РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2018, том 5, выпуск 4, с. 3–13

____ КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. ₌ РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 303.732.4:528.8:556.08 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.3.13

Анализ основных тенденций

развития спутниковых альтиметров:

«подрывные» или эволюционные технологии?

А. А. Романов, д. т. н., главный конструктор направления, romulas@spacecorp.ru AO «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются основные тенденции развития спутниковой альтиметрии начиная с 1992 года. Приведены характеристики всех основных спутниковых альтиметров: TOPEX/POSEIDON, SIRAL-2, SRAL, POSEIDON-4 и KaRIn.

На основе анализа ключевых характеристик, представленных в исследовании альтиметров, обсуждаются основные направления их перспективного развития. Показано, что технология синтеза апертуры спутниковых альтиметров привела к улучшению пространственного разрешения в направлении вдоль полета космического аппарата до 250–300 м. Однако подобные улучшения следует считать не более чем эволюционными.

Принципиальные изменения в спутниковой альтиметрии наступят вместе с внедрением технологии радарной интерферометрии, позволяющей получать измерения высот морской поверхности в полосе визирования, аналогично традиционным данным ДЗЗ. Указанная технология будет внедрена на базе перспективного интерферометра KaRIn (SWOT), предполагаемого к запуску в 2021 г.

Запуск КА SWOT предоставит беспрецедентные возможности исследования субмезомасштабных процессов в океане и изменит базовые подходы к методикам обработки спутниковой альтиметрической информации.

Ключевые слова: спутниковые альтиметры, системный анализ, «подрывные» технологии

The Analysis of the Basic Trends in Satellite Altimeters Development: "Disruptive" or Evolutional Technologies?

A. A. Romanov, *Dr. Sci. (Engineering)*, romulas@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The basic trends of satellite altimetry since 1992 are discussed in this article. The characteristics of the basic satellite altimeters TOPEX/POSEIDON, SIRAL-2, SRAL, POSEIDON-4, and KaRIn are represented.

The perspective directions of satellite altimeters evolution are discussed based on the conducted analysis of their pivotal characteristics. It was shown that the technology of the aperture synthesis used in contemporary satellite altimeters lead to the along-track spatial resolution improvements (up to 250–300 m). However, these improvements could not be considered as "disruptive" and could be related to "evolutional".

The fundamental changes in satellite altimetry will occur along with a new radar interferometer technology implementation only. This promising technology will allow one to receive the swath measurements of a sea surface height just like traditional remote sensing data provided conventional altimeters make measurements in the subsatellite points only. The KaRIn (SWOT) altimeter will utilize this new technology with launch plans for the satellite in 2021.

The launch of the SWOT satellite will provide some new unprecedented capabilities for the research of the submesoscale structures and processes in ocean and change the basics approaches to satellite altimetry data processing.

Keywords: satellite altimeters, system analysis, "disruptive" technologies

Введение

За последние несколько десятилетий направление спутниковой альтиметрии шагнуло далеко вперед: от приборов и космических аппаратов, пригодных для выполнения исключительно геодезических миссий (для которых характерны невысокие требования к точности измерений высоты морской поверхности) до сложнейших космических комплексов, использующихся в интересах решения задач фундаментальной климатологии, промысловой океанологии и пр., предоставляющих измерения высоты морской поверхности с точностью до нескольких сантиметров [1–3].

Принципиальный скачок вперед альтиметрические комплексы сделали за последнее десятилетие после внедрения нескольких ключевых технологий, разработка которых была вызвана необходимостью повышения точности определения толщины ледового покрова в арктической и антарктической зонах. Наряду с успешной реализацией миссии TOPEX/POSEIDON, впервые позволившей говорить о системных исследованиях уровня океана спутниковыми методами [4], использование технологий синтеза апертуры в альтиметре SIRAL-2 позволило повысить пространственное разрешение практически в 10 раз.

Так, альтиметры SRAL и POSEIDON-4 [5,6], построенные с использованием технологического задела, отработанного на предыдущих космических миссиях, позволяют достичь пространственного разрешения в 300 м, причем, в отличие от своих предшественников, пространственное разрешение альтиметра не будет зависеть от степени взволнованности подстилающей морской поверхности [6].

Квинтэссенцией развития альтиметрических космических комплексов в ближайшей перспективе станет система SWOT с размещенным альтиметром KaRIn на борту. Впервые в истории альтиметрических измерений указанный альтиметр будет способен предоставлять измерения высоты морской поверхности не только в подспутниковых точках, но и в полосах обзора с каждой стороны космического аппарата [7].

В рамках текущей работы предполагается сделать обзор характеристик существующих и перспективных альтиметрических комплексов и технологий их построения. Будет проведен анализ приведенных характеристик и выделены основные направления развития спутниковых альтиметров. Кроме того, будет сделана попытка оценки степени влияния предлагаемых технологий на темпы развития спутниковой альтиметрии. В результате проведенного исследования будут выделены ключевые технологии эволюционного или «подрывного» развития направления.

TOPEX/POSEIDON

Космический аппарат TOPEX/POSEIDON (2388 кг и CAC 5 лет) с одноименным альтиметром был запущен в 1992 г. и закончил свое существование в 2005 г. Обсуждая тенденции развития спутниковой альтиметрии, совершенно невозможно не упомянуть этот космический аппарат, поскольку именно с его запуском была начата активная эра использования информации спутниковых высотомеров в широких научных кругах.

КА TOPEX/POSEIDON (табл. 1) не был первым космическим аппаратом с высотомером на борту. Но он впервые дал возможность получать информацию с точностью определения высоты морской поверхности менее 5 см, что позволило начать ее активно применять для решения океанологических и океанографических задач в интересах различных потребителей [8].

Кроме того, информация TOPEX/POSEIDON (характеристики приведены в табл. 2) активно применялась для измерения не только уровня акваторий Мирового океана, но и уровня рек и прочих внутренних водоемов [10].

Необходимость решения проблемы улучшения алгоритмов «ретракинга» сигналов альтиметров КА TOPEX/POSEIDON привела в конечном счете к развитию принципиально новой технологии осуществления измерений, впервые примененных на КА CRYOSAT [11], запуск которого был неудачным. Вследствие этого первым альтиметром, который реализовал технологию синтеза апертуры, стал прибор SIRAL-2 КА CRYOSAT-2 [12].

Источники	GEOS-3	SeaSat	GeoSat	ERS-1	TOPEX/POSEIDON	
Альтиметр	13,9 ГГц	13,5 ГГц	13,5 ГГц	13,8 ГГц	5,3/13,6 (13,65) ГГц	
Инструментальный шум	50 см	19 см	5 см	3 см	< 2 см	
Смещение неопределенности	-	7 см	5 см	3-5 см	3 см	
Временное смещение	-	5 мс	3-5 мс	1-2 мс	< 1 мс	
ЕМ-смещение	10 см	5 см	2 см	2 см	< 2 см	
Асимметричность	2 см	1 см	1 см	1 см	1 см	
Сухая тропосфера	2 см	2 см	1 см	1 см	1 см	
Влажная тропосфера	15 см	3 см	4 см	1,2 см	1,2 см	
Ионосфера	2-3 см	2-3 см	2-3 см	2-3 см	1,3(2) см	
Орбита	30-50 см	30 см	20 см	18 см	3,5 см	
СКО	67 см	33 см	22 см	19 см	< 5 см	

Таблица 1. Сравнительные характеристики точности измерений альтиметров, запущенных до 1992 г. включительно, и сопутствующих поправок [9]

Таблица	2.	Основные	характеристики	альтиметра		
TOPEX [8]						

	Параметр	Значение			
1	Частота	13,575/5,3 ГГц (Ки/С)			
2	Ширина полосы	320 МГц (Ки), 320 или 100 кГц (С)			
3	Частота повторений импульсов	4,2 кГц (Ku), 1,22 кГц (C)			
4	Длительность импульса	102,4 мкс (Ки), 102,4 или 32 мкс (С)			
5	Диаметр пятна отклика сигнала	18 км			
6	Масса	230 кг (1 полукомплект)			
7	Потребляемая мощность	237 Вт			

SIRAL-2

В 2010 г. был запущен КА CRYOSAT-2 (720 кг и CAC 5,5 лет), который предназначен для мониторинга толщины ледовых шапок на суше и ледового покрытия на море. КА был необходим для решения фундаментальной проблемы объяснения взаимосвязи между таянием арктических льдов и повышением уровня мирового океана, а следовательно, ответа на вопрос — как этот процесс влияет на изменение климата.

КА был запущен на орбиту с наклонением 92° и высотой 717 км. Параметры орбиты предполагали длительность изомаршрутного цикла 369 дней (30 дней составлял псевдоизомаршрутный подцикл).

На борту КА был установлен высотомер SIRAL-2 (SAR/Interferometric Radar Altimeter-2), построенный с использованием принципиально новой технологии формирования сигнала DDA (Delay Doppler Altimeter) [13]. Прибор является одночастотным альтиметром, использует две приемные антенны, формирующие интерференционную картину в направлении, перпендикулярном движению КА, а также имеет два независимых канала обработки сигнала. Базовая линия антенн составляет 1,2 м. Они закреплены на едином основании со звездными датчиками для обеспечения точной информации об их позиционировании.

Сигнал альтиметра, отраженный от подстилающей поверхности, обрабатывается с использованием принципа синтеза апертуры (рис. 1) для увеличения разрешения в направлении вдоль движения космического аппарата.

Альтиметр функционирует в 3 режимах (табл. 3). Режим низкого разрешения (15 км) —



Рис. 1. Принцип работы альтиметра SIRAL-2 в режимах LRM, SARM и SARIn [12]

традиционный режим функционирования импульсного альтиметра (LRM). Применение этого режима эффективно только в случае измерения высоты поверхности над поверхностью, обладающей слабой изменчивостью [12].

Режим синтеза апертуры (SARM) использует один канал прибора и высокую частоту излучения сигнала. В этом режиме увеличивается пространственное разрешение альтиметра в направлении вдоль пролета КА до 250 м. Использование режима синтеза апертуры позволяет улучшить точность измерений над областями, покрытыми льдом [12].

Режим интерферометрии с синтезированной апертурой (SARIn) предназначен для увеличения точности измерений над регионами с сильно меняющейся топографией. Этот режим в основном используется над регионами границ ледяных покровов с существенными изменениями градиентов высоты. Два приемных канала работают одновременно с высокой частотой зондирования для обеспечения улучшенного пространственного разрешения в направлении, перпендикулярном направлению движения КА [12].

Альтиметр SIRAL-2 не используется для постоянного глобального мониторинга высоты поверхности океана, но технология синтеза апертуры впервые была применена именно на нем. Первым, постоянно использующимся альтиметром с синтезированной апертурой для глобального мониторинга высоты морской поверхности является прибор SRAL KA Sentinel-3A(B) [5].

SRAL

В 2016 (2018) гг. были запущены КА Sentinel-3A (В) (масса 1150 кг и CAC 12 лет), предназначением которых является комплексное зондирование поверхности океана для изучения изменчивости верхнего слоя, а также углубление понимания механизмов взаимодействия океан-атмосфера в интересах глобальной климатологии. КА были

	Параметр	Значение		
1	Частота	13,575 ГГц		
2	Ширина полосы	320 МГц (40 МГц SARIn)		
3	Частота повторений импульсов	1,97 кГц (LRM), 17,8 кГц (SARM/SARIn)		
4	Длительность импульса	50 мкс		
5	Мощность излучения пиковая	25 Вт		
6	Диаметр пятна отклика сигнала	15 км		
7	Разрешение SARM/SARIn	250 м		
8	Разрешение по дальности	45 см		
9	Масса	70 кг (1 полукомплект)		
10	Потребляемая мощность	149 Вт		

Таблица 3. Характеристики альтиметра SIRAL-2 [12]

Таблица 4. Характеристики альтиметра SRAL [5]

	Параметр	Значение
1	Частота	13,575/5,41 ГГц (Ки/С)
2	Ширина полосы	350 МГц (Ки), 320 МГц (С)
3	Частота повторений импульсов	1,9 кГц (LRM), 17,8 кГц (SARM)
4	Длительность импульса	20 мкс
6	Диаметр пятна отклика сигнала	18 км
7	Разрешение SARM/SARIn	300 м (2 км кросс-трек)
8	Ошибка определения дальности	3 см
9	Macca	60 кг (1 полукомплект)
10	Потребляемая мощность	100 Вт

запущены на солнечно-синхронную орбиту высотой 815 км и наклонением 98,6°, изомаршрутный цикл — 27 дней.

На борту КА Sentinel-3A(В) размещен альтиметр SRAL (табл. 4), который построен на базе технологий, отработанных в рамках миссий **POSEIDON-4** KA CRYOSAT-2, TOPEX/POSEIDON, JASON-1.

SRAL — первый в мире альтиметр, который постоянно осуществляет измерения высоты морской поверхности в режиме синтезирования апертуры. Применение указанной технологии позволило улучшить пространственное разрешение альтиметра до 300 м в направлении вдоль движения космического аппарата и не менее 2 км в направлении, перпендикулярном движению КА. При этом точность определения высоты морской поверхности осталась на уровне порядка 3 см [5].

Высотомер SRAL, как уже было сказано выше, постоянно функционирует в режиме синтезирования апертуры, но может реализовывать режим псевдонизкого разрешения (PLRM). Это необходимо для обеспечения непрерывности ряда альтиметрических измерений с учетом возможностей предшествующих приборов. Но SRAL не может обеспечить работу в режимах SARM и PLRM одновременно [5].

Для решения этой проблемы разработчикам альтиметра POSEIDON-4, предназначенного для перспективной миссии JASON-CS/Sentinel-6, была поставлена задача предусмотреть возможность совместного функционирования прибора в режимах SARM и LRM (PLRM) [6].

Миссия JASON-CS/Sentinel-6 (масса 1362 кг и САС 7,5 лет) рассматривается как потенциальное продолжение существующих альтиметрических миссий JASON-2/3, которые в свою очередь обеспечивают непрерывный ряд измерений относительно КА TOPEX/POSEIDON и JASON-1. Запуск двух космических аппаратов предполагается в 2020 и 2026 гг. [15].

КА JASON-CS/Sentinel-6 будут построены на базе успешной платформы SRYOSAT-2. Предполагается запустить два космических аппарата на орбиты, аналогичные орбитам семейства КА ТОРЕХ/ POSEIDON и JASON [15].

Альтиметр POSEIDON-4 будет с большой вероятностью использовать технологии, отработанные при создании высотомера SRAL. POSEIDON-4 будет представлять собой двухчастотный альтиметр (Ки- и С-диапазоны), функционирующий как



Рис. 2. Концепция функционирования КА SWOT [7]

в режимах LRM и SARM, так и в режиме, объединяющем два предыдущих (IRM). Предполагается, что пространственное разрешение вдоль направления движения KA не превысит 300 м, а точность определения высоты морской поверхности будет не хуже 3 см [6].

Миссия JASON-CS/Sentinel-6 призвана обеспечить плавный переход от традиционных альтиметрических миссий JASON-2/3 к принципиально новому радарному интерферометру KaRIn, который предполагается запустить на KA SWOT не ранее 2021 г. [7].

KaRIn

SWOT (~2000 кг и САС 5 лет) — принципиально новая альтиметрическая миссия, которая предполагает впервые в истории получать изображения подстилающей поверхности (рис. 2), содержащие измерения высоты поверхности в каждой его точке [7]. Космический аппарат SWOT будет запущен на орбиту высотой около 900 км с наклонением 77,6°, при этом изомаршрутный цикл составит 21 день. В настоящее время рассматривается возможность его запуска ракетоносителем Falcon-9 (SpaceX) с базы Ванденберг (США) и предварительная дата запуска — апрель 2021 г. [7].

Основным прибором КА SWOT (табл. 5) станет интерферометр Ка-диапазона KaRIn, который будет осуществлять измерения в полосе 100 км (по 50 км по каждой стороне от КА) вдоль трассы пролета космического аппарата. Кроме того, предполагается осуществление измерений в традиционном LRM-режиме. Пространственное разрешение альтиметрических изображений должно составить 2–70 м в зависимости от режима наблюдений [7].

Внедрение в практику исследований информации интерферометра KaRIn существенно повлияет на методики обработки информации, поскольку факт получения информации о высоте морской

	Параметр	Значение		
1	Частота	35,75 ГГц		
2	Ширина полосы	200 МГц		
3	Частота повторений импульсов	4,4 кГц		
4	Длительность импульса	4,5 мкс		
6	Пространственное разрешение	2-70 м		
7	Ширина полосы	100 км (2×50 км)		
8	Ошибка определения дальности	3 см (10 см — внутренние водоемы)		
9	Масса	294 кг		
10	Потребляемая мощность	810 Вт (пиковая мощность 1500 Вт)		

Таблица 5. Характеристики альтиметра KaRIn [7]

поверхности в полосе вместо подспутниковой точки, очевидно, влечет собой неизбежные изменения в методике получения основных тематических продуктов. Кроме того, при рассмотрении приведенных характеристик современных спутниковых альтиметров выявляется ряд определенных тенденций, которые необходимо проанализировать.

Анализ основных тенденций

Наиболее показательные результаты, отражающие темпы развития альтиметрических приборов и систем на их основе, возникают при анализе основных технических характеристик, представленных в обзоре выше (табл. 6). Действительно, масса космических аппаратов с 1992 г. сократилась практически в два раза (за исключением КА CRYOSAT-2, масса которого менее 1000 кг, что можно объяснить меньшим количеством приборов, размещенных на борту).

Наблюдается улучшение практически всех показателей с момента запуска альтиметра TOPEX/ POSEIDON до комплекса SRAL: масса приборов уверенно сокращается, а энергопотребление падает. Кроме того, длительность зондирующих импульсов сокращается в силу внедрения новой технологии синтеза апертуры, что в конечном счете приводит к качественному изменению пространственного разрешения от 18 км до 250–300 м.

На рис. З приведены два трека альтиметра SRAL KA Sentinel-3A и Sentinel-3B. На изображении четко прослеживается граница водоема, что делает альтиметрические измерения пригодными для определения его уровня. Ранее для альтиметров TOPEX/POSEIDON и даже POSEIDON-2 предполагалась полная отбраковка информации для условий так называемой «мелкой воды» [15, 16]. В соответствии с приведенной информацией на рис. З уровень озера Ван (Турция) составляет 1647 м.



Рис. 3. Изображение двух подспутниковых треков измерений альтиметров: Sentinel-3A от 26.04.2018 г. и Sentinel-3B от 09.05.2018 г. [14]

Анализ изображения показывает, что внедрение технологии синтеза апертуры и, как следствие, повышение пространственного разрешения вдоль трассы пролета спутника приводят к тому, что соотношение сигнал/шум для регионов перехода суша/вода серьезно улучшился. Следовательно, использование режима синтеза апертуры позволяет уточнить измерения над внутренними водоемами и в акваториях с «мелкой» водой.

Точность определения высоты морской поверхности различными альтиметрическими комплексами стабилизировалась на уровне 3 см, кроме того, сравнялись они и по возможностям предоставления

	TOPEX/POSEIDON	SIRAL-2	SRAL	POSEIDON-4	KaRIn
Частота, ГГц	13,575/5,3	13,575	13,575/5,41	13,575/5,41	35,75
Частота повторений импульсов, кГц	4,2	1,97/17,8	1,9/17,8	1,9/17,8	4,4
Длительность импульса, мкс	102,4 (Ku), 102,4 или 32 (C)	50	20	20	4,5
Пространственное разрешение, км	18	0,25	0,3	0,3	0,002-0,070
Ошибка определения дальности, см	< 5	< 45	3	3	3
Масса, кг	230	70	60	60	294
Потребляемая мощность, Вт	237	149	100	100	810
Режим синтеза апертуры	_	+	+	+	+
Ширина полосы, км	_	_	_		100
Масса КА, кг	2388	720	1150	1362	~ 2000
САС КА, лет	5 (13)	5,5 (8)	12	7,5	5

Таблица 6. Сводная таблица основных характеристик существующих и перспективных альтиметрических миссий

и учета сопутствующих измерениям геофизических поправок [4–7]. Подобный вывод можно сделать, анализируя информацию, представленную на рис. 4.

На изображении представлены треки различных альтиметрических КА, полученные за одни сутки. Видно, что в точках пересечения треков разных альтиметрических систем высота поверхности океана практически совпадает. Следовательно, для одновременного использования информации от нескольких систем не требуется проводить дополнительной кросскалибровки, как делалось, например, для миссий TOPEX/POSEIDON и ERS [18].

С учетом одновременной работы сразу четырех космических аппаратов с альтиметром на борту (рис. 4) за сутки набирается достаточно информации для реконструкции карты морской поверхности для определенного региона. Реконструкция или восстановление пространственного распределения высоты поверхности подразумевает использование различных методик аппроксимации или ассимиляции информации.

Следует отметить, что все ранее запущенные и современные альтиметры предоставляют информацию об уровне морской поверхности исключительно в подспутниковой точке. Именно поэтому все продукты, получаемые для последующего использования в различных приложениях, пересчитываются в узлы регулярной сетки с различным пространственным шагом. Временной шаг подобных продуктов определялся промежутком времени, равным по величине изомаршрутному циклу альтиметрической системы (т. е. не менее 10 сут, при использовании информации КА TOPEX/POSEIDON). Единственный механизм, применявшийся для сокращения времени «экспозиции» исследуемого региона, состоял в использовании информации от различных альтиметрических КА.

В соответствии с моделированием, проведенным в [19], показано, что ошибки восстановления распределений доходят до 40–60 % на модельных данных, т.е. существенное уточнение или улучшение непосредственных измерений спутниковых альтиметров будут нивелироваться неизбежными ошибками восстановления пространственных распределений, необходимых для исследования мезомасштабной изменчивости, циркуляции океана и для решения прочих прикладных задач.

Предложенные выше соображения показывают, что технологию синтеза апертуры нельзя считать «подрывной» технологией [20], способной перевернуть развитие спутниковой альтиметрии. Эта технология позволяет добиться исключительно последовательных улучшений, не оказывающих



Рис. 4. Измерения аномалий высоты морской поверхности (см) четырех альтиметрических аппаратов (JASON-2 (JA2), JASON-3 (JA3), а также Sentinel-3A (S3A) и Sentinel-3B (S3B)) для региона Атлантического океана на 08.05.2018 г. [17]

существенного влияния на качество финального продукта — пространственного распределения высот морской поверхности.

Действительно «подрывным» достижением в спутниковой альтиметрии (при условии успешной реализации и запуска КА) будет технология радарной интерферометрии, которая позволит получать информацию о высоте морской поверхности в полосе обзора. Будущая космическая миссия SWOT позволит получать изображение, каждая точка которого будет характеризовать высоту морской поверхности в ней. При этом полоса обзора составит 100 км, а пространственное разрешение будет варьироваться от 2 до 70 м. Масса космического аппарата составит около 2 т, САС 5 лет.

На первый взгляд, вышеперечисленные параметры с точки зрения сегодняшних характеристик аппаратуры ДЗЗ особенно не впечатляют. Но здесь наблюдается четкое соответствие механизму развития «подрывной» технологии на рынке: ее показатели всегда даже несколько хуже, чем общие по всему ряду [20]. Применительно к технологии радарной интерферометрии не стоит забывать, что при условии ее внедрения устраняется практически основной источник погрешности — необходимость аппроксимации альтиметрических данных для получения пространственного распределения исследуемого параметра, а прочие характеристики (пространственное разрешение, размер полосы, точность определения высоты) могут быть эволюционно улучшены.

С появлением «альтиметрических» снимков постепенно отпадет необходимость в проведении сложных процедур аппроксимации альтиметрической информации для реконструкции пространственных распределений высоты морской поверхности. Карты течений на поверхности будут получаться непосредственно обработкой вышеупомянутых изображений. Внедрение технологии радарной интерферометрии впервые позволит изучать субмезомасштабную изменчивость (как пространственную, так и временную) Мирового океана, что предоставляет беспрецедентные возможности для изучения, например, фундаментальных климатологических процессов. Фактически неизбежно произойдет изменение общепринятой парадигмы обработки данных спутниковой альтиметрии и переход к принципиально новым научным и прикладным продуктам.

При условии последовательного развития предлагаемой технологии интерферометрические альтиметрические данные в перспективе заменят собой информацию спутниковых радиолокаторов, применяемую для исследования изменчивости мирового океана, поскольку, обладая всеми преимуществами радиолокационных измерений, будет предоставлять дополнительную информацию — данные о высоте поверхности океана.

Выводы

В рамках настоящей работы приведен обзор и анализ характеристик основных альтиметрических систем, запущенных с 1992 г. или предполагаемых к запуску в ближайшие 2–3 года. Показано, что существует тенденция к сокращению массы и энергопотребления полезных нагрузок и, как следствие, общей массы альтиметрических КА.

В результате внедрения технологии синтеза апертуры пространственное разрешение современных спутниковых альтиметров достигло 250–300 м в направлении вдоль трассы движения КА, что привело значительным улучшениям альтиметрической информации, использующейся при исследованиях состояния гидрологических процессов внутренних водоемов и прибрежных зон.

В результате анализа тенденций развития спутниковых альтиметров показано, что технология синтеза апертуры определяет эволюционное развитие возможностей спутниковых альтиметров и не приводит к качественному скачку в рассматриваемой области.

Действительно «подрывной» технологией в спутниковой альтиметрии потенциально может стать радарная интерферометрия. Получение информации о высоте морской поверхности в полосе обзора неизбежно приведет к изменению общей парадигмы обработки информации спутниковой альтиметрии, поскольку перестанут использоваться механизмы реконструкции пространственных распределений высоты морской поверхности, исчезнет надобность в аппроксимации данных.

Запуск и последующее успешное функционирование КА SWOT, регулярное получение данных альтиметра KaRIn позволят получать информацию о динамике Мирового океана с беспрецедентной совокупностью пространственно-временного разрешения и точности. Впервые в истории изучения Мирового океана появится возможность исследования субмезомасштабных процессов как по временным (время пролета КА над исследуемой акваторией), так и по пространственным показателям (2–70 м).

Список литературы

- 1. *Bonnefond P. et al.* Calibrating the SAR SSH of Sentinel-3A and CryoSat-2 over the Corsica Facilities // Remote Sens., 2018, vol. 10, no. 92. P. 1–14.
- Bonnefond P. et al. The Benefits of the Ka-Band as Evidenced from the SARAL/AltiKa Altimetric Mission: Quality Assessment and Unique Characteristics of AltiKa Data // Remote Sens., 2018, vol. 10, no. 163. P. 1–32.
- Bonnefond P. et al. SARAL/AltiKa absolute calibration from the multi-mission Corsica facilities // Mar. Geodesy, 2015, vol. 38. P. 171–192.
- Fue L.-L., Cazenave A. Satellite Altimetry and Earth Science. A handbook of techniques and applications. Academic Press, 2001. P. 463.
- Sentinel-3. Электрон. дан. ЕС, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/ satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-3
- Jason-CS. Электрон. дан. США, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/ satellite-missions/j/jason-cs
- SWOT. Электрон. дан. США, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/ satellite-missions/s/swot
- TOPEX/POSEIDON. Электрон. дан. США, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/ eoportal/satellite-missions/t/topex-poseidon
- Романов А.А., Романов А.А. Основы космических информационных систем. М.: Радиотехника, 2013. 352 с.
- Жуков И.П., Романов А.А., Романов А.А. Определение уровня реки Амур по данным альтиметрического спутника TOPEX/POSEIDON // Мехатроника, автоматизация, управление, 2007, № 5. С. 12–15.
- CRYOSAT. Электрон. дан. ЕС, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/eoportal/ satellite-missions/c-missions/cryosat
- 12. CRYOSAT-2. Электрон. дан. EC, 2018. Заглавие с экрана. https://directory.eoportal.org/web/ eoportal/satellite-missions/c-missions/cryosat-2

- Mineart G. M. Emerging Space-Based Radar Altimeter Technologies // Sigma Earth Observations, 2005, vol. 5, no. 3. P. 6–12.
- Lake Van water height from Sentinel-3В 3. Электрон. дан. EC, 2018. Заглавие с экрана. http://m.esa.int/ spaceinimages/Images/2018/05/Lake_Van_water_ height_from_Sentinel-3B
- Benada R. PO.DAAC merged GDR (T/P) users handbook. Rep. JPL D-11007. Pasadena: Jet Propul. Lab., 1993. P. 111.
- Picot N., Case K., Desai S. and Vincent P. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products. Rep. JPL D-21352. Pasadena: Jet Propul. Lab., 2003. P. 120.
- 17. Just two weeks after the launch of the environmentmonitoring satellite Sentinel-3B, the third of its

payload of instruments — its radar altimeter — has begun sending high-precision measurements back to Earth 3. Электрон. дан. EC, 2018. Заглавие с экрана. https://www.eumetsat.int/website/home/News/DAT_ 3913829.html

- Ducet N., Le Traon P. Y., Reverdin G. Global high resolution mapping of ocean circulation from the combination of TOPEX/POSEIDON and ERS-1/2 // Journal of Geophysical Research (Oceans), 2000, vol. 105, no. C8. P. 19477-19498.
- Куницын В. Е., Романов А.,А. Восстановление карт поверхности океана методом локальной сплайн аппроксимации с хаотично расположенными узлами // Радиотехника и электроника, 2004, т. 49, № 4. С. 466–480.
- 20. Кристенсен К., Сктотт Э., Рот Э. Дилемма инноватора. Альпина Паблишер, 2018. 239 с.