

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 533.6.08

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЖИМА
СИНХРОНИЗАЦИИ МОД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАЗРЕШЕНИЯ МОНОСТАТИЧЕСКОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЛИДАРА**

В. И. Берсенеv, Л. Н. Капцов, А. В. Приезжев

(кафедра общей физики и волновых процессов)

1. **Введение.** С развитием лазеров для дистанционного определения скорости ветра в атмосфере стали использовать доплеровские лидары на одночастотных CO₂-лазерах с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм [1]. Пространственное разрешение ΔL для непрерывных моностатических систем определяется дифракционной длиной и дальностью фокусировки зондирующего излучения F [1]. Обычно $\Delta L=2+20$ м при $F\sim 100$ м. Использование лазеров в режиме синхронизации мод (СМ) может на два порядка улучшить пространственное разрешение, так как в этом случае оно будет определяться длительностью пикосекундных импульсов. Для изучения такой возможности был собран лабораторный лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) на Nd:YAG-лазере с $\lambda=1,06$ мкм, являющийся фактически макетом доплеровского лидара.

Принцип действия ЛДИС состоит в определении доплеровского сдвига частоты ω_D лазерного излучения, рассеянного движущимися со скоростью V частицами [1]. При рассеянии назад

$$\omega_D = (4\pi/\lambda) V_{11},$$

где V_{11} — проекция скорости V на направление зондирования.

2. **Описание установки.** Схема ЛДИС представлена на рис. 1. Излучение Nd:YAG-лазера, работающего в режиме СМ, делится пластиной 2 на опорный и зондирующий (со средней мощностью $P\sim 0,5$ Вт) пучки. Последний фокусировался на поверхность вращающегося диска 1. Рассеянное назад излучение (сигнальный пучок) смешивалось с опорным пучком на лавинном фотодиоде 3, происходило оптическое гетеродинирование и ток фотодиода оказывался промодулированным с частотой ω_D . Излучение, попадающее на фотодиод, ослаблялось с помощью светофильтров. Сигнал с фотодиода поступал на спектроанализатор, с помощью которого осуществлялись построение его спектра и контроль качества СМ по анализу спектра межмодовых биений. Качество СМ также контролировалось с помощью осциллографа.

3. **Результаты.** Излучение Nd:YAG-лазера, работающего в непрерывном режиме, содержит несколько продольных мод, причем его спектральный состав меняется за счет подавления и возникновения мод. Ширина моды $\Delta\omega$, оцениваемая по ширине межмодовых биений, не превышает 200 кГц. Выражения для поля опорного и сигнального пучков E_r и E_s можно записать в виде суммы гармонических составляющих [2]:

$$E_r(t) = \exp(i\omega t) \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} A_r^{(k)} \exp[i(k\Omega t + \varphi_k)],$$

$$E_s(t) = \exp[i\omega(t - \tau)] \exp(i\omega_D t) \sum_{k=-(N-1)/2}^{N-1)/2} A_s^{(k)} \exp\{i[k\Omega(t - \tau) + \varphi_k]\},$$

где ω — центральная частота спектра, N — число продольных мод, $\Omega = \pi c/l_0$ — частота межмодовых биений, l_0 — длина резонатора, c — скорость света, φ_k — фаза k -й моды, $A_r^{(k)}$, $A_s^{(k)}$ — амплитуды поля k -й моды опорного и сигнального пучков, $\tau = 2(L-l)/c$ — задержка сигнального пучка, l — длина опорного плеча интерферометра, L — расстояние до движущегося рассеивателя (см. рис. 1).

Составляющую фототока i_s , несущую информацию о частоте модуляции ω_D , а значит, и о скорости V_{11} , можно представить в виде [1]

$$i_s = \sigma \operatorname{Re} \int_s \langle E_s(t - \tau) E_r^*(t) \rangle ds = \sigma \operatorname{Re} B(\tau),$$

где $\sigma = \text{const}$, s — площадь фотоприемника, $B(\tau)$ — корреляционная функция поля (усреднение за время регистрации $2\pi/\omega \ll T \ll 2\pi/\Omega$).

Рассмотрим для простоты излучение лазера, состоящее из набора мод равной амплитуды: $A_s^{(k)} = A_s$, $A_r^{(k)} = A_r$. Тогда при СМ, когда все $\varphi_k = 0$, для i_s можно записать [2]

$$i_s = QR \cos(\omega_D t - \omega\tau), \quad (1)$$

$$Q = \sigma \text{Re} \int_s \langle A_s A_s^* \rangle ds, \quad (2)$$

$$R = \frac{\sin N\Omega(t - \tau)/2}{\sin \Omega(t - \tau)/2} \frac{\sin N\Omega t/2}{\sin \Omega t/2}. \quad (3)$$

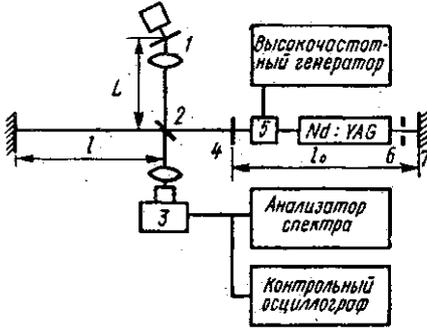


Рис. 1. Схема ЛДИС на Nd:YAG-лазере: 1 — вращающийся диск, 2 — делительная пластина, 3 — лавинный фотодиод, 4, 7 — зеркала резонатора, 5 — акустооптический модулятор, 6 — диафрагма для выделения основной поперечной моды

Из (3) следует, что в интервале времени $T \approx 2\pi/\omega_D$ R достигает максимальных значений при $\tau = (2\pi/\Omega)k$, $k = 0, 1, 2, \dots$ (для характерных скоростей ветра $\Omega \sim 10 - 20 \omega_D$), т. е. при полном совпадении импульсов опорного пучка с импульсами, рассеянными на движущемся диске.

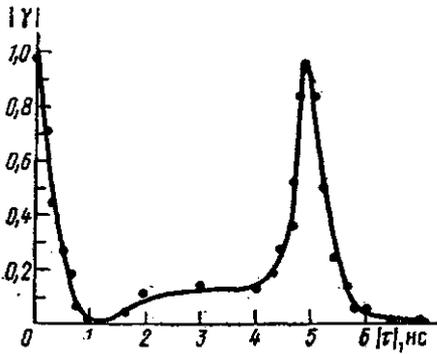


Рис. 2. Нормированная корреляционная функция $|\gamma(|\tau|)$. Длительность импульсов по уровню 0,5 $T_0 \approx 500$ пс

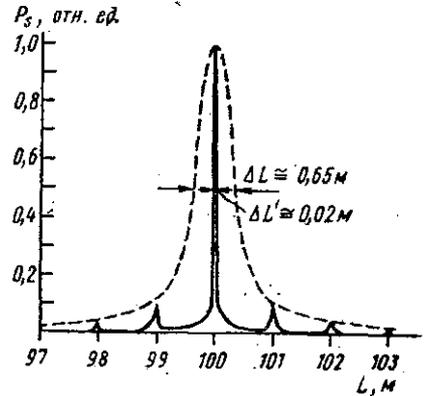


Рис. 3. Рассчитанная мощность P_s доплеровского сигнала, принимаемого с единицы длины трассы, в зависимости от расстояния до лидара L . Пунктиром показана зависимость P_s от L для одночастотного режима работы лазера, обычно используемого в лидарах

Зависимость от $|\tau|$ нормированной на единицу амплитуды i_s , полученная с помощью спектроанализатора на ЛДИС, т. е. фактически нормированная корреляционная функция $|\gamma(|\tau|)|$ [2], приведена на рис. 2.

Изменение τ осуществлялось изменением длины опорного плеча l . Ширина пиков определяется длительностью пикосекундных импульсов T_0 , а расстояние между ними — длиной резонатора, т. е. в пространстве локализуются слои толщиной $\Delta L' = 1 - 10$ см, из которых приходит основная часть доплеровского сигнала. Подобная слоистая структура может быть получена при использовании непрерывного лазера, стабильно генерирующего несколько продольных мод [3].

Мощность доплеровского сигнала определяется квадратом i_s [1]:

$$i_s^2 = Q^2 R^2 \cos^2(\omega_D t - \omega_0 \tau),$$
$$Q^2 = \frac{Q_0}{L^2 [1 + (\pi r^2 / \lambda L)^2 (1 - L/F)^2]},$$

где $Q_0 = \text{const}$, r — радиус апертуры приемопередающей системы (линзы или телескопа), F — расстояние, на котором фокусируется зондирующее излучение.

Для лидара на одностотном лазере Q^2 определяет пространственное разрешение $\Delta L = \frac{8}{\pi} \left(\frac{F}{D}\right)^2 \lambda$ (при $\Delta L \ll F$) [1].

На рис. 3 представлена рассчитанная нормированная мощность доплеровского сигнала P_s , принимаемого с единицы длины трассы при $F=100$ м, $r=0,125$ м. В этом случае расстояние до измерительного объема определяется величиной F , а его длина $\Delta L' \sim 1-10$ см (при выполнении условия $\Delta L < 2l_0$) — длительностью пикосекундных импульсов. Улучшение пространственного разрешения на два порядка приводит к соответствующему уменьшению отношения сигнал/шум κ доплеровского лидара ($\kappa \sim 1-10$ для коэффициента обратного рассеяния $\beta = 10^{-5} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, эффективности приемной системы $\eta = 0,5$, ширины спектра доплеровского сигнала $\Delta \omega_D = 5$ МГц, определяемой распределением частиц аэрозоля в воздухе по скоростям, $P = 10$ Вт [1]).

4. Заключение. Использование в моностатическом доплеровском лидаре Nd:YAG-лазера, работающего в режиме СМ, может дать возможность проводить практически точечные измерения скорости ветра на расстояниях порядка 100 м, что важно для изучения атмосферной турбулентности и решения других задач физики атмосферы [1]. При определенном радиусе приемопередающего телескопа r и фокусном расстоянии F можно проводить многоточечные измерения, которые могут оказаться полезными для диагностики воздушных потоков в аэродинамических трубах, для гидрофизических измерений и т. п. Оптическая часть и устройства обработки информации в подобных системах существенно не усложняются по сравнению с моностатическими доплеровскими лидарами на непрерывных лазерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Берсенева В. И., Приезжев А. В. Деп. ВИНТИ № 7988-В. М., 1985.
[2] Ахманов С. А. и др. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. [3] Васильев А. В. и др. // Кр. сообщ. по физике ФИАН СССР. 1980. № 13. С. 13—19.

Поступила в редакцию
04.03.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 1

УДК 535.34:535.375

О ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КРАСИТЕЛЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. Д. Рыжиков, Л. Ю. Горбунова

(кафедра общей физики для физического факультета)

Исследование влияния различных примесей на спектральные характеристики растворов органических красителей связано с необходимостью изучения фотоэнергетики красителей и создания на основе их растворов более совершенных активных сред [1]. В качестве искусственно вводимых примесей часто используются поверхностно-активные вещества (ПАВ), уменьшающие ассоциацию молекул красителей и понижающие порог генерации [2]. Однако присутствие в растворах даже малых концентраций ПАВ значительно усложняет спектральную картину, изменяя абсорбционные и люминесцентные свойства красителей [3]. Так, например, в работе [4] отмечалось существенное уменьшение поглощательной и генерационной способностей растворов родаминов при небольшом (до 10^{-5} моль/л) содержании ионогенного ПАВ — додецилсульфата натрия (ДСН). Авторы работы [4] связывают наблюдаемое уменьшение поглощательной способности с выпадением осадка. В работе [5] для