### Перспективы развития космических радиолокационных методов изучения океанских явлений

### С.В. Переслегин, А.Ю. Иванов, З.А. Халиков

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 117997, Нахимовский проспект, 36 E-mail: peresleg@ocean.ru

Современные активные космические радиолокационные (РЛ) средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используемые для изучения океанских явлений, включают СВЧ альтиметры (радиовысотомеры), скаттерометры и РСА – панорамные радиолокаторы высокого синтезированной апертурой. докладе рассматриваются разрешения с В основные океанологические задачи, требующие применения активных РЛ-средств, приводятся характерные альтиметрические данные и РСА изображения – продукты, полученные зарубежными датчиками с применением специальных алгоритмов обработки. Обсуждаются как зарубежные проекты совершенствования РЛ-средств, так и программа Российского космического агентства по созданию и вводу отечественных средств. В России, несмотря на явное отставание, предложен ряд проектов принципиально новых космических РЛ-средств для океана, разработанных в РАН при тесном сотрудничестве с отечественной промышленностью. Эти проекты опубликованы, имеются инженерные расчеты. Общая направленность проектов – эффективность и экономичность (как по энергетике, так и по финансовым затратам), при значительном опережении имеющихся зарубежных аналогов по информативности. Один из таких проектов двухпозиционный космический РСА, использующий квазизеркальный режим рассеяния (бликовую дорожку) и интерферометрический прием отраженного сигнала. Приводятся расчетные характеристики системы при восстановлении поля скорости поверхностных течений с учетом воздействия крупных ветровых волн.

Ключевые слова: ветровые энергонесущие волны, сейсмические волны, поле скорости течения, поле уровня океана, квазизеркальное двухпозиционное рассеяние, двухпозиционный интерферометрический радар с синтезированной апертурой (ДИРСА).

#### Введение

В настоящее время отечественные РЛ-средства в космосе отсутствуют, их разработки фактически прекратились много лет назад и только теперь восстанавливаются. Еще большее сожаление вызывает то обстоятельство, что принципиально новые методы зондирования, широко обсуждаемые на отечественных и международных конференциях по ДЗЗ, не продвигаются в реальные российские разработки, несмотря на все декларации по «инновационному развитию» космической отрасли. Роскосмос осуществляет запуск многих иностранных космических аппаратов (КА) с российских космодромов (последний пример – запуск новейшего КА ТегтаSAR-X с космодрома «Байконур»), однако при этом не оговариваются какие-либо преимущества для российских пользователей при получении информации о российских же территориях, не говоря уже об океанских акваториях. В то же время Россия, не имея своих РЛ-средств, чрезвычайно заинтересована как в оперативных, так и в мониторинговых РЛ съемках своей территории со специализированной обработкой данных именно от подобных аппаратов.

Для оснащения новой аппаратурой российских КА «Метеор» и «Ресурс», Роскосмос модернизирует устаревший РЛБО «Океан» (РЛБО «Северянин»), предполагается также запустить СВЧ-скаттерометр по типу американского Quikscat и, наконец, создать широкообзорный РСА с

характеристиками, близкими к упомянутому TerraSAR-X. Мы считаем, что от подобных («аналоговых») разработок в России не следует отказываться, но вести их по возможности ускоренно, приобретая зарубежные лицензии на технологии, документацию и программы обработки РЛ-информации. Кроме того, необходимо привести отечественную наземную инфраструктуру в соответствие с зарубежными стандартами. Также совершенно ясно, что истинно инновационный путь развития не может основываться на воспроизведении старых технологий – как зарубежных, так и отечественных. Новые проекты, как правило, требуют серьезных затрат на экспериментальные исследования, в том числе с самолетов-лабораторий. Однако вполне очевидно, что необходимо идти на подобные затраты ради обеспечения России в будущем эффективными (в данном случае – радиолокационными) средствами Д33.

На многих отечественных и международных конференциях, посвященных методам и результатам дистанционного зондирования Земли из космоса, обсуждались перспективы развития космических радиолокационных средств для изучения океанских явлений [1-5]. Поверхность океана – это объект, позволяющий провести глубокую оптимизацию аппаратурных (радиолокационных) решений под задачи распознавания и диагностики океанских явлений. Эти задачи сводятся, главным образом, к измерению параметров трех физических полей: энергонесущих ветровых волн (высота и орбитальная скорость), скорости течения и аномалий среднего уровня.

Первая задача косвенным образом решается существующими РЛ средствами. Так, в трассерных радиовысотомерах (PB) для измерения высоты волн используют специальный канал, корректирующий данные основного канала, т.е. измерителя среднего уровня. Панорамный CBЧскаттерометр, измеряя под разными ракурсами удельную эффективную поверхность рассеяния (УЭПР) моря, определяемую резонансными мелкими волнами, при определении скорости и направления ветра фактически имеет дело с нелинейным эффектом взаимодействия мелких волн с крупными. Неудивительно, что этот прибор при наличии пришедшей издалека зыби дает огромную ошибку в измерении направления ветра (до 90°). Высокоразрешающие PCA, работая в том же режиме резонансного рассеяния, воспроизводят опять-таки картину модуляции мелких волн крупными, а не интересующую нас картину крупных волн [6]. Таким образом, на сегодня не существует космических РЛ средств, способных непосредственно наблюдать пространственную структуру и измерять параметры (высоту, орбитальную скорость) энергонесущих ветровых волн.

Вторая задача предусматривает измерение вектора скорости течения, т.е. осредненной величины, относящейся к некоей заданной (мезомасштабной) площадке, по своим размерам заведомо превышающей размеры энергонесущих ветровых волн. Обработка исходных данных (радиоголограмм) от современных космических РСА позволяет измерять, с некоторыми ограничениями, радиальную составляющую скорости течения по частотному доплеровскому сдвигу отраженного сигнала. При обработке здесь устраняются многие ошибки, в частности частотный дрейф из-за изменения скорости вращения Земли вдоль меридиана [7]. Однако эта методика до сих пор не используется в целях мониторинга течений.

Третья задача – панорамное восстановление поля уровня океана – нам представляется наиболее важной. Многолетнее использование радиовысотомеров произвело, без преувеличений, революцию в физической океанологии. Массовая обработка (в настоящий момент на орбитах находятся шесть работающих PB) позволила, отделяя статические вариации уровня от динамических – получить, например, полную картину океанических хребтов и впадин по возникающим на поверхности гравитационным аномалиям. Выделение же динамических аномалий поля уровня позволило выявить области океана с градиентными (геострофическими) течениями и наблюдать их пространственно-временную изменчивость (по сезонам). Сюда же относится выявление природы явления Эль-Ниньо – перемещения экваториальных вод, вызывающего катастрофические аномалии погоды в Южной Америке.

Являясь трассерными приборами, существующие PB способны формировать и «панорамное» поле уровня – но за достаточно большое время, для одного PB – примерно за месяц. Поэтому при

восстановлении динамических аномалий (исключая приливы, в основном моделируемые для открытого океана) можно говорить об измерении лишь осредненных по времени (среднеквадратических) отклонений, но никак не о восстановлении мгновенной картины поля уровня. Таким образом, существует огромная потребность в создании космических панорамных измерителей поля уровня океана. При этом векторное поле геострофических течений рассчитывается общеизвестным методом через поле уровня.

Особо следует отметить необходимость создания радиолокационной системы, способной отслеживать быстропротекающие мезомасштабные и мелкомасштабные процессы и явления в океане. Например, для мониторинга изменчивости уровня океана в энергоактивных зонах необходима примерно суточная периодичность в получении изображений, формируемых при ширине кадра ~1000 км с разрешением около 3 км. Еще более жесткие требования возникают при наблюдении сейсмических волн в открытом океане, вызывающих катастрофические цунами: та же ширина кадра при несколько худшем разрешении (~10 км), однако периодичность формируемых изображений должна быть не более 1 часа – что должно позволить вовремя оповестить цунамоопасный район, если прогнозируемая высота волны цунами (именно в этом районе!) достигает 3 м.

### Объекты оперативной диагностики, требования к перспективной космической радиолокационной системе

Не претендуя на полноту, перечислим наиболее важные природные объекты для оперативного мониторинга в океане, а также основные требования, которым должна удовлетворять космическая система наблюдений для каждого из них. Будем считать, что ширина зоны обзора при этом должна быть не менее 1500 км при охвате кадром всей доступной акватории. Периодичность получения кадра зависит от числа КА в группировке: для суточной повторяемости достаточно одного аппарата, а для часовой повторяемости на широтах 50-70° – не менее шести КА. Итак, важнейшие объекты:

1. Ветровые энергонесущие волны и волны зыби, с вероятностным прогнозом «волн-убийц». Мелкомасштабные поля уровня или скорости, горизонтальное разрешение ~20 м, пороговая чувствительность по уровню ~2 м, по скорости ~1 м/с.

2. Сейсмические волны в открытом океане с прогнозом цунамоопасности. Мезомасштабное поле уровня, горизонтальное разрешение ~10 км, пороговая чувствительность ~ 2 см.

3. Пространственно-временная мезомасштабная структура поля течений. Горизонтальное разрешение ~1 км, чувствительность ~2 см/с.

4. Внутренние волны различного происхождения. Мезомасштабные поля скорости и уровня. Горизонтальное разрешение не хуже 200 м, пороговая чувствительность ~2 см и ~1 см/с.

Нетрудно видеть, что по совокупности требований (разрешение – чувствительность), сейсмические волны и течения (пп. 2 и 3) наиболее доступны. Формирование изображений волн зыби (п. 1) требует очень большого объема воспроизводимой информации, а формирование портретов слабых внутренних волн (п. 4) требует предельных значений чувствительности при умеренном разрешении, обеспечивающем подавление ветровых волн.

## Оценка эффективности имеющихся радиолокационных средств при наблюдении океанских явлений

Объем статьи позволяет привести лишь несколько наиболее информативных изображений, полученных космическими РЛ средствами за последнее время. На рис. 1 показано изображение штормовых волн в Южной Атлантике, полученное PCA на ИСЗ ERS-2. Специальная обработка выявила области возможного возникновения «волн-убийц» высотой более 12 м [8]. В то же время,

как говорилось выше, формируемое яркостное изображение отображает не высоту крупных волн, а лишь эффект их нелинейного взаимодействия с мелкими волнами, поэтому получить информацию о высоте волн из этих данных не представляется возможным. Если же говорить об оперативности наблюдений, то, конечно, при ширине зоны обзора 100 км (повторяемость ~12 суток на экваторе) и высокой стоимости радиолокатора со средней излучаемой мощностью ~300 Вт, не приходится говорить о создании группировки из большого количества аппаратов.



Рис. 1. Яркостное РСА-изображение штормовых волн, полученное РСА на ИСЗ ERS-2 в Южной Атлантике. В зачерненных областях возможно появление экстремальных волн («волн-убийц») высотой более 12 м (рисунок из [8])

На рис. 2а показан «разрез» поля уровня океана, выполненный радиовысотомером на ИСЗ Торех-Poseidon для участка Тихого океана, где именно в тот момент проходил цуг сейсмических волн, возникших во время Курильского землетрясения 4 октября 1994 г. На рис. 26 показан тот же сигнал, пропущенный через согласованный фильтр, полоса фильтрации которого подбиралась в соответствии с ожидаемыми параметрами цуга. Зафиксирован факт: если на исходном «разрезе» о присутствии сейсмоволны можно только догадываться, то после её распознавания (по априорным данным) четко диагностируется цуг с высотой волны 3-10 см и длиной волны ~100 км [9].



Рис. 2. а – запись сигнала на выходе радиовысотомера Topex-Poseidon (орбита 208), канал уровня; б – та же запись на выходе согласованного фильтра. Горизонтальная ось – градусы долготы; вертикальная ось – отклонения от среднего уровня океана в см (рисунок из [9])

На рис. 3 представлен результат обработки исходной радиоголограммы, полученной PCA на ИC3 ERS-1 для Флоридского пролива. Вверху показано яркостное изображение пролива (слева – п-ов Флорида, справа – о. Куба), затем – скоростное изображение (цвет отображает определенный диапазон скоростей, интервал между цветами 0,5 м/с). Внизу показаны разрезы изображений по линии AA [7]. Флуктуационная чувствительность составляла ~1,5 дБ по яркости и ~2 см/с по радиальной скорости, при осреднении на симметричных площадках размером 100 м и 1 км соответственно.



Рис. 3. а – РСА-изображение Флоридского пролива (ИСЗ ERS-1, 28.12.1995); б – скоростное изображение (поле течений, восстановленное по РЛИ); в – разрезы изображений по линии АА (рисунок из [7])

На рис. 4 представлен результат аналогичной обработки, выполненной для фрагмента РЛизображения (ИСЗ ERS-1), отображающего цуг внутренних волн в Гибралтарском проливе. Вверху – яркостное (слева) и скоростное (справа) изображения, внизу – их разрезы, совмещенные вдоль обозначенных вверху стрелок [10]. Видно, что длина волны в цуге в среднем составляет ~5 км, орбитальная скорость на поверхности (градиентное течение) имеет амплитуду ±10 см/с, а контраст интенсивности мелких поверхностных волн на переднем склоне внутренней волны составляет около +6 дБ.



Рис. 4. Пример обработки РЛ-данных ИСЗ ERS-1 от 01.01.1995. Вверху – яркостный (слева) и скоростной (справа) «портреты» внутренних волн в Гибралтарском проливе; внизу – совмещение разрезов по указанным вверху стрелкам (рисунок из [10])

Приведенные примеры РЛ наблюдений относятся к динамическим океанским явлениям, требующим оперативной диагностики из космоса. Измеряя параметры этих явлений по данным РЛ наблюдений, зная параметры используемых РЛ-средств и главное – физическую природу взаимодействия электромагнитного излучения с поверхностью океана, можно представить себе перспективу совершенствования космических РЛ средств, предназначенных для оперативного мониторинга подобных явлений, в том числе опасных. В этой связи отметим следующее:

1. Трассерные радиовысотомеры, используя квазизеркальный режим отражений, при формировании поля уровня обеспечивают приемлемую (порядка 1 см) флуктуационную чувствительность, но для объектов типа слабых сейсмических волн (рис. 2) требуется специальная обработка данных при наличии априорных сведений о параметрах сейсмической волны. Оперативный мониторинг цунами с оповещением об опасности возможен при наличии РЛ системы, включающей панорамные высотомеры с шириной полосы «мгновенного» обзора порядка 1000 км и чувствительностью ~1 см при допустимом размере площадки осреднения ~10 км.

2. Панорамные СВЧ-скаттерометры (типа современного Quikscat), работая в режиме брэгговского рассеяния, для измерения параметров энергонесущих волн и калибровки РЛизображений по скорости и направлению ветра используют модуляцию мелких волн крупными (нелинейное взаимодействие). В результате мы имеем весьма информативную космическую систему, отслеживающую перемещение и параметры атмосферных циклонов над океанами, однако параметры волн измеряются при этом с недопустимыми ошибками, особенно при наличии волн зыби. Периодичность получения подобных изображений (~1 сутки) является достаточной для отслеживания циклонической активности, однако отслеживание экстремальных волн невозможно из-за отсутствия достаточной разрешающей способности.

3. Космические панорамные PCA, работая в том же «брэгговском» режиме, формируют яркостные изображения, по которым можно судить о параметрах энергонесущих ветровых волн, главным образом об их длине и пространственной структуре (рис. 1). Оценивать высоту волн в данном случае можно лишь по косвенным признакам, пользуясь эффектом их нелинейного

взаимодействия с мелкими волнами. Мониторинг опасных волн из космоса представляется нереальным из-за узкой зоны обзора, малой периодичности получения изображений и невозможности создать группировку из огромного количества весьма дорогих и энергоемких аппаратов.

4. Формирование скоростных РЛ-изображений океанских акваторий по данным современных космических РСА возможно путем использования специализированной обработки исходных данных – радиоголограмм – выделяя малые доплеровские сдвиги при подавлении амплитудных вариаций и компенсируя значительный частотный дрейф из-за вращения Земли (возникающий при движении аппарата вдоль меридиана) (рис. 3). Эту методику необходимо совершенствовать применительно к новейшим типам РСА, прежде всего для РСА на КА TerraSAR-X. То же самое относится и к формированию изображений слабых течений, вызываемых, например, внутренними волнами приливного происхождения (рис. 4). Необходимо также оценить возможность формирования скоростных портретов дрейфующего ледового покрова Арктики.

### Перспективные проекты новых радиолокационных средств для изучения океана из космоса

Приведенный выше материал позволяет не только оценить эффективность имеющихся РЛ-средств при оперативной диагностике океанских явлений, но и наметить пути создания более эффективных средств. Космическая радиолокация бурно развивается, и на базе уже изученных и частично реализованных методов – можно считать перспективными следующие пути. Первое, это переход к панорамному и единовременному формированию полей уровня океана и скорости течений, что не исключает формирования поля интенсивности отраженного сигнала, несущего лишь косвенную информацию об океанских явлениях. Второе, это существенное (на порядок) расширение зоны обзора PCA при сохранении высокого разрешения, что и позволяет оперативно диагностировать слабые мезомасштабные явления. И, наконец, это использование «квазизеркального» режима рассеяния, свойственного только океанской поверхности при соответствующем выборе параметров визирования, т.е. при двухпозиционном наклонном зондировании, использующем два разнесенных аппарата.

На рис. 5 представлена схема нового американского аппарата, разрабатываемого JPL и, по-видимому, предназначенному на смену надирному радиовысотомеру [11]. Кроме антенн обычного радиовысотомера и СВЧ радиометра, работающих в надир, на аппарате устанавливаются еще две антенны, образующих интерферометрический PCA (ИРСА) с поперечной базой размером 7м. Наши расчеты подтверждают, что при тех же параметрах излучаемого сигнала, что имеет ныне существующий радиовысотомер GASON-2 (длина волны 2 см, ширина спектра 400 МГц, средняя мощность 30 Вт), этот прибор обеспечит формирование картин поля уровня океана (как и показано на рисунке) в полосе ±100 км от надира, с чувствительностью ~2 см на площадках размером ~2 км. В то же время, здесь очевидна невозможность получения на порядок более широкой полосы обзора, требуемой, например, для оперативной диагностики волн цунами.

На рис. 6 показана идея многопозиционного зондирования океана – подсвет поверхности с одного КА и прием отраженного сигнала тремя аппаратами, образующих интерферометр (проект CORIOLIS [12]). Орбиты аппаратов выбираются таким образом, чтобы на каждом витке сохранялась возможность формирования как картины поля уровня океана (поперечная составляющая антенной базы), так и картины поля скорости течений (продольная составляющая антенной базы). Расчеты по этому проекту нами не проводились, так как слишком велики неопределенности – как по предполагаемым параметрам аппаратуры, так и по необходимым параметрам орбит, образующих переменные (во времени и пространстве) антенные базы.



Рис. 5. Проект надирного интерферометрического PCA (JPL): формирование картин поля уровня океана при ширине полосы обзора 2 х 100 км с чувствительностью ~2 см на площадках размером 2 км [11]. Для оперативной диагностики явлений необходима группировка из десятков таких аппаратов



Рис. 6. Четырехпозиционный РЛ-интерферометр (проект CORIOLIS [12]). Квазизеркальный режим отражений, позволяющий формирование картин полей уровня и скорости течений

В отечественной и зарубежной литературе [13-16] есть немало работ, где с разных точек зрения прорабатывается идея использования навигационных космических излучателей для целей РЛ обзора поверхности Земли – в том числе и для измерения параметров океанской поверхности, а в работе [17] предлагается даже вариант конструкции сверхмалых (*nanosatellites*) приемных низкоорбитальных аппаратов, совокупность которых (порядка сотни штук при весе каждого аппарата ~5 Кг) должна решать задачу мониторинга поверхности океана, воспринимая отраженный океаном сигнал системы GPS. Однако проделанные нами расчеты однозначно показывают, что приведенный к поверхности Земли уровень излучаемого сигнала (дециметровый диапазон, когерентное сжатие импульса), даже при использовании «квазизеркального» отражения взволнованной поверхностью – требует совершено иных технических решений с применением

достаточно больших приемных антенн. Скорее всего, таким образом всё же возможно создать оперативную систему глобального мониторинга такого параметра, как средний уклон ветровых волн, используя калиброванные значения УЭПР. Однако представляется, что сами по себе параметры навигационных систем GPS и ГЛОНАСС принципиально не позволяют сформировать РЛ панораму полей уровня океана с необходимыми в данном случае чувствительностью, разрешением и быстродействием – независимо от того, применяется ли метод навигационной фазометрии или метод РЛ интерферометрии.

### Результаты модельных исследований по проекту двухпозиционного PCA с интерферометрическим приемом отраженного сигнала

Необходимость создания космического PCA, способного формировать не только обусловленное мелкими волнами поле интенсивности отраженного сигнала, но и непосредственно поля уровня и скорости на поверхности океана, была осознана уже в 90-х годах прошлого столетия (см. разд. 1 и 2). Физические обоснования подобной разработки были уже опубликованы авторами в работах [18-20]. Здесь же ограничимся изложением основных полученных результатов.

Прежде всего, очевидно, что энергетика однопозиционного (брэгговского) рассеяния при наклонном зондировании взволнованной поверхности из космоса не позволяет создать PCA с шириной зоны обзора порядка 2*H*, и тем более – группировку из нескольких КА с подобными PCA для обеспечения оперативности наблюдений. Отсюда и возникла идея использования «бликовой дорожки» при двухпозиционном зондировании – с энергетическим выигрышем в три порядка по величине УЭПР.

Модельные исследования показали и другие особенности двухпозиционного землеобзора, не связанные с океаном: существенное ухудшение поперечного разрешения вблизи зеркальной точки, значительную нелинейность поперечного масштаба изображения, а также значительный выигрыш (по сравнению с однопозиционным PCA) в максимальной ширине зоны обзора без применения многолучевых антенн.

Рассматривая различные способы формирования скоростных и уровенных изображений – был сделан вывод о том, что для приведенных в разд. 2 океанских задач нет иной перспективы помимо использования интерферометрического приема отраженного излучения, т.е. необходимо использование разнесенных приемных антенн с выделением разностно-фазового сигнала. Для восстановления поля уровня при этом необходима поперечная траектории антенная база (её пример дан на рис. 5), а для поля скорости – продольная база. Продольная база позволяет восстанавливать не только радиальную (поперечную) составляющую скорости течения, но и с несколько худшей чувствительностью также и продольную.

На рис. 7а приведен низкоорбитальный вариант двухпозиционного космического ИРСА, где два малых КА выводятся на одинаковые по высоте, но разнесенные по меридианам полярные орбиты. На нисходящем витке, как показано, левый КА излучает, а правый – принимает отраженный сигнал двумя разнесенными антеннами, образующими интерферометр. На восходящем витке излучающий и принимающий КА меняются местами, так что по своей конструкции аппараты идентичны. На рисунке показан интерферометр с продольной базой, позволяющий восстанавливать поле скорости течений. Расчетный размер такой базы укладывается в допустимый для раскрытия на одном КА. Расчетный размер поперечной базы (для восстановления поля уровня) гораздо больше, однако на сегодня известны и опробованы технические решения, позволяющие осуществить и этот вариант, не прибегая к размещению второй приемной антенны на независимом КА [21].

Расчетные диаграммы «квазизеркального» рассеяния, соответствующие данному варианту визирования, приведены на рис. 76. Цветом выделены уровни УЭПР от +7 дБ до -50 дБ (принятой модели соответствуют уровни до -30дБ). Безразмерные координаты  $m_x$  и  $m_y$  определяются расстоянием

от рабочей площадки до центральной (зеркальной) точки, отнесенным к высоте орбиты. Расчеты показывают, что при использовании в ИРСА 3-см сигнала, небольших по размерам антенн и высоте орбиты *H*=800 км, зона обзора шириной ±1000 км (относительно зеркальной точки) обеспечивается при средней мощности излучения не более 50 Вт. При расчетах учтена кривизна Земли.



Рис. 7. а – двухпозиционная РЛ-система для глобального оперативного мониторинга крупных волн (орбитальные скорости, мелкомасштабное разрешение) и течений (мезомасштабное разрешение). Два идентичных КА попеременно (при прохождении полюса) либо излучают, либо принимают отраженный сигнал, используя ИРСА с продольной базой; 6 – диаграммы «квазизеркального» рассеяния при центральном угле визирования y<sub>0</sub>=65°и скорости ветра 10 м/с. Значения УЭПР, отвечающие принятой модели, лежат в пределах от +7 до -30 дБ. Размер l<sub>y</sub> соответствует расстоянию от центральной точки, m<sub>y</sub> = l<sub>y</sub>/H, m<sub>x</sub>=l<sub>y</sub>/H

На рис. 8а приведен другой вариант двухпозиционной системы, где для подсвета поверхности используется геостационарный аппарат (ГСКА), а для оперативной (региональной) диагностики океанских явлений на строго-выверенную орбиту запускаются несколько малых пассивных КА с ИРСА, параметры которых аналогичны предыдущему.

Расчетные диаграммы рассеяния при условии  $H_1 >> H_2$  здесь несколько иные (рис. 8б), область яркого радиоблика укорачивается слева от зеркальной точки и удлиняется справа от неё.

При этом, для высоты ГСКА ( $H_1$ =35000 км) и  $H_2$ =800 км при условии, что излучающая антенна на ГСКА подобна телевизионной с диаметром  $D_a \sim 1$  м, требуемая средняя мощность излучения получается порядка 10 КВт.



Рис. 8. а – двухпозиционная РЛ-система для регионального оперативного мониторинга тех же явлений. Подсвет поверхности осуществляется с ГСКА, прием сигнала осуществляет низкоорбитальный КА, используя ИРСА с продольной базой; б – диаграммы «квазизеркального» рассеяния в тех же условиях. При этом m<sub>y</sub>=l<sub>y</sub>/H<sub>2</sub>, m<sub>x</sub>=l<sub>x</sub>/H<sub>2</sub>, H<sub>1</sub>>>H<sub>2</sub>. Значения УЭПР, отвечающие принятой модели, лежат в пределах от 0 до -30 дБ

Разумеется, исследования по двухпозиционной радиолокации морской поверхности на сегодня еще не закончены. В ИО РАН разрабатывается модель рассеяния, позволяющая ответить на вопрос о реальной эффективности квазизеркального режима наклонного визирования по сравнению с брэгговским при восстановлении полей уровня и скорости течений.

Исследования по интерференционному зондированию полей уровня и скорости в аэрокосмических РСА (ИРСА) велись ранее как в России, так и за рубежом, достаточно сослаться

на работы [22-25]. Наши последние исследования заключались в оценке параметров ИРСА, использующих оптимальные алгоритмы обработки разностно-фазового сигнала при возможном снижении флуктуационных и систематических ошибок аппаратурной природы, а также ошибок, возникающих при наличии крупных ветровых волн.

Результаты этих исследований, относящиеся только к восстановлению в ИРСА радиальной составляющей скорости течения, представлены на рис. 9 и рис. 10. Рис. 9 отображает степень ухудшения флуктуационно-скоростной чувствительности при вариациях главных аппаратурных (безразмерных) параметров: коэффициентов q (отношение фон/собственный шум, или энергетический потенциал) и  $\beta_2$ . При этом:

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{\pi}L_x l_2 \cos \gamma_n}{\lambda H}$$

где  $\lambda$  – длина волны, H – высота орбиты приемного аппарата,  $L_x$  – размер синтезированной апертуры,  $l_2$  – размер продольной антенной базы,  $\gamma_n$  – угол визирования,  $\Phi(\beta_2)$  – интеграл вероятностей. Видно, что при допустимом q=10 (20 дБ) следует выбирать  $\beta_2$  не менее 0,5 – в противном случае (например, при работе с малыми антенными базами), приращение постоянной составляющей сигнала на выходе коррелятора будет происходить на фоне собственного шума, т.е. при неполном использовании энергетического потенциала. Кроме того, в области  $\beta_2$  <0,5, даже с применением оптимального алгоритма обработки, подавление амплитудных вариаций оказывается недостаточным. Для космического РСА с высотой орбиты H=800 км, наименьшей длиной апертуры  $L_x=1$  км, длиной волны  $\lambda=3$  см и средним углом визирования  $\gamma=65^\circ$ , необходимая длина антенной базы  $l_2$  оказывается равной 15 м.



Рис. 9. Нормированная флуктуационно-скоростная (радиальная) чувствительность ИРСА с продольной антенной базой. Безразмерный параметр β<sub>2</sub> определяется двумя главными величинами: отношением длины синтезированной апертуры L<sub>x</sub> к высоте траектории H, и отношением длины антенной базы l<sub>2</sub> к длине волны излучения λ. Параметр q<sup>2</sup> есть отношение интенсивностей отражающего фона и собственного шума приемника

На рис. 10 приведены расчетные графики для пороговой скоростной чувствительности ИРСА в зависимости от скорости ветра, при т.н. «развитом» ветровом волнении. Графики построены для модели изотропных гауссовых волн, орбитальные скорости которых осредняются на симметричных площадках размерами 10, 30, 100 и 200 м, так что суммарная помеха зависит как от аппаратурного, так и от внешнего факторов:

$$(V_y)_{nop} = q_0 \left[ \sigma_{Vy}^2 \left( \beta_2, q, d \right) + \tilde{\sigma}_V^2 \left( d, W_e \right) \right]^{1/2}$$

Здесь  $q_0=2$  – пороговый коэффициент;  $\sigma_{V_y}^2$  – дисперсия шума, куда входят фоновый «спеклшум» и шум приемника, зависящие от числа независимых отсчетов сигнала на симметричной площадке размером d;  $\tilde{\sigma}_V^2$  – дисперсия осредненной помехи, обусловленной орбитальными скоростями крупных волн и зависящей как от размера площадки, так и от скорости ветра  $W_e$  [26]. Кроме того, показана зависимость «точечного» отклонения орбитальной скорости волн от скорости ветра  $\sigma_V(W_e)$ .

Значения пороговой чувствительности на рис. 10 рассчитывались для космических ИРСА, работающих в вариантах, показанных на рис. 7 или рис. 8 для площадок, находящихся на расстояниях от зеркальной точки, соответствующих коэффициенту *m*=1. При этом, расчетная ширина спектра радиосигнала составляла 100 МГц, расчетный горизонтальный размер антенн составлял 4 м.



Рис. 10. Пороговая скоростная (радиальная) чувствительность космического ИРСА (V<sub>y</sub>)<sub>nop</sub> с продольной антенной базой в зависимости от скорости приводного ветра (W<sub>e</sub>) и размера площадки осреднения (d). Черным цветом показана зависимость для «точечного» отклонения орбитальной скорости σ<sub>V</sub>(W<sub>e</sub>)

Интерпретируя эффекты, показанные на рис. 10, можно отметить следующее. Во-первых, ребуемая пороговая чувствительность по скорости течения ~2 см/с достижима на площадках размером не менее 200 м при скорости ветра не более 10 м/с. Во-вторых, на малой площадке размером не более 10 м и скорости ветра более 10 м/с – мы будем фиксировать не панораму течений, а именно панораму крупных энергонесущих волн с измерением их орбитальных скоростей. Разумеется, эти расчеты не учитывали фактор анизотропии крупных волн, т.е. рассмотренная модель не учитывала возможностей пространственной фильтрации волн по априорным признакам, как это было показано для сейсмической волны (см. рис. 2). Что же касается возможностей отображения в ИРСА мезо- и мелкомасштабного поля уровня, то это также возможно, и полученные нами графики для этих полей близки к показанным на рис. 9 и рис. 10. Техническая же реализация подобных аэрокосмических ИРСА представляется более сложной из-за большего (на порядок) требуемого размера поперечной антенной базы. Здесь особенно следует отметить намеченный в 2009 г. запуск (также с космодрома «Байконур») второго КА ТеггаSAR-Х, который должен образовать пару с уже запущенным в 2007 г. аналогичным аппаратом. Полученную систему предполагается использовать именно в режиме ИРСА с заданными размерами как продольной, так и поперечной антенной базы, при этом наклонный боковой обзор с обоих аппаратов ведется в одну и ту же сторону [27]. Заявленные значения параметров обзора (в первую очередь, ширина зоны обзора ~50 км при высоком разрешении) и другие данные [27] позволяют считать, что система TanDEM-X предназначена исключительно для картографии и изучения объектов суши, и вряд ли может быть востребована для целей оперативного мониторинга мезомасштабных океанских явлений.

#### Основные выводы и рекомендации

Изложенный материал, в совокупности с приведенными ссылками позволяет объективно оценить состояние радиолокационных космических средств изучения океана и сформулировать основные требования к параметрам оперативных средств – т.е. средств, предназначенных для мониторинга быстропротекающих океанских явлений, в том числе опасных с точки зрения человека (штормовые волны, экстремальные волны зыби, волн цунами). При этом совершенно необходим переход от формирования радиолокатором панорамного поля интенсивности отраженного сигнала к формированию полей среднего уровня и средней скорости течения в приповерхностном слое. Изменчивая структура океанских течений, а также проявления на поверхности глубинных процессов также требуют оперативного мониторинга полей уровня и скорости.

Как отечественные, так и зарубежные исследования, а также опубликованные проекты космических РЛ средств океанского назначения говорят о возможности создания таких средств в ближайшем будущем. При этом, первостепенной задачей является обеспечение не только необходимых параметров (широкая зона обзора, мезо- и мелкомасштабное разрешение, достаточная чувствительность и помехоустойчивость при слабых контрастах формируемых полей), но и экономичности. Под экономичностью, в свою очередь, следует понимать не только энергетику космических аппаратов, но и возможность создания сравнительно недорогой группировки из малых аппаратов, способных обеспечить либо глобальный, либо региональный оперативный мониторинг различных океанских явлений. В этом отношении представленный здесь отечественный проект, по нашему мнению, является наилучшим хотя бы потому, что не требует применения сложных и дорогостоящих антенн с электронным управлением. В то же время ясно, что путь к созданию подобной космической системы лежит через предварительный самолетный эксперимент, приближенный к решению обратной задачи. Эта задача сводится к формированию в самолетном РЛ интерферометре полей уровня моря и скорости течений, порожденных природными процессами, с оценкой их «распознаваемости» и диагностикой физических параметров.

Российская аэрокосмическая промышленность в кооперации с РАН способна выполнить эту задачу. Затем должен последовать этап собственно разработки, где на базе полученных данных необходимо решить ряд инженерных задач, включая чисто-космические (формирование и контроль параметров орбит в двухпозиционной системе, возможность создания приемного интерферометра с жесткой поперечной базой на одном аппарате). Наконец, должны быть созданы (и не только для данной системы) новые бортовые, чрезвычайно ёмкие накопители, а также специальные бортовые процессоры для обработки и передачи на Землю предельно допустимых объемов данных.

#### Литература

1. Арманд Н.А., Саворский В.П., Смирнов М.Т., Тищенко Ю.Г. О российской части программы научных экспериментов космического проекта «Сич-1М» / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2005, т. 1, с. 8-12.

2. *Чернявский Г.М.* Перспективы Российской системы спутникового мониторинга Земли / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2005, т.1, с. 49-54.

3. Лаппо С.С., Арманд Н.А., Волков А.М. и др. О концепции развития космической океанологии в России на 1996-2015 гг. // Исслед. Земли из космоса, 1997, № 2, с.70-80.

4. *Beneviste J., Menard Y.* Taking the measure of Earth: Fifteen years of progress in radar altimetry *// ESA Bulletin*, 2006, 128, p. 42-51.

5. Pereslegin S.V. Radar diagnostics of ocean phenomena / Proc. Int. Conference "Advances of Satellite Oceanography". Vladivostok, 2007 (http://www.sputnik.poi.dvo.ru/docs/).

6. Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1». М.: ГЕОС, 1999, 118 с.

7. Достовалов М.Ю., Неронский Л.Б., Переслегин С.В. Исследование поля скорости океанских течений по фазометрическим данным, полученным PCA космического аппарата ERS // Океанология, 2003, т. 43, № 3, с. 473-480.

8. Dankert H., Horstmann J., Lehner S., Rosenthal W. Detection of wave groups in SAR images and radar-images sequences // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2002, 41(6), p. 1437-1445.

9. Callachan P.C., Daffer W.H. Search for earthquake effects in Topex-Poseidon data // AGU Report, 1994, 32 p.

10. Переслегин С.В., Достовалов М.Ю., Неронский Л.Б., Осипов И.Г. Радиолокация глубинных океанских явлений с космических аппаратов / В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, ИПФ РАН, 2004, с.66-78.

11. Wide-swath altimetric measurement of ocean surface topography // JPL Publication, 2002, 67 p.

12. Project KORIOLIS: Study of concept for radar interferometry from ocean (and land) applications. Final Report, April 2002 (<u>http://www.uni-hamburg.de/~romeiser/koriolis.htm</u>).

13. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Применение навигационных космических аппаратов GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности // Изв. ВУЗов, сер. Приборостроение, 2004, № 3.

14. Martin-Neira M. Using GNSS signals for ocean observation // ETP Technical Notes, 1999, v. 8, N. 8, 7 p.

15. Zavorotny V. Bistatic GPS scattering from an ocean surface: theoretical modelling and wind speed retrieval from aircraft measurements / NOAA Environment Technology Lab. (http://www.etl.noaa.gov/~vzavorotny/).

16. Zavorotny V.U., Voronovich A.G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 2000, v. 38, p. 951-964.

17. Meerman M., Unvin M., Gleason S., Jason S., Sweeting M. A Nanosatellite to demonstrate GPS oceanography reflectometry / Proc. 16<sup>th</sup> AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2004, p. 9.

18. Переслегин С.В., Халиков З.А., Неронский Л.Б. Физическое обоснование радиолокационной космической системы, решающей задачу раннего обнаружения опасных океанических явлений / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2008, вып. 5, т. 2, с. 180-191.

19. Переслегин С.В. Халиков З.А. Двухпозиционная радиолокация морской поверхности / В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, ИПФ РАН, 2008, с. 95-103.

20. Переслегин С.В., Неронский Л.Б., Плющев В.А. Флуктуационно-уровенная чувствительность РЛ интерферометра при двухпозиционном зондировании морской поверхности / В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, ИПФ РАН, 2008, с. 104-114.

21. Андриенко А.Я., Чадаев А.И. Анализ возможности усиленно-гравитационной стабилизации низкоорбитальных спутников // Космические исследования, 1998, т. 36, № 4, с. 391-398.

22. Синицын Ю.П., Переслегин С.В. Потенциальная точность и оптимальный алгоритм восстановления мезомасштабного рельефа морской поверхности космическим радиолокатором бокового обзора // Исслед. Земли из космоса, 2000, № 1, с. 51-57.

23. Переслегин С.В., Синицын Ю.П. Формирование скоростных и уровенных портретов морской поверхности в аэрокосмических интерференционных РСА (ИРСА) / В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, ИПФ РАН, 2006, вып. 2, с. 35-48.

24. Siegmund R., Bao V., Lehner S., Mayerle R. First demonstration of surface currents imaged by hybrid along- and cross-track interferometric SAR // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 2004, 42(3), p. 511-519.

25. Schulz-Stellenfleth J., Horstmann J., Lehner S., Rosental W. Sea surface imaging with an across-track interferometric synthetic aperture radar: The SINEWAVE experiment // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 2001, 39(9), p. 2017-2028.

26. Переслегин С.В. О пространственно-временном усреднении вариаций высот, уклонов и скоростей развитых ветровых волн при дистанционном зондировании поверхности океана // Исслед. Земли из космоса, 1985, № 6, с. 3-7.

27. Bartusch M., Hermann J., Siebertz O. The TanDEM-X mission / Proc. 7<sup>th</sup> European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2008, v. 4, p. 27-30.

# Perspectives of development of space radar methods for research of oceanic phenomena

S.V. Pereslegin, A.Yu. Ivanov, Z.A. Khalikov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences Nakhimovsky pr. 36, Moscow, 117997, Russia E-mail: <u>peresleg@ocean.ru</u>

Operational monitoring of the ocean in mesoscale and even monitoring of ocean fields supposes a use of a spaceborne radar system with small revisit time and image acquisitions either in global scale or only for given ocean regions. The objects of operational monitoring in the ocean, such as wind waves, ocean currents and sea level anomalies, are considered to require a new spaceborne system based on a low cost basis and up-to-date technologies. The examples of radar images of different oceanic phenomena formed in the field of reflected signal intensity, current velocity and ocean level fields by existing altimeters and SARs are presented and discussed. The outputs of recently started foreign and national projects on this matter are also considered and evaluated. The given project, which uses an approach based on the bistatic (two-position) interferometric SAR (BiSAR), is proposed and considered. The method is based on the radar illumination of the ocean surface from other satellite. The parameters of an optimum system are presented, for example, the dependences of fluctuation velocity sensitivity from size of the area and wind speed, i.e. the obstacle via large wind waves. The full using of space resolution causes to form "true" large waves images. Averaging of different-phase signal on the extended areas allows forming the images of oceanic phenomena via observations the ocean level or current velocity fields.

**Keywords**: large wind waves, seismic waves, current velocity field, ocean level field, quasi-mirror bistatic scattering, bistatic interferometric SAR (BiSAR).