

Алгоритм обработки сигнала в автономном устройстве фиксации высоты

А.А. Кичигин, Б.И. Шахтарин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: kishigin92@gmail.com

Разработан алгоритм обработки сигнала разностной частоты для автономного устройства фиксации высоты, применяемого в высокоскоростных малоразмерных летательных аппаратах. В качестве зондирующего сигнала использован непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией, обеспечивающий высокое разрешение по дальности и скорости. Алгоритм основан на спектральном анализе сигнала разностной частоты. Рассчитаны основные параметры зондирующего колебания и модулирующего сигнала. Разработана структурная схема автономного устройства фиксации высоты, использующего указанный алгоритм, а также математическая модель устройства, проверена работоспособность алгоритма. Исследовано влияние шума на входе приемника на характеристики системы. Для исследования помехозащищенности алгоритма построена зависимость высоты фиксации от уровня шума.

Ключевые слова: летательный аппарат, автономное устройство, фиксация высоты, линейная частотная модуляция, математическая модель.

Signal Processing Algorithm in Autonomous System of Altitude Fixation

A.A. Kichigin, B.I. Shakhtarin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: kishigin92@gmail.com

The algorithm of difference frequency signal processing for autonomous system of altitude fixation, being used in high-speed flying small-sized vehicles, is designed. Continuous linear frequency modulation signal is used as a probe signal, that provides high quality distance and speed resolution. The algorithm is based on the spectral analysis of difference frequency signal. We calculated the basic parameters of probe and modulating signals. Moreover, we designed a functional scheme of autonomous system of altitude fixation, using the described algorithm. In addition to it, we designed a mathematical model of the system and verified the algorithm operability. We assessed the impact the noise at receiver entrance has on system performance. To explore the algorithm noise immunity, a dependence of altitude fixation on noise level is obtained.

Keywords: flying vehicle, autonomous system, altitude fixation, linear frequency modulation, mathematical model.

Введение. Для обеспечения эффективного использования высокоскоростных малоразмерных летательных аппаратов необходимо осуществлять фиксацию расстояния от аппарата до поверхности Земли. Основная проблематика таких систем — обеспечение стабилизации высоты срабатывания и высокой помехозащищенности устройства. Часто в качестве зондирующего сигнала применяют непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), который обеспечивает высокое разрешение по дальности и скорости [1–3]. В качестве полезного сигнала в таких системах используют сигнал разностной частоты. В настоящее время разработаны методы измерения малых расстояний с помощью частотной модуляции в радиолокации [4, 5]. Однако в условиях сильной шумовой обстановки и высокой скорости перемещения аппарата необходим специальный алгоритм обработки разностной частоты.

Алгоритм обработки сигнала разностной частоты. Для формирования функции селекции по дальности могут быть использованы спектральный и интегральный способы обработки результирующего сигнала.

При *спектральном способе* используют характеристики спектра результирующего сигнала, а при *интегральном* — характеристики мгновенной частоты. В работе [6] показано, что при использовании сигнала с ЛЧМ в качестве зондирующего спектр полезной составляющей результирующего сигнала «беден». В этом случае наиболее эффективно применить спектральный метод. При этом энергия полезного сигнала сосредоточивается только на частотах, кратных частоте модуляции F_m , а их амплитуды изменяются по закону $\sin x/x$ и пропорциональны следующему выражению:

$$B_m = \left| \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{R}{\Delta R} - m \right) \right]}{\pi \left(\frac{R}{\Delta R} - m \right)} \right|,$$

где R — расстояние до поверхности Земли; ΔR — разрешающая способность сигнала по дальности; m — номер гармоники.

Для обеспечения функции селекции по дальности с большой крутизной необходимо использовать многоканальную обработку. Амплитуды соседних гармоник изменяются по закону $\sin x/x$, при достижении необходимого расстояния R они становятся равными и выдается команда срабатывания (рис. 1).

Кроме полезного сигнала во входном колебании присутствуют паразитные составляющие, обусловленные конечной развязкой между приемной и передающей антенной и паразитной амплитудной модуляцией (ПАМ) вследствие неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) передающего и приемного трактов, а также модуляционной характеристики. Указанные характеристики выделяются на

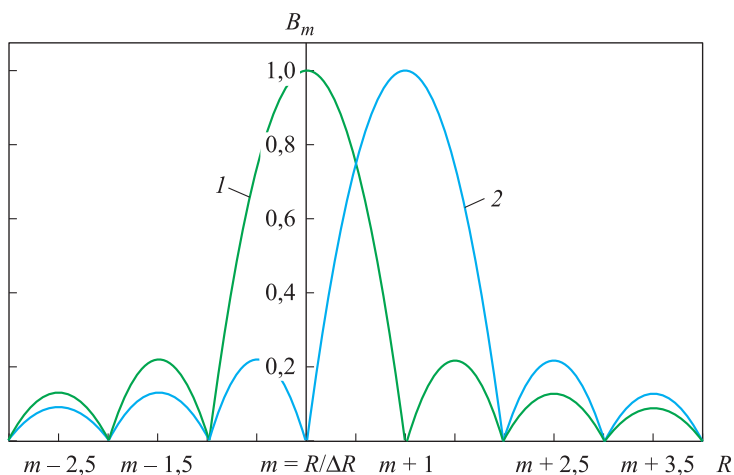


Рис. 1. Зависимость амплитуд соседних гармоник от расстояния для гармоник с номером m (1) и номером $m + 1$ (2)

частотах, кратных частоте модуляции F_m . Если сигнал развязки выделяется на всех частотах аналогично полезному сигналу, то составляющая, обусловленная ПАМ, в основном присутствует на первой гармонике, а далее резко убывает. Поэтому для обработки используем гармоники выше второй. При увеличении номера гармоники ее амплитуда также убывает. В связи с этим для обработки полезного сигнала целесообразно использовать третью и четвертую гармоники. Поскольку аппарат перемещается с определенной скоростью, зондирующий сигнал приобретет смещение Доплера [7], т. е. спектр сдвинется на частоту Доплера: $F_{Д} = (2f_0/c)V \cos \alpha_{Д}$, где f_0 — центральная частота зондирующего сигнала; V — скорость аппарата; $\alpha_{Д}$ — угол между вектором скорости снаряда и направлением на цель.

Облучается не точечная цель, а поверхность, тогда вместо одной гармоники будет непрерывный спектр Доплера, граничные частоты которого находят по формулам

$$F_{Д1, Д2} = \frac{2f_0}{c} V \cos \left(90 \pm \frac{\Delta\theta}{2} - \alpha \right).$$

Здесь $\Delta\theta$ — ширина диаграммы направленности антенны; α — угол полета летательного аппарата к поверхности Земли.

При скоростях, меньших скорости звука, и центральной частоте зондирующего сигнала максимальная частота спектра Доплера составит 54 кГц, а минимальная может быть нулевой.

Для того чтобы частота Доплера не мешала при выделении разностной частоты, необходимо соблюдение условия

$$F_M > 20F_{D \max}. \quad (1)$$

Из условия (1) получаем частоту модуляции ЛЧМ сигнала 1,5 МГц.

Полезный сигнал выделяется на частотах $mF_M \pm F_D$, вся энергия полезного сигнала также сосредоточивается на частотах $mF_M + F_D$ при минимальном обратном ходе. Для обработки сигнала разностной частоты используем третью и четвертую гармоники, которые имеют частоты $f_3 = 3F_M + F_D \approx 3F_M = 4,5$ МГц, $f_4 = 4F_M + F_D \approx 4F_M = 6,0$ МГц.

Необходимую разрешающую способность ΔR определяют из уравнения: $B_3 - B_4 = 0$. Решая уравнения для требуемого расстояния и учитывая, что для пилообразного закона изменения частоты при нулевом обратном ходе справедливо соотношение $\Delta f = c/(2\Delta R)$, получаем значение девиации частоты.

Структурная схема устройства фиксации высоты. Структурная схема реализации рассматриваемого алгоритма в автономном устройстве фиксации высоты приведена на рис. 2.

Модуляционное напряжение $u_m(t)$ от низкочастотного (НЧ) блока поступает на генератор, управляемый напряжением (ГУН). Затем сигнал, частота которого модулирована по пилообразному закону, через передающую антенну излучается в пространство и, отразившись от объекта исследования, через время $\tau_c = 2R/c$, возвращается в приемную антенну, соединенную со сверхвысокочастотным (СВЧ) смесителем. Кроме эхо-сигнала, на СВЧ-смеситель поступает часть сигнала передатчика, которая используется в качестве гетеродинного сигнала. Частота гетеродинного сигнала отличается от частоты эхо-сигнала на величину, пропорциональную времени τ_c . Поэтому на выходе СВЧ-смесителя появляется сигнал разностной частоты f_p . Далее результирующий сигнал усиливается, фильтруется и передается на НЧ-блок. В качестве высокочастотного (ВЧ) блока можно применять радарные модули фирмы RFBeam диапазона 24,05...24,25 ГГц [8], что уменьшит габаритные показатели всей системы.

Низкочастотный блок можно разделить на несколько функциональных узлов: блок передатчика; блок приемника; блок обработки.

Блок передатчика должен сгенерировать требуемое пилообразное напряжение. Существуют аналоговые способы генерации [9]. Для увеличения точности создания будем использовать цифровой синтез сигнала. Это позволит гибко настраивать модуляционный сигнал в случае нелинейности характеристики ГУН, поскольку такой фактор может существенно ухудшить характеристики системы [10]. Для создания пилообразного напряжения будет достаточно взять $N = 100$ отсчетов. Вначале необходим генератор прямоугольных импульсов, который будет

иметь частоту повторения f_{Γ} в N раз больше, чем требуемая частота F_M пилообразного напряжения: $f_{\Gamma} = NF_M = 150$ МГц. Поскольку отдельных генераторов с такой высокой частотой не существует, необходимо использовать специальный умножитель частоты — синтезатор PLL. Таким образом, можно использовать генератор прямоугольных импульсов с частотой $f_{\Gamma} = 15$ МГц и умножить ее на 10, получив требуемую частоту f_{PLL} . Далее следует создать цифровые отсчеты пилообразного напряжения. Их можно считать из энергонезависимой памяти с предварительно записанными данными отсчетами. Для получения требуемого значения девиации частоты осуществляется регулировка масштаба и смещения. С помощью цифроаналогового преобразователя с частотой преобразования, аналогичной частоте f_{PLL} , получаем модуляционное напряжение. При излучении сигнала с ЛЧМ и нулевым обратным ходом на вход приемника поступает колебание вида

$$e_c(t) = E_c \left\{ A_0 \cos(2\pi F_{\text{Д}} t + \Phi_c) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin[2\pi(mF_M + F_{\text{Д}})t + \Phi_c] \right\},$$

где E_c — амплитуда сигнала разностной частоты; A_0 — амплитуда составляющей с частотой $F_{\text{Д}}$; Φ_c — начальная фаза; B_m — амплитуда составляющей с частотой $mF_M + F_{\text{Д}}$.

Посредством узкополосных фильтров выделяются требуемые гармоники. Тогда в каждом канале получим следующие сигналы:

$$e_{3,4}(t) = E_c B_{3,4} \sin[2\pi((3,4)F_M + F_{\text{Д}})t + \Phi_c].$$

Сравнение амплитуд гармоник лучше проводить в цифровом виде, так как меньше влияние шумов и помех. Для этого сигналы преобразуются в цифровой вид, т. е. подаются на 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Пусть частота дискретизации АЦП составляет F_s , тогда $t = n/F_s$, где $n = 1, 2, \dots, N$ — номер отсчета. Получим сигнал на выходе АЦП:

$$u_{3,4}(n) = E_c B_{3,4} \sin \left[2\pi(3,4) \frac{F_M}{F_s} n + 2\pi \frac{F_{\text{Д}}}{F_s} n + \Phi_c \right].$$

Сигнал будет иметь единственную частоту — частоту Доплера — при выполнении условия $F_s = F_M/k$. При такой частоте дискретизации будет оцифрован сигнал с частотой Доплера, т. е. по теореме Котельникова. Следовательно, с учетом выражения (1) имеем $F_s \geq 2F_{\text{Д}} \geq 0,2F_M$.

Значения частоты дискретизации составят $F_s = F_M/1, F_M/2, F_M/3, F_M/4, F_M/5$. Выберем $F_s = 0,5F_M = 750$ кГц. При указанном значении

частоты на выходе приемника будут отсчеты колебаний с амплитудой, пропорциональной амплитудам B_3 и B_4 , и частотой F_D :

$$u_{3,4}(n) = E_c B_{3,4} \sin \left[2\pi \frac{F_D}{F_s} n + \Phi_c \right].$$

На входе в блок обработки необходимо поставить полосовые фильтры для устранения постоянной составляющей и ВЧ-помех. Такие фильтры должны пропускать спектр частот Доплера. Далее в каждом канале выделяется мощность и сравнивается между собой. При их равенстве генерируется импульс срабатывания. Гармоники могут стать равными до требуемого момента срабатывания, особенно при малых амплитудах входного сигнала (см. рис. 1). Отметим, что до требуемой точки пересечения есть участок, на котором одна из гармоник значительно превосходит другую. Это свойство можно использовать для создания запирающего канала. Основной канал сравнения будет находиться в запертом состоянии, пока четвертая гармоника не превысит третью на 3 дБ, таким образом, не будет ложных срабатываний. На выходе блока обработки формируется сигнал срабатывания.

Проверка работоспособности алгоритма на математической модели. Математическое моделирование проведено в САПР SystemVue [11, 12]. Выбраны следующие основные параметры модели: высота фиксации 6 м; скорость аппарата 200 м/с; угол подлета 50° ; диаграмма направленности шириной 90° ; облучаемая поверхность — грунт. Математическая модель составлена по структурной схеме (рис. 3). Результаты моделирования приведены на рис. 4, а. Амплитуды гармоник соответствуют амплитудам, показанным на рис. 1. Они становятся равными на требуемом расстоянии (6 м). При воздействии шума на входе приемника гармоники искажаются (рис. 4, б–г). Зависимость расстояния фиксации высоты от отношения сигнал–шум показана на рис. 5.

При низком значении отношения сигнал–шум увеличивается разброс расстояния фиксации и происходят ложные срабатывания. Система работает с приемлемой погрешностью при отношении сигнал–шум выше -30 дБ, поэтому предлагаемое автономное устройство фиксации высоты обладает высокой помехозащищенностью.

Выводы. Разработан алгоритм обработки результирующего сигнала разностной частоты, который можно использовать в устройстве фиксации высоты для высокоскоростных малоразмерных летательных аппаратов, обеспечивающем высокую точность и помехозащищенность. Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности и скорости использована ЛЧМ. Алгоритм обработки основан на спектральном способе, в котором сравниваются амплитуды соседних гармоник сигнала разностной частоты. Рассчитаны основные параметры зондирующего колебания, а также модуляционного напряжения.

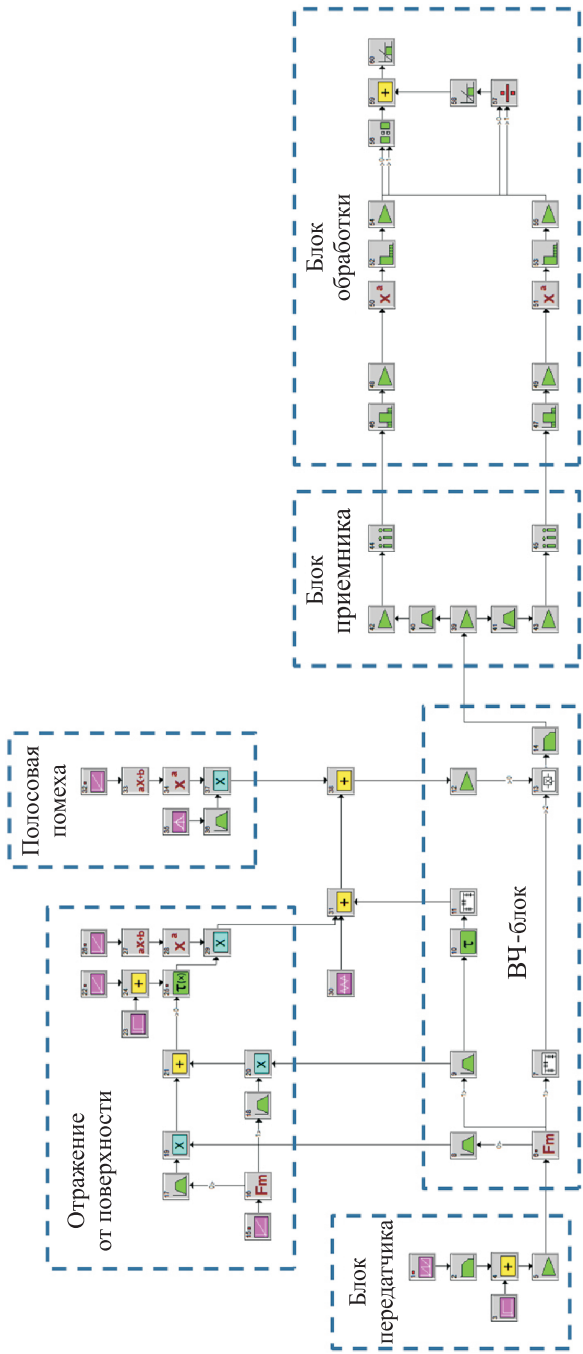


Рис. 3. Структурная схема автономного устройства фиксации высоты, смоделированная в САПР SystemVue

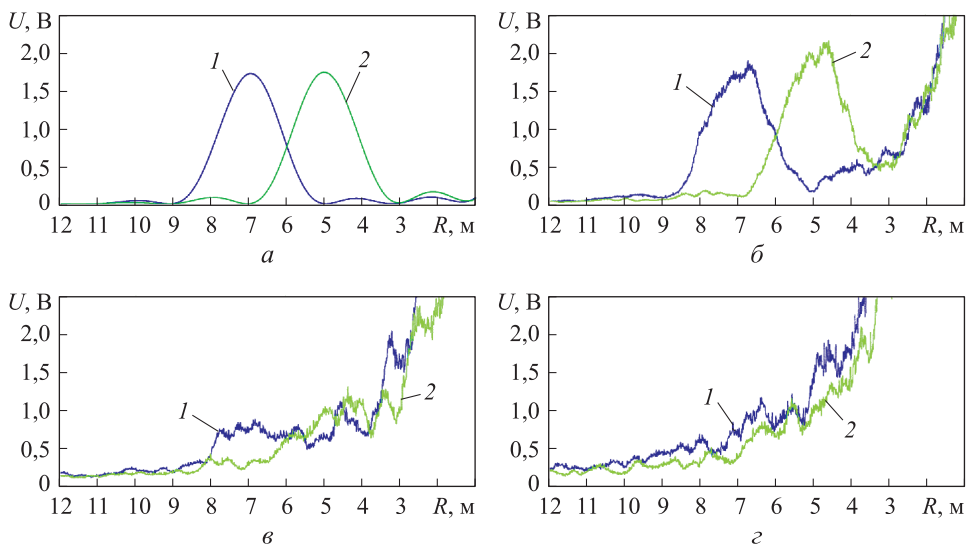


Рис. 4. Зависимость амплитуд соседних гармоник от расстояния, полученная в результате моделирования (а), при отношении сигнал–шум -20 (б), -30 (в) и -40 (г) дБ для рабочих четвертой (1) и третьей (2) гармоник

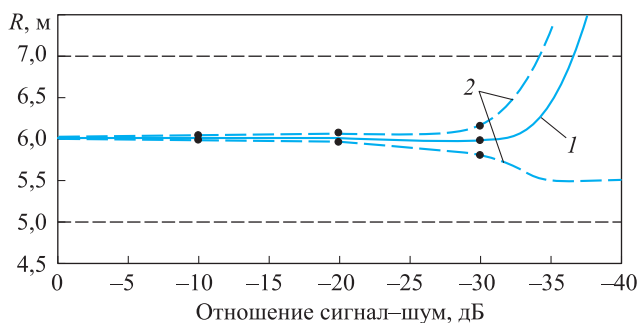


Рис. 5. Зависимость расстояния фиксации высоты от отношения сигнал–шум:

1 — среднее значение; 2 — отклонение

Разработана структурная схема автономного устройства фиксации высоты, использующего указанный алгоритм. Создание пилообразного напряжения осуществляется с помощью цифрового синтеза, что позволяет повысить точность и дает возможность подстраивать модуляционный сигнал под характеристику ГУН. Для уменьшения воздействия ПАМ в качестве рабочих гармоник используют третью и четвертую гармоники результирующего сигнала. Для уменьшения воздействия сигнала развязки применяют отстройку по частоте Доплера с помощью АЦП с частотой дискретизации, кратной частоте модуляции. По структурной схеме разработана математическая модель устройства фиксации высоты и проверена работоспособность алгоритма на модели. Получены зависимости амплитуд рабочих гармоник от высоты. Исследовано влияние шу-

ма на входе приемника на характеристики. Система работает с допустимой погрешностью при значении отношения сигнал–шум более –30 дБ, что доказывает ее высокую помехозащищенность.

Настоящая работа выполнена по гранту «Статистические методы локализации местоположения и протяженности области определения сигналов и изображений в пространстве их существования» (проект № 15-11-10022) Российского научного фонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоноровский И.С. Частотная модуляция и ее применение. М.: Связьиздат, 1948.
2. Винуцкий А.С. Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн. М.: Сов. радио, 1961. 495 с.
3. Коган И.М. Ближняя радиолокация (Теоретические основы). М.: Сов. радио, 1973. 272 с.
4. Атаянц Б.А., Езерский В.В., Смольский С.М., Шахтарин Б.И. Прецизионные промышленные системы ЧМ-радиолокации ближнего действия. Методическая погрешность измерения и ее минимизация // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 2. С. 3–23.
5. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения / Б.А. Атаянц, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский, В.С. Паршин, С.М. Смольский. М.: Радиотехника, 2012. 512 с.
6. Климашев Б.М., Петров И.П. Устройства ближней локации с непрерывными сигналами. Куйбышев: Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева, 1974. 51 с.
7. Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
8. Горбатов К. Радарные модули фирмы RFBeam диапазона ISM 24,05–24,25 ГГц // Компоненты и технологии. 2015. № 4. С. 18–22.
9. Бондарь В.А. Генераторы линейно изменяющегося напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
10. Атаянц Б.А., Езерский В.В., Смольский С.М., Шахтарин Б.И. Проблема шумов и нелинейность модуляционной характеристики передатчика в прецизионных промышленных системах ближней частотной радиолокации // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 3. С. 3–29.
11. Разевиг В.Д., Лаврентьев Г.В., Златин И.Л. SystemView — средство системного проектирования радиоэлектронных устройств / под ред. В.Д. Разевига. М.: Горячая Линия — Телеком, 2002. 352 с.
12. Кичигин А.А. Моделирование работы автономного устройства фиксации высоты // Электрон. Журн. Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/802837.html>

REFERENCES

- [1] Gonorovskiy I.S. Chastotnaya modulyatsiya i ee primenenie [Frequency Modulation and Its Application]. Moscow, Svyaz'izdat Publ., 1948.
- [2] Vinititskiy A.S. Ocherk osnov radiolokatsii pri nepreryvnom izluchenii radiovoln [Basics of Continuous Wave Radar]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1961. 495 p.
- [3] Kogan I.M. Blizhnyaya radiolokatsiya (Teoreticheskie osnovy) [Short Range Radiolocation (Fundamental Theory)]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1973. 272 p.
- [4] Atayants B.A., Ezerskiy V.V., Smolskiy S.M., Shakhtarin B.I. Precision industrial short-range FMCW radar systems. Truncation measurement error and its minimization. *Usp. sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2008, no. 2, pp. 3–23 (in Russ.).

- [5] Atayants B.A., Davydochkin V.M., Ezerskiy V.V., Parshin V.S., Smolskiy S.M. *Pretsizionnye sistemy blizhney chastotnoy radiolokatsii promyshlennogo primeneniya* [Precision Systems of Short Range Frequency Radiolocation for Industrial Applications]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 512 p.
- [6] Klimashev B.M., Petrov I.P. *Ustroystva blizhney lokatsii s nepreryvnymi signalami* [Continuous Wave Short Range Radars]. Kuybyshev, Kuybyshev politekh. inst. im. V.V. Kuybysheva Publ., 1974. 51 p.
- [7] *Radar Handbook*. Ed by Skolnik M.I. In 2 vol. Vol. 1. N.Y., McGraw-Hill, 1970.
- [8] Gorbатов K. RFBeam radar modules of ISM band 24.05–24.25 GHz. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2015, no. 4, pp. 18–22 (in Russ.).
- [9] Bondar' V.A. *Generatory lineyno izmenyayushchegosya napryazheniya* [Sawtooth Oscillator]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 160 p.
- [10] Atayants B.A., Ezerskiy V.V., Smolskiy S.M., Shakhtarin B.I. Noise and transmitter modulation curve non-linearity in the precision industrial short-range FM radar. *Usp. sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2008, no. 3, pp. 3–29 (in Russ.).
- [11] Razevig V.D., Lavrent'ev G.V., Zlatin I.L. Ed. by Razevig V.D. *SystemView — sredstvo sistemnogo proektirovaniya radioelektronnykh ustroystv* [System View — Means of Radio Electronic Device System Design]. Moscow, Goryachaya Liniya — Telekom Publ., 2002. 352 p.
- [12] Kichigin A.A. Simulation of autonomous height locking device. *Jelekt. Zhur. Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik. MGTU im. N.E. Baumana* [El. J. Youth Sci.&Techn. Herald of Bauman MSTU], 2015, no. 9. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/802837.html>

Статья поступила в редакцию 11.09.2015

Кичигин Артем Анатольевич — аспирант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kichigin A.A. — post-graduate student of Autonomous Information and Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Шахтарин Борис Ильич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Shakhtarin B.I. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Autonomous Information and Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Кичигин А.А., Шахтарин Б.И. Алгоритм обработки сигнала в автономном устройстве фиксации высоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3. С. 13–23. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-13-23

Please cite this article in English as:

Kichigin A.A., Shakhtarin B.I. Signal Processing Algorithm in Autonomous System of Altitude Fixation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostroy.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 3, pp. 13–23. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-13-23