

А. М. Гончаренко, В. А. Васильев, В. А. Жмудь

(Новосибирск)

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ВИБРОМЕТРОВ**

Рассмотрены методика и аппаратура измерения сверхмалых приращений фазы гетеродинного высокочастотного сигнала лазерного виброметра. Показано, что повышение чувствительности достигается переносом спектра сигнала на промежуточную частоту 14,7 кГц с последующим получением трехфазных отсчетов разностной частоты, которые служат для устранения дрейфа нуля АЦП и вычисления когерентной и квадратурной компонент аналитического сигнала. Расчет амплитуды и фазы аналитического сигнала произведен на компьютере.

Введение. Дистанционное измерение вибраций лазерными методами применяется в разных областях науки и техники. Принцип действия лазерного виброметра основан на измерении фазы сигнала биений двух лазерных пучков, отраженных от объекта исследования [1]. Спектр сигнала биений с помощью акустооптических модуляторов переносится на несущую частоту $F_c = 10,7$ МГц для согласования с полосой пропускания фотоприемника. Разность фаз принятых высокочастотных (ВЧ) сигналов пропорциональна приращению оптической длины пути в единицах длины волны излучения.

Приращения разности фаз $\Delta\varphi(t)$ обычно содержат большую низкочастотную (НЧ) компоненту $\varphi_{НЧ}(t)$ и малую высокочастотную компоненту $\delta\varphi$. Изучению подлежит сигнал малых фазовых приращений $\delta\varphi$ в интервале $2\pi \cdot 10^{-5} - 2\pi \cdot 10^{-4}$ в полосе частот от $f_{\min} = 200$ Гц до $f_{\max} = 5$ кГц в условиях большой мешающей низкочастотной компоненты $\varphi_{НЧ}(t)$. Целью работы является повышение точности измерения приращений фазы в полосе звуковых частот.

Теоретические основы и аппаратная часть. В известных фазометрах [2–4] не достигаются одновременно высокая точность и достаточное быстродействие. Решаемая задача требует достижения высокой точности измерений в широкой полосе в условиях мешающих факторов реального сигнала. Основные из них: амплитудная модуляция сигнала до 50 %, медленные изменения его уровня на 40 дБ, аддитивные и мультипликативные шумы. Источник мультипликативных шумов – изменение мощности лазера и рассеиваю-

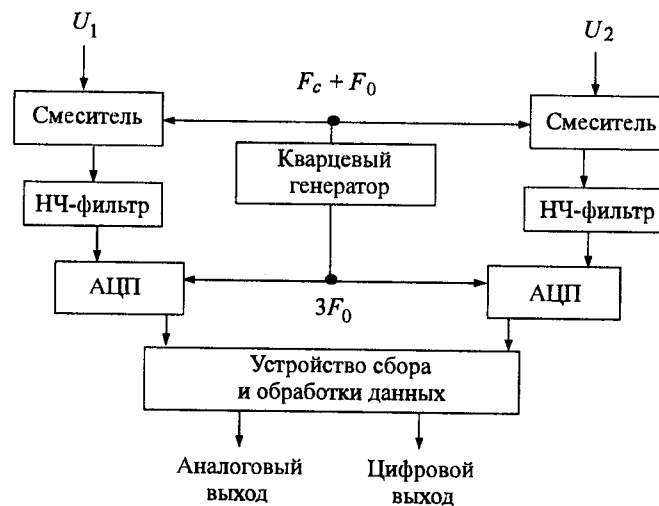


Схема фазометра для высокочастотного сигнала от лазерного виброметра

ших свойств объекта, аддитивных – электрические наводки и шумы фотоприемника.

В основу предлагаемого метода повышения точности измерений положено определение фазы аналитического сигнала [5]. Для получения аналитического сигнала использован гетеродинный перенос исходного сигнала на промежуточную частоту. Наилучшее сочетание точности и быстродействия оценки фазы достигается на промежуточной частоте $F_0 = 14,7$ кГц, заданной 18-разрядными АЦП с частотой дискретизации $F_d = 3F_0$. Для переноса спектра сигнала с несущей частоты $F_c = 10,7$ МГц на промежуточную используется предварительное преобразование.

Устройство двухступенчатого преобразования частоты (см. рисунок) имеет два идентичных канала. Первая ступень преобразования – перенос ее с F_c на F_0 – выполнена на перемножителях с НЧ-фильтрами на выходах. Кварцевый генератор вырабатывает сигнал опорной частоты $F_R = F_c + F_0$. Вторая ступень понижения частоты с получением аналитического сигнала выполнена на АЦП.

В каждом канале АЦП с частотой дискретизации F_d , примерно вдвое превышающей входную частоту F_0 , играет роль трех независимых АЦП, получающих в силу стробоскопического эффекта отсчеты $v(t_k)$ разностной частоты $F_\Delta = F_0 - F_d/3$ со сдвигом фаз на треть периода частоты, $F_d/3$. Из каждой тройки этих отсчетов вычисляется и устраняется смещение нуля, после чего вычисляется аналитический сигнал (когерентная и квадратурная составляющие с требуемым сдвигом фаз 90°).

Исходный узкополосный сигнал

$$u(t) = u_0(t) \sin [2\pi F_c + \varphi(t)], \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \Delta\varphi(t) + \delta\varphi(t) \quad (2)$$

в результате двухступенчатого преобразования переходит в последовательность отсчетов

$$v(t_k) = v_0 \sin[\varphi(t_k) + k \cdot 120^\circ], \quad (3)$$

которая состоит из групп по три отсчета:

$$A(t_k) = v_0 \sin[\varphi(t_k)] = v_0 \sin \varphi_k, \quad (4)$$

$$B(t_k) = v_0 \sin[\varphi_k + 120^\circ], \quad (5)$$

$$C(t_k) = v_0 \sin[\varphi_k + 240^\circ]. \quad (6)$$

Далее из условия $A(t_k) + B(t_k) + C(t_k) \stackrel{df}{=} 0$ вычисляются

$$\dot{A}_k = A(t_k) - \{A(t_k) + B(t_k) + C(t_k)\} = -B(t_k) - C(t_k), \quad (7)$$

$$\dot{B}_k = -A(t_k) - C(t_k), \quad (8)$$

$$\dot{C}_k = -A(t_k) - B(t_k) \quad (9)$$

и аналитический сигнал

$$\psi(t_k) = \dot{A}_k + \frac{i}{\sqrt{3}} [\dot{B}_k - \dot{C}_k], \quad (10)$$

для которого справедливо

$$\psi(t) = r_k \exp\{i(F_\Delta + \varphi_k)\}. \quad (11)$$

Тогда фаза φ_{1k} сигнала (10) определяется соотношением

$$\varphi_{1k} = \arctg \frac{\dot{A}_k \sqrt{3}}{\dot{B}_k - \dot{C}_k}. \quad (12)$$

Выражение (12) несимметрично относительно $\dot{A}_k, \dot{B}_k, \dot{C}_k$. (Далее индекс k и символ « \circ » при A, B, C, φ опускаем.) Целесообразно получить симметричное соотношение, вычисляя две дополнительные равноправные оценки фазы, а затем усредняя их все:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{B\sqrt{3}}{C-A}, \quad \varphi_3 = \arctg \frac{C\sqrt{3}}{A-B}. \quad (13)$$

Суммирование углов векторов можно получить перемножением их проекций, поскольку при перемножении векторов их углы складываются, а изменения длин не имеют значения при определении углов:

$$\varphi = \frac{1}{3}(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) = \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{3\sqrt{3}ABC}{(B-C)(C-A)(A-B)}. \quad (14)$$

Программная часть. По рассмотренной методике написана программа для компьютера под операционной системой Windows 98 на языке программирования C++ с применением технологии DirectX 8. В качестве программного АЦП использовалась звуковая плата компьютера с частотой дискретизации $F_d = 44,1$ кГц. Для вычисления угла вектора по его координатам (14) применялась функция $\operatorname{atan2}(x, y)$.

В лазерном виброметре требуется измерение фазы в больших пределах (более 2π). Функция $\operatorname{atan2}$ периодическая и выдает правильно значения угла $\varphi(t)$ в пределах от $-\pi$ до $+\pi$ рад. При выходе значения угла за эти пределы происходит разрыв функции со скачком фазы 2π . Это явление детектируется программно, и результат определения фазы корректируется на 2π , причем знак приращения определяется направлением скачка.

Чувствительность метода ограничена собственными шумами на уровне $2\pi \cdot 10^{-5}$ ($0,0036^\circ$). Применение цифровой фильтрации снижает величину шума до $6\pi \cdot 10^{-6}$ ($0,001^\circ$).

Во временной области это соответствует чувствительности измерения временных девиаций фронта сигнала величиной 10^{-12} с. Пикосекундная чувствительность достигается при сигнале не менее 1 мВ.

На основе описанного программно-аппаратного комплекса также реализован измеритель частотных девиаций, где частота $\omega(t) = d\varphi(t)/dt$ вычисляется по известному в теории сигналов соотношению

$$\omega(t_k) = \frac{\dot{X}_i(t_k)Y(t_k) - X(t_k)\dot{Y}_i(t_k)}{X^2(t_k) + Y^2(t_k)} \quad (15)$$

(здесь $X = ABC$ и $Y = (B - C)(C - A)(A - B)$).

Заключение. Программно-аппаратное средство измерения фазы и частоты в разных модификациях применено в лазерных дистанционных виброметрах. Результат представляется в аналоговом и цифровом виде, а также в графическом (на мониторе компьютера), данные сохраняются для последующей обработки. Измеритель обладает высокой помехозащищенностью. Наряду с полосовой фильтрацией при преобразовании спектра сигнала применяется временное осреднение.

Вследствие программной корректировки скачка фазы при переходе через уровень 2π устранены ограничения на верхнее значение приращения фазы.

В результате испытаний подтверждена возможность детектирования приращения фазы ВЧ-сигнала в полосе 5–10 кГц с погрешностью $2\pi \cdot 6 \cdot 10^{-6} - 2\pi \cdot 10^{-5}$. Предельная чувствительность достигается при превышении сигналом величины 0,5–2 мВ.

Для фотоприемника со спектральной плотностью шума $S_{\text{ш}} \approx 1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при амплитуде выходного сигнала $U_{\text{ф}} \approx 1 \text{ мВ}$ и для лазера с длиной волны $\lambda \approx 10 \text{ мкм}$ в полосе $f = 10^4 \text{ Гц}$ амплитуда вибраций вычисляется как

$$a \approx \lambda S_{\text{ш}} U_{\text{ф}} f^{1/2} = 0,001 \text{ мкм.}$$

При этом отношение сигнал/шум составляет 4 : 1.

В качестве АЦП использована звуковая плата компьютера. Каскад понижения частоты входных сигналов выполнен на микросхемах МС3361.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. А., Жмудь В. А., Ильянович Ю. Н. и др. Детектирование приращения текущей фазы в лазерном измерителе малых вибраций на больших базовых расстояниях // ПТЭ. 2002. № 3. С. 98.
2. Гольдштейн С. Ш., Мукимов К. М., Сигал Г. П. и др. Низкочастотный фазометр // ПТЭ. 1982. № 6. С. 133.
3. Френкс Л. Теория сигналов: Пер. с англ. /Под ред. Д. Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974.
4. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: Пер. с франц. М.: Мир, 1983.
5. Вакман Д. Е. Измерение частоты аналитического сигнала // Радиотехника и электроника. 1979. № 5. С. 982.

*Институт лазерной физики СО РАН,
E-mail: vadim@laser.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
20 апреля 2002 г.*