

## Оценка влияния сферичности Земли на форму отраженного радиолокационного импульса для ножевой диаграммы направленности антенны при надирном зондировании морской поверхности

В.Ю. Караев, Е.М. Мешков

*Институт прикладной физики РАН  
603950, Н.Новгород, Ульянова, 46  
E-mail: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Рассмотрена задача о влиянии шарообразности земной поверхности на форму отраженного импульса для космического радиоальтиметра с ножевой диаграммой направленности антенны. Получено аналитическое выражение для формы отраженного импульса в случае надирного зондирования морской поверхности. Выполненные численные оценки показали, что в отличие от радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны, форма отраженного импульса на временах, обычно используемых при обработке, слабо зависит от кривизны морской поверхности в случае применения в радиоальтиметре ножевой диаграммы направленности антенны.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиоальтиметр с ножевой диаграммой направленности антенны, кривизна рассеивающей поверхности, форма отраженного импульса.

### Введение

Спутниковые радиоальтиметры активно используются для измерения высоты значительного волнения вдоль траектории полета. За счет применения узкой диаграммы направленности антенны достигается высокое пространственное разрешение, необходимое для измерения среднего уровня Мирового океана. В тоже время, для изучения структуры процессов на морской поверхности, необходимо измерять высоту волнения в широкой полосе обзора с заданным разрешением. Это возможно, если применять радиоальтиметр с ножевой диаграммой направленности антенны, повернутой под углом к направлению полета. В работе (Караев, Мешков, 2011) приведена формула для формы отраженного импульса для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны в предположении «плоской» Земли. Это справедливо для измерений с самолета, однако при размещении радиоальтиметра на спутнике необходимо учитывать, что Земля представляет собой шар. В данной работе рассматривается форма отраженного импульса с учетом кривизны морской поверхности для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

### Схема зондирования

На рис. 1 показана схема измерения. Радиоальтиметр летит на высоте  $H_0$  над морской поверхностью и расстояние до отражающей точки на морской поверхности  $R$ . Точка отражения расположена на «глубине»  $h$ , если за нулевой уровень принять точку на поверхности непосредственно под радиоальтиметром.

Расстояние от радиолокатора до точки отражения можно записать в следующем виде:

$$R = \sqrt{H_0^2 + 2h \cdot (H_0 + R_3)}, \quad (1)$$

где  $R_3$  – радиус Земли. При проведении вычислений будем считать, что радиус Земли  $R_3$  равен 6371 км.

С другой стороны, смещение  $h$  по оси  $Z$  можно вычислить по следующей формуле:

$$h = R_3 - \sqrt{R_3^2 - x^2}. \quad (2)$$

Используя условие малости параметра  $h$  по сравнению с  $H_0$ , расстояние до точки отражения можно представить в следующем виде:

$$R \cong H_0 + \frac{x^2}{2} \left( \frac{H_0 + R_3}{H_0 R_3} \right). \quad (3)$$

При небольшой, по сравнению с радиусом Земли  $R_3$ , высоте полета  $H_0$  выражение (3) переходит в формулу для «плоской» Земли. Для сохранения одинакового вида формул в обоих случаях введем понятие «эффективной» высоты полета:

$$H_* = H_0 \frac{R_3}{H_0 + R_3}. \quad (4)$$

### Форма отраженного импульса для ножевой диаграммы направленности антенны

При малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках крупномасштабного волнения, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Учитывая то, что нас интересует только форма отраженного импульса, то формулу для отраженного сигнала приведем в упрощенном виде (Зубкович, 1968; Гарнакерьян, Сосунов, 1978):

$$E(t) \sim \int_S E_0(R) \cdot G(\vec{r}) \exp(-2kRi) d\vec{r}, \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние от радиолокатора до точки отражения на рассеивающей площадке  $S$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число падающего излучения;  $E_0(R)$  – амплитуда поля вблизи отражающей поверхности.

Функция  $G(\vec{r})$  задает диаграмму направленности антенны и при надирном зондировании имеет следующий вид (Зубкович, 1968):

$$G(\vec{r}) = \exp \left[ -1.38 \left( \frac{x^2}{H_0^2 \delta_x^2} + \frac{y^2}{H_0^2 \delta_y^2} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – ширина диаграммы направленности антенны в угломестной и азимутальной плоскостях соответственно.

С учетом кривизны морской поверхности «высота» полета будет зависеть от координаты  $x$ , т.е.  $H_0 + h$ . Однако при углах падения менее  $12-15^\circ$  (область квазизеркального рассеяния) и высоте полета более 800 км, можно пренебречь изменением  $H_0$  в формуле (6).

В результате мощность отраженного сигнала в момент времени  $t$  можно записать в следующем виде (Басс, Фукс, 1972; Гарнакерьян, Сосунов, 1978):

$$P(t) \sim \left\langle \int_S E_0(R_1) \cdot G(\vec{r}_1) E_0(R_2) \cdot G(\vec{r}_2) \exp(-2kR_1 i + 2ikR_2) d\vec{r} \right\rangle, \quad (7)$$

где скобки  $\langle \dots \rangle$  обозначают статистическое усреднение по морской поверхности, которая задается случайной функцией  $\zeta(\vec{r}, t)$ . В ходе дальнейших преобразований для  $R_1$  и  $R_2$  будет использоваться разложение (3).

Известно, что функция распределения высот является гауссовой и после выполнения стандартной процедуры усреднения формула для мощности отраженного сигнала примет следующий вид (Зубкович, 1968; Караев, Каневский, 1999):

$$P(t) \sim \iint_S |G(\vec{r})|^4 dx dy \iint d\rho_x d\rho_y \cdot \exp\left[\frac{2k}{H_*} ix\rho_x + \frac{2k}{H_*} iy\rho_y\right] \cdot \exp\left[-2k^2(\sigma_{xx}^2 \rho_x^2 + \sigma_{yy}^2 \rho_y^2)\right], \quad (8)$$

где  $\sigma_{xx}^2$  и  $\sigma_{yy}^2$  – дисперсии наклонов крупномасштабного волнения вдоль осей  $X$  и  $Y$  и  $\rho_x = x_2 - x_1$ ,  $\rho_y = y_2 - y_1$ .

После интегрирования формулы (8) по  $\rho_x$  и  $\rho_y$  выражение для мощности отраженного сигнала определяется следующей формулой:

$$P(t) \sim \iint_S dx dy \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_{xx}^2 H_*^2} - \frac{5.52x^2}{\delta_x^2 H_0^2}\right] \times \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_{yy}^2 H_*^2} - \frac{5.52y^2}{\delta_y^2 H_0^2}\right]. \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что мощность отраженного сигнала для радиоальтиметра с несимметричной антенной будет зависеть от ориентации диаграммы направленности антенны относительно направления распространения волнения.

Пределы интегрирования по  $X$  и  $Y$  зависят от времени, что приведет к формированию временной зависимости мощности отраженного импульса.

Учитывая особенности схемы проведения измерений (см. рис. 1), для вычисления интеграла лучше перейти из декартовой в полярную систему координат. В этом случае пределы интегрирования по азимутальному углу  $\varphi$  будут меняться от 0 до 360° и по радиусу  $\rho$  от 0 до  $\rho_0$ . Верхний предел  $\rho_0$  зависит от времени.

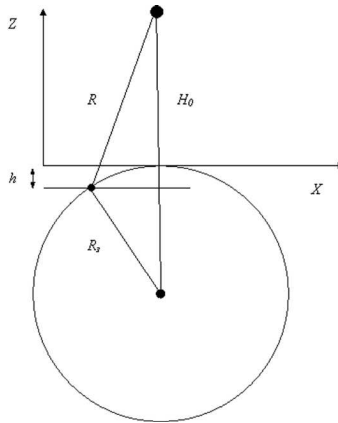


Рис. 1. Схема измерений

Для ножевой диаграммы направленности, когда  $\delta_x \gg \delta_y \approx 1^\circ$ , пределы интегрирования по азимутальному углу будут определяться шириной диаграммы направленности антенны по  $Y$ . В результате из (9) переходим к однократному интегралу по  $\rho$ , который и определяет форму отраженного импульса для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны:

$$P(t) \sim \int_0^{\rho_0} \rho \cdot \exp[-A \cdot \rho^2] d\rho \sim 1 - \exp[-A \rho_0^2], \quad (10)$$

где

$$A = \frac{\delta_x^2 / 2 + 5.52 \sigma_{xx}^2 H_*^2 / H_0^2}{H_*^2 \delta_x^2 \sigma_{xx}^2}.$$

В данном случае форма отраженного импульса зависит от дисперсии наклонов  $\sigma_{xx}^2$  в направлении ориентации ножевой антенны.

После касания электромагнитной волны поверхности в момент  $t_0$  начинается формирование переднего фронта отраженного импульса, которое заканчивается в момент  $t_0 + \tau_u$ .

Передний фронт отраженного импульса лежит в интервале от  $t_0$  до  $t_0 + \tau_u$ , где  $t_0 = 2H_0/c$  и задается следующей формулой:

$$P(t) = P(t_0 + \tau) = 1 - \exp[-AH_*c\tau] \quad (11)$$

После этого начинается формирование заднего фронта отраженного импульса и его форма задается следующим выражением:

$$P(t_0 + \tau) = A_0 \exp[-AH_*c\tau] \quad (12)$$

где

$$A_0 = \frac{1 - \exp[-AH_*c\tau_u]}{\exp[-AH_*c\tau_u]}.$$

Эти формулы справедливы для «гладкой» (высота волн равна 0) отражающей поверхности. При облучении реальной морской поверхности рассеяние начинается при достижении передним фронтом зондирующего импульса гребней волн и заканчивается при достижении задним фронтом впадин. Поэтому для нахождения интенсивности импульса, отраженного от морской поверхности в момент  $t$ , необходимо усреднить по высоте волнения (Brown, 1977; Chelton, et al., 1989):

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\zeta^2}} \int_{-\infty}^{\zeta_m} P(t - 2\zeta/c) \cdot \exp\left[-\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2}\right] d\zeta \quad (13)$$

где переменная  $t = 0$  в момент  $t_0$ ;  $\sigma_\zeta^2$  – дисперсия высот. Для положительного значения высоты  $\zeta$  относительно среднего уровня время  $t$  становится отрицательным.

Форма отраженного импульса радиоальтиметра задается формулами (11) и (12). Передний фронт отраженного импульса обозначим  $P_1(t)$ , а задний фронт –  $P_2(t)$ , т.е.

$$P(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ P_1, & 0 \leq t \leq \tau_u \\ P_2, & t > \tau_u \end{cases} \quad (14)$$

Для удобства интегрирования, исходный интеграл разделим на три участка в соответствии с (14) и выполним интегрирование. Для примера приведем выражение для отраженного импульса на первом участке ( $t \leq 0$ ):

$$F(t) = \frac{A_0 \exp(-AH_*ct)}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}} \int_{-\infty}^{t-\tau_u} \exp\left(-x^2/(2\sigma_t^2) + AH_*c \cdot x\right) dx + \\ + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}} \int_{t-\tau_u}^t \left[ \exp\left(-x^2/(2\sigma_t^2)\right) - \exp\left(-x^2/(2\sigma_t^2) + AH_*c \cdot x\right) \cdot \exp(-AH_*ct) \right] dx \quad (15)$$

где введена новая переменная  $\sigma_t^2 = \sigma_\zeta^2 \cdot \frac{4}{c^2}$ .

Все интегралы вычисляются аналитически и окончательная формула для формы отраженного импульса имеет следующий вид:

$$F(t) = I_1 + I_2 - I_3, \quad (16)$$

где

$$I_1 = \frac{A_0}{2} \cdot \exp\left[-AH_*c \cdot t + A^2H_*^2c^2 \cdot \frac{\sigma_t^2}{2}\right] \cdot \left[1 - \Phi\left(AH_*c\sqrt{\sigma_t^2/2} + (\tau_u - t)/\sqrt{2\sigma_t^2}\right)\right]$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left[ \Phi\left((\tau_u - t)/\sqrt{2\sigma_t^2}\right) + \Phi\left(t/\sqrt{2\sigma_t^2}\right) \right]$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot \exp\left[-AH_*c \cdot t + A^2H_*^2c^2 \cdot \frac{\sigma_t^2}{2}\right] \times \\ \times \left[ \Phi\left(AH_*c\sqrt{\sigma_t^2/2} + (\tau_u - t)/\sqrt{2\sigma_t^2}\right) - \Phi\left(AH_*c\sqrt{\sigma_t^2/2} - t/\sqrt{2\sigma_t^2}\right) \right]$$

В формулах интеграл вероятностей с конечным пределом обозначен функцией  $\Phi(t)$ .

### Моделирование

Рассмотрим влияние параметров волнения и ширины диаграммы направленности антенны на форму отраженного импульса. При моделировании использовался прямоугольный импульс длительностью 3 нс, высота полета 1200 км, диаграмма направленности антенны  $1^\circ \times 1^\circ$  и  $1^\circ \times 20^\circ$ . В процессе моделирования исследовалась зависимость формы отраженного импульса от дисперсии наклонов и высоты значительного волнения. Приведем некоторые характерные рисунки.

Изменчивость формы отраженного импульса от ширины диаграммы направленности антенны приведена на рис. 2 для плоской (пунктир) и шарообразной (сплошная линия) Земли.

Из рис. 2а видно, что для «плоской» Земли задний фронт отраженного импульса спадает значительно быстрее, чем для «шарообразной» в случае узкой диаграммы направленности антенны. Главным фактором, вызывающим быстрый спад заднего фронта отраженного импульса, является ширина диаграммы направленности антенны. Это видно из сравнения рис. 2а и 2б: в случае ножевой диаграммы направленности антенны имеем практически горизонтальную линию при малых временах задержки.

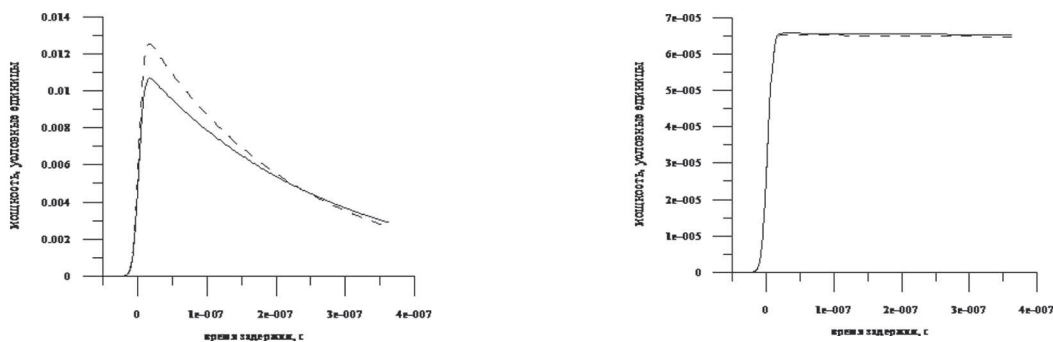


Рис. 2. Форма отраженного импульса для радиолокатора с узкой (а) и ножевой (б) диаграммами направленности антенны. Вычисления проведены для высоты полета  $H_0 = 1200$  км,  $\tau_u = 3$  нс,  $\sigma_{xx}^2 = 0,008$  и  $H_s = 4$  м. Пунктиром показана форма импульса для плоской Земли

Кривизна отражающей поверхности приводит к замедлению скорости спадания заднего фронта отраженного импульса, т.к. в этом случае угол падения внутри диаграммы направленности антенны в зависимости от времени задержки увеличивается медленнее. В тоже время, для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны (см. рис. 2б) за-

метных отличий между плоской и шарообразной Землей нет на временах задержки, которые обычно используются при обработке радиоальтиметрических данных.

Для ножевой диаграммы направленности влияние кривизны земной поверхности на форму импульса проявится только при существенном увеличении времени приема.

Было исследовано влияние дисперсии наклонов на форму отраженного импульса и показано, что дисперсия наклонов влияет на максимальную амплитуду, которой достигает мощность отраженного сигнала (амплитуда отраженного импульса). Увеличение дисперсии наклонов приводит к удлинению заднего фронта отраженного импульса. Этот эффект хорошо заметен для ножевой диаграммы направленности антенны и практически полностью нивелируется влиянием диаграммы направленности для узкой антенны.

### Заключение

В результате проведенного исследования была построена теоретическая модель формы отраженного импульса радиоальтиметра с ножевой диаграммой направленности антенны с учетом сферичности отражающей поверхности. Было показано, что в отличие от радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны, шарообразность Земли не оказывает существенного влияния на форму отраженного импульса радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны на временах задержки, которые обычно используются при обработке. Численные оценки показали, что дисперсия наклонов не оказывает существенного влияния на форму импульса для узкой диаграммы направленности антенны и сильно трансформирует задний фронт отраженного импульса для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны вне зависимости от кривизны рассеивающей поверхности.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 10-05-00181а и № 11-05-97014-р-п-а).

### Литература

1. *Гарнакерьян А., Сосунов А.* Радиолокация морской поверхности. Изд. Ростовского университета. 1978. 144 с.
2. *Зубкович С.* Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М. Советское радио. 1968. 224 с.
3. *Караев В., Каневский М.* К вопросу о радиолокационном определении параметров морского волнения // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. стр. 14–20.
4. *Караев В.Ю., Мешков Е.М.* Особенности измерения высоты значительного волнения радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны // Девятая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов), 14–18 ноября 2011, Москва, Тезисы конференции.
5. *Brown G.S.* The average impulse response of a rough surface and its application // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. V. 25. N 1. pp. 67–73.
6. *Chelton D., Wals E., MacArthur J.* Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, v. 6, pp. 407–438.

# Influence of Earth's sphericity on the waveform of the backscattered by the sea surface impulse for radar with knife-like antenna beam

V.Yu. Karaev, E.M. Meshkov

*Institute of Applied Physics RAS  
603950, N.Novgorod, 46, Uljanova str.  
E-mail: volod@hydro.appl.sci-nnov.ru.*

The problem of the influence of the earth's surface sphericity on the waveform of the backscattered impulse for a space altimeter with a knife-like antenna beam was investigated. The analytical formula for the waveform of the backscattered impulse in the case of nadir sounding of the sea surface was obtained. The performed numerical estimates have shown that in contrast to the radar with a narrow antenna beam, the waveform of the backscattered impulse, weakly depends on the sphericity of the sea surface for altimeter with knife-like antenna beam for the delay time, which commonly used at the data processing.

**Keywords:** remote sensing, altimeter, radar with knife-like antenna beam, curvature of the scattering surface, waveform of the backscattered impulse