

---

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

---

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО ВОЛНЕНИЯ В ШИРОКОЙ  
ПОЛОСЕ ОБЗОРА РАДИОЛОКАТОРОМ С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ  
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ**

© 2012 г. В. Ю. Караев\*, Е. М. Мешков

*Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород*

\*E-mail: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 11.03.2012 г.

Рассмотрены особенности формирования формы отраженного импульса при надирном зондировании радиоальтиметрами с узкой и широкой диаграммами направленности антенны. Предложена концепция радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, обеспечивающего панорамный режим измерения высоты значительного волнения в широкой полосе обзора вдоль траектории полета с заданным пространственным разрешением. Использование в приемном тракте радиолокатора частотных фильтров позволит разделить широкую полосу обзора на элементарные рассеивающие ячейки заданного размера и записать форму отраженного импульса для каждой ячейки. В этом случае форма отраженного импульса будет состоять из трех участков: переднего фронта, плато и заднего фронта. Численное моделирование показало, что передний фронт отраженного импульса сохранил информацию о высоте значительного волнения, и высота значительного волнения в каждой рассеивающей ячейке может быть восстановлена с помощью стандартного алгоритма, применяемого при обработке радиоальтиметрических данных.

**Ключевые слова:** радиоальтиметр, дистанционное зондирование, форма отраженного импульса, обратное рассеяние электромагнитных волн взволнованной водной поверхностью, полоса обзора, высота значительного волнения

## ВВЕДЕНИЕ

Радиоальтиметр измеряет высоту значительного волнения вдоль траектории движения, и эта информация активно используется в численных моделях при изучении волнового климата и в метеорологии. Существенным недостатком является то, что расстояние между витками (траекториями) превышает 100 км, а цикл измерений занимает около 10 сут (Lee-Lueng Fu, Anny Cazenave, 2001). На рис. 1 показан пример расположения треков радиоальтиметра Topex/Poseidon для Каспийского моря при 10-дневном цикле (Лебедев, Костяной, 2005). В то же время, разрешение вдоль траектории движения существенно выше и обычно составляет 4–8 км в зависимости от интенсивности волнения.

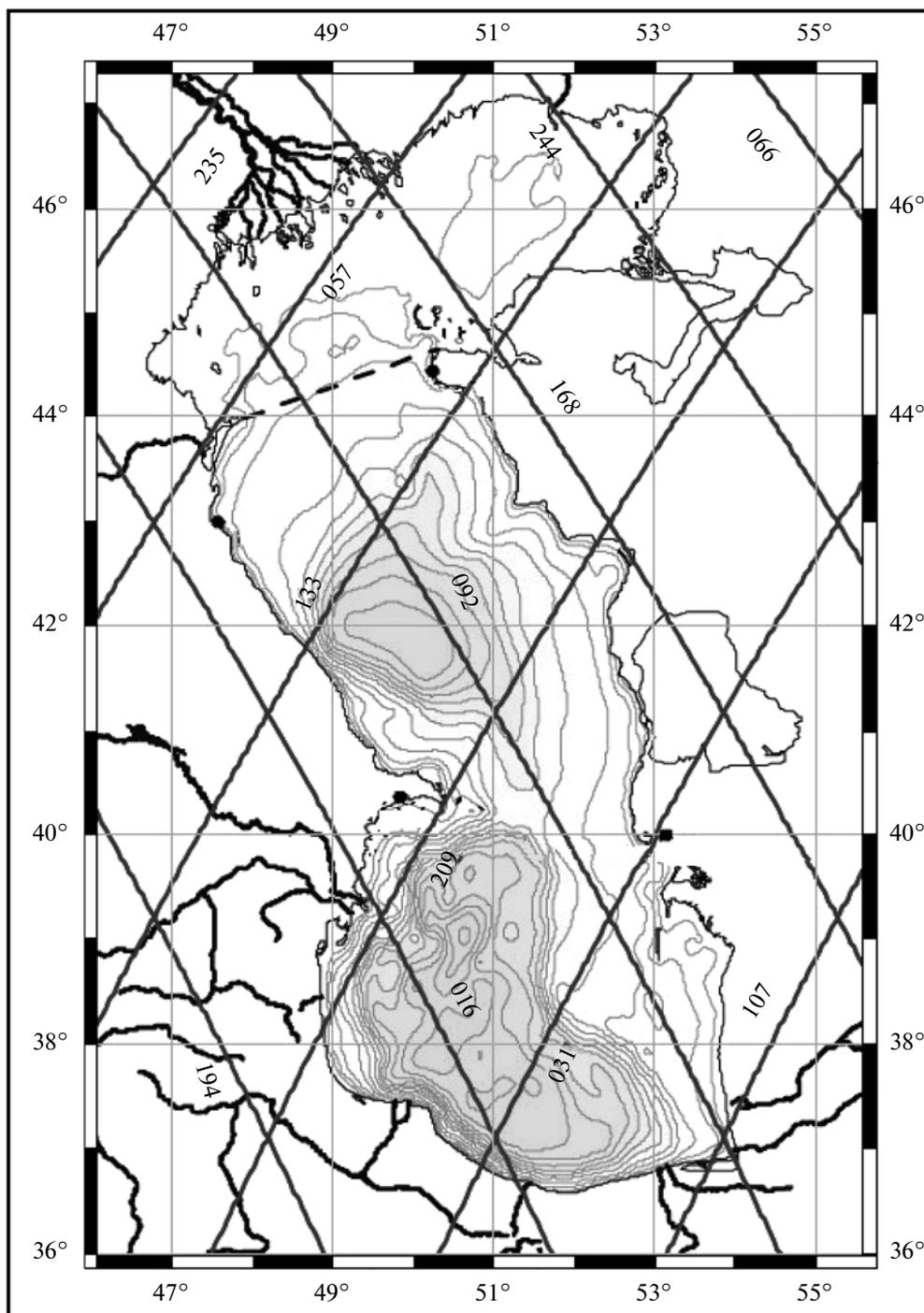
В результате с помощью радиоальтиметра может быть получено только сечение процесса на поверхности океана по высоте значительного волнения и скорости ветра с хорошим разрешением вдоль траектории полета, а не пространственная структура этого процесса, что было бы интереснее потребителям информации.

Ситуация несколько улучшается за счет присутствия на орбите нескольких радиоальтиметров

и, следовательно, их показания могут объединяться при проведении анализа в заданных регионах. Существенными недостатками такого объединения являются значительная разнесенность измерений разных радиоальтиметров по времени, которая может достигать нескольких суток, а также то, что, в лучшем случае, получаем еще одно сечение.

Сформированное радиоальтиметрами глобальное поле высот содержит информацию о волнении, относящуюся к разным дням, причем информацию фрагментарную из-за большого расстояния между витками и “трековостью” измерений, т.е. без полосы обзора. Поэтому построенные карты высот имеют в основном статистическую ценность, выявляя долговременную изменчивость интенсивности волнения на различных участках Мирового океана.

Решением задачи исследования пространственной структуры процессов на морской поверхности может стать измерение высоты значительного волнения в широкой полосе обзора с заданным пространственным разрешением. Так работают скаттерометры, которые измеряют скорость и направление ветра в широкой полосе обзора с заданным пространственным разрешением



**Рис. 1.** Пример прохождения треков по Каспийскому морю (10-дневный цикл) радиоальтиметра Torex/Poseidon (Лебедев, Костяной, 2005).

и формируют поля приповерхностного ветра, активно используемые, например, в метеорологии.

К сожалению, скаттерометры не способны восстанавливать параметры морского волнения, что обусловлено резонансным механизмом обратного рассеяния электромагнитных волн сан-

тиметрового диапазона морской поверхностью на средних углах падения.

Интерес к восстановлению параметров волнения дистанционными методами всегда привлекал внимание исследователей, и было разработано несколько радиолокационных систем, которые

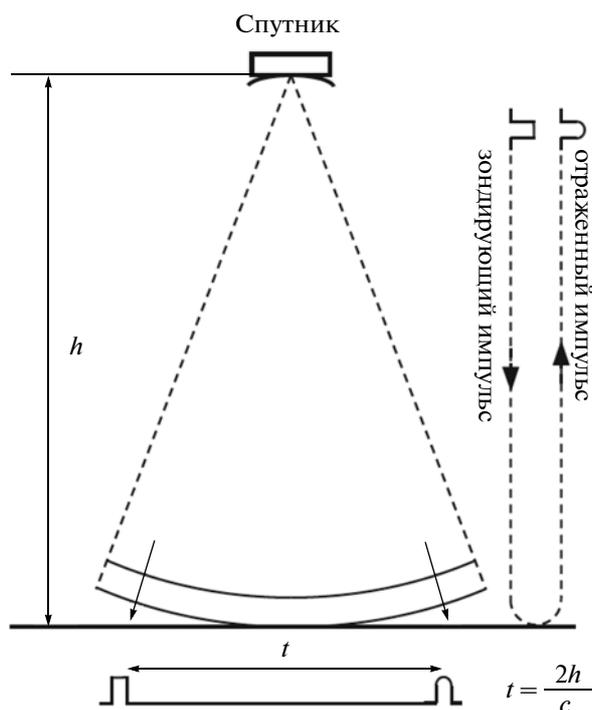


Рис. 2. Схема измерения радиоальтиметра (Лебедев, 2010).

хорошо зарекомендовали себя при измерении с самолета, например (Walsh et al., 1998; Hwang et al., 2000; Hauser, Caudal, 1996; Jackson et al., 1985). Однако по техническим причинам предложенные решения не могут быть перенесены на спутник для проведения глобального мониторинга.

В данной работе рассматривается возможность применения модифицированного радиоальтиметра для выполнения измерений высоты значительного волнения в широкой полосе обзора в элементарных ячейках заданного размера. Исследуется влияние ширины диаграммы направленности антенны на форму отраженного импульса при условии доплеровской селекции и обсуждаются алгоритмы восстановления высоты значительного волнения.

Для формирования полосы обзора предлагается применять радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны, а для достижения необходимого пространственного разрешения использовать спектральные характеристики отраженного сигнала.

В результате новый доплеровский радиоальтиметр с ножевой диаграммой направленности антенны будет измерять высоту значительного волнения и скорость приповерхностного ветра в широкой полосе обзора с заданным разрешением.

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО ВОЛНЕНИЯ

В настоящее время измерение высоты значительного волнения выполняется космическими радиоальтиметрами с узкой симметричной диаграммой направленности антенны при надирном зондировании морской поверхности, например JASON, ENVISAT. Известная теоретическая модель описывает форму отраженного импульса для таких радиолокаторов (Brown, 1977; Chelton et al., 1989; Зубкович, 1968).

Разработанный алгоритм позволяет восстанавливать высоту значительного волнения по переднему фронту отраженного импульса. Сравнение с данными контактных измерений показало хорошую точность алгоритма – ошибка измерения высоты значительного волнения не превосходит 10%, или 0.5 м (что больше) (Lee-Lueng Fu, Anny Casenave, 2001).

Схема измерения показана на рис. 2 (Лебедев, 2010): короткий импульс излучается вертикально вниз и достигает морской поверхности. Часть излученной энергии отражается обратно и попадает в приемную антенну, где записывается форма отраженного импульса.

Процесс формирования отраженного импульса показан на рис. 3 (Лебедев, 2010). С увеличением времени задержки происходит увеличение площади освещенной (отражающей) поверхности, и мощность принятого сигнала, пропорциональная этой площади, тоже растет.

После достижения задним фронтом падающего импульса отражающей поверхности площадь освещенной площадки достигает максимальной величины и в дальнейшем перестает меняться, так как площадь отражающего кольца (освещенной поверхности) во времени сохраняется. При использовании приемной антенны с узкой диаграммой направленности происходит ослабление мощности принимаемого сигнала при увеличении угла падения, поэтому в существующих радиоальтиметрах после достижения максимума наблюдается спад на заднем фронте отраженного импульса.

В отраженном импульсе, измеренном радиоальтиметром, можно выделить передний фронт длительностью  $\tau_i$ , когда происходит увеличение амплитуды принимаемого сигнала, и задний фронт, на котором происходит спад при учете в модели формы импульса диаграммы направленности антенны.

На рис. 3 приведена форма импульса при отражении от плоской поверхности. При наличии волнения форма импульса исказится, в частности, передний фронт станет длиннее, так как первый отраженный сигнал придет при достижении

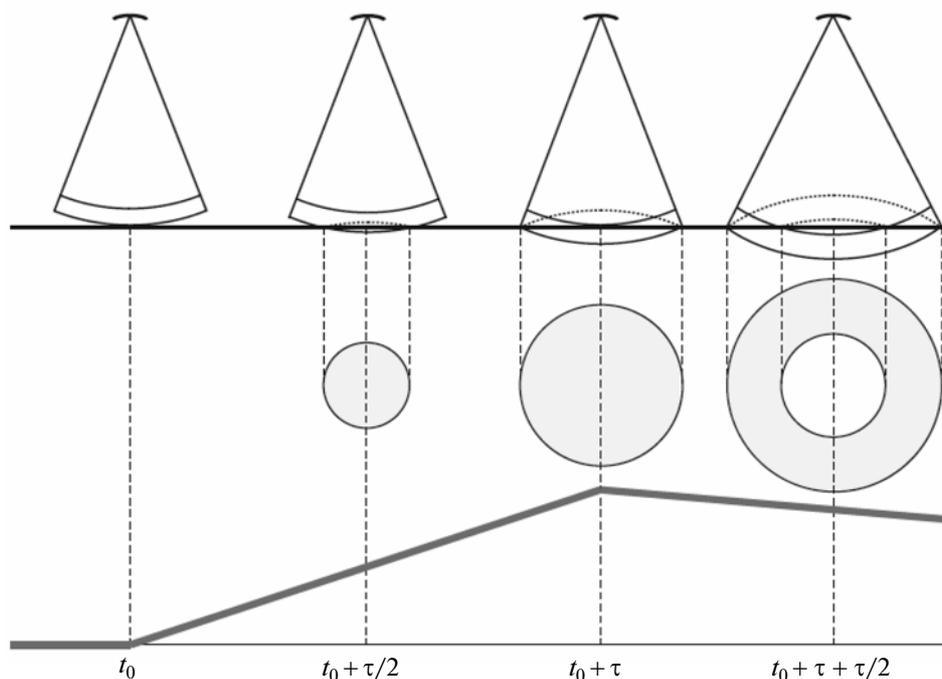


Рис. 3. Зависимость формы отраженного импульса от времени (Лебедев, 2010).

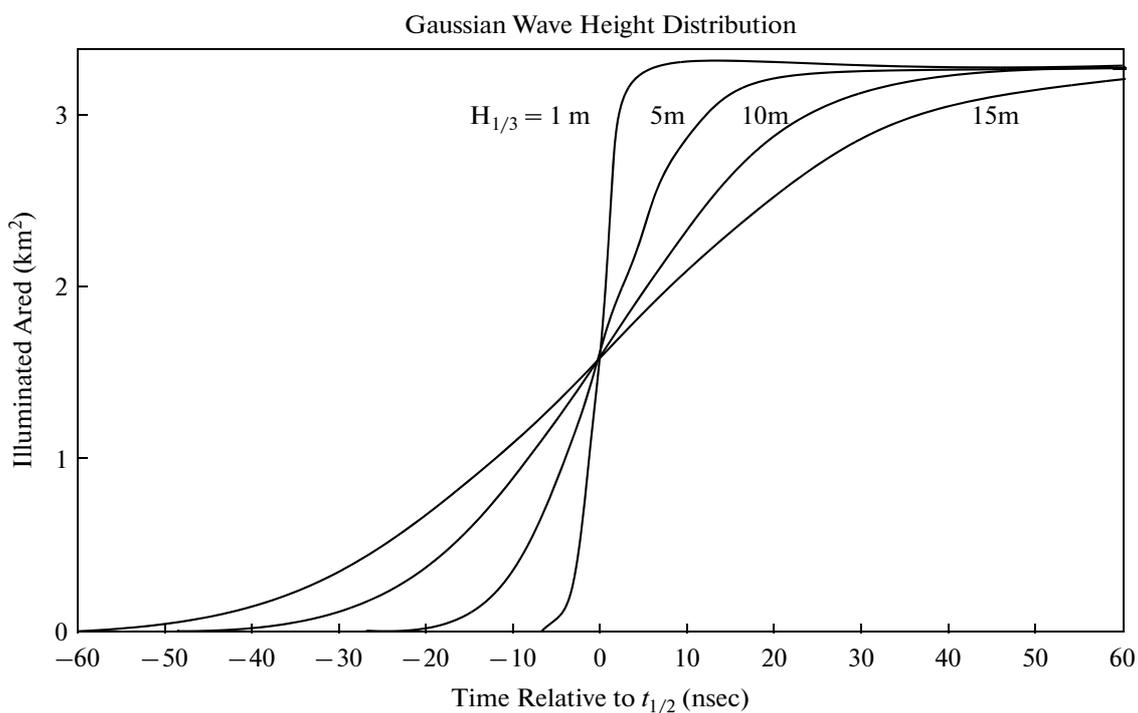


Рис. 4. Зависимость освещенной площади от времени при длительности импульса 3.125 нс и высоте значительного волнения 1, 5, 10 и 15 м (Lee-Lueng Fu, Anne Cazenave, 2001).

передним фронтом гребней волн, а завершится при достижении задним фронтом падающего импульса впадин.

Как отмечалось выше, мощность принятого сигнала пропорциональна площади освещенной площадки, поэтому вместо формы принятого им-

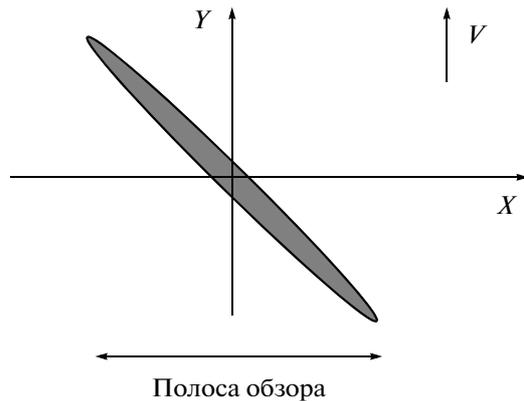


Рис. 5. Ориентация диаграммы направленности антенны в панорамном режиме.

пульса в качестве иллюстрации эффекта можно привести изменение освещенной площадки в зависимости от высоты значительного волнения из известной работы (Lee-Lueng Fu, Anny Casenave, 2001). Как видно из рис. 4, изменение высоты значительного волнения приводит к значительному увеличению площади засветки (длительности импульса).

Наблюдаемая трансформация переднего фронта отраженного импульса открывает возможность измерения высоты значительного волнения. В стандартном алгоритме восстановления высоты значительного волнения входным параметром является тангенс угла наклона переднего фронта отраженного импульса в средней точке.

Принципиальная возможность измерения высоты значительного волнения связана с существованием точки отсчета при приеме отраженного сигнала.

Если взять радиоальтиметр с узкой диаграммой направленности антенны и проводить измерения не в надира, а под небольшим углом падения, то будет сложнее точно измерить средний уровень океана. В то же время точность определения высоты значительного волнения не ухудшится. Дело в том, что при наклонном зондировании высота значительного волнения по-прежнему будет влиять на длительность переднего склона отраженного импульса.

Если для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны, например  $1^\circ \times 1^\circ$ , использовать сканирующий режим работы от надира по  $15^\circ$  в обе стороны с шагом по углу в  $1^\circ$ , как это работает, например, в дождевом радиолокаторе (Precipitation radar – далее PR-радиолокатор), то можно измерить высоту волнения во всей полосе обзора с требуемым пространственным разрешением.

Но такой подход приведет к серьезному усложнению измерительной системы, поэтому предлагается другой способ измерения высоты значительного волнения, использующий особенности радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

При ориентации ножевой диаграммы направленности антенны под углом к направлению движения мы получим полосу обзора, ширина которой зависит от угла поворота антенны и ширины диаграммы направленности (см. рис. 5). Известными методами можно разбить полосу обзора на элементарные рассеивающие ячейки нужного размера.

Для измерения высоты значительного волнения во всей полосе наблюдения необходимо ввести/найти точку отсчета для каждой элементарной рассеивающей ячейки. Для решения этой задачи предлагается использовать доплеровское смещение частоты отраженного сигнала.

Как известно, доплеровское смещение при постоянной скорости движения и известном угле поворота антенны зависит от угла падения. На входе приемного устройства надо поставить частотные фильтры с прямоугольными АЧХ, настроенные на заданные элементарные рассеивающие ячейки (по доплеровской частоте). Благодаря этому создается начальная точка отсчета для каждой элементарной рассеивающей ячейки. Отраженный сигнал появится в конкретном частотном фильтре только тогда, когда падающее поле достигнет этой элементарной ячейки. И точно так же сигнал пропадет после того, как задний фронт импульса покинет ячейку. Алгоритм восстановления высоты волнения будет аналогичен стандартному алгоритму определения высоты волнения.

Исследуем влияние диаграммы направленности антенны на форму отраженного импульса.

### РАДИОАЛЬТИМЕТР С ШИРОКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Рассмотрим математическую формулировку исходной задачи. Учитывая то, что нас интересует только форма отраженного импульса, формулу для отраженного сигнала приведем в упрощенном виде (Зубкович, 1968; Гарнакерьян, Сосунов, 1978)

$$E(t) \sim \int_S E_0(R) G(\vec{r}) \exp(-2kRi) dr, \quad (1)$$

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):

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

где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – ширина диаграммы направленности антенны в угломестной и азимутальной плоскостях соответственно;  $H_0$  – высота полета.

Повторив преобразования, выполненные, например, в (Зубкович, 1968; Караев, Каневский, 1999), получим выражение для мощности принимаемого сигнала

$$P(t) \sim \iint \exp \left[ -\frac{1}{2H_0^2} \left( \frac{x^2}{\sigma_{xx}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{yy}^2} \right) \right] \times \exp \left[ -\frac{5.52}{H_0^2} \left( \frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2} \right) \right] dx dy. \quad (3)$$

В предположении симметричной диаграммы направленности антенны ( $\delta_x = \delta_y = \delta$ ) и изотропного волнения ( $\sigma_{xx}^2 = \sigma_{yy}^2 = \sigma_{xy}^2$ ) можно перейти в полярную систему координат ( $\rho, \varphi$ ), и интеграл (3) легко берется аналитически.

В этом случае пределы интегрирования по азимутальному углу лежат в интервале от 0 до  $2\pi$ . Границы интегрирования по радиусу зависят от времени.

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

$$P(t) = P(t_0 + \tau) = 1 - \exp \left[ -\frac{c\tau(5.52\sigma_{xy}^2 + \delta^2/2)}{H_0\delta^2\sigma_{xy}^2} \right]. \quad (4)$$

После касания электромагнитной волны поверхности в момент  $t_0$  начинается формирование переднего фронта отраженного импульса, которое заканчивается в момент  $t_0 + \tau_n$ . После этого начинается формирование заднего фронта отраженного импульса и его форма задается следующим выражением:

$$P(t_0 + \tau) = A_0 \exp \left[ -\frac{c\tau(5.52\sigma_{xy}^2 + \delta^2/2)}{H_0\delta^2\sigma_{xy}^2} \right], \quad (5)$$

где  $A_0$  – коэффициент, введенный для согласования формы импульса в момент  $t_0 + \tau_n$  и вычисляемый следующим образом:

$$A_0 = \frac{1 - \exp \left[ c\tau_n(5.52\sigma_{xy}^2 + \delta^2/2)/H_0\delta^2\sigma_{xy}^2 \right]}{\exp \left[ c\tau_n(5.52\sigma_{xy}^2 + \delta^2/2)/H_0\delta^2\sigma_{xy}^2 \right]}. \quad (6)$$

Полученные формулы справедливы для плоской поверхности. При облучении морской поверхности рассеяние начинается при достижении передним фронтом падающей электромагнитной волны гребней волн и заканчивается при достижении задним фронтом впадин.

Функция распределения высот является гауссовой и задается следующей формулой:

$$p(\zeta) = \frac{\exp \left[ -\zeta^2/2\sigma_\zeta^2 \right]}{\sqrt{2\pi\sigma_\zeta^2}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_\zeta^2$  – дисперсия высот поверхностного волнения.

Для нахождения интенсивности импульса, отраженного от морской поверхности в момент  $t$ , необходимо усреднить по высоте волнения

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\zeta^2}} \int_{-\infty}^{\zeta_m} P(t - 2\zeta/c) \exp \left[ -\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2} \right] d\zeta, \quad (8)$$

где переменная  $t = 0$  в момент  $t_0$  и  $\zeta_m = ct/2$ . Для положительного значения высоты волны относительно среднего уровня время  $t$  становится отрицательным.

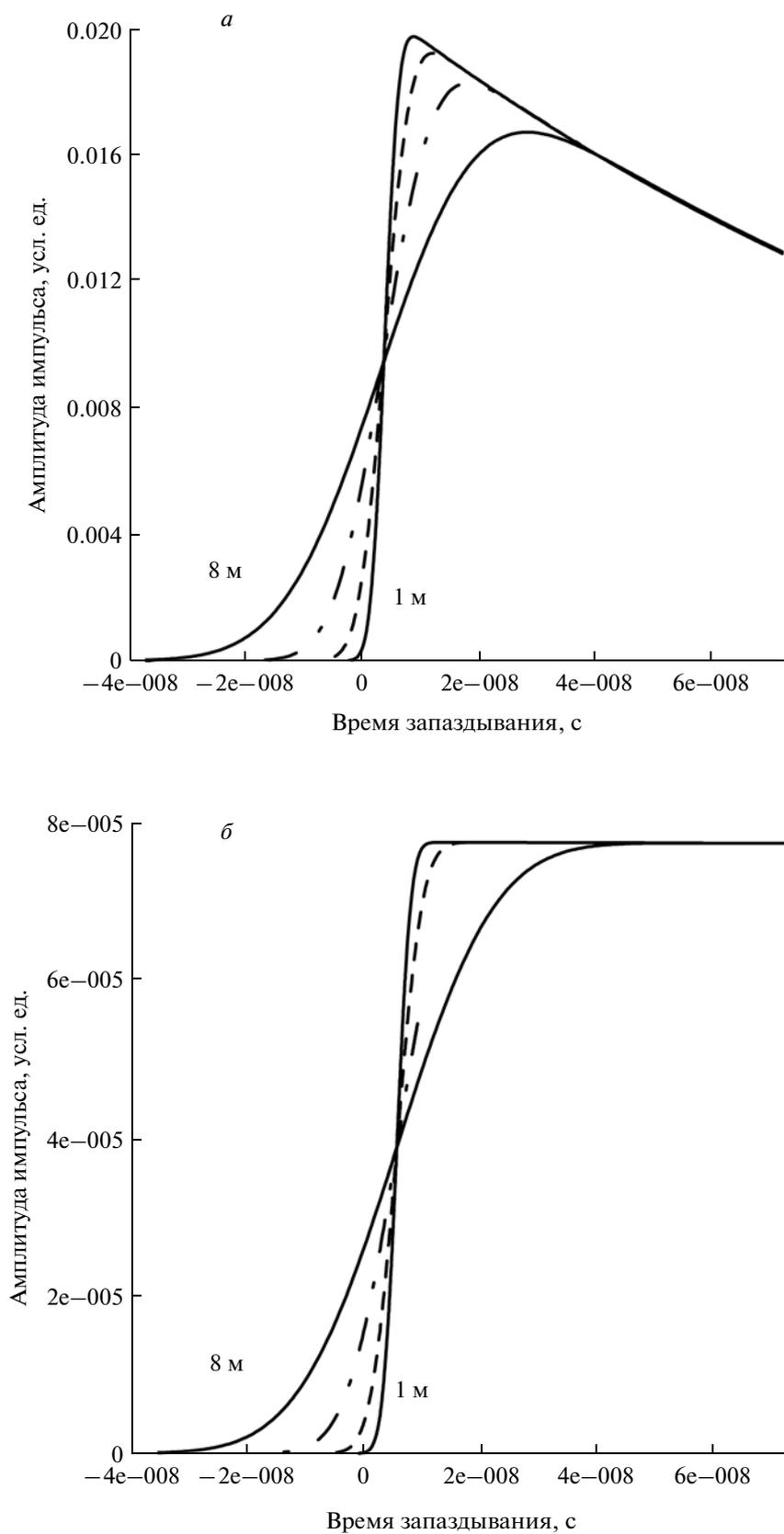
Зависимость формы отраженного импульса от времени прихода  $t$  показана на рис. 6а и б.

При моделировании использовался прямоугольный импульс длительностью 3 нс, высота полета 800 км, диаграмма направленности антенны  $1^\circ$ , дисперсия наклонов  $\sigma_{xy}^2 = 0.012$ . Вычисления проведены для высот значительного волнения: 1, 2, 4 и 8 м. Из рис. 6а видно, что происходит изменение угла наклона переднего фронта импульса в зависимости от высоты значительного волнения.

При использовании радиоальтиметра с широкой диаграммой направленности антенны ( $\delta = 26^\circ$ ) форма отраженного импульса изменится, результаты моделирования приведены на рис. 6б. В этом случае на рассматриваемом временном интервале влияние диаграммы направленности антенны мало и не просматривается спад заднего фронта отраженного импульса, характерный для антенны с узкой диаграммой направленности антенны.

Численное моделирование показало, что дисперсия наклонов влияет на сечение обратного рассеяния, но не изменяет форму отраженного импульса при данной схеме измерений.

Как уже обсуждалось, при использовании ножевой диаграммы направленности антенны можно разбить широкую полосу обзора на элементарные рассеивающие ячейки, для которых можно найти сечение обратного рассеяния, используя



**Рис. 6.** Зависимость формы отраженного импульса от времени для четырех значений высоты значительного волнения: 1, 2, 4 и 8 м, для высоты  $H_0 = 800$  км, при ширине диаграммы направленности антенны  $\delta = 1^\circ$  (а) и  $\delta = 26^\circ$  (б).

временную или доплеровскую селекцию, и определить скорость приповерхностного ветра.

В радиоальтиметрическом режиме передний фронт отраженного импульса формируется элементарной рассеивающей ячейкой, расположенной непосредственно под спутником (ближайшая точка) в независимости от ширины диаграммы направленности антенны, поэтому будет восстановлена высота значительного волнения непосредственно под спутником.

Для измерения высоты значительного волнения в каждой ячейке необходимо ввести точку отсчета принимаемого сигнала для каждой ячейки, и это можно сделать за счет применения частотных фильтров.

### ДОПЛЕРОВСКИЙ РАДИОАЛЬТИМЕТР С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Рассмотрим случай ножевой диаграммы направленности антенны, т.е.  $\delta_x \gg \delta_y$ . В этом случае теряется связь между переменными  $x$  и  $y$ , поэтому можно вычислить интеграл (3), не переходя в полярную систему координат (3), однако надо иметь в виду, что под дисперсией наклонов в данном случае понимается дисперсия наклонов вдоль ориентации антенны  $\sigma_{зонд}^2$  и в формулах (5) и (6) используется  $\delta_x$  вместо  $\delta$ . В результате окончательные формулы для формы отраженного импульса не изменятся, так как интегрирование вдоль  $\delta_y$  даст в окончательную формулу константу, не влияющую на форму импульса.

Для измерений высоты значительного волнения в панорамном режиме предлагается использовать радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны с доплеровскими фильтрами в приемном тракте. Это приведет к изменению границ интегрирования и формированию ограниченного по времени импульса, т.е. отраженный импульс будет состоять из трех участков: передний фронт, плато и задний фронт. Доплеровский сдвиг отраженного сигнала зависит от угла падения, поэтому выбор полосы пропускания фильтра равносильен заданию углов падения. Это приведет к изменению пределов интегрирования в формуле (3).

Для ножевой диаграммы направленности антенны, например,  $1^\circ \times 26^\circ$ , пределы интегрирования по азимутальному углу возьмем равным  $\varphi = \pm 3^\circ$ . Передний фронт отраженного импульса лежит в интервале от  $t_0$  до  $t_0 + \tau_{и}$ , где  $t_0 = 2H_0 \operatorname{tg} \theta_1 / c$  и задается следующей формулой:

$$P(t_0 + \tau) = 1 - \exp \left[ - \frac{c\tau (5.52\sigma_{зонд}^2 + \delta_x^2/2)}{H_0 \cos \theta_1 \delta_x^2 \sigma_{зонд}^2} \right], \quad (9)$$

где угол  $\theta_1$  зависит от нижней частоты полосы пропускания  $f_{Д}$  частотного фильтра, т.е.

$$\theta_1 = \arcsin (f_{Д} \lambda / (2V)).$$

Угол  $\theta_2$  зависит от верхней частоты полосы пропускания фильтра, и соответствующее время  $t_{Д}$  равно

$$t_{Д} = \frac{2H_0}{c} \left( \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2} \right). \quad (10)$$

Для участка времени  $t_0 + \tau_{и}$  до  $t_0 + t_{Д}$  форма отраженного также совпадает с ранее полученным выражением

$$P(t_0 + \tau) = A_{12} \exp \left[ - \frac{c\tau (5.52\sigma_{зонд}^2 + \delta_x^2/2)}{H_0 \cos \theta_1 \delta_x^2 \sigma_{зонд}^2} \right]. \quad (11)$$

Задний фронт импульса формируется в интервал времени от  $t_0 + t_{Д}$  до  $t_0 + t_{Д} + \tau_{и}$  и изменяется по следующему закону:

$$P(t_0 + \tau) = A_{23} \left( \exp \left[ - \frac{c\tau (5.52\sigma_{зонд}^2 + \delta_x^2/2)}{H_0 \cos \theta_1 \delta_x^2 \sigma_{зонд}^2} \right] - 1 \right). \quad (12)$$

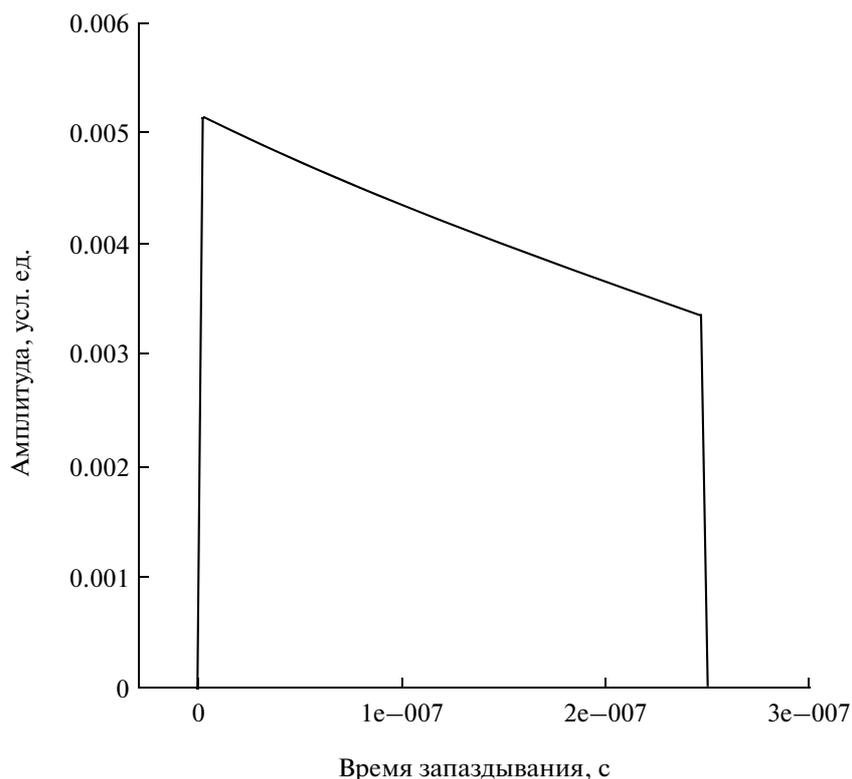
Коэффициенты  $A_{12}$  и  $A_{23}$  определяются из условия совпадения амплитуды сигнала на границе интервалов по аналогии с формулой (6).

Пример зависимости интенсивности отраженного сигнала от времени в одном из частотных фильтров приведен на рис. 7. Для расчетов использовались углы падения  $3^\circ$  и  $3.05^\circ$ , скорость движения 6000 м/с, высота полета 800 км, длина волны 0.021 м. При расчетах предполагался прямоугольный импульс длительностью 3 нс.

Как и в случае с узкой диаграммой направленности антенны, форма отраженного импульса будет зависеть от высоты значительного волнения. Для учета влияния этого эффекта на форму отраженного импульса необходимо провести усреднение по высотам волн (см. формулу (8)).

На рис. 8а приведены вычисления для четырех высот значительного волнения: 1, 2, 4 и 8 м для данного частотного фильтра. Ширина импульса получается значительной, поэтому более детально передний фронт отраженного импульса изображен на рис. 8б.

Сравнение рисунков показывает, что для восстановления высоты значительного волнения по переднему фронту отраженного импульса можно использовать существующие в радиоальтиметрии алгоритмы.



**Рис. 7.** Зависимость формы отраженного импульса от времени задержки в частотном фильтре 29–30.5 кГц для плоской поверхности.

### КОНЦЕПЦИЯ ПАНОРАМНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВОЛНЕНИЯ

Для измерения высоты значительного волнения в широкой полосе обзора предлагается использовать схему измерений, показанную на рис. 5.

Доплеровский радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны излучает короткий импульс вертикально вниз. Диаграмма направленности ориентирована под углом относительно направления полета, что формирует полосу обзора.

За счет скорости движения носителя отраженный сигнал будет иметь доплеровский сдвиг, что позволит провести частотную селекцию и выделить элементарные рассеивающие ячейки. В результате для заданных частотных интервалов (рассеивающих ячеек) будут получены зависимости отраженной мощности от времени задержки.

В результате для заданных элементарных ячеек будет измерена форма отраженного импульса и стандартными алгоритмами восстановлена высота значительного волнения в каждой ячейке.

Преимущество такого подхода еще в том, что при излучении одного импульса формируются отраженные импульсы во всех элементарных рассеивающих ячейках. При формировании полосы

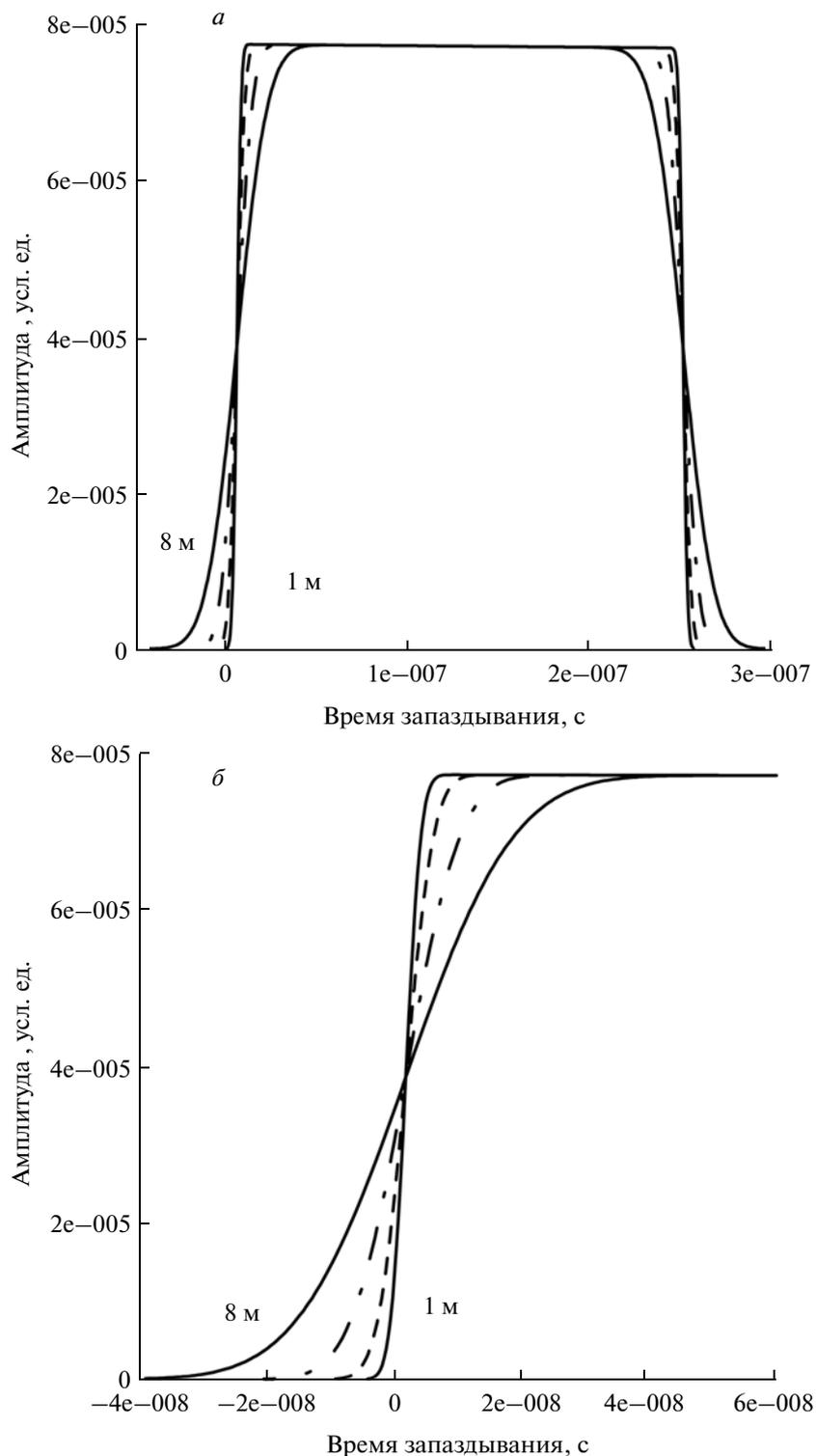
обзора не происходит механического или электронного сканирования, что повышает надежность радиолокатора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование обратного рассеяния в области малых углов падения. Получено выражение для формы отраженного импульса для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны и показано, что передний фронт отраженного импульса слабо зависит от ширины диаграммы направленности антенны и разработанные алгоритмы могут использоваться для измерения высоты значительного волнения.

Для получения панорамного режима измерения высоты значительного волнения предлагается использовать доплеровский радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны, ориентированной под углом относительно направления полета.

С помощью частотных фильтров, установленных в приемном тракте, можно селективировать элементарные рассеивающие ячейки и для каждой записать форму отраженного импульса. Это позволит при обработке восстановить высоту значительного волнения в каждой ячейке.



**Рис. 8.** Зависимость формы отраженного импульса от времени в частотном фильтре 29–30.5 кГц для взволнованной морской поверхности. Высота значительного волнения: 1, 2, 4 и 8 м; *a* – весь отраженный импульс; *б* – передний фронт отраженного импульса.

Была построена модель для формы отраженного импульса при использовании доплеровской селекции в частотных фильтрах. В отличие от

стандартного радиоальтиметра, отраженный импульс будет состоять из трех участков: передний фронт, плато и задний фронт. Высота значитель-

ного волнения может восстанавливаться как по переднему, так и по заднему фронту.

При работе в прибрежной зоне и внутренних водоемах у стандартного радиоальтиметра возникают сложности с восстановлением высоты значительного волнения, так как уровень берега выше уровня моря. И даже если берег формально находится за пределами области, освещенной за счет длительности излученного импульса, сигнал от возвышенности приходит раньше или одновременно с сигналом от водной поверхности, что искажает форму переднего фронта импульса и делает невозможным точное восстановление высоты значительного волнения.

При частотной селекции такой проблемы не возникнет, так как доплеровский сдвиг зависит от угла падения и не зависит от высоты берега, т.е. точность измерений в прибрежной зоне сохраняется.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-05-00181а и № 11-05-97014-р-п-а) и гранта Правительства Российской Федерации (договор № 11.G34.31.0048).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гарнакерьян А., Сосунов А. Радиолокация морской поверхности. Изд-во Ростовского ун-ва. 1978. 144 с.
- Зубкович С. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности, М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
- Караев В., Каневский М. К вопросу о радиолокационном определении параметров морского волнения // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 14–20.
- Лебедев С., Костяной А. Комплексный спутниковый мониторинг Каспийского моря с использованием данных альтиметрии // Всер. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 14–17 ноября 2005 г.
- Лебедев С.А. Основы спутниковой альтиметрии // Выездной семинар-школа. “Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования”. Таруса, 9–12 июля 2010 г.
- Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and its application // IEEE Transact. Antennas and Propag. 1977. V. 25. № 1. P. 67–73.
- Chelton D.B., Walsh E.J., MacArthur J.L. Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry // J. Atmos. and Oceanic Technol. 1989. V. 6. P. 407–438.
- Lee-Lueng Fu, Anny Cazenave. Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications. San Diego, USA: Acad. Press, 2001. 464 p.
- Hauser D., Caudal G. Combined analysis of the radar cross-section modulation due to the long ocean waves around 14 and 34 incidence: Implication for the hydrodynamic modulation // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C11. P. 25833–25846.
- Hwang P.A., Wang D.W., Walsh E.J., Krabill W.B., Swift R.N. Airborne measurements of the wavenumber spectra of ocean surface waves. Part II: Directional distribution // J. Phys. Oceanogr. 2000. V. 30. № 11. P. 2768–2787.
- Jackson F.C., Walton W.T., Baker P.L. Aircraft and satellite measurement of ocean wave directional spectra using scanning-beam microwave radars // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. № C1. P. 987–1004.
- Walsh E.J., Vandemark D.C., Friehe C.A., Burns S.P., Khelif D., Swift R.N., Scott J.F. Measuring sea surface square slope with a 36-GHz scanning radar altimeter // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № C6. P. 12587–12601.

## Measurement of the Significant Wave Height in Wide Swath with Required Spatial Resolution

V. Yu. Karaev, E. M. Meshkov

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod*

The features of the shape of the backscattered impulse of radio altimeters with narrow and wide antenna patterns at nadir probing were considered. The concept of radar with knife-like antenna beam, providing a panoramic mode of measuring of the significant wave height inside of a wide swath with a given spatial resolution along the flight track is suggested. The use in the receiving channels of radar the frequency filters will permit to divide a wide swath into the elementary scattering cells of a given size and shape of the reflected impulse will be recorded for each cell. The shape of the reflected impulse consists from three parts: the leading edge, the plateau and the trailing edge. Numerical estimates show that the leading edge of the returned waveform saved the information about the significant wave height. The significant wave height in each elementary scattering cell can be retrieved by the algorithm used in the processing of radio altimeter data.

**Keywords:** radio altimeter, remote sensing, returned waveform, backscattering of microwave signal by rough water surface, swath, significant wave height