

С.Д. Бураков, А.П. Годлевский, С.А. Останин

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ КОГЕРЕНТНЫМ АВТОДИННЫМ ЛИДАРОМ

В работе представлены результаты экспериментов по определению профиля отражающих объектов когерентным автодинным лидаром. Определены требования к величине доплеровского сдвига частоты.

Лазерные автодинные доплеровские лидары могут успешно использоваться для дистанционных измерений таких характеристик движущихся поверхностей [1–3], как параметры колебаний, скорость, альbedo, дальность.

В настоящей статье исследуются возможности дистанционного определения профиля объектов когерентным автодинным лидаром. Рассмотрим простейшую когерентную автодинную доплеровскую систему (рис. 1), в которой сдвиг частоты зондирующего излучения происходит при отражении от движущейся нормально к лучу поверхности 2. Фотоприемник 3 регистрирует сигнал на частоте сдвига  $\Delta f$ , измеряя которую можно получить информацию о скорости движения отражающего объекта:  $\Delta f = |kv|$ . Данная схема детектирования не позволяет определять направление движения, так как  $|(f_0 + kv) - f_0| = |(f_0 - kv) - f_0| = kv$ . Однако в некоторых случаях можно получить дополнительные данные о параметрах отражающей поверхности. Так, например, если известно, что поверхность осуществляет периодические колебания (поверхность вибрирующего станка, вал турбины и т.п.), то частоту доплеровского сдвига можно связать с частотой колебания поверхности  $f_{\text{кол}}$  и амплитудой колебаний  $x_0$ :  $\Delta f = 2f_{\text{кол}}x_0k$ .

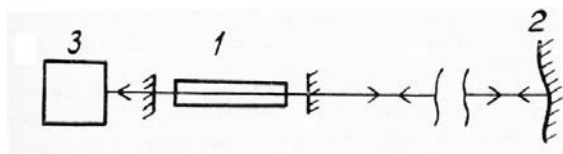


Рис. 1. Блок-схема простейшего автодина: 1 — лазер; 2 — поверхность; 3 — фотоприемник

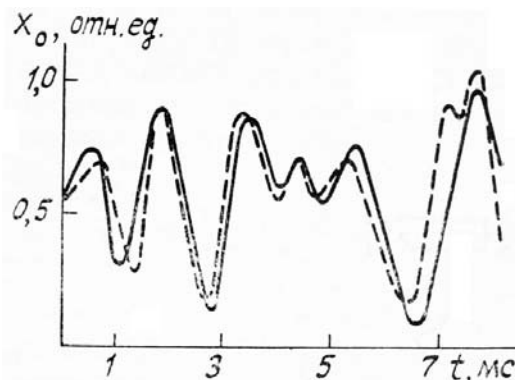


Рис. 2. Измерения амплитуды колебания: сплошная линия — измерения доплеровским автодином; пунктирная линия — измерения пьезодатчиком

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты измерения амплитуды колебаний поверхности ротационной машины, выполненные лазерным доплеровским автодином и пьезодатчиком. В том случае, когда относительное движение осуществляется в направлении, перпендикулярном оптическому пучку, в спектре сигнала содержится информация о характере профиля отражающей поверхности. Медленным изменениям профиля соответствуют малые скорости относительного движения и низкие частоты сдвига доплеровского сигнала, и наоборот. На рис. 3 представлены спектры сигналов самолетного лазерного автодинного доплеровского лидара, полученные при зондировании поверхности озера (а) и поля (б). Высота полета составляла 800 и 710 м, скорость около 190 км/ч. Измерения были проведены летом 1987 года с борта самолета-лаборатории Ил-14. Оптическая схема лидара аналогична схеме, представленной на рис. 1. Излучение коллимировалось зеркальным телескопом типа Кассегрена с апертурой 160 мм. Мощность непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера составляла 2,7 Вт. При измерениях регистрировалась часть излучения, отраженная от брюстеровского окна газоразрядной трубки. В качестве детектора оптического излучения использовался фотоприемник типа ФСГ-22А, охлаждаемый до температуры 77°К.

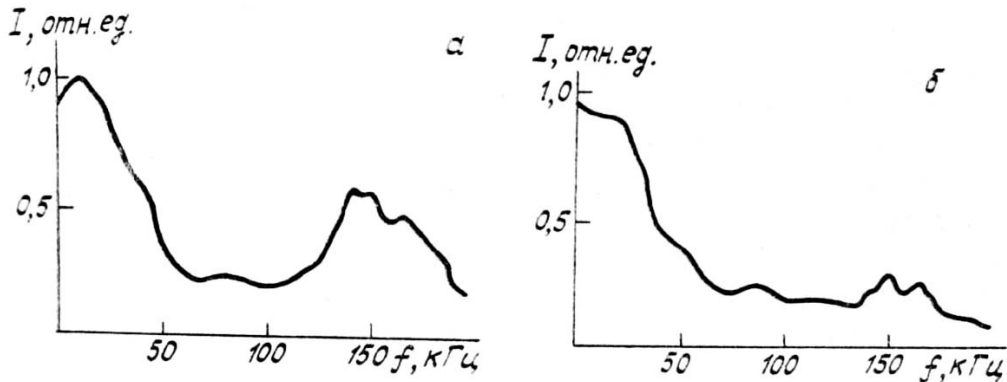


Рис. 3. Спектры сигнала при зондировании поверхности озера (а); поверхности поля (б)

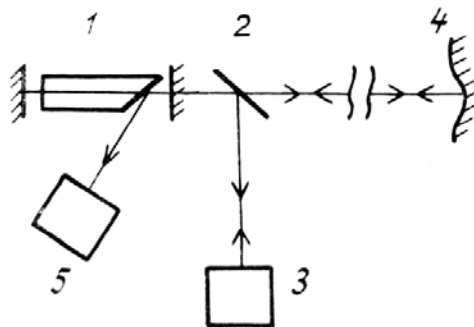


Рис. 4. Блок-схема автодина со сдвигом частоты: 1—CO<sub>2</sub>-лазер; 2—делительная пластинка; 3—устройство сдвига частоты; 4—поверхность; 5—фотоприемник

Для однозначного определения направления движения отражающей поверхности обычно используют оптические схемы со смещением частоты. Такое решение можно использовать и в автодинных системах. Однако при этом возникают некоторые специфические особенности. Рассмотрим вариант лазерного автодинного доплеровского лидара, блок-схема которого изображена на рис. 4. Лазер 1 генерирует излучение на частоте  $f_0$ , часть которого отводится светоделительной пластинкой 2 на устройство сдвига частоты (например, вращающийся диск), а другая часть проходит до отражающего или рассеивающего объекта и поступает обратно в лазер. В резонаторе таким образом смешиваются три волны с частотами  $f_0$ ,  $f_1$  (частота излучения, поступающего с устройства сдвига частоты) и  $f_s$  (частота излучения, отраженного от движущейся поверхности). При этом фотоприемник 5 регистрирует три доплеровских сигнала на частотах  $f_1 = |f_0 - f_s|$ ,  $f_2 = |f_1 - f_s|$ ,  $f_3 = |f_0 - f_1|$ . Сигнал на частоте  $f_3$  не несет полезной информации и задерживается режекторным фильтром. Условие, при котором направление и скорость движения отражающей поверхности определяется однозначно, выглядит достаточно просто:

$$v_l \geq 2 v_{\max}, \quad (1)$$

где  $v_l$  — линейная скорость отражающей поверхности диска в устройстве сдвига частоты;  $v_{\max}$  — максимальная из всех возможных скоростей движения лидара относительно поверхности земли. Покажем справедливость условия (1). Условие (1) можно переписать в виде

$$f_s < (f_l + f_0)/2.$$

Предположим

$$f_s > \frac{f_l + f_0}{2}, \text{ или } f_s = \frac{f_l + f_0}{2} + \Delta f. \quad (2)$$

Тогда можно записать выражения для двух пар доплеровских сигналов, которые соответствуют различным скоростям движения отражающей поверхности:

$$\begin{aligned} f_1 &= \left| f_0 - \left( \frac{f_l + f_0}{2} + \Delta f \right) \right|; & f'_1 &= \left| f_0 - \left( \frac{f_l + f_0}{2} - \Delta f \right) \right|; \\ f_2 &= \left| f_l - \left( \frac{f_l + f_0}{2} + \Delta f \right) \right|; & f'_2 &= \left| f_l - \left( \frac{f_l + f_0}{2} - \Delta f \right) \right|. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда видно, что при двух различных скоростях движения

$$v = \left( \frac{f_1 + f_0}{2} + \Delta f \right) / \kappa \text{ и } v' = \left( \frac{f_1 + f_0}{2} - \Delta f \right) / \kappa \quad (4)$$

имеем две одинаковые пары доплеровских частот

$$f_1 = f'_2, f_2 = f'_1.$$

Таким образом, при условии (2) возникает неоднозначность. Если  $f_s = \frac{f_1 + f_0}{2}$ , то  $f_1 = f_2$ . В том случае, когда выполняется условие (1), скорость определяется однозначно, то есть каждой паре доплеровских частот соответствует единственное значение скорости.

С точки зрения направления движения отражателя существует три ситуации:

- 1)  $f_1 + f_2 < f_3$ , что соответствует приближению отражателя,
- 2)  $f_1 = f_2 = f_3$  (отражатель покоится),
- 3)  $f_1 + f_2 > f_3$  (отражатель удаляется).

Поскольку, кроме состояния покоя,  $f_2 > f_1$  и учитывая, что на практике удобно пользоваться простыми критериями, (1) и (3) можно заменить следующими условиями:  $f_{\max} < f_3$  и  $f_{\max} > f_3$ . Так как, кроме состояния покоя  $f_{\min} = f_1$ , то значение и знак скорости определяются следующим образом:

$$v = \begin{cases} \lambda f_{\min} / 2\pi, & \text{если } f_{\max} < f_3; \\ 0, & \text{если } f_{\min} = f_{\max} = f_3; \\ -\lambda f_{\min} / 2\pi, & \text{если } f_{\max} > f_3. \end{cases} \quad (5)$$

Скорость относительного движения (5) можно связать с профилем протяженной поверхности, если лидар или поверхность перемещаются вдоль прямой, перпендикулярной оптическому пучку. Свяжем декартову систему координат и начало отсчета с поверхностью. Пусть излучение распространяется вдоль оси абсцисс, а относительное перемещение лидара и поверхности как целого вдоль оси ординат. Тогда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v_y}{v_x}, \quad (6)$$

где  $(x, y)$  — координаты точки поверхности, отражающей излучение;  $v_x$  — скорость относительного перемещения перпендикулярно пучку;  $v_y$  — относительная скорость перемещения вдоль пучка (приближение, удаление). Из (6), (5) следует, что с учетом (5) профиль поверхности с точностью до постоянной находится следующим образом:

$$y(\Delta t) = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi} \int_t^{t+\Delta t} f_{\min}(t) dt, & \text{если } f_{\max} < f_3; \\ 0, & \text{если } f_{\min} = f_{\max} = f_3; \\ -\frac{\lambda}{2\pi} \int_t^{t+\Delta t} f_{\min}(t) dt, & \text{если } f_{\max} > f_3. \end{cases}$$

В том случае, когда  $\Delta x$  мало (например,  $\Delta x \ll \rho_y$ , где  $\rho_y$  — радиус пространственной автокорреляции функции  $y(\Delta x)$ ),  $y(\Delta x)$  будет достаточно гладкой функцией без потерь высших пространственных частот.

В лабораторном эксперименте, проведенном по изложенной методике, использовалась оптическая схема, изображенная на рис. 5.

В качестве источника излучения использовался автоматизированный перестраиваемый непрерывный СО<sub>2</sub>-лазер, который содержит серийную газоразрядную трубку ГЛ-501 1, зеркало резонатора 2, закрепленное на пьезокорректоре, дифракционную решетку 3 (100 штрихов/мм), диафрагму 4 для селекции поперечных мод, поворотное зеркало 5 и фотоприемник 6. Перестройка лазера по длинам волн осуществляется поворотом зеркала 2 вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка. Точная настройка на центр линии осуществляется пьезокорректором, на котором крепится зеркало 2. Процессом грубой и точной настройки управляет микроЭВМ.

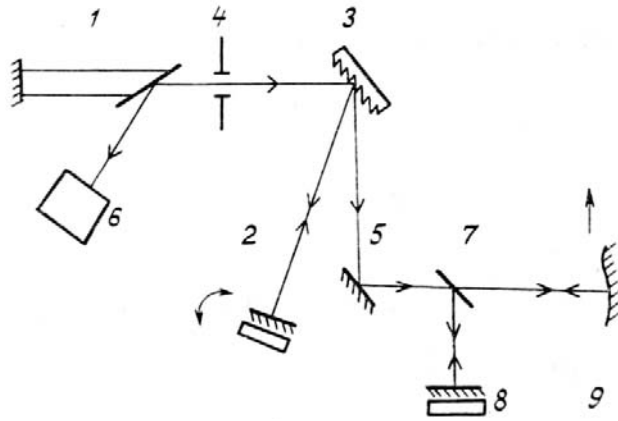


Рис. 5. Блок-схема автодина с перестраиваемым по частоте лазером: 1 — газоразрядная трубка  $\text{CO}_2$ -лазера; 2 — зеркало резонатора на пьезокорректоре; 3 — дифракционная решетка; 4 — диафрагма; 5 — поворотное зеркало; 6 — фотоприемник; 7 — делительная пластинка; 8 — зеркало на пьезокорректоре; 9 — отражающая поверхность

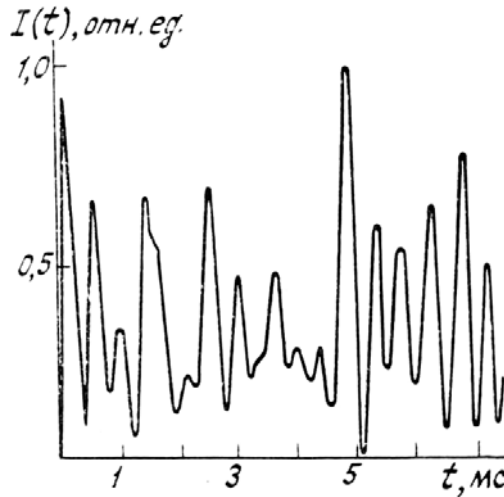


Рис. 6. Сигнал фотоприемника

Выходное излучение делится пластиной 7 из КВг на два пучка излучения. Устройство сдвига частоты выполнено в виде зеркала 8, закрепленного на пьезокорректоре, и приводится в движение пилообразным напряжением с частотой 100 Гц. Амплитуда напряжения, подаваемого на пьезокорректор, устанавливается такой, что выполняется условие (1), где  $v_l$  — скорость движения зеркала. Поверхность 9 транспортировалась в направлении, перпендикулярном оси пучка, со скоростью 1 см/с. Сигнал фотоприемника 6 на частоте  $\omega = f_{\min}$ , выделяемый полосовым фильтром, показан на рис. 6. На рис. 7, 8 представлены соответственно демодулированный сигнал и результат восстановления профиля отражающей поверхности.

При зондировании поверхностей, имеющих сложный профиль, не выполняются условия, необходимые обычно для ЧМ-демодуляции:  $\Omega \ll \omega_0$ ,  $\omega_m \ll \omega_0$ , где  $\Omega$  — девиация;  $\omega_0$  — центральная частота;  $\omega_m$  — частота модулирующей функции. При этом частота сигнала существенно изменяется на интервале времени, равном периоду. Для обработки подобных сигналов использовался следующий метод демодуляции. В предположении, что на интервале времени  $\Delta t \ll \frac{2\pi}{\omega_0}$  частота сигнала  $\omega$  постоянна, ее можно определять следующим образом:

$$\omega = \frac{1}{\Delta t} \sqrt{-\frac{I(\Delta t)}{I(\Delta t)}} = \frac{1}{t_i - t_{i-1}} \sqrt{2 - \frac{I(t_{i-1}) + I(t_{i+1})}{I(t_i)}}. \quad (7)$$

При реализации демодулятора на ЭВМ в точках перегиба функции  $I(\omega)$ , как видно из (7), возникает неопределенность типа деления нуля на нуль. Это проявляется в том, что функция  $\omega(t)$  имеет выбросы. Чтобы их избежать, вычисление  $\omega(t)$  в точке перегиба не производится, а утраченное зна-

чение восстанавливается интерполяцией. Этим способом проведена демодуляция доплеровского сигнала при восстановлении профиля (рис. 8).

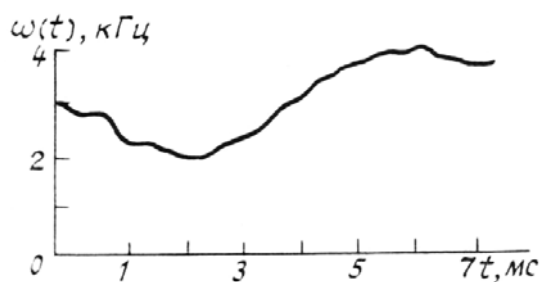


Рис. 7. Результат демодуляции

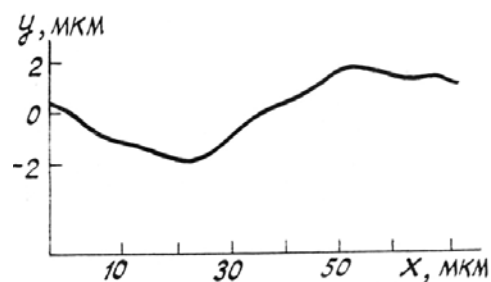


Рис. 8. Восстановленный профиль отражающей поверхности

Таким образом, показана возможность дистанционного определения профиля отражающих или рассеивающих поверхностей когерентным автодинным лидаром.

1. Бураков С. Д., Годлевский А. П., Останин С. А., Солдаткин Н. П. // *Нелинейная оптика и оптоакустика атмосферы*. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 133–138.
2. Бураков С. Д., Годлевский А. П., Останин С. А. // *Оптика атмосферы*. 1989. Т. 2. № 2. С. 206–210.
3. Burakov S. D., Godlevskii A. P., Ostanin S. A. et al. // *3 Int. Conf. TQE. Abstr. pap. Bucharest*. 1988. P. 453.

СКВ НИП «Оптика» СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
20 декабря 1989 г.

S. D. Burakov, A. P. Godlevskii, S. A. Ostanin. **Determination of Contours of Remote Objects Using an Autodyne Coherent Lidar.**

The paper presents the results of experiments on determination of contours of the light reflecting objects using an autodyne coherent lidar. The experiments allowed the formulation of requirements to the value of Doppler frequency shift.