

## Повышение точности радиолокационного ЧМ-высотомера малых высот

В.Д. Захарченко, Ю.А. Цапков, С.В. Захарченко

*Рассматривается задача подавления «дискретной ошибки» высотомера малых высот за счет введения дополнительной «медленной» частотной модуляции. Разработаны алгоритмы подбора оптимальной формы дополнительной модуляции и весового суммирования. Приведены результаты расчета погрешности, полученные математическим моделированием работы высотомера при различных формах модулирующего напряжения и при весовой обработке показаний счетчика в реальном времени.*

### Введение

Целью работы является повышение точности высотомера малых высот (рис. 1), работающего по принципу частотной модуляции за счет выбора формы модулирующего напряжения и цифровой обработки показаний счетчика при сохранении занимаемой полосы частот. Эта задача может представлять интерес для разработчиков простых и компактных средств радиотехнических измерений, использующих микропроцессорную технику.

Высотомеры малых высот, построенные по схеме измерения биений сигналов с частотной модуляцией - зондирующего и отраженного, отличаются простотой технической реализации, однако обладают существенным недостатком, т. н. «дискретной ошибкой», определяемой девиацией частоты  $\Delta\omega$  и носящей методический характер [1].

Одно из наиболее простых средств подавления дискретной ошибки ЧМ-дальномеров - использование дополнительной «медленной» модуляции средней частоты сигнала  $\omega(t) = \omega_0 + \Omega_m(t)$ . Достоинство такого метода в простоте технической реализации, выражающейся в минимальной доработке ЧМ-высотомера и регистрирующего устройства, которое должно работать в режиме усредняющего счета.

Физической основой работы дальномера является соотношение  $\tau = 2R/c$ , где  $R$  - измеряемое расстояние;  $\tau$  - время, за которое электромагнитная волна проходит путь до поверхности и

обратно;  $c$  - скорость света. При отражении сигнала  $x_1(t) = A_1 \cos[\Phi(t)]$  от поверхности, до которой измеряется расстояние, в приемник поступит сигнал с задержкой фазы на величину  $\tau$ :  $x_2(t) = A_2 \cos[\Phi(t - \tau)]$ . Смеситель (См) и фильтр низких частот (ФНЧ) представляют собой коррелятор разностной частоты [2], на выходе которого получается сигнал

$$z(t) = A \cos[\Phi(t) - \Phi(t - \tau)]. \quad (1)$$

Для дальнейшего рассмотрения представим разность фаз в (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(t) - \Phi(t - \tau) &= \frac{\Phi(t) - \Phi(t - \tau)}{\tau} \tau \approx \\ &\approx \frac{d\Phi}{dt} \tau = \omega(t) \tau, \end{aligned}$$

где  $\omega(t)$  - мгновенная частота. Для малых высот (величина  $\tau$  порядка  $10^{-7}$  секунды для высот до 100 м) такое приближение является достаточно точным. При этом сигнал на выходе ФНЧ можно записать в виде  $z(t) \cong A \cos[\omega(t)\tau]$ . В стандартном ЧМ-высотомере циклическая частота изменяется по гармоническому закону [1]  $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$ , где  $\omega_0$  - несущая частота сигнала;  $\Delta\omega$  - девиация частоты;  $\Omega$  - модулирующая частота ( $\Omega \ll \Delta\omega, \omega_0$ ). Счетчик, являющийся частью дальномера, измеряет количество положительных переходов через нуль сигнала

$$z(t) = A \cos[\omega_0 \tau + \Delta\omega \tau \cos \Omega t] \quad (2)$$

на некотором временном интервале.

Для анализа рассмотрим минимальный интервал, равный половине периода модулирующей частоты (во всех других полупериодах значения счетчика будут повторяться). Положительные переходы через нуль функции (2) происходят

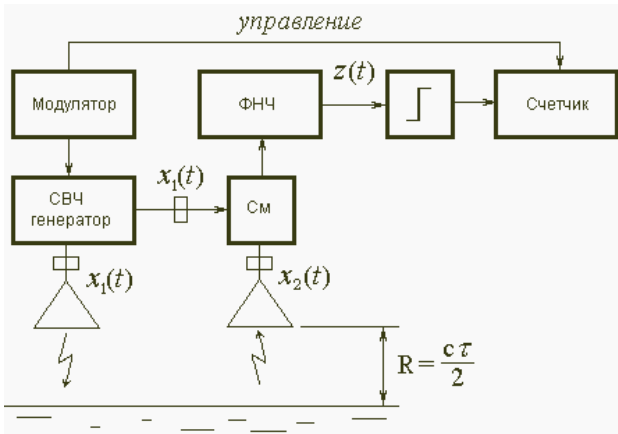


Рис. 1

через интервалы аргумента косинуса, равные его периоду, т. е. при

$$\omega_0\tau + \Delta\omega\tau \cos \Omega t = -\frac{\pi}{2} + 2\pi n, \quad n \in Z. \quad (3)$$

На рис. 2,а представлен график этой функции, из которого видно, что показания счетчика составляют величину

$$N = \left\lceil \left\lfloor \frac{\omega_0\tau + \Delta\omega\tau}{2\pi} \right\rfloor \right\rceil - \left\lceil \left\lfloor \frac{\omega_0\tau - \Delta\omega\tau}{2\pi} \right\rfloor \right\rceil, \quad (4)$$

где  $\lceil x \rceil$  - округленное в сторону меньшего целого числа значение  $x$  (целая часть числа  $x$ ).

Зависимость показаний  $N$  счетчика от высоты  $R$  (рабочая характеристика высотомера) для несущей частоты 450 МГц и девиации 25 МГц приведена на рис. 2,б. Эта зависимость немонотонна, и, следовательно, обратная зависимость  $R(N)$ , по которой можно определить расстояние, неоднозначна в пределах

$$\Delta R = \frac{\pi c}{2\Delta\omega}, \quad (5)$$

что и составляет т. н. «дискретную» ошибку ЧМ-высотомера. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_R$  зависимости  $N(\tau)$  от линейной  $N_0 = \Delta\omega\tau/\pi$

относительно расстояния составляет 1.22 м; однако в ряде задач (например, при измерении уровня нефти в танкерах, автоматической посадке и т. п.) требуется большая точность.

Рассмотрим два метода сглаживания рабочей характеристики высотомера: подбор формы дополнительной модуляции и весовое суммирование результатов счета при линейной модуляции.

### 1. Использование дополнительной частотной модуляции

Наиболее простым в исполнении способом повышения точности является введение дополнительной «медленной» модуляции - изменении частоты в каждом периоде модуляции  $T = 2\pi/\Omega$  и усреднении результатов счета. При этом

$$\omega(k, t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t + 2\pi F_k \tau \quad (6)$$

$$z(k, t) = A \cos(\omega_0\tau + \Delta\omega\tau \cos \Omega t + 2\pi F_k\tau)$$

$$N = \left\lceil \left\lfloor \frac{\omega_0\tau + \Delta\omega\tau}{2\pi} + F_k\tau \right\rfloor \right\rceil - \left\lceil \left\lfloor \frac{\omega_0\tau - \Delta\omega\tau}{2\pi} + F_k\tau \right\rfloor \right\rceil.$$

Если обозначить:  $L$  - максимальное значение номера периода  $k$ , а  $\Delta F$  - максимальное отклонение физической частоты дополнительной модуляции, то любую форму модуляции можно представить в виде

$$F_k = \Delta F \circ M\left(\frac{k - L/2}{L/2}\right),$$

где  $M(x)$  - нормированная ( $-1 \leq x \leq 1, -1 \leq M(x) \leq 1$ ) модуляционная функция, заданная либо аналитически, либо набором отсчетов.

Простейшей формой дополнительной модуляции является линейная  $M(x) = x$ . При такой форме модуляции и усредняющем счете для  $L = 200$  и девиации частоты  $\Delta F = 25$  МГц зависимость

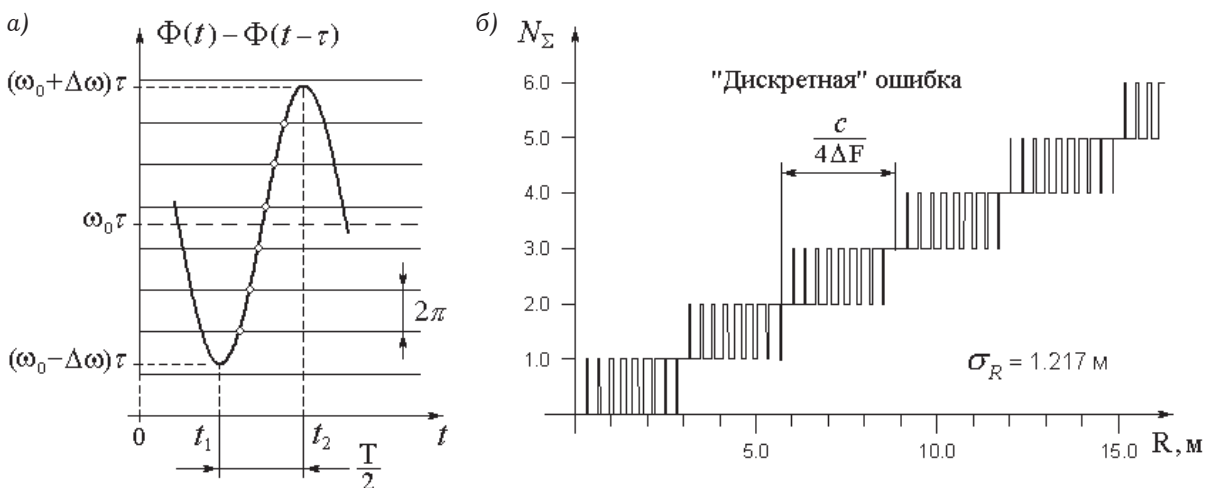


Рис. 2

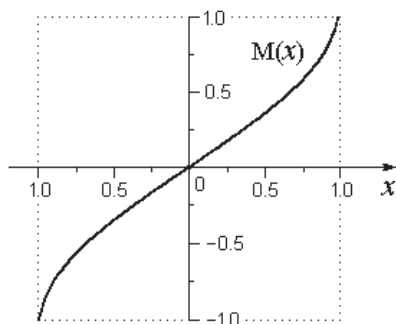


Рис. 3

$$\tilde{N} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L N(k, \tau)$$

дает при оценке расстояния в пределах 3–15 м среднеквадратическое отклонение в 0.122 м. Однако линейная форма не является максимально эффективной, что делает актуальной задачу нахождения оптимальной формы дополнительной модуляции.

Если учесть, что порядок следования отсчетов для «медленной» модуляции не важен, то можно рассматривать лишь неубывающие функции; очевидно также, что эта функция должна быть нечетной. В работе использовался алгоритм подбора оптимальной формы  $M(x)$  по коэффициентам разложения в ряд Тейлора при  $x > 0$  (при  $x < 0$  функция достраивается с использованием условия нечетности). При этом наилучшие результаты достигаются для функций, имеющих положительную вторую производную при  $x > 0$ . Из аналитических функций параметра  $a$  наилучший результат давала функция вида  $\text{Arth}(ax)/\text{Arth} a$  при  $a = 0.865$ . Полученная при этом погрешность составила 0.067 м, что почти в 2 раза ниже линейной формы  $M(x)$ .

В результате расчета с использованием алгоритма случайного покоординатного спуска была получена оптимальная форма функции  $M(x)$ , определяемая коэффициентами  $\alpha_k$  в разложении

$$M(x) = \sum_k \alpha_k |x^k| \text{sign}(x). \quad (7)$$

Вид оптимальной формы  $M(x)$  представлен на рис. 3; первые 10 коэффициентов в выражении (7) составляют:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.6607997, & \alpha_2 &= 0.06029326, \\ \alpha_3 &= 0, & \alpha_4 &= 0.09410462, \\ \alpha_5 &= -0.02859042, & \alpha_6 &= 0.0252846, \\ \alpha_7 &= 0.05649292, & \alpha_8 &= 0, \\ \alpha_9 &= 0.03742183, & \alpha_{10} &= 0.003611355. \end{aligned}$$

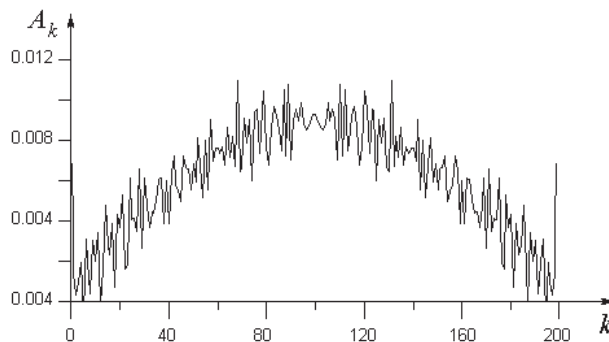


Рис. 4

Представленная функция обеспечивает среднеквадратическую погрешность  $\cong 0.030$  м в диапазоне высот 3–15 м.

## 2. Весовое суммирование результатов счета

Другой возможностью повышения точности является использование линейного изменения частоты в каждом периоде модуляции

$$\omega(k, t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t + 2\pi \left( \frac{k}{L} - \frac{1}{2} \right) \Delta F$$

с весовым суммированием показаний счетчика:

$$\tilde{N} = \sum_{k=1}^L A_k N(k, \tau); \quad \sum_{k=1}^L A_k = 1, \quad (8)$$

где  $A_k$  - весовые коэффициенты, причем, очевидно,  $A_{L-k} = A_k$ .

В этом случае задача оптимизации формы дополнительной модуляции заменяется нахождением  $L$  оптимальных весовых коэффициентов трансверсального цифрового фильтра [3], осуществляющего накопление результатов счета. В ряде случаев, когда точное воспроизведение нелинейной дополнительной модуляции технически затруднено, метод весового суммирования позволяет обойтись простым «линейным» модулятором. При этом используемый процессор должен обладать памятью в  $L$  ячеек для хранения весовых коэффициентов, на которые последовательно умножаются показания счетчика в каждом периоде основной модуляции.

Используя алгоритм подбора оптимальных коэффициентов  $A_k$  по критерию минимума среднеквадратического отклонения от прямой рабочей характеристики высотомера, получена огибающая массива оптимальных коэффициентов для  $L = 200$ , представленная на рис. 4. В диапазоне высот 3–15 м среднеквадратическая погрешность составляет  $\cong 0.0284$  м.

## Заключение

Таким образом, использование сложных видов «медленной» модуляции и процедуры оптимизации в заданном диапазоне высот позволяет снизить среднюю погрешность измерения более чем в 3 раза относительно линейной формы модуляции при той же занимаемой полосе частот. Таких же результатов можно достичь при линейной форме «медленной» модуляции с использованием весового суммирования результатов счета числа пересечений сигналом нулевого уровня в каждом периоде основной модуляции.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-07-00175а).*

## Литература

1. Астафьев Г.П., Шебшаевич В.С., Юрков Ю.А. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов. М.: Сов. радио, 1962. 962 с.
2. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Сов. радио, 1973. 232 с.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.

## Increasing precision of low-altitude radar FM-altimeter

*V.D. Zakharchenko, Y.A. Tsapkov, S.V. Zaharchenko*

The problem of “discrete error” suppression of low-altitude altimeter suppression using an additional “slow” frequency modulation is considered. Algorithms of modulation form optimization and weighed summation coefficients optimization are developed. Results of error estimation using numeric models of the altimeter performance for different modulation forms and real-time weight processing are presented.



**Захарченко Владимир Дмитриевич**, 1949 года рождения. Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры радиофизики Волгоградского государственного университета. Автор более 130 научных работ и изобретений. Окончил Рязанский радиотехнический институт в 1972 г. и аспирантуру Московского авиационного института в 1980 г. Область научных интересов: статистическая радиофизика и радиотехника, ближняя радиолокация, обработка широкополосных сигналов



**Цапков Юрий Анатольевич**, 1979 года рождения. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Волгоградского государственного университета (ВолГУ). В 2001 г. окончил с отличием физический факультет ВолГУ, а в 2004г – аспирантуру при ВолГУ. Автор 12 научных работ и изобретений. Область научных интересов: статистическое моделирование, цифровая обработка сигналов, радиолокация, вычислительные сети



**Захарченко Сергей Владимирович**, 1985 года рождения. Магистр техники и технологии, аспирант кафедры физики Волгоградского государственного технического университета (ВолГТУ). В 2008 г. окончил с отличием ВолГТУ по специальности «ЭВМ и системы»; автор 16 научных работ. Область научных интересов: электроника, обработка сигналов, численное моделирование