

Радиолокационный метод измерения параметров крупномасштабного волнения с самолета

В.Ю.Караев, Е.М.Мешков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Ульянова, 46 volody@hydro.appl.sci-nnov.ru

Проведен анализ влияния ширины диаграммы направленности антенны и высоты полета на форму отраженного импульса. Показано, что для измерения высоты значительного волнения с самолета необходимо использовать радиоальтиметр с широкой диаграммой направленности антенны. Кроме того, по заднему фронту отраженного импульса можно восстановить дисперсию наклонов крупномасштабного волнения и определить среднюю длину поверхностной волны.

The influence of the width of the antenna beam and the altitude of flight on the waveform of the reflected impulse was investigated. It is shown that for measurement of the significant wave height with the aircraft must be used a radioaltimeter with a wide antenna beam. In addition, the trailing edge of the reflected impulse can be used for retrieval of the variance of large-scale slopes and for determination of the mean sea wavelength.

Для получения информации о подстилающей поверхности дистанционными методами используются особенности отражения электромагнитных волн различной длины от объектов исследования. Диапазон задач, решаемых современными аэрокосмическими средствами, очень широк и особое место занимает применение дистанционного зондирования для наблюдения труднодоступных и удаленных районов Земли, в частности, поверхности океана.

Информация о состоянии морской поверхности и скорости приповерхностного ветра крайне важна для решения множества задач в области метеорологии и в климатических моделях. Благодаря спутникам появилась возможность получать эту информацию достаточно оперативно.

В тоже время, задача получения информации о состоянии морской поверхности с гидросамолетов или пассажирских самолетов не решена полностью. Радиолокаторы, способные измерять высоту волнения или дисперсию наклонов, являются сложными радиолокационными системами, которые предназначены для установки на специализированные исследовательские самолеты.

Предложенные в работах [1, 2] способы измерения высоты волнения предполагали использование КВ диапазона, что приводило к большому размеру антенной системы. Переход в СВЧ диапазон делает антенную систему компактнее и несколько методов восстановления дисперсии наклонов приведены в работах [3-5]. Интересные результаты по измерению спектра высот получены в работе [6].

Применение самолетного радиолокатора для измерения поля ветра обсуждается, например, в работе [7].

Тем не менее, в настоящее время не существует компактного радиолокатора, способного оперативно предоставлять информацию о скорости ветра, высоте и дисперсии наклонов морского волнения во время полета.

В нашей работе рассматривается концепция радиолокатора, способного одновременно измерять дисперсию наклонов крупномасштабного волнения, высоту значительного волнения и оценивать среднюю длину волны.

Радиоальтиметр

Задача измерения высоты значительного волнения дистанционными методами была успешно решается космическими радиоальтиметрами [8, 9]. Радиоальтиметр излучает короткий импульс вертикально вниз по направлению к морской поверхности. Импульс взаимодействует с морской поверхностью, и часть падающего излучения отражается обратно.

Сечение обратного рассеяния используется для восстановления скорости ветра, а по переднему фронту отраженного импульса восстанавливается высота значительного волнения.

Обычный радиоальтиметр имеет узкую диаграмму направленности антенны. В этой работе рассматривается форма отраженного импульса для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны, и обсуждаются особенности работы на малых высотах.

Форма отраженного импульса

Как известно, при малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках крупномасштабного профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Для описания отражения электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью вводится понятие двухмасштабной модели поверхности в соответствии с которой спектр волнения делится на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие относительно длины волны радиолокатора [10].

В общем случае зависимость мощности отраженного сигнала от времени дается следующим выражением [1]:

$$P(t) \sim \iint_{S_0} \exp \left[-\frac{2}{H_0^2} \left(\frac{x^2}{S_x^2} + \frac{y^2}{S_y^2} \right) \right] \times \exp \left[-\frac{2.76}{H_0^2} \left(\frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2} \right) \right] dx dy, \quad (1)$$

где S_x^2 и S_y^2 дисперсии наклонов крупномасштабного волнения вдоль осей X and Y ; δ_x и δ_y ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности в угломестной и азимутальной плоскостях; H_0 - высота полета радиолокатора.

Из формулы видно, что мощность отраженного сигнала зависит от дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и диаграммы направленности антенны. Для симметричной гауссовой диаграммы направленности антенны ($\delta_x = \delta_y = \delta$) и изотропного морского волнения ($S_x^2 = S_y^2 = S_{xy}^2$), интеграл легко вычисляется аналитически в полярной системе координат: азимутальный угол $\varphi = [0, 2\pi]$ и переменная ρ зависит от времени.

Передний фронт отраженного импульса формируется с момента t равного t_0 до $t_0 + \tau$:

$$P(t_0 + \tau) \sim 1 - \exp \left[-\frac{c \tau (2.76 S_{xy}^2 + 2\delta^2)}{H_0 \delta^2 S_{xy}^2} \right], \quad (2)$$

где c скорость света и $t_0 = 2H_0/c$.

Задний фронт формируется при t больше $t + \tau_u$:

$$P(t_0 + \tau) \sim A_0 \exp \left[-\frac{c \tau (2.76 S_{xy}^2 + 2\delta^2)}{H_0 \delta^2 S_{xy}^2} \right], \quad (3)$$

где коэффициент A_0 вводится для согласования формул (2) и (3).

Эти формулы корректны для плоской рассеивающей поверхности. Если рассматриваем морскую поверхность, то для нахождения формы отраженного импульса

необходимо провести усреднение формул (2) и (3), используя гауссову функцию распределения высот волнения $p(\zeta)$:

$$p(\zeta) = \frac{\exp\left[-\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2}\right]}{\sqrt{2\pi\sigma_\zeta^2}}, \quad (4)$$

где σ_ζ^2 - дисперсия высот поверхности.

В результате форма отраженного импульса вычисляется следующим образом:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\zeta^2}} \int_{-\infty}^{\zeta_m} P(t - 2\zeta/c) \cdot \exp\left[-\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2}\right] d\zeta. \quad (5)$$

Формы отраженных импульсов для узкой ($\delta = 1^\circ$) и широкой ($\delta = 28^\circ$) диаграмм направленности антенн и высоты $H_0 = 800$ км показаны на рис. 1.

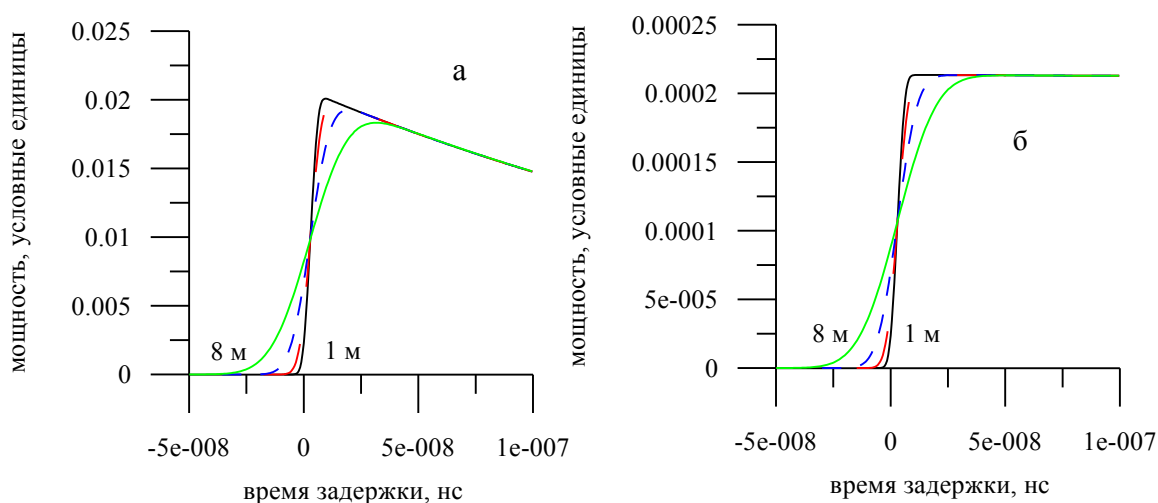


Рис. 1. Численное моделирование формы отраженного импульса: $\tau_u = 6$ нс, $H_0 = 800$ км, $S_{xy}^2 = 0,012$, высота значительного волнения: 1 м, 2 м, 4 м, 8 м; $\delta = 1^\circ$ (а) и $\delta = 28^\circ$ (б).

Из рисунка видно, что различие между узкой и широкой диаграммой направленности антенны связано с поведением заднего фронта отраженного импульса. Быстрое уменьшение мощности заднего фронта отраженного импульса связано с влиянием диаграммы направленности антенны, ослабляющей сигнал, приходящий с больших углов падения.

Для оценки возможности применения стандартного радиоальтиметра для измерения высоты волнения с самолета было проведено численное моделирование формы отраженного импульса для высоты $H_0 = 10$ км. Остальные параметры были такими же, как и в первом случае.

Из рис. 2а видно, что стандартный алгоритм для определения высоты значительного волнения в самолетном варианте не работает. Для радиоальтиметра с широкой диаграммой направленности антенны форма переднего фронта импульса сохранилась (см. рис. 2б), т.е. радиоальтиметр с широкой диаграммой направленности антенны может применяться для измерения высоты волнения с самолета.

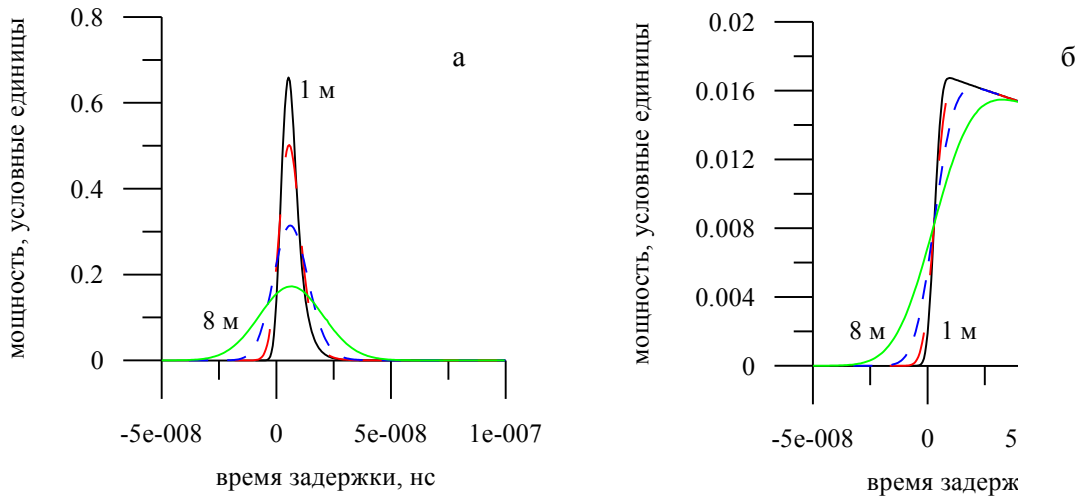


Рис. 2. Численное моделирование формы отраженного импульса: $\tau_u = 6$ нс, $H_0 = 10$ км, $S_{xy}^2 = 0,012$, высота значительного волнения: 1 м, 2 м, 4 м, 8 м; $\delta = 1^\circ$ (а) и $\delta = 28^\circ$ (б).

На первый взгляд рис. 1а и рис. 2б похожи. Однако физические причины, вызывающие формирование такой формы импульса различны. В случае с широкой диаграммой направленности антенны спадание заднего фронта отраженного импульса объясняется влиянием наклонов крупномасштабного волнения. Это видно из рис. 3, иллюстрирующим зависимость формы отраженного импульса от дисперсии наклонов.

Вычисления были сделаны для следующих параметров: $\tau_u = 6$ нс, $H_0 = 10$ км, высота значительного волнения 2 м, $\delta = 28^\circ$, и $S_{xy}^2 = 0,008, 0,012, 0,016$, и $0,02$. Таким образом из рисунков видно, что влияние высоты значительного волнения и дисперсии наклонов крупномасштабного волнения на форму отраженного импульса зависит от высоты полета и ширины диаграммы направленности антенны.

Использование антенны с симметричной диаграммой направленности антенны ведет к потере азимутальных характеристик морского волнения. Для сохранения этой информации необходимо использовать радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны. Пусть $\delta_x \gg \delta_y$. В этом случае теряется связь между переменными x и y , поэтому можно вычислить интеграл (1) не переходя в полярную систему координат.

В результате окончательные формулы для формы отраженного импульса не изменятся:

$$P(t_0 + \tau) \sim 1 - \exp\left[-\frac{c\tau(2,76S_x^2 + 2\delta_x^2)}{H_0\delta_x^2 S_x^2}\right] \text{ и } P(t_0 + \tau) \sim A_0 \exp\left[-\frac{c\tau(2,76S_x^2 + 2\delta_x^2)}{H_0\delta_x^2 S_x^2}\right].$$

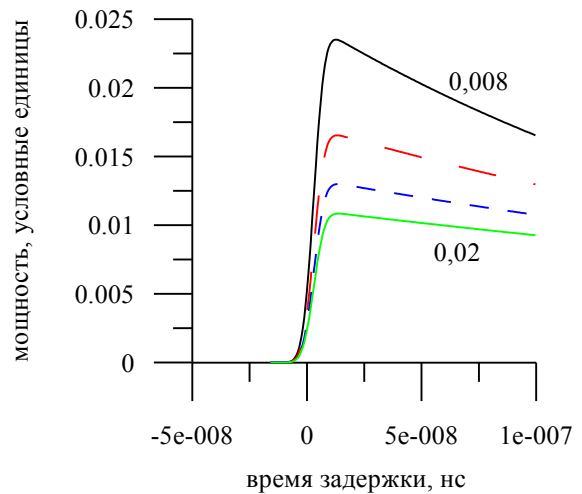


Рис. 3. Численное моделирование формы отраженного импульса: $\tau_u = 6$ нс, $H_0 = 10$ км, высота значительного волнения 2 м, $\delta = 28^\circ$, $S_{xy}^2 = 0,008, 0,012, 0,016, 0,02$.

В этом случае форма отраженного импульса содержит информацию о дисперсии наклонов S_x^2 вдоль ориентации антенны.

Выводы

Проведенный анализ показал, что высота полета и ширина диаграммы направленности антенны должны учитываться при анализе формы отраженного импульса. Моделирование подтвердило, что для измерения высоты значительного волнения с самолета необходимо применять радиоальтиметр с широкой или ножевой диаграммой направленности антенны. Кроме того, по заднему фронту отраженного импульса можно будет восстановить дисперсию наклонов крупномасштабного волнения. Оценка средней длины волны будет получена от отношения дисперсии высот к дисперсии наклонов.

Вращение антенны или изменение направления полета позволит определить направление распространения доминирующей системы волнения.

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

Литература

1. Зубкович С.Г., Способ измерения высоты морских волн с летательного аппарата, Авт. Свид. СССР № 169808, - Бюллетень изобретений, 1965, № 7
2. Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С., Связь фазовых флюктуаций радиосигналов, отраженных от морской поверхности, с высотой морских волн, Труды Всесоюзного семинара по неконтактным методам измерения океанографических параметров, 1975
3. Гарнакерьян А.А., А.С.Сосунов, Радиолокация морской поверхности, Издательство ростовского университета, 1978, 144 с.
4. Hauser D., G.Caudal, S.Guimbard, A.Mouche, A study of the slope propability density function of the ocean waves from radar observations, Journal of Geophysical Research, 2008, v. 113, C02006
5. Walsh, E. J., D. C. Vandemark, C. A. Friehe, S. P. Burns, D. Khelif, R. N. Swift, and J. F. Scott (1998), Measuring sea surface mean square slope with a 36-GHz scanning radar altimeter, J. Geophys. Res., 103(C6), 12,587–12,601, doi:10.1029/97JC02443.
6. Jackson, F.C., W.T.Walton, P.L.Baker, Aircraft and satellite measurement of ocean wave directional spectra using scanning-beam microwave radars, Journal of Geophysical research, v. 90, 1985, NC 1, pp.987-1004
7. Nekrasov A., Microwave Measurement of the Wind Vector over Sea by Airborne Radars, pp.521-548 in Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies: Semiconductor Devices, Circuits and Systems, ed. Moumita Mukherjee, INTECH, 2010, 642 p.
8. Brown G.S., The average impulse response of a rough surface and its applications, IEEE Tans. Antenass Propag., v. 25, pp.67-74, 1977
9. Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of Techniques and applications, ed. Lee-Lueng Fu, Anny Cazenave, Academic Press, 2001, 464 p.
10. Басс Ф., Фукс И., Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности, М. Наука, 1972, 424 с.