

УДК 621.396.96

Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев
 АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург)
 В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поиск эхосигнала спутникового высотомера

Проанализирована процедура поиска сигнала спутникового высотомера и рассчитаны ее характеристики. Получены численные оценки продолжительности поиска и вероятности его ошибочного завершения. Выполнена верификация полученных теоретических показателей с помощью компьютерного моделирования.

Спутниковый высотомер, эхосигнал, поиск по времени, вероятность ложной тревоги, вероятность правильного обнаружения

Поиском по времени традиционно называют грубую измерительную процедуру фиксации времени прихода сигнала с точностью, достаточной для замыкания контура автосопровождения по запаздыванию. Вне зависимости от исполнения поискового устройства его работа сводится к тестированию отдельных ячеек временной оси с целью обнаружения в них сигнала [1], [2].

В задачах спутниковой альтиметрии обнаружению подлежит сигнал, отраженный участком земной поверхности в пределах вертикально направленного луча передающей антенны. Математическое описание подобного эхосигнала сводится к вычислению суперпозиции откликов на зондирующий импульс независимых блестящих точек внутри освещаемого пятна [3], [4]. Уточненная зависимость усредненной мощности эхосигнала от времени (профиль мощности) с учетом доплеровского рассеяния откликов индивидуальных блестящих точек, приведенная в [5], имеет весьма короткий нарастающий фронт и достаточно плавный спад. Так как от поиска требуется лишь оценка времени прихода сигнала с погрешностью в пределах его длительности, при анализе поисковой процедуры вполне допустимо аппроксимировать профиль мощности некоторым удобным в вычислительном отношении импульсом.

Экспоненциальное приближение профиля. Альтиметры современных миссий космического мониторинга Земли функционируют в комплексе с системами траекторных измерений [6], [7], благодаря которым априорная ошибка значения измеряемой высоты относительно невелика. В частности, для космического аппарата (КА) на орбите высотой $h = 1000$ км типичной является априор-

ная неопределенность значения высоты порядка ± 100 м, что соответствует интервалу возможных значений времени прихода отраженного сигнала $4/3$ мкс. На рис. 1 приведены кривые профили мощности P_r , нормированной на ее максимум P_{max} , с учетом доплеровского рассеяния для полосы сигнала $W = 100, 320$ и 500 МГц, несущей частоты $f_0 = 35.75$ ГГц, длительности зондирующего импульса $T = 100$ мкс, высоты спутника $h = 1000$ км и ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) 0.6° . При построении профилей использовались гауссовское приближение ДНА и аппроксимация функции неопределенности (ФН) сигнала гауссовской поверхностью, симметричной относительно осей задержки τ и частоты F [5]:

$$\psi(\tau, F) = \exp(-\beta_\tau \tau^2 - \beta_F F^2),$$

где β_τ, β_F – параметры, характеризующие скорость спада ФН вдоль осей τ и F соответственно.

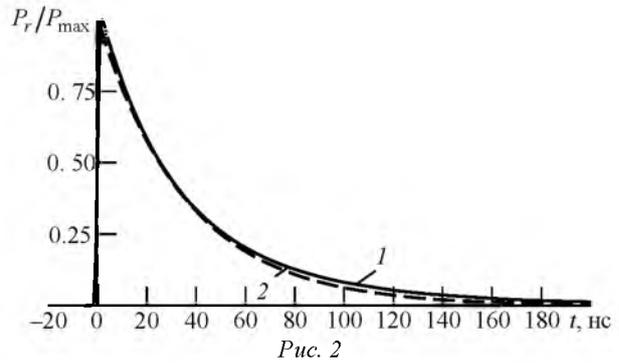
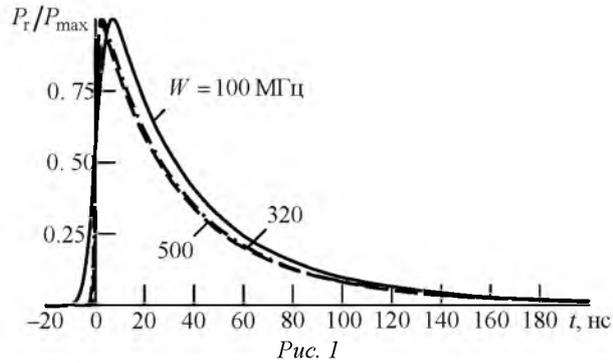
Обозначим

$$\Delta_{0.5} = 0.8859/W; \quad F_{0.5} = 0.8859/T$$

– ширину ФН по осям задержки и частоты по уровню половинной мощности соответственно. Тогда

$$\beta_\tau = \frac{2 \ln 2}{\Delta_{0.5}^2}; \quad \beta_F = \frac{2 \ln 2}{F_{0.5}^2}.$$

Отметим, что в области значительного отличия от нуля (кроме не дающего существенного вклада в результат корреляционной процедуры



поиска переднего фронта) любая из кривых рис. 1 весьма точно аппроксимируется экспоненциальным импульсом, длительность которого по уровню половинной мощности $T_{0.5}$ равна длительности аппроксимируемого профиля по тому же уровню. В подтверждение этого на рис. 2 повторен профиль P_r/P_{\max} для $W = 500$ МГц (кривая 1) совместно с указанным экспоненциальным приближением (кривая 2). Визуально расхождения между двумя кривыми едва заметны, что позволяет далее при анализе поисковой процедуры считать профиль мощности импульсом экспоненциальной формы.

Для выбранных значений полосы наименьшая длительность профиля по половинному уровню $T_{0.5} \approx 25.5$ нс соответствует $W = 500$ МГц. При фиксированном аппаратном ресурсе укорочение импульса ведет к росту временных затрат на поиск и к снижению его надежности [1], [2]. Поэтому с ориентацией на наихудшие условия поиска будем считать, что профиль мощности описывается соотношением

$$P_r(t) = P_{\max} \exp(-t \ln 2 / T_{0.5}) \quad (1)$$

при $T_{0.5} \approx 25$ нс.

Согласно [5]:

$$P_{\max} = A \pi h^2 K_{\max} / 2,$$

где

$$A = \frac{2WTP_{\text{тр}}G^2\lambda^2\sigma_0}{(4\pi)^3 L_p h^4}, \quad (2)$$

причем $P_{\text{тр}}$ – фактическая излучаемая мощность сигнала; G – коэффициент усиления антенны; $\lambda = c/f_0$ – длина волны излучения (c – скорость света); σ_0 – удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР); L_p – дополнительные трассовые потери.

Произведение WT в (2) отвечает за приведение фактической мощности $P_{\text{тр}}$ к эквивалентной мощности сжатого импульса;

$$K_{\max} = \max_t \left\{ \int_0^\infty \exp \left[-2\beta_\tau \left(t - \frac{hx}{c} \right)^2 - \left(\delta_F + \frac{4}{\gamma} \right) x \right] I_0(\delta_F x) dx \right\},$$

где

$$\delta_F = 4\beta_F v^2 / \lambda^2; \quad \gamma = (2/\ln 2) \sin^2 \theta_0;$$

$I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, причем v – путевая скорость КА; θ_0 – полуширина луча антенны по уровню 0.5.

Для полос 100, 320 и 500 МГц при принятых значениях несущей, ширины ДНА, высоты орбиты, длительности зондирующего импульса и путевой скорости КА $v \approx 7.36$ км/с имеем $K_{\max} = 2.2 \cdot 10^{-6}$, $8.03 \cdot 10^{-7}$ и $5.3 \cdot 10^{-7}$ соответственно.

Переходя к логарифмической мере (децибелам) и введя обозначение $A_1 = A \pi h^2 / 2$, имеем:

$$P_{\max, \text{дБ}} = A_{1, \text{дБ}} + K_{\max, \text{дБ}};$$

$$A_{1, \text{дБ}} = 10 \lg(WT) + P_{\text{тр}, \text{дБ}} + 2G_{\text{дБ}} + 20 \lg \lambda + \sigma_{0, \text{дБ}} - 20 \lg(8\pi) - L_{p, \text{дБ}} - 20 \lg h.$$

Финальным объектом интереса является максимальное отношение "сигнал/шум"

$$q_{\max} = P_{\max} / \sigma_n^2,$$

где $\sigma_n^2 = N_0 W$ (N_0 – спектральная плотность шума). Для типичного значения $N_0 = -200$ дБВт/Гц, излучаемой мощности $P_{\text{тр}} = 10$ Вт, коэффициента усиления антенны $G_{\text{дБ}} = 48.5$ дБ, УЭПР $\sigma_{0, \text{дБ}} = 0$ дБ при дополнительных потерях на трассе $L_{p, \text{дБ}} = 10$ дБ имеем значения параметров, приведенные в табл. 1.

Характеристики процедуры поиска. Введя некоторый запас, расширим указанный ранее

Таблица 1

Параметр	W, МГц		
	100	320	500
$K_{\max, \text{дБ}}$, дБ	-56.58	-60.95	-62.76
$A_{1, \text{дБ}}$, дБ·Вт	-52.53	-47.48	-45.54
$P_{\max, \text{дБ}}$, дБ·Вт	-109.11	-108.43	-108.30
$q_{\max, \text{дБ}}$, дБ	10.89	6.52	4.71

априорный интервал возможных запаздываний сигнала с $4/3$ до $T_a = 1.5$ мкс. Устройство поиска проверяет отдельные ячейки временной оси на предмет наличия в них сигнала. Для каждой ячейки указанная операция осуществляется коррелятором, вычисляющим скалярное произведение (корреляцию) принимаемого приемником колебания с репликой зондирующего сигнала, сдвинутой по времени соответственно положению ячейки на временной оси. В энергетическом приемнике корреляции, полученные при отдельных зондированиях, затем интегрируются некогерентно, после чего накопленный результат сравнивается с предустановленным порогом. При превышении порога фиксируется присутствие сигнала в тестируемой ячейке.

Предположим, что для поиска задействован банк из n_c параллельных корреляторов. Если анализируемые ими временные позиции распределены равномерно по всему априорному интервалу T_a (рис. 3), зона неопределенности запаздывания сокращается до T_a/n_c . В частности, приравняв эту величину к длительности профиля мощности по половинному уровню $T_{0.5}$, получим, что для одновременного анализа всего интервала времени запаздывания потребуется $n_c = T_a/T_{0.5}$ корреляторов. В частности, при принятых ранее значениях $T_a = 1.5$ мкс и $T_{0.5} = 25$ нс $n_c = 60$.

При расположении переднего фронта профиля в k -й слева ячейке и независимости тестовых статистик для отдельных ячеек вероятность окончания поиска правильным целсуказанием определяется как

$$P_c(k) = (1 - p_f)^{k-1} p_d, \quad k = 1, 2, \dots, n_c, \quad (3)$$

где p_f , p_d – вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения в отдельной ячейке соответственно.

Считая равновероятным попадание переднего фронта профиля в любую из n_c ячеек, для усредненной вероятности правильного завершения поиска P_c из (3) получим:

$$P_c = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} P_c(k) = \frac{p_d [1 - (1 - p_f)^{n_c}]}{n_c p_f} \approx p_d \left(1 - \frac{n_c - 1}{2} p_f \right), \quad (4)$$

где последнее приближение справедливо при $n_c p_f \ll 1$.

В ячейках, в которых отсутствует полезный сигнал, результат интегрирования квадратично-детектированных корреляций, полученных по N зондированиям, подчиняется распределению χ^2 с $2N$ степенями свободы, поэтому

$$p_f = 1 - F_{\chi^2}(l, 2N), \quad (5)$$

где $F_{\chi^2}(x, n)$ – интегральная функция распределения χ^2 с n степенями свободы; l – порог, нормированный на дисперсию шума σ_n^2 .

Отраженный от подстилающей поверхности сигнал как суперпозиция многих случайно интерферирующих компонентов есть реализация гауссовского шума. Поэтому в ячейке, содержащей сигнал, тестовая статистика после N зондирований по-прежнему подчиняется закону χ^2 с $2N$ степенями свободы, однако в этом случае абсолютный порог $l\sigma_n^2$ должен быть нормирован на новое значение дисперсии $\sigma_n^2 + P_f(\tau)$, где $\tau \in [0, T_a/n_c]$ – временное положение переднего фронта профиля мощности относительно правого края ячейки (рис. 3). Таким образом, нормированный порог для ячейки при наличии сигнала определяется как

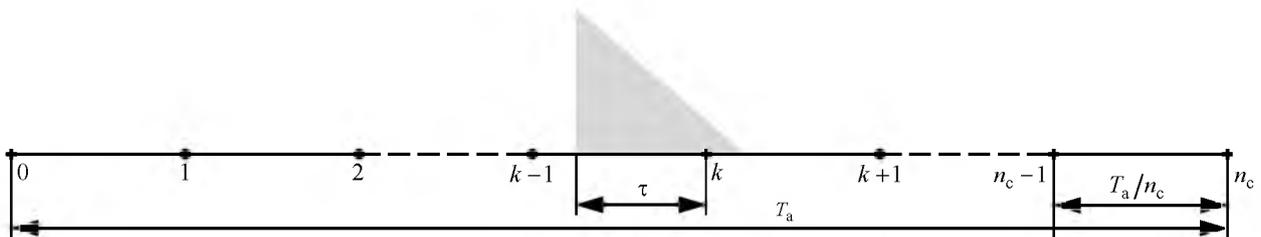


Рис. 3

$$l\sigma_n^2 / [\sigma_n^2 + P_r(\tau)] = l/[1 + q(\tau)],$$

где $q(\tau) = P_r(\tau) / \sigma_n^2$.

Полагая любые запаздывания τ в пределах ячейки равновероятными и учитывая экспоненциальную аппроксимацию профиля (1), имеем:

$$P_d = 1 - \frac{n_c}{T_a} \int_0^{T_a/n_c} F \chi^2 \left[\frac{l}{1 + q(\tau)}, 2N \right] d\tau =$$

$$= 1 - \frac{n_c}{T_a} \int_0^{T_a/n_c} F \chi^2 \left[\frac{l}{1 + q_{\max} \exp\left(\frac{-\tau \ln 2}{T_{0,5}}\right)}, 2N \right] d\tau. \quad (6)$$

При проектировании поискового устройства спутникового высотомера следует при заданных числе корреляторов n_c и зондирований N варьировать нормированный порог в (5) и (6), добиваясь максимума вероятности правильного завершения поиска (4). Если требуемая надежность поиска не достигнута, следует повторить анализ с увеличением числа зондирований. Если необходимое значение P_c не достижимо при приемлемых значениях N , определяемых допустимыми временными затратами, необходимо увеличивать число корреляторов n_c .

Описанный алгоритм проектирования реализован m-файлом в вычислительной среде Matlab. Расчеты проведены для значений W и q_{\max} , представленных в табл. 1, числа корреляторов $n_c = 64$ и числа зондирований $N = 50$. Полученные зависимости вероятности неправильного завершения поиска $P_e = 1 - P_c$ от нормированного порога $l/(2N)$ приведены на рис. 4. В табл. 2 указаны оптимальные значения порога и соответствующие им минимальные вероятности неудачного исхода поиска.

Результаты вычислений показывают, что уже при малом числе зондирований надежность поиска весьма высока. Отметим, что даже при низкой частоте зондирований (порядка одного килогерца) временные затраты на поиск находятся в пределах 0.05 с.

Результаты моделирования. Для верификации приведенных аналитических оценок проведено моделирование процедуры поиска в среде Matlab. С учетом слабого влияния ширины спектра сигнала на показатели поиска моделирование выполнялось для единственного значения полосы $W = 320$ МГц при количестве аккумулируемых зондирований $N = 50$ и 100 и числе корреляторов $n_c = 64$. Испытания прекращались по достижении

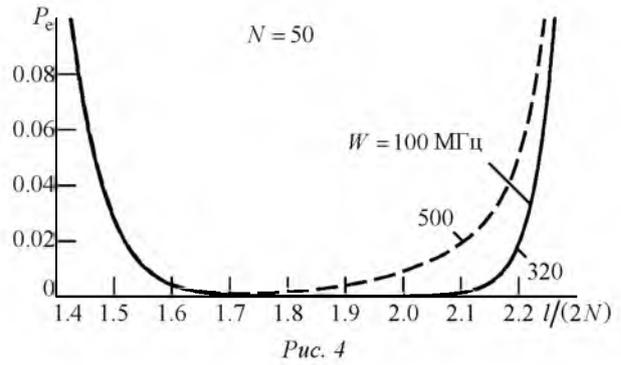


Таблица 2

Параметр	W , МГц		
	100	320	500
$q_{\max, \text{дБ}}$	10.89	6.52	4.71
$l/(2N)$	1.7...2	1.7...2	1.7
$P_{e \min}$	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$

10 неверных исходов поиска. Профиль мощности принимаемого сигнала в эксперименте не аппроксимировался экспонентой, как описано ранее, а формировался с помощью ассистирующего m-файла, моделирующего суперпозицию сигналов со случайными фазами, отраженных от освещаемых независимых блестящих точек. Отношение "сигнал/шум" q_{\max} увеличивалось от 0 дБ с шагом 0.5 дБ до значений, соответствующих вероятности ошибочного поиска порядка 10^{-5} . Значения порогов рассчитывались с использованием второго дополнительного m-файла. Результаты машинного эксперимента представлены на рис. 5, расчетные значения представлены кривыми, а экспериментальные – маркерами. Данные показывают весьма высокую степень совпадения результатов моделирования с теоретически предсказанными.

В настоящей статье исследована процедура поиска сигнала спутникового высотомера и рассчитаны ее характеристики. Установлено, что малые вероятности ошибочного завершения поиска ($1.13 \cdot 10^{-5}$, $2.30 \cdot 10^{-5}$ и $1.0 \cdot 10^{-3}$ для полос сигнала $W = 100, 320$ и 500 МГц соответственно)

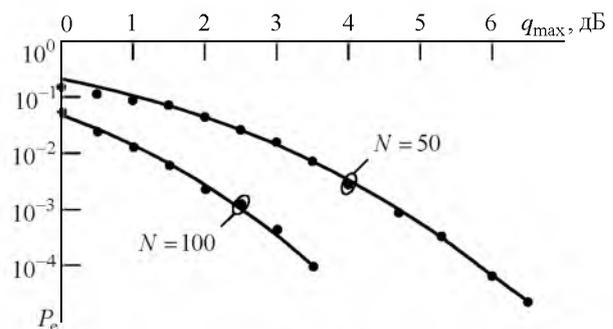


Рис. 5

при умеренных аппаратных затратах (числе эквивалентных корреляторов, близком к сотне) достигаются при продолжительности поиска в пределах 50 мс. Верификация теоретических оценок с

помощью компьютерного эксперимента продемонстрировала высокую степень достоверности проведенного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов радионавигационных систем / В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, Ю. Д. Ульяницкий; под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Сов. радио, 1975. 296 с.
2. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
3. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, № 1. P. 67–74.
4. Hayne G. S. Radar Altimeter Mean Return Waveforms from Near-Normal-Incidence Ocean Surface Scat-

tering // IEEE Trans. on Anten. and Prop. 1980. Vol. AP-28, № 5. P. 687–692.

5. Эхосигнал спутникового высотомера с учетом доплеровского рассеяния / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 46–52.

6. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 496 p.

7. Coastal Altimetry / ed. by S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Heidelberg: Springer, 2011. 565 p.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2017 г.

Для цитирования: Поиск эхосигнала спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 27–32.

Боровицкий Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук (2016), ведущий научный сотрудник АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – широкополосные системы радиолокации и радионавигации, теория сигналов. E-mail: dmitry_perogodin@mail.ru

Жестерев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук (1982), начальник отдела АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 20 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация; теория связи. E-mail: zhesterev@mail.ru

Ипатов Валерий Павлович – доктор технических наук (1983), профессор (1985) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (2001), почетный радист СССР (1983). Автор более 250 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронная системотехника; статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов. E-mail: ival1941@yandex.ru

Мамчур Руслан Михайлович – магистр техники и технологии по направлению "Радиотехника" (2015), аспирант и ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов; техническая электродинамика. E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru.

D. S. Borovitsky, A. E. Zhesterev

JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg)

V. P. Ipatov, R. M. Mamchur

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Searching for Satellite Altimeter Echo-Signal

Abstract. The paper is aimed at the study of time-based searching procedure for satellite altimeter echo-signal. The specific character of the problem is the noise nature of received signal which is a superposition of multiple illuminated scatterers reflection. The searcher is made as a bank of parallel energy receivers. When search characteristics are calculated, the received power profile is exponentially approximated. Normalized threshold, search failure probability and search duration are quantified. Theoretical results are well corroborated with MATLAB simulation.

Key words: Satellite Altimeter, Echo Signal, Time-Search, False Alarm Probability, Correct Detection Probability

REDERENSES

1. Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M., Kolomensky Yu. A., Uljanitzky Yu. D.; ed. by Kazarinov Yu. M. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov radionavigatsionnykh sistem* [Search, Detection and Parameter Estimation for Signals of Radionavigation Systems]. Moscow, *Sov. Radio*, 1975. (In Russian)
2. Yu. M. Kazarinov. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnyk dlya vuzov* [Radio Engineering Systems]. Moscow, *Vyssshaya Shkola*, 1990. (In Russian)
3. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 1977, vol. AP-25, no. 1, pp. 67–74.
4. Hayne G. S. Radar Altimeter Mean Return Waveforms from Near-Normal-Incidence Ocean Surface Scat-
tering. *IEEE Trans. on Anten. and Prop.* 1980, vol. AP-28, no. 5, pp. 687–692.
5. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. The Space-Based Altimeter Echo-Signal with Consideration of Doppler Scattering. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 46–52. (In Russian)
6. Martin S. *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2014, 496 p.
7. Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. *Coastal Altimetry*. Heidelberg, Springer, 2011, 565 p.

Received March, 17, 2017

For citation: Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Searching for Satellite Altimeter Echo-Signal. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 4, pp. 27–32. (In Russian)

Dmitry S. Borovitsky – Ph.D. in Engineering (2016), leading research fellow of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: broadband radiolocation and radionavigation systems; signals theory.
E-mail: dmitry_nepogodin@mail.ru

Alexander E. Zhesterev – Ph.D. in Engineering (1982), chief of the department of JSC "Russian institute of radionavigation and time" (Saint Petersburg). The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: radio-location and radionavigation systems; communication theory.
E-mail: zhesterev@mail.ru

Valery P. Ipatov – D.Sc. in Engineering (1983), Professor (1985) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored scientist of the RF (2001), honorable radio-man of the USSR (1983). The author of more than 250 scientific publications. Area of expertise: radio-electronic system engineering; statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory.
E-mail: ival1941@yandex.ru

Ruslan M. Mamchur – Master of Science in Radio Engineering (2015), postgraduate student and assistant of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 3 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory; technical electrodynamics.
E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru
