

УДК 551.46.09

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272

Для цитирования: Карцан И. Н., Жуков А. О. Малые космические аппараты для зондирования морской поверхности // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 262–272. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272.

For citation: Kartsan I. N., Zhukov A. O. [Small satellites for sea surface sounding]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 262–272. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272.

Малые космические аппараты для зондирования морской поверхности*

И. Н. Карцан^{1, 2, 3, 4*}, А. О. Жуков^{4, 5}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

²Морской гидрофизический институт РАН

Российская Федерация, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

³Севастопольский государственный университет

Российская Федерация, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

⁴Экспертно-аналитический центр

Российская Федерация, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33/4

⁵Институт астрономии Российской академии наук

Российская Федерация, 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, 48

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

В статье представлен метод обработки сигналов радиолокационного зондирования подстилающей поверхности с применением подсвета от имеющихся космических аппаратов (навигационных, связанных) и группировки малых приёмных космических аппаратов (МКА), использующих антенны с синтезированной апертурой.

Методы и результаты. Малые космические аппараты обладают многими преимуществами перед большими спутниками. Так, они относительно недорогие в создании, занимают минимально время от проектирования до вывода на орбиту, легко модифицируются для решения определенной задачи, создают меньше радиопомех. Рассматриваемый подход заключается в перераспределении решаемых задач между группировкой спутников, находящихся на орбите. В качестве носителей передатчиков для подсветки подстилающейся поверхности, представлены, как штатные высокоорбитальные спутники связи, так и низкоорбитальные спутниковые системы связи, а также навигационные спутники. Данные космические системы используют необходимый широкополосный сигнал. Приемники отраженных сигналов размещаются на борту малых космических аппаратов. Одной из задач системы является выполнение научно-исследовательских экспериментов, заключающихся, в том числе, в оперативном мониторинге быстро перемещающихся атмосферных циклонов. В работе применяется метод формирования радиолокационного изображения морской поверхности, основываясь на моделях отраженных сигналов. Основные результаты исследований заключаются в следующем: 1) возможность в качестве зондирующего сигнала использовать как импульсный, так и широкополосный сигнал с априорно неизвестным законом модуляции; 2) приемлемая

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Разработка новых методов автономной навигации космических аппаратов в космическом пространстве» 121102600068-5.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic “Development of new methods for autonomous navigation of spacecraft in outer space” 121102600068-5. The work was carried out within the framework of the state assignment on topic No. 0555-2021-0005.

разрешающая способность; 3) возможность существенного уменьшения стоимости системы по сравнению с действующими космическими радиолокаторами обзора морской поверхности.

Выводы. В результате использования многопозиционной радиолокационной системы, использующей малые приёмные антенны с синтезированной апертурой и подсвет морской поверхности от действующих космических аппаратов, представляется возможным перейти на качественно новый уровень решения задач дистанционного зондирования морской поверхности с пространственным разрешением до 1 м, независимо от освещенности и наличия облачного покрова.

Ключевые слова: малые космические аппараты, приёмные антенны с синтезированной апертурой, прожекторный режим обзора, радиолокационное изображение морской поверхности.

Small satellites for sea surface sounding

I. N. Kartsan^{1, 2, 3, 4*}, A. O. Zhukov^{4, 5}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochi Prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences
2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation

³Sevastopol State University
33, University St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

⁴Expert and Analytical Center
33/4, Talalikhina St., Moscow, 109316, Russian Federation

⁵Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences
48, Pyatnitskaya St., Moscow, 119017, Russian Federation

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

The paper presents a method of processing signals of radar sensing of the underlying surface using illumination from existing spacecraft (navigation, communication) and a constellation of small receiving spacecraft using synthetic aperture antennas.

Methods and Results. Small spacecraft have many advantages over large satellites. Thus, they are relatively inexpensive to build, take minimal time from design to launch, can be easily modified to solve a particular problem, and create less radio interference. The approach under consideration consists in redistribution of tasks to be solved between the constellation of satellites in orbit. Both regular high-orbit communication satellites and low-orbit satellite communication systems, as well as navigation satellites are represented as transmitter carriers (underlying surface illumination). These space systems use the necessary broadband signal. Receivers of reflected signals are placed onboard small spacecrafts, and one of the tasks of the system is to perform research experiments, including on-line monitoring of fast-moving atmospheric cyclones. The work applies the method of sea surface radar imaging based on reflected signal models. The main results of the research are as follows: (1) possibility to use as a probing signal both a pulse and a broadband signal with a priori unknown modulation law, (2) acceptable resolution, (3) possibility to significantly reduce the system cost as compared to the existing space radars of sea surface survey.

Conclusions. As a result of using a multi-position radar system, which uses small receiving antennas with synthetic aperture and sea surface illumination from operating spacecraft, it is possible to move to a qualitatively new level of solving problems of sea surface remote sensing with spatial resolution up to 1 meter, regardless of illumination and cloud cover presence.

Keywords: small spacecraft, receiving antennas with synthetic aperture, floodlight view mode, radar imaging of the sea surface.

Введение

С начала освоения космического пространства было запущено большое количество спутников дистанционного зондирования и проведено огромное число экспериментов, касающихся оценки возможностей использования новых методов для глобального мониторинга объектов

суши и океана. Изучение Мирового океана более эффективными методами полностью ложится в план реализации «Десятилетия наук об океане в интересах устойчивого развития» (2021–2030 гг.) и поставлено в ряд важнейших проблем науки и техники, что связано с его возросшим значением в жизни человечества. Однако, несмотря на все возрастающую интенсивность изучения океана, уровень сегодняшних знаний о протекающих в нем процессах далеко не соответствует практическим потребностям. Для более детального и оперативного мониторинга нестационарных процессов в Мировом океане с диагностикой их параметров возрастает потребность в получении информации о протекающих процессах с минимальным временем повторяемости формируемых изображений.

В настоящее время термин «малый космический аппарат» (МКА) определяет не только массогабаритные характеристики, но и принципиально новую постоянно прогрессирующую архитектуру построения. Архитектура построения МКА определяет собственно массогабаритные размеры, стоимостные характеристики, персональную (полезную нагрузку), аппаратуру пользователя, систему запуска (как при создании группировки, так и при оперативном восполнении) и систему оперативного управления в реальном масштабе времени [1–3]. В разряд МКА также по весовым габаритам относятся наноспутники (вес от 1 до 10 кг), пикоспутники (вес от 100 г до 1 кг), фемтоспутники (вес до 100 г). Данные вид МКА из-за минимальной мощности электропитания в представленной работе не рассматривается.

Применение МКА позволит перейти на более высокий продуктивный уровень решения поставленных задач дистанционного зондирования за счет возможности оперативного развертывания или замены группировки МКА. Применение радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой подтверждается одним из первых экспериментов в истории на космическом аппарате Seasat. Основной целью эксперимента являлась оценка степени всепогодности микроволновых методов исследования Мирового океана, обработка методов и алгоритмов комплексных измерений гидрометеорологических параметров и обработки данных [4]. Радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой в представленном эксперименте работал в L -диапазоне на рабочей частоте 1,275 ГГц с полосой захвата на местности шириной 100 км по правому борту с центром 20° от надира. Синтезирование апертуры позволяло получать пространственное разрешение на местности 25 м.

Отличительной особенностью исследования океанов из космоса является то, что они часто закрыты облаками, метод синтезированной апертуры в этом смысле дает возможность преодолеть недостатки оптических систем зондирования. Представленный метод в перспективе позволил одновременно получать независимые многокурсовые радиолокационные изображения наблюдаемого участка для измерений: статистических характеристик высоты, длины и энергетических спектров океанических волн; топографии поверхности моря, которая является информацией о геоиде, штормовых волнах, приливах, океанических течениях, а также в определении размеров и природе морского льда [5; 6].

На сегодняшний день действующие радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) космического базирования имеют относительно большие размеры антенн (4–15 м), суммарный вес аппаратуры достигает 500 кг.

Режимы обзора малыми космическими аппаратами с синтезированной апертурой антенны

Поверхность моря имеет особенности, которые включают многочисленные (если не все) характеристики других поверхностей. Поскольку речь идет о радиолокаторе, процесс рассеяния имеет место только на поверхности или очень близко от нее, так как глубина проникновения электромагнитного излучения на рабочих частотах радиолокатора с синтезированной апертурой очень мала. Способы моделирования морской поверхности можно разделить на три категории: почти ровные поверхности, очень грубые поверхности и комбинирования первых двух. Различие между почти ровной и очень грубой поверхностями производится в зависимости

от того, велика или мала длина волны падающего излучения по сравнению с отклонением поверхности от некоторой средней плоскости. Почти ровные поверхности успешно анализировались решением уравнения Максвелла на границе раздела при приблизительном удовлетворении граничных условий. Единственно успешным подходом в случае очень грубых поверхностей является аналогия с физической оптикой. Однако этот метод имеет серьезный недостаток: он не учитывает эффектов затемнения или многократного рассеивания. Более того, нарушается необходимое условие – радиусы кривизны поверхности должны быть больше по сравнению с длиной волны падающего излучения и при этом трудно учесть эффект деполяризации.

В связи со сложным влиянием факторов, определяющих работу космических систем с РСА, выбор оптимальных параметров является сложной инженерной задачей. Техническое задание для РСА обычно определяет орбитальную высоту, требуемую дальность и разрешение по азимуту, зону захвата и полосу (полосу настройки зоны захвата), а также конструктивные характеристики и энергопотребление. Расчет выполняется путем последовательного приближения. Максимальный горизонтальный размер антенны $D_g < 2\delta X$, который может быть задан конструктивными соображениями или по результатам расчетов режимов наблюдения и параметров оборудования, определяется указанным разрешением [7].

Радиолокационное изображение содержит много легко различимых и идентифицируемых признаков и имеет явное сходство с изображениями, полученными оптическими приборами, но это сходство обманчиво. Оно включает в себя множество результатов отражений от поверхности, которая подвергается воздействию излучения с длинами волн на много порядков больше, чем у видимого света. Разрешение оптических систем, используемых в дистанционном зондировании, редко ограничивается дифракцией на заданной апертуре. С радиолокатором это явление почти неизбежно. Радиолокатор также является источником излучения, отражение которого улавливается для получения изображения, т. е. он является активным инструментом дистанционного зондирования, а не пассивным. Активной оптической системой в настоящее время является лидар – дальномер оптического диапазона. Радиолокатор облучает вращающуюся искривленную поверхность Земли радиоволнами со сферическим фронтом. Ранние системы самолетного базирования обычно не учитывали эти геометрические особенности из-за малой высоты полета РСА, но в системах космического базирования они должны учитываться. В результате расстояние от радиолокатора до отдельной точки облучения изменяется по мере перемещения точки наблюдения – эффект «блуждания по дальности». Существует два компонента, ответственных за этот эффект: квадратичный член из-за кривизны Земли и линейный член из-за вращения Земли. Каждая точка должна быть прослежена по всей синтезированной апертуре, чтобы устранить этот эффект, хотя фактическое поведение для отдельной точки будет зависеть от широты и дальности. Во время обработки необходимо добавить зависящий от диапазона квадратичный сдвиг фазы в направлении движения аппарата, чтобы компенсировать кривизну фронта отраженной волны.

Стремление обеспечить достаточно высокую периодичность наблюдения заданной акватории по приемлемой стоимости вполне может быть достижимо при создании орбитальные группировки (ОГ), МКА нового поколения с РСА. При этом МКА с РСА со средним уровнем разрешения, но с большой полосой съемки наиболее полно отвечают требованиям по наблюдению за морской обстановкой [8; 9].

Один МКА с высотой орбиты 1500 км за суточный период, над одной точкой поверхности моря, может провести радиолокационное зондирование не менее 6 раз. Для оперативного получения информации о состоянии морской поверхности с МКА при высоте орбиты 1500 км необходимо создание группировки с 4 орбитами по 3 МКА на каждой по аналогии с орбитальной группировкой многофункциональной системой персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М».

Выбор режима обзора зависит от поставленной задачи и технических характеристик малого космического аппарата и подразделяется:

- на широкополосный режим по ходу маршрута;

- прямолинейный узколучевой режим по ходу маршрута;
- прожекторный режим с учетом зоны видимости.

Сложность использования широкополосного режима по ходу маршрута (обзорный режим) (рис. 1, *а*) вызывается азимутальной неоднозначностью и геометрическими искажениями, вызванными радиальной скоростью в лучах при ошибках ориентации МКА и, особенно, при работе в орбитальной системе координат, а также потреблением во время съемки повышенной мощности от буферных батарей. Оптимальные варианты исключения ошибки ориентации – это использование фазированной антенной решётки с электронным сканированием и цифровой обработкой полученных сигналов [10; 11]. Задача цифровой обработки потребует перехода на программируемые логические интегральные схемы.

При непрерывной съемке возможна реализация обработки всей азимутальной диаграммы направленности антенны (разрешение до $\delta X \geq D_r/2$), и широкополосный режим может быть уменьшен по положению полосы захвата, как представлено на рис. 1, *б*. Полоса захвата находится в пределах полосы обзора РСА.

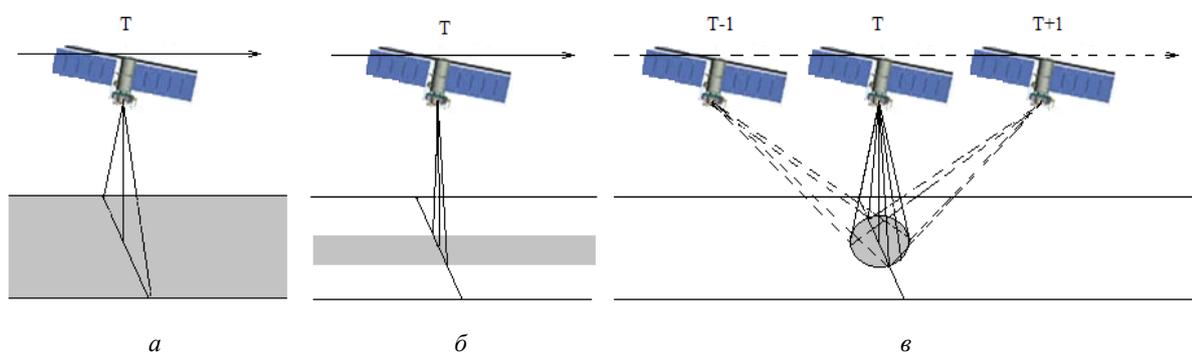


Рис. 1. Проекция площади при различных режимах обзора:
а – широкополосный режим; *б* – узкополосный режим; *в* – прожекторный режим

Fig. 1. Projection of the area in different viewing modes:
a – wideband mode; *b* – narrowband mode; *c* – spotlight mode

В случае, когда необходима широкая зона захвата и условия однозначности не удовлетворяются, то зону обзора сканируют несколькими парциальными лучами в обзорном режиме «скансар» [12] ценой уменьшения времени обработки информации. Обзор ведется кадрами поочередно с переключением лучей.

Прожекторный режим реализуется в том случае, когда требуется высокое разрешение, а длительность сигнала ограничена зоной облучения антенной по азимуту (рис. 1, *в*). Данный режим осуществляется удержанием диаграммы направленности антенны в снимаемом кадре при пролете МКА [13; 14].

Оптимизация обработки сигналов в многопозиционном прожекторном режиме

Космическая многопозиционная система должна состоять только из приемопередатчиков, расположенных на космических аппаратах различных космических систем (передатчики – космические аппараты системы связи, навигационные космические аппараты, телекоммуникационные космические аппараты и др., приемники – научно-исследовательские МКА), способных осуществлять совместную обработку от объектов, способных отражать радиосигнал. На рис. 2 представлена космическая многопозиционная система, работающая в прожекторном режиме, где функцию подсвета выполняют передатчик космического аппарата низкоорбитальной системы связи (ПРД КА-1), передатчик космического аппарата системы связи на эллиптической орбите (ПРД КА-2) и передатчик космического аппарата геостационарной системы связи (ПРД КА-3), а прием отраженного сигнала выполняет группировка или «рой» МКА (ПРМ МКА-1, ПРМ МКА-2,

ПРМ МКА-3). Реализацией многопозиционной системы РСА является относительное движение радиолокаторов и рассеивающих точек в пределах необходимой облучаемой области.

Согласно рис. 2, излучатели будут вводить доплеровский сдвиг в отраженный сигнал, который будет иметь максимальное положительное значение, когда он вначале входит в пучок приема, и максимальное отрицательное значение при выходе из прожекторной зоны. Характер изменения доплеровского сдвига для любой точки будет одинаковым по времени. Доплеровский процесс линейно модулирует частоту отраженного сигнала так, что его форма совпадает с тем отраженным сигналом, который принимается вслед за передачей исходного импульса.

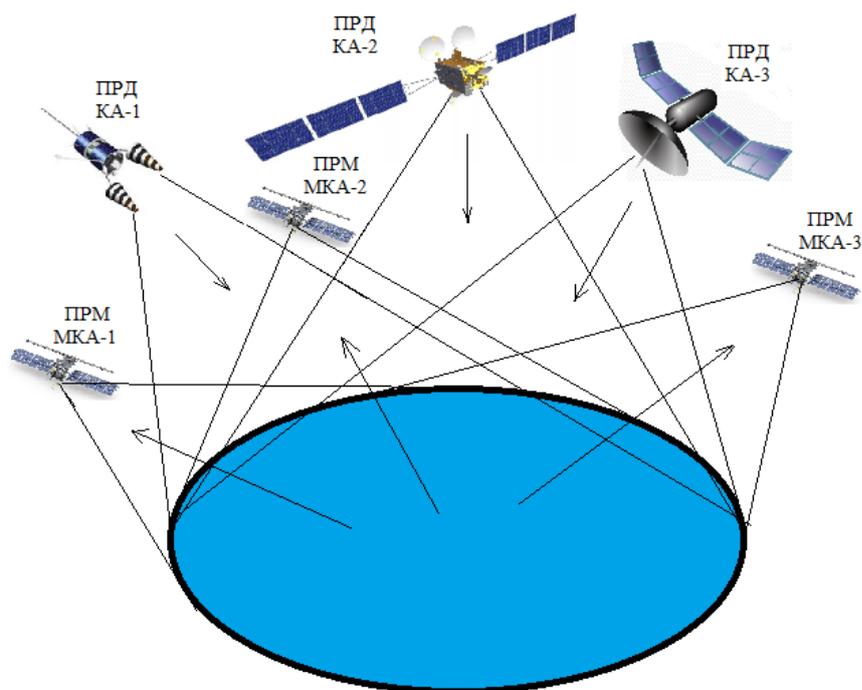


Рис. 2. Многопозиционная система с прожекторным режимом

Fig. 2. Multi-position spotlight system

Максимальная длина синтезированной апертуры является расстоянием, проходимым МКА, для которого отдельная точка остается в пределах обзора реального пучка. Тем самым выполняется одно из требований для космических систем к режимам покрытия, обеспечивающим «безпропускной» режим обзора.

Одной из основных задач при создании такой системы является разработка методов совместной обработки наблюдаемых полей [15–18], что позволит достичь максимального качества получаемых данных.

В настоящее время проведено большое количество «теоретических» работ, задачей которых является глобальный мониторинг состояния морской поверхности, включая передвижение атмосферных циклонов (штормовые волны). Для радиолокационной подсветки земной поверхности используются спутниковые радионавигационные системы (GNSS) [19–28] или геостационарные телекоммуникационные космические аппараты [29; 30].

Обобщенная структурная схема предлагаемой многопозиционной РСА с одним космическим аппаратом – передатчиком (высокоорбитальные или низкоорбитальные спутники связи, а также навигационные спутники), одним МКА – приемником и наземным комплексом представлена на рис. 3.

Космический радиолокационный комплекс любой космической системы включает в себя антенну, передающую на космическом аппарате подсвета (ПРД КА), и приемную антенну

на МКА с РСА (ПРМ МКА), блок формирования сигналов (БФС), синхронизатор, приёмник с выходами на фазовый детектор (ФД) синусного и косинусного квадратурных каналов, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) квадратурных каналов, блок сопряжения с радиолинией передачи данных, процессор управления и контроля, навигационное оборудование, командно-телеметрическую радиолинию (КРЛ) и радиолинию передачи данных (РПД).

Наземный комплекс включает в себя командно-телеметрическую радиолинию, приемник РПД, архив информационной составляющей, устройство синтеза цифровой радиоголограммы (ЦРГ), устройство нормализации, радиометрической и геометрической коррекции изображений, привязки к географическим координатам, рабочее место по обработке информации для поставленной задачи.

Технологическая повторяемость обуславливает относительно невысокую стоимость создания и развертывания такой многопозиционной системы, а создание универсального программного обеспечения обработки информации позволит оперативно вносить корректировки в алгоритмы работы системы.

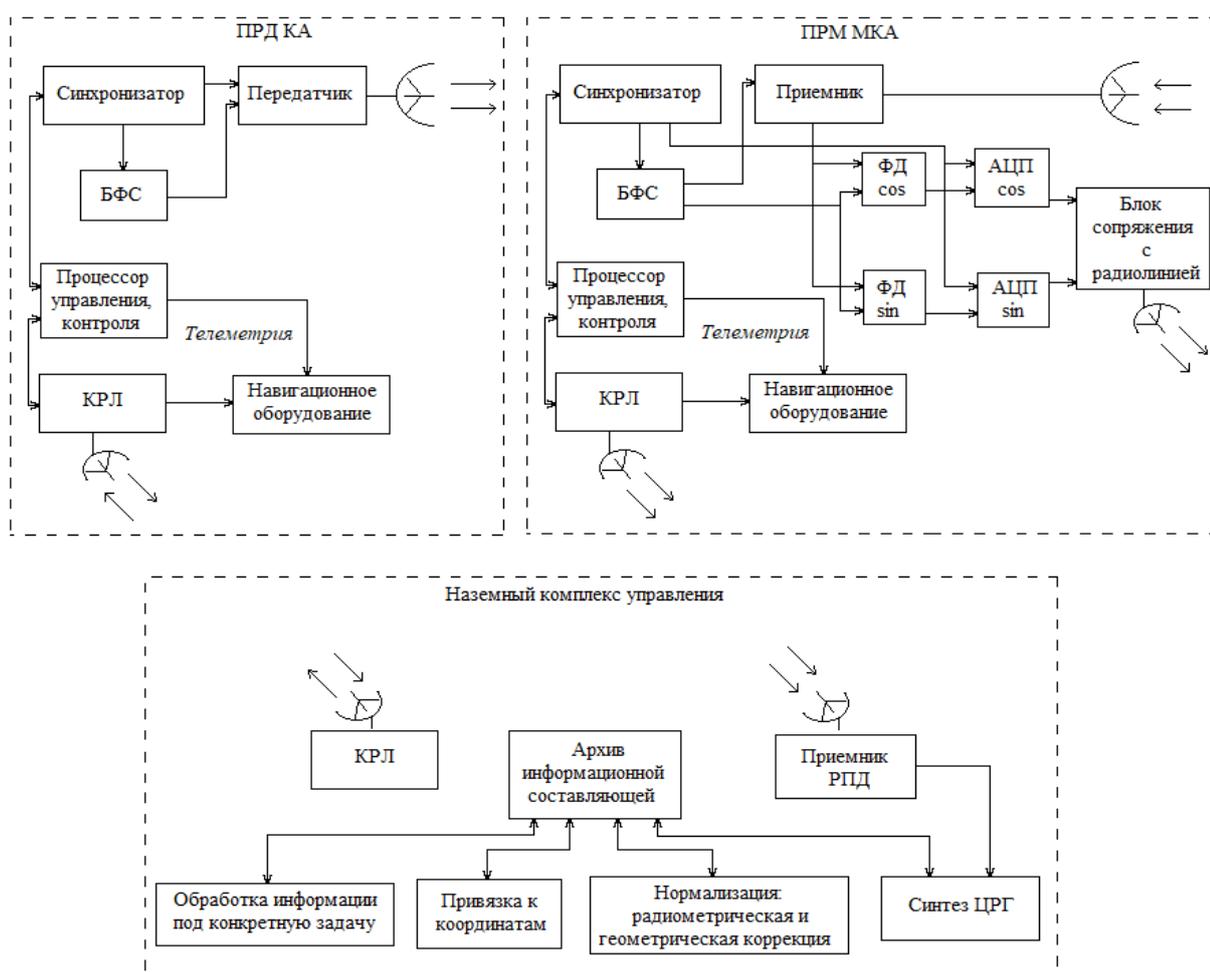


Рис. 3. Структурная схема многопозиционного РСА

Fig. 3. Structural diagram of a multi-position SAR

В представленной многопозиционной РСА с использованием научно-исследовательских МКА могут быть применены методы радиолокационного зондирования, разделяющиеся на три основных класса:

1) методы исследования флуктуаций амплитуды обратно рассеянного (или отраженного) сигнала, в основе которых лежит связь пространственных характеристик морского волнения со

структурой, огибающей внутриволновые флюктуации и угломестные зависимости удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности от интенсивности ветрового волнения;

2) методы, основанные на анализе доплеровских смещений частоты сигнала, вызванных наличием радиальных проекций скоростей единичных отражателей относительно радиолокатора;

3) методы, основанные на измерениях временных задержек и сдвигов элементов отраженного сигнала.

Данные методы основываются на представлении распределенного коэффициента отражения объектов, входящего в уравнение отраженного/рассеянного сигнала, в виде функционально-детерминированного или стохастического пространственного процесса. Дальнейшая оптимизация метода формирования радиолокационного изображения в системах дистанционных исследований морской поверхности могут основываться на двух основных моделях отраженных от поверхности сигналов – стохастической и функционально-детерминированной.

Заключение

Многопозиционная система с РСА на базе МКА будет являться в перспективе одной из мощных систем получения изображения морской поверхности, однако присутствуют сложности и трудности преобразования необработанных данных от РСА в понятную форму. Одним из вариантов решения данной проблемы является цифровая корреляция и гибкий подход, что позволит точно воспринимать вид изображения. Представленная схема получения и обработки информации может стать базой для создания различных вариантов квазиоптимальных алгоритмов, применимых при отсутствии необходимой априорной информации или при необходимости обеспечения измерений в масштабе реального времени. Использование МКА для радиолокационного зондирования морской поверхности в составе многопозиционной системы РСА позволит оперативно провести корректировку алгоритмов обработки радиолокационных изображений и возможность в перспективе проводить комплексную обработку радиолокационных данных, получаемых от метеоспутников и систем наблюдения в оптических диапазонах.

Библиографические ссылки

1. Kartsan I. N., Efremova S. V., Khrapunova V. V., Tolstopiatov M. I. Choice of optimal multiversion software for a small satellite ground-based control and command complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 450 (2), P. 022015.
2. Карцан И. Н., Ефремова С. В. Распределенное управление университетскими малыми космическими аппаратами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (13–17 апреля 2021). Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2019. Т. 2. С. 47–48.
3. Карцан И. Н. Наземный комплекс управления для малых космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 3 (24). С. 89–92.
4. Спутниковая гидрофизика : под ред. М. И. Штерн. М. : Наука, 1983. 253 с.
5. Ruffini G., Soulat F., Caparrini M., Germain O., Martin-Neira M. The eddy experiment: accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31(2). P. 2306.
6. Martin-Neira M., D'Addio S., Buck C., Floury N., Prieto-Cerdeira R. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. Vol. 49(6). P. 2209–2237.
7. Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. Спб. : СПбГУАП, 1999. Ч. 2. 220 с.
8. Клименко Н. Н., Занин К. А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2. С. 72–82.
9. Клименко Н. Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2. С. 48–57.

10. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array // International Siberian Conference on Control and Communications (29-30 June 2017) / V. N. Tyapkin, I. N. Kartsan, D. D. Dmitriev, S. V. Efremova. Astana, Kazakhstan, 2017. P. 7998452.
11. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference / I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. No. 155 (1). P. 012020.
12. Турук В. Э., Верба В. С., Голованова М. В. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Командор-Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 69–83.
13. Russian Spaceborne Synthetic Aperture Radar “Strizh” for Light Satellites of “Condor-E” type / V. Turuk, V. Verba, M. Golovanova et al. // Proc. EUSAR’2016. Hamburg, Germany. 2016. P. 947–952.
14. Афанасьев И. Зоркий «Кондор» // Новости космонавтики. 2013. № 8. С. 46–50.
15. Ксендзук А. В., Фатеев В. Ф., Попов С. А. Метод обработки сигналов в космических многопозиционных радиолокационных системах с синтезом апертуры антенны // Изв. выс. учеб. заведений. Приборостроение. 2009. № 4(52). С. 28–34.
16. Фалькович С. Е., Волосюк В. К., Горбуненко О. А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования. Харьков : ХАИ, 2002. 157 с.
17. Ksendzук A. V., Volosyuk V. K., Sologub N. S. Modeling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques // 5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004. Ulm, Germany. 2004. Vol. 2. P. 1013–1016.
18. Ksendzук A. V., Gerasimov P. A. Inverse passive synthetic aperture radar. Radio industry (Russia). 2016. Vol. 26(1). P. 33–37.
19. Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar // IGARSS 2003 / V. Zavorotny, D. Masters, A. Gasiewski et al. // 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (21–25 July 2003). Toulouse, France, 2003. Vol. 2. P. 781–783.
20. A delay Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing / Lowe S. T., Kroger P. M., Franklin G. W. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2003. Vol. 40(55). P. 1150–1163.
21. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals / Zavorotny V., Larson K.M., Braun J. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3(1). P. 100–110.
22. Gutmann E., Larson K. M., Williams M., Nievinski F. G., Zavorotny V. Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: An evaluation at niwot ridge, Colorado // Hydrol. Process. 2011. Vol. 26(19). P. 2951–2961.
23. Voronovich A. G. Non-local small-slope approximation for wave scattering from rough surfaces // Waves in Random Media. 1996. Vol. 6(2). P. 151–167.
24. Voronovich A. G. Small-slope approximation for electro-magnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces // Waves Random Media. 1994. Vol. 4(3). P. 337–367.
25. Soiguine A. Scattering of geometric algebra wave functions and collapse in measurements // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2020. Vol. 8. P. 1838–1844.
26. Johnson J. T. A study of ocean-like surface thermal emission and reflection using Voronovich’s small slope approximation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2005. Vol. 43(2). P. 306–314.
27. Voronovich A. G., Zavorotny V. U. Ocean-scattered polarized bistatic radar signals modeled with small-slope approximation // IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp. 2012. P. 3415–3418.
28. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content // IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp. 2000. Vol. 7. P. 2852–2854.
29. Переслегин С. В., Левченко Д. Г., Карпов И. О. Вибрационная волна на поверхности воды: параметрическое возбуждение и радиолокационное наблюдение // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 39–53.

30. Формирование скоростных радиолокационных изображений морской поверхности со стационарных, авиационных и космических носителей / С. В. Переслегин, И. О. Карпов, З. А. Халиков и др. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2019. Т. 12, № 1. С. 21–29.

References

1. Kartsan I. N., Efremova S. V., Khrapunova V. V., Tolstopiatov M. I. Choice of optimal multiversion software for a small satellite ground-based control and command complex. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 450(2), P. 022015.
2. Kartsan I. N., Efremova S. V. [Distributed control of university small spacecraft] *Materialy V Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials V Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2019. P. 47–48. (In Russ.).
3. Kartsan I. N. [Ground control complex for small spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 3 (24), P. 89–92 (In Russ.).
4. Satellite Hydrophysics. Ed. by M. I. Stern. Moscow, Nauka Publ., 1983, 253 p.
5. Ruffini G., Soulat F., Caparrini M., Germain O., Martin-Neira M. The eddy experiment: accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft. *Geophys. Res. Lett.* 2004, No. 31(2), P. 2306.
6. Martin-Neira M., D'Addio S., Buck C., Flourey N., Prieto-Cerdeira R. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, No. 49(6), P. 2209–2237.
7. Neronsky L. B., Mikhailov V. F., Bragin I. V. Microwave equipment for remote sensing of the Earth surface and atmosphere. Radar with synthesized aperture antenna. Spb., SPbGUAP Publ., 1999, Part 2, 220 p.
8. Klimenko N. N., Zanin K. A. New generation of spacecraft for maritime surveillance. *Air and Space Sphere*. 2019, No. 2, P. 72–82.
9. Klimenko N. N. Modern low-orbit spacecraft for geolocation and identification of radio emission sources. *Air and Space Sphere*. 2018, No. 2, P. 48–57.
10. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array. *International Siberian Conference on Control and Communications* (29–30 June 2017). Astana, Kazakhstan, 2017. P. 7998452.
11. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V., Kovalev I. V., Fateev Y. L., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, No. 155 (1), P. 012020.
12. Turuk V. E., Verba V. S. Golovanova, M. V. SAR Strizh for small spacecraft Komandor-E. *Modern problems of Earth remote sensing from space*. 2017, Vol. 14, No. 5, P. 69–83.
13. Turuk V., Verba V., Golovanova M., Neronskiy L., Zaitsev S., Tolstov E. Russian Spaceborne Synthetic Aperature Radar "Strizh" for Light Satellites of "Condor-E" type. *Proc. EUSAR'2016*. Hamburg, Germany. 2016. P. 947–952.
14. Afanasyev I. Zorky "Condor". *Novosti kosmonavtiki*. 2013. № 8. pp. 46-50.
15. Ksendzuk A. V., Fateyev V. F., Popov S. A. Method of signal processing in space multiposition radar systems with synthesis of antenna aperture. *Izvestiya vysokikh izuchenii "Instrument-making"* 2009, No. 4(52), P. 28–34.
16. Falkofich S. E., Volosyuk V. K., Gorbunenko O. A. Radiotechnical systems of remote sensing. Kharkov, KAI Publ., 2002, 157 p.
17. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K., Sologub N. S. Modeling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques. *5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004*. Ulm, Germany. 2004. Vol. 2, P. 1013–1016.
18. Ksendzuk A. V., Gerasimov P. A. Inverse passive synthetic aperture radar. *Radio industry (Russia)*, 2016, Vol. 26(1), P. 33–37. (In Russ.).
19. Zavorotny V., Masters D., Gasiewski A., Bartram B., Katzberg S., Axelrad P., Zamora R. Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar. *IGARSS 2003*.

2003 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (21-25 July 2003). Toulouse, France, 2003. vol.2, pp. 781–783.

20. Lowe S. T., Kroger P. M., Franklin G. W., LaBrecque J. L., Lerma J., Lough M. F., Marciniak M.R., Spitzmesser D.J., Young L. E. A delay Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2003, Vol. 40(55), P. 1150–1163.

21. Zavorotny V., Larson K.M., Braun J., Small E. E., Gutmann E., Bilich A. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, Vol. 3(1), P. 100–110.

22. Gutmann E., Larson K. M., Williams M., Nievinski F. G., Zavorotny V. Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: An evaluation at Niwot ridge, Colorado. *Hydrol. Process*. 2011, Vol. 26(19), P. 2951–2961.

23. Voronovich A.G. Non-local small-slope approximation for wave scattering from rough surfaces. *Waves in Random Media*. 1996, Vol. 6(2), P. 151–167.

24. Voronovich A.G. Small-slope approximation for electro-magnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces. *Waves Random Media*, 1994. Vol. 4(3), pp. 337–367.

25. Soiguine A. Scattering of geometric algebra wave functions and collapse in measurements. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2020. Vol. 8, pp. 1838-1844.

26. Johnson J.T. A study of ocean-like surface thermal emission and reflection using Voronovich's small slope approximation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2005. Vol. 43(2), pp. 306–314.

27. Voronovich A.G., Zavorotny V.U. Ocean-scattered polarized bistatic radar signals modeled with small-slope approximation. *IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.*, 2012. pp. 3415–3418.

28. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content. *IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.* 2000, Vol. 7, P. 2852–2854.

29. Pereslegin S. V., Levchenko D. G., Karpov I. O. The vibration wave on the water surface: parametric excitation and radar observation. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, Vol. 14(2), P. 39–53. Doi:10.7868/S2073667321020040.

30. Pereslegin S. V., Karpov I. O., Khalikov Z. A., Ermakov R. V., Mussiniants T. G. The forming of sea surface velocity images from stationary, airborne and spaceborne platforms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, Vol. 12(1), P. 21–29. Doi:10.7868/S2073667319010039.

© Карцан И. Н., Жуков А. О., 2023

Карцан Игорь Николаевич – доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН; профессор, Севастопольский государственный университет; главный научный сотрудник, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр». E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Жуков Александр Олегович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр»; ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Институт астрономии Российской академии наук». E-mail: aozhukov@mail.ru.

Kartsan Igor' Nikolaevich – Dr. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Senior Researcher, Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, professor, Sevastopol State University, head researcher, FGBNU “Expert and Analytical Center”. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Zhukov Alexander Olegovich – Senior Researcher, professor, deputy scientific director, FGBNU “Expert and Analytical Center”, leading researcher, Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. E-mail: aozhukov@mail.ru.
