



Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород, Россия

Потенциальные возможности
многочастотного дистанционного
зондирования водной поверхности для
измерения коротковолновой части
спектра волнения

*Титченко Ю.А., Кареев В.Ю., Рябкова М. С., Мешков Е. М.,
Понур К.А., Беляев Р.В.*

- Измерение мелкомасштабной части поверхностных волн чрезвычайно важно, поскольку она определяет обмен импульсом, теплом, массой и энергией между океаном и атмосферой.
- Чтобы включить в модели мелкомасштабные волны, нам нужен надежный способ их измерения.
- В реальных условиях это чрезвычайно сложная задача, из-за большого динамического диапазона изменения ординат волны.

Морской
буй

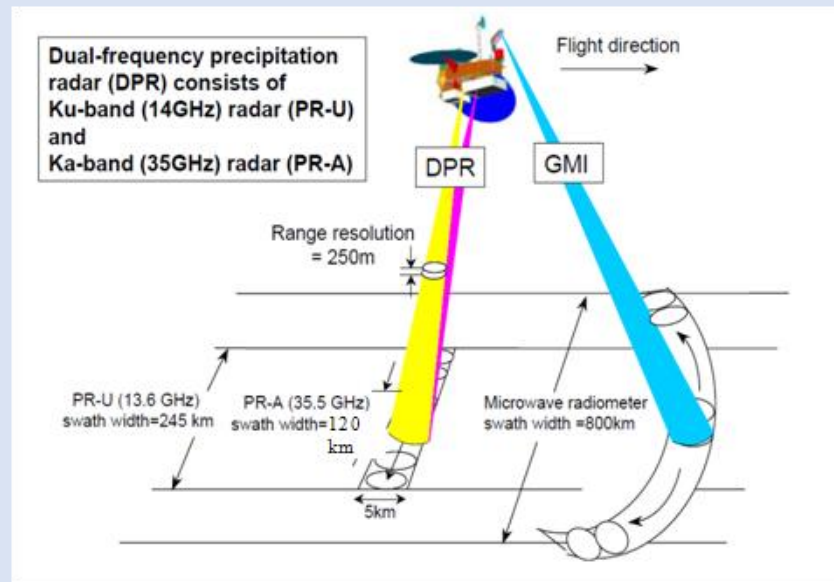


ADCP



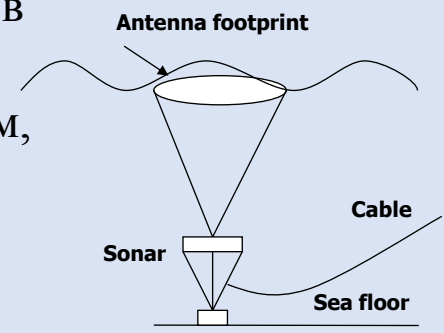
Струнный
волнограф

- Дисперсия уклонов морских волн с учетом коротковолновой части спектра волн может быть получена из данных радаров, установленных на спутниках миссий TRMM и GPM. Измерения GPM выполняются на двух частотах (Ku- и Ka-диапазон) при разных углах падения в полосе обзора около 240 км и с пространственным разрешением около 5 км. Последующая обработка позволяет определить дисперсию уклонов морских волн. Однако проверка уклонов требует проведения подспутниковых экспериментов с приборами, которые могут измерять дисперсию уклонов в тех же диапазонах поверхностных волн.

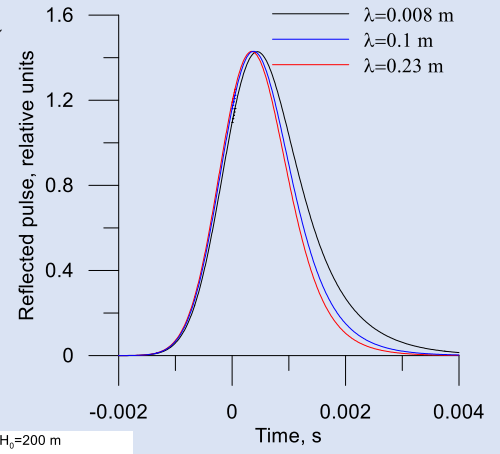
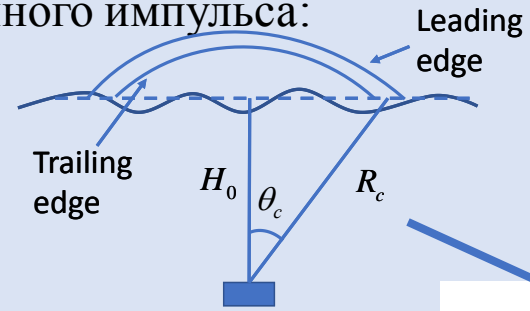


- Разработка новых устройств для измерения коротковолновой части спектра волн крайне важна и актуальна. Информация будет востребована специалистами, изучающими взаимодействие атмосферы и океана и разрабатывающих численные модели ветрового волнения.

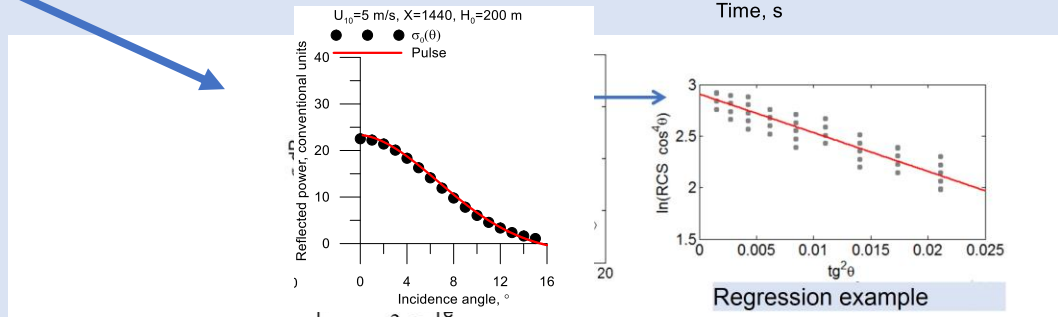
- В данной работе для анализа высокочастотной части спектра волн в 6-ти интервалах предлагается использовать шестичастотный импульсный подводный акустический волнограф (длины волн 8 мм, 21 мм, 3 см, 5,5 см, 10 см, 23 см.) с широкими диаграммами направленности (ширина на уровне половинной мощности составляет 15°) для каждой частоты.



- Для определения дисперсии уклонов поверхности для каждой излучаемой длины волны будут использоваться два подхода, заимствованные из радиолокационных методов и новые для гидроакустики: первый основан на анализе формы отраженного импульса:



- второй будет использовать угловую зависимость сечения обратного рассеяния.
- Таким образом, дисперсия уклонов водной поверхности будет измеряться подводным акустическим волнографом для каждой частоты излучения.



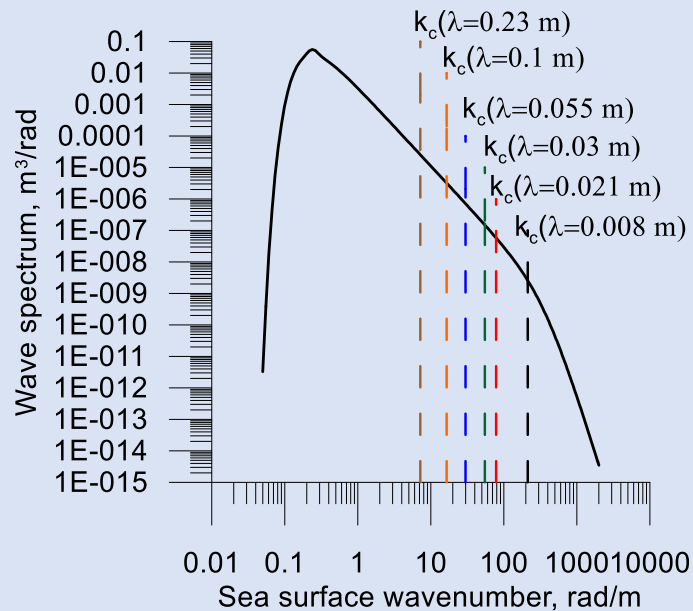
$$\sigma(\theta) = \frac{|R_{\text{eff}}(0)|^2}{2\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2}} \frac{\exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2\sigma_{xx}^2}\right]}{\cos^4 \theta} \rightarrow \ln(\sigma \cos^4 \theta) = a - b \text{tg}^2 \theta.$$

$$a = \ln(\sigma(0)), \quad \sigma(0) = \frac{|R_{\text{eff}}(0)|^2}{2\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2}}, \quad b = 1/\sigma_{xx}^2$$

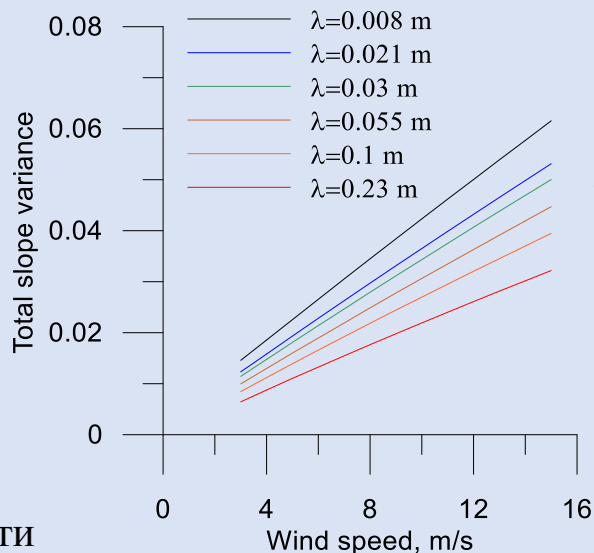
Дисперсия уклонов, измеренная сонаром и радаром, определяется интегралом спектра уклонов поверхности, взятого в диапазоне от 0 до граничного волнового числа:

$$\sigma_{total}^2 = \int_0^{k_c} k^2 S(k) dk$$

Расположение граничных волновых чисел, соответствующих частотам подводного акустического волновода:



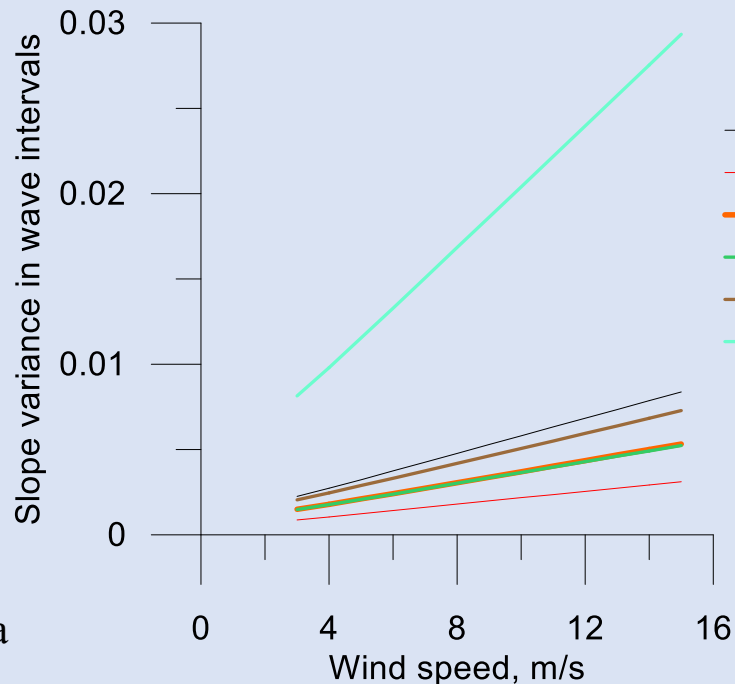
НАКЛОНЫ ДЛЯ РАЗНЫХ ЧАСТОТ И ИНТЕРВАЛОВ



На рисунке показано, что уклоны, учитывающие более широкий диапазон длин поверхностных волн, более чувствительны к скорости ветра.

Особенностью разности

уклонов является вычитание длинных волн, которые могут включать в себя зыбь и другие волны, распространяющиеся на большие расстояния. В результате уклоны в интервалах будут определяться только волнами, вызванными текущим ветром, что приведет к лучшему соответствию скорости ветра и уклонов.



— Slope($\lambda=0.008$ m)-Slope($\lambda=0.021$ m)
— Slope($\lambda=0.021$ m)-Slope($\lambda=0.03$ m)
— Slope($\lambda=0.03$ m)-Slope($\lambda=0.055$ m)
— Slope($\lambda=0.055$ m)-Slope($\lambda=0.1$ m)
— Slope($\lambda=0.1$ m)-Slope($\lambda=0.23$ m)
— Slope($\lambda=0.008$ m)-Slope($\lambda=0.23$ m)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА ВОЛН

Высокочастотная часть волнового спектра: $S(\omega) = \frac{a}{\omega^N}$

Дисперсию уклонов в диапазоне угловых частот, соответствующих граничным волновым числам, можно записать следующим образом:

$$\sigma_{21} = \sigma_2 - \sigma_1 = \int_{\omega_0}^{\omega_2} \frac{a}{\omega^N} \kappa^2 d\omega - \int_{\omega_0}^{\omega_1} \frac{a}{\omega^N} \kappa^2 d\omega = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{a}{\omega^N} \kappa^2 d\omega$$

Учитывая дисперсионное соотношение для гравитационно-капиллярных волн, можно записать дисперсию уклонов в интервале граничных волновых чисел следующим образом:

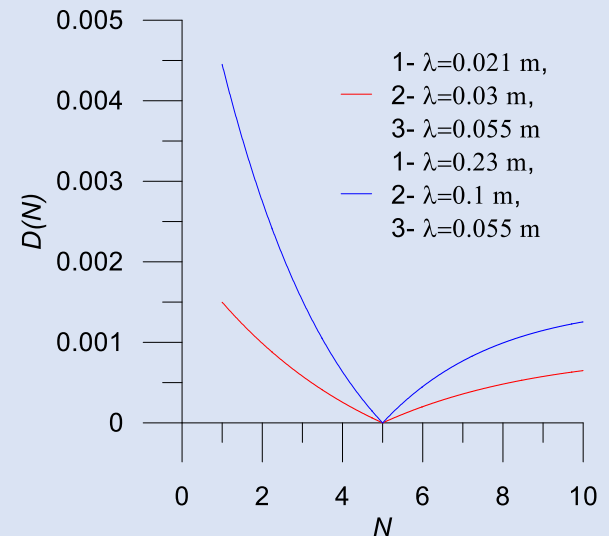
$$\sigma_{21} = \int_{\kappa_{c1}}^{\kappa_{c2}} \frac{a \kappa^2 \left(g + 3 \frac{\sigma}{\rho} \kappa^2 \right)}{2 \left(g \kappa + \frac{\sigma}{\rho} \kappa^3 \right)^{\frac{N+1}{2} + \frac{1}{2}}} d\kappa$$

Коэффициент a можно выразить с помощью дисперсии уклонов из другого интервала:

$$a = \frac{\sigma_{31}}{\int_{\kappa_{c1}}^{\kappa_{c3}} \frac{\kappa^2 \left(g + 3 \frac{\sigma}{\rho} \kappa^2 \right)}{2 \left(g \kappa + \frac{\sigma}{\rho} \kappa^3 \right)^{\frac{N+1}{2} + \frac{1}{2}}} d\kappa}$$

Далее численно определяем степень N спада спектра волн, чтобы минимизировать следующую разницу:

$$D(N) = \left| \sigma_{21} - \sigma_{31} \int_{\kappa_{c1}}^{\kappa_{c2}} \frac{\kappa^2 \left(g + 3 \frac{\sigma}{\rho} \kappa^2 \right)}{2 \left(g \kappa + \frac{\sigma}{\rho} \kappa^3 \right)^{\frac{N+1}{2} + \frac{1}{2}}} d\kappa \right| / \left| \int_{\kappa_{c1}}^{\kappa_{c3}} \frac{\kappa^2 \left(g + 3 \frac{\sigma}{\rho} \kappa^2 \right)}{2 \left(g \kappa + \frac{\sigma}{\rho} \kappa^3 \right)^{\frac{N+1}{2} + \frac{1}{2}}} d\kappa \right|$$



- В работе проведено теоретическое исследование, направленное на разработку новых методов измерения параметров морского волнения. Для измерений предлагается использовать многочастотный подводный акустический волнограф.
- Обсуждаются два метода определения дисперсии уклонов крупномасштабных волн по сравнению с длиной волны излучения с использованием особенностей импульсного режима работы устройства.
- Многочастотная система измеряет дисперсию уклонов в каждом частотном интервале, что позволяет разделить вклад в дисперсию уклонов длинноволновой и коротковолновой частей спектра волн.
- Разработан оригинальный алгоритм определения (восстановления) коротковолновой части спектра волн, который будет работать в морских условиях.

$\lambda = 0.016m$

$\lambda = 0.034m$

$\lambda = 0.017m$

$\lambda = 0.069m$

$\lambda = 0.008m$

$\lambda = 0.0025m$



Спасибо за внимание!