



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)

Потенциальная точность измерения запаздывания отраженного сигнала космическим альтиметром

Синтезирован максимально правдоподобный измеритель запаздывания отраженного сигнала спутникового высотомера. На основе границы Крамера-Рао получено выражение для минимально достижимой дисперсии оценки запаздывания.

Спутниковый высотомер, измерение запаздывания, оценка по максимуму правдоподобия, граница Крамера-Рао

Одним из главных инструментов, входящих в состав космических миссий дистанционного зондирования Земли, является радиолокационный альтиметр, размещаемый на космическом аппарате (КА) и измеряющий текущую высоту последнего над земной поверхностью. Результаты подобных измерений используются для уточнения формы геоида, локализации течений и вихрей в Мировом океане, определения степени взволнованности моря и характеристик приповерхностного ветра и т. п. [1]–[3]. Современные требования к точности спутниковой альтиметрии чрезвычайно высоки: суммарная погрешность измеренной высоты не должна превышать нескольких сантиметров [2], [4]. Существенный вклад в эту погрешность вносят ошибки, обусловленные шумом, сопутствующим приему отраженного зондируемой поверхностью сигнала, а также флуктуационной природой самого полезного сигнала. В связи с этим актуальна оценка теоретического минимума случайной погрешности измерения высоты в условиях априорных ограничений энергетического и спектрального ресурсов, располагаемых альтиметром. Близкие по содержанию задачи рассматривались в ряде работ (см., например, [5], [6]), посвященных построению дискриминаторов следящих петель космических высотомеров. В настоящей статье синтезирована оптимальная структура измерителя запазды-

вания сигнала в приемнике космического высотомера и установлена зависимость потенциальной точности оценки этого параметра от характеристик зондирования и свойств отражающей поверхности.

Сигнал, принимаемый спутниковым высотомером в каждый момент времени, представляет собой суперпозицию большого числа отражений от элементов засвечиваемой подстилающей поверхности. Поскольку фазы указанных отражений случайны по отношению друг к другу, результирующий сигнал в силу центральной предельной теоремы оказывается реализацией гауссовского шума. Таким образом, задача измерения высоты КА сводится к оценке момента прихода случайного сигнала на вход приемника КА.

В рамках описанного сценария фаза принимаемого колебания не содержит информации о наличии или отсутствии в нем полезного сигнала. Поэтому в дальнейшем рассматривается только огибающая сигнала на входе приемника.

Пусть излучаемый альтиметром сигнал имеет близкий к прямоугольному спектр ширины W . Тогда при переносе в видеообласть спектр наблюдаемой приемником КА смеси сигнала с шумом $y(t)$ можно считать равномерным вплоть до граничной частоты $F_{\text{ц}} = W/2$ и равным нулю на частотах, больших $F_{\text{ц}}$. В результате отсчеты Найк-

виста, разделенные интервалом, кратным $\delta = 1/(2F_u) = 1/W$, не коррелированы, а значит, в силу нормальности $y(t)$ независимы. Предположим, что наблюдение охватывает N зондирований и $y_i(t)$, $i = \overline{0, N-1}$ – принятая огибающая на i -м зондировании. Пусть $[0, T]$ – отрезок в пределах периода зондирования, на котором наблюдается $y_i(t)$. Заменяя $y_i(t)$ отсчетами Найквиста, имеем вектор наблюдения

$$y_i = \{y_i(0), y_i(\delta), \dots, y_i[(n-1)\delta]\},$$

где $n = T/\delta = WT$; $i = \overline{0, N-1}$. Составим функцию правдоподобия $\Lambda(\tau)$ относительно оцениваемого запаздывания τ :

$$\Lambda(\tau) = \frac{W(y_0, y_1, \dots, y_{N-1} | H_1, \tau)}{W(y_0, y_1, \dots, y_{N-1} | H_0)}, \quad (1)$$

где числитель и знаменатель есть условные плотности вероятностей наблюдений, полученных на всех зондированиях, при наличии и при отсутствии сигнала соответственно (истинности гипотез H_1 и H_0), причем в числителе отражена зависимость плотности вероятности при гипотезе H_1 от оцениваемого параметра τ . Отметим, что знаменатель в (1) может быть опущен, однако его присутствие усложняет выкладки.

Обозначим через σ_0^2 дисперсию отсчета ограниченного по полосе аддитивного белого гауссовского шума, а через $P(t)$ – среднюю по ансамблю мощность полезного сигнала в момент времени t . Будем считать, что от зондирования к зондированию не меняются ни зависимость мощности сигнала $P(t)$ от времени, ни его запаздывание τ . В силу нормальности принятого колебания отсчеты его огибающей подчиняются распределению Рэлея с параметром σ_0^2 в отсутствие полезной компоненты и $\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)$ – при наличии сигнальной составляющей, запаздывающей на τ . Независимость отсчетов огибающей позволяет записать (1) в виде

$$\Lambda(\tau) = \prod_{i=0}^{N-1} \prod_{k=0}^{n-1} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)} \times \exp \left(\left\{ \frac{1}{2\sigma_0^2} - \frac{1}{2[\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)]} \right\} y_i^2(k\delta) \right) =$$

$$= \prod_{i=0}^{N-1} \prod_{k=0}^{n-1} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)} \times \exp \left(\left\{ \frac{P(k\delta - \tau)}{2\sigma_0^2 [\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)]} \right\} y_i^2(k\delta) \right).$$

Прологарифмировав обе части этого равенства, получим:

$$z(\tau) = \ln \Lambda(\tau) = N \sum_{k=0}^{n-1} \ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)} + \frac{1}{2\sigma_0^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{P(k\delta - \tau) y_i^2(k\delta)}{\sigma_0^2 + P(k\delta - \tau)}. \quad (2)$$

Введем текущее отношение "сигнал/шум" по мощности $q(t) = P(t)/\sigma_0^2$ и получим (2) в виде

$$z(\tau) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{q(k\delta - \tau) y_i^2(k\delta)}{1 + q(k\delta - \tau)} - N \sum_{k=0}^{n-1} \ln [1 + q(k\delta - \tau)]. \quad (3)$$

Выражение (3) указывает на следующий вариант построения максимально правдоподобного измерителя запаздывания τ (рис. 1). Организуем банк из M параллельных каналов, в памяти каждого из которых хранятся наборы коэффициентов $1 + q(k\delta - \tau_m)$ и $q(k\delta - \tau_m)/[1 + q(k\delta - \tau_m)]$, где τ_m ($m = \overline{1, M}$) – значение параметра τ , на которое настроен m -й канал. Отсчеты огибающей $y_{ki}^2 = y_i^2(k\delta)$ с выхода квадратичного детектора КД суммируются с весами $q(k\delta - \tau_m)/[1 + q(k\delta - \tau_m)]$ и накапливаются от зондирования к зондированию. Накопленный итог корректируется поправкой в виде второго слагаемого в (3). Выходы всех каналов сравниваются в решающем устройстве РУ, выдающем в качестве оценки $\hat{\tau}$ значение τ_m канала с максимальным выходным эффектом:

$$\hat{\tau} = \arg \max_m z(\tau_m). \quad (4)$$

Если измерение в реальном времени не требуется, надобность в параллельных каналах отпадает, поскольку обработку можно осуществить последовательно, перестраивая единственный канал по запаздыванию перед очередной подачей на его вход массива записанных отсчетов.

Для нахождения дисперсии оценки $\hat{\tau}$ примем значение τ_0 за истинное запаздывание случайного

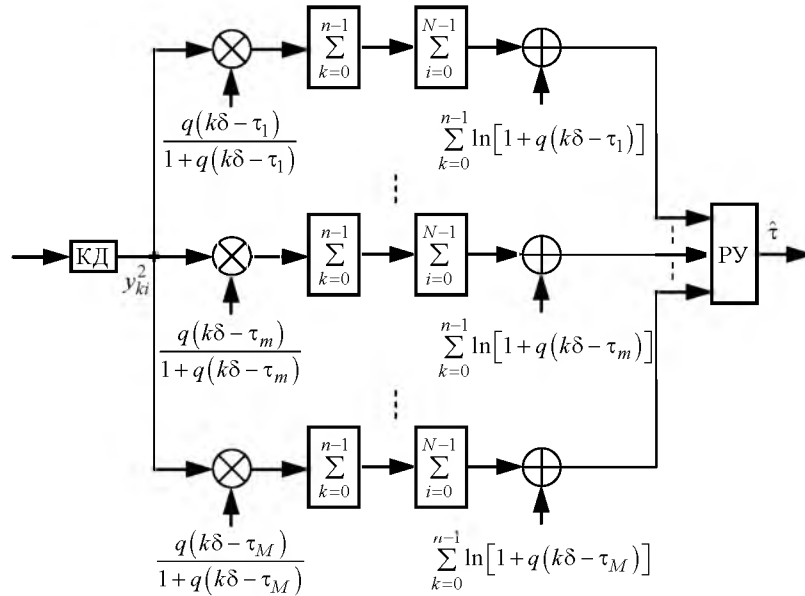


Рис. 1

сигнала. Тогда, вычислив математические ожидания обеих частей (3), имеем

$$\overline{z(\tau)} = N \sum_{k=0}^{n-1} \frac{q(k\delta - \tau)[1 + q(k\delta - \tau_0)]}{1 + q(k\delta - \tau)} - N \sum_{k=0}^{n-1} \ln[1 + q(k\delta - \tau)],$$

где горизонтальная черта сверху означает статистическое усреднение. Перепишем полученное равенство в форме

$$\overline{z(\tau)} = A - N \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1 + q(k\delta - \tau_0)}{1 + q(k\delta - \tau)} - N \sum_{k=0}^{n-1} \ln[1 + q(k\delta - \tau)], \quad (5)$$

где $A = N \sum_{k=0}^{n-1} [1 + q(k\delta - \tau_0)]$ не зависит от τ .

Найдем асимптотическую (соответствующую высокой точности измерений) условную (при истинном значении запаздывания τ_0) дисперсию оценки $\hat{\tau}$, воспользовавшись границей Крамера-Рао [7], [8]:

$$\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\} \approx \frac{1}{d^2/d\tau^2 [\overline{z(\tau)}]_{\tau=\tau_0}}. \quad (6)$$

Дважды продифференцировав (5), после подстановки $\tau = \tau_0$ получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d\tau^2} [\overline{z(\tau)}]_{\tau=\tau_0} &= \\ &= -N \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ -q''(k\delta - \tau_0)[1 + q(k\delta - \tau_0)] + \right. \end{aligned}$$

$$\left. + 2[q'(k\delta - \tau_0)]^2 \right\} / [1 + q(k\delta - \tau_0)]^2 + N \sum_{k=0}^{n-1} \frac{-q''(k\delta - \tau_0)[1 + q(k\delta - \tau_0)] + [q'(k\delta - \tau_0)]^2}{[1 + q(k\delta - \tau_0)]^2},$$

или

$$\frac{d^2}{d\tau^2} [\overline{z(\tau)}]_{\tau=\tau_0} = -N \sum_{k=0}^{n-1} \frac{[q'(k\delta - \tau_0)]^2}{[1 + q(k\delta - \tau_0)]^2}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), приходим к результату

$$\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\} \approx \frac{1}{N \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{q'(k\delta - \tau_0)}{1 + q(k\delta - \tau_0)} \right]^2}. \quad (8)$$

После умножения на $\delta = 1/W$ сумму в знаменателе (8) можно трактовать как приближение интеграла методом прямоугольников:

$$\begin{aligned} \delta \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{q'(k\delta - \tau_0)}{1 + q(k\delta - \tau_0)} \right]^2 &\approx \\ &\approx \int_0^T \left[\frac{q'(t - \tau_0)}{1 + q(t - \tau_0)} \right]^2 dt \leq \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q'(t)}{1 + q(t)} \right]^2 dt, \end{aligned}$$

откуда нижняя граница асимптотической дисперсии оценки запаздывания

$$\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\} \geq \frac{1}{NW \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q'(t)}{1 + q(t)} \right]^2 dt}. \quad (9)$$

Если интервал наблюдения $[0, T]$ охватывает весь временной диапазон, на котором $q(t)$ испы-

тывает существенные изменения, левая и правая части (9) совпадают:

$$\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\} \approx \frac{1}{NW \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q'(t)}{1+q(t)} \right]^2 dt}, \quad N \gg 1, \quad (10)$$

где требование большого числа зондирований ($N \gg 1$) отражает асимптотический характер сходимости дисперсии оценки запаздывания к границе Крамера–Рао. При этом условии среднеквадратическое отклонение оценки высоты от истинного значения

$$\sigma_h = \frac{c\sqrt{\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\}}}{2}, \quad (11)$$

где c – скорость света.

В качестве примера определим дисперсию (10) для гипотетического профиля мощности

$$q(t) = q_m \Phi(Wt),$$

где $q_m = P_m/\sigma_0^2$; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ –

интеграл вероятности, причем P_m – средняя мощность сигнала при максимальной отражающей поверхности¹. Для этого случая интеграл в знаменателе (10) определяется как

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q'(t)}{1+q(t)} \right]^2 dt &= \frac{q_m^2 W^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-W^2 t^2)}{[1+q_m \Phi(Wt)]^2} dt = \\ &= \frac{q_m^2 W}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{[1+q_m \Phi(x)]^2} dx, \end{aligned}$$

откуда для среднеквадратической ошибки измерения запаздывания имеем

$$\sigma_\tau = \sqrt{\text{var}\{\hat{\tau}|\tau_0\}} \geq \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{NW}q_{me}}, \quad (12)$$

где

$$q_{me} = q_m \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{[1+q_m \Phi(x)]^2} dx}$$

– "эквивалентное" отношение "сигнал/шум".

Кривая $q_{me}(q_m)$ приведена на рис. 2. В частности, для $N = 500$, $W = 300$ МГц, $q_m = 5$ из (12) и рис. 2 получим $\sigma_\tau \geq 0.16$ нс, что согласно

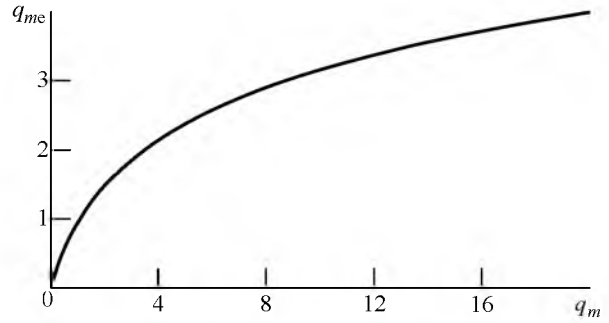


Рис. 2

(11) отвечает среднеквадратической погрешности измерения высоты порядка 2.4 см.

Сравним это значение с погрешностью оценки по моменту пересечения уровня половинной мощности, часто используемой в реальных альтиметрах [2]–[4]. Дисперсия смеси сигнала и шума после квадратичного детектора в момент достижения мощностью сигнала половинного уровня составляет $\text{var}\{y^2\} = 4(\sigma_0^2 + P_m/2)^2$. В этот же момент для рассматриваемого профиля крутизна нарастания сигнальной мощности, накопленной за N зондирований, $S = NP_m W/\sqrt{2\pi}$, откуда

$$\begin{aligned} \sigma_\tau &= \frac{\sqrt{N \text{var}\{y^2\}}}{S} = \frac{2(\sigma_0^2 + P_m/2)\sqrt{2\pi}}{\sqrt{NP_m W}} = \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{NW}} \frac{q_m + 2}{q_m}. \end{aligned}$$

При прежних исходных данных имеем $\sigma_\tau \approx 0.52$ нс, что в пересчете к высоте составит около 8 см. Тем самым измерение по пересечению уровня заметно проигрывает в точности оптимальному измерению.

Для того чтобы убедиться в надежности (10), проведено моделирование в среде MATLAB. Формировался массив независимых отсчетов заданного размера $n \times N$ на выходе квадратичного детектора, т. е. распределенных экспоненциально со средним значением, нарастающим вдоль столбца как $\mu = 2[1 + q_m \Phi(i - n/2)]$, $i = 0, n-1$. Полученные таким образом наблюдения обрабатывались согласно рис. 1 с шагом по τ в (3), равным $\delta/20 = 0.05/W$, и принятием решения по правилу (4). При каждом фиксированном значении q_m выборочная дисперсия рассчитывалась усреднением по $M = 2000$ попыткам. Приведенные в таблице значения σ_τ при $n = 100$, $N = 500$ и $W = 300$ МГц свидетельствуют об исключитель-

¹ Аппроксимация нарастающего фронта мощности интегралом вероятности используется в ряде работ по спутниковой альтиметрии [9]–[11].

q_m	σ_{τ} , нс		q_m	σ_{τ} , нс		q_m	σ_{τ} , нс		q_m	σ_{τ} , нс		q_m	σ_{τ} , нс		q_m	σ_{τ} , нс	
	теор.	модел.		теор.	модел.		теор.	модел.		теор.	модел.		теор.	модел.		теор.	модел.
0.50	0.528	0.705	1.25	0.334	0.351	2.00	0.264	0.264	2.75	0.225	0.219	4.00	0.187	0.183	5.50	0.159	0.162
0.75	0.432	0.521	1.50	0.310	0.313	2.25	0.249	0.244	3.00	0.216	0.213	4.50	0.176	0.175	6.00	0.152	0.151
1.00	0.374	0.397	1.75	0.283	0.282	2.50	0.236	0.237	3.50	0.198	0.194	5.00	0.167	0.170	6.50	0.147	0.149

ной близости результатов компьютерного эксперимента к теоретическому прогнозу, за исключением области малых отношений "сигнал/шум" q_m , где расхождения обязаны аномальным ошибкам, игнорируемым границей Крамера–Рао [7]. Графически высокая точность предсказания σ_{τ} с помощью (12) дополнительно иллюстрируется рис. 3, где кривой представлены результаты теоретического расчета, а маркерами – результаты эксперимента.

Резюмируя, отметим, что основными итогами работы являются статистический синтез максимально правдоподобного измерителя запаздывания сигнала космического высотомера и получение зависимости потенциальной точности оценки запаздывания от энергетика радиолинии, ширины спектра зондирующего сигнала и профиля принимаемой мощности. Достоверность теоретического

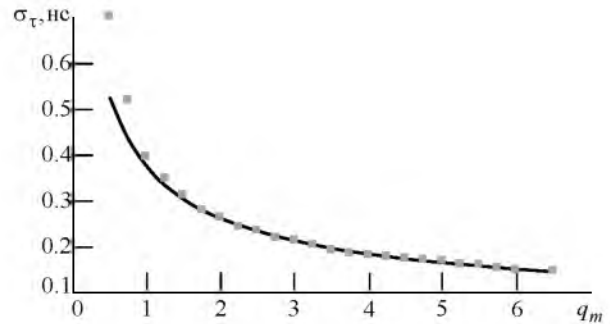


Рис. 3

анализа подтверждена компьютерным моделированием. Установлено, что популярная оценка времени прихода отраженного сигнала по пересечению предустановленного порога весьма значительно (до нескольких раз) проигрывает в точности оптимальной оценке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев и др. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
2. Coastal Altimetry / ed. by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin: Springer, 2011. 565 p.
3. Rees W. G. Physical Principles of Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 343 p.
4. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 496 p.
5. Терехов В. А., Гришечкин Б. Ю., Баскаков А. И. Потенциальная точность оптимального дискриминатора для измерения степени взволнованности морской поверхности с борта космического аппарата // Радиотехнические тетради. 2008. № 37. С. 65–69.
6. Егоров В. В., Ка Мин-Хо. Вопросы точности аэрокосмической альтиметрии // Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 48–55.
7. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
8. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: в 3 т. / пер. с англ. М.: Сов. радио, 1972. Т. 1. 744 с.
9. Brown G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1977. Vol. AP-25, iss. 1. P. 67–74.
10. Jackson F. C., Walton W. T., Hines D. E. Sea surface mean square slope from Ku-band backscatter data // J. of Geophysical Research. 1992. Vol. 97, № 7. P. 11411–11427.
11. Barrick D. E., Lipa B. J. Analysis and Interpretation of Altimeter Sea Echo // Advances in Geophysics. 1985. Vol. 27. P. 61–100.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2016 г.

Для цитирования: Потенциальная точность измерения запаздывания отраженного сигнала космическим альтиметром / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 5–11.

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 25 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 технологий по направлению "Радиотехника" (2015), аспирант и ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех 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"

Potential Accuracy of Echo-Signal Delay Measurement by Space-Based Radar Altimeter

Abstract. *Satellite radar altimetry is a universal tool for global all-weather monitoring of the surface of the Earth. Substantial contribution to the satellite altimeter error is made by a component associated with noise and random nature of the echo-signal itself. When simulating a scattering surface with an array of specular points the altimeter echo-signal represents Gaussian process waveform received against AWGN. In such a case, the conventional statistical design produces an optimal echo-signal delay estimator in the form of the bank of identical energy receivers where decision is made according to maximal response. The Cramer-Rao bound defines the dependence of potential delay estimate accuracy on power and spectral resources used by altimeter, and the form of received power profile. The validity of analytical results obtained is confirmed by MATLAB simulation. It is also shown that the routine method of delay estimate based on threshold crossing yields manifold to the optimal one in measuring accuracy.*

Key words: Satellite Altimeter, Delay Estimate, Maximum Likelihood Estimate, Cramer–Rao Bound

REFERENCES

1. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mitjagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A. *Kompleksny sputnikoviy monitoring morey Rossii* [Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas]. Moscow, ICI RAS, 2011, 480 p. (In Russian)
2. Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P. Coastal Altimetry, ed. by J. Benveniste. Berlin, Springer, 2011, 565 p.
3. Rees W. G. *Physical Principles of Remote Sensing*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2001, 343 p.
4. Martin S. *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 496 p.
5. Terekhov V. A., Grishechkin B. Yu., Baskakov A. I. Potential Accuracy of the Optimal Discriminator for Spaceborne Measuring Roughness of the Sea Surface. *Radiotekhnicheskie tetradi* [Radio Equipment Notebook], 2008, no. 37, pp. 65–69. (In Russian)
6. Egorov B. B., Ka Min-Khoyu. Problems of Aerospace Altimetry Accuracy. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, no. 5, pp. 48–55. (In Russian)
7. Kazarinov Yu. M. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnyk dlja vuzov* [Radio Electronic Systems: Textbook for High School]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1990, 496 p. (In Russian)
8. Van Trees H. L. *Detection, estimation and modulation theory*. P. 1. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2001, 715 p.
9. 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.
10. Jackson F. C., Walton W. T., Hines D. E. Sea Surface Mean Square Slope from Ku-Band Backscatter Data. *J. of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, no. 7, pp. 11411–11427.
11. Barrick D. E., Lipa B. J. Analysis and Interpretation of Altimeter Sea Echo. *Advances in Geophysics*, 1985, vol. 27, pp. 61–100.

Received December, 16, 2016

For citation: Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Potential Accuracy of Echo-Signal Delay Measurement by Space-Based Radar Altimeter. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 5–11. (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 radio-navigation and time" (Saint Petersburg). The author of more than 25 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 radioman 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

УДК 621.391

Д. И. Каплун, В. В. Гульванский, И. И. Канатов, Д. М. Клионский
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
 В. Ф. Лапицкий, В. И. Бобровский, К. В. Фролов, А. К. Скворцов
 ПАО "Интелтех" (Санкт-Петербург)

Разработка и исследование методов демодуляции частотно-манипулированных сигналов

Предложены различные методы демодуляции частотно-манипулированных сигналов и произведено их сравнение по критерию количества ошибок демодулированного сигнала относительно сигнала до модуляции при различном отношении "сигнал/шум".

Демодуляция, частотно-манипулированный сигнал, быстрое преобразование Фурье, автокорреляционная функция, двойная корреляция

Назначение канала связи – передача той или иной информации. Из теории связи известно, что существуют две основные причины снижения достоверности передачи [1]. Первая причина – снижение отношения "сигнал/шум" (signal noise ratio – SNR). Вторая причина – искажение сигнала. Применительно к аналоговым сигналам используются понятия интермодуляционных искажений (например, интермодуляционные искажения второго порядка (composite secondary order – CSO), интермодуляционные биения третьего порядка (composite triple beat – CTB) и канальные искажения) [2]. В цифровых системах связи большей частью используется понятие межсимвольной интерференции. В настоящей статье рассмотрено определение количества ошибок в зависимости от реализуемого значения SNR и используемого способа демодуляции.

Частотно-манипулированный (ЧМн) сигнал – сигнал, в составе которого излучаются гармони-

ческие колебания одной из двух известных частот в зависимости от значения бита информационной последовательности [3]. Частоты сигналов, соответствующих логическим "1" и "0", определяются как $f \pm f_0$, где f – центральная частота сигнала; f_0 – отклонение частоты, причем логическому "0" соответствует знак "-" в формуле, а логической "1" – знак "+". Полоса частот такого сигнала составляет $2f_0$.

Математическая модель. Модель разработана в вычислительной среде MatLab. Рассмотрена демодуляция сигнала с частотой логического "0" 1.6 кГц и логической "1" 2.0 кГц. В модели предусмотрена дискретизация с частотой 12.8 кГц. Длительность логического символа составляет 128 отсчетов. В целях анализа потенциальных возможностей принято, что во всех звеньях модели производится символьная синхронизация, позволяю-