

НПО им. С.А. Лавочкина ГК «Роскосмос»*

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

Научно-исследовательский Университет (НИУ МЭИ)***

А.А. Прилуцкий*, А.Л. Родин*, С.В. Переслегин**, Е.А. Куликов**,
Д.В. Ивонин**, З.А. Халиков**, И.О. Карпов**, А.И. Баскаков***

**ПРИНЦИПЫ ГЛОБАЛЬНО-ОПЕРАТИВНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ОКЕАНСКИХ ЯВЛЕНИЙ
(ВКЛЮЧАЯ ОПАСНЫЕ) ИЗ КОСМОСА**

Объекты оперативной диагностики, требования к космической РЛ системе

Основные фоноконтрастные объекты (без ледового покрова и климатообразующих параметров):

Энергонесущие ветровые волны и зыбь, в том числе – «волны-убийцы» (мелкомасштабные поля уровня и скорости)

Сейсмические волны, порождающие цунами (мезомасштабное поле уровня)

Пространственно-временная мезомасштабная структура поля геострофических течений в океане

Техногенные источники – корабли, следы кораблей, нефтяные пленки (мелкомасштабные поля яркости)

Основные требования:

Ширина обзора не менее 2000 км при максимальном охвате акватории (по длине кадра)

Время повторяемости для заданного района океана – зависит от объекта наблюдения и числа КА в группировке (для цунами – не более 20 минут, штормовые волны – 1 час)

Горизонтальное разрешение для волн зыби ~20 м при вертикальном разрешении ~0,5 м

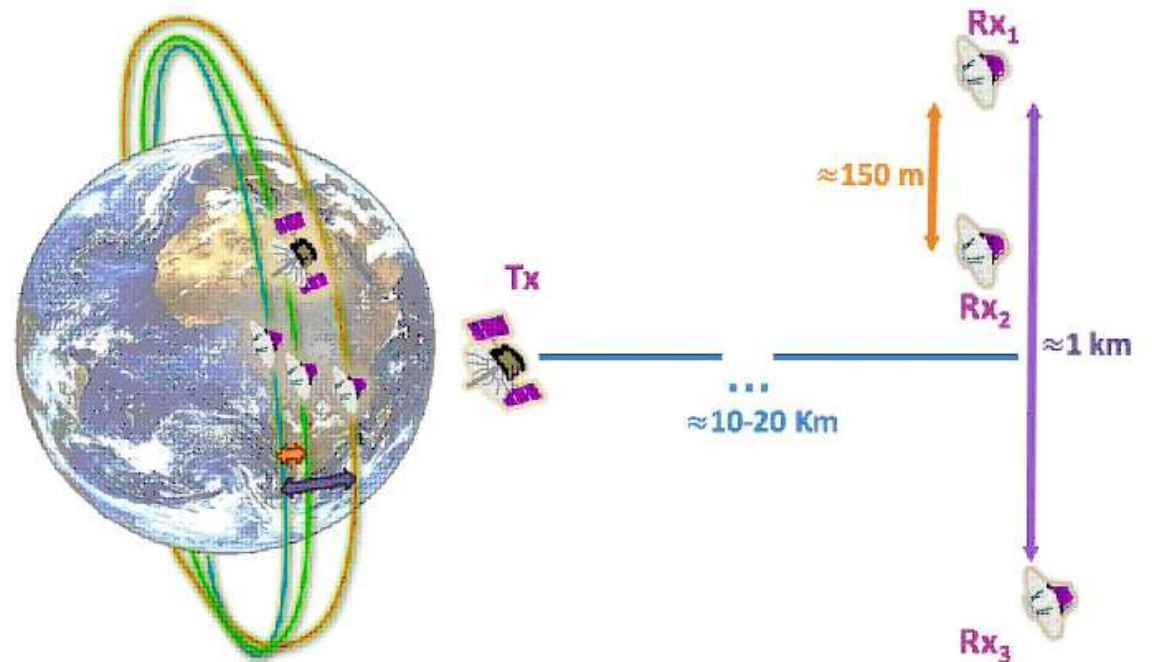
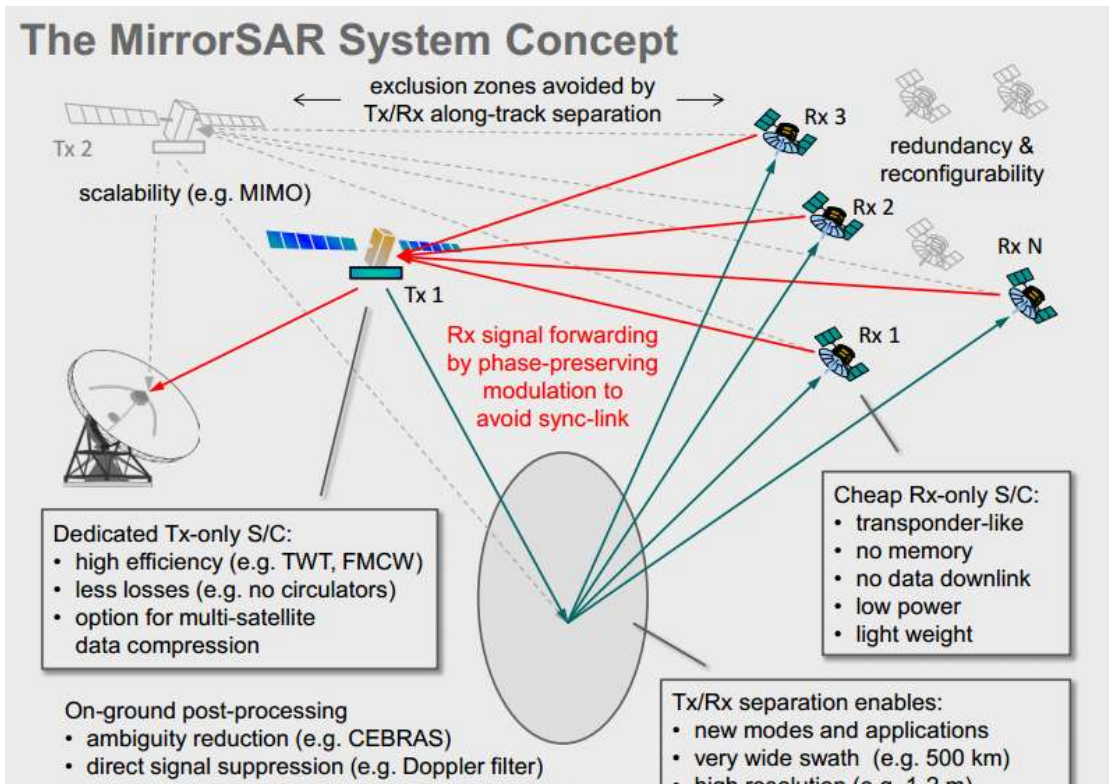
Горизонтальное разрешение для сейсмических волн ~10 км при вертикальном разрешении ~ 5 см

Горизонтальное разрешение для градиентных течений ~3 км при скоростном разрешении ~ 2 см/с

Горизонтальное разрешение для малоразмерных объектов ~ 10м при скоростном разрешении ~ (0,05 – 1) м/с

Европейский проект развития системы Tandem TerraSAR

Материал IGARSS-2017 и EUSAR-2018: ESA и DLR предлагают модернизировать действующую систему Tandem TerraSAR, добавив некое количество малых приёмных аппаратов (Rx), а основной приёмно-излучающий аппарат (Tx) поместить на орбиту, позволяющую обеспечить приём многих сигналов, отраженных поверхностью Земли. Это должно существенно увеличить ширину зоны обзора на поверхности Земли (до 500км) и повысить точность восстановления рельефа при использовании поперечной интерферометрии (по-видимому, здесь **суша является основным объектом**).



Satellites formation and baselines

НИР «АВАНГАРД» (материал ЦНИИмаш для ИО РАН)

Название: Системные, проектно-поисковые и расчетно-теоретические исследования в обеспечение разработки технического облика многопозиционной космической системы радиолокационного наблюдения Мирового океана (2019 – 2020гг)

Основные цели и задачи НИР:

1. Определение и обоснование спектра задач мониторинга Мирового океана.
2. Предварительная оценка достижимых характеристик, функциональных возможностей и способов использования многопозиционной космической РЛ системы для оперативного мониторинга океанских явлений.
3. Выявление и исследование проблем, возникающих при формировании РЛ изображений полей уровня океана и высоты ветровых волн при использовании различных принципов зондирования и интерферометрии.
4. Рекомендации по этапам создания отечественной РЛ системы «ГЕОСАР».

Перспективные космические РЛ системы для оперативного мониторинга океанских явлений (в т. ч. опасных: цунами, волны-убийцы, штормовые волны)

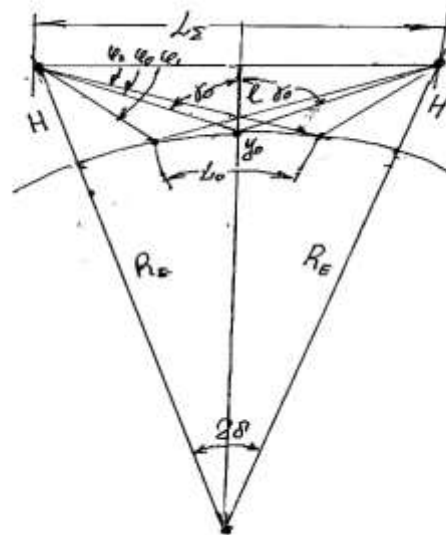
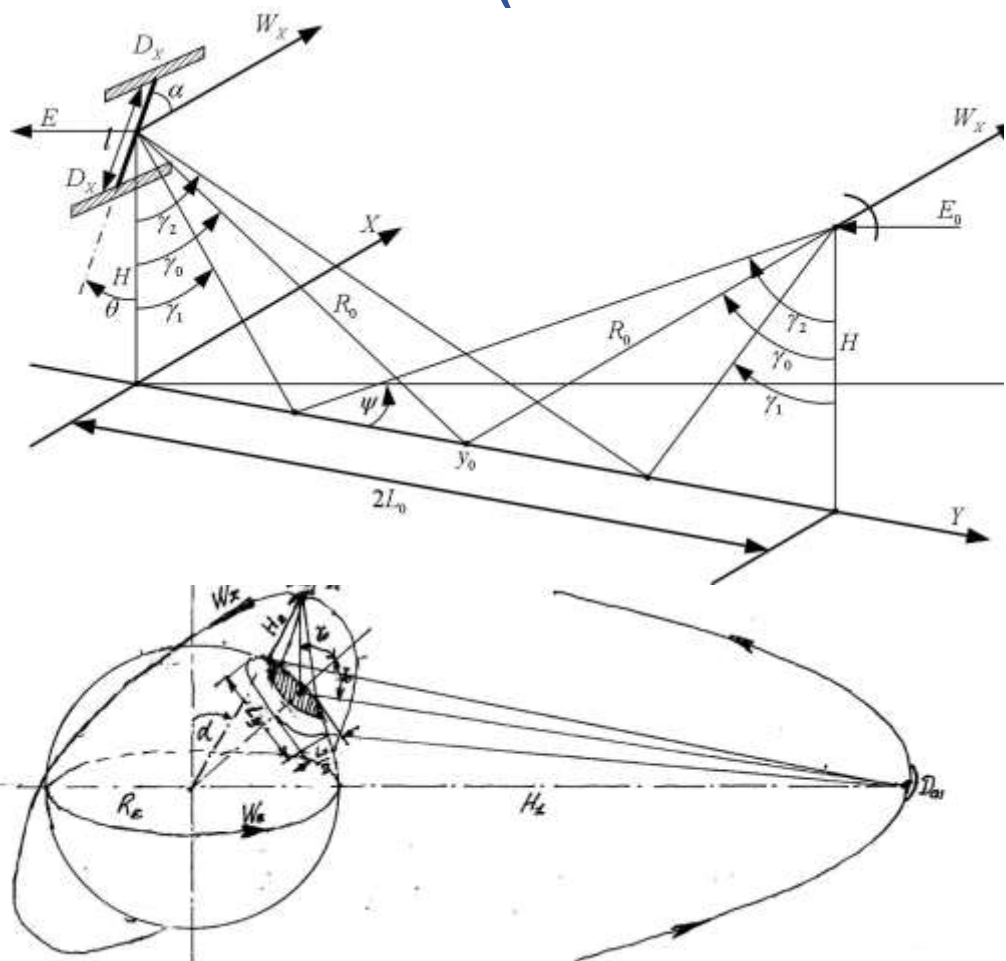


Рис.1: «Почти-глобальная» система, использующая равновысотные «танделы» МКА, один из которых излучающий. При наклонении ~ 45 град. и четырёх танделах время повторяемости достигает ~ 20 минут.

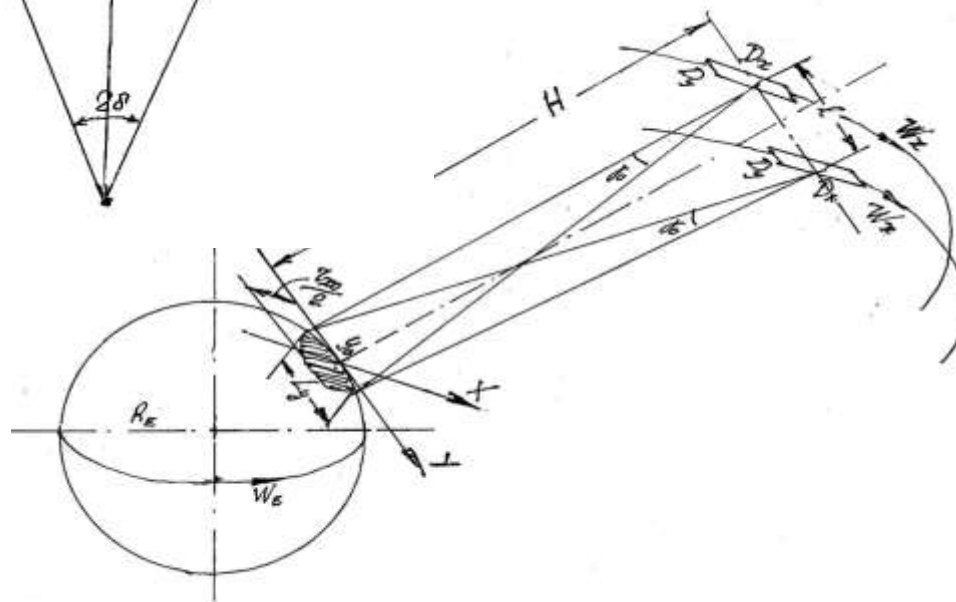
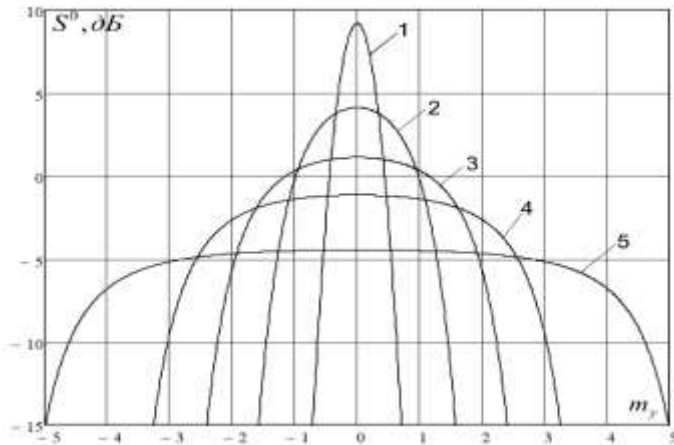


Рис.2: Региональная система, использующая излучающий геостационарный аппарат и группировку приемных МКА, подобных рис.1. Время повторяемости при 6 МКА составляет 10 минут. Региональный мониторинг охватывает определённую область в Тихом и Индийском океанах.

Рис.3: Система для регионального мониторинга использует аппараты на геосинхронных орбитах, образующих интерферометр с базой ~ 400 км. Однако, из-за малой скорости относительно Земли, время апертурного синтеза слишком велико (для волн цунами), и слишком велико время повторяемости изображений.

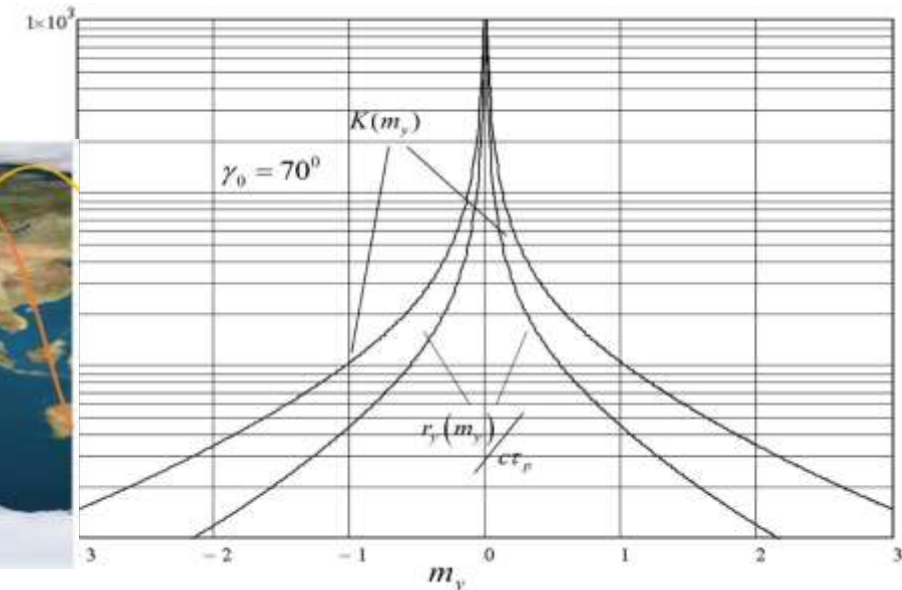
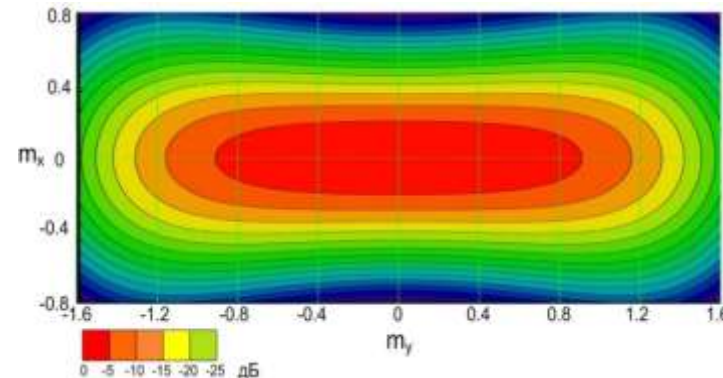
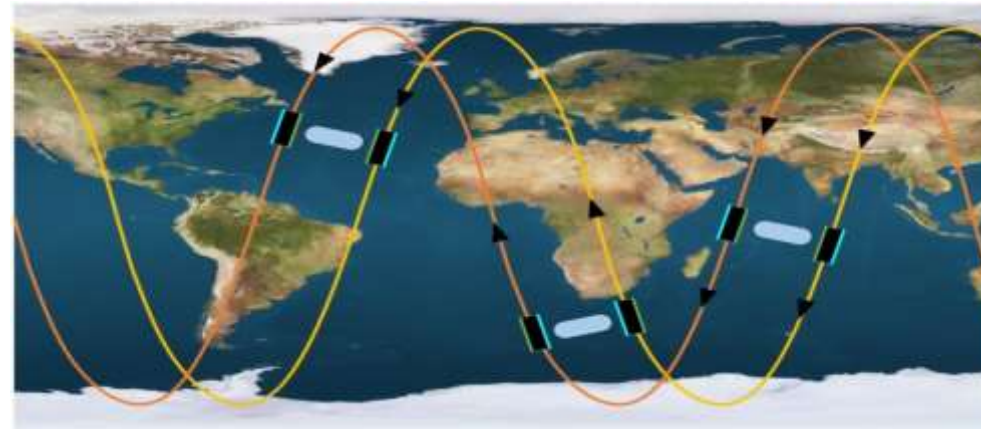
Физические особенности «квазизеркального» РЛ метода при зондировании морской поверхности

Три равновысотных тандема с разномом ~ 3000 км по долготе



Диаграммы УЭПР $S^0(m_y)$ для равновысотных КА, $H=800$ км, $\lambda=3$ см:

1 – $\gamma_0=0$ (надир), 2 – $\gamma_0=60^\circ$, 3 – $\gamma_0=70^\circ$, 4 – $\gamma_0=75^\circ$, 5 – $\gamma_0=80^\circ$ при скорости ветра 4 м/с



Поперечная разрешающая способность $r_y(m_y)$ и коэффициент растяжения масштаба горизонтальной дальности $K(m_y)$ при двухпозиционном зондировании для равновысотных аппаратов, $\gamma_0=70^\circ$.

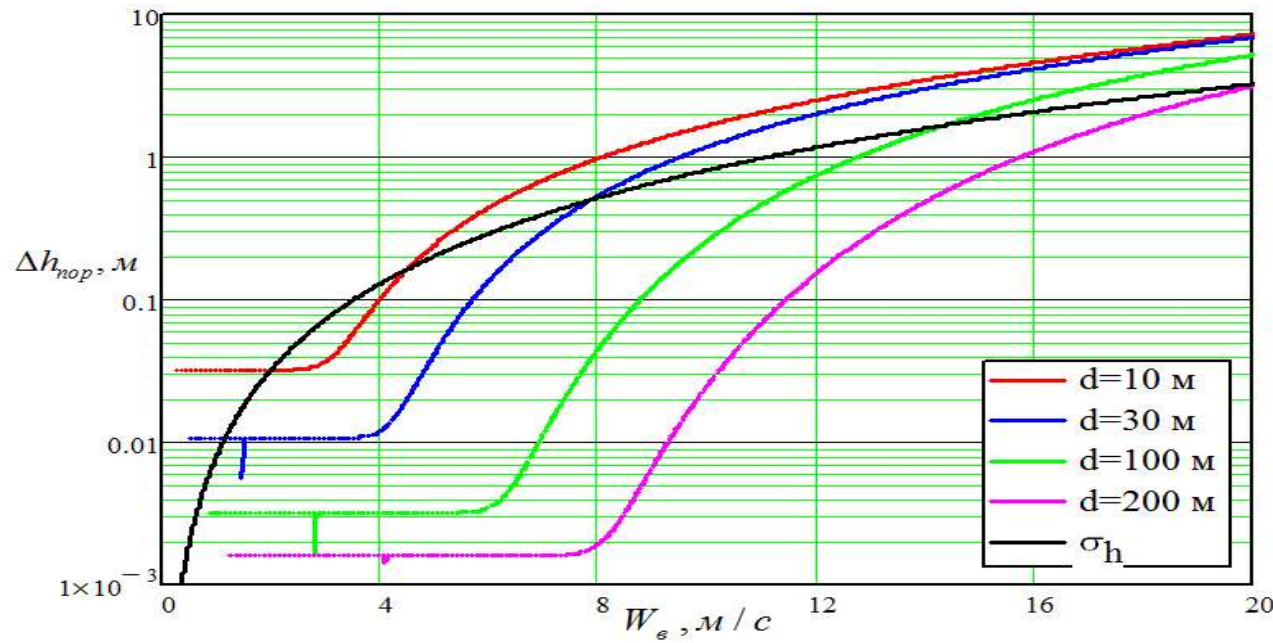
Трёхмерные диаграммы «квазизеркального» рассеяния $S^0(m_y, m_x)$ для равновысотных аппаратов при центральном угле визирования $\gamma_0=65^\circ$ и скорости ветра $W=10$ м/с с учетом кривизны земли

Публикации: Переслегин С.В., Халиков З.А. Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, № 4; Переслегин С.В., Карпов И.О., Халиков З.А. Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности: механизмы СВЧ-рассеяния и возможности решения океанологических задач из космоса // Океанология, 2017, №5; Переслегин С.В., Халиков З.А., Риман В.В., Коваленко А.И., Неронский Л.Б. Радиолокационный способ оперативной диагностики океанских явлений из космоса / Патент РФ № 2447457 с приоритетом от 09.09.2009.

ОПТИЧЕСКИЙ КВАЗЗЕРКАЛЬНЫЙ АНАЛОГ (Григорьев, 2012)



Интерференционные измерения поля вариаций среднего уровня океана



Пороговая флуктуационно-уровенная чувствительность $(\Delta h)_{пор}$ в зависимости от скорости приводного ветра и размера симметричной площадки осреднения:

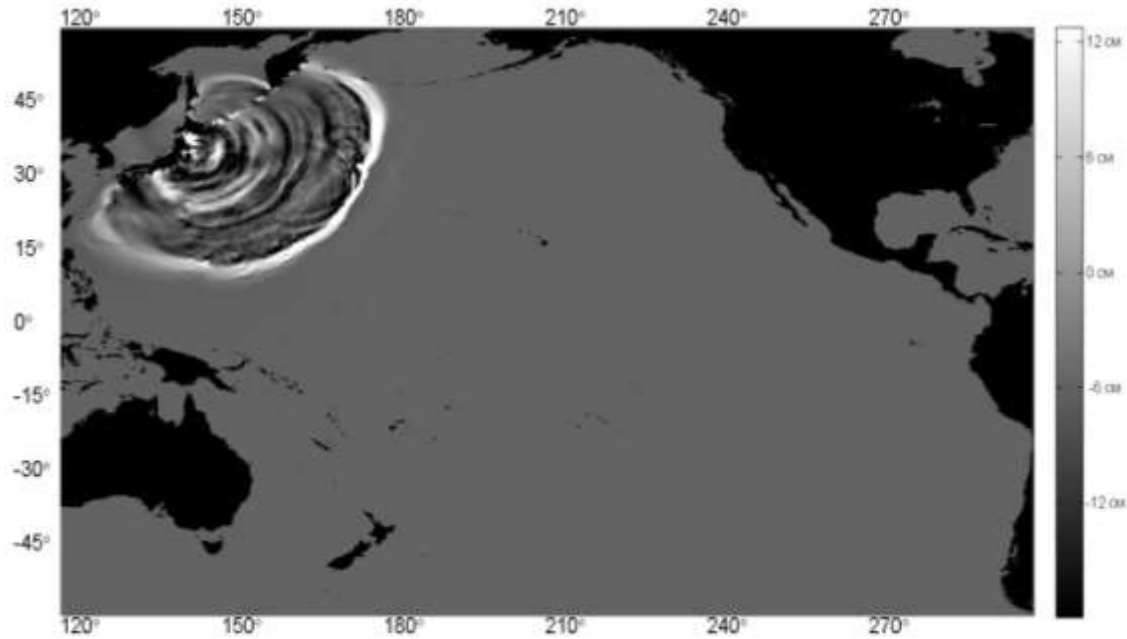
$$(\Delta h)_{пор} = q_0 \left[\sigma_{\Delta h}^2(\beta_1, q, d) + \tilde{\sigma}_h^2(d, W_\epsilon) \right]^{1/2}$$

Показана зависимость «точечного» отклонения высот волн $\sigma_h(d, W_\epsilon)$

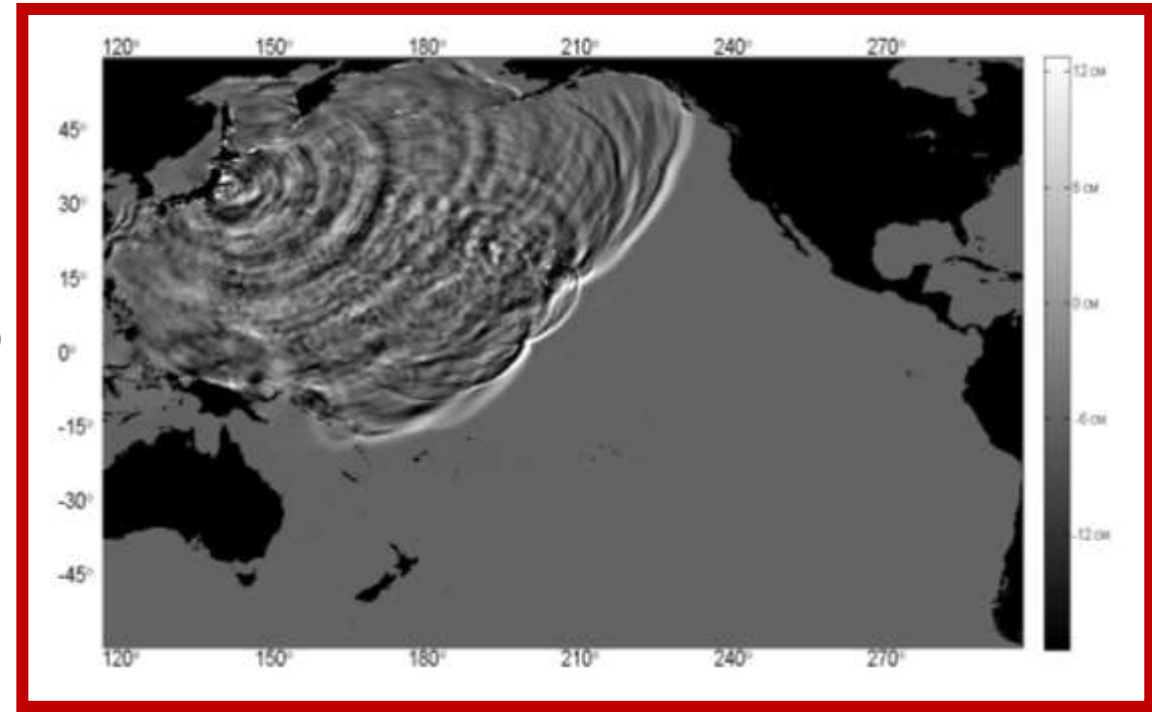
Параметры: высота орбиты $H=800$ км, длина волны $\lambda=0,8$ см, ширина спектра сигнала $\Delta f_c=100$ МГц, ширина полосы обзора $L_y \sim 2 \times 800$ км (с «вырезом» $\sim 2 \times 100$ км вблизи зеркальной точки), размер поперечной антенной базы $l_z=10$ м. Видно, что при $d=300$ м и $W_\epsilon < 10$ м/с средний уровень восстанавливается с необходимой чувствительностью, а при $d=10$ м и $W_\epsilon > 8$ м/с восстанавливается высота энергонесущей волны.

Модель развития гравитационной сейсмоволны (исх. данные лаб. цунами)

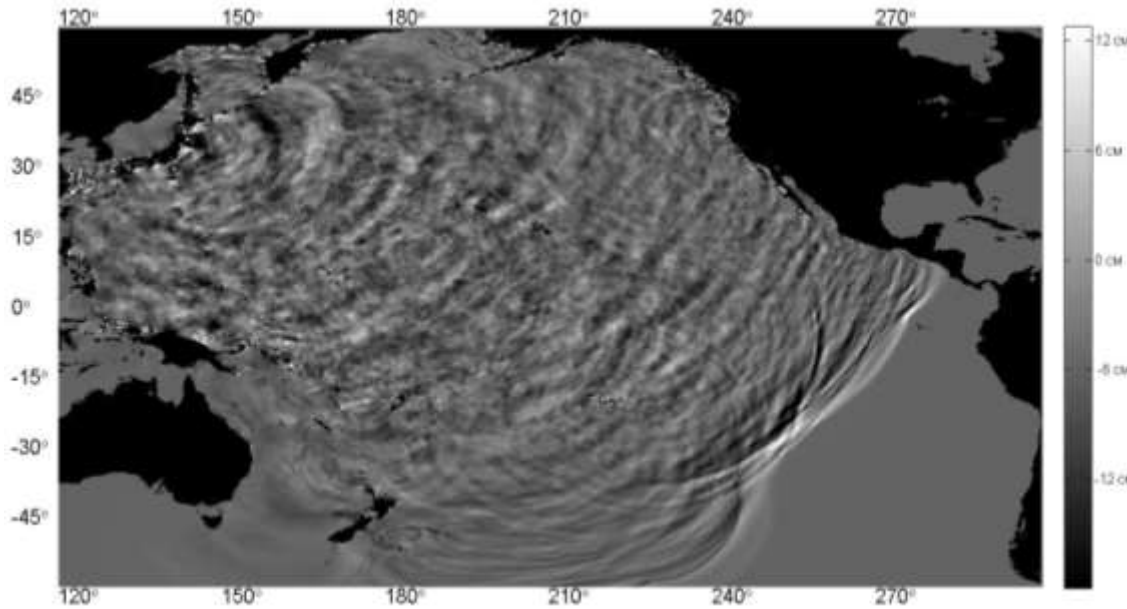
а)



б)



в)



Курильское землетрясение 4 октября 1994 г., 13.23

СГВ:

а) – 200 мин.,

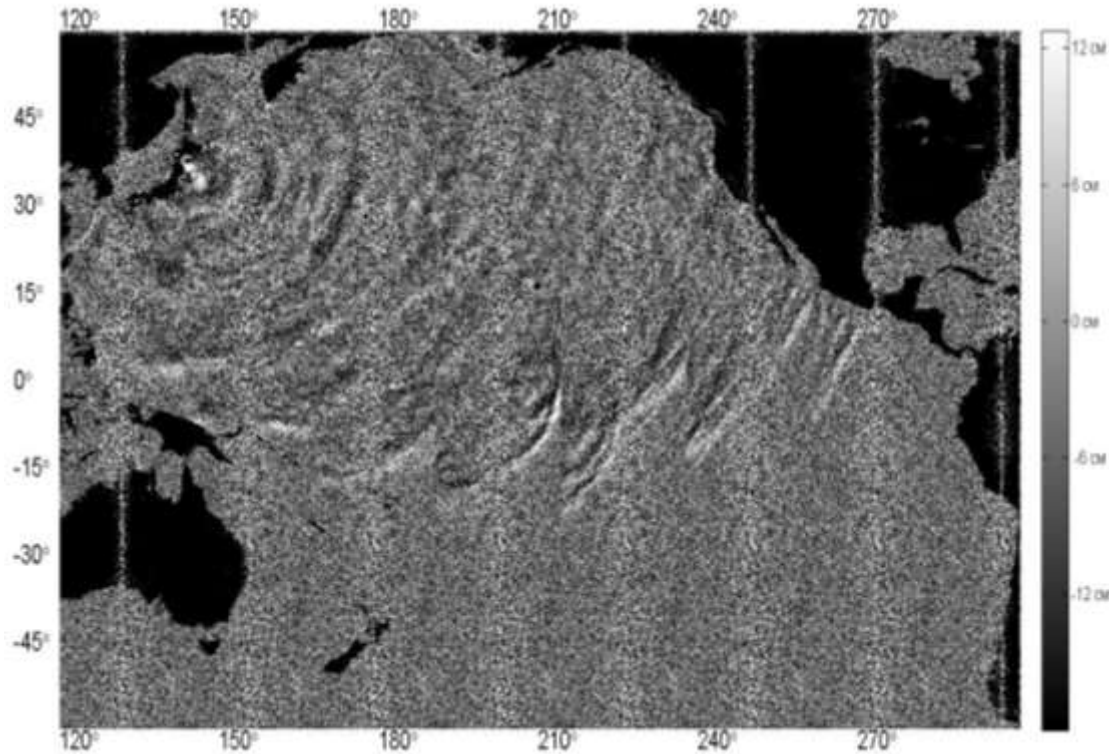
б) – 500 мин.,

в) – 1000 мин. от 13.23 СГВ

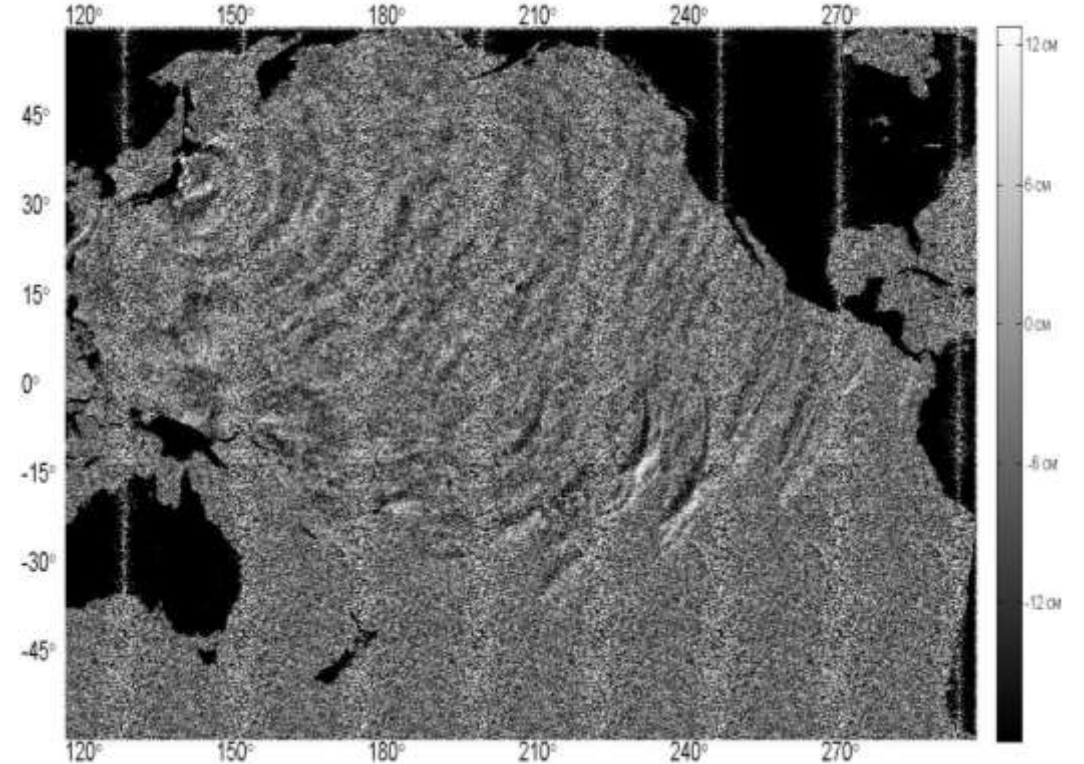
Результат моделирования уровня изображения волны цунами в системе рис.1

Радиолокационная модель развития сейсмоволны:

кадры, полученные последовательно с
первого «тандема»

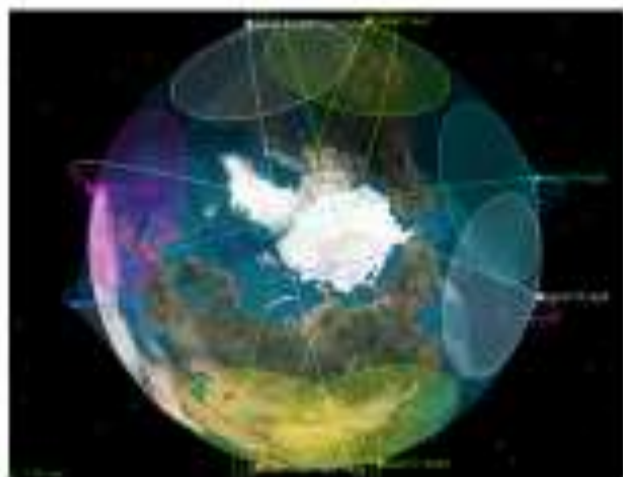


кадры, полученные со второго «тандема» с задержкой
относительно первого 90 мин.

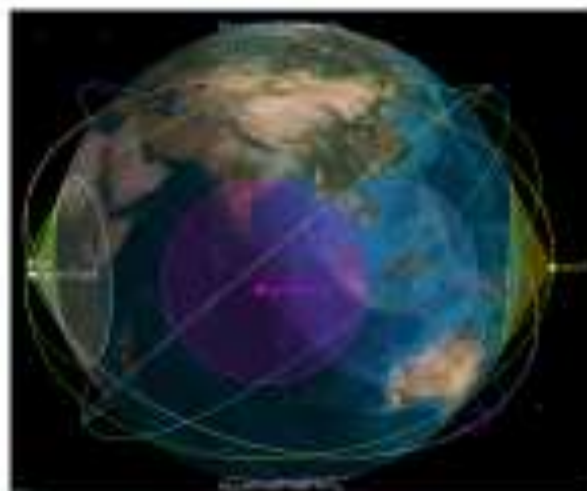


1. Ограниченная флуктуационная чувствительность интерферометра приводит к зашумлению кадра, особенно вблизи зеркальной точки;
2. Вследствие временных разрывов съемки возникают пространственные смещения, их следует учитывать при дальнейшей обработке;
3. С целью подавления вариаций уровня иной природы, при обработке изображений необходима пространственно-временная фильтрация, использующая модельные закономерности развития сейсмоволны;
4. При увеличении количества тандемов КА пропорционально уменьшается время повторяемости изображений.

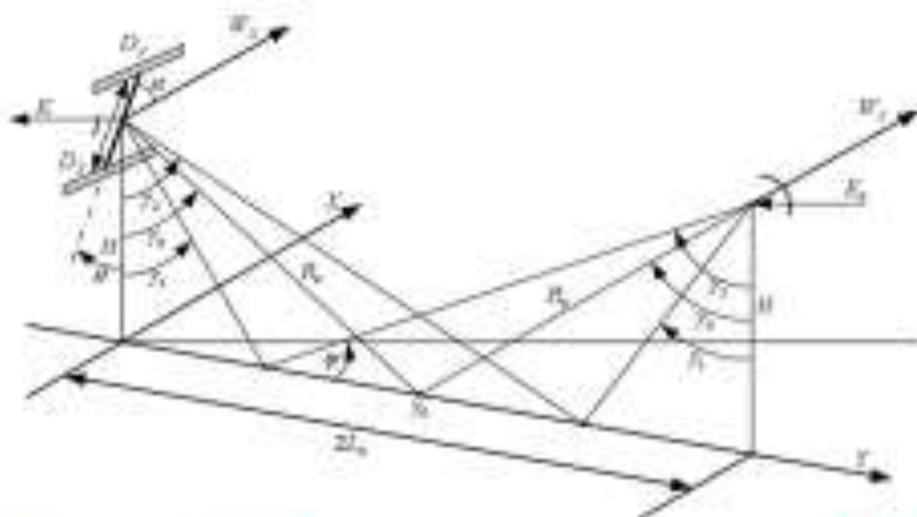
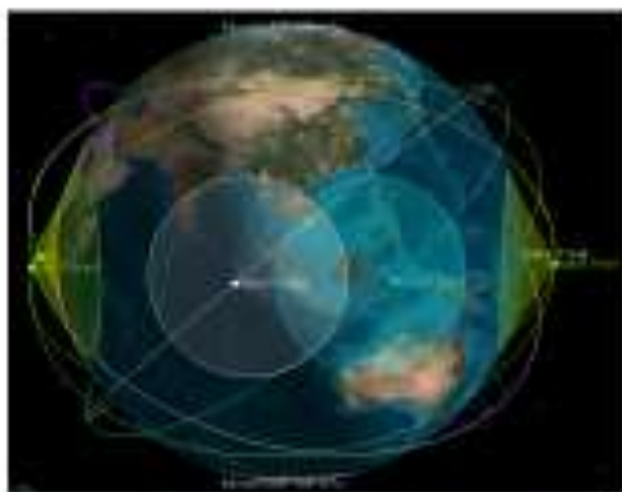
Баллистическое построение космической системы из панорамных альтиметров



Вид на орбиты 4-х кластерной системы со стороны полюса. Угол наклонения орбит 45 град.



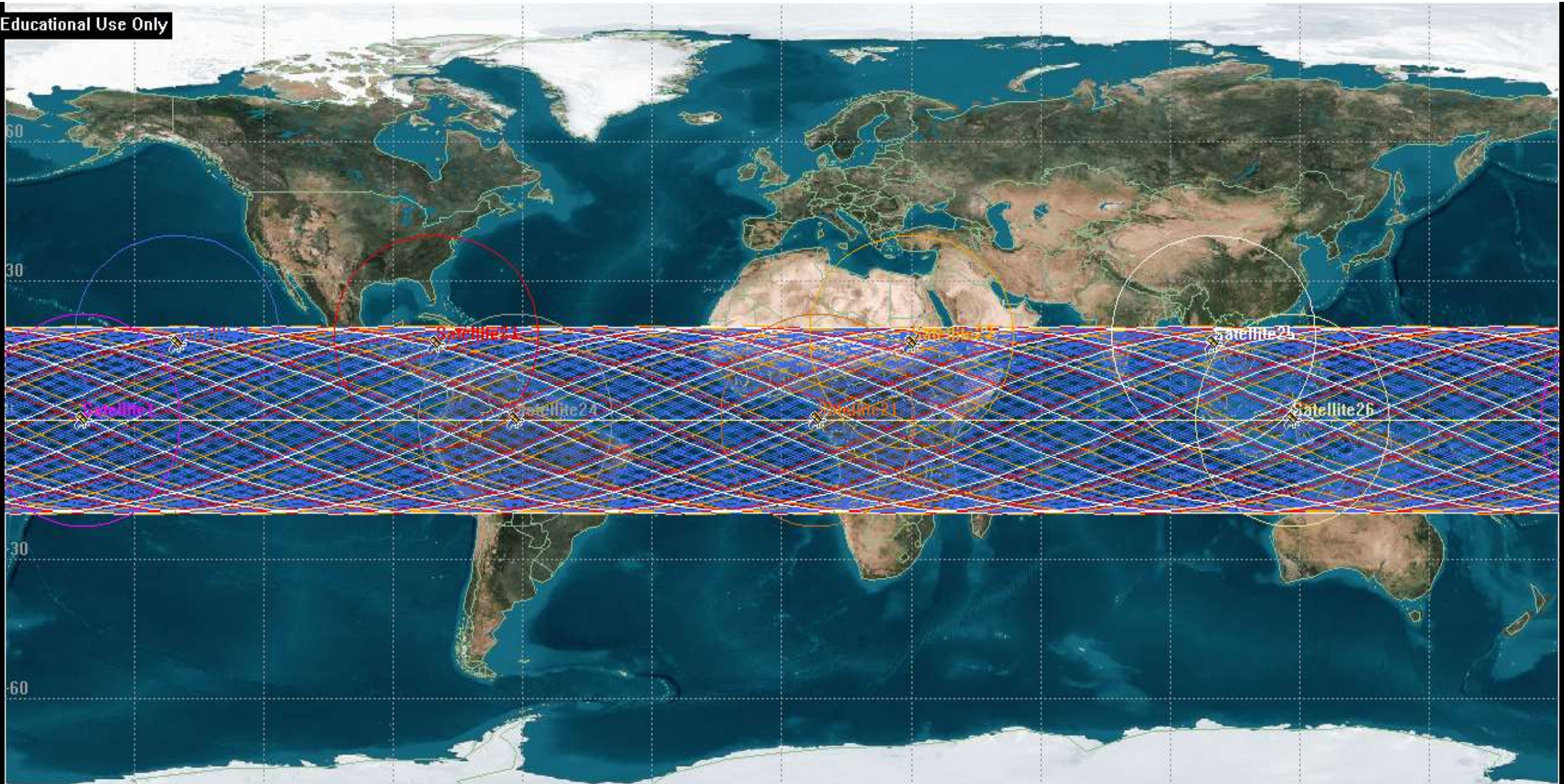
Изображены конусы радиовидимости (угол 124,6 град при вершине), пересечение следов от конусов тандема обозначает доступную зону обзора)



Вариант: КС из четырех кластеров КА на околоземной орбите. Пиковая мощность потребления активного КА (Ки-диапазон) не более 1,0 кВт. База интерферометра 10 м, мощность потребления пассивных КА – 200 Вт. Потенциальная точность измерения уровня океана не хуже 5 см. Синхронизации КА по фазе не требуется. Время ревизита 25 минут. Перерывы наблюдения 20 минут.

ГРУППИРОВКА ИЗ ЧЕТЫРЁХ ТАНДЕМОВ МКА ПРИ НАКЛОНЕ К ЭКВАТОРУ 30 град.

Educational Use Only



Китайский (сухопутный) вариант землеобзора (GEOSAR) с геосинхронной орбиты

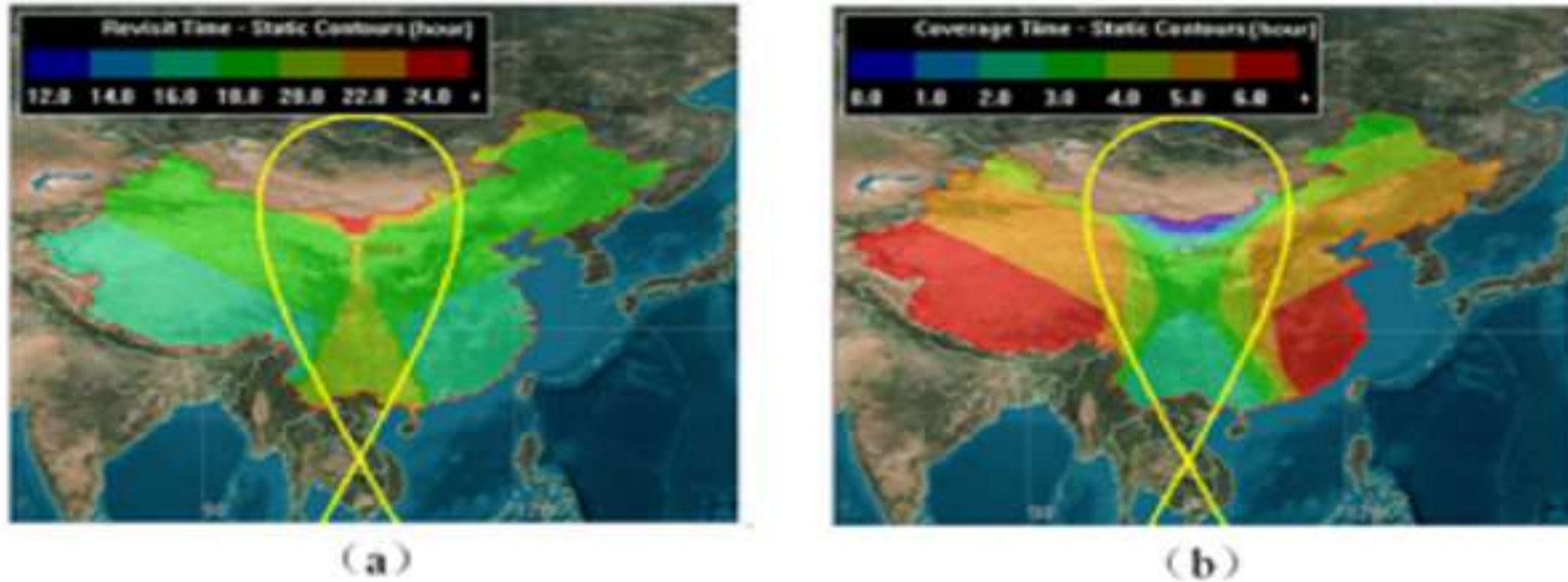


Fig. 2. GEO SAR coverage performance [L-band working frequency (0.24-m wavelength), the effective antenna aperture is $27 \times 13.5 \text{ m}^2$, look angle ranges from 1° to 8° , the ground-plane squint angle (the yaw angle) of GEO SAR is limited within $\pm 60^\circ$, and only the right looking is considered]. (a) Maximal revisit time. (b) Daily coverage time toward the scene.

Краткие выводы

Сравнение трех возможных вариантов РЛ систем, предназначенных для оперативного мониторинга и диагностики океанских явлений (в первую очередь – опасных для береговых районов, судоходства и морской деятельности), показывает следующее.

Первый вариант (слайды 6 – 12) использует группировку «танделов» МКА на низко-высотных орбитах. Он позволяет проводить **оперативный глобальный мониторинг** мелкомасштабных океанских явлений (включая структуру ветровых волн и плёночных загрязнений, внутренние волны, судовую обстановку). Мониторинг мезомасштабного поля уровня требует использования мм (K_a) диапазона и установки на приёмном аппарате второй антенны с расстоянием между антеннами не менее 4м. Время повторяемости для заданного района составляет 20 минут при ширине зоны обзора ~ 2500 км, четырёх «танделах» и допустимых пространственных разрывах. Используемый «квазизеркальный» режим рассеяния СВЧ сигнала морской поверхностью (рассеяние «вперёд» на настильных углах) требует постановки предварительного эксперимента, хотя бы со стационарных платформ. Соответствующие РЛ технологии (не требующие больших мощностей и АФАР) имеются в России.

Второй вариант (слайд 5) использует «подсвет» заданного района с геостационарного аппарата, что обеспечивает необходимый «квазизеркальный» режим рассеяния при использовании низко-высотных МКА для приёма сигнала в широкой зоне бокового обзора (**оперативный региональный мониторинг**). Здесь, как и в первом варианте, возможен мониторинг мелко-масштабных явлений, а также применение интерферометра на приёмном МКА для мониторинга мезомасштабного поля уровня. Преимуществами этого варианта являются: применение только пассивных приёмных МКА и малое время повторяемости изображений – порядка четверти часа при запуске четырёх МКА, при отсутствии разрывов. Недостаток – сложность и высокая стоимость «подсвечивающего» ГСА.

Третий вариант (слайд 6) представляет собой панорамный интерферометр, установленный на двух геосинхронных аппаратах. Он позволяет проводить **региональный мониторинг поля уровня океана** – однако время апертурного синтеза слишком велико для мониторинга волн цунами, и велико время повторяемости (1 сутки). Этот вариант (без интерферометрии) предложен в Китае для сухопутного (регионального) мониторинга с высоким разрешением (слайд 13).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!