

УДК 621.375.826

В.Л. КОЗЛОВ

### **МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

Methods of construction of two-frequency optical measuring systems of movement parameters with high space-time resolution, based on use of linearly frequency-modulated probing signals with various laws of modulation and optimum processing of the reflected signal by matched filters are presented.

С развитием элементной базы, совершенствованием методов генерирования и приема когерентного оптического излучения область применения лазерных доплеровских измерителей существенно расширилась. Они позволяют решить целый ряд фундаментальных задач физики атмосферы и океана, спектроскопии и квантовой электроники, также комплекс прикладных задач пространственно-временных измерений подвижных объектов в метеорологии, геодезии, контроле окружающей среды, военной технике. Специфика таких доплеровских измерителей обусловлена использованием в них лазерных источников излучения, обладающих высокой спектральной яркостью, монохроматичностью, пространственной и временной когерентностью. Благодаря этому в лазерных системах можно формировать пучки с узкими диаграммами направленности, легко осуществлять спектральную и пространственную селекцию. Существенные доплеровские сдвиги частоты отраженного оптического излучения позволяют эффективно разделять объекты по скорости их движения, что весьма ценно при измерении параметров движения медленно перемещающихся объектов на фоне интенсивных помех. Эти особенности лазерных доплеровских измерителей обеспечивают более высокую эффективность решения ряда прикладных задач, чем радиолокационные, ультразвуковые и акустические доплеровские измерительные системы.

Распространение известных радиолокационных методов на видимую и ИК области спектра и сопутствующее увеличение на несколько порядков доплеровского сдвига частоты обеспечивают более успешное обнаружение объектов и измерение параметров их движения [1]. Однако, если диапазон изменения радиальной скорости объекта не известен, то в одночастотных измерительных системах трудно обнаружить слабый сигнал на неизвестной промежуточной частоте со случайным временем появления, что вынуждает использовать или широкополосные детектор и электронный тракт, в результате чего уменьшается отношение сигнал/шум, или частотное сканирование гетеродина с несколькими параллельными каналами обработки. Одночастотные системы за один импульс зондирующего излучения не позволяют одновременно измерять дальность и скорость движения нескольких объектов, попадающих в поле зрения.

В двухчастотных измерительных системах отпадает необходимость сканирования гетеродина. В таких системах осуществляется компенсация доплеровского сдвига, это дает возможность одновременно обнаруживать и измерять дальности до объектов со значительно различающимися скоростями движения, что особенно важно в ИК и видимом диапазонах, где доплеровские сдвиги обычно велики. Более того, для двухчастотной системы возможно увеличение отношения сигнал/шум на выходе по сравнению с его значениями для одночастотной из-за уменьшения шумовой полосы [2]. Для измерения дальности и скорости объекта в двухчастотных измерительных системах на дистанцию по-

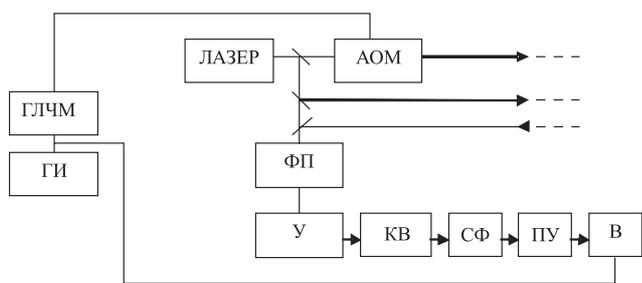


Рис. 1. Функциональная схема двухчастотной лазерной измерительной системы с немодулированным и модулированным зондирующими сигналами:

АОМ – акустико-оптический модулятор; ГЛЧМ – генератор линейно-частотно-модулированного сигнала; ГИ – генератор импульсов; ФП – гетеродинный фотоприемник; У – усилитель; КВ – квадратор; СФ – согласованный фильтр; ПУ – полосовой усилитель; В – вычислитель

сылаются два зондирующих сигнала: первый – немодулированный, второй – линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ), модуляция которого осуществляется акустико-оптическим модулятором, управляемым с генератора ЛЧМ-сигнала. Функциональная схема лазерной системы измерения параметров движения объектов, реализующая двухчастотный метод построения [3], представлена на рис. 1. Отраженное от объекта излучение попадает на фотоприемник, где смешивается с немодулированным гетеродинным сигналом. При этом на выходе фотоприемника выделяются два сигнала: первый  $U_1$  – ЛЧМ-радиоимпульс, задержанный на дистанции на

время  $\tau = 2D/c$  ( $D$  – расстояние до объекта,  $c$  – скорость света) с доплеровским сдвигом частоты  $f_d = v_0 \cdot 2v_r/c$ , где  $v_0$  – частота излучения лазера,  $v_r$  – радиальная скорость движения объекта; второй  $U_2$  – немодулированный радиосигнал доплеровской частоты. Зависимость нормированной амплитуды этих сигналов от времени определяется выражениями

$$U_1(t) = \sin[\omega_0 + \beta(t - \tau) + \omega_d]t, \quad U_2(t) = \sin \omega_d t, \quad (1)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – начальная частота ЛЧМ-сигнала,  $\beta$  – скорость изменения частоты,  $\omega_d = 2\pi f_d$ . Сигналы (1) поступают в информационно-измерительный тракт системы, где обрабатываются квадратором и согласованным фильтром (СФ). Выходной сигнал квадратора находим следующим образом:

$$U_{\text{кв}}(t) = [U_1(t) + U_2(t)]^2 = 1 - \frac{1}{2} \cos 2[\omega_0 + \beta(t - \tau) + \omega_d]t - \frac{1}{2} \cos 2\omega_d t + \cos[\omega_0 + \beta(t - \tau)]t - \cos[\omega_0 + \beta(t - \tau) + 2\omega_d]t. \quad (2)$$

Сигнал на выходе согласованного фильтра можно определить с помощью операции [4]

$$U_{\text{вых}} = \int_{-T/2}^{T/2} h(s)U_{\text{кв}}(t - s)ds, \quad (3)$$

где  $h(s)$  – импульсная характеристика согласованного фильтра, представляющая собой обращенную во времени функцию модулирующего сигнала;  $T$  – длительность импульсной характеристики СФ.

После прохождения сигнала (2) через согласованный фильтр на его выходе появится сигнал вида [3]

$$U_{\text{вых}} = \frac{\sin[T - (t - \tau) \cdot \beta \cdot T/2]}{\beta(t - \tau)} \cos \omega_0 t + \frac{\sin[T - (t - \tau - \frac{2\omega_d}{\beta}) \cdot \beta \cdot T/2]}{\beta(t - \tau - \frac{2\omega_d}{\beta})} \cos \omega_0 t. \quad (4)$$

Сигналы, описываемые первыми тремя членами выражения (2), в результате выполнения операции (3) не дадут откликов на выходе СФ, так как они не согласованы с его импульсной характеристикой. Сигнал, соответствующий четвертому члену формулы (2), дает на выходе СФ отклик (первое слагаемое в (4)), огибающая которого задержана относительно модулирующего сигнала на  $\tau$ . Очевидно, что временное положение импульса характеризует дальность до объекта. Пятое слагаемое из формулы (2) дает на выходе СФ отклик, временное положение которого сдвинуто относительно времени появления первого отклика на  $2\omega_d/\beta$ , и, следовательно, характеризует скорость объекта. В вычислительном блоке определяется временное положение импульсов и соответственно вычисляется дальность и скорость объекта. В зависимости от знака скорости импульс для определения скорости будет возникать раньше импульса для измерения дальности для приближающегося объекта или позже – для удаляющегося.

Диапазон измеряемых скоростей объектов зависит от девиации частоты зондирующего ЛЧМ-сигнала, которая определяется временем прохождения акустической волны в АОМ через диаметр сечения оптического луча, и для таких модуляторов не превышает величину 15 МГц, при этом длительность откликов (4) на выходе согласованного фильтра  $\sim 100$  нс. При использовании фильтров с длительностью импульсной характеристики порядка 50 мкс погрешность измерения дальности составляет метр, а скорости – 0,1 м/с.

Использование в качестве источника излучения двухволнового полупроводникового лазера [5], обеспечивающего одновременную генерацию излучения на двух различных оптических длинах волн, позволяет упростить функциональную схему и конструкцию двухчастотной измерительной системы [6] при сохранении точностных характеристик и пространственно-временного разрешения.

В описанной двухчастотной измерительной системе информация о дальности до всех объектов, попадающих в поле зрения, будет присутствовать независимо от значения скоростей их движения. Информация о скорости будет присутствовать только для тех объектов, чей доплеровский сдвиг частоты не превышает половину девиации частоты зондирующего излучения. Для расширения диапазона измеряемых скоростей при построении измерительной системы целесообразно использовать зондирующие сигналы с противоположными по знаку изменения частоты модуляции законами. Функциональная схема двухчастотной лазерной системы с такими зондирующими сигналами представлена на рис. 2. Излучение лазера делится на два пучка, частота которых модулируется акустико-оптическими модуляторами по линейному закону с противоположными значениями скорости перестройки частоты  $+\beta$  и  $-\beta$ :

$$U_1(t) = U_m \sin(\omega_0 + \omega_n + \beta t)t, \quad U_2(t) = U_m \sin(\omega_0 - \beta t)t, \quad (5)$$

где  $\omega_n = 2\pi f_n$  – частотный сдвиг между ЛЧМ-сигналами,  $U_m$  – амплитуда сигналов. Сигналы (5) на дистанцию посылаются с помощью оптической системы. Отраженное от движущегося объекта излучение с доплеровским сдвигом частоты  $f_d$  попадает на фотоприемник, где в результате фотогетеродинамирования образуется сигнал, содержащий две частотные составляющие вида (5), но задержанные во времени на  $\tau$  и сдвинутые по частоте на  $\omega_d = 2\pi f_d$ . После прохождения этими сигналами нелинейного элемента (квадратора) на его выходе образуются сигналы разностной  $f_{\text{разн}}$  и суммарной  $f_{\text{сум}}$  частот:

$$U_{\text{разн}}(t) = U'_m \sin(\omega_n + 2\beta(t - \tau))t, \quad U_{\text{сум}}(t) = U''_m \sin(2\omega_0 + \omega_n + 2\omega_d)t, \quad (6)$$

где  $U'_m, U''_m$  – амплитуды отраженных сигналов. Из (6) следует, что на выходе нелинейного элемента образуются ЛЧМ-сигнал, задержанный на время  $\tau$ , не содержащий доплеровского сдвига с крутизной перестройки частоты  $2\beta$ , и сигнал постоянной частоты, значение которой определяется удвоенной частотой доплеровского сдвига  $\omega_d$ . Обработывая ЛЧМ-сигнал с помощью согласованного фильтра, измеряем дальность до объекта и параллельно, определяя значение доплеровской частоты быстрым спектроанализатором [7], находим скорость движения объекта.

В случае одновременного появления нескольких объектов в поле зрения на выходе описанной системы появятся импульсы, определяющие дальности до объектов и гармонические сигналы, равные удвоенному доплеровскому сдвигу частоты, определяющие скорости этих объектов. Однако при этом возникает проблема идентификации объектов по скорости, т. е. на какой дальности объекту принадлежит данная скорость. Эта задача актуальна в системах лазерного зондирования турбулентных сред, когда необходимо обеспечить одновременное измерение дальности и скорости нескольких рассеивающих неоднородностей при прохождении излучения через среду. На рис. 3

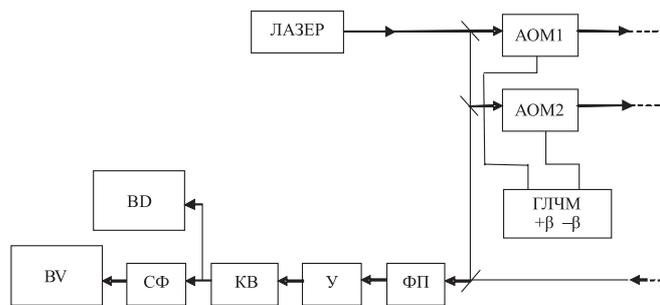


Рис. 2. Функциональная схема двухчастотной лазерной измерительной системы с ЛЧМ зондирующими сигналами с противоположной крутизной модуляции: АОМ1, АОМ2 – акустико-оптические модуляторы; ГЛЧМ – генератор ЛЧМ-сигналов с противоположными значениями перестройки частоты  $+\beta$  и  $-\beta$ ; ФП – гетеродинный фотоприемник; ВВ, ВВ – блоки вычисления дальности и скорости

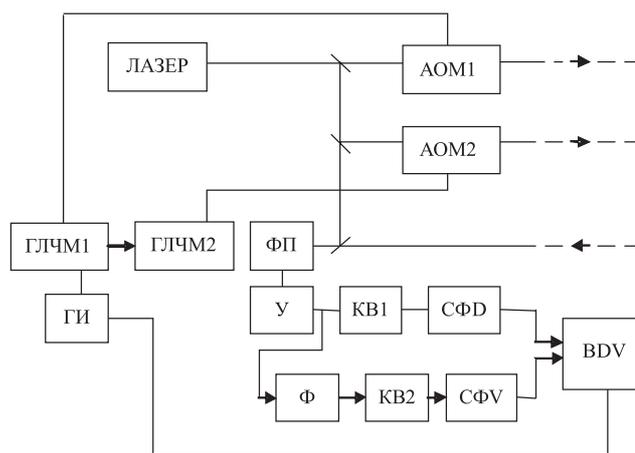


Рис. 3. Функциональная схема двухчастотной лазерной системы для одновременного измерения дальности и скорости нескольких объектов: Ф – полосовой фильтр; КВ1, КВ2 – квадраторы; СФV, СФД – согласованные фильтры канала скорости и канала дальности; BDV – блок вычисления дальности и скорости, ЛЧМ – генераторы сигнала с противоположными значениями крутизны перестройки частоты ГЛЧМ1 ( $+\beta$ ) и ГЛЧМ2 ( $-\beta$ )

представлена функциональная схема двухчастотной лазерной системы, решающей задачу одновременного измерения дальности и скорости нескольких подвижных объектов при лазерном зондировании турбулентных сред [8]. По сравнению с двухчастотной измерительной системой на рис. 2 здесь содержится дополнительный канал измерения скорости, включающий полосовой фильтр  $\Phi$ . Для обеспечения правильной работы системы необходимо, чтобы модулирующие сигналы генераторов ГЛЧМ2, ГЛЧМ1 были когерентны, т. е. их фазы должны быть жестко связаны. Этого можно достичь, если формировать сигналы от одного ЛЧМ-генератора с автоподстройкой по методу цифрового преобразования и использовать широкополосный аналоговый смеситель и дополнительный опорный генератор [9].

На дистанцию посылаются два оптических зондирующих сигнала с девиацией частоты  $\Delta F$  и длительностью  $T$ , частота которых изменяется по линейному закону с противоположными значениями скорости перестройки частоты  $+\beta$  и  $-\beta$  (5). Отраженное от рассеивающих частиц зондирующее излучение, задержанное на дистанции на время  $\tau$  и имеющее доплеровский сдвиг частоты  $f_d$ , через приемную оптическую систему попадает на фотоприемник, где в результате фотогетеродинамирования выделяются два ЛЧМ-сигнала с частотами

$$U_1^d(t) = U_m' \sin[(\omega_n + \omega_o + \omega_d)t + \beta t(t - \tau)], \quad U_2^d(t) = U_m'' \sin[(\omega_o - \omega_n)t - \beta t(t - \tau)]. \quad (7)$$

После усиления сигналы (7) поступают в канал дальности. С использованием известных тригонометрических формул можно легко показать, что в результате обработки сигналов (7) на выходе квадратора будет присутствовать ЛЧМ-сигнал, не содержащий доплеровского сдвига частоты с удвоенным значением крутизны перестройки [8]:

$$U_D'(t) = U_m' \sin(\omega_n + 2\beta(t - \tau))t. \quad (8)$$

Передаточная характеристика согласованного фильтра СФД выбирается соответствующей сигналу (8), и по задержке отклика на его выходе определяется расстояние до рассеивающего центра независимо от величины скорости его передвижения. Остальные члены выражения, полученного в результате обработки квадратором дистанционного сигнала, не согласованы с характеристикой фильтра и, следовательно, не дадут отклика на выходе [8]. Таким образом, на выходе согласованного фильтра канала дальности образуется сигнал, задержка которого определяется только расстоянием до рассеивающих центров, а амплитуда – мощностью отраженного сигнала.

Параллельно сигналы (7) поступают в канал скорости через полосовой фильтр  $\Phi$  с полосой пропускания частот  $\Delta F_{\Pi} = f_o + \Delta F$ , где  $f_o$  – начальная частота ЛЧМ-сигнала, и центральным значением частоты  $f_{\Pi} = f_n + f_o/2$ , где  $f_n$  – частотный сдвиг между ЛЧМ-сигналами. Полоса фильтра выбрана так, что при отсутствии доплеровского сдвига частоты сигналы (7) проходят через фильтр без ослабления. При наличии доплеровского сдвига частоты, т. е. при радиальном движении рассеивающих центров, часть одного из ЛЧМ-сигналов не попадает в полосу  $\Delta F_{\Pi}$  и будет подавляться фильтром. При этом будет уменьшаться длительность  $\tau_d$  ЛЧМ-сигнала, согласованного с передаточной характеристикой фильтра СФV, в соответствии с выражением

$$\tau_d = T - T \frac{|f_d|}{\Delta F}. \quad (9)$$

Амплитуда отклика на выходе согласованного фильтра для прямоугольного радиоимпульса, частотно-модулированного по линейному закону, определяется выражением [4]

$$U(x) = 0,5 U_m^2 \tau_d \frac{\sin[\pi k x (1 - x)]}{\pi k x}, \quad (10)$$

где  $x = 1 - \frac{t - \tau}{T}$ ,  $T$  – длительность импульсной характеристики согласованного фильтра,  $n = T \cdot \Delta F$  – безразмерный параметр частотной модуляции,  $\tau_d$  – длительность ЛЧМ-сигнала. Из (10) видно, что максимальное значение амплитуды отклика определяется только длительностью сигнала  $\tau_d$ , поступившего в согласованный фильтр. Так как часть ЛЧМ-сигнала подавлена фильтром  $\Phi$ , амплитуда отклика на выходе фильтра СФV будет уменьшаться на соответствующую величину. Следовательно, амплитуда сигнала на выходе канала скорости зависит от величины доплеровского сдвига частоты

$$U_V = U_m \frac{\tau_d}{T} = U_m \left(1 - \frac{|f_d|}{\Delta F}\right). \quad (11)$$

Значение  $U_V$  уменьшается при увеличении доплеровского сдвига. В блоке вычисления дальности и скорости фиксируется время появления сигналов на выходах согласованных фильтров и измеряются

их амплитудные значения. После этого по времени появления сигналов на выходе фильтров определяется расстояние до рассеивающих центров, а радиальная скорость перемещения центров вычисляется по величине отношения амплитуд с помощью выражения

$$v_r = \frac{\Delta F \cdot c}{2v_0} \left(1 - \frac{U_V}{U_D}\right), \quad (12)$$

где  $U_V$  – амплитуда импульса на выходе канала скорости,  $U_D$  – амплитуда импульса на выходе канала дальности. Таким образом, на выходах согласованных фильтров каналов дальности и скорости формируются сигналы, задержка которых определяется только расстоянием до рассеивающих центров, а отношение амплитуд – радиальной скоростью перемещения этих центров. Одновременное измерение дальности и скорости нескольких объектов позволяет за один период модуляции определить непрерывное распределение радиальных скоростей подвижных атмосферных слоев по дальности вдоль линии распространения зондирующего лазерного излучения.

При построении вычислительного блока следует использовать методику [10], которая позволяет повысить вероятность правильного обнаружения и уменьшить вероятность ложной тревоги при обработке доплеровских сигналов с неизвестной несущей частотой, случайным временем появления и малым отношением сигнал/шум.

Для технической реализации описанных систем целесообразно использование двухчастотного лазера [11]. Это дает возможность получить два частотно-модулированных сигнала с противоположными по знаку изменения частоты модуляции законами без использования внешних акустико-оптических модуляторов, что значительно упрощает конструкцию измерителя.

Двухчастотные лазерные измерители имеют несомненные преимущества перед одночастотными, заключающиеся в увеличении чувствительности приема и минимизации вероятности ошибки, особенно при неизвестном диапазоне скоростей. Такие системы обеспечивают выходной радиосигнал на известной разностной частоте, несмотря на доплеровский сдвиг отраженного излучения, что дает возможность избежать частотного сканирования гетеродина или приемника и одновременно наблюдать объекты, имеющие значительно различающиеся скорости. Время измерения дальности и скорости двухчастотными измерителями равняется одному периоду модулирующего сигнала, что в два раза меньше, чем в одночастотных системах. Это позволяет увеличить или скорость обзора, или время накопления сигнала и соответственно повысить дальность действия и чувствительность системы. В условиях доплеровской неопределенности оптимальные условия работы системы реализуются, когда разностная частота зондирующих сигналов близка к полосе усиливаемых частот усилителя или когда частота гетеродина лежит между частотами зондирующих сигналов. Погрешности измерения параметров движения объектов двухчастотными измерителями определяются частотой и ее девиацией для зондирующих сигналов, а также длительностью модулирующего ЛЧМ-импульса. Более глубокий анализ методических погрешностей приведенных методов является предметом отдельного исследования.

1. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерная локация. М., 1984.
2. Киес Р.Дж., Крузе П.В., Патли Э.Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов: Под ред. Р.Дж. Киеса. М., 1985.
3. Козлов В.Л., Фираго В.А., Шилов А.Ф. // Радиофизика и электроника. 1993. Вып. 1. С. 71.
4. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М., 1994. С. 18.
5. Афоненко А.А., Кононенко В.К., Манак И.С. Полупроводниковый лазер: Пат. РФ № 1385. 1996.
6. Козлов В.Л. Способ определения дальности до объекта и его скорости: Пат. РФ № 11960. 2009.
7. Козлов В.Л. // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. № 3. С. 46.
8. Фираго В.А., Козлов В.Л., Малевич И.А. Устройство для измерения распределения скоростей подвижных слоев по дальности: А. с. СССР № 1780070. 1992.
9. Козлов В.Л., Фираго В.А., Шилов А.Ф. Генератор с линейной частотной модуляцией: А. с. СССР № 1631698. 1991.
10. Козлов В.Л. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 54.
11. Козлов В.Л., Фираго В.А., Карих Е.Д. Способ частотной модуляции излучения в двухчастотном лазере: А. с. СССР № 1826829. 1992.

Поступила в редакцию 01.12.09.

**Владимир Леонидович Козлов** – кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники.