



УДК 535.3; 621.378

В.С. Соболев, Е.Н. Уткин, Г.А. Кашеева, Ф.А. Журавель, А.М. Щербаченко

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su*

## **ДОПЛЕРОВСКОЕ СМЕЩЕНИЕ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАССЕЯННОГО ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ**

### **АННОТАЦИЯ**

Теоретически и экспериментально показано, что интенсивность рассеянного или отраженного движущимся объектом амплитудно-модулированного когерентного оптического излучения несет информацию о скорости в виде доплеровского смещения частоты модулирующей гармонической функции. Поскольку фотодетектор реагирует на интенсивность излучения, пропорциональную этой функции, то указанный выше эффект позволяет реализовать бесконтактные измерения параметров движения без применения методов интерферометрии.

### **ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА, ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ, ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Прецизионные лазерные измерительные системы для бесконтактных измерений параметров движения широко применяются в научных исследованиях, промышленности и в военном деле. Достаточно указать на лазерную локацию, лазерную доплеровскую анемометрию, интерферометрию для прецизионной оценки перемещений, лазерное зондирование атмосферы, лазерную гравиметрию и т.п. [1-4]. Однако все соответствующие устройства отличаются большой сложностью и очень высокой стоимостью. Это обстоятельство связано с тем, что для формирования выходных сигналов используют методы интерферометрии с таким непростым и капризным узлом, как интерферометр. В то же время уже применяются более простые методы и устройства, основанные на модуляции лазерного излучения [5-6].

Статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию доплеровского эффекта для случая, когда в качестве зондирующего используется гармоническое амплитудно-модулированное когерентное оптическое излучение. Отметим, что модуляция может осуществляться как по мощности излучения, так и по амплитуде поля. В статье рассмотрены результаты применения обоих способов модуляции.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

Вначале рассмотрим случай модуляции мощности лазерного излучения. Примем, что модулирующая функция имеет вид

$$P(t) = [1 + m \cdot \cos(\Omega t)] , \quad (1)$$

где  $m$  – индекс модуляции, а  $\Omega$  – ее частота;  $t$  – текущее время.

Поскольку мощность излучения (1) пропорциональна квадрату амплитуды поля, то его напряженность  $E(t)$  будет выражаться, как

$$E(t) \propto \sqrt{1 + m \cdot \cos(\Omega t)} \cdot \exp(j\omega_0 t), \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – несущая частота лазерного излучения, а множитель перед экспонентой является модулирующей функцией поля.

Далее в целях упрощения будем проводить анализ взаимодействия излучения с движущимся объектом при значении коэффициента модуляции  $m = 1$ . Спектральное разложение модулирующей функции, нормированное на  $(2\sqrt{2})/\pi$  имеет вид

$$S(t) = 1 - 2 \left[ \frac{\cos(\Omega t)}{3} + \frac{\cos(2\Omega t)}{15} + \frac{\cos(3\Omega t)}{35} + \dots \right], \quad (3)$$

а спектральное разложение модулированного поля (2) представляется как [7].

$$S(t) = \sin(\omega_0 t) + 0.5 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos[(\omega_0 - n\Omega)t] - C_n \cos[(\omega_0 + n\Omega)t] \right\}, \quad (4)$$

где  $C_n$  – коэффициенты разложения модулирующей функции.

На рис.1(а) представлен график модулированного поля (2), а на рис.1(б) его амплитудный спектр.

Если исследуемый объект движется, то каждая гармоника рассеянного поля вследствие эффекта Доплера будет смещена по частоте на величину пропорциональную скорости. Этот сдвиг в нерелятивистском случае для зондирующего поля с длиной волны  $\lambda$  выражается известным соотношением [1-3]

$$\omega_D = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) = \frac{4\pi}{\lambda} |\mathbf{V}| \cos \varphi = \omega_0 K, \quad (5)$$

где  $V$  – вектор скорости,  $k_s$  и  $k_i$  – волновые векторы соответственно рассеянного и зондирующего полей,  $\varphi$  – угол между вектором скорости  $V$  и вектором  $(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i)$ ,

$$K = 2 \frac{|\mathbf{V}|}{C} \cos \varphi, \quad (6)$$

$C$  – скорость света.

С учетом (5) круговая частота каждой  $n$ -ой гармоники рассеянного поля может быть представлена как

$$\omega_{\pm n} = (\omega_0 \pm n\Omega) \cdot (1 + K), \quad (7)$$

а поле этой гармоники будет равно

$$E_n(t) = E_{0n} \exp\left[j(\omega_0 \pm n\Omega) \cdot (1 + K)t\right] \quad (8)$$

Суммарное поле всех гармоник определится как

$$E(t) = \sum_n E_n(t). \quad (9)$$

Амплитудный спектр рассеянного поля с учетом доплеровского смещения представлен на рис. 1(в).

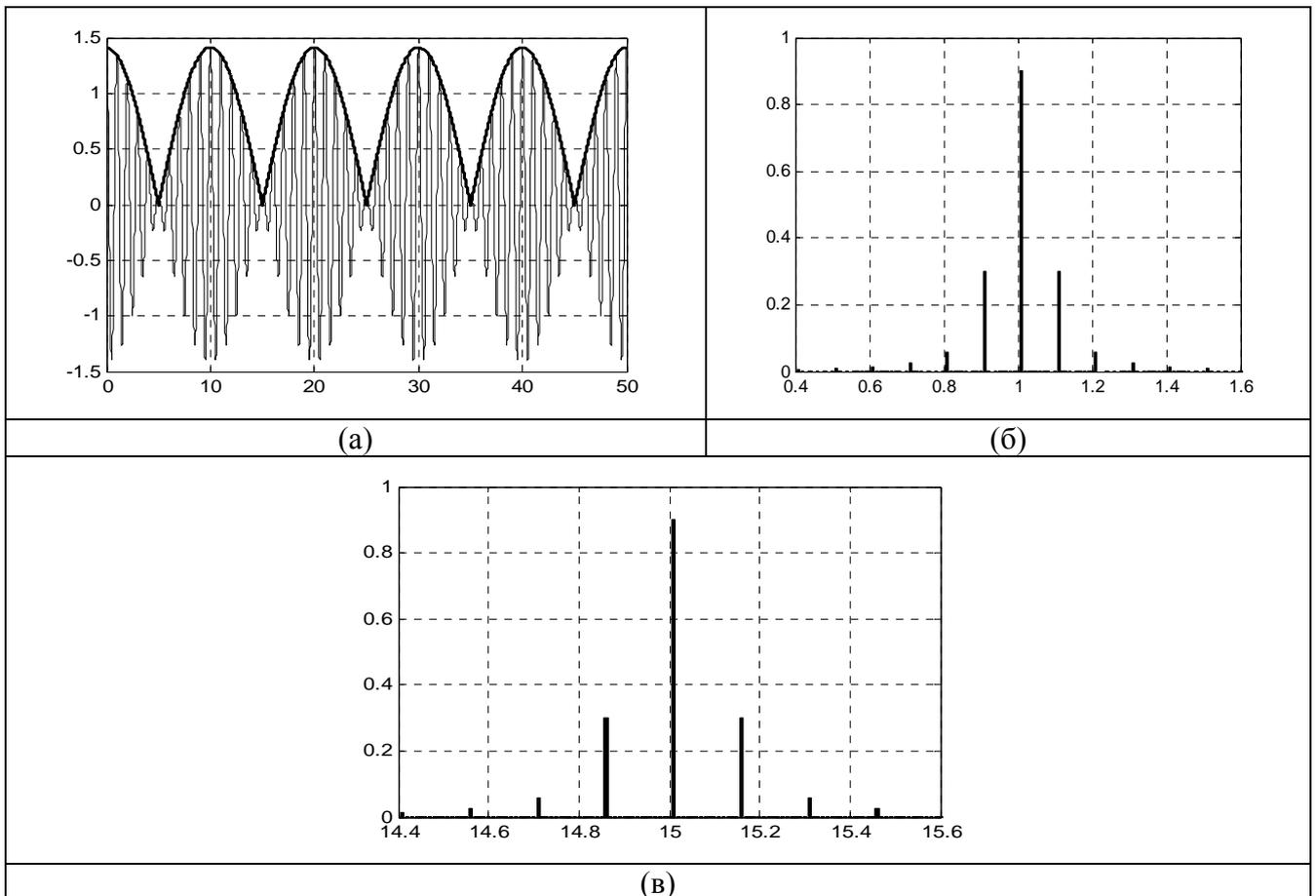


Рис. 1.(а) – График модулированной напряженности зондирующего поля, (б) - амплитудный спектр этого поля, (в) амплитудный спектр поля, рассеянного движущимся объектом

Из этого рисунка и выражений (7, 8) следует, что амплитуды спектральных линий зондирующего и рассеянного полей пропорциональны друг другу, но разнос линий теперь составляет величину  $\Omega(1+K)$ . Из этого следует, что рассеянный свет остаётся амплитудно-модулированным колебанием, но частота его модуляции изменена и равна  $\Omega(1+K)$ .

Исходя из выражений (8) и (9), получим сигнал на выходе детектора как квадрат модуля суммарного поля (9)

$$I_d(t) = \eta E_0^2 \left\{ 1 + \cos\left[\Omega(1 + K)t\right] \right\}, \quad (10)$$

где  $E_0$  – амплитуда рассеянного поля,  $\eta$  коэффициент преобразования фотодетектора.

Сравнивая (1) и (10), видим, что выходной сигнал фотодетектора аналогичен модулирующему, но смещен на доплеровскую частоту, пропорциональную скорости и равную  $\Omega K$ .

Далее рассмотрим случай, когда амплитудной модуляции подвергается поле зондирующего пучка. Реальная часть этого поля может быть выражена как

$$\operatorname{Re}[E(t)] = E_0 [1 + m \cdot \cos(\Omega t)] \cdot \cos(\omega_0 t) . \quad (11)$$

Если  $m = 1$ , то оно примет вид

$$\operatorname{Re}[E(t)] = E_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right]. \quad (12)$$

Учитывая (12) и (7), выражения для частоты каждой гармоники рассеянного излучения принимают вид

$$\omega_{s(0)} = \omega_0 + K \omega_0; \quad \omega_{s(+1)} = (\omega_0 + \Omega) + K (\omega_0 + \Omega); \quad \omega_{s(-1)} = (\omega_0 - \Omega) + K (\omega_0 - \Omega) \quad (13)$$

а разность между новой центральной частотой и новыми боковыми частотами будет равна

$$\Delta \omega = \Omega(1 + K) \quad (14)$$

Из (14) следует, что боковые спектральные составляющие приобретают сдвиг по частоте относительно несущей частоты сигнала на одинаковую величину, а это означает, что рассеянный свет остаётся амплитудно-модулированным колебанием, но теперь частота его модуляции  $\Omega_{md}$  будет смещена на новую доплеровскую частоту, также пропорциональную скорости, как и в случае модуляции по мощности.

$$\Omega_{md} = \Omega \pm K \Omega . \quad (15)$$

Отметим, что величина доплеровского сдвига частоты модуляции  $K\Omega$  не зависит от частоты зондирующего излучения  $\omega_0$  и определяется только частотой модуляции  $\Omega$ .

Далее определим сигнал на выходе фотодетектора. Для этого найдем выражение для комплексного рассеянного поля. В соответствии с (11) и (13), при условии  $m = 1$ , получим

$$E_S(t) = E_0 [1 + \cos(\Omega_{md}t)] \cdot \exp[j\omega_0(1 + K)t] \quad (16)$$

Исходя из этого, сигнал на выходе фотодетектора примет вид (17)

$$I_D(t) = |E_S(t)|^2 = E_0^2 [1.5 + 2 \cos(\Omega_{md}t) + 0.5 \cos(2\Omega_{md}t)] \quad (17)$$

Он содержит, во-первых, члены, колеблющиеся с новой частотой модуляции (15), смещенной на доплеровскую частоту  $K\Omega$ , пропорциональную измеряемой скорости, а, во – вторых, не только первую, но и вторую гармонику этой новой частоты.

Для оценки скорости исследуемого объекта в этом случае, целесообразно использовать только первую гармонику сигнала, так как ее амплитуда в четыре раза превышает амплитуду

второй. Операция ее выделения может быть выполнена узкополосным фильтром, включенным на выходе фотоприемника. Сигнал после фильтра приобретет вид

$$U_s(t) = U_0 \cos[(\Omega \pm K\Omega)(t)] \quad (18)$$

Знаки плюс или минус определяются направлением движения исследуемого объекта.

Таким образом показано, что рассеянные поля для обоих способов модуляции остаются модулированными, соответственно, по мощности или амплитуде поля, но частота модуляции в каждом случае смещена на доплеровскую частоту, равную

$$\omega_{Dm} = K\Omega = 2(V/C)\Omega \cdot \cos \varphi. \quad (19)$$

Что касается выходных сигналов фотодетектора, то при фильтрации второй гармоники в случае модуляции поля, они идентичны и несут информацию о движении объекта исследований в виде указанного выше доплеровского смещения частоты модуляции. Мало того, это смещение определяется той же формулой, что и сдвиг, который получается при облучении движущегося объекта излучением любой длины волны  $\Lambda$ , то есть

$$\omega_D = V \cdot \frac{4\pi}{\Lambda} \cdot \cos \varphi, \quad (20)$$

но теперь

$$\Lambda = 2\pi C/\Omega, \quad (21)$$

длина волны модулирующей функции. Это замечательный результат, так как он позволяет оценивать скорость как величину, пропорциональную доплеровскому смещению частоты сигнала, полученного путем простого фотодетектирования рассеянного излучения. Рассмотренный способ в сравнении с доплеровской радиолокацией может дать существенное повышение пространственного разрешения за счет сверхузкой диаграммы направленности лазерного луча.

В качестве примера найдем значение доплеровской частоты для случая, когда скорость исследуемого объекта составляет 100 m/s, частота модуляции  $\Omega = 2\pi \cdot 10^9$  Hz, а угол  $\varphi = 0$ . В соответствии с (20) получим  $F_D = \omega_D/2\pi = (2V \cdot \Omega)/(C \cdot 2\pi) = 106$  Hz.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Для экспериментальной проверки предложенного принципа был исследован макет устройства, функциональная схема которого представлена на Рис. 2. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер (1) с длиной волны излучения 650 nm, который модулировался по мощности сигналом частотой 80 МГц, поступающим от модулятора (2). Длина волны сигнала модуляции в этом случае является эталоном и составляет 3,75 м. В качестве движущегося объекта применялись уголкового отражатель или белая бумага.

Для выделения информации о скорости и направлении ее вектора сигнал (18) умножается на две квадратурные компоненты напряжения генератора модулирующей функции. В результате на выходе перемножителей после соответствующей фильтрации получают две компоненты комплексного сигнала  $Z(t)$  доплеровской частоты  $\omega_{Dm} = K\Omega$

$$Z(t) = Z_C(t) + jZ_S(t) = |Z(t)| \cdot \exp[j\varphi(t)], \quad (22)$$

$$\varphi(t) = \arg[Z(t)]. \quad (23)$$

Оценка этой частоты осуществляется с использованием алгоритма:

$$\Omega_{D_n} = K_n \Omega = \frac{1}{T} \arg(Z_n^* Z_{n+1}), \quad (24)$$

где  $Z_n$  и  $Z_{n+1}$  - комплексные дискретные отсчеты сигнала (22) в последовательные моменты времени ( $t_n, t_{n+1}$ ), разделенные периодом дискретизации  $T$  ( $T < \pi/\Omega_{Dmax}$ ), звездочка означает операцию комплексного сопряжения.

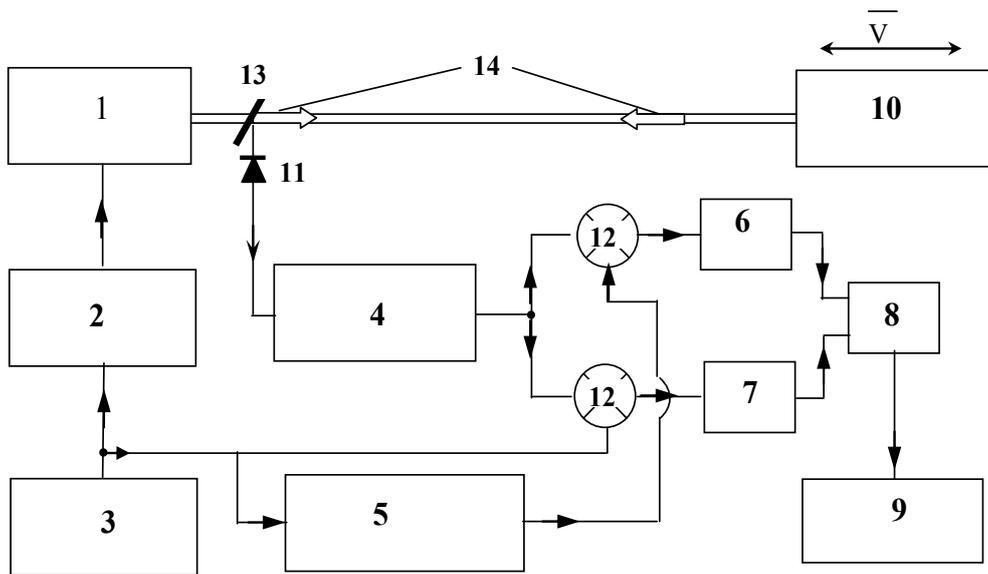


Рис. 2. Функциональная схема макета. 1 - лазер, 2 – модулятор, 3 – генератор, 4 – узкополосный фильтр, 5 – фазовращатель, 6, 7 – фильтры нижних частот, 8 – АЦП, 9 – компьютер, 10 – исследуемый объект, 11 – фотодетектор, 12 – перемножители, 13 – светоделитель, 14 – зондирующий и отраженный лучи

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

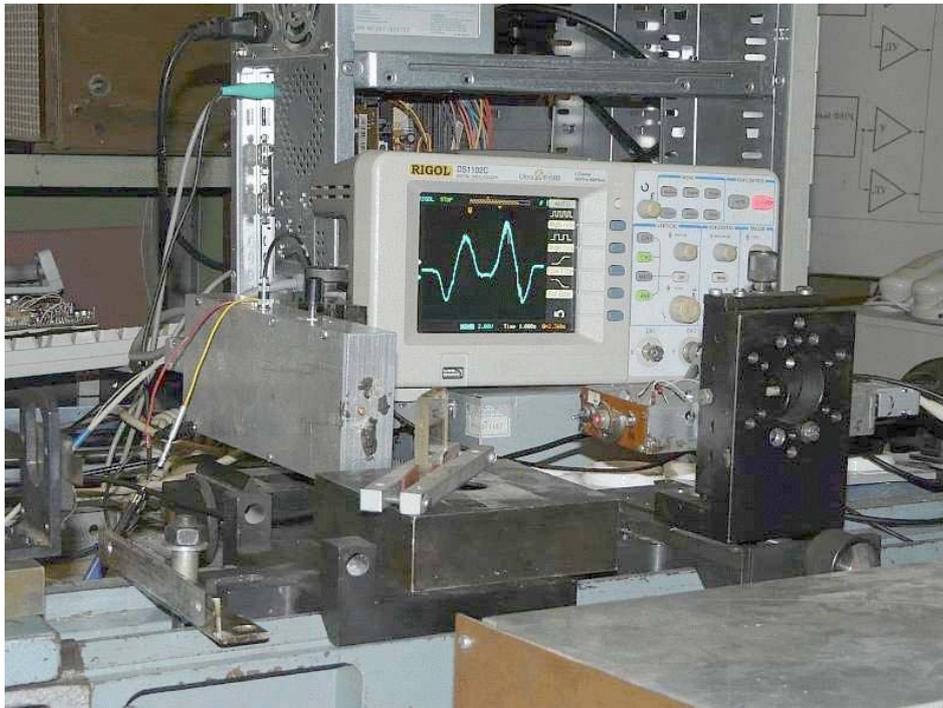


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Справа виден лазерный излучатель, далее установлен светоделитель, за ним – фотодетектор, а слева каретка с отражателем. На экране осциллографа представлен выходной сигнал детектора, получаемый при перемещении объекта со скоростью 1 м/с на пути, равном половине длины волны сигнала модуляции. Вначале объект двигался в направлении к лазеру, останавливался на небольшой промежуток времени, а затем возвращался на место. Как это следует из теории, сигнал представлял собой отрезок синусоиды доплеровской частоты. При движении в обратном направлении он также оставался синусоидальным, но его частота сменила знак. Компьютер, работающий по алгоритму (23) в соответствии с формулой  $F_D = 2V/\lambda$  выдал значение доплеровской частоты, равное 0.53 Гц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при использовании в качестве зондирующего лазерного излучения, модулированного по мощности или амплитуде, эффект Доплера проявляется в виде смещения частоты модулирующей функции. Частота смещения пропорциональна скорости исследуемого объекта, не зависит от длины волны излучения лазера и определяется длиной волны  $\Lambda$  модулирующей функции, как  $F_D = 2V/\Lambda$ . Выходной сигнал фотодетектора рассеянного поля является гармонической функцией частоты модуляции плюс или минус частота доплеровского смещения в зависимости от направления движения облучаемого объекта.

Применение в качестве несущего колебания луча лазера позволяет при оценке параметров движения зеркальных или диффузно рассеивающих объектов позволяет исключить такой сложный узел, как интерферометр и существенно повысить пространственное разрешение за счет малой расходимости коллимированного лазерного пучка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лазерные доплеровские измерители скорости** / Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич, В.С. Соболев и др., **Лазерные доплеровские измерители скорости** Под ред. Ю.Е. Нестерихина. Новосибирск: Наука, 1975. 164 с.
2. **Дюррани Т., Грэйтид К.** Лазерные системы в гидродинамических измерениях: Пер. с англ. М.: Энергия, 1980, 336 с.
3. **Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубнищев Ю.Н.** Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
4. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
5. **Верещака А.М., Попов Ю.В., Смирнов В.П.** // Опт.-мех. пром., 1973. V. 1.
6. **Wu L., Zhao Yu., Zhang Yo., Jin Ch., Liu L., Wu J.** Патент CN102798866 МПК GO1S17/32, GO1S7/483, опубликован, 2012.
7. **Харкевич А.А.** Спектры и анализ. М.: ФМ., 1962. 236с.

V.S. Sobolev, E.N. Utkin, G.A. Kashcheeva, F.A. Zhuravel, A.M. Shcherbachenko  
*Institute of Automation and Electrometry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia,  
630090, Novosibirsk, Acad. Koptyug Ave., 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su*

### **MODULATION FREQUENCY DOPPLER SHIFT OF THE LASER RADIATION SCATTERED BY MOVING OBJECT**

*It is shown theoretically as experimentally that intensity of the amplitude-modulated coherent optical radiation scattered or reflected by moving object bears information on velocity in the form of Doppler shift of harmonious function modulating frequency. As the photodetector reacts to the intensity of radiation proportional to this function, the effect stated above allows to realize contactless measurements of the movement parameters without application of interferometry methods*

DOPLER'S EFFECT, LASER LOCATION, PHOTODETECTION