

- В. П. Чеботаев, Высокостабильный газовый лазер на основе нелинейного поглощения ( $\lambda=0,63$  мкм). Ч. 5.— «Автометрия», 1974, № 6.
6. Научно-технический отчет по теме: «Разработка и исследование новых методов интерференционного преобразования одночастотного и многочастотного излучения». Гос. регистрация № 71075724. (ВНЦТИ № Б353457). Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1973.
7. Ю. В. Троицкий. Осциллографическая регистрация появления внеосевых мод в газовом ОКГ.— «ПТЭ», 1973, № 2.
8. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации частоты газового лазера по провалу Лэмба.— «Автометрия», 1971; № 1.

Поступила в редакцию 10 апреля 1975 г.

УДК 621.317.77:531.7

**В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, В. Н. БУРНАШОВ, В. В. ВОРОБЬЕВ**  
(Новосибирск)

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ

Измерение сдвигов фаз\* двух сигналов в настоящее время, за редкими исключениями [1], производится при одинаковых частотах сигналов, а пределы однозначного измерения составляют  $0 \div 360^\circ$ . Такие измерения выполняются, например, с помощью триггерных или компенсационных фазометров. Однако для измерения перемещений системами, использующими в качестве датчика двухчастотный интерферометр (а также поворотный или линейный индуктосины), или для измерения расстояний в различного рода дальномерах необходимы кумулятивные фазометры, позволяющие однозначно и с точностью до малых долей периода опорного сигнала измерять сдвиг фаз двух сигналов (опорного — постоянной частоты и информационного — в общем случае переменной частоты) в широком диапазоне его изменения, на много порядков превосходящем период опорного сигнала. В настоящее время возможности таких фазометров полностью не используются: в двухчастотных лазерных измерителях перемещений измерение сдвига фаз опорного и информационного сигналов осуществляется с точностью только до периода опорного сигнала, а в лазерных дальномерах используется «набор» фиксированных частот сигнала и гетеродина, что позволяет косвенно определять кумулятивный сдвиг фаз опорного и информационного сигналов. По этой причине в современных лазерных измерителях перемещений и дальномерах используются разнородные блоки электронной обработки сигналов. Применение кумулятивных фазометров позволяет устранить указанную разнородность и совместить функции измерения перемещения и расстояния в одном устройстве. С этой целью рассмотрим в обобщенном виде зависимость выходной величины этих измерителей — сдвига фаз — от измеряемого и паразитных параметров.

Простейшая схема измерения перемещения или расстояния по величине сдвига

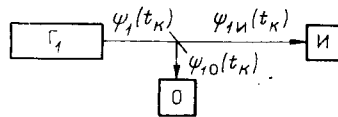


Рис. 1.

\* Определения «разность фаз» и «сдвиг фаз» в литературе используются как синонимы одного и того же понятия. Здесь же определение «разность фаз» будет использоваться в обычном смысле, а определение «сдвиг фаз» — для обозначения приращения разности фаз.

фаз представлена на рис. 1, где  $\Gamma_1$  — генератор, О и И — опорный и информационный приемники, расположенные от генератора на расстояниях  $L_{1o}(t_k)$  и  $L_{1н}(t_k)$ , в общем случае зависящих от времени. Если фазу выходного сигнала генератора, соответствующего моменту времени  $t_k$ , представить в виде

$$\psi_1(t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \omega_1(t) dt + \varphi_1, \quad (1)$$

где  $\omega_1(t)$  — частота генератора,  $\varphi_1$  — начальная фаза,  $t_k - \frac{L_{1o}(t_k)}{c}$  — время задержки сигнала.

откуда следует, что  $\psi(t_k)$  не зависит от начальной фазы генератора  $\varphi_1$ .

Как известно [2, 3], информация об измеряемом перемещении или расстоянии может быть получена при измерении сдвига фаз. При измерении перемещений  $L_{1o}$ ,  $\omega_1 = \text{const}$  и, как это следует из (2),

$$\Delta L_{1н}(t_k) = -\frac{\Delta\psi}{2\pi} \lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — длина волны лазера.

При измерении расстояний ( $L_{1н} = \text{const}$ ) сдвиг фаз, пропорциональный  $L_{1н}$ , может быть получен за счет изменения частоты генератора  $\omega_1$ , использования двух идентичных систем (см. рис. 1), одновременно работающих на двух различных частотах, или, наконец, одной системы, работающей в различное время на двух различных частотах, что широко используется в современных лазерных дальномерах [4, 5]. Это объясняется тем, что измерения частоты (а также разности частот) производятся в диапазоне порядка сотен мегагерц, где в настоящее время достигаются точности измерения частоты до  $10^{-9}$ . Однако такие измерения требуют сравнительно большого времени, а используемая для их проведения аппаратура не пригодна для измерения перемещений. Кроме того, на оптических частотах непосредственные измерения разности фаз не выполняются. На практике такие измерения осуществляются только с использованием гетеродинного преобразования частот. При этом схема (см. рис. 1) дополняется вторым генератором  $\Gamma_2$ , с которого сигналы поступают на информационный и опорный приемники по путям  $L_{2н}$  и  $L_{2o}$ , а фазы опорного и информационного фотоприемников можно записать так:

$$\begin{aligned} \psi_o(t_k) &= \psi_{2o}(t_k) - \psi_{1o}(t_k) = \int_{t_0}^{t_k - \frac{L_{2o}(t_k)}{c}} \omega_2(t) dt + \varphi_2 - \int_{t_0}^{t_k - \frac{L_{1o}(t_k)}{c}} \omega_1(t) dt - \varphi_1; \\ \psi_n(t_k) &= \psi_{2н}(t_k) - \psi_{1н}(t_k) = \int_{t_0}^{t_k - \frac{L_{2н}(t_k)}{c}} \omega_2(t) dt + \varphi_2 - \int_{t_0}^{t_k - \frac{L_{1н}(t_k)}{c}} \omega_1(t) dt - \varphi_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Используя (4), получим выражения для частот выходных сигналов опор-

ного и информационного фотоприемников:

$$\begin{aligned}\omega_o(t_k) &= \frac{d\psi_o(t_k)}{dt_k} = \omega_2 \left[ t_k - \frac{L_{2o}(t_k)}{c} \right] \left[ 1 - \frac{v_{2o}(t_k)}{c} \right] - \\ &\quad - \omega_1 \left[ t_k - \frac{L_{1o}(t_k)}{c} \right] \left[ 1 - \frac{v_{1o}(t_k)}{c} \right]; \\ \omega_n(t_k) &= \frac{d\psi_n(t_k)}{dt_k} = \omega_2 \left[ t_k - \frac{L_{2n}(t_k)}{c} \right] \left[ 1 - \frac{v_{2n}(t_k)}{c} \right] - \\ &\quad - \omega_1 \left[ t_k - \frac{L_{1n}(t_k)}{c} \right] \left[ 1 - \frac{v_{1n}(t_k)}{c} \right].\end{aligned}\quad (5)$$

Интегрируя разность частот опорного и информационного фотоприемников, получим формулу для сдвига фаз

$$\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2}) = \int_{t_{k1}}^{t_{k2}} [\omega_n(t_k) - \omega_o(t_k)] dt_k. \quad (6)$$

Операция интегрирования разности частот (6) информационного и опорного фотоприемников выполняется с помощью кумулятивного фазометра. Формулы (5) и (6) в отличие от приведенных в [2] пригодны для анализа как измерителей перемещений, так и дальномеров, использующих принцип гетеродинного преобразования частот с непрерывным изменением во времени частот генераторов и расстояний от этих генераторов до опорного и информационного приемников.

В измерителях перемещений, т. е. при постоянных  $\omega_1, \omega_2, \omega_2 - \omega_1 = \omega_o, L_{2n}, L_{2o}, L_{1o}$  и переменном  $L_{1n}(t)$ , как это следует из (6),

$$\Delta\psi = \int_{t_{k1}}^{t_{k2}} \omega_d(t_k) dt_k = \int_{t_{k1}}^{t_{k2}} \frac{\omega_1 v_{1n}(t_k)}{c} dt_k = \frac{\omega_1}{c} \Delta L_{1n}(t_{k1}, t_{k2}), \quad (7)$$

где  $\omega_d(t_k) = \omega_n(t_k) - \omega_o$  — доплеровская частота, откуда

$$\Delta L_{1n}(t_{k1}, t_{k2}) = \frac{c\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2})}{\omega_1} = \lambda_1 \frac{\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2})}{2\pi}.$$

Для измерителей расстояний с непрерывным изменением частот  $\omega_1(t_k)$  и  $\omega_2(t_k)$  при постоянных  $L_{2n}, L_{1n}, L_{2o}, L_{1o}, \omega_2(t_k) - \omega_1(t_k) = \omega_o$  и  $v_{2n} = v_{1n} = v_{2o} = v_{1o} = 0$  формулу (6) можно также упростить:

$$\begin{aligned}\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2}) &= \int_{t_{k1}}^{t_{k2}} \left[ \omega_1 \left( t_k - \frac{L_{2n}}{c} \right) - \omega_1 \left( t_k - \frac{L_{1n}}{c} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \omega_1 \left( t_k - \frac{L_{2o}}{c} \right) + \omega_1 \left( t_k - \frac{L_{1o}}{c} \right) \right] dt_k.\end{aligned}\quad (8)$$

Однако полученная формула не дает простой зависимости величины результирующего сдвига фаз от приращения частоты  $\omega_1(t_k)$ . Для получения этой зависимости функцию  $\omega_1(t_k)$  представим в виде

$$\omega_1(t) = \begin{cases} \omega_1 & \text{при } t_{k1} < t < t_1; \\ \omega_1(t) & \text{при } t_1 < t < t_2; \\ \omega_1 + \Delta\omega_1 & \text{при } t_2 < t < t_{k2}, \end{cases} \quad (9)$$

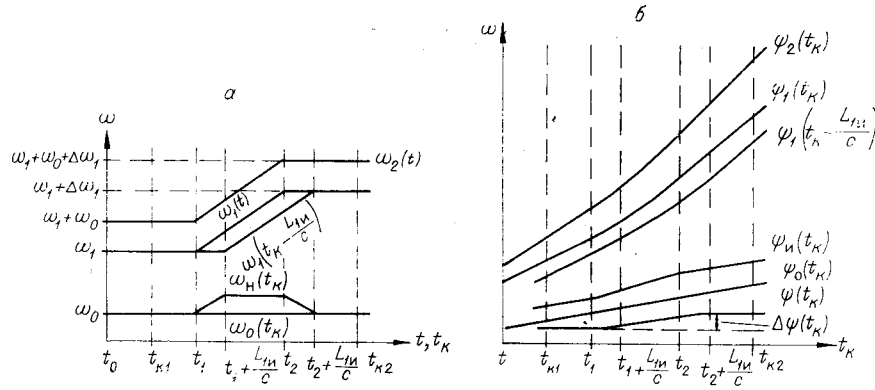


Рис. 2.

где  $\omega_1, \Delta\omega_1 = \text{const}$ , а  $\omega_1(t)$  — произвольная функция с двумя известными значениями  $\omega_1(t_1) = \omega_1$  и  $\omega_1(t_2) = \omega_1 + \Delta\omega_1$ .

Полагая

$$t_{k2} > t_2 + \tau, \quad (10)$$

где

$$\tau > \frac{L_{2н}}{c}, \quad \frac{L_{1н}}{c}, \quad \frac{L_{2о}}{c} \quad \text{и} \quad \frac{L_{1о}}{c},$$

и подставляя функцию (9) в (8), получаем

$$\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2}) = \frac{\Delta\omega_1}{c} (L_{1н} - L_{2н} + L_{2о} - L_{1о}). \quad (11)$$

Формула (11) представляет результирующий сдвиг фаз при изменении частоты генератора сигнала и гетеродина, который при условиях (10) не зависит от начала  $t_{k1}$  и конца  $t_{k2}$  измерения сдвига фаз.

Пользуясь (11), получим выражение для измеряемого расстояния

$$L_{1н} = \frac{\Delta\psi(t_{k1}, t_{k2})}{2\pi} \lambda_{\Delta} + L_{2н} - L_{2о} - L_{1о}, \quad (12)$$

где  $\lambda_{\Delta} = c2\pi/\Delta\omega_1$ .

В качестве иллюстрации случая получения сдвига фаз при использовании гетеродинного преобразования частот и непрерывного изменения частот генератора сигнала  $\omega_1(t)$  и гетеродина  $\omega_2(t)$  на величину  $\Delta\omega_1$  на рис. 2, а приведены графики этих функций (при  $t_1 < t < t_2$  скорости возрастания обеих функций постоянны и равны между собой), а также функции  $\omega_1\left(t - \frac{L_{1н}}{c}\right)$ , запаздывающей на  $\frac{L_{1н}}{c}$  относительно  $\omega_1(t)$ , функций  $\omega_0(t)$  и  $\omega_n(t)$ , т. е. частот выходных сигналов опорного и информационного приемников, связанных с  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$ . Причем поскольку величины  $\frac{L_{2н}}{c}$ ,  $\frac{L_{2о}}{c}$  и  $\frac{L_{1о}}{c}$  малы, то

$$\omega_0(t) \approx \omega_2(t) - \omega_1(t) = \omega_0 = \text{const};$$

$$\omega_n(t) \approx \omega_2(t) - \omega_1\left(t - \frac{L_{1н}}{c}\right).$$

Как это видно из рис. 2, а, частота выходного сигнала информационного приемника в интервале  $\left(t_1, t_2 + \frac{L_{1н}}{c}\right)$  отклоняется от частоты опорного сигнала, причем величина этого отклонения пропорциональна измеряемому

расстоянию  $L_{1н}$ . Так, например, при постоянных скоростях изменения частот  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$ , равных  $2\pi \cdot 10^6$  (рад/с<sup>2</sup>), и  $L_{1н} = 3 \cdot 10^4$  м, в интервале  $(t_1, t_2 + \frac{L_{1н}}{c})$  максимальное отклонение частоты информационного сигнала от частоты опорного сигнала составляет  $\frac{\omega_1}{2\pi} \frac{L_{1н}}{c} = 100$  Гц, что при реально используемых частотах опорного сигнала порядка нескольких десятков килогерц составляет малую величину.

На рис. 2, б приведены графики фаз  $\psi_2(t)$ ,  $\psi_1(t)$ ,  $\psi_1\left(t - \frac{L_{1н}}{c}\right)$ ,  $\psi_n(t) \approx \psi_2(t) - \psi_1\left(t - \frac{L_{1н}}{c}\right)$ ,  $\psi_0(t) \approx \psi_2(t) - \psi_1(t)$  и  $\psi(t) = \psi_n(t) - \psi_0(t)$ , равных (в сумме с произвольными постоянными) интегралам от соответствующих функций, показанных на рис. 2, а.

Из проведенных рассуждений следует, что при использовании гетеродинного преобразования частот для измерения перемещений и расстояний, линейно связанных со сдвигом фаз выходных сигналов — опорного (постоянной частоты) и информационного (переменной частоты), указанный сдвиг фаз в обоих случаях может быть измерен одинаковым способом — интегрированием разности опорной и информационной частот, которое выполняется с помощью кумулятивного фазометра, применяемого, например, в двухчастотном лазерном измерителе перемещений, рассмотренном в [3], что позволяет создать комбинированный измеритель перемещений и расстояний и сократить время при измерении расстояний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cumulative phase meter using wholecycle and partial cycle comparison.— Пат. США № 3512085. Off. Gasette, 12 мая 1970, т. 874.
2. Г. П. Астафьев и др. Радионавигационные устройства и системы. М., «Сов. радио», 1958.
3. С. Н. Атутов и др. Измеритель угловых и линейных перемещений на основе двухчастотного лазера.— «Автоматрия», 1975, № 5.
4. Д. Оуэнс. Лазеры в метрологии и геодезии.— В кн.: Применения лазеров. М., «Мир», 1974.
5. R. H. BradSELL. Telemetry with modulated beams short range high resolution Systems.— "Alta frequenza", 1972, vol. XLI, № 10, English issue № 6.

Поступила в редакцию 11 мая 1975 г.