УДК 621.396

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ВЫСОКОТОЧНОГО АВИАЦИОННОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА ПРИ РАБОТЕ НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

А. И. Баскаков, А. А. Комаров*, М. С. Михайлов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

При работе высокоточного авиационного радиовысотомера на малых высотах в режиме измерения профиля морской поверхности характеристикой её отражающих свойств является локальная диаграмма обратного рассеяния, которая зависит от времени, в отличие от большинства других ситуаций, когда пятно облучения существенно превышает характерные размеры крупных неровностей поверхности. При этом оценка высоты на выходе следящей системы радиовысотомера летательного аппарата представляет собой сумму трех слагаемых: высоты до среднего уровня; смещения оценки высоты, изменяющегося во времени в зависимости от наклонов крупных неровностей; составляющей, связанной с рельефом поверхности. Для расчёта текущей методической погрешности оценки высоты высокоточного авиационного радиовысотомера на малых высотах необходима обоснованная аппроксимация крупных неровностей морской поверхности детерминированной функцией.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнический способ измерения высоты полёта широко применяется в авиации и всё больше внедряется в космонавтике [1, 2]. Радиовысотометрия очень близка к радиодальнометрии, но имеет ряд специфических особенностей, связанных, прежде всего, с объектом локации — протяжённой и в общем случае неровной и неоднородной поверхностью [3, 4]. В связи с этим важное значение имеет оценка точности измерений в условиях широкого диапазона высот полёта носителя радиовысотомера.

Для сверхвысокочастотных высокоточных радиовысотомеров (BPB) особенности отражения широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией от морской поверхности при её облучении с больших высот подробно рассмотрены, например, в работах [5, 6]. При этом под высотой полёта обычно понимается расстояние от BPB до среднего уровня спокойной водной поверхности. Для анализа характеристик отражённого сигнала используется феноменологическая модель морской поверхности, а форма диаграммы обратного рассеяния обычно гауссова. При этом сигнал, отражённый от облучаемой области, определяется статистическими свойствами морской поверхности [7].

Для высот ниже $H \leq 500\,\mathrm{m}$ анализ характеристик радиовысотомерных сигналов, отражённых от неровной морской поверхности, который основан на её стационарном представлении, становится неверным, т. к. размер облучаемой на поверхности области сравним с радиусом корреляции неровностей. Следовательно, отражённое поле формируется отражёниями от единичных крупномасштабных неровностей и множества более мелких неровностей, расположенных на поверхности крупных неровностей. Это типичный случай нестационарного поля. Формирование оценки высоты в ВРВ при этом условии можно провести относительно крупномасштабного рельефа, если последний является информационным параметром. При этом локальная диаграмма обратного рассеяния морской поверхности — характеристика не только этой поверхности, но и положения

^{*} bookmaggot@yandex.ru

относительно неё летательного аппарата. Ширина этой диаграммы определяется статистическими характеристиками мелких неровностей на поверхности крупных ветровых волн. В этом случае текущая оценка высоты в следящем BPB зависит от случайных функций, описывающих крупные неровности морской поверхности и их наклоны.

1. ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОТРАЖЁННЫЙ СИГНАЛ ВЫСОКОТОЧНОГО АВИАЦИОННОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

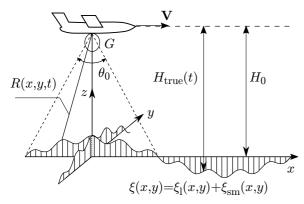


Рис. 1. Осуществление текущей оценки высоты с учётом вертикального профиля крупномасштабного рельефа морской поверхности при полёте ВРВ на малых высотах

Особенность работы высокоточного радиовысотомера в режиме малых высот заключается в том, что он позволяет оценить вертикальный профиль крупномасштабного рельефа (см. рис. 1).

Поверхность задаётся в виде суперпозиции крупных (ξ_1) и мелких (ξ_{sm}) неровностей, моделирующих крупные ветровые морские (или волны зыби) и мелкие ветровые волны (или рябь) на поверхности крупных волн соответственно [8]:

$$\xi(x,y) = \xi_{l}(x,y) + \xi_{sm}(x,y).$$
 (1)

Используя метод нахождения поля обратного рассеяния от двухмасштабной модели поверхности S типа (1) в приближении Кирхгофа и полагая, что мелкие неровности не разрешаются мо-

дулирующей функцией сигнала, запишем выражение для сигнала с частотой ω_0 на выходе линейной части оптимального приёмника BPB [1]:

$$\dot{u}(t) = A \int_{S} \dot{\rho}_{s} \left(t - \frac{2R_{0}(s,t) - 2\xi(s)}{c} \right) \frac{G(s,t)}{R^{2}(s,t)} \exp\{2jk \left[\xi_{l}(s) + \xi_{sm}(s) \right] - 2jkR_{0}(s,t) + j\omega_{0}t \right\} ds, \quad (2)$$

где A — масштабный коэффициент, G(s) — диаграмма направленности антенны BPB, R_0 — расстояние до среднего уровня поверхности $R(s,t)=R_0(s)-\xi(s)$, $\dot{\rho}_{\rm s}(t)$ — автокорреляционная функция зондирующего сигнала, $k=2\pi/\lambda$ — волновое число, ${\rm d} s$ — элементарная площадка на поверхности, t — время, c — скорость света в вакууме.

Напряжение на выходе квадратичного детектора приёмника является входным для дискриминатора BPB:

$$u(t) = \dot{u}(t)\tilde{\dot{u}}(t) =$$

$$= A^{2} \iint_{S_{1}S_{2}} \frac{G(s_{1},t)G(s_{2},t)}{R^{2}(s_{1},t)R^{2}(s_{2},t)} \dot{\rho}_{s} \left(t - \frac{2\left[R_{0}(s_{1},t) - \xi(s_{1},t)\right]}{c}\right) \tilde{\rho}_{s} \left(t - \frac{2\left[R_{0}(s_{2},t) - \xi(s_{2},t)\right]}{c}\right) \times$$

$$\times \exp\left\{2jk\left[\xi_{sm}(s_{1}) - \xi_{sm}(s_{2}) + \xi_{l}(s_{1}) - \xi_{l}(s_{2}) - R_{0}(s_{1},t) + R_{0}(s_{2},t)\right]\right\} ds_{1} ds_{2}, \quad (3)$$

где тильда означает комплексное сопряжение. Поскольку все сомножители в (3), кроме фазового, являются медленно меняющимися функциями, то для них можно считать $S_1 = S_2$.

Для нахождения среднего по множеству напряжения на входе дискриминатора усредним (3) по мелким неровностям поверхности. При этом можно считать, что их число в пределах облучаемой области велико, а двумерный закон распределения мелких неровностей является нормальным с дисперсией $\sigma_{\rm sm}^2$:

$$W(\xi_{\rm sm1}, \xi_{\rm sm2}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\rm sm}^2 \sqrt{1 - \rho_{\rm sm}^2}} \exp\left[-\frac{\xi_{\rm sm1}^2 + \xi_{\rm sm2}^2 - 2\rho_{\rm sm}\xi_{\rm sm1}\xi_{\rm sm2}}{2\sigma_{\rm sm}^2(1 - \rho_{\rm sm}^2)}\right],\tag{4}$$

где корреляционная функция мелких неровностей имеет вид

$$r_{\rm sm}(\Delta x, \Delta y) = \sigma_{\rm sm}^2 \exp\left(-\pi \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{l_{\rm sm}^2}\right) = \sigma_{\rm sm}^2 \rho_{\rm sm}(\Delta x, \Delta y),\tag{5}$$

 $ho_{
m sm}(\Delta x,\Delta y)$ — коэффициент корреляции, $l_{
m sm}$ — пространственный интервал корреляции мелких неровностей.

В результате усреднения (обозначено горизонтальной чертой) получим, что

$$\overline{u_{\text{in}}(t)} = A^{2} \iint_{S_{1}S_{2}} \frac{G^{2}(s_{1},t)}{R^{4}(s_{1},t)} \dot{\rho}_{s}^{2} \left(t - \frac{2 \left[R_{0}(s_{1},t) - \xi_{\text{l}}(s_{1}) \right]}{c} \right) \times \\
\times \exp\left\{ 2jk \left[\xi_{\text{l}}(s_{1}) - \xi_{\text{l}}(s_{2}) - R_{0}(s_{1},t) + R_{0}(s_{2},t) \right] \right\} \overline{\exp\left\{ 2jk \left[\xi_{\text{sm}}(s_{1}) - \xi_{\text{sm}}(s_{2}) \right] \right\}} \, ds_{1} \, ds_{2} = \\
= A^{2} \iint_{S_{1}S_{2}} \frac{G^{2}(s_{1},t)}{R^{4}(s_{1},t)} \dot{\rho}_{s}^{2} \left(t - \frac{2 \left[R_{0}(s_{1},t) - \xi_{\text{l}}(s_{1}) \right]}{c} \right) \exp\left\{ 2jk \left[\xi_{\text{l}}(s_{1}) - \xi_{\text{l}}(s_{2}) \right] \right\} \times \\
\times \exp\left\{ -2jk \left[R_{0}(s_{1},t) - R_{0}(s_{2},t) \right] \right\} \exp\left\{ -(2k\sigma_{\text{sm}})^{2} \left[1 - \rho_{\text{sm}}(\Delta x, \Delta y) \right] \right\} \, ds_{1} \, ds_{2}. \quad (6)$$

Поскольку случайная высота крупных неровностей $\xi_l(x,y)$ является информационным параметром, то усреднение по ним проводить нельзя и выражение (6) описывает усреднённую по мелким неровностям огибающую отражённого сигнала. В пределах радиуса корреляции мелких неровностей крутизна наклона крупных неровностей может считаться постоянной. Кроме того, для антенны BPB обычно ширина диаграммы направленности $\theta_0 < 1$ рад. В этих условиях разности функций в (6) равны

$$\xi_{\rm l}(s_1) - \xi_{\rm l}(s_2) \approx \Delta x \, \frac{\mathrm{d}\xi_{\rm l}(x,y)}{\mathrm{d}x} + \Delta y \, \frac{\mathrm{d}\xi_{\rm l}(x,y)}{\mathrm{d}y} \,,$$
 (7)

где $\Delta x,\,\Delta y$ — переменные интегрирования по $S_1;\,x,\,y$ — переменные интегрирования по S_2 и

$$R_0(s_1, t) - R_0(s_2, t) \approx -\frac{\Delta x(x - V_x t)}{H} - \frac{\Delta y(y - V_y t)}{H},$$
 (8)

где V_x , V_y — компоненты вектора скорости летательного аппарата в координатах (x,y). Также использовано приближение

$$R_0(x,y) \approx H + \frac{x^2 + y^2}{2H}.$$

Подставляя (7) и (8) в (6) и интегрируя по Δx , Δy , получим

$$\overline{u_{\rm in}(t)} = A^2 \int_S \frac{G^2(s,t)}{R^4(s,t)} G_{\rm bs}\left(s, \frac{\mathrm{d}\xi_1}{\mathrm{d}s}, t\right) \dot{\rho}_{\rm s}^2\left(t - \frac{2\left[R_0(s,t) - \xi_1(s)\right]}{c}\right) \mathrm{d}s,\tag{9}$$

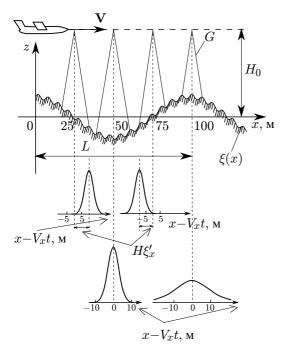


Рис. 2. Зависимость локальной диаграммы обратного рассеяния от времени и профиля морской поверхности при $H=100\,\mathrm{m},\,V_x=200\,\mathrm{m/c},\,\Delta\theta_\mathrm{bs}=0.1\,\mathrm{pag},\,\xi_0=2\,\mathrm{m},\,L=100\,\mathrm{m},\,\xi(x)=\xi_0\cos(2\pi x/L)$

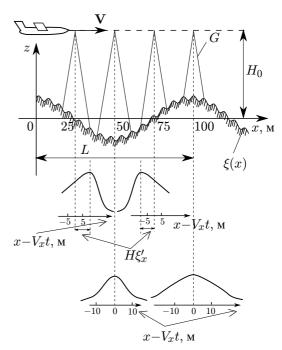


Рис. 3. Зависимость локальной диаграммы обратного рассеяния от времени и профиля морской поверхности при $H=100\,\mathrm{m},\ V_x=200\,\mathrm{m/c},$ $\Delta\theta_\mathrm{bs}=0.34\,\mathrm{pag},\ \xi_0=2\,\mathrm{m},\ L=100\,\mathrm{m},\ \xi(x)=\xi_0\cos(2\pi x/L)$

где выражение для локальной диаграммы обратного рассеяния имеет вид

$$G_{\rm bs}\left(s, \frac{d\xi_{\rm l}}{ds}, t\right) = \exp\left\{-\pi \frac{\left[x - V_x t + H d\xi(x, y) / dx\right]^2 + \left[y - V_y t + H d\xi(x, y) / dy\right]^2}{H_0^2 \Delta\theta_{\rm bs}^2}\right\},\tag{10}$$

 $\Delta\theta_{\rm bs}=2\pi\sigma_{\rm sm}/l_{\rm sm}$ — эффективная ширина диаграммы обратного рассеяния мелких неровностей морской поверхности, характерные размеры которых не превосходят длины радиоволны зондирующего сигнала λ . На рис. 2 и 3 показаны зависимости локальной диаграммы обратного рассеяния от времени и профиля поверхности.

При работе ВРВ на малых высотах размер облучаемого на поверхности моря пятна не превышает и часто даже меньше протяжённости крупных ветровых волн. При этом крупные волны изменяют локальный наклон морской поверхности в облучаемой области, вследствие чего изменяются и рассеивающие свойства мелковолновой структуры на поверхности крупных волн. Это является причиной деформации локальной диаграммы обратного рассеяния морской поверхности. Следовательно, при работе ВРВ на малых высотах эта величина является характеристикой отражающих свойств морской поверхности. В отличие от большинства других ситуаций, когда пятно облучения существенно превышает характерные размеры крупных неровностей поверхности, в данном случае диаграмма обратного рассеяния зависит от времени и положения летательного аппарата относительно поверхности.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКУЩЕЙ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ В ВЫСОКОТОЧНОМ РАДИОВЫСОТОМЕРЕ

Используя (9), найдём выражение для дискриминационной характеристики дискриминатора следящей за высотой системы [1] (см. рис. 4) BPB:

$$z(\varepsilon,t) = A_1^2 \int_{\mathcal{S}} \frac{G^2(s,t)}{R^4(s,t)} G_{bs}\left(s, \frac{\mathrm{d}\xi_l}{\mathrm{d}s}, t\right) \left[C_1(\varepsilon(s) + \Delta; 0) - C_1(\varepsilon(s) - \Delta; 0)\right] \mathrm{d}s, \tag{11}$$

где $C_1[\varepsilon(s)\pm\Delta;0]$ — функция неопределённости квадрата огибающей автокорреляционной функции зондирующего сигнала и опорного импульса при частотном сдвиге $\Omega=0,\ A_1$ — масштабный коэффициент, $\varepsilon(s)=2\left[R(s,t)-H^*\right]/c$ — текущая расстройка оценки высоты H^* в дискриминаторе, 2Δ — расстояние между опорными сигналами.

Таким образом, дискриминационная характеристика BPB, зависящая от времени и наклонов поверхности, изменяется в течение полёта случайным образом. В точке слежения правую часть (11) можно приравнять к нулю и получить интегральное уравнение для оценки высоты BPB:

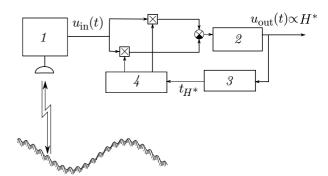


Рис. 4. Блок-схема следящей системы высокоточного радиовысотомера: 1 — передатчик и приёмник, 2 — экстраполятор, 3 — временной модулятор, 4 — генератор опорных импульсов

$$\int_{S} \frac{G^{2}(s,t)}{R^{4}(s,t)} G_{bs}\left(s, \frac{\mathrm{d}\xi_{1}}{\mathrm{d}s}, t\right) \left\{ C_{1}[\varepsilon(s) + \Delta; 0] - C_{1}[\varepsilon(s) - \Delta; 0] \right\} \mathrm{d}s = 0.$$
 (12)

При интегральном методе обработки сигнала (медианным образом), когда опорные импульсы значительно шире отражённых и взаимная функция неопределённости медленно зависит от $\varepsilon(s)$, используем следующее приближение:

$$C_1[\varepsilon(s) + \Delta; 0] - C_1[\varepsilon(s) - \Delta; 0] \approx \left[\frac{\mathrm{d}C_1}{\mathrm{d}\varepsilon}(\Delta; 0) - \frac{\mathrm{d}C_1}{\mathrm{d}\varepsilon}(-\Delta; 0) \right] \varepsilon(s). \tag{13}$$

Учитывая (13), интегральное уравнение (12) преобразуем к виду

$$\int_{S} \frac{G^{2}(s,t)}{R^{4}(s,t)} G_{bs}\left(s, \frac{d\xi_{l}}{ds}, t\right) \left[R_{0}(s,t) - \xi_{l}(s) - H^{*}\right] ds = 0.$$
(14)

Решая (14) относительно H^* , получим

$$H^*(t) = \frac{\int_{S} \left[G^2(s,t)/R^4(s) \right] G_{\text{bs}}(s, \, \mathrm{d}\xi_{\text{l}}/\,\mathrm{d}s, t) \left[R_0(s,t) - \xi_{\text{l}}(s,t) \right] \, \mathrm{d}s}{\int_{S} \left[G^2(s,t)/R^4(s) \right] G_{\text{bs}}(s, \, \mathrm{d}\xi_{\text{l}}/\,\mathrm{d}s, t) \, \, \mathrm{d}s}$$
(15)

Выражение (15) определяет алгоритм формирования оценки высоты в следящем ВРВ при интегральной обработке сигнала. Непосредственное вычисление (15) в общем случае невозможно, т.к. подынтегральные выражения зависят от случайных функций, описывающих крупные неровности и их наклоны.

Для анализа формирования оценки высоты BPB в режиме измерения профиля поверхности рассмотрим частный случай. Пусть в пределах облучаемого пятна производная крупных неровностей постоянна. Для вычисления (15) используем аппроксимацию диаграммы направленности антенны в виде

$$G(x,y) = \exp\left(-\pi \frac{x^2 + y^2}{H_0^2 \theta_0^2}\right). \tag{16}$$

Подставляя (16) в (15) и учитывая, что $R_0 \approx H_0 + (x^2 + y^2)/(2H_0)$, получим

$$H^{*}(t) = H_{0} + \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{x^{2} + y^{2}}{2H_{0}} - \xi_{l}(x, y) \right] \exp \left[-2\pi \frac{x^{2} + y^{2}}{H_{0}^{2}\theta_{0}^{2}} - \pi \frac{(x - V_{x}t + H_{0}\xi'_{x})^{2} + (y - V_{y}t + H_{0}\xi'_{y})^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{bs}^{2}} \right] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-2\pi \frac{x^{2} + y^{2}}{H_{0}^{2}\theta_{0}^{2}} - \pi \frac{(x - V_{x}t + H_{0}\xi'_{x})^{2} + (y - V_{y}t + H_{0}\xi'_{y})^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{bs}^{2}} \right] dx dy} = H_{0} + \frac{H_{0}\Delta\theta_{eq}^{2}}{2\pi} \left\{ 1 + \pi \frac{\Delta\theta_{eq}^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{bs}^{4}} \left[(V_{x}t - H_{0}\xi'_{x})^{2} + (V_{y}t - H_{0}\xi'_{y})^{2} \right] \right\} - \exp \left\{ -\pi \frac{\left[(V_{x}t - H_{0}\xi'_{x})^{2} + (V_{y}t - H_{0}\xi'_{y})^{2} \right]^{2}\Delta\theta_{eq}^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{bs}^{4}} \right\} \frac{1}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{eq}^{2}} \times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \xi(x - V_{x}t; y - V_{y}t) \exp \left\{ -\pi \frac{x^{2} + y^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{eq}^{2}} + \frac{2\pi}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{bs}^{2}} \left[(V_{x}t - H_{0}\xi'_{x}) x + (V_{y}t - H_{0}\xi'_{y}) y \right] \right\} dx dy = H_{0} + H_{1}^{*}(t) + H_{2}^{*}(t), \quad (17)$$

где

$$\xi_x'(t) = \frac{\mathrm{d}\xi(x - V_x t, y - V_y t)}{\mathrm{d}x}, \qquad \xi_y'(t) = \frac{\mathrm{d}\xi(x - V_x t, y - V_y t)}{\mathrm{d}y}, \qquad \Delta\theta_{\mathrm{eq}} = \frac{\Delta\theta_{\mathrm{bs}}\theta_a}{\sqrt{\Delta\theta_{\mathrm{bs}}^2 + \theta_{\mathrm{a}}^2}},$$

 $\theta_{\rm a} = \theta_0/\sqrt{2}, \, \Delta\theta_{\rm eq} -$ эквивалентная ширина диаграммы (с учётом диаграмм направленности и обратного рассеяния).

Из (17) следует, что оценка высоты на выходе следящей системы ВРВ представляет собой сумму трёх слагаемых: высоты H_0 до среднего уровня; смещения H_1^* оценки высоты, изменяющегося во времени в зависимости от наклонов крупных неровностей; составляющей H_2^* , связанной с рельефом поверхности.

3. РАСЧЁТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ

Для расчёта текущей методической погрешности оценки высоты BPB на малых высотах необходима обоснованная аппроксимация крупных неровностей морской поверхности детерминированной функцией $\xi_l(x,y)$. В простейшем случае для этого может быть использована гармоническая функция

$$\xi(x,y) = \xi_0 \cos\left[\frac{2\pi}{L} \left(x - V_x t\right)\right],\tag{18}$$

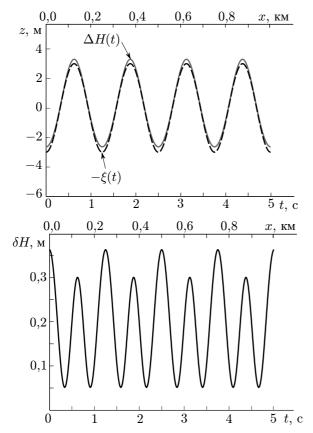


Рис. 5. Временна́я зависимость приращения из-за рельефа измеренной высоты по отношению к профилю морской поверхности $\xi(t)$ (со знаком минус) и методической погрешности измерения высоты над морской поверхностью при $H_0=100\,\mathrm{m}$, $\xi_0=3\,\mathrm{m}$, $V_x=200\,\mathrm{m/c}$, $\Delta\theta_\mathrm{bs}=0.15\,\mathrm{pag}$, $\theta_0=0.526\,\mathrm{pag}$, $L=250\,\mathrm{m}$, $\xi(x)=\xi_0\cos(2\pi x/L)$

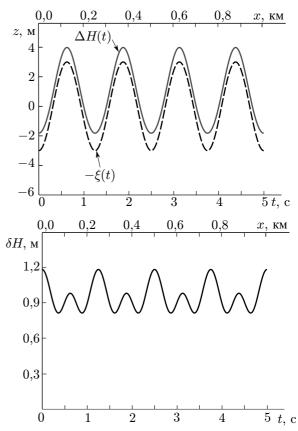


Рис. 6. Временна́я зависимость приращения из-за рельефа измеренной высоты по отношению к профилю морской поверхности $\xi(t)$ (со знаком минус) и методической погрешности измерения высоты над морской поверхностью при $H_0=100\,\mathrm{m}$, $\xi_0=3\,\mathrm{m}$, $V_x=200\,\mathrm{m/c}$, $\Delta\theta_\mathrm{bs}=0.3\,\mathrm{pag}$, $\theta_0=0.526\,\mathrm{pag}$, $L=250\,\mathrm{m}$, $\xi(x)=\xi_0\cos(2\pi x/L)$

где ξ_0 — ордината морской волны и L — её длина в направлении x. Подставляя в (17) аппроксимацию крупных неровностей (18) и их производных, а также полагая ${\bf V}=\{V_x,0,0\},$ после преобразований получим

$$H^{*}(t) = H_{0} + H_{1}^{*}(t) + H_{2}^{*}(t) =$$

$$= H_{0} + \frac{H_{0}\Delta\theta_{\text{eq}}^{2}}{2\pi} \left\{ 1 + \pi \frac{\Delta\theta_{\text{eq}}^{2}}{H_{0}^{2}\Delta\theta_{\text{bs}}^{4}} \left[V_{x}t + \sqrt{2\pi} H_{0}\gamma_{l} \sin\left(\frac{2\pi}{L}V_{x}t\right) \right]^{2} \right\} -$$

$$-\xi_{0} \cos\left(\frac{2\pi}{L} \left\{ \frac{\Delta\theta_{\text{eq}}^{2}}{\Delta\theta_{\text{bs}}^{2}} \left[V_{x}t + \sqrt{2\pi} H_{0}\gamma_{l} \sin\left(\frac{2\pi}{L}V_{x}t\right) \right] - V_{x}t \right\} \right) \exp\left(-\pi \frac{H_{0}^{2}\Delta\theta_{\text{eq}}^{2}}{L^{2}}\right), \quad (19)$$

где $\gamma_{\rm l} = \sqrt{2\pi}\,\xi_0/L$ — средний угол наклона крупных неровностей.

С учётом (18) истинную высоту полёта летательного аппарата определим из выражения

$$H_{\text{true}}(t) = H_0 - \xi_0 \cos(2\pi V_x t/L).$$
 (20)

Сравнивая (19) и (20), можно сделать выводы относительно методических погрешностей ВРВ

при измерении текущей высоты полёта на малых высотах, см. рис. 5–7, где

$$\Delta H(t) = H^*(t) - H_0, \qquad \delta H(t) = H^*(t) - H_{\text{true}}(t).$$

Составляющая $H_1^*(t)$ в (19) характеризует смещение оценки высоты $H^*(t)$ относительно истинного значения $H_{\text{true}}(t)$. Это смещение существенно возрастает с ростом ширины диаграммы направленности антенны BPB и ширины локальной диаграммы обратного рассеяния поверхности. Поскольку ширина диаграммы направленности антенны BPB на практике обычно выбирается достаточно большой (не менее 0,5 рад), что связано с необходимостью сохранять работоспособность BPB при крене и тангаже летательного аппарата, то определяющей становится ширина локальной диаграммы обратного рассеяния поверхности. Смещение оценки связано с деформацией локальной диаграммы обратного рассеяния поверхности и смещением медианного значения при интегральном методе обработки сигнала (см. рис. 3 и 4). Отклонение составляющей $H_2^*(t)$ в (19) от $\xi_1(t)$ определяется отношением размеров облучаемого на морской поверхности пятна к длине морской волны L в направлении полёта.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

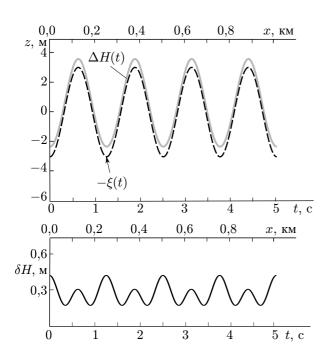


Рис. 7. Временна́я зависимость приращения из-за рельефа измеренной высоты по отношению к профилю морской поверхности $\xi(t)$ (со знаком минус) и методической погрешности измерения высоты над морской поверхностью при $H_0=100\,\mathrm{m},\ \xi_0=3\,\mathrm{m},\ V_x=200\,\mathrm{m/c},\ \Delta\theta_\mathrm{bs}=0.3\,\mathrm{pag},\ \theta_0=0.263\,\mathrm{pag},\ L=250\,\mathrm{m},\ \xi(x)=\xi_0\cos(2\pi x/L)$

- 1) При работе высокоточного радиовысотомера на малых высотах в режиме измерения профиля морской поверхности характеристикой её отражающих свойств является функция $G_{\rm bs}(s,{\rm d}\xi_{\rm l}/{\rm d}s,t)$, которая зависит от времени. Последнее отличает рассмотренную ситуацию от большинства других, когда пятно облучения существенно превышает характерные размеры крупных неровностей поверхности.
- 2) Локальная диаграмма обратного рассеяния морской поверхности является характеристикой не только этой поверхности, но и положения относительно неё летательного аппарата.
- Эффективная ширина локальной диаграммы обратного рассеяния определяется статистическими характеристиками мелких неровностей.
 На вершине крупных ветровых волн ширина локальной диаграммы обратного рассеяния растёт, во впадине, наоборот, падает.
- 4) Максимум локальной диаграммы обратного рассеяния зависит от производной $\xi' = \mathrm{d}\xi/\mathrm{d}t$ для крупных неровностей морской поверхности, т. е. смещается пропорционально наклонам крупных неровностей поверхности в сторону падения склона на величину $H_0\xi'$. В то же время при широкой диаграмме обратного рассеяния на скло-

нах рельефа нарушается симметрия локальной диаграммы рассеяния.

5) Непосредственное вычисление текущей оценки высоты в следящем ВРВ при интегральной обработке сигнала в общем случае затруднительно, т. к. подынтегральные выражения в (15) зависят от случайных функций, описывающих крупные неровности морской поверхности и их наклоны.

- 6) Оценка высоты на выходе следящей системы BPB представляет собой сумму трёх слагаемых: высоты до среднего уровня; смещения оценки высоты, изменяющегося во времени в зависимости от наклонов крупных неровностей; составляющей, связанной с рельефом поверхности.
- 7) Для расчёта текущей методической погрешности оценки высоты высокоточного авиационного радиовысотомера на малых высотах необходима обоснованная аппроксимация крупных неровностей морской поверхности детерминированной функцией $\xi_1(x,y)$.
- 8) В статье рассчитана погрешность оценки высоты для простейшего случая, когда для аппроксимации крупных неровностей использована гармоническая функция, и показано, что погрешность возрастает при расширении диаграммы направленности антенны ВРВ и локальной диаграммы обратного рассеяния.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 15–11–10022) и Госзадания в проектной части 8.152.2014/K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовы
сотометрии. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
- 2. Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И. Локационные методы исследования объектов и сред: Уч. для вузов. М.: Изд. центр «Академия», 2011. 384 с.
- 3. Сосновский А. А., Хаймович И. А. Авиационная радионавигация. М.: Транспорт, 1980. 255 с.
- 4. Овчинников Л. Е. Теория и методы радиовысотометрии: уч. пособие. Ленинград: Изд-во Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина), 1979. 68 с.
- 5. Ka M.-H., Baskakov A. I., Kononov A. A. // IEICE Trans. Comm. 2007. V. E90–B, No. 11. P. 3 237.
- 6. Баскаков А. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 5. С. 710.
- 7. Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. Радиолокация морской поверхности. Ростов-на-Дону: Издво Ростовского университета, 1978. 144 с.
- 8. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: Физматлит, 2008. 704 с.

Поступила в редакцию 20 мая 2016 г.; принята в печать 13 февраля 2017 г.

METHODICAL ERRORS OF A HIGH-PRECISION RADAR ALTIMETER OPERATING ABOVE THE SEA SURFACE AT LOW ALTITUDES

A. I. Baskakov, A. A. Komarov, and M. S. Mikhailov

When a high-precision aircraft radar altimeter operates at low altitudes in the mode of measuring the profile of the sea surface, the local backscattering pattern, which depends on time as distinct from the majority of other situations where the irradiation spot significantly increases the characteristic dimensions of the large-scale surface roughness, is the feature of the reflecting properties of the latter. In this case, the altitude estimate at the servo-system output of the flying-vehicle radar altimeter is a sum of three terms, namely, the altitude to the average level, the altitude-estimate shift, which varies in time as a function of the inclinations of the large-scale roughness, and the component related to the surface topography. The current methodical error of the altitude estimation by the high-precision aircraft radar altimeter at low altitudes can be calculated by the well-founded approximation of the large-scale sea-surface roughness by the determinate function.