

4. Y. Cho, T. Tajime and Matsuo. Stabilization of a Compositecavity Single — Frequency Laser.— IEEE J. Quantum Electronics, 1968, v. QE — 4, p. 699.
5. P. W. Smith. On the Stabilization of a High — Power Single — Frequency Laser.— IEEE J. Quantum Electronics, 1966, v. QE — 2, N 9.
6. H. G. Danielmeyer. Stabilized Efficient Single — Frequency Nd : YAG Laser.— IEEE J. Quantum Electronics, 1970, v. QE — 6, N 2.
7. М. И. Захаров, Ю. В. Троицкий. Расчет оптического резонатора с селекцией мод за счет поглощения и рассеяния света.— Оптика и спектроскопия, 1971, с. 30, вып. 3.
8. Ю. В. Троицкий. Сравнение методов селекции продольных мод оптического резонатора.— ЖПС., 1970, т. 12.
9. Ю. В. Троицкий. Расчет одночастотного газового лазера с селекцией мод по добротности.— Автометрия, 1971, № 1.
10. Ю. В. Троицкий, Н. Д. Голдина. Тонкий рассеивающий слой в поле стоячей волны оптических частот и его использование для селекции мод оптического резонатора.— Оптика и спектроскопия, 1968, т. 25, с. 462.

*Поступила в редакцию 28 ноября 1973 г.,  
окончательный вариант — 21 января 1974 г.*

УДК 531.76

**Л. Д. ГИК, Е. Н. КАЛИШ, Л. А. ПЕТРАШЕВИЧ,  
Ю. Ф. СТУСЬ, А. М. ЩЕРБАЧЕНКО**

*(Новосибирск)*

### **СЧЕТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА**

Определение гравитационного ускорения абсолютными лазерными гравиметрами в общем случае [1] требует громоздких вычислений из-за необходимости выполнения множительных операций с семью-восемью разрядными десятичными числами. Необходимость выполнения даже простой статистической обработки, что связано с наличием неизбежных случайных ошибок, обусловленных микросейсмами и другими помехами, а также возможными сбоями аппаратуры, заставляет использовать современные вычислительные средства.

В передвижных гравиметрических устройствах возникает естественное стремление обходиться минимально необходимым количеством блоков измерительной аппаратуры. С этой точки зрения особый интерес приобретает схема последовательного построения пространственно-временных интервалов измерения [2, 3]). В этой схеме операция вычисления в случае использования двух равных по времени интервалов  $t_1 = t_2$  измерения определяется выражением

$$g = \frac{\lambda}{2t_1(t_2 + \tau)} (N_2 - N_1).$$

Здесь  $t_1$  и  $t_2$  — временные интервалы измерения;  $\tau$  — пауза между ними;  $N_1$  и  $N_2$  — число интерференционных полос за время  $t_1$  и  $t_2$  соответственно;  $\lambda$  — длина волны.

Поскольку  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\tau$  и  $\lambda$  неизменны в каждом опыте, то операция вычисления сводится: а) к определению разности  $N_2 - N_1$ , что может быть осуществлено реверсивными счетчиками, и б) к умножению этой разности на постоянный весовой коэффициент  $\lambda/2t_1(t_2 + \tau)$ , что может быть реализовано непосредственно в самих счетных блоках.

Проведенные в ИАЭ СО АН СССР эксперименты по созданию вычислительного устройства для транспортабельного гравиметра [4] на основе реверсивного счетчика с управляемым весовым коэффициентом показали, что, несмотря на простоту конструкции вычислителя, он обладает, во-первых, методической погрешностью умножения и, во-вторых, он не застрахован от регистрации недостоверных результатов измерения, которые могут появиться в результате случайного сбоя в работе гравиметра. При разработке счетно-вычислительного блока (СВБ) транспортабельного гравиметра нецелесообразно усложнять процесс обработки. По-видимому, можно задать число усреднений, а промахи устранять, сравнивая результаты единичных измерений  $N_2-N_1$  с рядом чисел, предварительно задав минимальные и максимальные числа, вне зоны которых измерение считается промахом. Таким образом, выражение для определения среднего значения  $\bar{g}$  может быть представлено в виде

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \frac{\lambda}{2t_1(t_2 + \tau)} \sum_{k=1}^n (N_{2k} - N_{1k}),$$

где  $n$  — количество очищенных единичных измерений.

Для получения необходимой точности измерения  $g$  в пунктах с неодинаковыми уровнями микросейсмических колебаний требуется накопление неодинакового числа единичных измерений. Следовательно, коэффициент умножения для разных пунктов измерений может быть различным.

Поэтому при разработке счетно-вычислительного блока желательно иметь такую схему умножения, которая позволила бы просто устанавливать требуемый коэффициент умножения. Задача умножения заданного числа импульсов на постоянный коэффициент с учетом указанного требования может быть успешно решена с помощью цифровых интеграторов [5]. Наиболее простую структуру из них имеет цифровой интегратор с последовательным переносом. Цифровой интегратор с последовательным переносом (рис. 1, а) содержит числовой регистр, хранящий значение интегрируемой функции  $y$ , счетчик-делитель частоты, соединенный поразрядно посредством импульсно-потенциальных вентилей, и счетчик, регистрирующий результат интегрирования. Число импульсов  $N_{\text{вых}}$ , регистрируемое в этом счетчике, определяется в общем виде суммой

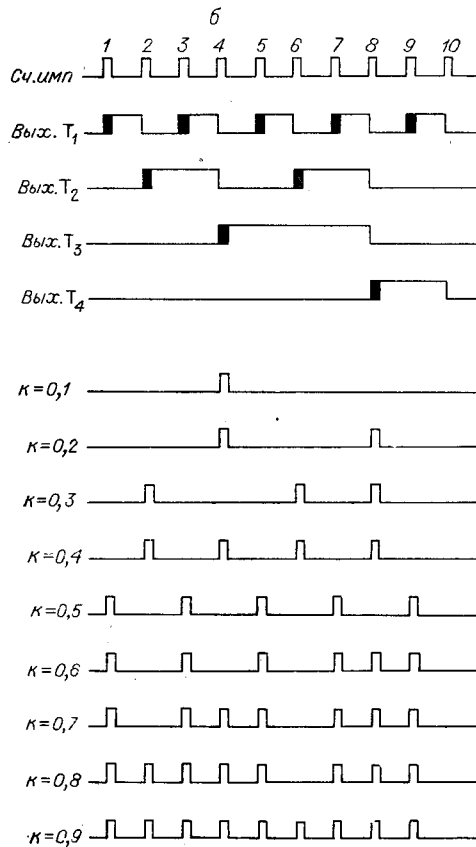
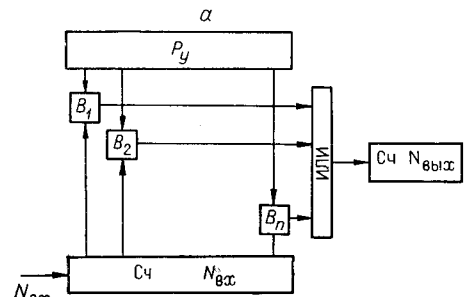


Рис. 1.

$$N_{\text{вых}} \cong \frac{N_{\text{вх}}}{B^n} \sum_{i=1}^n C_i B^{i-1} \cong \frac{N_{\text{вх}}}{B^n} N_y,$$

где  $N_y = \sum_{i=1}^n C_i B^{i-1}$  — число, хранящееся в регистре  $y$ ;  $B$  — основание системы счисления;  $n$  — количество разрядов регистра и счетчика-делителя частоты;  $i$  — порядковые номера открытых вентилей;  $C_i$  — постоянные коэффициенты, равные числам от 1 до  $B-1$  для открытых вентилей и нулю — для закрытых.

При выполнении равенств  $N_y/B_n = \lambda/2t_1t_2$  и  $N_{\text{вх}} = N_2 - N_1$  схема цифрового интегратора обеспечивает вычисление ускорения силы тяжести Земли  $g$ .

Однако использование такого цифрового интегратора в качестве устройства умножения счетно-вычислительного блока лазерного гравиметра приводит к появлению дополнительной методической погрешности вычисления, обусловленной тем, что операция умножения в таком цифровом интеграторе производится приближенно.

Для двоичных цифровых интеграторов задача определения методической погрешности решалась аналитически в [6].

Решение аналогичной задачи для двоично-десятичных цифровых интеграторов затруднительно.

Для однодекадного цифрового интегратора, перебрав все возможные комбинации коэффициентов умножения и входных импульсов, можно составить таблицу погрешностей. В таблице такие результаты приведены для одной из схем цифрового интегратора, временные диаграммы работы которого показаны на рис. 1, б. В таблице *a* сведены результаты умножения, а в таблице *б* — вычисленные погрешности умножения.

В общем виде абсолютную методическую погрешность вычисления для  $n$ -декадного цифрового интегратора можно представить выражением

$$\delta = \left[ \frac{1}{10^n} \sum N_{\text{вх}} a_i \right] - \frac{1}{10^n} \sum_{i=1}^n N_{\text{вх}} a_i = \sum_{i=1}^n \delta_i.$$

Обозначив значения коэффициентов в  $i$ -разрядах числа  $N_{\text{вх}}$  как  $b_i$  и учитывая в соответствии с данными таблицы, что однодекадный цифровой интегратор производит перемножение входного числа импульсов на коэффициент  $a_i/10$  без погрешности, если  $N_{\text{вх}}$  кратно 10, найдем значения методической погрешности  $\delta$  каждого разряда цифрового интегратора:

$$\delta_1 = \left[ b_1 \frac{a_1}{10} \right] - b_1 (a_n 10^{-1} + a_{n-1} 10^{-2} + \dots + a_1 10^{-n});$$

$$\delta_2 = \left[ b_2 \frac{a_{n-1}}{10} \right] - b_2 (a_{n-1} 10^{-1} + a_{n-2} 10^{-2} + \dots + a_1 10^{-n+1});$$

$$\delta_i = \left[ b_i \frac{a_{n-(i-1)}}{10} \right] - b_i (a_{n-(i-1)} 10^{-1} + \dots + a_{n-(i-1)-1} 10^2 + a_1 10^{-n+(i-1)});$$

$$\delta_n = \left[ b_n \frac{a_1}{10} \right] - b_n a_1 10^{-1}.$$

Здесь и выше в квадратных скобках представлен результат умножения на цифровом интеграторе.



Анализ полученных выражений показывает, что абсолютное значение максимально возможной методической погрешности для  $n$ -декадного цифрового интегратора не превышает  $n$  единиц. Отметим следующее: так как в массиве единичных измерений меняются только последние 2—3 цифры, указанную методическую погрешность умножения можно учесть более точно, рассчитав ее для определенной комбинации цифр, присущей измерению в данной точке. Исходя из изложенного, рассмотрим одну из возможных структурных схем счетно-вычислительного блока, выполненного на базе цифрового интегратора с последовательным переносом, реализующего операцию удаления промахов и вычисление среднего значения  $\bar{g}$  по результатам единичных измерений  $g$ . Структурная схема счетно-вычислительного блока, решающего указанные задачи, приведена на рис. 2, а, б. Он содержит генератор опорной частоты (ГОЧ) и устройства: умножения (УУм), счета числа измерений (УСЧИ), устранения промахов (УУП), управления (УУ) и индикации результата (УИР).

Генератор опорной частоты необходим при формировании фиксированных интервалов времени  $t_1$  и  $t_2$  и  $\tau$ , в течение которых производится измерение пути падающей призмы лазерного интерферометра. В [7] сформулированы основные требования, которым должен удовлетворять такой генератор при измерении  $g$  с относительной погрешностью порядка  $10^{-8}$ . Поэтому в данной статье нет необходимости детально рассматривать эти требования и возможные реализации генератора.

Устройство умножения составляет основу счетно-вычислительного блока. Оно состоит из шифратора Ш коэффициента умножения; реверсивного счетчика РС<sub>1</sub>, фиксирующего разность числа импульсов  $N_2 - N_1$ , поступающих от устройства формирования счетных импульсов УФСИ лазерного гравиметра; двух декадных счетчиков прямого счета Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub>; импульсно-потенциальных вентилях В<sub>1</sub>÷В<sub>n</sub>; схем совпадения И<sub>1</sub>÷И<sub>3</sub> и суммирующих схем ИЛИ<sub>1</sub> и ИЛИ<sub>2</sub>.

Шифратор преобразует десятичный код коэффициента умножения в двоично-десятичный. Выходы шифратора управляют работой венти-

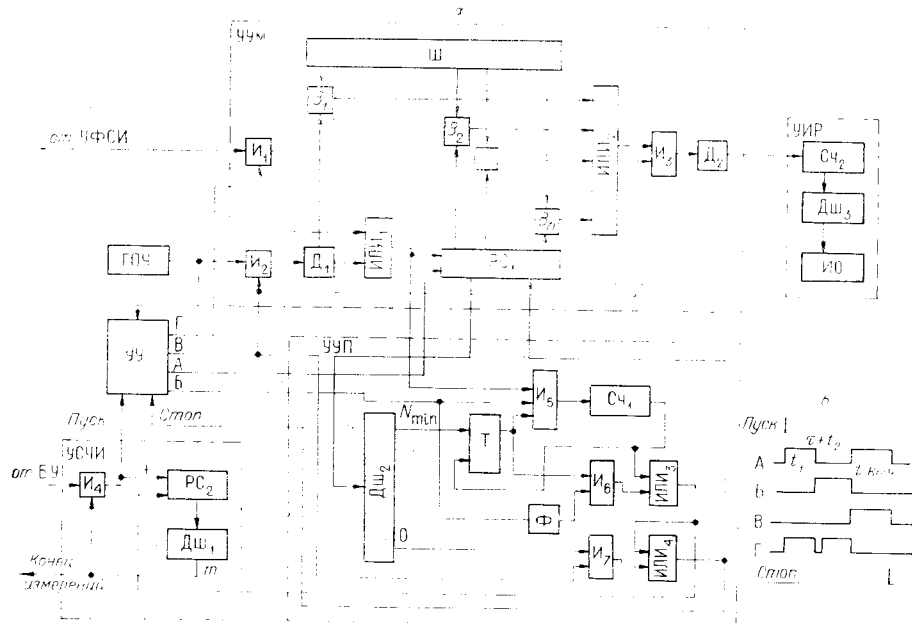


Рис. 2.

лей  $V_1—V_n$ , на импульсные входы которых поступают сигналы с выходов триггеров счетчиков  $D_1$  и  $PC_1$ . Счетчики  $D_1$  и  $D_2$ , один из которых включен на входе цифрового интегратора, а другой — на выходе, позволяют уменьшить методическую погрешность устройства умножения до величины, меньшей единицы, при разрешающей способности отсчета лазерного гравиметра в 8 десятичных знаков. Это уменьшение достигается за счет умножения на постоянный коэффициент увеличенного в 100 раз числа импульсов  $N_2—N_1$  и последующего деления на 100 результата умножения. На рис. 3 подробно представлена одна из возможных схем одноразрядного декадного цифрового интегратора, временные диаграммы, поясняющие принципы умножения которого приведены на рис. 1, б.

Устройство устранения промахов исключает из общего числа измерений результаты измерений  $N_2—N_1$ , которые не попадают в зону чисел  $N_{max} \div N_{min}$ . Оно содержит дешифратор  $Dш_2$ , определяющий моменты, когда разность чисел превышает  $N_{min}$ , и равенство нулю кодов счетчиков  $D_1$  и  $PC$ . В состав УУП входит также триггер  $T$ , запоминающий момент превышения разности  $N_2—N_1$  числа  $N_{min}$ ; счетчик числа  $\Delta N$  для определения момента, когда  $N_2—N_1$  превысит  $N_{max} = N_{min} + \Delta N$ ; формирователь  $\Phi$  логические схемы совпадения  $I_5—I_7$  и схемы ИЛИ<sub>3</sub> и ИЛИ<sub>4</sub>.

Устройство счета числа измерений содержит реверсивный счетчик  $PC_2$ , дешифратор  $Dш_1$  и схему совпадения  $I_4$ . При отсутствии промахов реверсивный счетчик  $PC_2$  работает в режиме суммирования до тех пор, пока его состояние не достигнет заданного числа, о чем будет

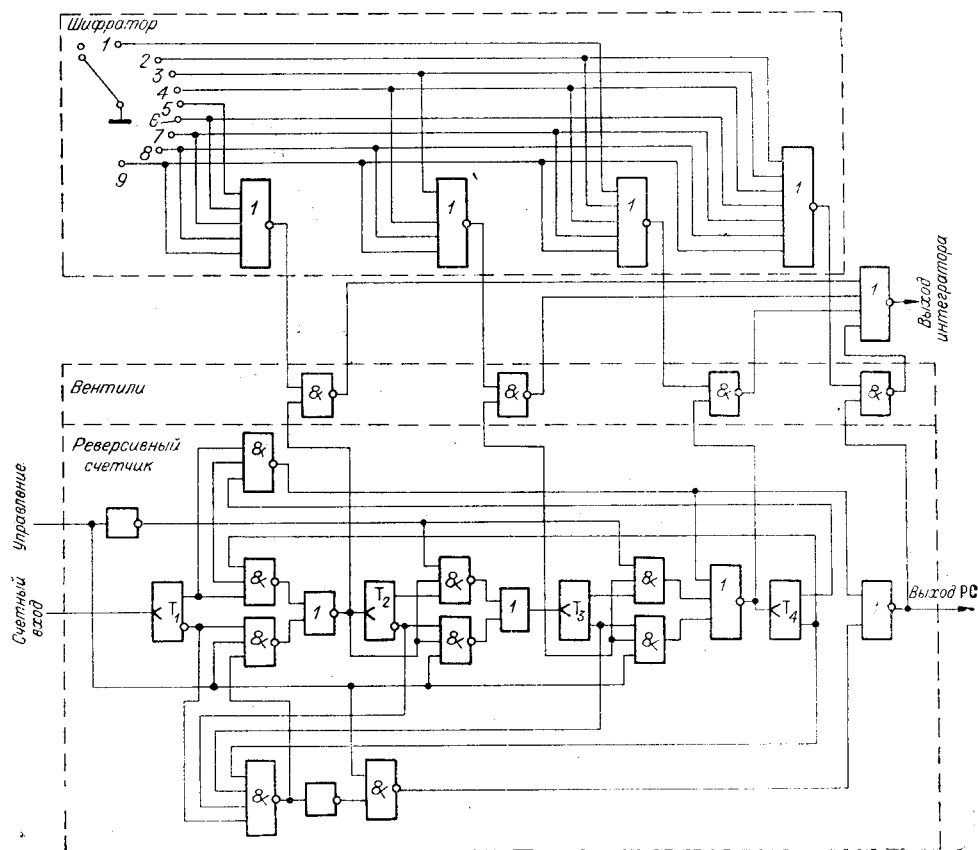


Рис. 3.

свидетельствовать сигнал дешифратора Дш<sub>1</sub>, который запретит пропуск пусковых импульсов от блока управления гравиметра, сигнализируя о конце серии, состоящей из  $m$  измерений.

Если же при измерении происходит сбой (промах), то сигнал, формируемый УУП, поступая на вычитающий вход РС<sub>2</sub>, возвращает триггеры РС<sub>2</sub> в состояние, предшествующее данному измерению. При этом в исходное состояние возвращаются также и триггеры счетчиков УУ и УУМ.

Устройство управления осуществляет управление работой устройств счетно-вычислительного блока лазерного гравиметра. По сигналу «Пуск» оно формирует управляющие сигналы в соответствии с временной диаграммой, приведенной на рис. 2, б.

Сигнал А используется для управления режимом работы реверсивного счетчика РС<sub>1</sub>. Сигнал Г пропускает на вход РС<sub>1</sub> через схему И<sub>1</sub> импульсы от устройства формирования счетных импульсов УФСИ в течение временных интервалов  $t_1$  и  $t_2$ . Сигналы Б и В управляют работой УУП, а сигнал В, кроме того, управляет работой схем совпадения И<sub>2</sub> и И<sub>3</sub> УУМ, открывая их на время, равное времени вычисления  $g$ . Окончание вычисления  $g$  одиночного измерения происходит по сигналу «Стоп», формируемому УУП.

Устройство индикации результата содержит регистрирующий счетчик Сч<sub>2</sub>, дешифратор Дш<sub>3</sub> и индикатор отсчета (ИО) на цифровых индикаторных лампах. При числе измерений  $m=100$  счетчик выполняется в двоично-десятичном коде, причем младший разряд декадного счетчика не участвует в индикации результата.

Рассмотрим работу счетно-вычислительного блока при многократном измерении ускорения силы тяжести. Запуск счетно-вычислительного блока производится от блока управления (БУ) гравиметра. Сигнал запуска проходит через схему И<sub>4</sub> на входы УУ и через суммирующий вход в РС<sub>2</sub>. При этом на выходе УУ формируется управляющий сигнал, обеспечивающий работу РС<sub>1</sub> в режиме суммирования. Через временной интервал  $t_1$  (сигнал А на рис. 2, б) в РС<sub>1</sub> будет зафиксировано  $N_1$  импульсов, а режим работы РС<sub>1</sub> сменится на вычитающий. В течение временного интервала  $t_2$  в счетчик РС<sub>1</sub> поступит  $N_2$  импульсов. Суммарное число импульсов, зафиксированное в счетчике РС<sub>1</sub> к моменту окончания интервала времени  $t_2$ , будет равно разности  $N_2 - N_1$ . Если выполняется условие  $N_{\max} > N_2 - N_1 > N_{\min}$ , триггер Т фиксирует это состояние, открыв схему И<sub>5</sub> и закрыв И<sub>6</sub>. При этом в счетчике Сч<sub>1</sub> пройдет число импульсов  $N < N_{\max} - N_{\min}$ .

В момент окончания временного интервала  $\tau + t_2$  (сигнал Б) счетчик РС<sub>1</sub> вновь устанавливается в режим суммирования (сигнал А), схемы И<sub>2</sub> и И<sub>3</sub>, И<sub>7</sub> открываются сигналом В. Начинается процесс умножения числа  $N_2 - N_1$  на постоянный коэффициент, задаваемый шифратором. Вычисление заканчивается в момент, когда состояние триггеров счетчиков Д<sub>1</sub> и РС<sub>1</sub> соответствует исходному нулевому состоянию, которое определяет дешифратор Дш<sub>2</sub>. Сигнал дешифратора Дш<sub>2</sub>, пройдя через логические схемы И<sub>7</sub> и ИЛИ<sub>4</sub>, производит установку триггеров УУ в исходное состояние.

Если  $N_2 - N_1 < N_{\min}$ , то после окончания временного интервала  $t_2$  сигнал формирователя Ф, пройдя через открытую логическую схему И<sub>6</sub> и схему ИЛИ<sub>3</sub>, возвращает триггеры РС<sub>2</sub> в состояние, предшествующее измерению, а сигнал с выхода схемы ИЛИ<sub>4</sub> возвращает в исходное состояние триггеры УУ и счетчиков Д<sub>1</sub> и РС<sub>1</sub>.

Если  $N_2 - N_1 > N_{\max}$ , то сигнал сброса триггеров УУ, счетчиков Д<sub>1</sub> и РС<sub>1</sub> и уменьшения на 1 состояния РС<sub>2</sub> формируется сигналом переполнения счетчика СЧ<sub>1</sub>.

После проведения  $m$  числа измерений на выходе дешифратора образуется сигнал «Конец измерений», поступающий в БУ гравиметра

и закрывающий схему И<sub>4</sub>. На индикаторе отсчета при этом будет зафиксирован результат усреднения  $m$  числа измерений.

Таким образом, рассмотренная структурная схема обеспечивает решение требуемых при измерении  $g$  задач. Она позволяет сравнительно просто реализовать СВБ транспортабельного лазерного гравиметра на базе серийно выпускаемых микросхем серий 137 и 155.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. S a c u m a. Recent Developments in the Absolute Measurement of Gravitational Acceleration in Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 343, edited by D. N. Langenberg and B. N. Taylor, p. 447. U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. 1971.
2. Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь. Анализ погрешностей электронно-счетного блока.— В кн.: Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Новосибирск, 1972.
3. Г. П. Арнаут, Л. Д. Гик, Е. Н. Калиш, И. С. Малышев, Ю. Ф. Стусь. Механическая и электронная схемы гравиметра.— В кн.: Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Новосибирск, 1972.
4. Л. Д. Гик, В. Н. Затолокин, Ю. Е. Нестерихин, Л. А. Петрашевич, М. Г. Смирнов. Вопросы обработки результатов абсолютных измерений ускорения силы тяжести.— В кн.: Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Новосибирск, 1972.
5. Г. И. Тахванов, Ю. Ш. Шхалахов. К вопросу о построении импульсных моделей с обратной связью. Математическое моделирование и электрические цепи. Киев, «Наукова думка», 1964.
6. Ян Си-Зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— Автоматика и телемеханика, 1960, т. XXI, № 7.
7. Г. П. Арнаут, Л. Д. Гик, Е. Н. Калиш, В. П. Коронкевич, Ю. Е. Нестерихин, Ю. Ф. Стусь. Точность измерения лазерным гравиметром.— В кн.: Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Новосибирск, 1972.

*Поступила в редакцию 26 февраля 1974 г.*

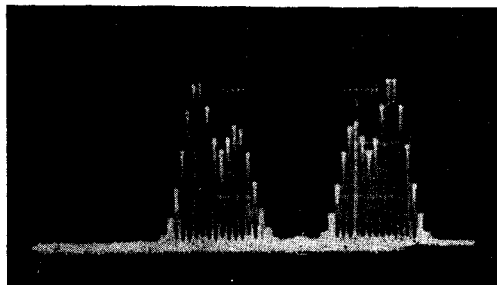
УДК 532.574.082.54.1088.8

**Ю. Г. ВАСИЛЕНКО, Ю. Н. ДУБНИЩЕВ, В. С. СОБОЛЕВ,  
А. А. СТОЛПОВСКИЙ**

*(Новосибирск)*

### **ЛАЗЕРНЫЕ ДОППЛЕРОВСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ВЕКТОРА СКОРОСТИ СО СМЕЩЕНИЕМ ЧАСТОТЫ**

Определение направления вектора скорости одновременно с измерением его величины является важной задачей, особенно при исследовании вихревых потоков. Один из способов определения знака заключается в несимметричной деформации огибающей доплеровского сигнала путем применения соответствующих амплитудных фильтров в приемной части оптической схемы или формирования в рассеивающем объеме интерференционного поля с несимметричным распределением интенсивности в направлении измеряемой компоненты скорости. Фотография сигнала,



*Рис. 1.*