



УДК 621.396.96

Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев
АО "Российский институт радионавигации и времени"
пр. Обуховской Обороны, д.120, лит. ЕЦ, Санкт-Петербург, 192012, Россия
В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

Синтез временного дискриминатора следящего контура измерения запаздывания спутникового высотомера*

Аннотация. Статья посвящена исследованию квазиоптимального временного дискриминатора бортовой системы слежения за запаздыванием эхосигнала радиовысотомера, установленного на борту космического аппарата. В современных спутниковых высотомерах итоговая обработка альтиметрических данных возлагается на наземный измерительный комплекс, получающий необходимую информацию с космического аппарата по телеметрической линии, тогда как задача бортовой петли автосопровождения состоит в долговременном надежном удержании принимаемого эхосигнала в следящем окне. Оптимальный дискриминатор петли удержания сигнала в окне обеспечивает потенциальную точность измерения времени, однако весьма сложен при реализации. В рассмотренном дискриминаторе сигнал ошибки пропорционален временному рассогласованию точки половинной мощности принимаемого профиля с положением следящего окна. В статье получено выражение для дисперсии эквивалентных флуктуаций запаздывания и установлено, что синтезированный дискриминатор сопоставим по точности слежения с дискриминаторами точки максимума принятой мощности и точки максимальной крутизны профиля. При этом дискриминатор положения точки половинной мощности существенно выигрывает у последних по требуемым аппаратным ресурсам. Результаты теоретического анализа подкреплены компьютерным моделированием. Моделирование выполнялось как собственно дискриминатора слежения за точкой половинной мощности, так и с использованием различных способов цензурирования сигнала ошибки на выходе дискриминатора для эффективной нейтрализации возможных аномальных ошибок, не учтенных теоретическим анализом.

Ключевые слова: спутниковый высотомер, временной дискриминатор, эхосигнал, дисперсия эквивалентных флуктуаций запаздывания

Для цитирования: Синтез временного дискриминатора следящего контура измерения запаздывания спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 5–11.

D. S. Borovitsky, A. E. Zhesterev
JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time"
120, Obukhovskoy Oborony Pr., bd. EC, 192012, St. Petersburg, Russia
V. P. Ipatov, R. M. Mamchur
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

Time Discriminator for Satellite Radar Altimeter Tracker System

Abstract. The article deals with the study of quasi-optimal TOA discriminator of an onboard echo-signal tracker of the altimeter carried by a space vehicle. In modern space-based altimeters, final data processing is imposed on the ground-

*Окончание. Начало в № 1 за 2018.

based center receiving information from the spacecraft through a telemetry line, while the main task of an onboard delay-locked loop is to reliably retain the received echo-signal within the tracking window. The optimum discriminator of an onboard loop providing the potential accuracy of time measurement can appear difficult to implement. In the discriminator considered an error signal is proportional to the time mismatch between the half power point of the received power pattern and the tracking window. The equation for the equivalent time fluctuation variance is derived. It is also found that the discriminator proposed is as good at tracking precision as the maximum-power-point discriminator and maximum-steepness discriminator, being at the same time much more attractive in terms of hardware complexity. The theoretical results are well consistent with the computer simulation. This simulation is performed both directly and using different methods of censoring the error signal at the discriminator output to effectively neutralize possible abnormal errors that are not taken into account by theoretical analysis.

Key words: space-based altimeter, time discriminator, echo-signal, equivalent time fluctuation variance

For citation: Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Time Discriminator for Satellite Radar Altimeter Tracker System. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 2, pp. 5–11. (In Russian)

Введение. Спутниковый радиовысотомер (альтиметр) является основным элементом космических аппаратов, функционирующих в составе комплексов дистанционного зондирования Земли [1], [2]. В современных высотомерах космического базирования финальная ("чистовая") обработка результатов альтиметрических измерений выполняется наземным сегментом, тогда как главной задачей оборудования на борту спутника является надежное удержание принимаемого эхосигнала в следящем окне контура автосопровождения. При таком построении системы измерений использование на борту оптимального временного дискриминатора (ВД) системы слежения за запаздыванием оказывается чрезмерно затратным в аппаратном отношении, что актуализирует поиск квазиоптимальных структур, сочетающих требуемую точность и устойчивость слежения с приемлемой реализационной сложностью. В развитии известных публикаций по этой тематике [3]–[10] авторами в [11] предложено несколько вариантов построения подобных дискриминаторов. Настоящая статья продолжает и завершает изложение результатов исследований авторов в этом направлении, начатое в [11].

Дискриминатор слежения за точкой половинной мощности. В дополнение к ВД точки максимума и точки максимальной крутизны профиля принимаемой мощности, проанализированным в [11], рассмотрим дискриминатор, сигнал ошибки в котором пропорционален временному рассогласованию между центром (или иной фиксированной точкой) следящего окна и моментом $t_{0.5}$ пересечения принимаемым наблюдением $y(t)$ уровня $P_{\max}/2$, где P_{\max} – максимальное значение мгновенной мощности принятого сигнала: $y^2(t_{0.5}) = P_{\max}/2$.

Пусть $\bar{t}_{0.5}$ – момент достижения усредненным нормированным профилем мощности эхосигнала своего половинного уровня: $\varphi(\bar{t}_{0.5}) = \varphi_{\max}/2$.

Согласно [11]

$$\varphi(t) = \Phi \left[2\sqrt{\beta} \left(t - \frac{\alpha}{4\beta} \right) \right] \exp \left[-\alpha \left(t - \frac{\alpha}{8\beta} \right) \right], \quad (1)$$

где $\Phi[\cdot]$ – интеграл вероятности, причем β – параметр, характеризующий длительность сжатого гауссовского зондирующего импульса; $\alpha = 4c/(\gamma h)$ (c – скорость света; γ – показатель остроты луча гауссовской диаграммы направленности антенны $G(\theta) = \exp(-2 \sin^2 \theta/\gamma)$; h – высота орбиты спутника).

При достаточном уровне полезного сигнала отклонение $t_{0.5}$ от $\bar{t}_{0.5}$ можно оценить как (рис. 1)

$$\bar{t}_{0.5} - t_{0.5} \approx \frac{y^2(\bar{t}_{0.5}) - P_{\max}/2}{S}, \quad (2)$$

где

$$S = \left. \frac{d}{dt} y^2(t) \right|_{t=\bar{t}_{0.5}} = 2\sigma_n^2 \varphi'(\bar{t}_{0.5}) \quad (3)$$

– средняя крутизна наклона функции $y^2(t)$ в точке $t = t_{0.5}$, причем σ_n^2 – дисперсия шума на выходе фильтра, согласованного с зондирующим сигналом.

Пренебрегая зависимостью флюктуаций $y^2(\bar{t}_{0.5})$ от P_{\max} , оценим дисперсию отклонения $t_{0.5}$ от $\bar{t}_{0.5}$ через дисперсии слагаемых числителя (2):

$$\overline{(\bar{t}_{0.5} - t_{0.5})^2} \approx \frac{\text{var}\{y^2(\bar{t}_{0.5})\} + \text{var}\{P_{\max}\}/4}{S^2}. \quad (4)$$

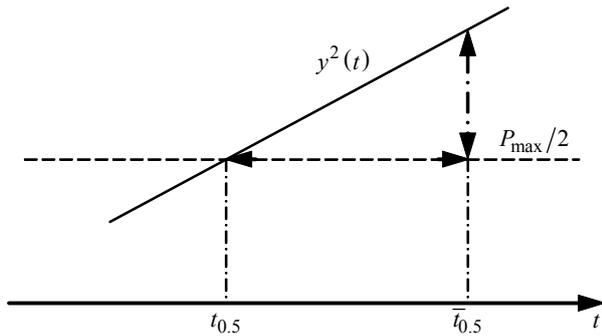


Рис. 1

Поскольку дисперсия квадрата огибающей гауссовского шума равна учетверенной четвертой степени дисперсии шума [12], имеем

$$\begin{aligned} \text{var}\{y^2(\bar{t}_{0.5})\} &= 4\sigma_n^4 [1 + Q\varphi(\bar{t}_{0.5})]^2; \\ \text{var}\{P_{\max}\} &\approx 4\sigma_n^4 [1 + Q\varphi_{\max}]^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где Q – отношение мощностей сигнала и шума. Приближение в (5) связано с возможными флуктуациями точки максимума случайного профиля относительно момента максимума функции $\varphi(t)$.

Подставив (5) и (3) в (4), получим:

$$\begin{aligned} \sigma_\tau^2 &= \overline{(\bar{t}_{0.5} - t_{0.5})^2} \approx \\ &\approx \frac{[1 + Q\varphi(\bar{t}_{0.5})]^2 + [1 + Q\varphi_{\max}]^2 / 4}{[Q\varphi'(\bar{t}_{0.5})]^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

С ростом Q найденная дисперсия стремится к нижнему пределу

$$\sigma_\tau^2 \rightarrow \sigma_{\tau\infty}^2 = \frac{\varphi^2(\bar{t}_{0.5}) + \varphi_{\max}^2 / 4}{[\varphi'(\bar{t}_{0.5})]^2}. \quad (7)$$

Предельные значения среднеквадратической ошибки оценки запаздывания $\sigma_{\tau\infty}$ рассматриваемым дискриминатором, рассчитанные согласно (7) с использованием соотношения (1) и его производной

$$\begin{aligned} \varphi'(t) &= \left\{ \sqrt{\frac{2\beta}{\pi}} \exp\left[-2\beta\left(t - \frac{\alpha}{4\beta}\right)^2\right] - \right. \\ &\left. - \alpha\Phi\left[2\sqrt{\beta}\left(t - \frac{\alpha}{4\beta}\right)\right] \right\} \exp\left[-\alpha\left(t - \frac{\alpha}{8\beta}\right)\right] \end{aligned}$$

для трех значений полосы сигнала W приведены в таблице.

W , МГц	200	320	500
$\sigma_{\tau\infty}$, нс	3.200	2.025	1.307

Зависимость (6) дисперсии эквивалентных флуктуаций запаздывания от параметра Q для

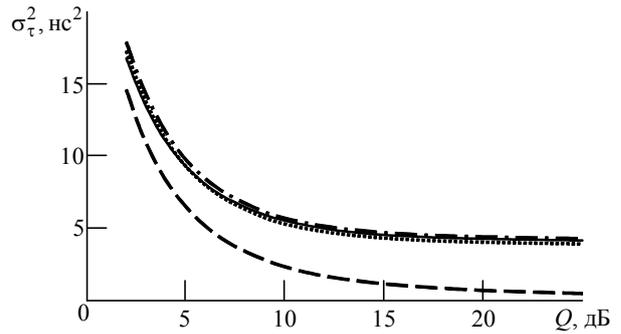


Рис. 2

$W = 320$ МГц приведена на рис. 2 (сплошная линия) вместе с подобными кривыми для оптимального (штриховая линия) и двух квазиоптимальных ВД из [11]: слежения за точкой максимума принимаемой мощности (пунктирная линия) и слежения за точкой максимальной крутизны (штрихпунктирная линия). Как видно, дискриминатор слежения за точкой половинной мощности по точности измерения запаздывания равноценен последним двум ВД. В то же время он максимально прост и, кроме того, не требует адаптации к скорости нарастания переднего фронта профиля, критически зависящей от степени взволнованности морской поверхности. Если, соглашаясь с [13], считать основной задачей бортового контура слежения за задержкой надежное удержание принимаемого профиля в следящем окне, предпочтение последнего из рассмотренных дискриминаторов остальным представляется вполне обоснованным. Это позволяет признать дискриминатор слежения за точкой половинной мощности наиболее подходящим для построения бортовой петли автосопровождения профиля принимаемой мощности эхосигнала.

Результаты моделирования. В качестве объекта детального компьютерного эксперимента выберем последнюю из рассмотренных структур, т. е. ВД слежения за точкой половинной мощности. Моделирование осуществлялось в среде Matlab. Генерирование реализаций принятого профиля мощности выполнял m-код, написанный в ходе разработки компьютерной модели отраженного сигнала спутникового радиовысотомера [14]. Сигнал ошибки формировался по накоплению откликов на N зондирований. Зона задержек, охватываемая $n_c = 64$ корреляторами, иначе говоря, протяженность окна слежения, соответствовала неопределенности, остающейся после поиска, т. е. примерно $T_a/n_c \approx 21$ нс, где T_a – априорный интервал возможных запаздыва-

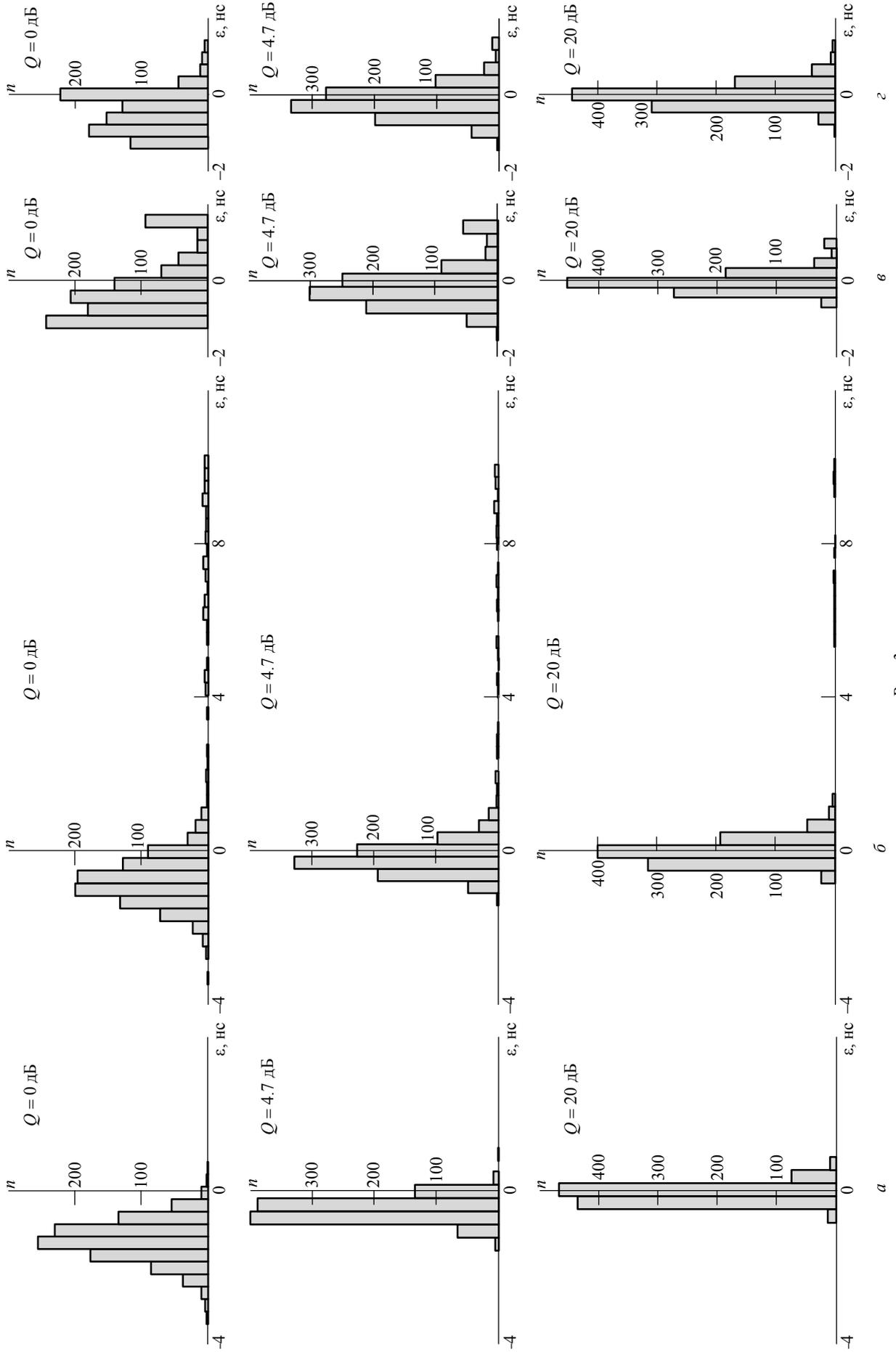
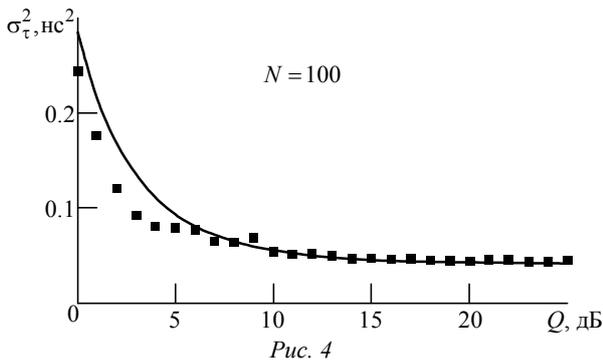
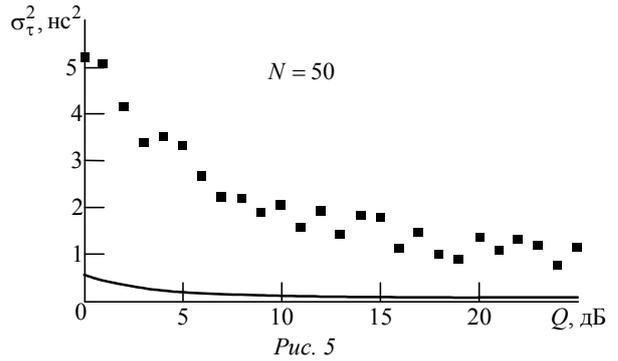


Рис. 3

ний сигнала [15]. За ошибку принималось расстояние от точки пересечения нарастающим профилем уровня половинной мощности до центра отрезка между положением 32-го и 33-го стробов (т. е. опор соответствующих корреляторов в окне слежения). Набор статистики ошибки дискриминирования выполнялся по результатам $N_t = 1000$ тестов. На рис. 3, а приведены результаты моделирования в виде гистограмм ошибки ϵ , пересчитанной ко входу дискриминатора для сигнала с полосой $W = 320$ МГц при трех значениях параметра, учитывающего входное отношение "сигнал/шум": $Q = 0, 4.7$ и 20 дБ и числе накапливаемых откликов $N = 100$. Экспериментальная (рис. 4, маркеры) и теоретическая (кривая) зависимости дисперсии ошибки дискриминирования от интенсивности сигнала Q для тех же W и N демонстрируют очень хорошее совпадение опытных и прогнозных данных, по крайней мере для $Q \geq 5$ дБ.

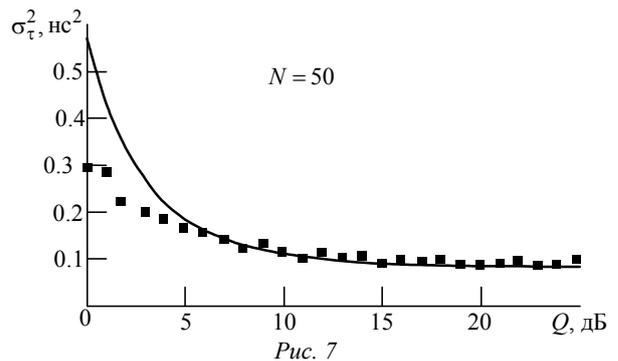
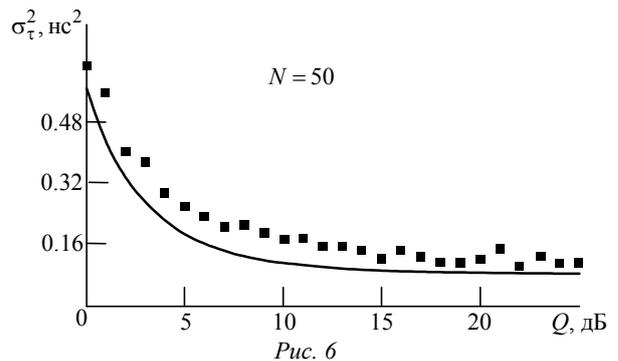


При фиксированном периоде зондирования завышенное число накапливаемых откликов N снижает предельную скорость, обрабатываемую цифровым контуром слежения за запаздыванием. В этом плане полезно выяснить, как ведет себя дискриминатор с уменьшением значения N . На рис. 3, б представлены гистограммы ошибки дискриминирования для $N = 50$ и прежних значений Q . Как можно видеть, при уменьшенном N отчетливо проявляется влияние аномальных ошибок дискриминирования, не учтенных теоретическим анализом в линеаризованном приближении. Дело в том, что из-за шума и собственных флуктуаций сигнала истинный нарастающий фронт усредненного профиля может быть подавлен в текущем наблюдении, что приведет к смещению точки половинной мощности вправо. Именно это и отражается гистограммами рис. 3, б, имеющими протяженный правый "хвост". Всплески же слева от основного тела гистограммы значительно менее вероятны, так как для



их появления шумовой выброс на временном отрезке, предшествующем отраженному сигналу, должен превысить максимальный пик смеси сигнала и шума. В итоге экспериментальная зависимость дисперсии ошибки дискриминирования от Q при $N = 50$ (рис. 5, маркеры) лежит значительно выше теоретической (кривая), что потенциально существенно снизит точность автосопровождения.

Эффективным средством нейтрализации аномалий оказывается цензурирование сигнала ошибки на выходе дискриминатора. При моделировании были протестированы два варианта подобной обработки: с ограничением сигнала ошибки и отбрасыванием сигнала ошибки, превысившего порог. В первом случае сигнал ошибки ϵ , сохраняя знак, ограничивался по абсолютной величине половинной длительности зондирующего сигнала по уровню половинной мощности $\Delta_{0.5}/2$. Гистограммы ошибок дискриминирования, соответ-



ствующие этому варианту, показаны на рис. 3, в, а кривые дисперсии ошибки дискриминирования в зависимости от Q – на рис. 6, свидетельствующем о заметном сближении экспериментальной (маркеры) и теоретической (кривая) зависимостей в сравнении с отсутствием цензурирования.

Во втором варианте цензурирования сигнал ошибки, превысивший порог $\Delta_{0,5}/2$, заменялся нулевым. Соответствующие гистограммы даны на рис. 3, г, а зависимости дисперсии ошибки дискриминирования от Q – на рис. 7. Как следует из указанных рисунков, при отбрасывании anomalously больших измерений машинный эксперимент (рис. 7, маркеры) дает результаты, практиче-

ски неотличимые от предсказанных теорией (кривая). Тем самым, по крайней мере для режима установившегося слежения, вариант цензурирования с обнулением anomalously большого сигнала ошибки можно считать предпочтительным.

Выводы. В настоящей статье проанализирован ВД слежения за точкой половинной мощности в составе бортового контура измерения запаздывания спутникового высотомера. Как установлено в ходе теоретического исследования и подтверждено компьютерным моделированием, подобный ВД не уступает в точности альтернативным квазиоптимальным структурам, рассмотренным в [11], выгодно отличаться от последних в плане реализационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / ed. by L.-L. Fu and A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. 463 p.
2. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 496 p.
3. Баскаков А. И. Точностные характеристики космического радиотехнического комплекса дистанционного зондирования для восстановления рельефа поверхности Земли: дис. ... д-ра техн. наук / МГТУГА. М., 1997. 461 с.
4. Морозов К. Н. Исследование влияния состояния поверхности акваторий на точностные характеристики прецизионного высотомера космического базирования: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ (ТУ). М., 2000. 201 с.
5. Терехов В. А. Радиолокационные методы определения степени взволнованности морской поверхности с борта ИСЗ: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ (ТУ). М., 2011. 228 с.
6. Wingham D. J., Rapley C. G., Griffiths H. New techniques in satellite altimeter tracking systems // Proc. of IGARSS'86 Symp., Zurich, 8–11 Sept. 1986. P. 1339–1344.
7. Deng X., Featherstone W. E. A Coastal Retracking System for Satellite Radar Altimeter Waveforms: Application to ERS-2 Around Australia // J. of Geophysical Research. 2006. Vol. 111. C06012 (1–16).
8. Bao L., Lu Y., Wang Y. Improved Retracking Algorithm for Oceanic Altimeter Waveforms // Progress in Natural Science. 2009. Vol. 19, iss. 2. P. 195–203.
9. Davis C. H. A Robust Threshold Retracking Algorithm for Measuring Ice-Sheet Surface Elevation Change From Satellite Radar Altimeters // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 1997. Vol. 35, № 4. P. 974–979.
10. Rodriguez E. Altimetry for Non-Gaussian Oceans: Height Biases and Estimation of Parameters // J. of Geophysical Research. 1988. Vol. 93, № C11. P. 14107–14120.
11. Синтез временного дискриминатора следящего контура измерения запаздывания спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 5–12.
12. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
13. Poseidon-3 radar altimeter: new modes and in-flight performances / J. D. Desjonquères, G. Carayon, N. Steunou, J. Lambin // Marine Geodesy. 2010. Vol. 33. P. 53–79.
14. Компьютерная модель отраженного сигнала спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 12–19.
15. 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.

Статья поступила в редакцию 05 мая 2017 г.

Боровицкий Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук (2016), ведущий научный сотрудник АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор 20 научных публикаций. Сфера научных интересов – широкополосные системы радиолокации и радионавигации; теория сигналов. E-mail: dmitry_nepogodin@mail.ru

Жестерев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук (1982), начальник отдела АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор 30 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 300 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 технологий по направлению "Радиотехника" (2015), аспирант и ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 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

REFERENCES

1. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications; ed. by L.-L. Fu and A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001, 463 p.
2. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 496 p.
3. Baskakov A. I. *Tochnostnye kharakteristiki kosmicheskogo radiotekhnicheskogo kompleksa distantsionnogo zondirovaniya dlya vosstanovleniya reliefa poverkhnosti Zemli* [Precision Characteristics of the Space Radio-Technical Complex of Remote Sensing for Restoration of the Earth's Surface Relief: diss. D.Sc.]. Moscow, 1997, 461 p. (In Russian)
4. Morozov K. N. *Issledovanie vliyaniya sostoyaniya poverkhnosti akvatorii na tochnostnye kharakteristiki pretsizionnogo vysotomera kosmicheskogo bazirovaniya* [Investigation of the Influence of the State of the Surface of the Water Areas on the Accuracy Characteristics of a Precision Altimeter of Space Basing: diss. Ph.D.]. Moscow, 2000, 201 p. (In Russian)
5. Terekhov V. A. *Radiolokatsionnye metody opredeleniya stepeni vzvolnovannosti morskoi poverkhnosti s borta ISZ* [Radar Methods for Determining the Degree of Agitation of the Sea Surface from the Board of an Artificial Satellite: diss. Ph.D.]. Moscow, 2011, 228 p. (In Russian)
6. Ingham D. J., Rapley C. G., Griffiths H. New techniques in satellite altimeter tracking systems // Proc. of IGARSS'86 Symp., Zurich, 8–11 Sept., 1986, pp. 1339–1344.
7. Deng X., Featherstone W. E. A Coastal Retracking System for Satellite Radar Altimeter Waveforms: Application to ERS-2 Around Australia. J. of Geophysical Research. 2006, vol. 111, C06012 (1–16).
8. Bao L., Lu Y., Wang Y. Improved Retracking Algorithm for Oceanic Altimeter Waveforms. Progress in Natural Science. 2009, vol. 19, iss. 2, pp. 195–203.
9. Davis C. H. A Robust Threshold Retracking Algorithm for Measuring Ice-Sheet Surface Elevation Change From Satellite Radar Altimeters. IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 1997, vol. 35, no. 4, pp. 974–979.
10. Rodriguez E. Altimetry for Non-Gaussian Oceans: Height Biases and Estimation of Parameters. J. of Geophysical Research. 1988, vol. 93, no. C11, pp. 14107–14120.
11. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Time Discriminator for Satellite Radar Altimeter Tracker System. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 1, pp. 5–12. (In Russian)
12. Levin B. R. Theory of statistical radioengineering. Moscow: *Radio i Svyaz'*, 1989, 656 p. (In Russian)
13. Desjonquères J. D., Carayon G., Steunou N., Lambin J. Poseidon-3 radar altimeter: new modes and in-flight performances. Marine Geodesy. 2010, vol. 33, pp. 53–79.
14. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Space-Based Altimeter Backscatter Waveform Software Model. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 5, pp. 12–19. (In Russian)
15. 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)

Received May, 05, 2017

Dmitry S. Borovitsky – Ph.D. in Engineering (2016), leading research fellow of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: broadband radiolocation and radionavigation systems; signal 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 30 scientific publications. Area of expertise: radiolocation 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 radioman of the USSR (1983). The author of more than 300 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 10 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory; technical electrodynamics.

E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru