

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)

Аналитическая модель эхосигнала спутникового высотомера

Получено выражение, связывающее усредненный профиль мощности, принимаемой спутниковым высотомером, с высотой орбиты, степенью взволнованности моря и отклонением луча антенны от вертикали. Компактность предлагаемой аналитической модели упрощает синтез и анализ алгоритмов поиска и сопровождения эхосигнала.

Спутниковый высотомер, эхосигнал, элементарный отражатель, гауссовский импульс

Спутниковая альтиметрия с момента своего появления стала основным средством космического мониторинга акваторий Мирового океана, открыв новые горизонты в прикладных и научных исследованиях Земли. Первый радиовысотомер космического базирования был выведен на орбиту в составе экспериментальной миссии SkyLab в 1973 г. С тех пор альтиметры стали неотъемлемой частью большинства масштабных программ дистанционного зондирования Земли из космоса [1].

Пролетая над подстилающей поверхностью, спутниковый альтиметр с высоты порядка тысячи километров засвечивает обширную территорию, площадь которой достигает десятков квадратных километров. При этом отражения от элементарных участков освещаемого пятна, имея свои случайные начальные фазы и амплитуды, складываются на входе приемника некогерентно, в результате чего суммарный полезный сигнал оказывается шумовым. Решающая роль в определении высоты принадлежит оценке временного положения нарастающего фронта профиля принимаемой мощности, а требуемая при этом высокая точность налагает необходимость излучать сигналы эквивалентной длительности порядка нескольких наносекунд. Альтиметры, строящиеся по такому принципу, являются импульсно-ограниченными. Измерение других характеристик поверхности (степень взволнованности моря, отражающая способность) также связано с оценкой параметров профиля мощности эхосигнала [2], [3].

В настоящей статье исследуется математическая модель усредненной мощности отраженного сигнала, а также приводятся весьма точные выражения, удобные для последующего теоретического анализа.

В литературе по спутниковой альтиметрии часто используется модель Брауна [4], которая описывает импульсный отклик (реакция на сигнал в виде δ -функции) плоской шероховатой поверхности. Фундаментом при ее формировании послужили результаты работы Мура и Вильямса [5], дающие основание считать, что полная мощность, отраженная от шероховатой поверхности, есть сумма парциальных мощностей от всех освещаемых элементарных отражателей этой поверхности. При этом модель опирается на ряд допущений:

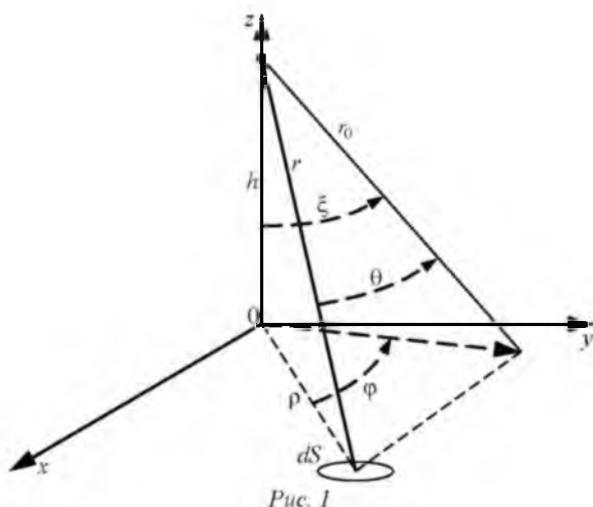
- отражающая поверхность представляет собой совокупность большого числа независимых рассеивающих элементов (блестящих точек);
- описывающая шероховатость статистика полагается однородной (одинаковой) в пределах всего освещаемого пятна на протяжении каждого сеанса зондирования;
- отражение является частотно-независимым скалярным процессом с отсутствием эффектов поляризации;
- зависимость интенсивности отражения от угла падения относительно нормали к поверхности обуславливается только соответствующим изменением удельной отражающей способности σ_0 и характеристиками направленности приемной антенны;
- длительность зондирующего импульса пренебрежимо мала по сравнению с периодом доплеровской частоты сигнала, отраженного блестящей точкой в пределах засвечиваемой области, возникающей вследствие ненулевой радиальной скорости между последней и космическим аппаратом (КА).

Отметим, что в отличие от суши указанные ограничения хорошо согласуются со свойствами

морской поверхности при разумном выборе времени накопления и усреднения [4], [6].

Дальнейшие уточнения модели Брауна [7], [8] в основном имели целью максимальный учет смещений, обусловленных асимметрией гребней и впадин морских волн, распределения наклонов морской поверхности и другими факторами. Заметим, что влияние подобных эффектов ограничивается этапом финальных измерений, выполняемых наземным мониторинговым комплексом по данным альтиметра, транслируемым с борта КА. Главной же целью измерений, осуществляемых на борту, является надежное удержание принимаемого эхосигнала на автосопровождении, малочувствительном к указанным ранее систематическим ошибкам. Поэтому при разработке самого спутникового альтиметра актуальна такая модель эхосигнала, аналитическая компактность которой, достигаемая за счет пренебрежения упомянутыми вторичными факторами, позволяет синтезировать прозрачные алгоритмы поиска и сопровождения эхосигнала и с достаточной точностью спрогнозировать их эффективность. По мнению авторов, приводимый далее вывод отвечает сформулированной цели.

Расчет профиля принимаемой мощности. Методика расчета мощности эхосигнала, отраженного от плоской шероховатой поверхности и поступающего на вход приемника высотомера, поясняется рис. 1 [4], на котором отражающая поверхность находится в плоскости xOy ; h – расстояние от отражающей поверхности до фазового центра антенны (высота); ξ – угол между осью диаграммы направленности (ДН) антенны r_0 и направлением надира (осью z); r – наклонная дальность от антенны до блестящей точки dS с полярными координатами ρ , φ ; θ – угол между направлением на элементарный отражатель и лучом



антенны. Тогда принимаемая альтиметром усредненная мощность как функция времени может быть найдена суммированием мощностей отражений от всех блестящих точек в пределах пятна засветки [4]:

$$P_{\text{r}}(t) = \frac{P_{\text{tr}} W T G_0^2 \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 L_p} \int_S \frac{s^2 \left(t + 2 \frac{h-r}{c} \right)}{r^4} G^2(\theta) dS, \quad (1)$$

где P_{tr} – излучаемая пиковая мощность; W , T – ширина спектра и длительность зондирующего сигнала соответственно; G_0 – коэффициент усиления антенны на прием и передачу; λ – длина излучаемой волны; L_p – дополнительные потери на трассе распространения; $s(t)$ – форма сжатого зондирующего импульса единичной пиковой мощности; c – скорость света; $G(\theta)$ – нормированная ДН антенны, полагаемая телом вращения. Перейдя к полярным координатам и используя тригонометрические преобразования, придадим выражению (1) следующий вид:

$$P_{\text{r}}(t) = A \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{s^2 [t + 2(h-r)/c]}{[1 + (\rho/h)^2]^2} G^2(\theta) \rho d\rho d\varphi, \quad (2)$$

где множитель A объединяет все не зависящие от координат элементарного отражателя величины, а r и θ связаны с ρ и φ соотношениями

$$r = \sqrt{h^2 + \rho^2}; \quad (3)$$

$$\theta = \arccos \frac{h \cos \xi + \rho \sin \xi \cos \varphi}{r}. \quad (4)$$

Равенство (2) описывает среднюю мощность эхосигнала высотомера, отраженного от плоской поверхности, например спокойного моря. Учет волнения согласно многим источникам, посвященным космической альтиметрии ([2]–[5], [7], [8] и др.), реализуется сверткой отражения от невзволнованной поверхности с плотностью вероятности высоты волны.

Пусть иглообразный луч антенны ориентирован строго в направлении надира (рис. 2). Блестящая точка с плоскими полярными координатами ρ , φ за счет волны отклоняется от спокойной горизонтальной поверхности (штриховая линия) на величину z , причем $|z| \ll r_0$, где r_0 – расстояние от фазового центра антенны до элементарного отражателя в отсутствие волнения (рис. 2). В узком луче антенны угол видимости отражателя практически не зависит от z : $\theta_d \approx \theta_0$, а расстояние отража-

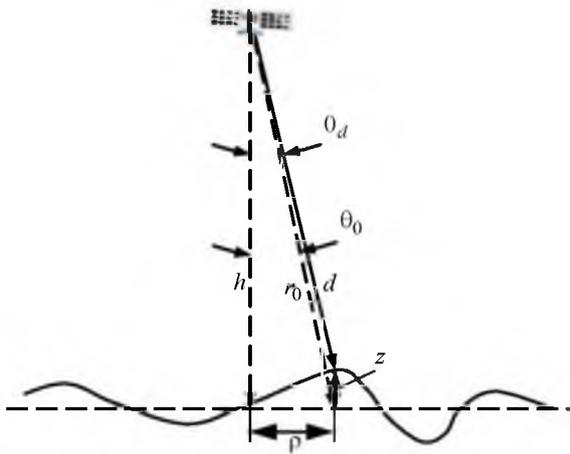


Рис. 2

теля до антенны $d \approx r_0 + z$. Таким образом, при зондировании импульсом, автокорреляционная функция которого описывается как $s(t)$, мощность, приходящая на приемник от отражателя с координатами ρ, φ в момент времени t^1 , в соответствии с уравнением радиолокации [4], [9] определяется как

$$P_{\text{rw}}(t, \rho, \varphi) \approx \frac{s^2 \left[t + 2(h - r_0)/c - 2(z/c) \right]}{(r_0 + z)^4} G^2(\theta_0) \approx \frac{s^2 \left[t + 2(h - r_0)/c - 2(z/c) \right]}{r_0^4} G^2(\theta_0), \quad (5)$$

где индекс "w" (wave) указывает на наличие волнения, а в коэффициент A_1 входят величины, не зависящие от координат отражателя. Пусть $W(z)$ – статистическое распределение высоты отражателя над средним уровнем спокойной поверхности. Тогда, усреднив правую часть (5) по z , придем к математическому ожиданию мощности, принятой от конкретной блестящей точки:

$$P_{\text{rw}}(t, \rho, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{rw}}(t, \rho, \varphi) W(z) dz \approx \frac{s^2 \left[t + 2(h - r_0)/c - 2(z/c) \right]}{\left[1 + (\rho/h)^2 \right]^2} \times G^2(\theta_0) W(z) dz, \quad (6)$$

где A_2 – константа, определяемая излучаемой мощностью, высотой орбиты КА h , отражающими свойствами поверхности и т. п. Для нахождения

полной мощности $P_{\text{rw}}(t)$, перехватываемой приемником в момент t от всех освещаемых блестящих точек, следует проинтегрировать (6) по всей плоскости. После изменения порядка интегрирования имеем:

$$P_{\text{rw}}(t) = A \int_{-\infty}^{\infty} W(z) \left\{ \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{s^2 \left[t + 2(h - r_0)/c - 2(z/c) \right]}{\left[1 + (\rho/h)^2 \right]^2} \times G^2(\theta_0) \rho d\rho d\varphi \right\} dz, \quad (7)$$

где $A = 2A_2$. Переход к переменной $t_1 = 2z/c$ приводит (7) к виду

$$P_{\text{rw}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c}{2} W\left(\frac{ct_1}{2}\right) \left\{ A \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{s^2 \left[t + 2(h - r_0)/c - t_1 \right]}{\left[1 + (\rho/h)^2 \right]^2} \times G^2(\theta_0) \rho d\rho d\varphi \right\} dt_1, \quad (8)$$

где $r_0 = \sqrt{h^2 + \rho^2}$; $\theta_0 = \arccos(h/r_0)$ (рис. 2).

Учтем, что в (2) $r = \sqrt{h^2 + \rho^2}$ и при нулевом отклонении луча антенны от вертикали ($\xi = 0$) $\theta = \arccos(h/r)$. Отметим, что выражение в фигурной скобке в (8) отличается от (2) только смещением аргумента на $-t_1$. Таким образом, интеграл по t_1 в (8) является сверткой выражения мощности при невзволнованной поверхности с функцией $(c/2)W(ct_1/2)$ – масштабированной плотностью вероятности высоты волны:

$$P_{\text{rw}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c}{2} W\left(\frac{ct_1}{2}\right) P_t(t - t_1) dt_1.$$

В подынтегральном выражении внутреннего интеграла в (8) от смещения t_1 зависит только функция $s^2(\cdot)$. Поэтому для вычисления $P_{\text{rw}}(t)$ можно вначале найти свертку функций $s^2(\cdot)$ и $(c/2)W(ct_1/2)$:

$$s_w^2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c}{2} W\left(\frac{ct_1}{2}\right) s^2(t - t_1) dt_1, \quad (9)$$

а затем подставить $s_w^2(t)$ в (2) вместо $s^2(t)$. Тем самым имеется основание считать, что наличие волнения эквивалентно преобразованию сигнала

¹ Время отсчитывается от $2h/c$ – момента достижения приемника фронтом волны, отраженной от среднего уровня зондируемой водной поверхности.

$s^2(t)$ линейным фильтром с импульсной характеристикой $(c/2)W(ct_1/2)$.

Широко распространена гауссовская модель морского волнения [1]–[4], [7], [8], [10]–[12]:

$$W(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (10)$$

где σ_z – среднеквадратическое отклонение высоты волны. Примем форму сжатого зондирующего импульса также гауссовской, опираясь на повсеместное использование данного приближения в источниках по альтиметрии [1]–[4], [7], [8], [10]–[13]:

$$s(t) = \exp(-\beta t^2), \quad (11)$$

где $\beta = 2 \ln 2 / \Delta_{0.5}^2$, причем $\Delta_{0.5}$ – длительность импульса по уровню половинной мощности. Так как свертка двух колокольных функций есть вновь колокольная функция, подставив (10) и (11) в (9), получим:

$$s_w^2(t) = \frac{1}{\sqrt{1+16\beta(\sigma_z/c)^2}} \times \exp\left[-2\frac{\beta t^2}{1+16\beta(\sigma_z/c)^2}\right] = \sqrt{v} \cdot s^2(\sqrt{v} \cdot t), \quad (12)$$

где

$$v = \frac{1}{1+16\beta(\sigma_z/c)^2}. \quad (13)$$

Как видно, волнение не меняет формы гауссовского зондирующего импульса, приводя лишь к его растяжению во времени с сохранением энергии. Поэтому, чтобы учесть волнение при вычислении профиля принятой мощности, нужно лишь подставить в (2) исходный гауссовский импульс, отмасштабированный согласно (12), (13). В итоге для колокольного зондирующего импульса (11) задача одновременного измерения высоты и степени взволнованности морской поверхности параметризуется как оценка двух величин: запаздывания нарастающего фронта принятой мощности и параметра масштабирования (13), что совпадает с выводами [4].

Воспользовавшись гауссовской аппроксимацией ДН антенны [4]

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

где $\gamma = (2/\ln 2)\sin^2(\theta_{0.5}/2)$, причем $\theta_{0.5}$ – ширина ДН антенны по половинному уровню, перепишем (2) с учетом волнения следующим образом:

$$P_{\text{rw}}(t) = A\sqrt{v} \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{\exp\left[-2\beta v(t+2(h-r)/c)^2\right]}{\left[1+(\rho/h)^2\right]^2} \times \exp\left[-(4/\gamma)\sin^2\theta\right] \rho d\rho d\varphi. \quad (14)$$

В предположении, что ширина луча $\theta_{0.5}$ достаточно мала и отклонение оси ДН антенны от вертикали $\xi < \theta_{0.5}/2 \ll 1$; $\varepsilon = \rho/h \ll 1$, $\sin\theta \approx \theta$.

Тогда из (3) $r \approx h(1+\varepsilon^2/2)$, а из (4)

$$\cos\theta \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\xi^2 + \varepsilon^2 - 2\xi\varepsilon\cos\varphi)/2,$$

откуда

$$\theta \approx \sqrt{\xi^2 + \varepsilon^2 - 2\xi\varepsilon\cos\varphi}. \quad (15)$$

С учетом (15) равенство (14) примет вид

$$P_{\text{rw}}(t) = Ah^2\sqrt{v} \exp(-4\xi^2/\gamma) \times \int_0^\infty \frac{\exp\left[-2\beta v(t-h\varepsilon^2/c)^2\right]}{(1+\varepsilon^2)^2} \exp(-4\xi^2/\gamma) \times \int_0^\pi \varepsilon d\varepsilon \int_0^\pi \exp(8\xi\varepsilon\cos\varphi/\gamma) d\varphi$$

или

$$P_{\text{rw}}(t) = A\pi h^2\sqrt{v} \exp(-4\varepsilon^2/\gamma) \times \int_0^\infty \frac{\exp\left[-2\beta v(t-h\varepsilon^2/c)^2\right]}{(1+\varepsilon^2)^2} \times \exp(-4\xi^2/\gamma) I_0(8\xi\varepsilon/\gamma) \varepsilon d\varepsilon, \quad (16)$$

где $I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. Далее, используя приближение последней функции при малых аргументах

$$I_0(\zeta) \approx 1 + \zeta^2/4 \approx \exp(\zeta^2/4), \quad (17)$$

получим

$$P_{\text{rw}}(t) \approx A\pi h^2\sqrt{v} \exp(-4\xi^2/\gamma) \times \int_0^\infty \exp\left[-2\beta v(t-h\varepsilon^2/c)^2\right] \times \exp\left[-(4\varepsilon^2/\gamma)(1-4\xi^2/\gamma)\right] \varepsilon d\varepsilon = (A\pi h^2/2)\sqrt{v} \exp(-4\xi^2/\gamma) \times \int_0^\infty \exp\left[-2\beta v(t-h\mu/c)^2\right] \times \exp\left[-(4\mu/\gamma)(1-4\xi^2/\gamma)\right] d\mu, \quad (18)$$

где знаменатель в выражении под интегралом отброшен в силу того, что в пределах луча антенны $\mu = \varepsilon^2 = (\rho/h)^2 \ll 1$. Заменив в (18) переменную интегрирования на $y = t - h\mu/c$, имеем:

$$P_{\text{rw}}(t) \approx \frac{A\pi ch}{2} \sqrt{v} \exp(-\alpha\eta t - 4\xi^2/\gamma) \times \int_{-\infty}^t \exp(-2\beta v y^2) \exp(\alpha\eta y) dy,$$

где $\alpha = 4c/(\gamma h)$: $\eta = 1 - 4\xi^2/\gamma$. После дополнения показателя экспоненты под интегралом последнего выражения до квадрата разности имеем:

$$P_{\text{rw}}(t) \approx \frac{A\pi\sqrt{\pi} \cdot ch}{2\sqrt{2\beta}} \exp\left[-\alpha\left(\eta t + \frac{\xi^2 h}{c}\right) + \frac{\alpha^2 \eta^2}{8\beta v}\right] \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} [1/(2\sqrt{\beta v})]} \int_{-\infty}^t \exp\left\{-2\beta v \left(y - \frac{\alpha\eta}{4\beta v}\right)^2\right\} dy.$$

Окончательно:

$$P_{\text{rw}}(t) \approx \frac{A\pi\sqrt{\pi} \cdot ch}{2\sqrt{2\beta}} \Phi\left[2\sqrt{\beta v} \left(t - \frac{\alpha\eta}{4\beta v}\right)\right] \exp\left\{-\alpha\left[\eta\left(t - \frac{\alpha\eta}{8\beta v}\right) + \frac{\xi^2 h}{c}\right]\right\}, \quad (19)$$

где $\Phi(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\zeta} \exp(-z^2/2) dz$ – интеграл вероятности.

На рис. 3 изображены нормированные профили мощности, один из которых (сплошная кривая) рассчитан численным интегрированием "точного" равенства (14), а второй (штриховая кривая) – согласно приближению (19). Кривые построены при следующих значениях параметров: высота $h = 1000$ км, полоса частот колокольного сигнала $W = 320$ МГц, его длительность $\Delta_{0.5} = 0.886/W$, $\sigma_z = 0$, $v = 1$ (гладкая поверхность), $\theta_{0.5} = 0.6^\circ$ – типичная ширина ДН антенны по уровню 0.5 высотомера Ка-диапазона ($\lambda \approx 0.84$ см) при диаметре раскрытия зеркала 1 м и отклонение оси антенны от направления надира $\xi = 0.15^\circ$.

Из рис. 3 следует, что при принятых ширине луча и отклонении от вертикали разница между приближенным решением (19) и точным решением (14) уже вполне ощутима. Для улучшения аппроксимации воспользуемся приближением функции Бесселя из [14], сохраняющим более высокую относительно (17) точность в более широкой окрестности нуля:

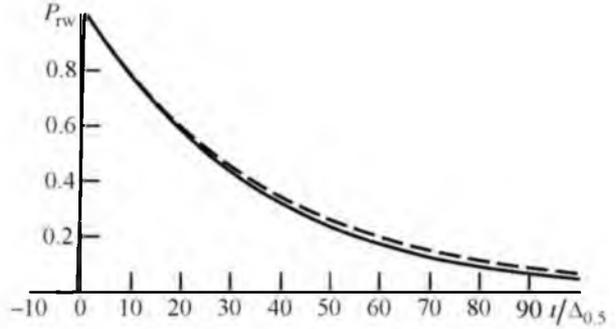


Рис. 3

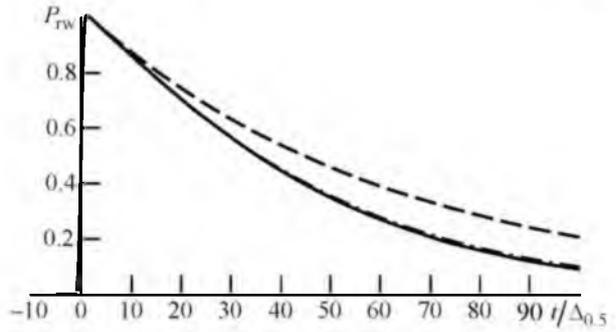


Рис. 4

$$I_0(\zeta) \approx 2 \exp(\zeta^2/8) - 1. \quad (20)$$

Подставив (20) в (16) и практически полностью повторив прежние выкладки, придем к итогу:

$$P_{\text{rw}}(t) \approx \frac{A\pi\sqrt{\pi} \cdot ch}{2\sqrt{2\beta}} \exp\left(-\frac{4\xi^2}{\gamma}\right) \times \left\{ 2\Phi\left[2\sqrt{\beta v} \left(t - \frac{\alpha\eta_1}{4\beta v}\right)\right] \exp\left[-\alpha\eta_1 \left(t - \frac{\alpha\eta_1}{8\beta v}\right)\right] - \Phi\left[2\sqrt{\beta v} \left(t - \frac{\alpha}{4\beta v}\right)\right] \exp\left[-\alpha \left(t - \frac{\alpha}{8\beta v}\right)\right] \right\}, \quad (21)$$

где $\eta_1 = 1 - 2\xi^2/\gamma$. Как видно из рис. 4, даже при отклонении от вертикали на треть ширины луча антенны ($\xi = 0.2^\circ$) разница между зависимостями (21) (штрих-пунктирная кривая) и (14) (сплошная кривая) незаметна, чего нельзя сказать о приближении (19) (штриховая кривая).

Полученная в настоящей статье аналитическая модель описывает профиль принятой альтиметром мощности через элементарные или табулированные функции. Благодаря этому процедура синтеза алгоритмов поиска и сопровождения эхосигнала упрощается и обретает прозрачность. В еще большей степени удобства модели проявятся при анализе потенциальной точности совместной оценки альтиметром высоты орбиты, значимой высоты волны, удельной эффективной отражающей поверхности и отклонения оси ДН антенны от направления надира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Barrick D. E., Lipa B. J. Analysis and Interpretation of Altimeter Sea Echo // *Advances in Geophysics*. 1985. Vol. 27. P. 61–100.
3. Coastal Altimetry / ed by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 578 p.
4. 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.
5. Moore R. K., Williams C. S. Radar terrain return at near-vertical incidence // *Proc. IRE*. 1957. Vol. 45, № 2. P. 228–238.
6. Miller L. S. Topographic and backscatter characteristics of Geos 3 overland data // *J. of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84, № B8. P. 4045–4054.
7. 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.
8. Морозов К. Н. Исследование влияния состояния поверхности акваторий на точностные характеристики прецизионного высотомера космического базирования: дис. ... канд. техн. наук / МЭИ. М., 2000. 201 с.
9. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
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. Brown G. S. Backscattering from a Gaussian-Distributed Perfectly Conducting Rough Surface // *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 1978. Vol. AP-26, № 3. P. 472–482.
12. Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 496 p.
13. Баскаков А. И., Голубков В. Г. Устойчивость средней формы импульса, отраженного от взволнованной морской поверхности, к форме зондирующего импульса // *Тр. МЭИ*. 1979. Вып. 418. С. 41–44.
14. Improving the Jason-1 Ground Retracking to Better Account for Attitude Effects / L. Amarouche, P. Thibaut, O. Z. Zanife, J.-P. Dumont, P. Vincent, N. Steunou // *Marine Geodesy*. 2004. Vol. 27, № 1–2. P. 171–197.

Статья поступила в редакцию 7 марта 2017 г.

Для цитирования: Аналитическая модель эхосигнала спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2017. № 3. С. 39–46.

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_nepogodin@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 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"

Radar Altimeter Echo-Signal Analytical Model

Abstract. To design and analyze signal processing procedures in the onboard receiver of a space-based altimeter an analytical echo-signal model is desirable which combines compactness with acceptable accuracy of presenting average return power dependency on the measured parameters. On the same premises as for the popular Brown's model and for the

scenario of a sharp antenna beam the expression is proposed linking the mean return power profile to parameters to be measured: orbit altitude, significant wave height and antenna boresight angle. Only the "ready" functions enter the equation obtained, so that no numerical integration is necessary. The model proposed is feasible to optimize echo-signal search and tracking algorithms as well as to evaluate the potential accuracy of joint estimate of the abovementioned parameters.

Key words: Satellite radar altimeter, echo-signal, specular point, gaussian pulse

REFERENCES

1. 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.
2. Barrick D. E., Lipa B. J. Analysis and Interpretation of Altimeter Sea Echo. *Advances in Geophysics*, 1985, vol. 27, pp. 61–100.
3. Coastal Altimetry; ed by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 578 p.
4. 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.
5. Moore R. K., Williams C. S. Radar Terrain Return at Near-vertical Incidence. *Proc. IRE.* 1957, vol. 45, no. 2, pp. 228–238.
6. Miller L. S. Topographic and Backscatter Characteristics of Geos 3 Overland Data. *J. of Geophysical Research.* 1979, vol. 84, no. 8, pp. 4045–4054.
7. 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, no. 5, pp. 687–692.
8. 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)
9. *Radiotekhnicheskie sistemy: Uchebnik dlya vuzov; pod red. Yu. M. Kazarinova* [Radio Engineering Systems: Textbook for High Schools]. Moscow, Vyssh. shk., 1990, 496 p. (In Russian)
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. 11 411–11 427.
11. Brown G. S. Backscattering from a Gaussian-Distributed Perfectly Conducting Rough Surface. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 1978, vol. AP-26, no. 3, pp. 472–482.
12. Martin S. *An Introduction to Ocean Remote Sensing.* 2nd ed. Cambridge University Press, 2014, 496 p.
13. Baskakov A. I., Golubkov V. G. Stability of the Average Pulse Shape Reflected from an Agitated Sea Surface to the Shape of a Probing Pulse. *Tr. MEI.* 1979, iss. 418, pp. 41–44. (In Russian)
14. Amarouche L., Thibaut P., Zanife O. Z., Dumont J.-P., Vincent P., Steunou N. Improving the Jason-1 Ground Retracking to Better Account for Attitude Effects. *Marine Geodesy.* 2004, vol. 27, no. 1–2, pp. 171–197.

Received March, 7, 2017

For citation: Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Radar Altimeter Echo-Signal Analytical Model. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 39–46. (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 25 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 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