

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.521

А.И. Жилиба

**ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ КОГЕРЕНТНОГО ЛИДАРА С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ПРИЕМОМ ЭХОСИГНАЛА НА АИГ : Nd<sup>3+</sup>-ЛАЗЕР. ТЕОРИЯ**

Изучается чувствительность когерентного лидара, в котором АИГ: Nd<sup>3+</sup>- лазер используется как источник зондирующего излучения и в качестве резонансного нелинейного усилителя слабой модуляции эхосигнала. Показана возможность значительного (на четыре порядка) увеличения чувствительности такого способа детектирования эхосигнала по сравнению с прямым детектированием.

**Введение**

Наряду с когерентными лидарами с гетеродинным детектированием эхосигналов исследуются когерентные лидары с другим способом высокочувствительного приема, основанного на использовании резонансного усиления эхосигнала лазером. Эти лидары названы автодинными или ЛП-лидарами. В [1–5] сообщалось об автодинных лидарах на основе СО<sub>2</sub>-лазера.

В связи с тем что лидарные системы на основе твердотельных лазеров имеют малые габариты, длительные время работы, безопасны для глаз, а влияние турбулентности в спектральной области генерации Nd:YAG-лазера несущественно, рассмотрим принципиальные возможности использования Nd:YAG-лазера в автодинном лидаре. В статье показано, что Nd:YAG-лазер в автодинном лидаре является резонансным нелинейным усилителем слабой модуляции эхосигнала еще до его попадания на фотодетектор. В низкочастотной области спектра модуляции эхосигнал может усиливаться в десятки раз. Максимальное усиление эхосигнала происходит в области модуляции, попадающей в резонанс с релаксационными колебаниями Nd:YAG-лазера. Здесь усиление может достигать четырех порядков.

Таким образом, значительное усиление регистрируемого эхосигнала перед попаданием его на фотоприемник позволяет довольно существенно подняться не только над шумами фотоприемного тракта, но и над шумами, обусловленными фоновой засветкой, особенно существенными в дневное время. Чувствительность при определении атмосферно-оптических характеристик будет лимитирована флуктуациями зондирующего сигнала, приобретаемыми в процессе распространения в атмосфере до отражающего объекта и обратно, а также собственными шумами лазера.

В статье приведены выражения для предельных значений коэффициента модуляции зондирующего сигнала, которые можно измерить, когда преобладающим является шум лазера.

**1. Теория**

Принципиальная схема работы когерентного лидара с внутрирезонаторным усилением эхосигнала Nd:YAG-лазером выглядит следующим образом. Зондирующее излучение генерируется Nd:YAG-лазером. Слабый эхосигнал, отраженный от частиц аэрозоля (или от выносного зеркала, топографической мишени и т.д.) собирается с помощью телескопа и направляется в резонатор лазера-излучателя. Результирующий сигнал подается на фотоприемник. Граничное условие на зеркале  $R_1$ , связывающее поля внутри резонатора лазера  $E^{(-)}(l)$ ,  $E^{(+)}(l)$  с полем  $E^{(+)}(l+L)$ , прошедшем путь  $L$  от лазера до отражателя (5) и обратно, имеет вид

$$E^{(-)}(l) = \sqrt{R_1} E^{(+)}(l) + (1 - \sqrt{R_1})^2 \sqrt{R_2(L, \mu t)} \times \\ \times \exp[-\alpha(\mu t)L] E^{(+)}(l+L) \exp[i(\varphi_1 - \varphi_2 + \theta)], \quad (1)$$

где  $R_0$ ,  $R_1$  — коэффициенты отражения зеркал резонатора,  $R_2$  — выносного зеркала или отражающего аэрозольного образования;  $\alpha(\mu t)$  — интегральный коэффициент потерь зондирующего сигнала на трассе до выносного зеркала  $R_2$  и обратно;  $\theta$  — набег фазы зондирующего сигнала на пути от зеркала  $R_1$  до отражателя и обратно.

Если отражатель движется со скоростью  $v_1$  то  $\theta = 4\pi v_1/\lambda$  ( $v_1$  — проекция скорости отражателя вдоль зондирующего луча). Величины  $\alpha(\mu t)$ ,  $R_2(\mu t)$  могут медленно ( $\mu \ll 1$ ) зависеть от времени (по сравнению с временем жизни зондирующих фотонов в резонаторе  $R_0$ ,  $R_1$ ).

Пусть поля  $E^{(+)}(l+L)$ ,  $E^{(+)}(l)$  связаны соотношением  $E^{(+)}(l+L) = BE^{(+)}(l)\exp(2i\kappa L)$ , где  $B$  — коэффициент пространственного и временного согласования эхосигнала с модой резонатора лазера, на которой формируется зондирующий сигнал. Тогда (1) будет иметь вид

$$E^{(-)}(l, t) = \sqrt{R_1} E^{(+)}(l, t) [1 + \text{Re} \langle \varepsilon(\mu t) \rangle],$$

где

$$\text{Re} \langle \varepsilon(\mu t) \rangle \equiv \langle B \exp[-\alpha L] \cos(2\kappa L + \theta) (1 - \sqrt{R_1})^2 \sqrt{R_2} / \sqrt{R_1} \rangle,$$

$\langle \dots \rangle$  обозначает усреднение, так как в общем случае  $\alpha$ ,  $R_2$ ,  $\theta$ ,  $L$  — случайные величины. Тем самым описание приема эхосигнала на лазер сводится к известной задаче лазера с модулированными потерями [6]. Нас интересует детектирование сверхслабых эхосигналов, поэтому мы с уверенностью остаемся в рамках описания линейного режима модуляции, т. е. вдали от режима, когда может произойти навязывание лазеру новой частоты генерации. В связи с этим уравнение для фазовой переменной не включаем в дальнейшее описание. С учетом (1) и (2) система уравнений, описывающая динамику числа фотонов генерируемой моды  $n$  и инверсной заселенности генерирующих атомов  $N$  в резонаторе, имеет вид [7–9]

$$\begin{aligned} \dot{n} &= -Cn + gnN; \\ \dot{N} &= \Lambda - N/T - gnN, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $C = c \setminus [2 - \sqrt{R_0} - \sqrt{R_1}(1 + \text{Re} \langle \varepsilon \rangle) + 2\alpha_0 l]$  — скорость выхода фотонов из резонатора лазера;  $g$  известным образом зависит от параметров активной среды и резонатора;  $\Lambda$  — скорость накачки на верхний рабочий уровень;  $T$  — время релаксации разности заселенностей.

Спектральная компонента амплитуды отклика фототока на изменение выходной мощности лазерного излучения  $P_{\text{вых}}$  в результате его модуляции эхосигналом имеет вид

$$(\delta i)_{\Omega}^{\text{лп}} = \frac{qe}{h\nu} \frac{\text{Re} \langle \varepsilon \rangle_{\Omega}}{\kappa} P_{\text{вых}} F(\Omega), \quad (4)$$

где  $\kappa \equiv (2 - \sqrt{R_0} - \sqrt{R_1} + 2\alpha_0 l)$  — суммарные потери внутри резонатора лазера без воздействия эхосигнала;  $q$  — квантовая эффективность фотоприемника;  $F(\Omega)$  — спектр функции отклика Nd:YAG-лазера на модуляционное воздействие. При прямом детектировании одинаковое модуляционное воздействие на зондирующий сигнал той же выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  приводит к следующему изменению фототока:

$$(\delta i)_{\Omega}^{\text{н.л}} = \frac{qe}{h\nu} \text{Re} \langle \varepsilon \rangle_{\Omega} P_{\text{вых}}. \quad (5)$$

Отношение  $(\delta i)_{\Omega}^{\text{лп}} / (\delta i)_{\Omega}^{\text{н.л}} \equiv \Gamma$  и имеет вид

$$\Gamma = F(\Omega) / \kappa. \quad (6)$$

Рассмотрим два характерных случая: 1)  $\Omega \ll \Omega_{\text{рел}}$ , 2)  $\Omega \sim \Omega_{\text{рел}}$ , где  $\Omega_{\text{рел}}$  — частота релаксации Nd:YAG-лазера. В первом варианте  $F(\Omega) = m/m - 1$ , во втором  $F(\Omega_{\text{рел}}) = \frac{c\kappa T}{2l m}$  [8, 9], где  $m$  характеризует превышение накачки над порогом генерации. Пусть  $\kappa = 0,1$ ,  $m = 2$ ,  $l = 0,5$  м и известно [10], что  $T \sim 2,3 \cdot 10^{-4}$ . Тогда в первом случае  $\Gamma \approx 0$ , а во втором  $\Gamma \approx 3,45 \cdot 10^4$ . Таким образом, Nd:YAG-лазер выступает как резонансный нелинейный усилитель слабой модуляции эхосигнала. Максимальное усиление испытывает модуляция на частоте релаксационных колебаний. В случае такого значительного усиления эхосигнала основным источником шума является шум лазерного излучения. На основе выражения (4) и известного выражения для спектра мощности шума Nd:YAG-лазера [10, 11] запишем отношение сигнал/шум в двух характерных спектральных областях;  $\Omega \ll \Omega_{\text{рел}}$  и  $\Omega \sim \Omega_{\text{рел}}$ . В обоих случаях отношение сигнал/шум имеет вид

$$(S/N)_{\Omega \approx 0}^{\text{лп}} = \left( \frac{qP_{\text{вых}}}{2h\nu\Delta f} \right)^{1/2} \frac{\text{Re} \langle \varepsilon \rangle}{\kappa} \frac{m}{m-1}; \quad (7)$$

$$(S/N)_{\Omega \approx \Omega_{\text{рел}}}^{\text{лп}} = \left( \frac{\alpha/2\tau P_{\text{в.л.}}}{2h\nu\Delta f} \right)^{1/2} \frac{\text{Re} \langle \epsilon \rangle}{\alpha}. \quad (8)$$

На основе (7), (8) оценим для примера минимально-обнаруживаемый коэффициент отражения  $R_2^{\text{min}}$ , используя условие сигнал/шум = 1. В низкочастотной области спектра модуляции  $R_2$  имеем

$$(R_2^{\text{min}})_{\Omega \approx 0}^{1/2} = \left( \frac{2h\nu\Delta f}{qP_{\text{в.л.}}} \right)^{1/2} \frac{m-1}{m} \alpha \frac{V\bar{R}_1(1-V\bar{R}_1)^{-2}}{B \exp(-\alpha L)}, \quad (9)$$

в области релаксационных колебаний

$$(R_2^{\text{min}})_{\Omega \approx \Omega_{\text{рел}}}^{1/2} = \left( \frac{2h\nu\Delta f}{\alpha/2\tau P_{\text{в.л.}}} \right)^{1/2} \alpha \frac{V\bar{R}_1(1-V\bar{R}_1)^{-2}}{B \exp(-\alpha L)}. \quad (10)$$

### Заключение

Любые измерения параметров атмосферы или движущихся в ней и отражающих зондирующий сигнал объектов, которые проводятся с использованием Nd:YAG-лазера и прямого детектирования, можно с большей эффективностью проводить на основе когерентного лидара с внутриврезонаторным приемом эхосигнала на Nd:YAG-лазер. Залогом большей эффективности в данном случае является значительное резонансное усиление эхосигнала еще до его попадания на фотодетектор. Это позволяет, в частности, избавиться от обычно ограничивающего чувствительность лидара шума, обусловленного фоновой засветкой дневного неба. Своеобразной платой за значительный выигрыш в чувствительности в окрестности частоты релаксационных колебаний является ухудшение временного разрешения эхосигнала.

В заключение отмечу, что фактор резонансного усиления эхосигнала в лидарной системе с CO<sub>2</sub>-лазерным внутриврезонаторным приемом экспериментально изучался в [12].

1. Churnside J. H. // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 61.
2. Ibid. P. 2097.
3. Gordov E. P. et al. // Appl. Opt., 1987. V. 20. P. 1607.
4. Годлевский А. П., Гордов Е. П., Жилиба А. И., Шарин П. П. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 1. С. 25.
5. Жилиба А. И., Шарин П. П. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 2. С. 210.
6. Мак А. А., Орлов О. А., Устюгов В. И. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. С. 2112.
7. Haken H. Laser Theory. Berlin. Springer. 1970. 320 s.
8. Mc Cumber D. E. // Phys. Rev. 1966. V. 141. P. 306.
9. Danielmeier H. G. // Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 4014.
10. Климонтович Ю. Л., Ковалев А. С., Ланда П. С. // УФН. 1972. В. 106. С. 279.
11. Калмыкин А. А., Мак А. А., Орлов О. А., Устюгов В. И. // Доклад V Вавиловской конф. по нелинейной оптике. Новосибирск, 1977.
12. Шарин П. П. Исследование возможностей зондирования характеристик атмосферы на основе внутриврезонаторных эффектов в CO<sub>2</sub>-лазере. Диссертация. Томск, ИОА СО РАН. 1992. 191 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
10 июля 1992 г.

A. I. Zhiliba. **Signal-to-Noise Ratio in a Coherent Lidar with an Intracavity Detection of Return Signals Using a Nd : YAG<sup>+</sup> Laser. Theory.**

Sensitivity of a coherent lidar with a Nd:YAG laser used both as a source of sounding radiation and as a resonance nonlinear amplifier of a weak return signal modulation is investigated. It is shown that an essential (up to four orders of magnitude) increase in the sensitivity can be expected by using this method of return signal detection compared to a direct detection.