

Физическое обоснование радиолокационной космической системы, решающей задачу раннего обнаружения опасных океанических явлений

С.В. Переслегин¹, З.А. Халиков¹, Л.Б. Неронский²

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

117851 Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mail: peresleg@ocean.ru

²*ОАО «Концерн «Вега»*

121140 Москва, Кутузовский проспект, 34

E-mail: otdel7@vega.su

Приводятся результаты исследований по физическому обоснованию двухпозиционных РЛ систем, использующих наклонное «квазизеркальное» зондирование поверхности океана, т.е. работающих в «радиолокационном блике». Первый вариант, пригодный для глобального мониторинга океанских явлений, предусматривает одновременный запуск нескольких пар малых аппаратов на орбиты, разнесенные по долготе. Второй вариант использует геостационарный аппарат (ГСКА), который «подсвечивает» заданную океанскую акваторию (аналогично ТВ-ретранслятору), а прием сигналов осуществляется малыми космическими аппаратами (КА), оснащенными пассивными РЛ интерферометрами бокового обзора с допустимыми размерами антенной базы и самих антенн. Расчеты показывают, что в таких системах формируется мезомасштабное поле вариаций уровня океана с горизонтальным разрешением ~10-100м, шириной зоны обзора ~2000 км и контрастно-уровневой флуктуационной чувствительностью порядка единиц сантиметров на километровых площадках. Расчетные параметры предлагаемых систем сравниваются с параметрами американского РЛ интерферометра, работавшего в 2001 году по программе SRTM, а также с параметрами предлагаемого в настоящее время (в виде проекта JPL) «надирного» интерферометра. Помимо оперативного мониторинга сейсмообстановки, предлагаемые системы можно использовать и для других задач, связанных с формированием как поля уровня океана, так и слабоконтрастного поля уклонов мелких волн.

Введение

Опыт использования существующих космических средств в целях диагностики океанских явлений показывает, что по целому ряду причин современные космические радары не могут служить средством оперативной диагностики таких быстропротекающих явлений, как штормовые волны и волны цунами, ущерб от которых огромен, не говоря уже о человеческих жертвах. В практическом плане, основной ограничивающей причиной является энергетика. Например, существующие космические РСА, способные формировать мелкомасштабную панораму «поля яркости» поверхности океана, работают в режиме «диффузно-резонансного» рассеяния при малых величинах отражательной способности морской поверхности, так что создание постоянно действующей группировки спутников (аналогично группировке навигационных аппаратов типа GPS) попросту невозможно – ни по их стоимости, ни технически. Что касается радиоальтиметров, способных наблюдать поле уровня океана в «квазизеркальном» режиме трассерного визирования, то здесь мы сталкиваемся с принципиальной невозможностью создать достаточно широкую зону обзора – что опять-таки приводит к невозможности обеспечить постоянный мониторинг обширной океанской акватории (при допустимом количестве аппаратов в группировке) с необходимой оперативностью. Например, известен проект NASA [1] по созданию РЛ интерферометра, работающего при близких к надиру углах визирования, где максимальная ширина (поперечной к орбите) зоны обзора составляет ~100км. Известны также проекты по созданию многопозиционных РЛС обзора земной поверхности, использующих в качестве излучателей навигационные космические аппараты систем ГЛОНАСС-GPS [2, 3]. Проведенные нами расчеты показывают, что этот путь, хоть он и обещает явную экономическую выгоду при мониторинге сильно-отражающих «точечных» объектов (например, крупных кораблей), не позволяет организовать оперативный

мониторинг протяженных объектов – таких как океанские сейсмические волны, где необходима контрастно-уровневая чувствительность «беспропускного» изображения порядка единиц сантиметров на километровых площадках.

Оперативная диагностика подобных океанских явлений диктует необходимость создания космической радиолокационной системы типа «панорамного радиовысотомера», способного распознавать природу явлений по формируемой радиолокатором панораме поля уровня океана. Такая система, помимо своей оперативности (что требует широкой зоны обзора при небольшом числе спутников в группировке) должна быть достаточно экономичной – как по энергетике, так и по затратам на разработку. В работе [4] рассматривались основные особенности двухпозиционной системы, где излучающий аппарат «подсвечивает» широкую морскую акваторию под углом $\gamma \pm \Delta\gamma$, а приемный аппарат воспринимает этот сигнал как зеркальный (т. е. в той же системе координат работает при отрицательных углах визирования). Этот случай хорошо иллюстрируется в оптике – каждый из нас наблюдал «световую дорожку», когда Солнце (или Луна) подсвечивают взволнованную поверхность под углом, противоположным углу наблюдения. Разумеется, этот эффект возможен лишь для морской поверхности, удовлетворяющей условию «пологости» рельефа (радиус кривизны поверхности на порядок превышающий длину электромагнитной волны), при значительной величине френелевского коэффициента отражения. В работе [5] рассматривались особенности интерференционного метода приема и обработки сигнала в двухпозиционном радаре при восстановлении поля уровня морской поверхности.

Интерференционные радиолокаторы с синтезированной апертурой (ИРСА), устанавливаемые на летательных аппаратах, применяются для восстановления рельефа подстилающей поверхности (поперечная антенная база) и для измерения горизонтальной скорости элементов поверхности (продольная антенная база). При восстановлении поля уровня морской поверхности требуется, в первую очередь, соответствующая флуктуационная чувствительность – порядка единиц см на «мезомасштабных» площадках [6, 7]. Минимальный размер площадки зависит от параметров аппаратуры: например, для космического ИРСА, запущенного по программе SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 2001 [8]), подобная чувствительность могла быть обеспечена на площадке 2x2 км. К сожалению, нам неизвестны результаты, полученные в данном эксперименте по восстановлению поля уровня океана. Тем не менее, этот опыт является огромным шагом вперед, если сравнивать его возможности с системой трассерных радиовысотомеров (программа TOPEX-POSEIDON).

Первая демонстрация самолетного ИРСА, использующего оба вида интерферометров – с поперечной и продольной антенными базами – состоялась в 1997 г. [9]. Однако этот опыт, как и опыт SRTM, главной своей целью ставил восстановление рельефа суши с высоким разрешением, а также измерение скоростей наземных объектов (например, скорости речного течения). Задача обеспечения предельной флуктуационной чувствительности для диагностики океанских явлений, насколько нам известно, не ставилась.

В данной работе мы попытались обосновать необходимость и предложить варианты космической РЛ системы, способной не только к мониторингу важнейших океанских явлений, но и к оперативному обнаружению таких явлений, как опасные сейсмические волны в океане, порождающие цунами. Предварительные расчеты [4, 5] показывают, что в предлагаемых здесь вариантах двухпозиционной РЛ системы обеспечивается формирование изображений двух важнейших полей – среднего уклона поверхностных волн и среднего уровня поверхности при необходимых параметрах чувствительности, размера «площадки осреднения» и ширины зоны обзора, и, что очень важно – при допустимом количестве малых аппаратов в группировке.

Объекты РЛ диагностики и основные требования к космической РЛ системе

Одной из важных задач (как для судоходства, так и для гидрометеопрогноза) является создание экономичного космического радара, способного отслеживать с необходимой оперативностью

именно поле энергонесущих волн, включая пришедшие издалека волны зыби. Возможно, что в этом плане удастся прогнозировать (с какой-то вероятностью) и появление т.н. «волн-убийц» в заданных заранее акваториях [10].

Другой важной задачей является экологическая охрана акваторий – не только прибрежных, но и акваторий открытого океана, интенсивно загрязняемых при добыче и транспортировке нефти и нефтепродуктов. Радиолокационная диагностика пленочных сликков (в т.ч. нефтяных) сейчас интенсивно развивается, в ее основе лежит сильная зависимость высоты мелких волн от параметров пленки (поверхностного натяжения, вязкости и толщины), вплоть до возможности измерять толщину пленки и, следовательно, объем разлива при наличии детального РЛ изображения заданной акватории [11]. В этом случае не предъявляется жестких требований к повторяемости съемок, ибо нефтяной слик перемещается сравнительно медленно (благодаря течениям) и существует достаточно долго.

Следующей задачей является именно мониторинг течений, структура которых, особенно в прибрежных районах, сложна и непредсказуема. Радиолокационная диагностика поля течений (включая дрейф ледовых полей) также развивается, эта задача близка к известной РЛ задаче селекции движущихся целей (СДЦ). Наилучшее её решение, по-видимому, заключается в использовании интерференционных РСА с продольной базой [7], однако для градиентных течений открытого океана возможно использовать и поперечную антенную базу с формированием скалярного поля уровня и дальнейшим пересчетом этого поля в векторное поле течений. Очевидно, применение для этой цели панорамного радиоальтиметра намного эффективнее по сравнению с системой трассерных радиоальтиметров.

Не менее важной задачей является диагностика подводных источников динамических возмущений поверхностного слоя – например, внутренних волн различного происхождения, деформирующих одновременно все три поля поверхности – поле ветровых волн, поле течений и поле уровня [12]. Наконец, в самое последнее время на первый план выдвигается задача оперативного мониторинга сейсмообстановки в океане, используя в качестве датчиков как донные сейсмографы, так и радиолокационные измерители вариаций поля уровня океана. Космический радар этого типа должен не только формировать поле уровня для заданных акваторий открытого океана, но и обеспечивать своевременное оповещение об опасности появления волн цунами вблизи береговой полосы. Естественно, что решение проблемы состоит в разработке достаточно надежной космической радиолокационной системы, которая должна быть еще и достаточно экономичной – как по материальным затратам, так и по энергетике. По нашим оценкам, параметры подобной системы характеризуются следующими главными требованиями:

1. Непрерывное наблюдение (отслеживание) заданных открытых акваторий Мирового океана с малым интервалом срабатывания системы оповещения. Интервал срабатывания, отсчитываемый от момента появления опасности в данной (называемой «площадкой осреднения») области океана, до момента оповещения об опасности цунами, должен быть не более часа – исходя из природы цунами, а также из накопленного опыта.

2. Полоса обзора L должна быть не менее H ($L > H$) при высоте орбиты аппарата $H \sim 1000$ км. Длина кадра радиолокационного изображения должна быть не менее нескольких L , и по возможности охватывать целиком всю заданную акваторию.

3. При диагностике сейсмических волн должна быть обеспечена относительная точность измерения их высоты $(\delta h/h) \leq 0,3$, при высотах h от 5 см до 0,5 м и размере симметричного «пятна осреднения» не более $d \sim (1-3)$ км.

4. При диагностике волн зыби обеспечивается такая же относительная точность измерения их высоты $(\delta h/h) \leq 0,3$, при высотах h в пределах (3 – 30) м и размере симметричного «пятна осреднения» не более $d \sim (30 - 300)$ м соответственно.

5. Флуктуационная контрастно-яркостная чувствительность должна быть не хуже 1 дБ в симметричном «пятне осреднения» размером $d \sim 100$ м.

Двухпозиционная радиолокация морской поверхности с применением РЛ интерферометрии

Предварительные расчеты показали, что перечисленным основным требованиям удовлетворяет космическая двухпозиционная РЛ система, использующая «квазизеркальный» режим отражений при наклонном визировании морской поверхности – иными словами, при использовании «радиоблика», образованного «подсветом» поверхности с одного из космических аппаратов. Другой аппарат является приемным, и поле уровня («осредненный рельеф») океана формируется при помощи установленного на этом аппарате РЛ интерферометра с поперечной базой (рис. 1). Основные обозначения рис. 1: H_1 и H_2 – высоты орбит «подсвечивающего» и приемного аппаратов, γ_0 и γ_0 – «зеркальный» угол визирования и положение «зеркальной точки», y_n – положение точки в зоне обзора, r_y и r_x – поперечный и продольный элементы разрешения РСА, S – площадка осреднения сигнала, 1 и 2 – положения антенн интерферометра, L – база интерферометра, θ – угол наклона базы к горизонту.

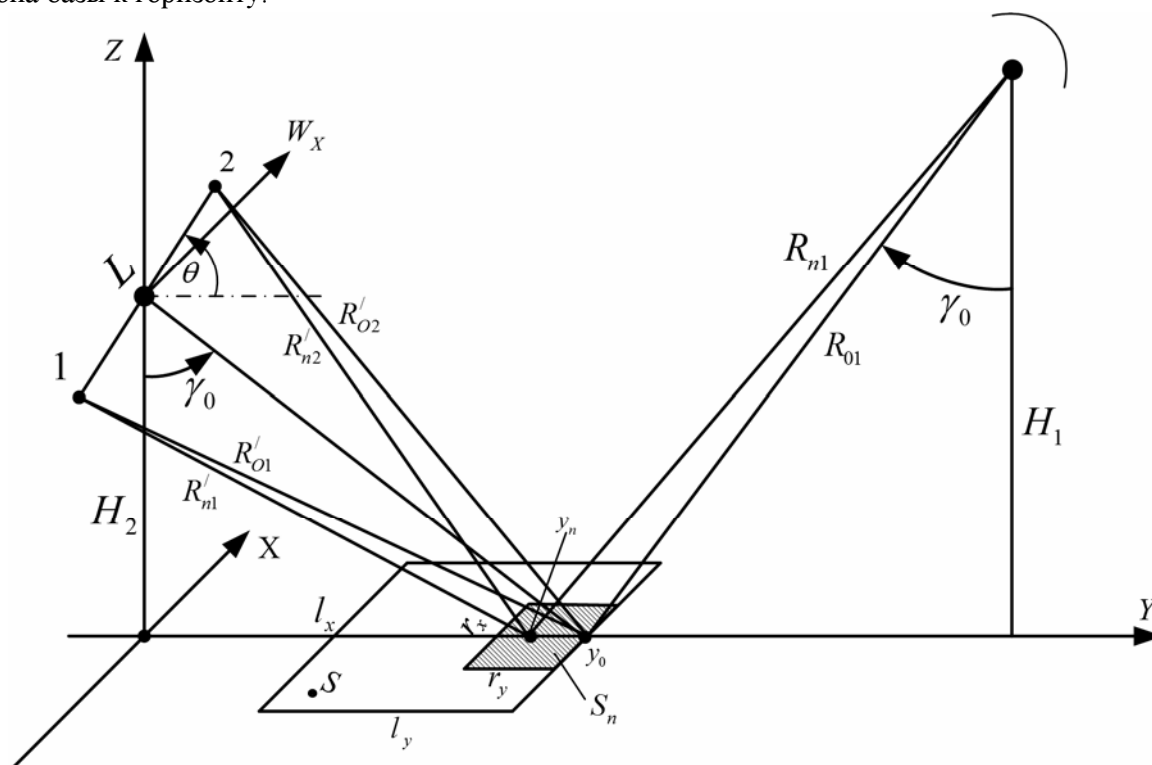


Рис. 1. Двухпозиционное РЛ визирование поверхности, прием сигналов интерферометром с поперечной антенной базой

В работе [4] рассмотрены характеристики интенсивности «радиоблика» применительно к космическим условиям визирования взволнованной поверхности. Введя безразмерную величину m – отношение величины l_y (расстояния по оси Y от заданной точки до «зеркальной» точки y_0) к высоте орбиты приемного аппарата H_2 , $m=l_y/H_2$, в приближении «квазизеркального» рассеяния были получены зависимости УЭПР (удельной эффективной поверхности рассеяния S^0) в функции от m . Эти зависимости показаны на рис. 2а,б для двух крайних случаев визирования – при равенстве высот орбит аппаратов ($H_1=H_2$) и при сильном удалении первого аппарата ($H_1 \gg H_2$), когда угол падения «подсвечивающего» луча практически не отличается от «зеркального» угла падения γ_0 .

Характеристики рис. 2 построены для длины волны радара $\lambda=3,0$ см и двух значений скорости приводного ветра, 4 и 12 м/с. Точки $m=\pm 1$ отстоят от «зеркальной» точки $m=0$ на высоту приемного аппарата H_2 , а при выбранном «зеркальном» угле падения $\gamma_0=65^\circ$, приемный аппарат находится над точкой $m = -H_2 \operatorname{tg} \gamma_0 = -2,14 H_2$. (для принятой здесь модели, не учитывающей кривизну Земли). Главный вывод, который следует из рис. 2а, следующий: ширина зоны бокового обзора (ко-

торая не может превышать ширину «зоны подсвета»), при минимальном значении УЭПР $S^0=1$ (0дБ) составляет более $2H_2$. Рис. 2б показывает, что при «подсвете» с удаленного аппарата (например, геостационарного), примыкающая к приемному аппарату (левая) зона обзора немного увеличивается, однако правая зона увеличивается чрезвычайно. Использовать этот эффект проблематично, ибо соответствующую диаграмму направленности приемной антенны не удастся реализовать без значительных потерь в энергетике. В то же время очевидно, что здесь мы имеем огромный энергетический выигрыш по сравнению с однопозиционными космическими РСА, которые в лучшем случае имеют зону обзора $L_y \sim 0,5H$ при энергетике, обеспечивающей обзор морской поверхности с минимальным значением УЭПР $S^0=10^{-3}$ – т.е. выигрыш в энергетике составляет три порядка, если для работы двухпозиционного радара достаточна $S^0=1$.

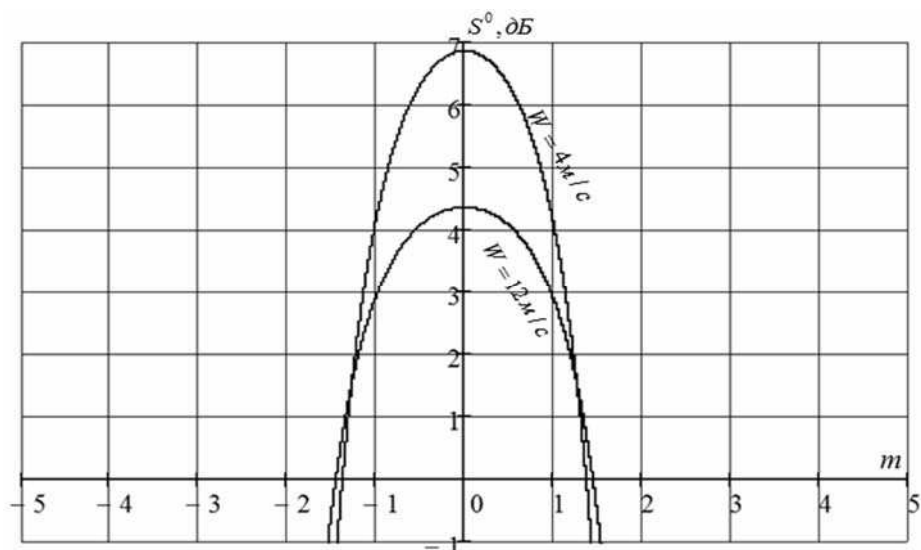


Рис. 2а. Характеристики $S^0(m)$, построенные относительно зеркальной точки для случая равновысотных аппаратов ($H_1 = H_2$)

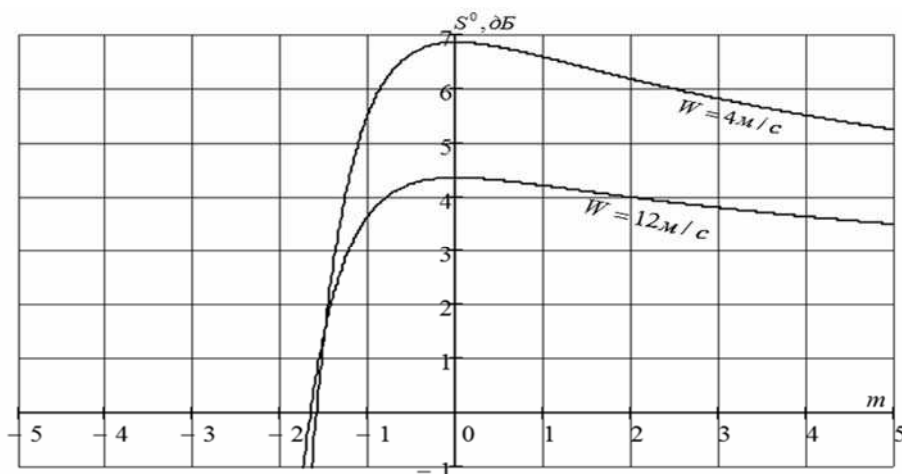


Рис. 2б. Характеристики $S^0(m)$, построенные относительно зеркальной точки для случая разновысотных аппаратов ($H_1 \gg H_2$)

Приведенные результаты сопоставимы с результатами работы [13], где рассматривался общий случай двухпозиционного визирования – с фиксированным углом падения «подсвечивающего» луча и переменными углами приема по углу места и азимуту. Соответствующие индикатрисы рассеяния (сплошные линии) показаны на рис. 3, пунктиром показана полученная нами индикатриса. Сравнение показывает, что расчеты, выполненные с использованием метода малых возмущений, дают значительно большие значения УЭПР на прилежащей к «зеркальной точке» области,

по сравнению с использованной нами «квазизеркальной» моделью. Соответственно, возрастает и ширина зоны обзора по заданному (0дБ) уровню УЭПР. Из рис. 3 также видно, что при обратном (однопозиционном) рассеянии и соосно-горизонтальной поляризации сигнала УЭПР составляет минус 38 дБ, тогда как в «зеркальном направлении – плюс 12 дБ. Выбор соосно-горизонтальной поляризации при двухпозиционном зондировании морской поверхности не случаен, ибо при угле падения $\gamma_0=65^\circ$ прилежащая к нему «квазизеркальная» область оказывается вблизи угла Брюстера ($\gamma_{Br} \sim 80^\circ$ для плоской поверхности в СВЧ диапазоне), где коэффициент отражения на соосно-вертикальной поляризации мал.

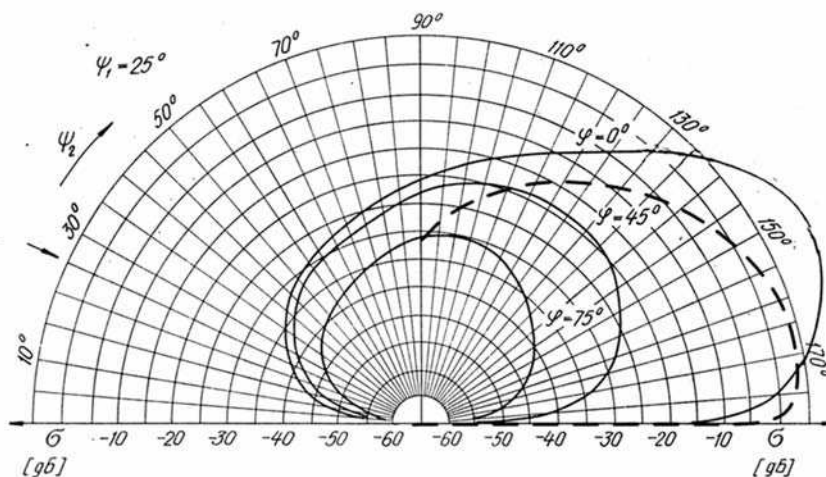


Рис.3

Сплошные линии: индикатрисы рассеяния на морской поверхности радиоволны горизонтальной поляризации ($\lambda=3,0\text{см}$) при угле скольжения излучающего луча $\psi_1=25^\circ$. Индикатрисы построены в функции угла скольжения луча приемной антенны ψ_2 , при различном азимутальном разное $\varphi=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$ и $\varphi=75^\circ$.

Расчеты [13] велись на базе метода малых возмущений, скорость ветра не указана.

Пунктир: индикатриса рассеяния на морской поверхности применительно к двухпозиционному зондированию, построенная для скорости ветра $W=4\text{м/с}$ при длине волны излучения $\lambda=3\text{ см}$, $\varphi=0^\circ$, угле падения $\gamma_0=65^\circ$ и разновысотных орбитах, $H_1 \gg H_2$. Расчеты [4] велись в «квазизеркальном» приближении

Таким образом, первое принципиальное различие двухпозиционного и однопозиционного радаров при зондировании морской поверхности заключается в существенном энергетическом выигрыше двухпозиционного радара. Второе принципиальное различие состоит в характере изменения фазы отраженного сигнала по горизонтальной дальности. Вследствие этого, вблизи зеркальной точки горизонтальное разрешение r_y значительно хуже при той же ширине спектра сигнала, а по обе стороны от зеркальной точки, на преобладающей части зоны обзора разрешение улучшается – примерно обратно-пропорционально квадрату расстояния от зеркальной точки.

Соответствующие зависимости $r_y(m)$ получены в работе [4] и показаны на рис. 4.

Суммируя результаты расчетов, видим следующую картину. Для равновысотных аппаратов, если принять $H=800\text{км}$, $\gamma_0=65^\circ$, $\Delta f_c=100\text{МГц}$, то при суммарной ширине зоны обзора $L_y \sim 2400\text{км}$, отвечающей уровню минимальной УЭПР $S^0=1$ (0дБ), в центре этой зоны получим разрешение $r_{y0} \sim 4\text{км}$, а на её краях – разрешение $(r_y)_{\text{мин}} \sim 3\text{м}$ – см. рис. 4а. Если же использовать только зону с разрешением лучше 100м, то получим размер неиспользуемой области $\sim 320\text{км}$ в центре зоны обзора (около «зеркальной» точки), т.е. $\sim 15\%$ от её суммарной ширины. При «подсвете» с геостационара вблизи от зеркальной точки наблюдается примерно та же картина, однако на краю правой зоны (со стороны геостационара, рис.4б) разрешение на порядок хуже $(r_y)_{\text{мин}} \sim 30\text{м}$.

Разумеется, эти результаты должны быть уточнены – в первую очередь путем учета кривизны Земли, особенно при «подсвете» с геостационарного аппарата.

Примем во внимание, что для космических РСА сантиметрового диапазона при работе по морской поверхности время синтезирования ограничено величиной порядка 0,1с, что приводит к

ограничению продольной разрешающей способности r_x величиной порядка 30 м [7], и это приемлемо практически для всех океанских «фоноконтрастных» задач, решаемых радаром. Следовательно, если ориентироваться на использование в двухпозиционном РСА достаточно широкополосного сигнала ($\Delta f_c \geq 100$ МГц), то на большей части зоны обзора мы получим приемлемое разрешение по обеим осям.

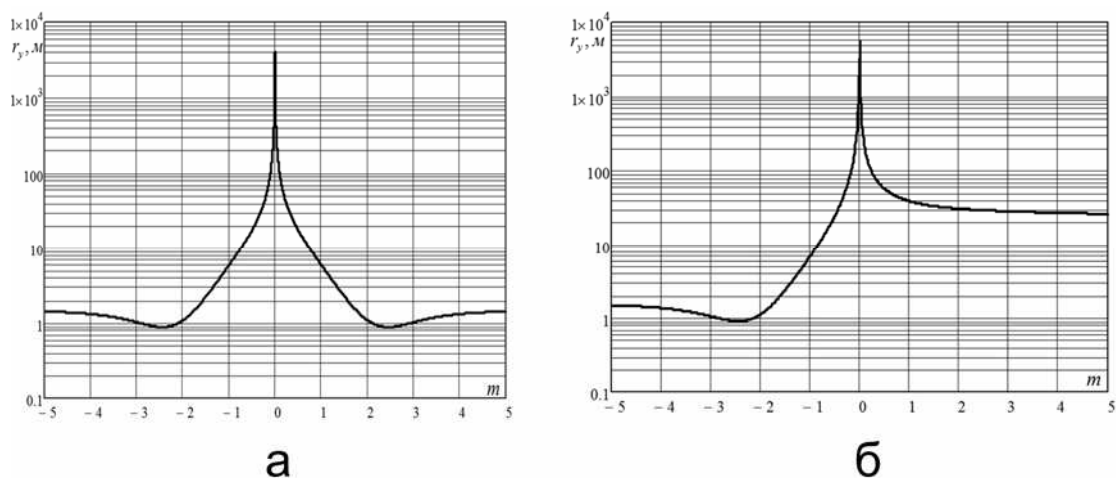


Рис. 4. Поперечно-горизонтальное разрешение r_y (м) при двухпозиционном РЛ зондировании поверхности Земли, $\gamma_0=65^\circ$, $\Delta f_c=100$ МГц
 а – равновысотные орбиты, $H_1=H_2=800$ км
 б – облучение с геостационара, $H_1=35000$ км, $H_2=800$ км

Анализ флуктуационно-уровневой чувствительности РЛ интерферометров показывает, что при одной и той же ширине спектра и равном количестве отсчетов на площадке осреднения, предельные чувствительности однопозиционного и двухпозиционного интерферометров отличаются незначительно [5]. Однако, в обоих случаях приходится считаться с ограничением относительной ширины спектра сигнала:

$$\frac{\Delta f_c}{f_c} \leq \frac{2\pi qL \cos \gamma_n \sin \gamma_n \cos(\gamma_n - \theta)}{H_2},$$

в силу которого ширина спектра сигнала (Δf_c), размер антенной базы интерферометра (L) и энергопотенциал радара (q) оказываются жестко связанными. Вследствие этой взаимосвязи, энергопотенциал и ширину спектра сигнала в двухпозиционной системе приходится выбирать, ориентируясь на точку наилучшего горизонтального разрешения, которая находится на краю зоны обзора ($l_y \approx H_2$).

Для оценки получаемого энергетического выигрыша при двухпозиционном зондировании с учетом рассмотренных особенностей ДИРСА, мы воспользовались известными соотношениями для импульсной мощности на входе приемника, включающими коэффициенты усиления реально-выполнимых антенн, площадь облучаемой поверхности, минимальную УЭПР поверхности и шумовую температуру приемника (см. Таблицу 1).

Варианты осуществления космического ДИРСА для глобального и регионального мониторинга поверхности океана

Глобальный вариант предполагает запуск (одной ракетой) двух малых КА на орбиту, проходящую, например, точно по меридиану. Над полюсом происходит разделение аппаратов – таким образом, чтобы в дальнейшем их траектории проходили по меридианам, отстоящим по долготе на $\sim 30^\circ$ – см. рис. 5а. Практически параллельные орбиты (на протяжении большей их части) дают возможность создать «квазизеркальную» систему бокового обзора при минимальном дрейфе (взаимном отставании или опережении) аппаратов. Преимуществом подобной системы является малая требуемая мощность излучения (порядка десятков ватт при $H \sim 1000$ км). Число «парных» КА для глобального беспрерывного обзора с шириной зоны обзора $L_y \sim 2H$ и приемлемой перио-

дичностью съемок (порядка 0,5 часа в средних широтах) получается около 10. Однако, обеспечение работоспособности подобной системы требует, по-видимому, специальных мер, предусматривающих принудительную коррекцию орбит аппаратов и другие меры, обеспечивающие заданную геометрию визирования поверхности на нисходящем и восходящем витках. Тем не менее, в дальнейшем этот вариант системы заслуживает проработки.

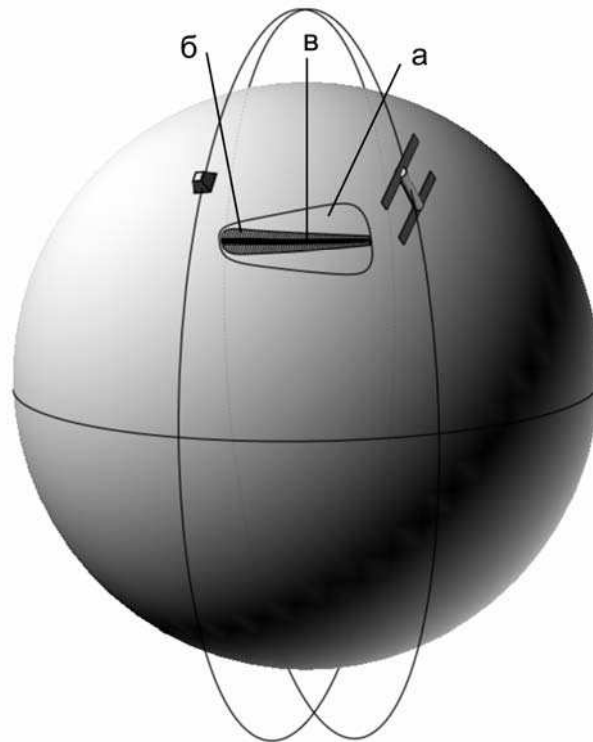


Рис. 5а. Вариант двухпозиционного радара для глобального оперативного мониторинга океанских явлений. Два малых КА, $H_1=H_2$. Приемными последовательно являются либо левый, либо правый аппараты (на восходящем и нисходящем витках), при наличии на них интерферометров с поперечной базой. а) область «подсвета»; б) область обзора; в) область разрешения с необходимым осреднением по осям x, y

Второй вариант предполагает использование геостационарного аппарата для «подсвета» заданной акватории и группировки малых (неизлучающих) аппаратов на орбитах $H \sim 1000$ км, осуществляющих последовательный съем информации с этой акватории – см. рис. 5б. Параметры гео-

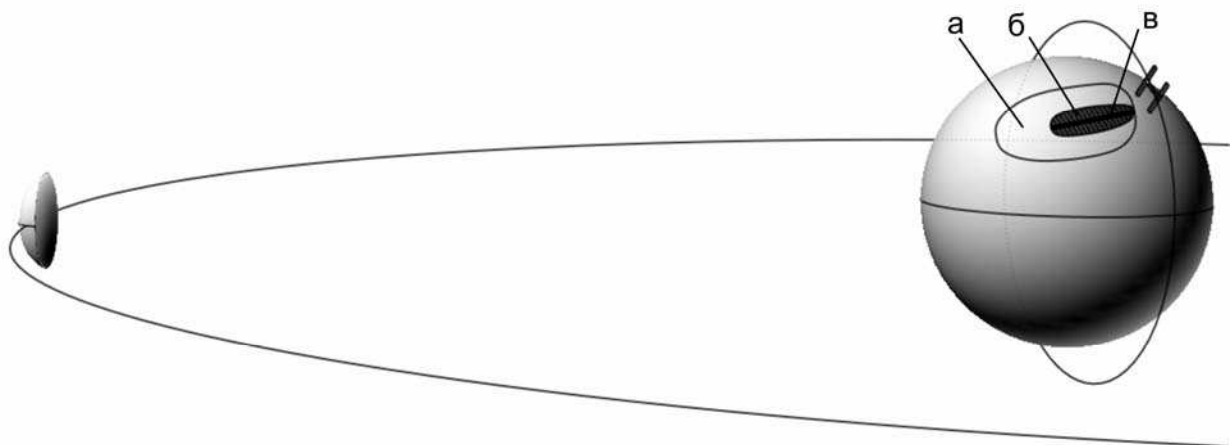


Рис. 5б. Вариант двухпозиционного радара для регионального мониторинга океанских явлений: геостационар (ГСКА) и малый КА, включающий интерферометр с поперечной базой. а) область «подсвета»; б) область обзора; в) область разрешения с необходимым осреднением по осям x, y

стационарного аппарата и состав его аппаратуры близки к существующим ТВ ретрансляторам, а требуемая мощность излучения, согласно расчетам, должна быть порядка десятка кВт. Аппаратура приемных аппаратов мало отличается от аппаратуры существующих космических РСА – но, конечно, отсутствие излучающих устройств сильно её упрощает. Важным моментом для данного варианта является необходимость согласования азимутального угла «подсвета» акватории с наклоном орбиты приемного аппарата, для заданного широтного расположения акватории. Например, для северо-западной области Тихого океана (Камчатка – Аляска – Гавайи – Япония), при среднем угле визирования $\gamma \sim 65^\circ$ (от вертикали для обоих аппаратов), приемный аппарат должен иметь наклонение (от меридиана) около 20° . Число приемных аппаратов в группировке, обеспечивающей интервал съема не более 0,5 часа – получается не более 8 для этой области океана.

Оценка возможных параметров космических ИРСА и ДИРСА

Оценки достижимой флуктуационно-уровневой чувствительности и необходимого энергообеспечения вариантов космических ДИРСА были проведены на базе работ [4,5].

Задавались следующие параметры: высота приемной орбиты $H=800$ км, длина антенной базы $L=20$ м, угол визирования «зеркальной» точки $\gamma_0 = \theta = 65^\circ$, длина волны излучения $\lambda = 3,0$ см. Располагаемый энергopotенциал (отношение фон/шум q) и допустимая ширина спектра сигнала Δf_c выбирались, исходя из характерных для РЛ интерферометра ограничивающих соотношений.

Для оценки получаемого энергетического выигрыша при двухпозиционном зондировании с учетом рассмотренных особенностей ДИРСА, мы пользовались известными соотношениями для импульсной мощности на входе приемника, включающими коэффициенты усиления направленных антенн, площадь облучаемой поверхности, минимальную УЭПР поверхности и шумовую температуру приемника. Размеры приемной антенны, обеспечивающей парциальную зону обзора ~ 500 км, принимались равными $D_x=10$ м, $D_z=0,5$ м. Тогда, при площади передающей антенны на ГСКА (рис. 5б) $S_{at}=1$ м² и минимальной УЭПР $S^0=1$, необходима средняя излучаемая мощность $P_{1cp} \geq 10$ кВт. Следует отметить, что при этом с избытком обеспечивается и необходимая площадь импульсного «пятна засветки» поверхности. Конечно, излучаемую мощность на ГСКА можно было бы уменьшить, используя антенну большего размера. Однако, на наш взгляд этот путь крайне нежелателен, так как из-за уменьшения азимутального размера «пятна засветки» потребуются привязка положения этого пятна к «пятну приема», т.е. автоматическое слежение за положением приемного аппарата. Если же использовать «парные» малые КА (рис. 5а), на каждом из которых установлены приемные антенны тех же размеров, а передающая антенна (по многим соображениям) имеет площадь всего $S_{at}=0,1$ м², то излучаемая мощность оказывается всего $P_{1cp} \geq 50$ вт.

Полученные расчетные параметры космических интерферометров сведены в таблицу. Горизонтальные строки относятся к пяти типам рассмотренных РЛ интерферометров. Вертикальные столбцы характеризуют космический аппарат, режим интерферометра (одно- или двухпозиционный), параметры аппаратуры и расчетные параметры интерферометров, работающих в режиме панорамной диагностики мезомасштабного поля уровня океана.

Приведенные в таблице данные позволяют сделать следующие выводы о перспективности того или иного варианта космических ИРСА и ДИРСА для сформулированных выше задач – по порядку перечисленных в таблице вариантов.

1. ИРСА, запущенный в 2001г. на пилотируемом аппарате-челноке (программа SRTM, [8]), обладал всеми необходимыми параметрами для решения поставленной задачи, за исключением ширины зоны обзора. В то же время ясно, что на малом беспилотном КА невозможно осуществить ни столь большую антенную базу (60м), ни гораздо более высокую среднюю мощность излучения при соответствующих размерах антенн.

2. «Вблизи-надирный» ИРСА с небольшой горизонтальной базой предложен JPL в качестве «радиовысотомера с широкой полосой обзора» [1]. Этот прибор, безусловно, пригоден для диагностики медленно протекающих океанских явлений, например для отображения структуры градиент-

ных течений. Однако, он непригоден для диагностики протяженных и быстротекающих океанских явлений вследствие малой (100 км) ширины зоны обзора. Оперативный мониторинг таких явлений потребовал бы одновременной работы не менее сотни подобных (малых) аппаратов.

Таблица 1. Расчетные параметры космических ИРСА и ДИРСА

	Тип КА. Аппаратурные параметры радара.	Ширина зоны обзора L_y , км Размер симмет- ричной пло- щадки осредне- ния l , км Число незави- симых отсчетов N	Флуктуа- ционно- уровенная и яркостная чувствитель- ности $\sigma_{\Delta h}$, см $1+\delta S^0/S^0$, дБ	Требуемый энергопо- тенциал q , дБ Фоновая РЛ чувствитель- ность $(S^0)_{мин}$, дБ Необходимая средняя мощность излучения $P_{ср}$, Вт
1	Пилотируемый «челнок» (запущен в 2001г). Программа SRTM. Однопозиционный ИРСА. Реальные параметры: $L=60\text{м}$, $H=250\text{км}$, $\gamma\approx\theta=30^\circ$, $\lambda=3,1\text{см}$, $\Delta f_c=30\text{МГц}$, $D_x=10\text{м}$ $D_z=0,2\text{м}$	$L_y\approx 100\text{км}$ $N=2\cdot 10^4$ при $l=1\text{км}$	$\sigma_{\Delta h}\approx 3\text{см}$ 0,1 дБ	$q\geq 15\text{дБ}$ $(S^0)_{мин}\approx -20\text{дБ}$ (ВВ) $P_{ср}\approx 150\text{Вт}$
2	Малый КА. Проект JPL. Однопозиционный ИРСА. Предполагаемые параметры: $L=20\text{м}$, $H=800\text{км}$, $\gamma=(2,8-11)^\circ$, $\theta=0^\circ$, $\lambda=2,0\text{см}$, $\Delta f_c=300\text{МГц}$, $D_x=10\text{м}$, $D_y=0,2\text{м}$	$L_y\approx 120\text{км}$ $N=4\cdot 10^4$ при $l=1\text{км}$	$\sigma_{\Delta h}\approx 1\text{см}$ 0,1 дБ	$q\geq 30\text{дБ}$ $(S^0)_{мин}\approx 0\text{дБ}$ $P_{ср}\approx 30\text{Вт}$
3	Малый КА. Однопозиционный ИРСА. Расчетные параметры: $L=20\text{м}$, $H=800\text{км}$, $\gamma_{ср}\approx\theta=45^\circ$, $\lambda=2,0\text{см}$, $\Delta f_c=30\text{МГц}$, $D_x=10\text{м}$, $D_z=0,1\text{м}$	$L_y\approx 1000\text{км}$ $N=4\cdot 10^4$ при $l=3\text{ км}$	$\sigma_{\Delta h}\approx 3\text{см}$ 0,1 дБ	$q\geq 30\text{дБ}$ $(S^0)_{мин}\approx -30\text{дБ}$ (ВВ) $P_{ср}\approx 150\text{КВт}$
4	Малый КА с «подсветом» от ГСКА (рис. 5б). Двухпозиционный ИРСА (ДИРСА). Расчетные параметры: $L=20\text{м}$, $H_2=800\text{км}$, $\gamma\approx\theta=65^\circ$, $\lambda=3,0\text{см}$, $\Delta f_c=100\text{МГц}$, $D_{x2}=10\text{м}$, $D_{z2}=2\times 0,5\text{м}$, $S_{a1}=1\text{м}^2$	$L_y\approx 1600\text{км}$ $N=10^3-10^4$ при $l=1\text{км}$	$\sigma_{\Delta h}\approx 2\text{см}$ 0,2 дБ	$q\geq 30\text{дБ}$ $(S^0)_{мин}\approx 0\text{дБ}$ (ГГ) $P_{1ср}\approx 10\text{ КВт}$
5	Малые «парные» КА (рис. 5а) Двухпозиционный ИРСА (ДИРСА). Расчетные параметры: $L=20\text{м}$, $H=800\text{км}$, $\gamma\approx\theta=65^\circ$, $\lambda=2,0\text{см}$, $\Delta f_c=100\text{МГц}$, $D_{x2}=10\text{м}$, $D_{z2}=2\times 0,5\text{м}$, $S_{a1}=0,1\text{м}^2$	$L_y\approx 1600\text{км}$ $N=10^3-10^4$ при $l=1\text{км}$	$\sigma_{\Delta h}\approx 2\text{см}$ 0,2 дБ	$q\geq 30\text{дБ}$ $(S^0)_{мин}\approx 0\text{дБ}$ (ГГ) $P_{1ср}\approx 50\text{Вт}$

3. Малый космический аппарат с ИРСА, обеспечивающий необходимую зону обзора (~1000км) при малом значении УЭПР морской поверхности потребовал бы гигантской мощности излучения (~150 КВт), что только подчеркивает перспективность применения ДИРСА.

4. При осуществлении ДИРСА в варианте рис. 5б, где предусматривается неизлучающий малый КА при «подсвете» поверхности с ГСКА, требуется достижимая, но весьма солидная (порядка 10Квт) средняя мощность излучения. Уменьшение этой мощности путем увеличения размеров передающей антенны возможно, но потребует синхронизации направления луча антенны с положением приемного аппарата, т.е. создания передающей антенны по технологии АФАР.

5. При осуществлении ДИРСА в варианте рис. 5а («парные» малые КА) требуется небольшая мощность излучения (~50 Вт) – однако возникают дополнительные (по-видимому, преодолимые) трудности, относящиеся к обеспечению синхронности траекторий КА, а также к обеспечению одинакового режима зондирования на восходящем и нисходящем витках.

Основные выводы и рекомендации

Главный вывод исследований состоит в том, что предлагаемая космическая (оперативная) система обнаружения и оповещения об опасных явлениях в океане имеет перспективы для реализации. Эта система не только нова и эффективна, но и весьма экономична – как по своей энергетике, так и по затратам на разработку. Вместе с тем предлагаемая система достаточно универсальна, т.е. может быть использована не только для раннего обнаружения опасных явлений (штормовых волн, волн цунами), но и для отслеживания (мониторинга) структуры океанских течений, пленочных (нефтяных) загрязнений и гидродинамических подводных источников – внутренних волн и подводного рельефа, обтекаемого течениями. Несомненно, что при соответствующих алгоритмах разделения «статических» и «динамических» вариаций поля уровня океана, применяемых при обработке данных трассерных радиоальтиметров, эффективность мониторинга различных явлений сильно возрастет (по сравнению с трассовыми радиоальтиметрами). Это относится, например, к восстановлению структуры приливов внутри архипелагов или же к восстановлению рельефа океанических подводных хребтов и впадин.

Создание предлагаемой системы и решение с её помощью хотя бы части перечисленных выше задач явилось бы реальной «прорывной технологией» в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Вместе с тем очевидно, что подобной разработке должна предшествовать специальная НИР, включающая математическое моделирование и самолетный РЛ эксперимент – с целью уточнения приведенных характеристик системы, а также подтверждения эффективности двухпозиционного зондирования океана при панорамном восстановлении поля уровня.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-05-00931.

Литература

1. Wide-Swath Altimetric Measurement of Ocean Surface Topography // JPL Publication, 2002, 67pp.
2. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Применение навигационных КА GPS / ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности // Изв. ВУЗов, Приборостроение, 2004, № 3
3. Meerman M., Unvin M., Gleason S., Jason S., Sveeting M. A Nanosatellite to Demonstrate GPS Oceanography Reflectometry // 16th AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2004.
4. Переслегин С.В., Халиков З.А. Двухпозиционная радиолокация морской поверхности // В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности», Нижний Новгород, 2008, ИПФ РАН, вып. 3.
5. Переслегин С.В., Неронский Л.Б., Плющев В.А. Флуктуационно-уровенная чувствительность РЛ интерферометра при двухпозиционном зондировании морской поверхности // В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности», Нижний Новгород, 2008, ИПФ РАН, вып.3, с.
6. Синицын 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.

7. *Переслегин С.В., Синицын Ю.П., Плющев В.А.* Формирование скоростных и уровенных портретов морской поверхности в аэрокосмических интерференционных РСА (ИРСА). // В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности», Нижний Новгород, 2006, ИПФ РАН, вып.2, с. 35-48.
8. *Farr T., Kobrik M.* The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) // Proc. of EUSAR-98, Friedrichshafen, Germany, May 1998, p.307-308.
9. *Siegmund R., Vignuan Bao, Lehner S., Mayerle R.* First demonstration of surface currents imaged by hybrid along- and cross-track interferometric SAR // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2004, v. 42 (3), p.511-519.
10. *Бадулин С.И., Иванов А.Ю., Островский А.Г.* Волны-убийцы и их дистанционное зондирование // Исследование Земли из космоса, 2006, №1, с. 77-92.
11. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиопизика и астрономия, 2005, т.10, №2, с. 178-188.
12. *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». ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2004, с.66-78.
13. *Калмыков А.И., Лементы Ю.А., Островский И.Е., Фукс И.М.* Энергетические характеристики рассеяния радиоволн СВЧ диапазона взволнованной поверхностью моря / Препринт №71, ИРЭ АН УССР, Харьков, 1976, 60 с.