



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, Россия, 192012

В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

Синтез временного дискриминатора следящего контура измерения запаздывания спутникового высотомера*

Аннотация. Проведен синтез оптимального временного дискриминатора системы слежения за запаздыванием сигнала бортового приемника спутникового радиовысотомера. За основу принята упрощенная модель эхосигнала, с необходимой адекватностью отвечающая режиму удержания сигнала в следящем окне приемника. Наряду с оптимальным предложены квазиоптимальные дискриминаторы точки максимума принимаемой мощности и точки максимальной крутизны. Рассчитаны дискриминационные характеристики рассмотренных структур; показано, что квазиоптимальные дискриминаторы примерно в 2.5 раза уступают оптимальному в размахе эквивалентных флуктуаций запаздывания, что можно считать умеренной ценой достигнутых упрощений в реализации дискриминатора.

Ключевые слова: спутниковый высотомер, временной дискриминатор, система слежения за задержкой, дискриминационная характеристика

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. № 1. С. 5–12.

D. S. Borovitsky, A. E. Zhesterev
JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time"
120, Obukhovskoy Oborony Pr., bld 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 considers the design of optimum time discriminator for onboard delay-lock loop of a space-based radar altimeter. The basic signal model is simplified remaining however adequate enough to the task of keeping echo-signal within the tracking receiver window. Along with the optimal one the quasi-optimal maximum-point and maximal-steepness-point discriminators are proposed. The discriminator curves of all considered structures are calculated. It is shown that the quasi-optimal discrimination yield about 2.5 times to the optimal one in the equivalent time fluctuations. Such a loss can be considered a tolerable cost of achieved hardware simplicity.

Key words: Satellite Altimeter, Time Discriminator, Delay-Lock Loop, Discriminator Curve

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. 1, pp. 5–12. (In Russian)

* Начало. Окончание в № 2. To be continued in the next issue.

Введение. Спутниковый радиовысотомер (альтиметр) представляет собой радиолокационный прибор, оценивающий высоту космического аппарата над водной поверхностью или сушей по запаздыванию отраженного сигнала относительно зондирующего. Наряду с запаздыванием в параметрах отраженного сигнала содержится информация о степени взволнованности освещаемой поверхности, ее отражающих свойствах и др.

Финальная обработка альтиметрических данных в современных мониторинговых миссиях достаточно сложна и охватывает длительные периоды, в силу чего ее выполнение в основном возлагается на наземный измерительный комплекс [1]. При этом за самим бортовым высотомером закрепляются функции поиска и устойчивого удержания принимаемого эхосигнала в следящем окне петли автосопровождения по запаздыванию.

Ключевым элементом указанной петли служит дискриминатор, преобразующий временное рассогласование между принятым сигналом и местным следящим окном в сигнал ошибки, управляющий задержкой упомянутого окна. Алгоритмам временного дискриминирования в спутниковых альтиметрах посвящено немало публикаций [2]–[6], в дополнение к которым предлагаемая статья содержит синтез оптимального и квазиоптимальных дискриминаторов на основе упрощенной модели эхосигнала, с необходимой адекватностью отвечающей отмеченным ранее задачам бортового сегмента высотомера.

Оптимальный дискриминатор. Как уже отмечено, основная роль системы слежения за запаздыванием в бортовом приемнике спутникового высотомера состоит в надежном удержании переднего фронта отраженного сигнала в пределах следящего окна. Далее измеренные отклонения временного положения принятого сигнала от середины (или иной наперед заданной точки) окна совместно с полученными отсчетами усредненно-го эхосигнала могут быть переданы на Землю для "чистового" многомерного сглаживания, введения поправок, устраняющих систематические ошибки, и, наконец, выработки оценок измеряемых параметров: высоты, значимой высоты волны, удельной отражающей поверхности и пр.

Следящий измеритель формирует оценку $\hat{\tau}$ максимального правдоподобия запаздывания сигнала τ , рекуррентно решая уравнение правдоподобия

$$\left. \frac{d \ln \Omega(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=\hat{\tau}} = 0, \quad (1)$$

где $\Omega(\tau)$ – функция правдоподобия.

В ходе описанной процедуры временной дискриминатор по истечении заданного числа зондирований N вырабатывает сигнал ошибки, т. е. рассогласования текущей оценки $\hat{\tau}$, выданной контуром слежения, с истинным запаздыванием τ . Через петлю обратной связи сглаженный сигнал ошибки корректирует оценку $\hat{\tau}$ для уменьшения рассогласования, после чего по итогам следующих N зондирований формируется обновленный сигнал ошибки. Процедура выполняется постоянно в процессе слежения.

Воспользуемся общепринятой [7]–[9] гауссовской аппроксимацией сжатого зондирующего сигнала $s(t) = \exp(-\beta t^2)$, где $\beta = (2 \ln 2) / \Delta_{0.5}^2$, а $\Delta_{0.5}$ – длительность импульса по уровню половинной мощности. В [10] получено выражение для решающей статистики $z(\Lambda)$, достаточной для оценки вектора информационных параметров $\Lambda = (\tau, \nu, Q)$, где ν – растяжение гауссовского импульса из-за волнения моря; Q – параметр, характеризующий отношение "сигнал/шум" принятого сигнала [10]:

$$z(\Lambda) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{Q\varphi(k\delta; \tau, \nu) y_i^2(k\delta)}{1 + Q\varphi(k\delta; \tau, \nu)} - N \sum_{k=0}^{n-1} \ln[1 + Q\varphi(k\delta; \tau, \nu)], \quad (2)$$

где σ_n^2 – дисперсия шума на выходе фильтра, согласованного с зондирующим сигналом; n – число обрабатываемых отсчетов на каждом зондировании; $\varphi(k\delta; \tau, \nu)$ – функция, описывающая профиль мощности отраженного сигнала при точном нацеливании луча антенны в надир [10]; $\delta = 1/W$ – интервал дискретизации Найквиста (W – полоса сигнала); $y_i(k\delta)$ – огибающая принимаемого сигнала на i -м зондировании.

Функция $\varphi(k\delta; \tau, \nu)$ задается соотношением

$$\varphi(k\delta; \tau, \nu) = \Phi \left[2\sqrt{\beta\nu} \left(k\delta - \tau - \frac{\alpha}{4\beta\nu} \right) \right] \times \exp \left[-\alpha \left(k\delta - \tau - \frac{\alpha}{8\beta\nu} \right) \right],$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-z^2/2) dz$ – интеграл вероятности; $\alpha = 4c/(\gamma h)$, причем c – скорость света;

γ – показатель остроты луча гауссовской диаграммы направленности антенны

$$G(\theta) = \exp\left[-(2/\gamma)\sin^2 \theta\right];$$

h – высота орбиты спутника.

В настоящей статье дискриминаторы рассмотрены в предположении детерминированности высоты волны ($v=1$) и параметра Q . Тогда анализ (2) показывает, что логарифм функции правдоподобия в (1) имеет вид

$$\ln \Omega(\tau) = z(\tau) = \frac{W}{2\sigma_n^2} \sum_{i=0}^{N-1} \int_0^T \frac{Q\varphi(t-\tau) y_i^2(t)}{1+Q\varphi(t-\tau)} dt - \\ - NW \int_0^T \ln[1+Q\varphi(t-\tau)] dt, \quad (3)$$

где T – время наблюдения для отдельного зондирования, а

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

Представим (3) как

$$z(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} z_i(\tau),$$

где

$$z_i(\tau) = W \left\{ \frac{1}{2\sigma_n^2} \int_0^T \frac{Q\varphi(t-\tau) y_i^2(t)}{1+Q\varphi(t-\tau)} dt - \right. \\ \left. - \int_0^T \ln[1+Q\varphi(t-\tau)] dt \right\} \quad (5)$$

– логарифм функции правдоподобия для i -го зондирования. Продифференцировав (5) по запаздыванию τ , имеем:

$$dz_i(\tau)/d\tau = \\ = W \int_0^T \frac{Q\varphi'(t-\tau)}{[1+Q\varphi(t-\tau)]^2} \left[1+Q\varphi(t-\tau) - \frac{y_i^2(t)}{2\sigma_n^2} \right] dt.$$

Полученное выражение задает алгоритм работы оптимального временного дискриминатора, опорный сигнал (ОС) которого содержит два компонента:

$$r_1(t) = \frac{Q\varphi'(t)}{[1+Q\varphi(t)]^2}, \quad r_2(t) = 1+Q\varphi(t).$$

При начальном временном сдвиге ОС τ дискриминатор по получении наблюдения $y_i^2(t)$ интегрирует произведение

$$[r_2(t-\tau) - y_i^2(t)] r_1(t-\tau).$$

Полученный сигнал ошибки

$$e(\tau) = \\ = W \int_0^T \frac{Q\varphi'(t-\tau)}{[1+Q\varphi(t-\tau)]^2} \left[1+Q\varphi(t-\tau) - \frac{y_i^2(t)}{2\sigma_n^2} \right] dt \quad (6)$$

накапливается по N зондированиям и по петле обратной связи следящего контура корректирует сдвиг ОС τ в сторону уменьшения абсолютного значения ожидаемого сигнала ошибки с выхода дискриминатора.

Под дискриминационной кривой (или характеристикой) понимается зависимость усредненного сигнала ошибки от рассогласования $\varepsilon = \tau_0 - \tau$ между сдвигом ОС τ и истинным запаздыванием профиля принятой мощности τ_0 :

$$\overline{e(\varepsilon)} = \overline{dz_i(\tau)/d\tau}.$$

Как следует из (6), эта кривая описывается следующим выражением:

$$\overline{e(\varepsilon)} = \\ = WQ^2 \int_0^T \frac{\varphi'(t-\tau)}{[1+Q\varphi(t-\tau)]^2} [\varphi(t-\tau) - \varphi(t-\tau_0)] dt.$$

Распространив интегрирование на всю временную ось, получим:

$$\overline{e(\varepsilon)} = WQ^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi'(t)[\varphi(t) - \varphi(t-\varepsilon)]}{[1+Q\varphi(t)]^2} dt. \quad (7)$$

Для расчета дискриминационной кривой следует в (7) подставить (4) и его производную по времени:

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

На рис. 1 приведены полученные по (7) нормированные дискриминационные характеристики $\overline{e(\varepsilon)}/(WQ^2)$ для полосы сигнала $W = 320$ МГц и трех значений параметра Q^1 .

Расчет шумовой ошибки петли слежения за задержкой можно было бы выполнить в традици-

¹ Представленные в настоящей статье зависимости получены для высоты орбиты спутника $h = 1000$ км и показателя остроты луча антенны γ , обеспечивающего его ширину по уровню половинной мощности 0.6° .

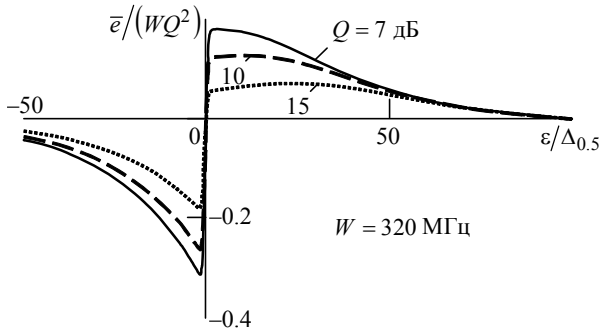


Рис. 1

онном линейном приближении, вычислив вначале дисперсию приведенных ко входу дискриминатора виртуальных флюктуаций запаздывания принимаемого сигнала [11], [12]:

$$\sigma_{\tau}^2 = \sigma_e^2 / S_d^2, \quad (9)$$

где σ_e – среднеквадратическое отклонение флюктуаций на выходе дискриминатора;

$$S_d = \left. \frac{d\bar{e}(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} \quad (10)$$

– крутизна дискриминационной характеристики при нулевом временном рассогласовании сигнала и ОС.

Дисперсия σ_{τ}^2 (9) позволила бы найти спектральную плотность виртуальных флюктуаций запаздывания вблизи нуля, умножение которой на эквивалентную шумовую полосу замкнутой петли дало бы искомую дисперсию шума на выходе контура слежения за запаздыванием. Однако для рассмотренного дискриминатора выкладки по (9) избыточны, так как в силу оптимальности реализуемой процедуры дисперсия σ_{τ}^2 совпадает с границей Крамера–Рао [10], при $N = 1$ имеющей вид

$$\sigma_{\tau}^2 \approx \frac{1}{WQ^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\varphi'(t)}{1 + Q\varphi(t)} \right]^2 dt}.$$

Описанная структура дискриминатора, обеспечивая потенциальную точность измерения времени, требует весьма значительных затрат на реализацию, что особенно существенно для бортового приемника альтиметра. Как уже отмечалось, построение последних разработок (типа "Poseidon-3" [1]) предполагает, что "чистовая" обработка данных альтиметра осуществляется на Земле, так что задачей бортового следящего контура является лишь надежное удержание профиля принятой мощности в окне слежения по времени. Это позволяет смягчить требования к дискриминатору

бортового приемника в обмен на реализационные упрощения. Следуя этой линии, обратимся к возможным квазиоптимальным решениям.

Дискриминатор слежения за максимумом профиля мощности. На рис. 2 представлен усредненный профиль принятой мощности, нормированный к максимальному значению, для трех значений полосы сигнала [13].

В качестве первой из возможных альтернатив рассмотрим дискриминатор петли, следящей за временным положением максимума профиля принятой мощности. Местным ОС $r(t)$ в подобном дискриминаторе может служить производная функции (4), определяемая (8): $r(t) = \varphi'(t)$.

Подобный ОС (рис. 3) имеет резкий всплеск, соответствующий быстро нарастающему фронту на рис. 2, а затем – после смены полярности – плавно стремится к нулю, отражая медленный спад профиля принятой мощности.

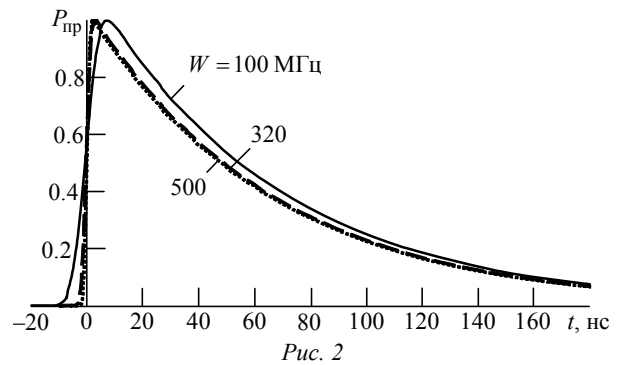


Рис. 2

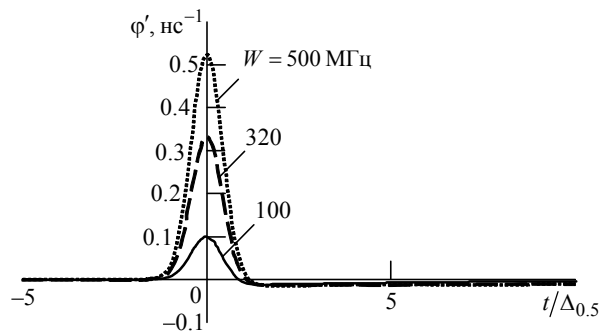


Рис. 3

При начальном сдвиге ОС τ сигнал ошибки получается интегрированием произведения колебания с выхода квадратичного детектора $y^2(t)$ с ОС $r(t - \tau)$:

$$e(\tau) = \int_0^T y^2(t) \varphi'(t - \tau) dt. \quad (11)$$

Распространив интегрирование на всю ось времени и усреднив $e(\tau)$, получим описание дискриминационной кривой в следующем виде:

$$\begin{aligned}\overline{e(\varepsilon)} &= 2\sigma_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} [1 + Q\varphi(t - \varepsilon)] \varphi'(t) dt = \\ &= 2\sigma_n^2 Q \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t - \varepsilon) \varphi'(t) dt.\end{aligned}\quad (12)$$

Нормированные дискриминационные кривые рассматриваемого дискриминатора $\overline{e(\varepsilon)}/(2\sigma_n^2 Q)$ для трех значений полосы сигнала приведены на рис. 4.

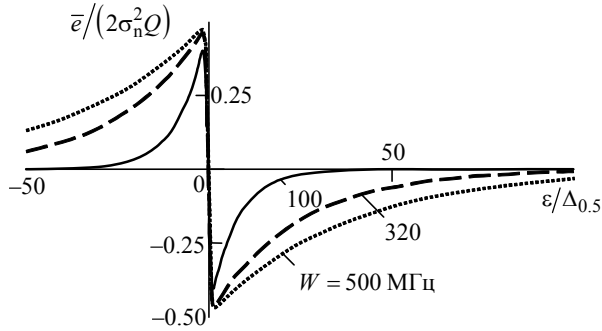


Рис. 4

Крутизна дискриминационной характеристики (12) в соответствии с (10) определяется как

$$S_d = -2\sigma_n^2 Q \int_{-\infty}^{\infty} [\varphi'(t)]^2 dt. \quad (13)$$

Для определения дисперсии σ_e^2 сигнала ошибки на выходе дискриминатора запишем (11) согласно теореме отсчетов (Котельникова):

$$\begin{aligned}e(0) &= \int_0^T y^2(t) \varphi'(t) dt = \\ &= \frac{1}{W} \sum_i y^2(i\delta) \varphi'(i\delta), \quad \delta = 1/W,\end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}\sigma_e^2 &= \overline{e^2(0)} - [\overline{e(0)}]^2 = \\ &= \frac{1}{W^2} \left\{ \sum_i \sum_k \left[\overline{y^2(i\delta) y^2(k\delta)} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \overline{y^2(i\delta) y^2(k\delta)} \right] \varphi'(i\delta) \varphi'(k\delta) \right\}.\end{aligned}\quad (14)$$

Выражение в квадратной скобке в двойной сумме представляет собой автокорреляционную функцию процесса на выходе квадратичного детектора. Считая отсчеты квадрата огибающей некоррелированными, имеем [14]:

$$\begin{aligned}\overline{y^2(i\delta) y^2(k\delta)} - \overline{y^2(i\delta) y^2(k\delta)} &= \\ &= 4\sigma_n^4 [1 + Q\varphi(t)]^2 \delta_{ik},\end{aligned}\quad (15)$$

где

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, & i = k, \\ 0, & i \neq k \end{cases}$$

– дискретная дельта-функция (символ Кронекера).

Подставив (15) в (14) и вернувшись к интегралу, получим:

$$\sigma_e^2 = \frac{4\sigma_n^4}{W} \int_{-\infty}^{\infty} \{[1 + Q\varphi(t)] \varphi'(t)\}^2 dt.$$

Тогда из (9) и (13) имеем

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{WQ^2} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{[1 + Q\varphi(t)] \varphi'(t)\}^2 dt}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} [\varphi'(t)]^2 dt \right\}^2}.$$

На рис. 5 приведены зависимости σ_τ^2 от значения Q для рассмотренных типов дискриминаторов при $W = 320$ МГц. Как видно, проигрыш в точности дискриминатора слежения за максимумом профиля (кривая 2) оптимальному дискриминатору (кривая 1) с ростом Q становится весьма заметным. Так, при $Q = 20$ дБ средне-квадратическое значение эквивалентных флуктуаций запаздывания для первого из них примерно в 2.5 раза больше, чем для второго.

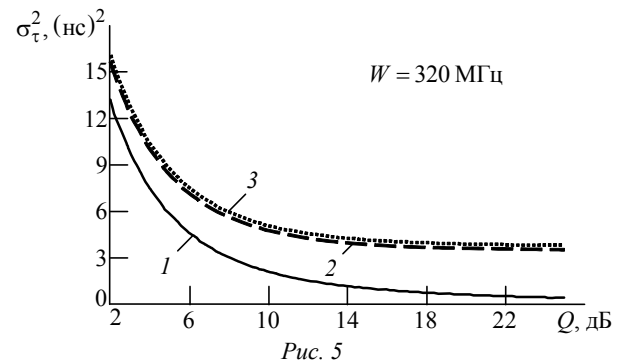
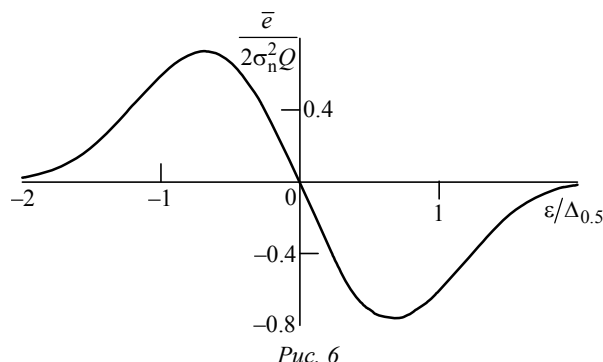


Рис. 5

Дискриминатор слежения за точкой максимальной крутизны профиля. Природа формирования принятого импульсно-ограниченным альтиметром отраженного сигнала [8] таков, что основную информацию о запаздывании приходящего сигнала содержит в себе временное положение нарастающего фронта профиля принятой мощности (рис. 2). В точке максимальной крутизны этого фронта вторая производная меняет знак с положительного на отрицательный, что можно использовать для дискриминирования временного положения приходящего сигнала.



Дискретно аппроксимируя вторую производную наблюдения $y^2(t)$, возьмем три последовательных отсчета этой функции, разделенных временными промежутками $\delta = 1/W$, и сформируем сигнал ошибки:

$$e(\varepsilon) = y^2(\varepsilon - \delta) + y^2(\varepsilon + \delta) - 2y^2(\varepsilon). \quad (16)$$

В этом случае формируемый в альтиметре ОС представляет собой тройку селектирующих импульсов.

Усреднение (16) определяет дискриминационную характеристику

$$\overline{e(\varepsilon)} = 2\sigma_n^2 Q[\varphi(\varepsilon - \delta) + \varphi(\varepsilon + \delta) - 2\varphi(\varepsilon)]. \quad (17)$$

Кривая (17), рассчитанная с помощью (4) для случая $W = 320$ МГц, показана на рис. 6. Ее крутизна в точке $\varepsilon = 0$

$$S_d = 2\sigma_n^2 Q[\varphi'(-\delta) + \varphi'(\delta) - 2\varphi'(0)].$$

С учетом некоррелированности отсчетов наблюдения, отстоящих на δ , для дисперсии флюктуаций сигнала ошибки из (16) имеем:

$$\sigma_e^2 = 4\sigma_n^4 \{ [1 + Q\varphi(-\delta)]^2 + [1 + Q\varphi(\delta)]^2 + 4[1 + Q\varphi(0)]^2 \}.$$

Тогда дисперсия эквивалентных флюктуаций запаздывания на входе дискриминатора определяется следующим образом:

$$\sigma_\tau^2 = \sigma_e^2 / S_d^2 = \frac{[1 + Q\varphi(-\delta)]^2 + [1 + Q\varphi(\delta)]^2}{Q^2 [\varphi'(-\delta) + \varphi'(\delta) - 2\varphi'(0)]^2} + \frac{4[1 + Q\varphi(0)]^2}{Q^2 [\varphi'(-\delta) + \varphi'(\delta) - 2\varphi'(0)]^2}. \quad (18)$$

Зависимость дисперсии (18) от Q для $W = 320$ МГц представлена на рис. 5 кривой 3.

Как видно, по флюктуационной ошибке дискриминатор слежения за точкой максимальной крутизны практически равноценен дискриминатору слежения за максимумом профиля принятой мощности, существенно выигрывая у последнего в простоте аппаратной реализации [см. (16)].

Выводы. В настоящей статье синтезирован оптимальный временной дискриминатор следящего контура измерения запаздывания спутниковым высотомером. Поскольку, с одной стороны, структура такого дискриминатора избыточно сложна для использования в бортовом устройстве космического аппарата, а с другой – от бортового следящего измерителя требуется лишь долговременное надежное удержание принимаемого профиля в следящем окне, с практической точки зрения более интересны квазиоптимальные решения, упрощающие реализацию в обмен на умеренные потери в точности дискриминирования. Примерами такого рода служат два рассмотренных дискриминатора (точек максимума и максимальной крутизны), проигрыш которых оптимальному в эквивалентных флюктуациях запаздывания (в пределах 2.5 раз) можно считать приемлемой ценой достигнутой простоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Морозов К. Н. Исследование влияния состояния поверхности акваторий на точностные характеристики прецизионного высотомера космического базирования: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ. М., 2000. 201 с.
4. Терехов В. А. Радиолокационные методы определения степени взволнованности морской поверхности с борта ИСЗ: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ. М., 2011. 228 с.

5. 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.
6. 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).
7. 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.
8. *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Application* / ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. 463 p.

9. Hayne G. S. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1980. Vol. AP-28, № 5. P. 687–692.

10. Потенциальная точность совместной оценки параметров радиовысотометром космического базирования / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 33–41.

11. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.

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. 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.

2. Baskakov A. I. *Tochnostnye kharakteristiki kosmicheskogo radiotekhnicheskogo kompleksa distantsionnogo zondirovaniya dlya vosstanovleniya rel'efa 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)

3. 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)

4. 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)

5. Wingham D. J., Rapley C. G., Griffiths H. New techniques in satellite altimeter tracking systems. Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zurich. 8–11 Sept., 1986, pp. 1339–1344.

6. Deng X., Featherstone W. E. A Coastal Retracking System for Satellite Radar Altimeter Waveforms: Application to ERS-2 around Australia. Journal of Geophysical Research. 2006, vol. 111, C06012.

12. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения: пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 364 с.

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

14. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

7. Brown G. S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and its Applications. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1977, vol. 25, no. 1, pp. 67–74.

8. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications; ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego, Academic Press, 2001, 463 p.

9. Hayne G. S. Radar Altimeter Mean Return Waveforms from Near-Normal-Incidence Ocean Surface Scattering. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1980, vol. 28, no. 5, pp. 687–692.

10. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Potential Accuracy of the Joint Parameter Estimate by a Space-Based Radar Altimeter. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 4, pp. 33–41. (In Russian)

11. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnik dlja vuzov; pod red. Yu. M. Kazarinova* [Radio Engineering Systems: Textbook for High School]. Moscow, Vyssh. Shk., 1990, 496 p. (In Russian)

12. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA: Principles and Applications. New York, John Wiley & Sons, 2005, 400 p.

13. 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)

14. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theory of Statistical Radioengineering]. Moscow, *Radio i Svyaz'*, 1989, 656 p. (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), post-graduate 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
