



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-63-68>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 623.618.3

РАСЧЕТ ВЫСОТЫ И ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ УСТРОЙСТВА ИНИЦИАЛИЗАЦИИ РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА

С.С. СОЛОНОВИЧ, И.И. ЗАБЕНЬКОВ, Д.В. АРХИПЕНКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 20 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Цель данной статьи заключается в представлении способа повышения точности расчета высоты и времени срабатывания устройства инициализации реактивного снаряда на заданной высоте, а также способа его структурной реализации. Снаряд, вылетевший из направляющих носителя, испытывает на себе различные возмущающие факторы: сопротивление воздуха, состояние атмосферы, воздействие воздушного потока от лопастей вертолета и др. В работе рассматривается временной метод расчета высоты срабатывания. Он основан на измерении высоты полета снаряда в четырех равноудаленных по времени точках, на основании которых рассчитывается отрицательное приращение высот, составляется уравнение, описывающее вертикальную составляющую полета снаряда. Для измерения высоты полета над подстилающей поверхностью внутри снаряда размещается малогабаритный радиовысотомер. Численный расчет аппроксимирующего полинома по методу Кардано позволяет определить время срабатывания снаряда на заданной высоте. В качестве структурной схемы устройства предлагается использование гомодинной структуры, основными преимуществами которой являются простота реализации, малое количество компонентов и, как следствие, малые габариты.

Ключевые слова: радиовысотомер, срабатывание на заданной высоте, гомодинный тракт.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Солоневич С.С., Забеньков И.И., Архипенков Д.В., Расчет высоты и времени срабатывания устройства инициализации реактивного снаряда. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 63-68.

CALCULATION OF THE HEIGHT AND RESPONSE TIME OF THE MISSILE INITIALIZATION DEVICE

SERGEY S. SOLONOVICH, IGOR I. ZABENKOV, DMITRY V. ARKHIPENKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 December 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of this article is to present a method for improving the accuracy of calculating the height and response time of the missile initialization device at a given height, as well as a method for its structural implementation. The paper considers a time option for calculating the response height. I**-* is based on measuring the height of the projectile's flight at five points equidistant in time, from which the negative increment in heights is calculated, a formula that describes the vertical component of the projectile flight is drawn, the numerical calculation of which allows us to determine the projectile response time at a given height. As a structural diagram of the device, it is proposed to use a homodyne structure, the main advantages of which are easiness to implement, a small number of components and, as a consequence, small dimensions.

Keywords: radio altimeter, triggering at a given altitude, homodyne path.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Solonovich S.S., Zabenkov I.I., Arkhipenkov D.V. Calculation of the Height and Response Time of the Missile Initialization Device. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 63-68.

Введение

Одним из способов повышения эффективности действия реактивных снарядов является срабатывание его на заданной высоте над подстилающей поверхностью. Известны два основных метода расчета высоты срабатывания: дальномерный и временной [1].

При использовании дальномерного варианта предварительно лазерным дальномером носителя снаряда измеряют дальность цели. Используя априорную скорость снаряда и баллистический вычислитель носителя, рассчитывается время срабатывания на заданном расстоянии. Основным недостатком способа является значительная погрешность априорного значения усредненной скорости снаряда и ее сильная зависимость от времени и дальности полета, состояния окружающей среды и т. п.

Временной вариант расчета высоты срабатывания [2] основывается на оснащении непосредственно снаряда радиовысотомером, который относится к устройствам ближней радиолокации. В этом случае на каждом снаряде имеется возможность измерять высоту полета и, используя собственный микропроцессор, рассчитывать время инициализации неконтактного датчика. В этом случае получение данных о времени срабатывания переносится на программу расчета функции движения реактивного снаряда и расчета времени или высоты срабатывания.

Расчет времени срабатывания, предложенный в [1], основывается на традиционном квадратичном полиноме, аппроксимирующем функцию движения. В рассматриваемой ситуации важной является только вертикальная составляющая функции движения – функция снижения. Измерение осуществляется радиовысотомером, который выдает отсчеты высоты полета снаряда относительно подстилающей поверхности.

Считаем, что функция снижения снаряда в воздушном пространстве определена на некотором отрезке траектории, неразрывна и имеет все производные. Тогда ее можно аппроксимировать рядом Тейлора [3]:

$$h(t) = h(t_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h^{(n)}(t_0)}{n!} (x - x_0)^n. \quad (1)$$

В [2, 4] рассматривается случай аппроксимации функции снижения степенным трехчленом второго порядка. Однако в литературных источниках по баллистике указывается, что сопротивление воздуха полету снаряда зависит от состояния атмосферы, формы обтекаемости снаряда и пропорционально четвертой степени скорости его движения. Важным фактором, влияющим на траекторию движения снаряда, является воздействие воздушного потока от лопастей вертолета как носителя вооружений. Реактивный снаряд при вылете из направляющих подвергается воздействию этого источника внешней силы, значительно изменяет начальный участок траектории, что необходимо учесть при разборе способа инициализации. Поэтому возникает необходимость уточнения аппроксимирующей функции путем увеличения порядка степенного ряда.

Рассмотрим функцию снижения (1), ограниченную четырьмя членами ряда Тейлора с нулевым (базовым) отсчетом времени:

$$h(t) = h(t_0) + h'(t)t + \frac{1}{2}h''(t)t^2 + \frac{1}{6}h'''(t)t^3, \quad (2)$$

где $h^n(t)$, $n = 1, 2, 3$ – производные функции снижения; h_0 – начальный отсчет высоты в начальный (базовый) отсчет времени t_0 .

Представим уравнение (2) в принятой в баллистике физически ясной интерпретации с учетом (1):

$$h(t) = h_0 + Vt + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}jt^3, \quad (3)$$

где V – скорость снижения, первая производная функции снижения; a – ускорение снижения, вторая производная функции снижения или первая производная скорости снижения; j – рывок снижения – третья производная функции снижения или первая производная ускорения снижения.

Заметим, что в выражении (3) положительные знаки могут быть заменены на отрицательные, так как летящий по наклонной траектории реактивный снаряд имеет отрицательные значения величин скорости, ускорения, рывка и скачка снижения.

При цифровой обработке сигналов радиовысотомера появляется возможность дискретного отсчета коэффициентов уравнения (3), т. е. замены производных (3) их приращениями при минимальных временных дискретах.

Используя бортовой радиовысотомер в качестве источника данных для микропроцессорного вычислителя, запишем в память данных четыре значения высоты h_0, h_1, h_2, h_3 на одинаковых предельно малых интервалах времени. Собственный таймер высотомера задает четыре временные точки отсчета t_0, t_1, t_2, t_3 . Начальному отсчету высоты h_0 соответствует начальный (базовый) отсчет времени t_0 . Соответственно $h_1 \rightarrow t_1, h_2 \rightarrow t_2, h_3 \rightarrow t_3$, причем $t_1 = t_0 + \Delta t, t_2 = t_1 + \Delta t, t_3 = t_2 + \Delta t$.

Для нахождения значений V, a, j из (3) составим систему уравнений:

$$\begin{cases} h(t_1) = h_0 + Vt_1 + \frac{1}{2}at_1^2 + \frac{1}{6}jt_1^3 \\ h(t_2) = h_0 + Vt_2 + \frac{1}{2}at_2^2 + \frac{1}{6}jt_2^3 \\ h(t_3) = h_0 + Vt_3 + \frac{1}{2}at_3^2 + \frac{1}{6}jt_3^3 \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы удобнее произвести матричным методом. Для упрощения дальнейшего расчета примем значение $\Delta t = t_1$, при этом получаем значения временных точек отсчета: $t_2 = 2t_1, t_3 = 2t_2$. Также введем значение разностной высоты

$$H_n = h(t_n) - h_0. \quad (5)$$

Используя (3) – (5), составим матрицу

$$\begin{cases} \frac{1}{6}t_1^3 & \frac{1}{2}t_1^2 & t_1 & H_1 \\ \frac{8}{6}t_1^3 & \frac{4}{2}t_1^2 & 2t_1 & H_2 \\ \frac{27}{6}t_1^3 & \frac{9}{2}t_1^2 & 3t_1 & H_3 \end{cases} \quad (6)$$

Проведя серию простых математических операций с (6), получим

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{6}t_1^3 & \frac{1}{2}t_1^2 & t_1 & H_1 \\ \frac{1}{2}t_1^3 & \frac{1}{2}t_1^2 & 0 & H_2 - 2H_1 \\ \frac{1}{3}t_1^3 & 0 & 0 & \frac{H_3 - 3H_2 + 3H_1}{3} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Далее выразим значения V , a и j из (5) и (7):

$$j = \frac{h_3 - 3h_2 + 3h_1 - h_0}{t_1^3}, \quad (8)$$

$$a = \frac{-h_3 + 8h_2 - 7h_1 + 3h_0}{t_1^2}, \quad (9)$$

$$V = \frac{2h_3 - 21h_2 + 24h_1 - 14h_0}{6t_1}. \quad (10)$$

Численный расчет уравнения (3) позволяет найти время срабатывания снаряда на заданной высоте по программе внутреннего микропроцессора. Этот расчет основан на нахождении вещественного корня кубического уравнения методом Кардано.

Преобразуем (3) в каноническую форму кубического многочлена:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (11)$$

где

$$p = -\frac{3a^2}{j^2} + \frac{6V}{j}, \quad (12)$$

$$q = 2\left(\frac{a}{j}\right)^3 - \frac{6Va}{j^2} + \frac{6(h_0 - h_n)}{j}, \quad (13)$$

где h_n – заданная высота инициализации реактивного снаряда; h_0 – начальный (базовый) отсчет высоты, соответствующий начальному (базовому) отсчету времени.

Решение по методу Кардано сводится к определению величины Q :

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2. \quad (14)$$

Оценочные расчеты величины Q показывают, что $Q > 0$. В этом случае имеется один вещественный корень:

$$y_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}. \quad (15)$$

Далее можно выразить значение времени инициализации t_n :

$$t_n = y_1 - \frac{a}{j}. \quad (16)$$

Параметр t_n является информационным для выдачи микропроцессором команды на срабатывание.

Для реализации описанного метода предлагается использование гомодинной структуры радиовысотомера, которая представлена на рис. 1. В данной структуре используется ЛЧМ-сигнал симметричной пилообразной формы.

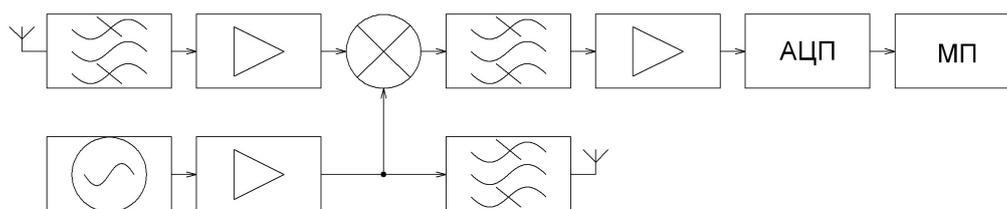


Рис. 1. Гомодинная структура радиовысотомера
Fig. 1. Homodyne structure of the radio altimeter

Схема состоит из передающего и приемного блоков, которые содержат входной и выходной полосовые фильтры радиочастоты, входной и выходной усилители радиочастоты, синтезатор ЛЧМ-сигнала, смеситель, фильтр разностной частоты, усилитель разностной частоты, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микропроцессор.

Синтезатор частоты передающего блока формирует радиосигнал с линейной частотной модуляцией симметричной пилообразной формы, который после выходного усилителя высокой частоты поступает на выходной фильтр и излучается передающей антенной. Часть этого сигнала поступает на гетеродинный вход смесителя приемного блока.

Сигнал, отразившийся от подстилающей поверхности, принимается антенной приемного блока и через входной фильтр и усилитель высокой частоты поступает на сигнальный вход смесителя. Образующийся разностный сигнал со смесителя через фильтр разностной частоты и усилитель разностной частоты поступает на вход АЦП и микропроцессор, который рассчитывает время или высоту срабатывания.

С уменьшением высоты движущегося реактивного снаряда относительно подстилающей поверхности, будет уменьшаться и разностная частота:

$$h = \frac{\Delta F c}{2q}, \quad (17)$$

где h – высота реактивного снаряда над подстилающей поверхностью; ΔF – разностная частота; q – крутизна ЛЧМ-сигнала.

Значение разностной частоты поступает на вход микропроцессора, который в соответствии с (17) определяет значения высот в заданные моменты времени и по описанному алгоритму определяет коэффициенты при переменных. Далее, подставив в (13) требуемую высоту инициализации h_n , высчитывается время инициализации t_n .

Заключение

В статье рассматривается оригинальный способ расчета времени срабатывания реактивного снаряда на заданной высоте. Для этого установленный в корпусе снаряда радиовысотомер измеряет высоту его полета над подстилающей поверхностью в четырех равноудаленных во времени точках. На основании измеренных значений высот рассчитывается отрицательное приращение высот. В соответствии с предложенным способом производится численный расчет уравнения полинома четвертой степени методом Кардано, после чего рассчитывается время инициализации снаряда на заданной высоте, по истечению которого происходит срабатывание исполнительного механизма.

Разработана гомодинная структурная схема малогабаритного радиовысотомера.

Список литературы

1. Arora V.K. *Proximity fuzes: theory and techniques*. Defence & Development Organisation, New Delhi. 2010:38-48.
2. Кривонос О.К., Ильющенко А. Ф., Петюшик Е. Е., Коноплиник В. А. Основные направления развития неуправляемых авиационных ракет типа С-8. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2018;1(58):89-97.
3. Нефёдов Д.С., Мелец А.Ф. Экспериментальные исследования по оценке скорости полета неуправляемых авиационных ракет с использованием модуля пассивной электростатической локации. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2015;4(58):96-103.

4. Забеньков И.И., Солонович С.С., Исакович Н.Н., Забеньков А.И. Расчет и обоснование критерия инициализации на заданной высоте неконтактного датчика летательного аппарата с задержкой срабатывания. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2019;2(63):71-78.
5. Забеньков И.И., Солонович С.С. Эффект автокоррекции высоты срабатывания взрывателя реактивного снаряда с пикирующей траекторией. *Наука и военная безопасность*. 2019;2(60):37-40.

References

1. Arora V.K. *Proximity fuzes: theory and techniques*. Defence & Development Organisation, New Delhi. 2010:38-48.
2. Krivonos O.K., Ilyushchenko A.F., Petyushik E.E., Konoplyanik V.A. [The main directions of development of unguided aircraft missiles of the S-8 type]. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 2018;1(58):89-97. (In Russ.)
3. Nefyodov D.S., Milets A.F. [Experimental studies on assessing the flight speed of unguided aircraft missiles using a passive electrostatic location module]. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 2015;4(58):96-103. (In Russ.)
4. Zabenkov I.I., Solonovich S.S., Isakovich N.N., Zabenkov A.I. [Calculation and justification of the initialization criterion at a given altitude of the non-contact sensor of an aircraft with a response delay]. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 2019;2(63):71-78. (In Russ.)
5. Zabenkov I.I., Solonovich S.S. [The effect of auto-correction of the height of the fuse of a rocket projectile with a diving trajectory]. *Science and military security*. 2019;2(60):37-40. (In Russ.)

Вклад авторов

Солонович С.С. разработал методику расчета и осуществил проектирование приемопередающего тракта.

Архипенков Д.В. принял участие в проектировании приемопередающего тракта.

Забеньков И.И. осуществил постановку задачи и провел анализ результатов.

Authors' contribution

Solonovich S.S. developed calculation methodology and design of a receiving-transmitting path.

Arkhipenkov D.V. took part in the design of the transmit-receive path.

Zabenkov I.I. took part statement and analysis of results.

Сведения об авторах

Солонович С.С., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Забеньков И.И., профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Архипенков Д.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Solonovich S.S., Postgraduate at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zabenkov I.I., Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Arkhipenkov D.V., Postgraduate at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-187-68-36;
e-mail: w00lfyby@gmail.com
Солонович Сергей Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-187-68-36;
e-mail: w00lfyby@gmail.com
Solonovich Sergey Sergeevich