

Моделирование процесса электромагнитного зондирования морской поверхности

Д.Ю. Князьков, В.В. Черник

Институт проблем механики РАН

1 Введение.

В настоящее время представляется актуальной задача восстановления спектра волнения морской поверхности по данным электромагнитного зондирования. Определение формы морской поверхности важно для задач определения динамических характеристик приповерхностного ветра, прогнозирования погоды, идентификации искусственных и естественных глубинных процессов; при этом, чаще всего, зондирование проводится с самолета или искусственного спутника Земли [1]. Существенным здесь является то, что длина зондирующей волны сравнима с масштабом неоднородностей поверхности. В настоящей работе, для нужд радиотомографии поверхности Земли, решается задача моделирования собственного излучения морской поверхности.

Согласно принципу взаимности, интенсивность собственного излучения в заданном направлении пропорциональна доли излучения, поглощенного средой при облучении ее плоской волной в этом же направлении - энергетическому дефекту. Поэтому далее в расчетах будет находиться именно энергетический дефект, однако, поскольку нас в первую очередь интересует задача пассивной радиолокации, часто, особенно при интерпретации результатов, мы будем говорить о собственном излучении морской поверхности.

В настоящей работе считалось, что излучающая поверхность является цилиндрической по одной координате и периодической по другой. В рассматриваемой нами модели система уравнений Максвелла имеет вид (при отсутствии

сторонних токов и в случае $\mu = 1$, что соответствует отсутствию ферромагнитных свойств вещества)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \bar{H} = -i\varepsilon \frac{\omega}{c} \bar{E}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \bar{E} = \frac{\omega}{c} \bar{H}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div}(\varepsilon \bar{E}) = 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div}(\bar{H}) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma$ — комплексная проницаемость, σ_0 — проводимость, ω — частота электромагнитной волны, c — скорость света, $\varepsilon_0(\bar{x})$ — комплексная диэлектрическая проницаемость.

2 Организация расчетов на кластере HybriLIT ЛИТ ОИЯИ.

Для расчета собственного излучения морской поверхности в заданном направлении использовался метод параллельных сечений [2]. Этот метод ранее был реализован в качестве расчетного модуля на языке программирования python [3]. В настоящей работе улучшенная версия этой программы была распараллелена для использования на суперкомпьютерах. Для расчетов использовался гибридный кластерный вычислитель HybriLIT, находящийся в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ в Дубне (<http://hybrilit.jinr.ru/>).

На данный момент кластер HybriLIT состоит из 7 вычислительных узлов, с 2 двенадцатиядерными процессорами Intel Xeon E5-2695 v2 2.4 ГГц на каждом узле (всего 168 вычислительных ядер, 3.2 ТФлопс пиковой производительности) и имеет 896 Гб ОЗУ. Также на кластере установлены одна видеокарта NVIDIA Tesla K20X, 12 видеокарт NVIDIA Tesla K40 (всего 37248 CUDA ядер, 18.47 ТФлопс на числах двойной точности) и один сопроцессор Intel Xeon Phi 5110P, два сопроцессора Intel Xeon Phi 7120P (всего 182 ядра, 3 ТФлопс на числах двойной точности).

Таким образом, требовалось реализовать параллельный алгоритм расчёта,

пригодный для использования на суперкомпьютерах кластерного типа. Поскольку большинство численных экспериментов представляет собой определение дефекта для разных наборов параметров (формы поверхности, длины волны, угла падения), не имеет смысла осуществлять распараллеливание алгоритма самого проекционного метода (точнее самой затратной по времени его части - решения системы дифференциальных уравнений), а следует организовать параллельное осуществление элементарных расчётов дефекта при фиксированных длине волны, форме поверхности, периоде, угле падения.

Программа расчёта по проекционному методу была написана на языке python, для распараллеливания расчётов использовался python-модуль `pyrag` (<https://code.google.com/p/pyrag/>). Этот модуль позволяет пользоваться средствами параллельного интерфейса MPI (Message passing interface - интерфейс передачи сообщений) в программах, написанных на языке python. Такой модуль был установлен сотрудниками ЛИТ ОИЯИ на вычислительном кластере HybriLIT. В программе общая расчётная задача разбивалась на подмножества элементарных расчётов (нахождение дефекта при заданных угле падения, длине волны, периоде, форме поверхности), каждое из которых должно было быть рассчитано на отдельном вычислительном ядре. Для вывода изображений использовалась библиотека `matplotlib` (<http://matplotlib.org/>).

Параллельная организация расчетов, ввиду независимости отдельных вычислений, показала высокую, близкую к 1 эффективность использования ресурсов суперкомпьютера. Для ряда расчетов (например, график рис. 2) использование параллельной организации счета на кластерном вычислителе позволило снизить время счета с двух суток (на одном ядре процессора) до одного часа (на двух вычислительных узлах).

3 Примеры расчетов

С помощью описанной выше программы был произведен ряд численных расчетов. Исследовалась зависимость интенсивности излучения от угла визирования, влияние на излучение возмущения волны мелкой рябью и длинными волнами, зависимость излучения морской поверхности от периода волнения.

3.1 Зависимость интенсивности излучения от угла визирования

Изучалась зависимость интенсивности собственного излучения в заданном направлении от угла визирования при различной интенсивности волнения. Форма поверхности задавалась в виде $f(x) = l\sin(x)$, где амплитуда волнения l принимала значения от 0 (случай плоской поверхности) до 0.5 с шагом 0.1. Результаты расчета показаны на рис. 1. Видно, что при угле визирования в 30 градусов (резонансом для данных периода волнения и длины волны электромагнитного излучения) наблюдается резкий скачок интенсивности излучения. Также видно, что до угла визирования 60 градусов интенсивность излучения монотонно зависит от интенсивности волнения при фиксированном угле визирования, однако при дальнейшем увеличении угла эта монотонность теряется. Таким образом, пригодными для нужд радиотомографии углами визирования являются углы от 30 до 60 градусов.

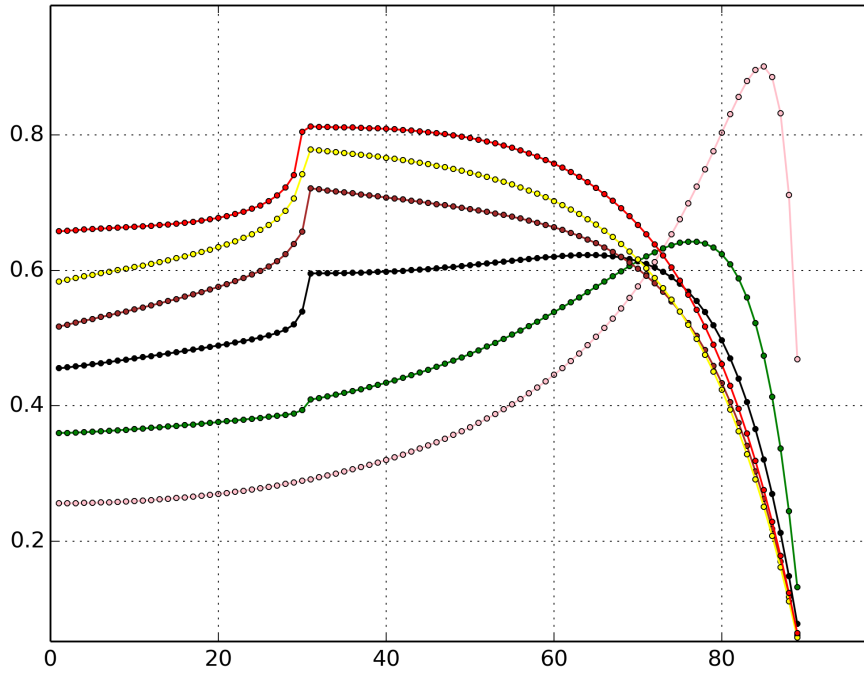


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения (по вертикальной оси) от угла визирования (откладывается по горизонтальной оси) для вертикальной E-поляризации для морской поверхности формы $l \sin(x)$. Кривые (снизу вверх) розового, зеленого, синего, коричневого, желтого и красного цвета на обоих графиках отвечают значениям $l = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ соответственно.

3.2 Возмущение поверхностной волны мелкой рябью и длинной волной.

Изучалась зависимость дефекта от амплитуды волны на поверхности при угле падения и длинах волн, соответствующих аномалии Вуда и влияние на эту зависимость возмущения формы морской поверхности.

Были рассмотрены случаи излучения невозмущённой водной поверхностью ($l_1 = l_2 = 0$), поверхностью, возмущенной мелкой рябью ($l_1 \neq 0$), и поверхностью, возмущенной длинными волнами ($l_2 \neq 0$).

Изучалось также влияние возмущений вида $\frac{l_1}{k_1} \sin(k_1 x) + l_2 k_2 \sin(\frac{x}{k_2})$, то есть одновременно мелкой ряби с периодом $\frac{2\pi}{k_1}$ и длинных волн с периодом $2\pi k_2$, на зависимость дефекта от амплитуды основного волнения поверхности $l \sin(x)$. Параметры принимали следующие значения: $k_1 = 2, 3, 4, 5$; $l_1 = 0, 0.05, 0.1, 0.15$; $k_2 = 2, 3$; $l_2 = 0, 0.05, 0.1, 0.15$. Расчеты проводились для всевозможных сочетаний значений параметров.

Результаты расчётов приведены на рис. 2.

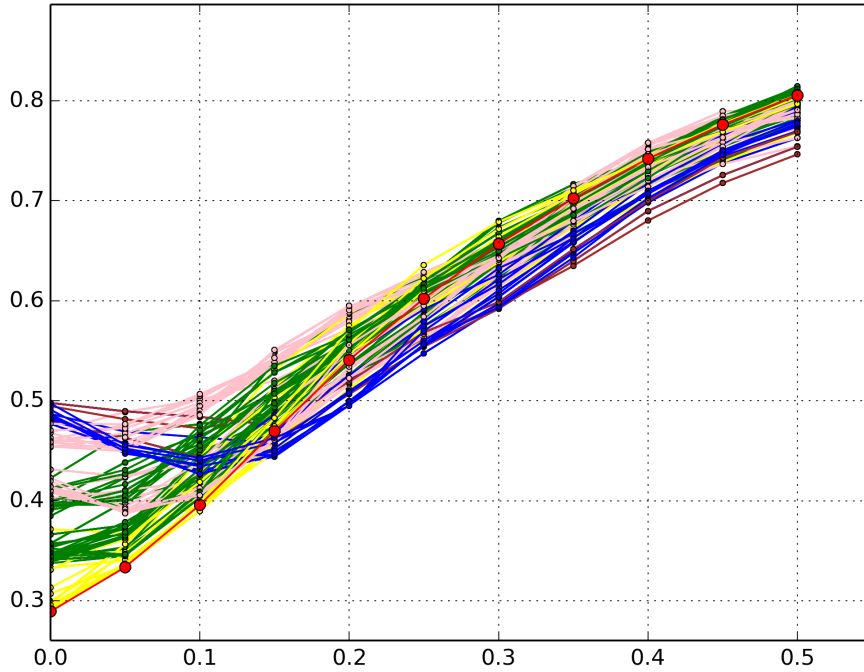


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения от амплитуды волны при вертикальной Е-поляризации и смешанном возмущении мелкой рябью и длинными волнами. По горизонтальной оси отложена амплитуда l , по вертикальной - дефект. Красным цветом показана невозмущенная кривая (когда морская поверхность задана функцией $l \sin(x)$), желтым - после возмущения морской поверхности с параметрами $l_1 + l_2 \leq 0.1$, зелёным - возмущения с параметрами $0.1 < l_1 + l_2 \leq 0.3$, розовым - возмущения с параметрами $0.3 < l_1 + l_2 \leq 0.4$, синим - возмущения с параметрами $0.4 < l_1 + l_2 \leq 0.5$, коричневым - возмущения с параметрами $l_1 + l_2 > 0.5$.

3.3 Зависимость интенсивности излучения морской поверхности от периода волнения.

Изучалась зависимость интенсивности излучения от периода волнения на морской поверхности. Морская поверхность задавалась функцией $\frac{0.5}{k_1} \sin(k_1 x)$, где k_1 изменялось от 0.55 (0.8 для Н-поляризации) до 5.5. Таким образом, период изменялся от $\frac{2\pi}{5}$ до 3.3π . Угол визирования составлял 30 градусов.

Результаты расчётов для горизонтальной поляризации приведены на рис. 3, а для вертикальной - на рис. 4. По этим графикам качественно можно оценить, как будут влиять возмущения волнами с различными периодами на сложность идентификации основной на данной частоте излучения и угле визирования (соответствующей аномалии Вуда или максимуму интенсивности излучения) длине волны.

Графики рис. 3 и рис. 4 показывают, что в целом селективность при использовании Е-поляризации должна быть выше. Результаты расчетов рис. 3 и рис. 4 согласуются с результатами предыдущих расчетов: короткие волны возмущения должны иметь меньшее влияния, чем длинные; волны возмущения с близкими к основной волне периодами вносят большее возмущения. Видна и разница между двумя поляризациями: если падение интенсивности для Н-поляризации с уменьшением периода от основного значения 2π идет медленно, то в случае Е-поляризации оно идет скачками, резко уменьшаясь при достижении периодом значения $\frac{4\pi}{3}$ и затем $\frac{2\pi}{3}$. Близкие к основной волне длинные волны возмущения имеют большее влияние в случае Н-поляризации, чем в случае Е-поляризации.

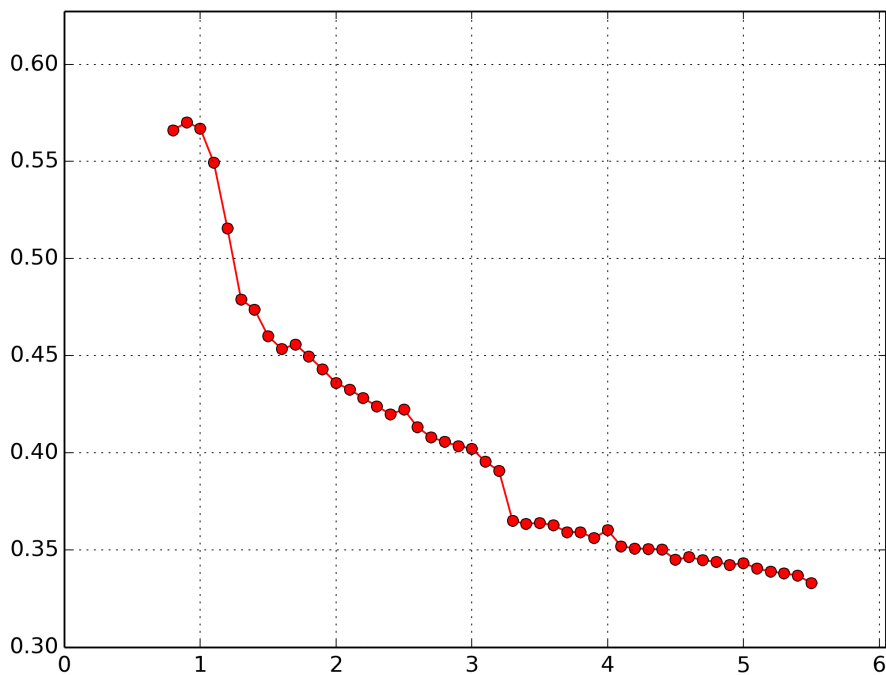


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от периода волны при горизонтальной Н-поляризации. Волна имеет форму $\frac{0.5}{k_1} \sin(k_1 x)$. По горизонтальной оси отложено значение параметра k_1 , по вертикальной - дефект.

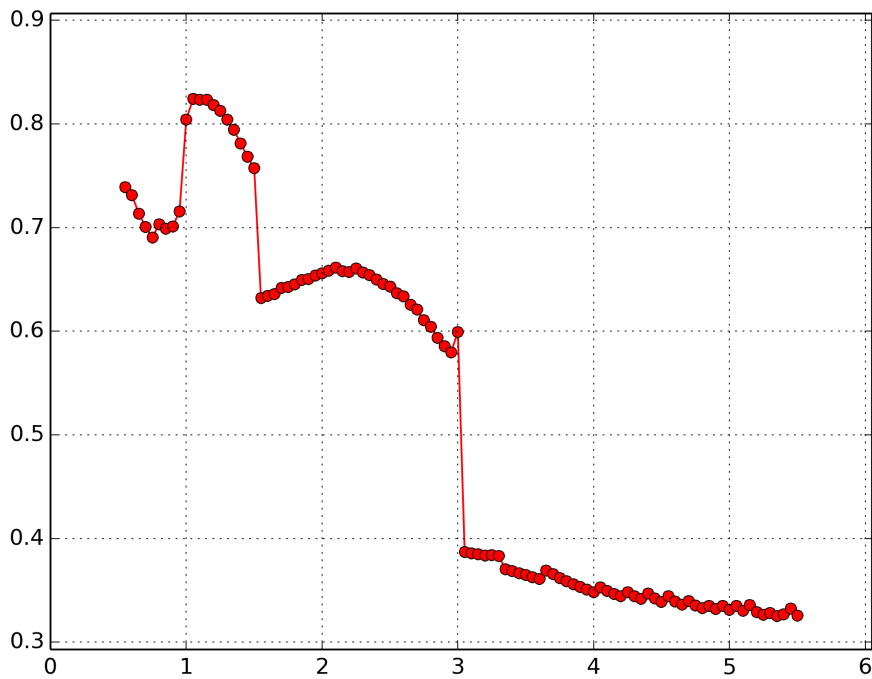


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от периода волны при вертикальной E-поляризации. Волна имеет форму $\frac{0.5}{k_1} \sin(k_1 x)$. По горизонтальной оси отложено значение параметра k_1 , по вертикальной - дефект.

4 Заключение.

Был реализован кластерный суперкомпьютерный вариант организации расчёта по проекционному методу. Эта параллельная реализация использовалась на кластере HybrLIT ЛИТ ОИЯИ, позволяя получать линейное (по количеству используемых вычислительных ресурсов) ускорение счёта, и позволяя существенно снижать время счета при проведении численных экспериментов. С помощью этой вычислительной программы был произведен ряд численных расчетов для нужд радиотомографии поверхности Земли.

Литература

[1]. Нестеров С.В., Шамаев А.С., Шамаев С.И. Методы, алгоритмы и средства аэрокосмической компьютерной томографии приповерхностного слоя Земли. - М.: Научный мир, 1996. - 272 с.

[2]. Ильинский А.С. Метод исследования задач дифракции волн на периодической структуре // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. - 1974. - Т. 14, № 4. - С. 1063-1067.

[3]. Черник В.В. Применение методов декомпозиции и интегральных преобразований для решения задачи прохождения плоской волны через неоднородную среду // Труды 57-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. - М.: МФТИ, 2014. - С. 23-24.