

Концепция космического радиолокатора СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны

В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков

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

В работе обобщаются результаты исследований по развитию концепции новой радиолокационной аппаратуры для дистанционного зондирования. В качестве космической системы рассматривается вариант доплеровского радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, ориентированной вертикально вниз. Обсуждаются два варианта использования радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны при размещении на спутнике. В первом случае след антенны ориентирован вдоль направления движения, и дисперсия наклонов восстанавливается только вдоль траектории полета. Во втором случае предлагается использовать вращение антенны вокруг вертикальной оси и благодаря этому информация о дисперсии наклонов, направлении распространения волнения и скорости приповерхностного ветра может быть измерена в полосе обзора шириной несколько сот километров, например, при высоте полета 800 км, полоса обзора составляет около 355 км с разрешением 14 км x 14 км.

Ключевые слова: обратное рассеяние электромагнитных волн СВЧ-диапазона, морское волнение, космический радиолокатор, алгоритмы обработки

Введение

Мировой океан покрывает две трети поверхности Земли и является гигантским аккумулятором тепловой энергии. Течения и ветровое волнение определяют интенсивность процесса тепло- и газообмена между атмосферой и океаном, что и формирует климат Земли. Получение оперативных и достоверных сведений о состоянии приповерхностного слоя океана крайне важно для составления достоверных долговременных прогнозов погоды.

Сбор исходной информации является самым трудоемким звеном процесса составления достоверного прогноза. Наземные метеостанции обеспечивают сбор достоверной информацией о состоянии приповерхностного слоя над сушей. Однако до недавнего времени информация о скорости ветра над морской поверхностью поступала только от немногочисленных буев и от судов вдоль судоходных трасс.

В последние двадцать лет благодаря применению дистанционных методов стало возможно оперативно собирать информацию с обширных акваторий. В то же время возрастающие требования к достоверности собираемой информации и необходимость обеспечения глобального контроля состояния Мирового океана заставляют разрабатывать новые дистанционные измерительные системы.

С точки зрения охвата территории лидерами на сегодняшний день являются скаттерометры, например, Sea Wind с узкой диаграммой направленности антенны, установленный на Quikscat (см. Рис.1). Скаттерометры измеряют скорость и направление ветра.

Широкая полоса обзора достигается за счет вращения антенны. Вращение позволяет радиолокатору «видеть» непосредственно под собой, что дает системе преимущество по сравнению с предшествующим скаттерометром NSCAT.

Следующая радиолокационная система является проектом и борется с основным недостатком радиолокатора Sea Wind, связанным с тем, что каждая точка наблюдается ра-

диолокатором только два или четыре раза. Это приводит к погрешности при восстановлении направления ветра. В данном случае за счет применения ножевой антенны удастся видеть точку под 6-10 азимутальными углами. Схема наблюдения приведена на рис. 2.

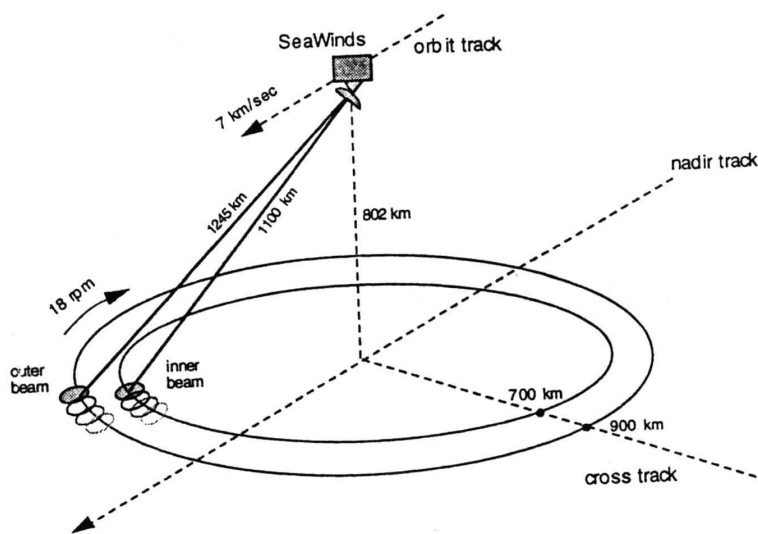


Рис.1. Скаттерометр SEA WINDS. Антенны $1,8^{\circ} \times 1,6^{\circ}$, и $1,7^{\circ} \times 1,4^{\circ}$, разрешение 25 км, ширина следа 1400 км, угол падения - 47° и 55°

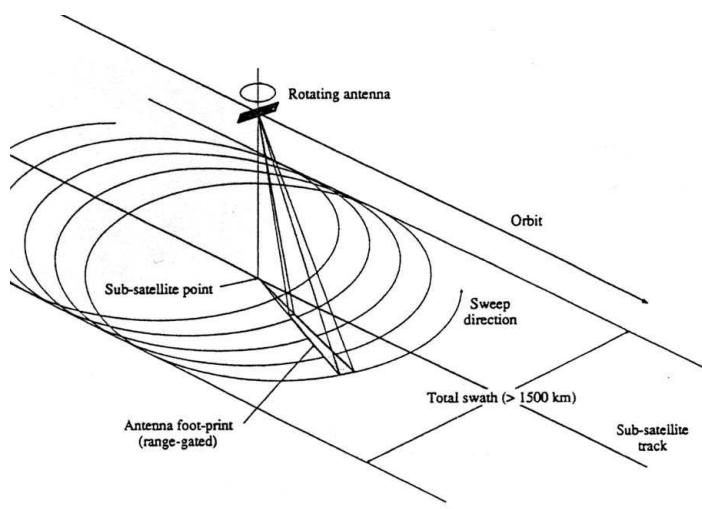


Рис.2. Скаттерометр с ножевой антенной. Частота 5,3 ГГц, антенна $23^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, разрешение 15 и 50 км, ширина следа 1400 км, угол падения от 28° до 51°

Однако скаттерометры не способны измерять параметры крупномасштабного волнения, что приводит к ошибке при восстановлении скорости приповерхностного ветра по сечению обратного рассеяния. Дело в том, что сечение обратного рассеяния напрямую зависит не от скорости ветра, а от параметров крупномасштабного волнения, связанных с полем приповерхностного ветра. Независимое измерение параметров крупномасштабного волнения позволит уменьшить неоднозначность и повысить точность определения скорости приповерхностного ветра, поэтому задача определения параметров волнения с помощью радиолокатора является актуальной.

Предпосылки

Новая концепция радиолокационной системы, способной измерять параметры крупномасштабного волнения из космоса, базируется на теоретической модели сечения обратного рассеяния, разработанной для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны, например, [1, 2].

Высоту значительного волнения измеряет радиоальтиметр. Обычный радиоальтиметр имеет диаметр освещенной площадки несколько километров, и такой небольшой размер пятна необходим для обеспечения высокой точности измерения среднего уровня океана.

Мы предлагаем использовать антенну с ножевой диаграммой направленности с угловыми размерами, например $1^\circ \times 25^\circ$. При высоте полета 800 км размер освещенной площадки на уровне 0,5 по мощности составит примерно 14×355 км.

В современных численных моделях волнения применяется сетка с ячейками 50×50 км в открытом океане и 25×25 км в прибрежных морях. Таким образом, мы видим, что разрешение вдоль одного направления является вполне удовлетворительным для изучения волновых процессов на поверхности океана (по азимутальному углу). Улучшить разрешение вдоль направления зондирования (по дальности) можно, применяя временную или доплеровскую селекцию.

Для получения широкой полосы обзора поверхности (панорамный режим) предлагается вращать антенну вокруг вертикальной оси. В результате мы получим полосу обзора шириной 355 км даже при ориентации антенны в надир (на уровне 0,5 по мощности).

Разработанные нами алгоритмы позволяют получать информацию о состоянии приповерхностного слоя океана, например, измерять дисперсию наклонов, направление распространения волнения, скорость ветра.

Ниже кратко рассмотрим основные характеристики радиолокационной системы для неподвижной и для вращающейся антенны.

Радиолокатор с неподвижной ножевой антенной. Общая характеристика

При малых углах падения рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках морской поверхности, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Величина сечения обратного рассеяния зависит от дисперсии наклонов крупномасштабного (по сравнению с длиной волны падающего излучения) волнения.

В приближении Кирхгофа формула для сечения обратного рассеяния σ_0 при надирном зондировании имеет следующий вид [3]:

$$\sigma_0 = \frac{|R_{эфф}(U_{10})|^2}{2} (\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2/5,52)^{-1/2} (\sigma_{yy}^2 + \delta_y^2/5,52)^{-1/2}, \quad (1)$$

где δ_x, δ_y – ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 – дисперсии наклонов крупномасштабного волнения; U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м. Эффективный коэффициент

отражения $R_{эфф}(U_{10})$ вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть ослабление мощности зеркальной компоненты мелкомасштабной рябью. Таким образом, сечение обратного рассеяния зависит как от крупномасштабного волнения (дисперсии наклонов), так и от мелкой ряби (через эффективный коэффициент отражения).

Мелкие волны (гравитационно-капиллярные и капиллярные) формируются под воздействием локального ветра и поэтому хорошо коррелируют с его скоростью, а в его отсутствие быстро затухают.

В то же время параметры крупномасштабного волнения зависят не только от локальной скорости ветра, но и от других факторов, например от наличия волн зыби, длины разгона, стабильности скорости ветра. В результате связь скорости ветра и сечения обратного рассеяния становится неоднозначной, что и является источником ошибок при определении скорости ветра только по сечению обратного рассеяния, т.е. с помощью однопараметрических алгоритмов.

Для того чтобы повысить точность определения скорости ветра, необходимо измерить дисперсию наклонов крупномасштабного волнения независимым способом, в результате чего указанная выше неоднозначность существенно уменьшается. Кроме того, новая информация повысит наши знания о состоянии океанской поверхности.

В качестве концепции радиолокатора рассматривается доплеровский радиолокатор СВЧ диапазона с ножевой диаграммой направленности (ДН) антенны ($\delta_x \ll \delta_y$), работающий в режиме надирного зондирования.

На рис. 3 показан пример такой системы при ориентации диаграммы направленности вдоль направления полета.

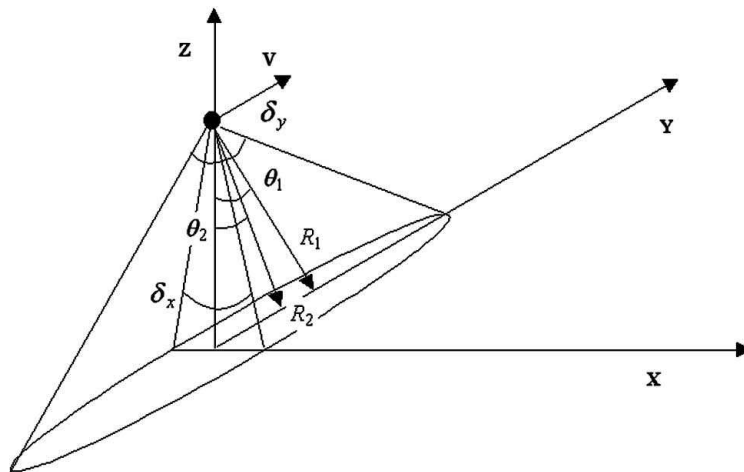


Рис. 3. Схема наблюдения. Неподвижная антенна

Если измерения проводятся радиолокатором с ножевой ДН антенны и с симметричной узкой ДН (ширина диаграммы $\delta_x = \delta_y \ll \sigma_{xx}, \sigma_{yy}$), то дисперсию наклонов рассеивающей поверхности вдоль траектории движения можно определить следующим образом [3]:

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_y^2 \sigma_0^2(\text{нож}) - \delta_x^2 \sigma_0^2(\text{узкая})}{5,52(\sigma_0^2(\text{узкая}) - \sigma_0^2(\text{нож}))}, \quad (2)$$

где $\sigma_0(\text{нож})$ – сечение обратного рассеяния в случае антенны с ножевой ДН и $\sigma_0(\text{узкая})$ – сечение обратного рассеяния для антенны с узкой симметричной ДН.

Теперь, благодаря прямому измерению дисперсии наклонов, можно в значительной степени избавиться от неопределенности, которая существует в зависимости сечения обратного рассеяния от скорости ветра, и, следовательно, можно точнее определить локальную скорость приповерхностного ветра. В этом случае можно будет говорить не об изменении скорости ветра на высоте 10 м, а об измерении скорости трения потому, что именно она непосредственно влияет на генерацию мелкомасштабного волнения, ответственного за величину эффективного коэффициента отражения. И эта информация более важна, т.к. именно скорость трения влияет на интенсивность газо- и теплообмена между океаном и атмосферой.

Важной отличительной особенностью радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны является то, что каждую элементарную рассеивающую ячейку радиолокатор видит в течение всего времени пролета под разными углами падения.

Селекция по времени прихода отраженного импульса позволяет легко решить вопрос идентификации элементарных рассеивающих площадок по дальности. Разделить площадки, расположенные на одной дальности, но по разные стороны от радиолокатора, поможет знак доплеровского сдвига.

На рис. 4а приведена иллюстрация последовательного наблюдения элементарной рассеивающей площадки при движении носителя. Объединим все данные, относящиеся к одной элементарной рассеивающей площадке, т.е. все наблюдения одного участка поверхности под разными углами падения во время пролета над освещенным пятном (см. рис. 4а) объединим (см. рис. 4б).

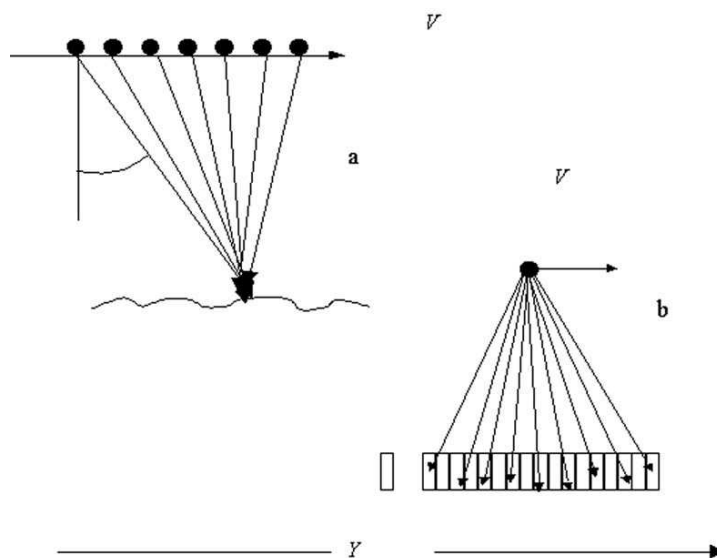


Рис. 4. Иллюстрация наблюдения элементарной рассеивающей площадки (а) и процедуры синтезирования (б)

В результате выполнения такой операции синтезирования, суммирующее изображение будет аналогично "одномоментному" наблюдению морской поверхности радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны. Синтезирование позволяет перейти к работе с квазиоднородным волнением и устранить влияние пространственной изменчивости волнения при измерении со спутника.

Таким образом, благодаря такому подходу удается имитировать измерение с хорошим пространственным разрешением радиолокатором с ножевой диаграммой направлен-

ности антенны со спутника и определить дисперсию наклонов в элементарной рассеивающей площадке.

Недостаток новой системы связан с тем, что измерение происходит только вдоль траектории движения, т.е. получается только сечение процесса на поверхности океана, как и в случае с радиоальтиметром.

Преимущества и недостатки радиолокатора с вращающейся ножевой антенной.

Рассмотрим особенности режима вращения антенны вокруг вертикальной оси. Первое отличие по сравнению с фиксированным положением антенны состоит в том, что радиолокатор не может видеть все элементарные ячейки непрерывно (Рис. 5). Частота наблюдения элементарной ячейки зависит от скорости вращения антенны.

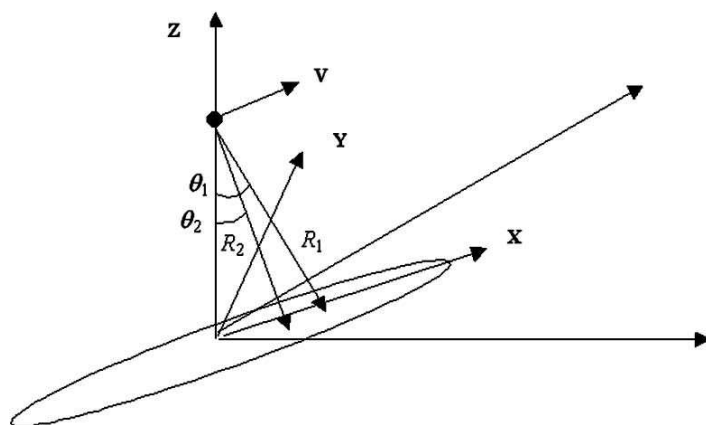


Рис. 5. Схема зондирования. Вращающаяся антенна

У такой системы появляется полоса обзора, что позволяет получить изображение процесса на поверхности океана. Изображение будет подобно скаттерометрическому, но информации о поверхности можно извлечь больше, т.е. каждой рассеивающей ячейке можно поставить в соответствие не только скорость ветра, но и дисперсию наклонов.

В то же время, вращение антенны приводит к некоторым отличиям при обработке отраженного сигнала по сравнению с неподвижной антенной.

При ориентации диаграммы направленности антенны вдоль траектории движения каждая элементарная ячейка наблюдается под всеми углами падения в пределах диаграммы направленности антенны, поэтому для обработки можно применить разработанную процедуру синтезирования и восстановить дисперсию наклонов в каждой ячейке. Такой подход неприменим для вращающейся антенны, т.к. каждая элементарная рассеивающая ячейка видна только под несколькими углами падения/азимутальными. Поэтому для режима панорамного обзора был разработан новый алгоритм определения дисперсии наклонов поверхности, учитывающий специфику планируемых измерений.

В общем случае наклонного зондирования сечение обратного рассеяния при малых углах падения задается известной формулой [4]:

$$\sigma_0 \cong \frac{|R_{\text{эфф}}(U_{10})|^2}{2 \cos^4 \theta_0 \sigma_{xx} \sigma_{yy}} \exp \left[-\frac{\text{tg}^2 \theta_1}{2 \sigma_{xx}^2} \right], \quad (3)$$

где индекс «xx» относится к текущему направлению зондирования (отслеживается поворот антенны), а «yy» – к перпендикулярному направлению.

При вращении ножевой антенны ($1^\circ \times 25^\circ$) освещается широкая полоса, которую с помощью временной или доплеровской селекции можно разбить на элементарные рассеивающие ячейки.

Две последовательные вдоль оси X ячейки будут отличаться углами падения. Для небольших ячеек, например 14×14 км, можно пренебречь изменением параметров волнения как внутри ячейки, так и между соседними ячейками. Тогда для восстановления дисперсии наклонов вдоль направления зондирования воспользуемся формулой, следующей из (3):

$$\sigma_{x1}^2 = \frac{tg^2\theta_1 - tg^2\theta_2}{2 \ln\left(\frac{\sigma_0(\theta_2) \cos^4\theta_2}{\sigma_0(\theta_1) \cos^4\theta_1}\right)}, \quad (4)$$

где θ_1 и θ_2 – углы падения для двух элементарных ячеек, а $\sigma_0(\theta_1)$ и $\sigma_0(\theta_2)$ – сечения обратного рассеяния этих ячеек соответственно.

Известно, что с высокой степенью точности полная дисперсия наклонов поверхности представляет собой сумму дисперсий наклонов, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поэтому для определения полной дисперсии наклонов поверхности в каждой элементарной ячейке необходимо измерить дисперсию наклонов в этой ячейке под разными азимутальными углами, используя вращение антенны во время движения радиолокатора.

Если измерение проведено под другим азимутальным углом то, принимая во внимание характер азимутальной зависимости дисперсии наклонов, можно определить дисперсию наклонов в нужном нам направлении и найти полную дисперсию наклонов. Алгоритм в этом случае будет сходен с алгоритмом, применяющимся при определении направления ветра по скаттерометрическим данным.

Радиолокатор видит каждую ячейку под разными азимутальными углами благодаря движению носителя и вращению антенны. Пусть радиолокатор видит каждую элементарную ячейку 6 раз, т.е. под шестью азимутальными углами. Для этого достаточно трех оборотов, т.к за один оборот антенны ячейка наблюдается 2 раза и частота вращения будет чуть меньше 6 оборотов в минуту при высоте полета 800 км.

В результате мы измерим дисперсию наклонов в каждой ячейке под шестью азимутальными углами, определим полную дисперсию и направление распространения крупномасштабного волнения в элементарной рассеивающей ячейке.

Заключение

Была рассмотрена новая концепция космического радиолокатора для измерения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и скорости приповерхностного ветра. В качестве радиолокатора предлагается использовать доплеровский радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны, ориентированной вертикально вниз.

Возможны два варианта спутниковой системы: 1) радиолокатор с неподвижной антенной, ориентированной вдоль траектории движения и 2) радиолокатор с вращающейся ножевой антенной.

Для неподвижной антенны разработана процедура синтезирования, которая позволяет устранить влияния пространственной изменчивости волнения и перейти к работе с квазиоднородным волнением. Недостаток системы связан с тем, что измерения происходят только вдоль траектории движения.

Провести измерения в широкой полосе обзора возможно за счет вращения антенны вокруг вертикальной оси. При размещении радиолокационной системы на спутнике на поверхности «освещается» широкая полоса, с которой собирается вся необходимая информация. Например, при высоте орбиты 800 км и диаграмме направленности антенны $1^\circ \times 25^\circ$ ширина полосы составит 350 км.

При последующей обработке происходит разбиение полосы обзора на элементарные рассеивающие ячейки размером, например, 14×14 км. Внутри ячеек волнение можно считать однородным и стационарным. С помощью разработанных алгоритмов восстанавливается дисперсия наклонов и направление распространения волнения в каждой элементарной ячейке, а также скорость ветра.

Благодаря построению двумерного изображения поверхности открываются возможности для анализа волновых процессов на поверхности океана, изучения их структуры и временной динамики при повторных наблюдениях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 09-05-97016-р-п-а и № 10-05-00181-а).

Литература

1. *Караев В.Ю., Каневский М.Б.* К вопросу о радиолокационном определении параметров морского волнения // Исследование Земли из космоса, 1999, N4, С.14-21.
2. *Мешков Е., Караев В.* Определение параметров морского волнения по доплеровскому спектру радиолокационного СВЧ сигнала, отраженного водной поверхностью // Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика, 2004, 47, N3, С. 231-244.
3. *Karaev V.Yu., Kanevsky M.B., Cotton P.D., Challenor P.G.* Is it possible to measure ocean surface slopes with a microwave radar? // International Journal on Remote Sensing, 2002, v.23, N16, pp. 3251-3262.
4. *Исакович М.А.* Рассеяния волн от статистически шероховатой поверхности // ЖЭТФ, 1952, т. 23, № 3, С. 305-314.

Concept of the Microwave Space Radar with Knife-Like Beam Antenna

V. Karaev, M. Kanevsky, Eu. Meshkov

Institute of Applied Physics RAS

603950, Nizhny Novgorod, Ulyanova, 46.

E-mails: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru

A new concept of radar for remote sensing of the ocean is discussed. As a space system the Doppler radar with knife-like beam antenna oriented in nadir is suggested. Two alternatives of the space Doppler radar with a knife-like beam antenna are considered. In the first case, a footprint of antenna is oriented along a track and the variance of slopes is retrieved only along the flight track. In the second case it is offered to use rotation of the antenna around of vertical axis and due to this the information on a variance of slopes, direction of wave propagation and near surface wind speed may be obtained over a few hundred kilometer swath; for example, at altitude of orbit of 800 km, the swath is approximately 350 km with the resolution cell 14×14 km.

Keywords: backscattering of microwave signal, sea waves, space radar, algorithms of data processing