

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>
УДК 621.37Оригинальная статья**А. В. Гусинский, И. И. Забеньков*, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов, С. С. Солонович***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, б. 220013, Минск, Республика Беларусь***РАДИОВЫСОТОМЕРЫ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА**

Аннотация. Представлены математические модели излучаемого, отраженного и разностного радиосигналов, используемых в радиовысотомерах, во временной и частотной областях на основе аналитического метода Габор в квадратурной форме. Рассмотрены симметричный и несимметричный виды линейных частотно-модулированных радиосигналов и ограничения, используемые при их аналитическом применении, а также сигналов, использующих синусоидальный вид модулирующего напряжения. Приведены временной, частотный, корреляционный и счета нулей способы построения. Каждому из методов соответствует одноименный принцип построения. Даны подробные структуры радиовысотомеров, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также приведены рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: устройства ближней радиолокации, радиовысотомеры, модели разностного сигнала, методы построения радиовысотомеров

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Гусинский Александр Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных измерительных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: avggus@mail.ru; *Забеньков Игорь Иванович* – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. E-mail: zabenkov@bsuir.by; *Свирид Максим Сергеевич* – заместитель директора Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: maxim_sv@tut.by; *Кондрашов Денис Александрович* – директор Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: denis_kondrashov@yahoo.co.uk; *Солонович Сергей Сергеевич* – магистр, научный сотрудник Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: solonovichse@gmail.com

Вклад авторов: *Гусинский Александр Владимирович* – постановка задач, обсуждение результатов, выводы; *Забеньков Игорь Иванович* – решение аналитических задач, разработка корреляционного метода, написание текста статьи; *Свирид Максим Сергеевич* – разработка моделей симметричного и несимметричного сигналов; *Кондрашов Денис Александрович* – синтез структур радиовысотомеров временного метода; *Солонович Сергей Сергеевич* – синтез структур радиовысотомеров частотного метода, подготовка иллюстративного материала.

Для цитирования: Радиовысотомеры с частотной модуляцией зондирующего сигнала / А. В. Гусинский [др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 318–328. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>

Поступила в редакцию: 25.10.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

**Aleksandr V. Gusinskiy, Igor I. Zabenkov*, Maxim S. Svirid,
Denis A. Kondrashov, Sergey S. Solonovich**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

RADIOALTIMETERS WITH FREQUENCY MODULATION OF THE PROBING SIGNAL

Abstract. Mathematical models of radiated, reflected and differential radio signals used in radio altimeters in the time and frequency domains based on the analytical Gabor method in quadrature form are presented. Symmetric and asymmetric types of linear frequency-modulated radio signals and limitations used in their analytical application, as well as signals using a sinusoidal type of modulating voltage, are considered. The time, frequency, correlation and zero counting methods of construction are given. Each of the methods corresponds to the same principle of construction. Detailed structures of radio altimeters are given, their advantages and disadvantages are considered, and recommendations for their use are given.

Keywords: short-range radar devices, radio altimeters, difference signal models, methods for constructing radio altimeters

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Aleksandr V. Gusinskiy* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Information Measuring Systems at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: avgus@mail.ru; *Igor I. Zabenkov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: zabenkov@bsuir.by; *Maxim S. Svirid* – Deputy Director of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: maxim_sv@tut.by; *Denis A. Kondrashov* – Director of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: denis_kondrashov@yahoo.co.uk; *Sergey S. Solonovich* – Master of Science, Researcher of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: solonovichse@gmail.com

Contribution of the authors: *Aleksandr V. Gusinskiy* – setting tasks, discussing results, conclusions; *Igor I. Zabenkov* – solving analytical problems, developing a correlation method, writing the text of the article; *Maxim S. Svirid* – development of models of symmetrical and asymmetrical signals; *Denis A. Kondrashov* – synthesis of structures of radio altimeters of the time method; *Sergey S. Solonovich* – synthesis of structures of radio altimeters of the frequency method, preparation of illustrative material.

For citation: Gusinskiy A. V., Zabenkov I. I., Svirid M. S., Kondrashov D. A., Solonovich S. S. Radioaltimeters with frequency modulation of the probing signal. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 318–328 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>

Received: 25.10.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Наряду с непрерывным увеличением дальности действия радиолокационных устройств определилась тенденция внедрения радиолокационных принципов в области, требующей решение задач при малых расстояниях. Специфические требования в особенности технических решений в этой области привели к формированию научного и технического направления систем ближней радиолокации. Характерной особенностью систем ближней радиолокации является соизмеримость дальности действия с геометрическими размерами взаимодействующих объектов и с ошибками выдачи результатов измерений. Измерение высоты полета объектов – неотъемлемая часть информационной составляющей систем обслуживания летательных аппаратов и авиационных устройств. Наиболее часто встречающимся методом радиовысотометрии является радиолокационный на основе применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [1–3]. Интерес к данной теме исследования заметен в публикациях последних лет [4–7].

Определим ограничения, в рамках которых будем рассматривать аналитические выводы и рекомендации в данной статье:

а) анализ проводится для непрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией пилообразным или симметричным треугольным напряжением;

б) анализ проводится для объектов, работающих в СВЧ-области радиочастот и ограниченной скорости их движения, где можно пренебречь эффектом Доплера и при этом приращение частоты отраженного сигнала за счет эффекта Доплера не превышает величину нестабильности опорного генератора передатчика;

Отличительной особенностью типовой структуры радиовысотомера с ЛЧМ (рис. 1) является совмещение функций генератора передатчика и гетеродина приемника, в результате чего система становится когерентной. При преобразовании напряжений излучаемого передающей антенной сигнала и принятого приемной антенной отраженного сигнала в смесителе приемника после обработки фильтром выделяется напряжение разностной частоты: $F_{\text{раз}} = f_{\text{изл}} - f_{\text{отр}}$.

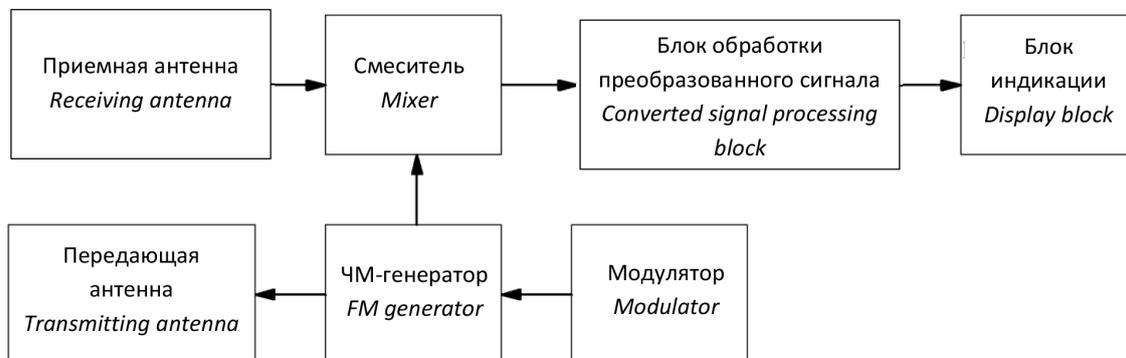


Рис. 1. Типовая структурная схема радиовысотомера

Fig. 1. Typical structural diagram of a radio altimeter

Рассмотрим технические характеристики ЛЧМ-сигналов. На рис. 2 показаны сигналы с несимметричной (рис. 2, а) и симметричной (рис. 2, б) треугольными модуляциями (далее симметричный и несимметричный сигналы).

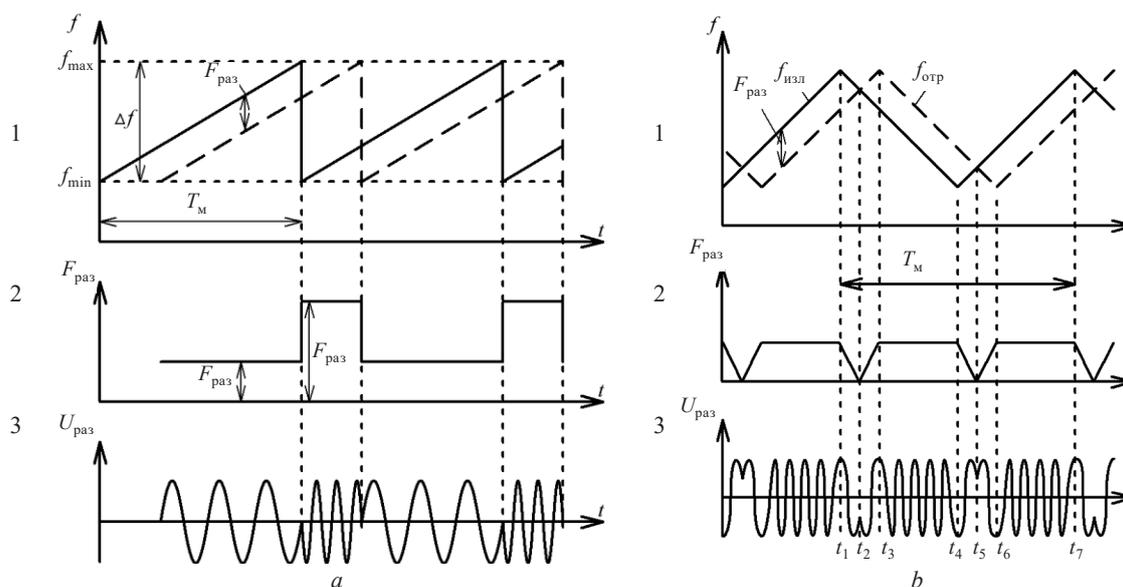


Рис. 2. Непрерывные ЛЧМ-сигналы с несимметричной (а) и симметричной (б) треугольными модуляциями;

$$1 - f_{\text{изл}}(t), f_{\text{отр}}(t); 2 - F_{\text{раз}}(t); 3 - U_{\text{раз}}(t)$$

Fig. 2. Continuous chirp signals with asymmetric (a) and symmetrical (b) triangular modulations;

$$1 - f_{\text{изл}}(t), f_{\text{отр}}(t); 2 - F_{\text{раз}}(t); 3 - U_{\text{раз}}(t)$$

Аналитика частотно-модулированных сигналов. Под аналитикой ЧМ понимаем представление частотно-модулированных сигналов с различными законами модуляции моделями во временной и частотной областях с использованием метода аналитического сигнала по Габору [8]. Для ЛЧМ линейный закон модуляции частоты $\omega = at$ определяет фазу сигнала интегральным ее преобразованием: $\omega = \int_{-\infty}^{\infty} at \cdot dt + C = at^2 / 2 + \omega_0$. В этом случае аналитическая модель излучаемого сигнала с ЛЧМ во временной области может быть представлена в показательной форме:

– при несимметричной модуляции в пределах $t = nT_M$, $n = 1, 2, 3, \dots$ и симметричной в пределах $t = n(0 - T_M/2)$, $n = 1, 2, 3, \dots$:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)e^{j[\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0]}, \quad (1)$$

– для симметричной ЛЧМ в пределах $t = n(T_M/2 - T_M)$:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)e^{j[\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0]}. \quad (2)$$

Модели (1) и (2) излучаемого сигнала в квадратурной форме можно представить, используя оператор Гильберта. Применим преобразование Эйлера $e^{ix} = \cos x + j\sin x$ и запишем:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)].$$

Далее по аналогии с (1) и (2) модель отраженного сигнала запишется в виде:

– для несимметричной модуляции в пределах $t = nT_M$, $n = 1, 2, 3, \dots$ и симметричной в пределах $t = n(0 - T_M/2)$, $n = 1, 2, 3, \dots$:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)e^{j[\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0]}, \quad (3)$$

– для симметричной ЛЧМ в пределах $n(T_M/2 - T_M)$:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)e^{j[\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0]}. \quad (4)$$

Модели (3) и (4) излучаемого сигнала в квадратурной форме:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)[\cos(\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)[\cos(\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)].$$

Для упрощения записи опустим далее φ_0 .

Рассмотрим дальнейшие преобразования отраженного сигнала. В структуре рис. 1 смеситель использует принцип перемножения двух сигналов – излучаемого и отраженного. Для этого он должен иметь квадратичную передаточную функцию вида

$$U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}^2(t). \quad (5)$$

Тогда выходной сигнал смесителя можно записать в виде:

$$U_{\text{вых}}(t) = k[U_{\text{изл}}(t) + U_{\text{отр}}(t)]^2.$$

После несложных преобразований выделим напряжение разностного (преобразованного) сигнала $U_{\text{раз}}(t)$, являющееся одной из основных информационных характеристик для радиовысомера:

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_1 - t_2)$ и $n(t_4 - t_5)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t)e^{j[\Omega_{\text{раз}} t - b(nt)^2/2]}, \quad (6)$$

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_2 - t_3)$ и $n(t_5 - t_6)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{j[b(n)^2/2 + \pi]}; \quad (7)$$

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_3 - t_4)$ и $n(t_6 - t_7)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{j(\Omega_{\text{раз}} t)}. \quad (8)$$

Заметим, что напряжение разностной частоты выделяется на выходе смесителя с помощью фильтра нижних частот, частота среза которого определяется максимальным значением частоты разностного сигнала.

В частотной области модели излучаемого, отраженного и разностного сигналов можно записать в виде преобразований Фурье уравнений (6)–(8):

$$S_{\text{изл}}(j\omega) = \int_0^\infty A_{\text{изл}}(t) e^{j\left[\omega_{\text{изл}} t - \frac{at^2}{2} + \varphi_0\right]} \cdot e^{-j\omega} \cdot d\omega; \quad (9)$$

$$S_{\text{отр}}(j\omega) = \int_0^\infty B_{\text{отр}}(t) e^{j\left[\omega_{\text{отр}}(t-\tau) - \frac{a(t-\tau)^2}{2} + \varphi_0\right]} \cdot e^{-j\omega} \cdot d\omega; \quad (10)$$

$$S_{\text{раз}}(j\Omega) = \int_0^T k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{ja \cdot n^2/2} \cdot d\Omega. \quad (11)$$

Представляет интерес применение частотно модулированного колебания с синусоидальным законом модуляции для измерения (фиксации) высоты, рассмотренное в [1]. При синусоидальной модуляции спектр разностного сигнала имеет дискретный характер, пропорциональный частоте модуляции. При этом соотношение амплитуд гармоник в спектре зависит от высоты объекта, а максимумы их амплитуд появляются на различных высотах. Однако при рассматриваемой синусоидальной модуляции зависимость каждой из гармоник от высоты не резкая. Поэтому для снижения погрешности измерений высоты закон модуляции должен быть более сложным, например пилообразным (см. рис. 2, *a*).

Наличие у колебания разностной частоты при треугольной модуляции двух участков с разными частотами приводит к тому, что его спектр имеет дискретный характер, его компоненты кратны частоте модулирующего сигнала. Спектр высокочастотного модулированного сигнала имеет сложный характер [9, 10] и практически его можно считать сплошным. В зависимости от высоты в его составе выделяется та компонента, которая наиболее близка к разностной частоте F_p (см. рис. 2, *a*). Путем подбора закона модуляции и расчета его параметров можно обеспечить подчеркивание одной гармоники частоты модуляции при исчезающе малых величинах остальных.

Структуры радиовысотомеров. Во всех рассматриваемых структурах радиовысотомеров их высокочастотная часть, включающая приемную и передающую антенны, ЧМ-генератор и смеситель, является неизменной основой. Поэтому методы построения радиовысотомеров основываются на методах построения модуляторов, блоков обработки разностного сигнала и индикации (см. рис. 1).

Перечислим эти методы: частотный (спектральный), временной, корреляционный, метод счета переходов через нуль. Каждому из методов соответствует одноименный принцип построения.

Частотный метод построения является классическим и основан на фильтровом способе выделения из спектра разностного сигнала заданной его гармоники. При синусоидальном законе модуляции максимум первой гармоники имеет место при $h = \sim 0,17/T_M$; второй – при $h = \sim 0,26/T_M$;

третьей – $h = \sim 0,34/T_M$ и т. д. [1]. Это дает возможность, измеряя и сравнивая амплитуды гармоник, измерять или фиксировать измеренную высоту объекта. Структура такого радиовысотомера показана на рис. 3.

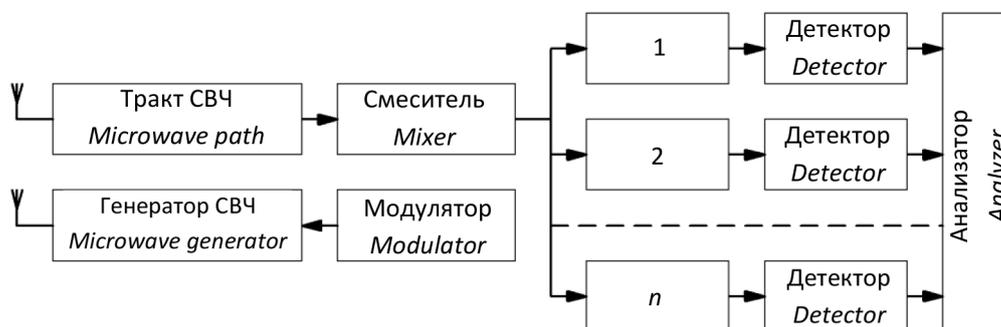


Рис. 3. Структурная схема радиовысотомера с частотным методом построения

Fig. 3. Structural diagram of a radio altimeter with a frequency method of construction

В рассматриваемой структуре предполагается параллельный метод обработки. Увеличение числа гармоник в спектре разностного сигнала требует увеличение числа каналов либо увеличивает потери мощности полезного сигнала. При этом индекс частотной модуляции должен быть выбран таким, чтобы число гармоник разностного сигнала L соответствовало числу фильтровых каналов обработки. В таблице [11] представлена зависимость L от Ψ_M .

L	2	4	5	6	7	9	Примечание
Ψ_M	1	2	3	4	5	6	$\Psi_M = \Delta f/F_{M \max}$

Если задаться количеством гармоник L в спектре F_p , то из таблицы можно определить индекс модуляции Ψ_M , который может быть рассчитан путем вариации отношением девиации частоты излучаемого сигнала к частоте синусоидальной модуляции.

Как было показано выше, при пилообразном законе модуляции возможно использование только одного канала обработки по структуре (см. рис. 3) при наличии полосового фильтра разностной частоты F_p . В [11, с. 233–234] приводится структура такого радиовысотомера, в котором устройство состоит из последовательно соединенных звукового генератора, частотного модулятора, генератора радиочастоты и передающей антенны, а также последовательно соединенных приемной антенны, балансного смесителя, усилителя низкой частоты и измерителя частоты, причем второй вход балансного смесителя соединен с выходом генератора радиочастоты.

Работа радиодальномера основана на использовании непрерывных ЛЧМ зондирующих сигналов и гомодинной обработке отраженных от радиолокационных объектов сигналов. При этом процесс излучения и приема отраженного сигнала совмещен во времени и информация о дальности до отражающего объекта содержится в спектре сигнала биений. Этот сигнал формируется как разность «мгновенных» частот излученного и отраженного от объекта сигналов. Измерителем частоты в радиодальномере является частотный детектор. Амплитуда напряжения на выходе частотного детектора после фильтра низких частот (ФНЧ) линейно связана с измеряемой высотой. Аналитическое уравнение связи измеряемой высоты и параметров ЛЧМ-сигнала имеет вид:

$$H = F_{\text{раз}} \cdot T_M \cdot c / \Delta f. \quad (12)$$

Временной метод построения радиовысотомеров применим для радиосигналов с симметричным ЛЧМ-сигналом и основан на измерении временного интервала задержки отраженного сигнала относительно излучаемого в данный момент времени. Этот интервал времени соответствует разности $\Delta t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, как показано на рис. 2. Измеряемая высота находится из уравнения $H = \Delta t_1 \cdot c$ (м).

Другим вариантом временного метода измерения высоты является отсчет интервала времени $\Delta t_2 = t_4 - t_3$. Тогда искомая величина высоты находится из уравнения

$$H = (T_M - \Delta t_2) \cdot c \text{ (м)}.$$

В рассматриваемых случаях изменяется структура блока обработки, так как появляется необходимость четкого определения границ отсчетных временных интервалов. В этом случае используем дифференциальный способ определения интервалов. Он состоит из введения в блок обработки дифференциатора, как показано на рис. 4, а.

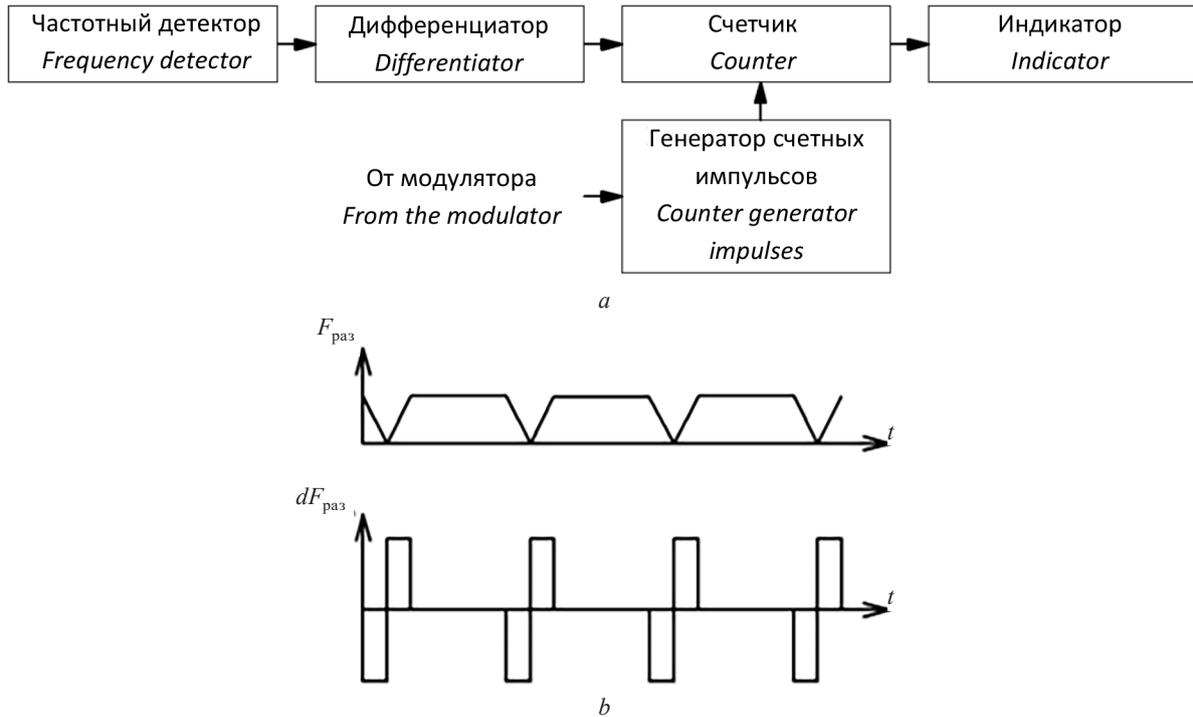


Рис. 4. Блок обработки разностного сигнала при временном методе измерений:
а – структура блока; б – осциллограммы $F_{\text{раз}}$ и $dF_{\text{раз}}$

Fig. 4. Block for processing the difference signal with the time measurement method:
а – block structure; б – oscillograms of $F_{\text{раз}}$ and $dF_{\text{раз}}$

Основной сущностью определения заданной высоты полета объекта над поверхностью является свойство однозначности соответствия любой высоты полета временной форме (осциллограмме) разностного сигнала. В типовой структуре радиовысотомера блок обработки преобразованного сигнала выполняется в соответствии со структурой, показанной на рис. 4, а. Разностный сигнал проходит частотный детектор, после которого приобретает вид, показанный на рис. 4, б. Далее этот сигнал подвергается дифференцированию. После дифференциатора формируется импульсный сигнал (см. рис. 4, б). Длительность первого импульса соответствует разности $\Delta t_1 = t_2 - t_1$. Передний фронт импульса запускает счетчик коротких импульсов, поступающих от синхронизированного с модулятором генератора счетных импульсов. Задний фронт импульса прекращает счет, а число отсчитанных импульсов счета пропорционально времени $\tau/2$, что позволяет определить высоту объекта над поверхностью.

Корреляционный метод основан на указанном в [1] свойстве когерентности излучаемого и отраженного ЛЧМ-радиосигналов. При этом производится корреляционная обработка отраженного ЛЧМ-сигнала с неизвестным временем запаздывания (τ) с известным сигналом для определения степени их схожести. Получаемая функция имеет аргументом относительное расстояние между сигналами на оси времени, а ее математическое выражение – различный вид для случаев аналоговой и цифровой обработки сигналов.

Для аналоговых сигналаў гэтая функцыя прадстаўляе сабой неперывную сумму (інтэграл) произведенияў супадаючых (перакрываючых друг друга) частаў двух сигналаў:

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{изл}}(t) \cdot U_{\text{отр}}(t - \tau) \cdot dt.$$

Для дыскрэтных ці цыфровых сигналаў – гэта сумма произведенияў супадаючых (перакрываючых друг друга) субімпульсаў:

$$K(m\tau) = \sum_{(m=0)}^{(m=\infty)} \{ [U_{\text{изл}}(nt) \cdot U_{\text{отр}}[(n-m)t] \}.$$

Корреляцыйны метад вымярэння ці фіксацыі вышыні прадугавяляе два спосабы знаходжэння корреляцыйнага інтэграла. Першы спосаб аснова на перамяжэнні адражэннага СВЧ-радыясігнала, прынятага прыёмнай антэнай, і ізлучаемага СВЧ-радыясігнала, задрэжанага на час τ . Як паказана на рис. 5, а, у тыповую структуру радыёвышытомера вядзецца блок рэгулюемай задрэжкі, а ў якасці перамяжача іспользуецца смесіцельны каскад. Час задрэжкі дазваляе выславаць вымяраемую вышыню $H = \tau/2 \cdot c$ (м).

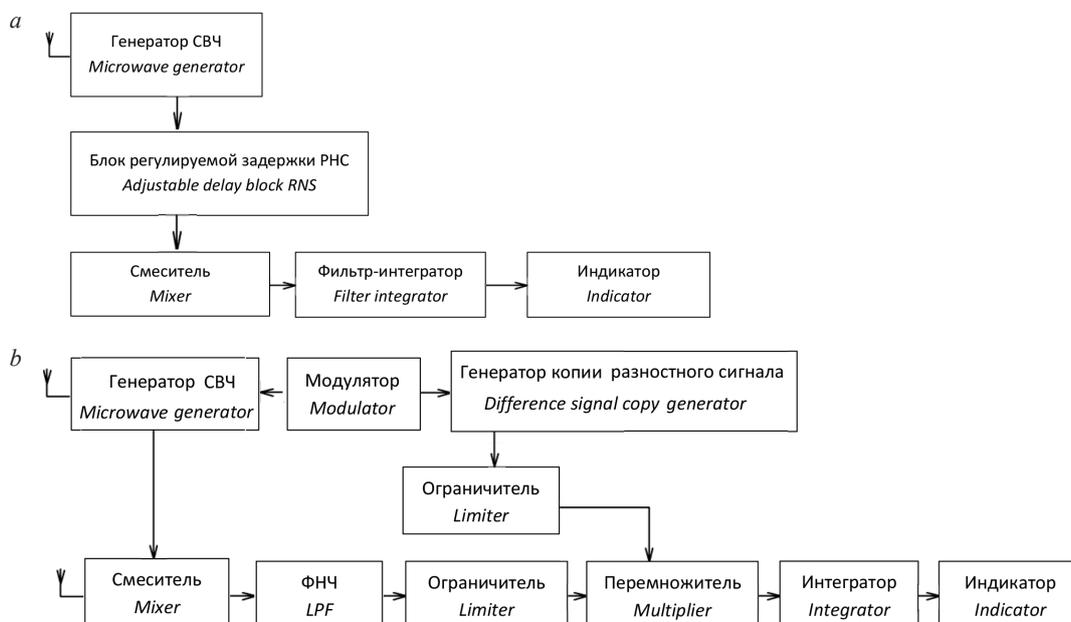


Рис. 5. Структура корреляционного радиовысотомера: а – структура коррелятора радиосигнала; б – структура коррелятора разностного сигнала

Fig. 5. Structure of the correlation radio altimeter: а – structure of the radio signal correlator; б – structure of the difference signal correlator

Функцыю інтэгратора выконвае фільтр ніжніх частот. Перастраіваючы блок задрэжкі, можна дабіцца максімальнага паказання корреляцыйнага індикатора. Пры гэтым адсчот супаставячых паказанняў часу задрэжкі дазваляе выславаць вымяраемую вышыню $H = \tau/2 \cdot c$ (м).

Второй спосаб прадпалагае знаходжэнне корреляцыйнага інтэграла на разнастнай частаце, як паказана на рис. 5, б. Для гэтага ў вядомую структуру блока абробкі вядзецца генератор копіі разнастнага сігнала, напружэнне з якога пасля абмежавання падаецца на перамяжач. На другой ўваход перамяжача паступае разнастны сігнал. Паследуючыя блокі інтэгратора і індикатора выдзяляюць і фіксуюць максімальнае значэнне корреляцыйнага інтэграла, а паказання часу задрэжкі прамы прапарцыянальны вымяраемай вышыні.

Метад счэта пераходаў праз нуль іспользуе аднозначную сувязь пераходаў праз нулевае значэнне амплітуды разнастнага сігнала з велічыняй вымяраемай вышыні. Так, аўтары патэнта РФ

№ 2313107 «Частотный радиовысотомер»¹ (В. А. Заренков, Д. В. Заренков, В. И. Дикарев, Б. В. Койнаш) приводят структуру измерителя малых расстояний, в которой используется шумовой сигнал для дополнительной модуляции ЛЧМ-радиосигнала. По мнению авторов патента, вводимая так называемая антикорреляционная обработка позволяет обострить корреляционную характеристику.

Достижимым техническим результатом изобретения является повышение точности и чувствительности частотного радиовысотомера при измерении малых высот. Частотный радиовысотомер (рис. 6) содержит генератор шумового сигнала, RC-фильтр, модулятор, частотно-модулированный генератор, передающую антенну, приемную антенну, смеситель, усилитель разностной частоты, ограничитель, счетный каскад, обеспечивающий выходное напряжение, пропорциональное средней частоте пересечений разностным напряжением нулевого уровня, усилитель постоянного тока и индикатор высоты. Следует заметить, что зависимость высоты от числа переходов через нуль неравномерная, что позволяет использовать данный метод только для фиксации заданной высоты полета.



Рис. 6. Структура радиовысотомера с шумовым модулирующим сигналом

Fig. 6. Structure of a radio altimeter with a noise modulating signal

Дополнительным преимуществом использования шумовой модуляции является возможность идентификации конкретного устройства среди множества подобных, находящихся в ограниченном пространстве.

Заключение. Благодаря простоте своей технической реализации наибольшее применение в технике радиовысотометрии находит частотный метод измерения высоты. С целью повышения точности измерений или фиксации высоты рекомендуется использовать варианты временного метода и метода счета нулей. В случае необходимости работы большого количества радиовысотометров в ограниченном пространстве авторами предлагается использовать корреляционные методы с дополнительной шумовой компонентой модулирующего сигнала.

Принятые в статье обозначения / The designations accepted in the article

- $F_{\text{раз}}$ – разностная частота, Гц / difference frequency, Hz;
 $\Omega_{\text{раз}} = 2\pi F_{\text{раз}}$ – круговая разностная частота, рад / circular difference frequency, rad;
 $f_{\text{изл}}, f_{\text{отр}}$ – соответственно излучаемая и отраженная частоты, Гц / respectively the emitted and reflected frequencies, Hz;
 $\omega_{\text{изл}} = 2\pi f_{\text{изл}}, \omega_{\text{отр}} = 2\pi f_{\text{отр}}$ – соответственно круговые излучаемая и отраженная частоты, Гц / respectively the emitted and reflected frequencies, Hz;
 $T_{\text{м}}, F_{\text{м}}$ и $\Omega_{\text{м}} = 2\pi F_{\text{м}}$ – соответственно период (с), частота (Гц) и круговая частота (рад) модулирующего колебания / respectively, the period (s), frequency (Hz) and circular frequency (rad) of the modulating oscillation;
 τ – время задержки при прохождении излучаемого сигнала до объекта и обратно, с, $\tau = 2H/c$ (H – измеряемая высота, м; c – скорость света), $\tau \leq \tau = 2H/c$ – для несимметричной модуляции и $\tau \leq T_{\text{м}}/2$ – для симметричной модуляции / delay time for the transmitted signal to reach the object and back, s, $\tau = 2H/c$ (H is the measured height, m; c is the speed of light), $\tau \leq \tau = 2H/c$ – for asymmetric modulation and $\tau \leq T_{\text{м}}/2$ – for symmetric modulation;
 $\omega_{\text{max}}, \omega_{\text{min}}$ – соответственно максимальная и минимальная круговые частоты излучения (отражения), рад;
 $\omega_{\text{max}} = 2\pi f_{\text{max}}, \omega_{\text{min}} = 2\pi f_{\text{min}}$ / respectively, the maximum and minimum circular frequencies of radiation (reflection), rad;
 $\omega_{\text{max}} = 2\pi f_{\text{max}}, \omega_{\text{min}} = 2\pi f_{\text{min}}$;

¹ Частотный радиовысотомер: пат. № 2313107 Рос. Федерация. Заявл. 07.04.2006; опубл. 20.12.2007.

$a = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/T_M = \Delta\omega/T_M$ – крутизна модуляцыі для несимметричнага сігналу, рад/с / the steepness of the modulation for an unbalanced signal, rad/s;

$a = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/2T_M = \Delta\omega/T_M$ – крутизна модуляцыі для симметричнага сігналу, рад/с / the steepness of the modulation for a symmetric signal, rad/s;

$b = 2 F_{\text{раз}}/\tau$ – крутизна наклону функцыі разностной частоты, рад/с / slope of the difference frequency function, rad/s;

$\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ – дэвіяцыя частоты, Гц / frequency deviation, Hz;

L – колькасць гармонік у спектры / number of harmonics in the spectrum;

ψ_m – індэкс частотнай модуляцыі / frequency modulation index;

$K(\tau)$ – каэфіцыент карэляцыі / correlation coefficient;

k – каэфіцыент пераўтварэння / conversion coefficient;

$U_{\text{вых}}$ і $U_{\text{вх}}$ – функцыя і аргумент у ўраўненнях перадачы / function and argument in transmission equations;

$m\tau$ – часовае задержка, с / time delay, s.

Список использованных источников

1. Коган, И. М. Ближняя радиолокация: теоретические основы / И. М. Коган. – М.: Совет. радио, 1973. – 272 с.
2. Комаров, И. В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И. В. Комаров, С. М. Смольский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 360 с.
3. Купряшкин, И. Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев. – М.: Радиотехника, 2020. – 288 с.
4. Лихачев, В. П. Ближняя радиотехническая навигация беспилотных летательных аппаратов малого класса с использованием широкополосных линейно-частотно-модулированных сигналов / В. П. Лихачев, А. В. Нагалин, А. А. Павлюк // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 2. – С. 109–118. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202202-13>
5. Соколик, Н. В. Определение скорости движения и дальности быстро движущихся объектов в РЛС с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением с использованием автокорреляционной схемы / Н. В. Соколик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 63–72. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-63-72>
6. Barbarossa, S. Analysis of Multicomponent LFM signals by a Combined Wigner-Hough Transform / S. Barbarossa // IEEE Trans. Signal Process. – 1995. – Vol. 43, Iss. 6. – P. 1511–1515. <https://doi.org/10.1109/78.388866>
7. Multicomponent LFM signal detection and parameters estimation based on Radon-ambiguity transform / A.-F. Liu [et al.] // J. Nanjing Univ. Sci. Technol. – 2004. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 409–413.
8. Gabor, D. Theory of Communication / D. Gabor // J. Inst. Electric. Eng. Part III: Radio and Communication. – 1946. – Vol. 93, № 26. – P. 429–457. <https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0076>
9. Курулев, А. П. Преобразование спектров сигналов в электрорадиотехнике / А. П. Курулев. – Минск: БГУИР, 2017. – 176 с.
10. Новаковский, С. В., Техника частотной модуляции в радиовещании / С. В. Новаковский, Г. П. Самойлов. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 304 с.
11. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы / П. А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

References

1. Kogan I. M. *Short-Range Radar: Theoretical Foundations*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
2. Komarov I. V., Smol'skii S. M. *Fundamentals of the Theory of Radar Systems with Continuous Emission of Frequency-Modulated Oscillations*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010. 360 p. (in Russian).
3. Kupryashkin I. F., Likhachev V. P., Ryazantsev L. B. *Small-Sized Multifunctional Radars with Continuous Frequency-Modulated Radiation*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020. 288 p. (in Russian).
4. Likhachev V. P., Nagalin A. V., Pavlyuk A. A. Short-range radio-technical navigation of small-class unmanned aerial vehicles using broadband linear frequency-modulated signals. *Journal Radioengineering*, 2022, vol. 86, no. 2, pp. 109–118. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202202-13>
5. Sokolik N. V. Determination of Fast-Moving Objects' Speed and Range with Linear Frequency Modulation Continuous Wave Radar Using Autocorrelation Scheme. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 63–72 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-63-72>
6. Barbarossa S. Analysis of Multicomponent LFM signals by a Combined Wigner-Hough Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, vol. 43, iss. 6, pp. 1511–1515. <https://doi.org/10.1109/78.388866>
7. Liu A.-F., Zhu X.-H., Lu J.-H., Liu Z. Multicomponent LFM signal detection and parameters estimation based on Radon-ambiguity transform. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, vol. 28, iss. 4, pp. 409–413.

8. Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part III: Radio and Communication*, 1946, vol. 93, no. 26, pp. 429–457. <https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0076>
9. Kurulev A. P. *Conversion of Signal Spectra in Electric Radio Circuits*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2017. 176 p. (in Russian).
10. Novakovskii S. V., Samoilov G. P. *Frequency Modulation Technique in Radio Broadcasting*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1952. 304 p. (in Russian).
11. Bakulev P. A. *Radar Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).