

Современное состояние и тенденции развития космической радиолокационной океанологии

С.В. Переслегин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36.
Тел.: (499)124-7392, E-mail: peresleg@ocean.ru*

Развивающиеся группировки космических аппаратов, предназначенных для оперативного мониторинга явлений в системе океан-атмосфера, требуют совмещения зондирующих средств оптического, ИК и СВЧ диапазонов – как пассивных (радиометрических), так и активных (радиолокационных). Рассматриваются задачи мониторинга и соответствующие им современные аппаратные решения – с точек зрения эффективности, новизны, сложности осуществления и экономической целесообразности.

Developing groupings of the space vehicles intended for operative monitoring of the ocean-atmosphere phenomena, are require a combination of optical, IR and MW ranges means – both passive (radiometric), and active (radar). Problems of monitoring and modern hardware decisions are considered corresponding to them – from the points of view of efficiency, novelty, realisation and economic feasibility.

Задачи мониторинга океанской среды и атмосферы над океаном

Современные спутниковые комплексы средств ДЗЗ решают задачи оперативной диагностики состояния среды (краткосрочный метеопрогноз, оповещение об опасности), задачи изучения климата Земли (средне- и долгосрочный прогнозы) и, наконец, выполняют роль основных исследовательских приборов для изучения в глобальном масштабе различных явлений на суше, в океане и в атмосфере. Взаимодействие океана и атмосферы при этом является ключевым моментом как в задачах метеопрогноза, так и в климатологии, где введен термин *климатообразующие* параметры системы океан-атмосфера (СОА), измеряемые с ИСЗ [1]. Задачи мониторинга океанской среды и СОА можно подразделить на крупномасштабные, мезомасштабные и мелкомасштабные. Крупномасштабные (глобальные) явления при протяженности в тысячи км требуют аппаратной разрешающей способности (10 – 100) км, мезомасштабные (1 – 10)км, а мелкомасштабные требуют разрешения, соответствующего малому размеру самого объекта (10 – 100)м. В этом плане, перечень основных объектов дистанционного панорамного зондирования океана (ДЗО) из космоса выглядит следующим образом.

Крупно- и мезомасштабные поля СОА:

- температура поверхности океана (ТПО);
- солёность приповерхностного слоя океана;
- температура, влажность и скорость ветра в приповерхностном слое атмосферы;
- облачность, измерение водозапаса;
- вертикальные профили температуры и влажности атмосферы;
- неорганическая и органическая взвесь (планктон) в верхнем слое океана;
- ледовый покров, измерение толщины и скорости дрейфа ледовых полей;
- уровень поверхности океана (УПО) и его малые вариации, в том числе высота сейсмических (цунамиобразующих) поверхностных волн;
- скорость течений на поверхности открытого океана (СПО);
- осредненные параметры ветровых волн и через них – скорость приповерхностного ветра.

Мелкомасштабные поля поверхности океана:

- высота и орбитальная скорость энергонесущих ветровых волн, а также сторонней зыби;

- загрязняющие (нефтяные) пленки, их пространственная структура и толщина;
- следы надводных кораблей;
- проявления подводных гидродинамических источников – внутренних

гравитационных волн и донного рельефа, обтекаемого течением.

Перечисленные задачи сформировались постепенно, и главным фактором их формирования в течение последних 40 лет явился именно **прогресс в разработках спутниковых средств ДЗО**. В настоящее время поля, относящиеся к первым шести позициям перечня, наблюдаются с помощью пассивных средств ДЗО, использующим оптический, ИК и СВЧ диапазоны электромагнитного излучения; такие средства уже разработаны и функционируют в составе аппаратурного комплекса на ИСЗ «Метеор-М» [2]. Остальные позиции перечня требуют применения активных радиолокационных (РЛ) средств ДЗО. При этом дополнительные, по отношению к пассивным средствам, возможности диагностики полей океана (включая мелкомасштабное разрешение) **определяются использованием всех присущих им информационных параметров – амплитуды, фазы, производной фазы и полной поляризационной матрицы отраженного поверхностью радиосигнала**. В настоящее время можно констатировать следующее: пассивные средства по своим параметрам (точности измерений) еще не исчерпали своих возможностей, однако близки к этому. Активные РЛ средства находятся в той фазе развития, когда новые возможности осознаны, но их претворение в действующие космические системы только начинается. В то же время, надлежащее использование в России первичной информации от уже действующих космических РЛ средств – таких как СВЧ скаттерометр SEAWIND на КА QUIKSCAT и PCA на КА RADARSAT, ENVISAT и TerraSAR-X – позволило бы в значительной мере удовлетворить потребности российских пользователей, в особенности исследователей океанской среды и СОА.

Основные требования к параметрам радиофизической аппаратуры

Важнейшим требованием к комплексу средств ДЗО на космическом аппарате является поэлементное пространственно-временное совмещение изображений, формируемых различными датчиками – как активными, так и пассивными, а также совмещение пассивных изображений с активными. Это требование продиктовано, с одной стороны, нестационарностью (быстрым перемещением) наблюдаемых объектов и нестационарностью самой поверхности (наличием волнения). С другой стороны, именно совмещение изображений позволяет решать поставленные задачи в полной мере. Например, чрезвычайно важно совместить температурные изображения поверхности и изображения атмосферной влажности, формируемые пассивным СВЧ сканером в области атмосферного циклона, с изображениями полей волнения и ветра, формируемые СВЧ скаттерометром в той же области (оптический и ИК сканеры в области циклона бесполезны из-за облачности). Насколько нам известно, подобная задача до сих пор не решена, ибо соответствующие средства (американские СВЧ сканер SSM-I и скаттерометр SeaWIND находятся на различных аппаратах).

Основные требования, которым должен удовлетворять космический мониторинг океанских явлений (при использовании известных на сегодня и технологически выполнимых космических датчиков), включают ширину зоны обзора и время повторяемости изображений с одного аппарата, а также необходимое число аппаратов в группировке. Затем следуют допустимые флуктуационные (аппаратурные) ошибки при формировании мезомасштабных или мелкомасштабных полей, причем систематические (аппаратурные и иные) ошибки не должны превышать флуктуационных .

Перспективные зарубежные разработки

Хорошим примером развития космических технологий (в соответствии с развитием идеологического базиса) является разработка нового СВЧ скаттерометра для аппарата XOVWM, идущего на смену СВЧ скаттерометру SeaWIND на аппарате QuikSKAT (JPL) – панорамному измерителю вектора скорости ветра в открытом океане, который уже несколько лет служит основным информационным датчиком для краткосрочных метеопрогнозов в океанских акваториях и прибрежных районах. Эта информация поступает от одного или нескольких КА QuikSKAT, ежедневно выставляется в Интернет на сайте NOAA и доступна любому потребителю бесплатно.

Несмотря на очевидную востребованность и огромный экономический эффект (который вряд ли поддается исчислению), очевидны и недостатки скаттерометра SeaWIND. Прежде всего, при ширине зоны обзора 1800км (для орбиты высотой 650км), его разрешение (~40км) не позволяет эффективно обслуживать прибрежные акватории. Далее, алгоритм обработки исключительно по вариациям УЭПР не может быть универсальным, он не может учитывать множество факторов, вызванных сложным характером взаимодействия ветра с морским волнением. Например, при наличии т.н. *развитых волн* (т.е. волн, индуцированных ветром на значительном расстоянии разгона), этот алгоритм работает удовлетворительно, однако он даёт серьезные ошибки при наличии, кроме ветровых волн, *сторонней зыби*. Имеется экспериментальное подтверждение этого факта, полученное нами при сравнении изображения SeaWIND с изображением волн в РСА на КА ENVISAT [3]. Можно представить и случай, когда ветер слаб (1 – 3м/с), но пришедшая издалека зыбь сильна ($h \sim 2\text{м}$). В этом случае среднее значение УЭПР мало, но азимутальная модуляция УЭПР – огромна и не описывается взятым за основу алгоритмом, где этот случай не мог быть предусмотрен.

При ознакомлении с новейшими материалами JPL наибольшее впечатление производит отчет [4], посвященный реальной разработке нового СВЧ скаттерометра. Эта разработка была развернута после пережитого в США урагана "Катрина" (2004), вызвавшего неисчислимые бедствия в южных штатах и затопившего Новый Орлеан. Выделенные ассигнования, включая исследования, разработку и запуск аппарата в 2013 году, составили \$350млн. При запуске ракетой ATLAS предполагается вывести на орбиту сразу два аппарата, при этом время повторяемости изображений составит 12 часов при суммарной ширине кадра ~3500км.

Разработанная аппаратура позволяет достигнуть необходимых параметров обзора, т.е. широкой зоны охвата, при коническом сканировании с разрешением 5 км. Комплекс реализован на основе массивной вращающейся платформы, на которой установлены все элементы наблюдательной аппаратура: два параболических короткофокусных зеркала диаметром ~5м, три антенных облучателя (Ku, C и X диапазонов, СВЧ передатчики (Ku и C диапазонов) и СВЧ приемники. Из [4] следует, что двухволновый скаттерометр эффективнее одноволнового, а комплексирование в одной антенне СВЧ скаттерометра (Ku, C диапазоны) с СВЧ радиометром (X диапазон) позволяет получать дополнительные данные об атмосферных циклонах – например, выделять области дождя. В [4] также показано, что общая идеология системы (способ обзора, алгоритмы обработки сигналов с использованием вариаций УЭПР) повторяет идеологию системы SeaWIND, однако сами по себе алгоритмы предусматривают более глубокую и гибкую обработку сигнала. Приведены примеры использования получаемой информации на примере данных (экспериментальных и модельных), соответствующих параметрам урагана "Катрина".

Огромный интерес представляет другой проект JPL по созданию панорамного радиоальтиметра – измерителя мезомасштабного поля уровня океана, работающего в квазизеркальной (вблизиадириной) области рассеяния [5]. Проектируемый космический

аппарат должен быть запущен в 2012 г., он идет на смену «трассовому» радиоальтиметру Gason-2. Общая смета расходов на 2007-2011 гг составляет ~\$450млн.

Рекомендации по отечественным разработкам на ближайшие годы

Таким образом, перед российскими разработчиками стоит нелегкая задача: создать проект российского скаттерометра, по своим параметрам не уступающего американскому проекту – и в то же время обладающего новыми возможностями, т.е. большей эффективностью. С этой целью, как нам представляется, необходимо идти по пути использования поляризационной матрицы отраженного сигнала при брэгговском рассеянии, что позволяет восстанавливать не только вектор скорости ветра, но и вектор уклонов волн. Именно такой подход предлагался ранее в нашей и зарубежной работах [6,7] – однако он, по-видимому, не реализуется в проекте ХОВМ [4].

Наши рекомендации по отечественным разработкам (в частности, и по перспективному комплексу «Метеор-МП») состоят в следующем.

1. Пассивный оптико-микроволновый (совмещенный) сканер МТВЗА-ОК [8] должен быть усовершенствован применительно к имеющимся требованиям пользователей – по длинам волн и параметрам каналов. Например, необходимо обеспечить требования ИО РАН по каналам цветности (восстановление концентрации планктона) и каналу температуры (технологически достижимое устранение ошибки при наличии штормовых волн).

2. Разработка СВЧ скаттерометра с электронным сканированием (предложение НИИТП, [9]) должна предусматривать, во-первых, функциональное совмещение с пассивным сканером – с целью совместной поэлементной обработки получаемых изображений. Во-вторых, эта разработка должна быть в чем-то конкурентоспособной по отношению к скаттерометрам JPL [4]. По-видимому, здесь следует ориентироваться на использование поляризационной матрицы рассеяния, что позволяет непосредственно восстанавливать поле уклонов волн. Наличие определенных (не универсальных) моделей взаимосвязи параметров волн с полем ветра позволяет, как и в скаттерометрах JPL, восстанавливать поле приводного ветра. Однако, для выяснения пригодности поляризационной модели для восстановления полей волн и ветра (а также для проверки аппаратных решений, отличных от применяемых JPL) совершенно обязательным представляется самолетный эксперимент, сопровождаемый соответствующими (контактными) измерениями восстанавливаемых параметров.

3. Разработка однопозиционного РСА для мониторинга океанских явлений, близкого по построению к действующему (германскому) TerraSAR-X [10], требует совершенно иных параметров космической платформы, нежели платформа «Метеор-М». В то же время, если говорить о сугубо морском применении РСА – включая ледовую обстановку по программе «Арктика» – то возможности аппаратов TerraSAR-X в свете «морских» требований явно недостаточны. Поэтому нам представляется целесообразной разработка РСА с ограниченным энергопотенциалом, аппаратура которого явилась бы в какой-то мере модернизацией БРЛК «Северянин-М». Это мог бы быть интерференционный РСА (ИРСА), способный диагностировать не только положение кромки льда, но и скорость дрейфа ледовых полей и, возможно, толщину ледового покрова [11, 12] – наподобие недавно запущенному КА «CRIOSAT». Разумеется, подобная разработка также требует натурального самолетного эксперимента.

4. Весьма перспективной и конкурентоспособной представляется разработка двухпозиционного ИРСА (ДИРСА) сугубо «морского» применения [13,14]. Используя квазизеркальную область рассеяния при высокой отражающей способности поверхности, этот метод обеспечивает как широкую зону обзора (без использования АФАР), так и возможность непосредственного измерения скоростных и уровенных полей океана, а

также полей волнения с последующим восстановлением поля ветра. Не исключена, по-видимому, и возможность использования существующих платформ «Метеор». В то же время, отсутствие экспериментального «задела» по двухпозиционному зондированию океана требует в этом случае постановки специальной НИОКР, включающей самолетный двухпозиционный эксперимент.

Литература

1. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела / М., Физматлит, 2004, 166с.
2. Трифонов Ю.В. «Метеор-М» – первый спутник российской гидрометеорологической системы нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009, М., ИКИ РАН (в печати).
3. Переслегин С.В., Елизаветин И.В., Иванов А.Ю. Измерение параметров ветровых волн, наблюдение полей ветра и облачного покрова в области атмосферного циклона по данным космических радиолокаторов и оптического сканера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006, М., ИКИ РАН, вып.3, т.II, с.140 – 148 .
4. Gaston R., Rodrigez E. QuikSCAT Follow-on Concept Study // 2008, JPL Publication 08-18, p. 66.
5. Wide-Swath Altimetric Measurement of Ocean Surface Topography // 2006, JPL Publication 03-002, p.67.
6. Переслегин С.В. Статистические характеристики СВЧ-рассеяния от морской поверхности с учетом конечного разрешения и фактора деполяризации // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1975, т.11, №6, с. 610-619
7. Tsai W., Nghiem S.V., Huddleston J.N., Spencer M.W., Stiles B.W., West R.D. Polarimetric Technique for Improving Ocean Surface Wind Measurements from Space // 2006, JPL MS 300-319, p.52.
8. Наконечный В.П., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Данилов С.Г., Казанцев О.Ю. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ОК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2003, М., ИКИ РАН, с.139-145.
9. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Смирнов С.Н., Чечина И.Н. Принципы реализации космических скаттерометров на основе активных фазированных антенных решеток // Доклад на наст. конференции, Муром, 2010.
10. Mittermayer J., Metzsig R., Steinbrecher U. and others. TerraSAR-X Instrument, SAR System Performance and Command Generation // 7-th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2008, Germany, Friedrichshafen.
11. Сеницын Ю.П., Переслегин С.В. Потенциальная точность и оптимальный алгоритм восстановления мезомасштабного рельефа морской поверхности космическим радиолокатором бокового обзора // Исследование Земли из космоса, 2000, № 1, с. 51-57.
12. Переслегин С.В., Сеницын Ю.П. Интерференционные радиолокаторы с синтезированной апертурой (ИРСА) для оперативного мониторинга океанских явлений // Изв. ВУЗов, Радиофизика, 2010 (в печати).
13. Переслегин С.В., Иванов А.Ю., Халиков З.А. Перспективы развития космических радиолокационных методов изучения океанских явлений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, М., ИКИ РАН, 2009, вып.6, т.I, с.42 – 57.
14. Переслегин С.В., Халиков З.А. Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности. Физическое обоснование и анализ особенностей // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2010 (в печати).