



www.volsu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1>

УДК 621.376.3

ББК 32.95

Дата поступления статьи: 16.04.2020

Дата принятия статьи: 13.07.2020

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ С ДВОЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ¹

Владимир Дмитриевич Захарченко

Доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики,
Волгоградский государственный университет

zvd@volsu.ru

просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Сергей Владимирович Захарченко

Кандидат физико-математических наук, программист,

ООО «Открытые системы»

doublef.mobile@gmail.com

ул. Кирова, 121а, офис 213, 400067 г. Волгоград, Российская Федерация

Андрей Леонидович Якимец

Кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики,
Волгоградский государственный университет

yakimec.a.l@volsu.ru, rf@volsu.ru

просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения точности вы­сотомера малых высот, работающего по принципу частотной модуляции. Рас­смотрен вариант подавления «дискретной ошибки» вы­сотомера путем исполь­зования дополнительной «медленной» частотной модуляции несущего колеба­ния и усреднения результатов счета. Достоинством такого метода является простота технической реализации, выражающаяся в минимальной доработке СВЧ-тракта и регистрирующего устройства, которое должно работать в ре­жиме усредняющего счета. Показано, что при ограничении на занимаемую

полосу частот линейная форма модуляции не является оптимальной. Приведены результаты расчета погрешности, полученные математическим моделированием работы высотомера при различных формах дополнительной частотной модуляции. Показано, что использование сложных видов «медленной» модуляции с положительной третьей производной и оптимизация в заданном диапазоне высот позволяет дополнительно в 2–3 раза снизить среднюю погрешность измерения относительно линейной формы модуляции, без расширения занимаемой полосы частот.

Ключевые слова: высотомер малых высот, двойная частотная модуляция, форма модуляции, точность измерения расстояния, численное моделирование.

Введение

Высотомеры малых высот, построенные по схеме измерения биений сигналов с частотной модуляцией зондирующего и отраженного (ЧМ-высотомеры), отличаются простотой технической реализации, однако обладают существенным недостатком — так называемой «дискретной ошибкой», определяемой девиацией частоты $\Delta\omega$ и носящей методический характер [1]. Одним из наиболее простых средств подавления дискретной ошибки является использование дополнительной «медленной» модуляции средней частоты сигнала. Достоинством такого метода является простота технической реализации, выражающаяся в минимальной доработке СВЧ-тракта и регистрирующего устройства, которое должно работать в режиме усредняющего счета. Работы в этой области [2; 3; 5] опираются на вполне конкретный вид закона «медленной» модуляции (пилообразный или гармонический). Такой подход достаточно нагляден, приводит к легко реализуемым результатам, однако оставляет открытым вопрос о потенциальных возможностях снижения дискретной ошибки указанным методом в рамках технических ограничений на девиацию частоты и время измерения.

На рисунке 1 представлена структурная схема ЧМ-высотомера малых высот. При отражении сигнала $x_1(t) = A_1 \cos[\Phi(t)]$ от поверхности, до которой измеряется расстояние, в приемник поступает сигнал с задержкой фазы на величину $\tau = \frac{2R}{c}$: $x_2(t) = A_2 \cos[\Phi(t - \tau)]$.

Сигнал с выхода фильтра нижних частот (ФНЧ) поступает на ограничитель и далее — на счетчик. С учетом малости величины задержки τ (для высот до 100 м она составляет $\approx 10^{-7}$ с) сигнал на выходе фильтра можно записать в виде:

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

В стандартном ЧМ-высотомере циклическая частота со временем изменяется по гармоническому закону $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$ [1], что приводит к записи:

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

где ω_0 — несущая частота сигнала; $\Delta\omega$ — девиация частоты; Ω — модулирующая частота ($\Omega \ll \Delta\omega, \omega_0$). Усредняющий счетчик измеряет количество положительных переходов через нуль сигнала (2) на некотором временном интервале. При этом показания счетчика за период модуляции $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ изменяются на величину:

$$N = \left\lfloor \frac{2R}{c} (f_0 + \Delta f) \right\rfloor - \left\lfloor \frac{2R}{c} (f_0 - \Delta f) \right\rfloor, \quad (3)$$

где $\lfloor x \rfloor$ — целая часть числа x . Зависимость показаний N счетчика от высоты R (рабочая характеристика высотомера) для несущей частоты $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 450$ МГц и девиации $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 25$ МГц приведена на рисунке 2.

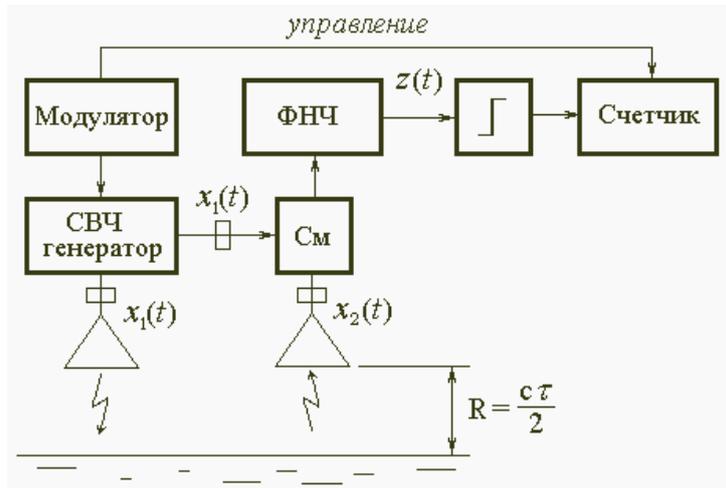


Рис. 1. Блок-схема ЧМ-высотомера малых высот

Эта зависимость немонотонна и, следовательно, обратная зависимость $R(N)$, по которой можно определить расстояние, неоднозначна в пределах $\Delta R = \frac{0.5\pi}{\Delta\omega}$, что и составляет «дискретную ошибку» ЧМ-высотомера. Среднеквадратическое отклонение σ_R зависимости $N(R)$ от линейной составляет 1,217 м, однако в ряде задач (например, при измерении уровня нефти в танкерах, автоматической посадке и т. п.) требуется большая точность [4; 6].

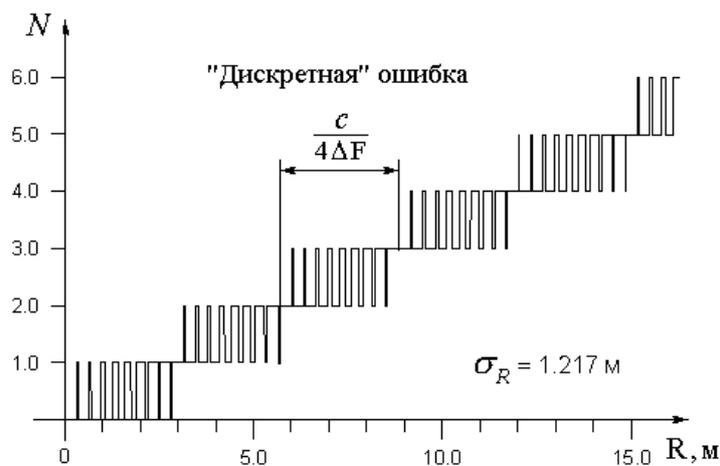


Рис. 2. Рабочая характеристика ЧМ-высотомера

1. Подавление «дискретной ошибки» с использованием дополнительной частотной модуляции

Наиболее простым способом повышения точности ЧМ-высотомера является введение дополнительной «медленной» модуляции частоты несущей в каждом периоде T и усреднении результатов счета. При этом

$$N(F_k) = \left\lfloor \frac{2R}{c} (f_0 + \Delta f + F_k) \right\rfloor - \left\lfloor \frac{2R}{c} (f_0 - \Delta f + F_k) \right\rfloor, \quad (4)$$

где $F_k = F(kT)$ — значение медленной модуляции $F(t)$ в k -м периоде. Усреднение показаний происходит за время $T_m = MT$ (M периодов):

$$\widetilde{N}_\Sigma = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M N(F_k),$$

что позволяет счетчику работать в режиме непрерывного счета в течение времени $t \in (0, T_m)$.

Простейшей формой дополнительной частотной модуляции $F(t)$ является линейная: $F(t) = \frac{2\Delta F t}{T_m}$; $t \in [-\frac{T_m}{2}; \frac{T_m}{2}]$. При такой форме и усредняющем счете за $M = 200$ периодов частоты модуляции Ω рабочая характеристика высотомера $\widetilde{N}_\Sigma(R)$ в пределах 3–15 м имеет среднеквадратическое отклонение от прямой $\sigma_R = 0,121$ м (рис. 3).

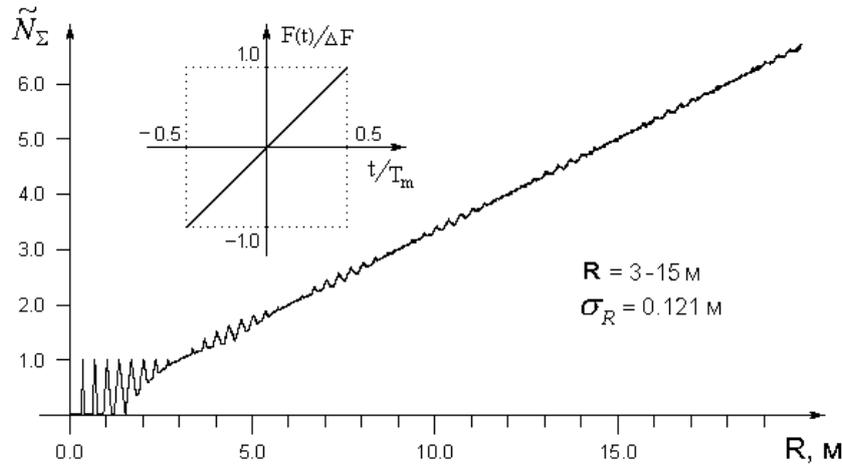


Рис. 3. Рабочая характеристика высотомера при линейной дополнительной частотной модуляции. Девиации частоты основной и дополнительной модуляции выбраны одинаковыми ($\Delta f = \Delta F = 25$ МГц)

Начальный участок характеристики ($R < 3$ м), не поддающийся подавлению дискретной ошибки, можно исключить при начальной установке высотомера.

Однако линейная форма модуляции не является максимально эффективной. Так, например, при использовании нелинейной формы дополнительной модуляции вида $F(t) = \frac{2\Delta F}{\pi} \arcsin\left(\frac{2t}{T_m}\right)$ при тех же значениях полосы частот линейность рабочей характеристики дальномера значительно выше: среднеквадратическое отклонение зависимости $\widetilde{N}_\Sigma(R)$ от линейной в диапазоне дальности 3–15 м составляет $\sigma_R = 0,046$ м (рис. 4).

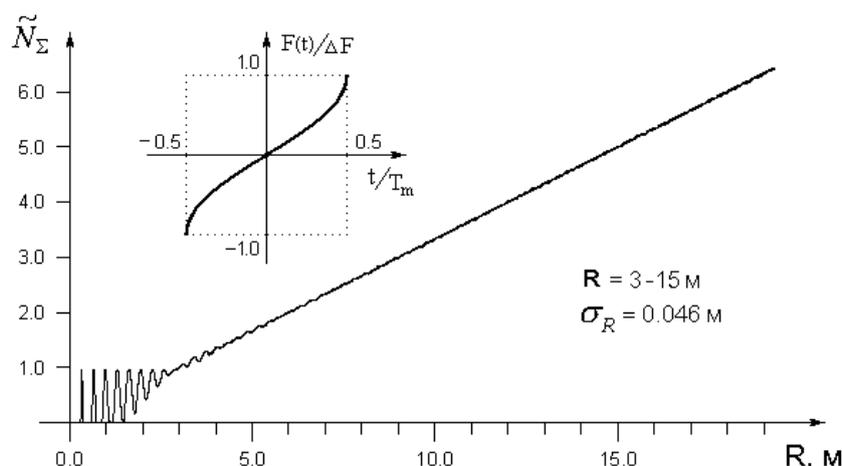


Рис. 4. Усредненные показания счетчика ЧМ-высотомера с двойной частотной модуляцией:

$$f_0 = 450 \text{ МГц}, \Delta f = \Delta F = 25 \text{ МГц}, F(t) = \frac{2\Delta F}{\pi} \arcsin\left(\frac{2t}{T_m}\right)$$

В процессе моделирования использовался также параметрический закон изменения дополнительной частотной модуляции:

$$F(\alpha, t) = \left\{ \sigma(t) \times \left(1 - \left|1 - \frac{2t}{T_m}\right|^\alpha\right) - [1 - \sigma(t)] \times \left(1 - \left|1 + \frac{2t}{T_m}\right|^\alpha\right) \right\} \Delta F. \quad (5)$$

Модельные расчеты показывают, что при значении параметра $\alpha = 0,62$ в выражении (5) и приведенных выше частотных параметрах f_0 и ΔF среднеквадратическое отклонение рабочей характеристики от линейной в диапазоне дальности 3–15 м составляет $\sigma_R = 0,043$ м.

Заключение

Таким образом, использование дополнительной частотной модуляции в высотомерах малых высот позволяет значительно (не менее чем на порядок) повысить точность измерения расстояния. При этом потенциальные возможности повышения точности определяются диапазоном рабочих дальностей и формой дополнительной «медленной» модуляции.

Использование сложных видов «медленной» модуляции с добавлением положительной третьей производной и оптимизация в заданном диапазоне высот позволяет дополнительно в 2–3 раза снизить среднюю погрешность измерения относительно линейной формы модуляции, без расширения занимаемой полосы частот. При этом реализация сложных видов модуляции на низкой частоте повторения ($\approx 5 - 20$ Гц) не составляет трудностей при использовании средств бортовой компьютерной техники.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Волгоградской области (проект № 19-47-340005-р_поволжье_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев, Г. П. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов / Г. П. Астафьев, В. С. Шебшаевич, Ю. А. Юрков. — М. : Сов. радио, 1962. — 962 с.
2. Кагаленко, Б. В. Частотный дальномер повышенной точности / Б. В. Кагаленко, В. П. Марфин, В. П. Мещеряков // Измерительная техника. — 1981. — № 11. — С. 68–71.
3. Марфин, В. П. Радиоволновый бесконтактный уровнемер повышенной точности / В. П. Марфин, А. И. Киселев, Ф. З. Розенфельд // Измерительная техника. — 1988. — № 6. — С. 46–48.
4. Способ повышения точности ЧМ-дальномера масштабированием фазы сигнала биений : Пат. RU 2426070 C1 / Аткин И.С., Захарченко В.Д.; Заявл. 08.02.2010; Опубл. 10.08.2011.
5. Частотно-модулированный радиодальномер : Пат. SU 1141354 A1 / Кагаленко Б. В., Мещеряков В. П.; Заявл. 03.05.1983; Опубл. 23.02.1985.
6. ЧМ-дальномер непрерывного слежения с дробно-дифференцирующим фильтром : Пат. RU 2439592 C1 / Заявл. 21.10.2010; Опубл. 10.01.2012.

REFERENCES

1. Astafev G.P., Shebshaevich V.S., Yurkov Yu.A. *Radiotekhnicheskie sredstva navigatsii letatelnykh apparatov* [Radiotechnical Aircraft Navigational Means]. Moscow, Sov. radio Publ., 1962. 962 p.
2. Kagalenko B.V., Marfin V.P., Meshcheryakov V.P. Chastotnyy dalnomer povyshennoy tochnosti [Increased Precision Frequency Distance Meter]. *Izmeritelnaya tekhnika*, 1981, no. 11, pp. 68-71.
3. Marfin V.P., Kiselev A.I., Rozenfeld F.Z. Radiovolnovyy beskontaktnyy urovnermer povyshennoy tochnosti [Radiowave Contactless Increased Precision Level Meter]. *Izmeritelnaya tekhnika*, 1988, no. 6, pp. 46-48.
4. Atkin I.S., Zakharchenko V.D. Sposob povysheniya tochnosti CHM-dalnomera masshtabirovaniem fazy signala bienij [Method of Increasing Accuracy of FM Distance Meter by Scaling the Beat Signal Phase]. Patent RU 2426070 C1, stated. 08 February 2010, publ. 10 August 2011.
5. Kagalenko B.V., Meshcheryakov V.P. Chastotno-modulirovannyj radiodalnomer [Frequency-Modulated Radar Distance Meter]. Patent SU 1141354 A1, stated. 03 May 1983, publ. 23 February 1985.
6. Zakharchenko, V.D., Atkin, I.S. CHM-dalnomer nepreryvnogo slezheniya s drobnodifferenciruyushchim filtrom [Continuous Monitoring FM Distance Meter with Fractional Derivative Filter]. Patent RU 2439592 C1, stated. 21 October 2010, publ. 10 January 2012.

**NUMERIC MODELING OF LOW-ALTITUDE ALTIMETER
WITH DOUBLE FREQUENCY MODULATION**

Vladimir D. Zakharchenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radiophysics,
Volgograd State University
zvd@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Sergey V. Zakharchenko

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Programmer,
Open Systems LLC
doublef.mobile@gmail.com
Kirova St, 121a, apt. 213, 400067 Volgograd, Russian Federation

Andrey L. Yakimets

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Radio Physics,
Volgograd State University
yakimec.a.l@volsu.ru, rf@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. This study is concerned with the problem of increasing the accuracy of a low-altitude altimeter employing the frequency modulation principle. A way to suppress the “discrete error” of the altimeter by employing additional “slow” frequency modulation of the carrier wave and averaging the resulting counts is considered. The benefit of such approach is simplicity of technical implementation manifesting in minimal changes in the microwave path and the recording device, which needs to run in the averaging count mode. It is shown that, given a limited frequency band, the linear modulation form is not optimal. Results of error calculations presented are obtained via mathematical modelling of the altimeter’s operation for different shapes of the additional frequency modulation. It is shown that using complex shapes of the “slow” modulation with positive third derivative and optimizing for a given altitude range allows to reduce the average measurement error 2–3 times additionally relatively to the linear modulation form without expanding the occupied frequency band.

Key words: low-altitude altimeter, double frequency modulation, modulation shape, distance measurement accuracy, numeric modelling.