



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.2.2>

УДК 621.376.3

ББК 32.95

Дата поступления статьи: 19.03.2021

Дата принятия статьи: 21.04.2021



**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА  
ДЛЯ РАСЧЕТА ЧАСТОТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ<sup>1</sup>**

**Владимир Дмитриевич Захарченко**

Доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики,

Волгоградский государственный университет

[zvd@volsu.ru](mailto:zvd@volsu.ru)

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

**Сергей Владимирович Захарченко**

Кандидат физико-математических наук, старший программист,

ООО «Открытые системы»

[doublef.mobile@gmail.com](mailto:doublef.mobile@gmail.com)

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

**Аннотация.** Рассматривается задача повышения точности высотомера малых высот, работающего по принципу частотной модуляции. Подавление «дискретной ошибки» высотомера осуществляется путем использования дополнительной 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. Описан генетический алгоритм расчета массива частот дополнительной модуляции, позволяющей снизить среднеквадратическое значение дискретной ошибки при ограничении на занимаемую полосу частот.

Приведены результаты расчета погрешности, полученные математическим моделированием работы высотомера. Показано, что использование генетического алгоритма оптимизации частот дополнительной модуляции в заданном диапазоне высот позволяет снизить среднюю погрешность измерения в два раза относительно линейной формы модуляции без расширения занимаемой полосы частот.

**Ключевые слова:** высотомер малых высот, двойная частотная модуляция, точность измерения расстояния, генетический алгоритм.

### Введение

Высотомеры малых высот, построенные по схеме измерения частоты биений сигналов с частотной модуляцией (ЧМ-высотомеры), отличаются простотой технической реализации, однако обладают существенным недостатком — т.н. «дискретной ошибкой», определяемой девиацией частоты  $\Delta\omega$  и носящей методический характер [4; 6]. Одним из наиболее простых средств подавления дискретной ошибки является использование дополнительной модуляции средней частоты сигнала [5; 7].

В стандартном ЧМ-высотомере циклическая частота  $\omega(t)$  со временем изменяется по гармоническому закону. При этом зависимость показаний 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 1.

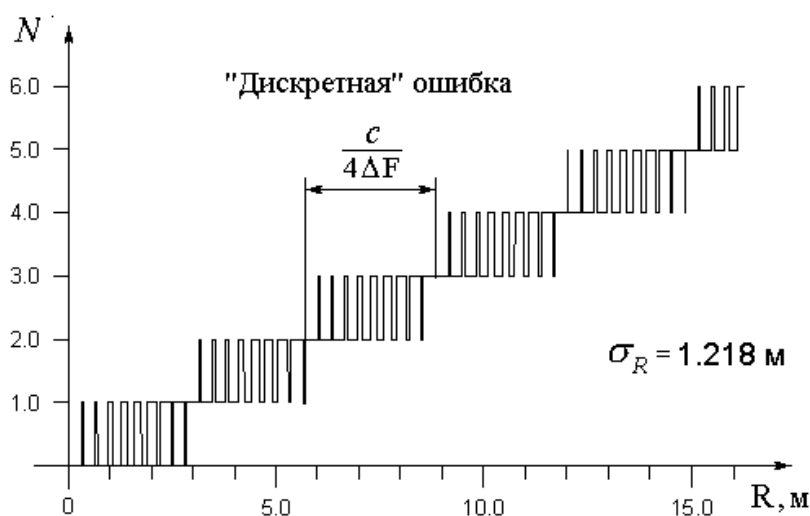


Рис. 1. Рабочая характеристика ЧМ-высотомера

Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_R$  зависимости  $N(R)$  от линейной составляет 1,218 м, что в ряде практических приложений не обеспечивает требуемой точности.

Наиболее простым способом подавления дискретной ошибки ЧМ-высотомера является введение дополнительной модуляции — изменение частоты несущей в каждом периоде основной модуляции  $T = \frac{2\pi}{\Omega}$  и усреднение результатов счета на достаточно большом интервале наблюдения [3; 7]. При использовании дополнительной частотной модуляции показания счетчика высотомера составляют величину

$$N(F_k, \tau) = \left\lfloor \frac{\omega_0 \tau + \Delta \omega \tau}{2\pi} + F_k \tau \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\omega_0 \tau - \Delta \omega \tau}{2\pi} + F_k \tau \right\rfloor, \quad (1)$$

где  $F_k$  — значение дополнительной частотной добавки в  $k$ -м периоде;  $\tau = \frac{2R}{c}$  — задержка зондирующего сигнала на дальности  $R$ . При этом усреднение показаний происходит за  $M$  периодов частоты дополнительной модуляции:

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

где  $M = 2m$  четное.

Простейшей формой дополнительной частотной модуляции  $F(t)$  является линейная  $F_k = \left(2 \frac{k-1}{M-1} - 1\right) \Delta F$ , предполагающая равномерное распределение частот  $F_k$  на интервале  $F_k \in [-\Delta F; \Delta F]$ . При одинаковых девиациях частот основной и дополнительной модуляции (25 МГц) среднеквадратическое отклонение рабочей характеристики высотомера  $\tilde{N}(R)$  от прямой в диапазоне высот 3–15 м составляет  $\sigma_R = 0,121$  м (см. рис. 2).

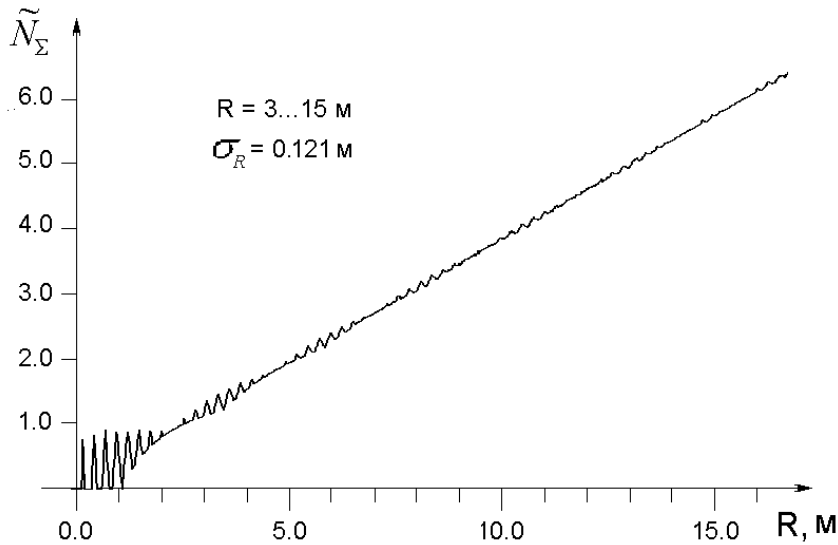


Рис. 2. Рабочая характеристика высотомера при линейной дополнительной частотной модуляции. Девиации частоты основной и дополнительной модуляции выбраны одинаковыми ( $\Delta f = \Delta F = 25$  МГц).

Как отмечалось ранее [3], линейный закон изменения частоты дополнительной модуляции не является максимально эффективным.

### 1. Использование генетического алгоритма для оптимизации частот дополнительной частотной модуляции

Поиск оптимального набора частот дополнительной модуляции осуществлялся с помощью генетического алгоритма [1; 2] с учетом симметрии задачи:

$$w_i, 1 \leq i \leq m, \quad (2)$$

где  $w_i$  — элемент генотипа  $\{w_i\}$  одного индивида (потенциального решения) в виде набора частот  $\{F_i\}$ . Этот соответствующий индивиду набор имеет вид:

$$F_i = \begin{cases} w_i, & i \leq m; \\ -w_{M+1-i}, & i > m. \end{cases} \quad (3)$$

Как и частоты, параметры индивидов ограничены условием:

$$-\Delta F \leq w_i \leq 0. \quad (4)$$

Дополнительно, без потери общности, накладывается условие упорядоченности:

$$i < j \rightarrow w_i \leq w_j. \quad (5)$$

Далее использовалась эволюционная стратегия [8]  $\mu + \lambda$ : следующее поколение (набор потенциальных решений) генетического алгоритма выбирается из индивидов текущего и большого количества производных от них экземпляров. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3, где  $\xi_*$ ,  $\xi'_*$  — равномерно распределенные на интервале  $[0; 1)$  независимые случайные величины.

При оптимизации были использованы следующие параметры генетического алгоритма:

- размер популяции, а также количество индивидов текущего поколения, принимающих участие в отборе  $\mu = 100$ ;
- количество производных индивидов в каждом поколении  $\lambda = 400$ ;
- вероятность получения нового индивида путем мутации  $p = 0,5$ ;
- вероятность получения нового индивида путем скрещивания  $0,5$  (равна  $1 - p$  для схемы  $\mu + \lambda$ ).

Оператор мутации был определен следующим образом: каждая частота с вероятностью  $0,2$  изменяется на нормально распределенную случайную величину со стандартным отклонением  $\sigma = \frac{\Delta F}{M}$ . При выходе  $w_i$  из границ (4) выполняется ее зеркальное отражение от этих границ до тех пор, пока она не окажется внутри, т.е. выполняется преобразование:

$$w'_i = \Delta F \left[ -\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left\langle \sin \pi \left( \frac{w_i}{\Delta F} + \frac{1}{2} \right) \right\rangle \right]. \quad (6)$$

Такой способ обеспечения ограничения (4) предназначен для исключения возможной системной предвзятости в пользу граничных точек при альтернативных ограничениях, например:

$$w''_i = \begin{cases} -\Delta F, & w_i < \Delta F; \\ 0, & w_i > 0; \\ w_i, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (7)$$

В завершение процедуры мутации частоты производится сортировка для выполнения условия (5). Скрещивание выполняется путем слияния наборов значений двух

индивидов в общий массив, сортировки массива и разбиения его на подряд идущие пары, в каждой из которых одно значение помещается в один из порождаемых индивидов, а другое — в другой (какое из двух значений окажется в каком индивиде, выбирается случайным образом). Легко видеть, что при этом за счет первоначальной сортировки условие (5) выполняется автоматически.

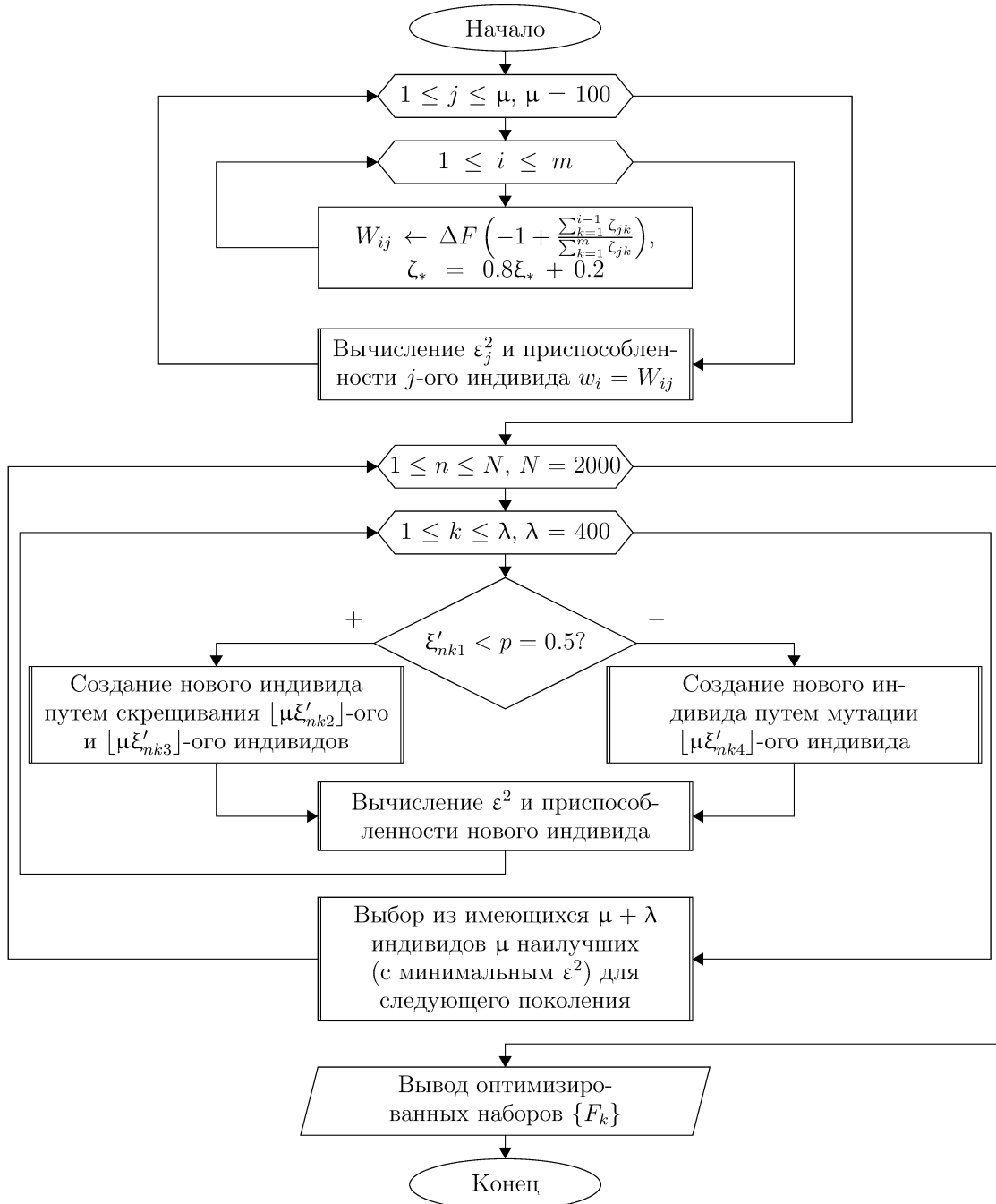


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма оптимизации набора частот дополнительной модуляции высотомера малых высот

Набор частот дополнительной модуляции, полученных с использованием генетического алгоритма, представлен на рисунке 4. Приведенные результаты получены после моделирования 2000 поколений.

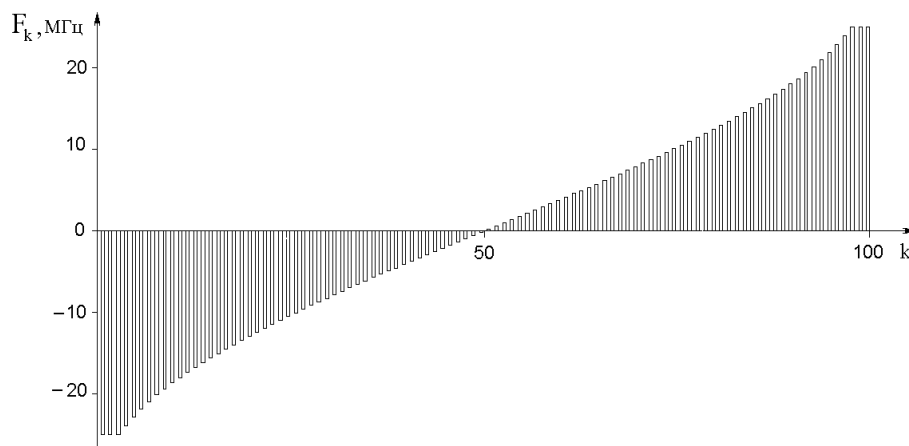


Рис. 4. Значения частот дополнительной модуляции, полученные с помощью генетического алгоритма ( $\mu = 100$ ,  $\Delta F = 25$  МГц)

Рабочая характеристика высотомера малых высот, полученная численным моделированием с использованием оптимизированного набора частот дополнительной модуляции приведена на рисунке 5.

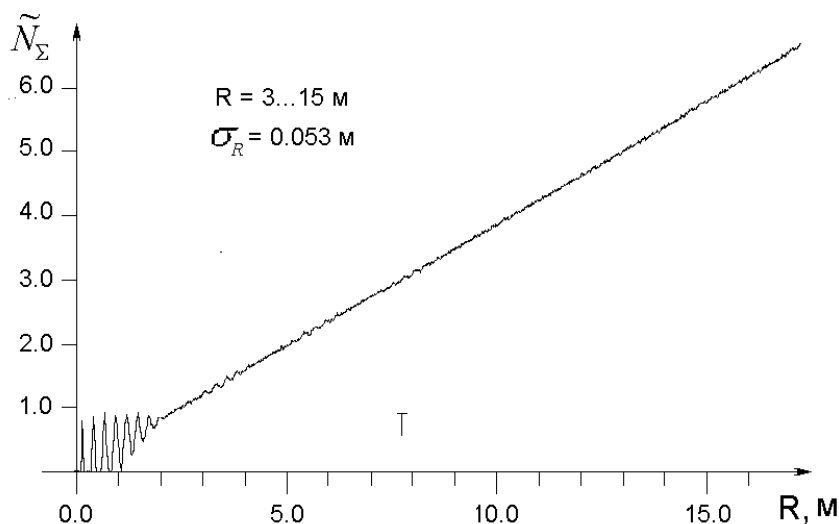


Рис. 5. Рабочая характеристика высотомера при дополнительной частотной модуляции, полученной с использованием генетического алгоритма ( $\Delta f = \Delta F = 25$  МГц)

Сравнение зависимостей на рисунках 2 и 5 показывает, что в последнем случае погрешность отклонения от прямой зависимости  $\tilde{N}(R)$  существенно ниже по сравнению с линейным законом изменения дополнительной частотной модуляции при тех же ограничениях на занимаемую полосу частот.

### Заключение

Таким образом, использование генетического алгоритма для оптимизации набора частот дополнительной частотной модуляции в высотомере малых высот позволило более чем в два раза повысить точность измерения расстояния по сравнению с линейной формой без расширения занимаемой полосы частот. Последнее обстоятельство особенно важно при жестких условиях на электромагнитную совместимость бортовых систем автоматической посадки.

Значения элементов массива оптимизированных частот могут быть рассчитаны заранее для конкретных условий эксплуатации. Хранение в памяти большого числа значений частот и их оперативное использование при работе синтезатора не представляет сложности для средств бортовой компьютерной техники.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта №19-47-340005-р\_поволжье\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. — М. : Физматлит, 2003. — 432 с.
2. Замечник, Т. В. Управляемый классификатор в диагностике рака молочной железы по данным микроволновой радиотермометрии / Т. В. Замечник, А. Г. Лосев, А. Ю. Петренко // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2019. — Т. 22, № 3. — С. 52–65. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.5>.
3. Захарченко, В. Д. Численное моделирование высотомера малых высот с двойной частотной модуляцией / В. Д. Захарченко, С. В. Захарченко, А. Л. Якимец // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2020. — Т. 23, № 3. — С. 5–11. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1>.
4. Кагаленко, Б. В. Частотный дальномер повышенной точности / Б. В. Кагаленко, В. П. Марфин, В. П. Мещеряков // Измерительная техника. — 1981. — № 11. — С. 68–71.
5. Марфин, В. П. Радиоволновый бесконтактный уровнемер повышенной точности / В. П. Марфин, А. И. Киселев, Ф. З. Розенфельд // Измерительная техника. — 1986. — № 6. — С. 46–48.
6. 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.
7. Частотно-модулированный радиодальномер : пат. SU 1141354 A1 / Кагаленко Б. В., Мещеряков В. П. ; заявл. 03.05.1983; опубл. 23.02.1985.
8. Rechenberg, I. Evolutionsstrategie — Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution / I. Rechenberg. — Stuttgart-Bad Cannstatt : Frommann-Holzboog, 1973. — 170 p.

### REFERENCES

1. Emelyanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* [Theory and Practice of Evolutionary Modeling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 432 p.

2. Zamechnik T.V., Losev A.G., Petrenko A.Yu. Upravlyaemy klassifikator v diagnostike raka molochnoy zhelezy po dannym mikrovolnovoy radiotermometrii [Guided Classifier in the Diagnosis of Breast Cancer According to Microwave Radiothermometry]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2019, vol. 22, no. 3, pp. 52-65. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.5>.

3. Zakharchenko V.D., Zakharchenko S.V., Yakimets A.L. Chislennoe modelirovanie vysotomera mal'kikh vysot s dvoynoy chastotnoy modulyatsiey [Numeric Modeling of Low-Altitude Altimeter with Double Frequency Modulation]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1>.

4. 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.

5. Marfin V.P., Kiselev A.I., Rozenfeld F.Z. Radiovolnovyy beskontaktnyy urovnemer povyshennoy tochnosti [Radiowave Contactless Increased Precision Level Meter]. *Izmeritelnaya tekhnika*, 1986, no. 6, pp. 46-48.

6. 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]. Pat. RU 2426070 C1, stated. 08 February 2010, publ. 10 August 2011.

7. 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.

8. Rechenberg I. *Evolutionsstrategie – Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart-Bad Cannstatt, Frommann-Holzboog, 1973. 170 p.

## NUMERIC LOW-ALTITUDE ALTIMETER MODELING WITH COMPUTATION OF ADDITIONAL MODULATION FREQUENCIES USING A GENETIC ALGORITHM

**Vladimir D. Zakharchenko**

Doctor of Technical Sciences, Professor of 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, Senior Programmer,  
Open Systems LLC  
doublef.mobile@gmail.com

Kirova St, 121a, off. 213, 400067 Volgograd, Russian Federation

### **Abstract.**

This study examines 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 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 has to run in



averaging count mode. This work presents a genetic algorithm for computing the array of additional modulation frequencies which can be used to reduce the mean square of the discrete error given a limited frequency band.

Presented results of error calculations are obtained via mathematical modeling of the altimeter's operation. It is shown that using additional modulation frequencies obtained by the genetic algorithm allows to reduce the average measurement error by half relatively to the linear modulation form without expanding the occupied frequency band.

**Key words:** low-altitude altimeter, double frequency modulation, distance measurement accuracy, genetic algorithm.