3(\theta)/r_2) \exp[-2L\alpha_g(\omega)],$$

где  $R_0$  – радиус приемной апертуры. Во втором уравнении системы (1)  $w_n$  – вероятность вынужденного перехода под действием накачки;  $\tau^{-1}$  – вероятность спонтанных переходов в канале накачки;  $n_0$  – полное число активных центров в единице объема.

Приближенное решение системы (1) для малых отклонений от стационарных значений  $N(t)$  и  $J(t)$  для амплитуды переменной составляющей лазерного отклика в случае периодического внешнего воздействия будет иметь вид

$$\Delta J = \frac{J_0 r_{ef}}{[k - \beta - (2I)^{-1} \ln(1 + r_{ef} + 2B_c \sqrt{r_{ef}})](g - 1)} \quad (2)$$

Здесь  $J_0$  – стационарное значение плотности числа фотонов;  $g$  – относительное превышение уровня накачки над пороговым значением, учитывающее как мощность накачки, так и потери в лазерном резонаторе. При приближении уровня накачки к пороговому значению возрастает величина лазерного отклика  $\Delta J$ . Этим обстоятельством широко пользуются в практике внутррезонаторной лазерной спектроскопии для повышения чувствительности. Однако при  $g \rightarrow 1$  резко возрастают шумы лазерной генерации.

На рис. 1, а представлена зависимость минимально обнаруживаемого коэффициента отражения  $R$  в зависимости от угла поворота плоскопараллельной пластинки из фторида бария, помещенной в резонатор непрерывного газоразрядного  $\text{CO}_2$ -лазера. Лазер имел систему стабилизации частоты генерации и сверхмалощумящий стабилизированный источник питания. Пластинка устанавливалась перпендикулярно оптической оси резонатора, угол установки изменялся от  $90^\circ$  до угла Брюстера  $54,5^\circ$ . Другая возможность использования выражения (2) – изменение разрядного тока (рис. 1, б), что также определяет величину  $g$ . Максимальный уровень сигнала наблюдается при разрядном токе 2,2 мА. При дальнейшем уменьшении разрядного тока наступает срыв генерации. В этом случае наблюдалось увеличение чувствительности примерно в 8 раз. Благодаря эффективной системе стабилизации частоты генерации и малощумящему источнику питания лазера, ожидаемого увеличения флуктуаций лазерного излучения не произошло.

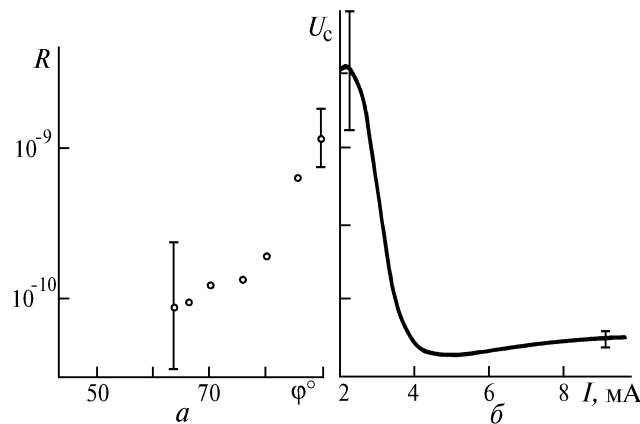


Рис. 1. Зависимость минимально обнаруживаемого коэффициента отражения от величины внутррезонаторных потерь (а) и изменение уровня сигнала фотоприемника  $U_c$  от величины уровня накачки – разрядного тока  $I$  (б)

Описание системы стабилизации и источника питания будет представлено в [7].

Совместное действие внутррезонаторного поглотителя и вариаций разрядного тока заметных результатов не дало. При увеличении внутррезонаторных потерь увеличивалось пороговое значение разрядного тока и наоборот. Значение чувствительности оставалось на достигнутом уровне.

Повышения эффективности когерентного приема можно достичь надлежащим выбором рабочей точки лазера на кривой контура усиления. Располагая рабочую точку лазера в месте

наибольшего наклона кривой усиления, можно максимально увеличить переменную составляющую лазерного сигнала (рис. 2).

Рассмотрим для простоты лоренцовский контур усиления лазера. Зависимость коэффициента усиления от частоты имеет вид [6]

$$k(\omega) = \frac{S}{\pi} \frac{\Delta\omega_{0,5}}{(\omega - \omega_0)^2 + \Delta\omega_{0,5}},$$

где  $S$  – относительная интегральная интенсивность линии;  $\omega_0$  – центр линии, имеющей полуширину  $\Delta\omega_{0,5}$ . Наибольшую крутизну  $k(\omega)$  будет иметь для частот, равных

$$\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \Delta\omega_{0,5}. \quad (3)$$

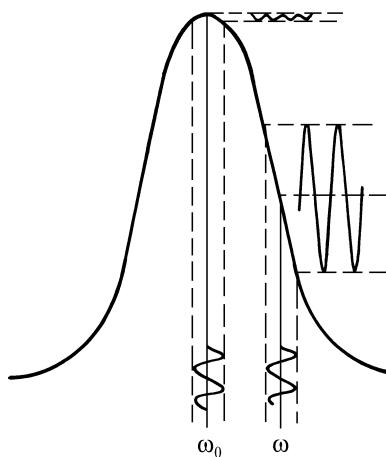


Рис. 2. Изменение величины переменной составляющей лазерного сигнала от расположения рабочей точки лазера на контуре усиления

Как правило, рабочая точка лазера выбирается на вершине кривой  $k(\omega)$ , т.е. при условии  $k'(\omega) = 0$ . На это условие ориентирована работа систем стабилизации частоты генерации практически во всех случаях [8, 9], которые удерживают рабочую точку лазера на вершине кривой по минимуму сигнала ошибки. В нашем случае необходимо удерживать рабочую точку лазера, исходя из условия максимального сигнала. Технически это реализовать не очень просто. Для исследования чувствительности лазера к периодическому слабому внешнему излучению в зависимости от положений рабочей точки на контуре усиления использовалось медленное перемещение выходного зеркала непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера. Схема эксперимента представлена на рис. 3.

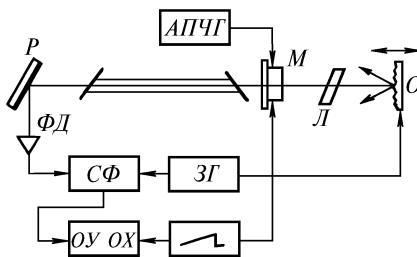


Рис. 3. Блок-схема эксперимента по исследованию влияния расположения рабочей точки лазера на уровень переменной составляющей лазерного сигнала

Резонатор газоразрядного лазера образован дифракционной решеткой  $P$  и зеркалом  $M$ , установленными на пьезокорректоре. Положением зеркала управляет система стабилизации, поддерживающая рабочую точку лазера на вершине кривой усиления. Вывод излучения на пиро-электрический приемник  $\Phi Д$  осуществляется в нулевом порядке. Излучение направлялось на отражатель  $O$ , являющийся поверхностью пьезо-керамического модулятора, на кото-

рый подавалось переменное напряжение от звукового генератора (ЗГ) для модуляции фазы отраженного сигнала. Сигнал с фотодетектора поступал на синхронный фильтр  $СФ$ , управляемый напряжением звукового генератора. Протектированный сигнал подавался на запоминающий осциллограф на вход  $ОУ$ . На развертку  $ОХ$  и на пьезокорректор выходного зеркала  $М$  подается пилообразное напряжение, что обеспечивает линейное во времени изменение частоты лазерной генерации.

На пути распространения лазерного излучения помещался аттенуатор  $A$ , представляющий собой набор дисперсных поглотителей. Использование модуляции рассеянного излучения позволило устранить влияние рассеянного на аттенуаторе паразитного излучения. Полученная зависимость величины сигнала фотоприемника от напряжения (или от положения рабочей точки лазера на контуре усиления), подаваемого на пьезокорректор, представлена на рис. 4, *a*.

Увеличение амплитуды сигнала фотоприемника наблюдалось в максимуме чувствительности, т.е. на одной из частот  $\omega_{1,2}$  примерно в 15 раз. Однако благодаря большому наклону кривой  $k(\omega)$ , лазер становился чрезвычайно чувствительным к любым возмущениям параметров резонатора – механическим, акустическим, термическим, оптическим и т.д. Несмотря на то, что по описанной методике эксперимента повторяемость результатов хорошая (разброс не более 5% для 10 реализаций), наши попытки длительного удержания рабочей точки лазера в месте максимального наклона не дали удовлетворительных результатов. Мы добивались увеличения чувствительности внутрирезонаторного приема, но повторяемость результатов резко ухудшилась, разброс достигал 100%. Это можно объяснить прежде всего несовершенством системы стабилизации частоты генерации, в которой использован принцип стандартной системы АПЧГ по максимуму кривой усиления, т.е. по минимуму сигнала ошибки, а в нашем случае – по максимуму. Поэтому в разработке метода и создании эффективной системы АПЧГ, способной удерживать рабочую точку лазера в месте максимального наклона кривой усиления, заключается один из дальнейших путей повышения чувствительности когерентного внутрирезонаторного приема.

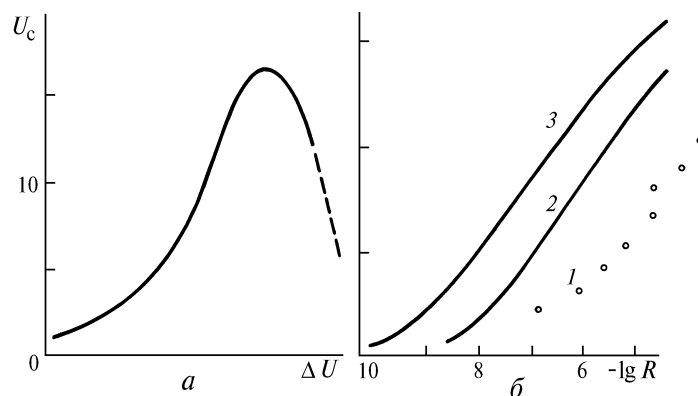


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала фотоприемника от величины смещения выходного зеркала лазера, задаваемого напряжением на пьезокорректоре (*a*); сравнение чувствительности (*б*) при традиционном внерезонаторном смещении – кривая 1; внутрирезонаторном (расположение рабочей точки лазера в максимуме наклона кривой усиления) – 2; внутрирезонаторном (расположение точки то же при максимальном уровне накачки) – 3

В заключение представим результаты совместного действия рассмотренных механизмов повышения эффективности когерентного приема. На рис. 4, *б* представлены результаты сравнения чувствительности традиционного и внутриразрядного оптического фотосмещения при различных режимах.

При совместном действии рассмотренных механизмов можно было бы ожидать увеличения чувствительности на 2,5 – 3 порядка. Однако реально оно составило 1,5 порядка. Это объясняется прежде всего ростом флуктуаций лазерного излучения при создании условий для максимального увеличения чувствительности. Устранение причин, порождающих флуктуации лазерного излучения, заметно сказывается на эффективности когерентного приема. Другая причина заключается в уменьшении коэффициента усиления, что повышает пороговое значе-

ние мощности накачки и уменьшает внутриврезонаторные потери. Однако уменьшение коэффициента усиления не коррелирует с уменьшением ожидаемого увеличения чувствительности.

Таким образом, изменением внутриврезонаторных потерь или величины накачки, а также выбором рабочей точки лазера в месте максимального наклона кривой усиления можно достигнуть значительного увеличения (на 2,5 – 3 порядка) чувствительности лазера к внешнему оптическому излучению лишь при максимальном устранении или минимизации действия источников лазерных шумов и флуктуаций.

1. Ахманов С.А., Гордиенко В.М., Косовский Л.А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1991. Т. 55. N 2. С. 194.
2. Hardesty R. M. // Opt. and Lazer Remote Sensing. Berlin: Heidelberg, N.Y. 1983. Springer. Verlag. 350 P.
3. Henderson S. W., Hale Ch.P., Magee I. R. et al // Opt. Lett. 1991. V. 16. N 10. P. 733.
4. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности / И.В. Самохвалов, Ю.Д. Копытин, И.И. Ипполитов и др. Новосибирск: Наука, 1987. Гл. 4. 267 с.
5. Godlevskii A.P., Zuev V.E., Kopytin Yu.D., Lazarev S.V., Sharin P.P. // Opt. commun. 1987. V. 62. N 6. P. 370.
6. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981. 516 с.
7. Лазарев С.В. // ПТЭ. 1993 (в печати).
8. Гуделев В.Г., Ясинский В.М. Простая система стабилизации частоты газового лазера // ПТЭ. 1980. N 1. С. 215.
9. Okajima S. et al // Infrared Phys. 1985. V. 25. N 3. P. 569.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
1 февраля 1993 г.

**S. V. Lazarev. Extending Possibilities of a Coherent Detection Using an Intracavity Laser Detection.**

In this paper we deal with the problem on extending the sensitivity of a coherent detection of optical signals that uses intracavity laser detection. The desirable effect is reached by lowering the relative level of pumping both by changing the intracavity losses and by decreasing the pump power. Experimentally, we reached an eight fold increase of the detection sensitivity. Another way to increase the detection sensitivity is to choose the operation point of a laser on the amplification curve in a proper place, that is, at its maximum slope. These mechanisms of the sensitivity increase have been studied experimentally. As a result we obtained a 30 fold increase of the detection sensitivity. Some other ways to increase the detection sensitivity are discussed.