

УДК

А. А. Гавриков, Д. Ю. Князьков, А. В. Романова,  
В. В. Черник, А. С. Шамаев

## Моделирование влияния волнения поверхности на спектр собственного излучения океана

Аннотация. Для нужд радиотомографии поверхности Земли рассматривается задача моделирования излучения морской поверхности. Метод параллельных сечений моделирования дифракции электромагнитного излучения на слое с периодической поверхностью был реализован в виде компьютерной программы на языке программирования python. С помощью этой программы был проведен ряд численных экспериментов. Для расчетов использовался гибридный кластерный вычислитель HugiLIT, находящийся в лаборатории информационных технологий ОИЯИ в г.Дубне.

*Ключевые слова и фразы:* НРС-вычисления, суперкомпьютерные вычисления, радиометрия океана, дифракция, метод параллельных сечений, дифракция на периодическом слое.

### 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.

---

© А. А. Гавриков<sup>(1)</sup> Д. Ю. Князьков<sup>(2)</sup> А. В. Романова<sup>(3)</sup> В. В. Черник<sup>(4)</sup> А. С. Шамаев<sup>(5)</sup> 2015

© ИПМех РАН<sup>(1, 2, 4, 5)</sup> 2015

© МГУ<sup>(3, 5)</sup> 2015

© ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ, 2015

Задача радиотомографии морской поверхности предполагает нахождение формы поверхности, например, коэффициентов в ее Фурье-разложении  $\{a_i\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , по измеренному в заданном направлении набору интенсивностей  $\{\varphi_j\}$ ,  $j = 1, \dots, m$ , ее собственного излучения на разных частотах  $\{\xi_j\}$ ,  $j = 1, \dots, m$ :

$$(1) \quad \{\varphi(\xi_j)\} \rightarrow \{a_i\}.$$

В настоящей работе в основном будут обсуждаться методы и результаты решения прямых задач определения излучения поверхности заданной формы при различных значениях параметров излучения  $P$ :

$$(2) \quad \{a_i\}, \xi_j, P \rightarrow \varphi_j(P).$$

Решение этих задач может быть использовано как для определения возможностей радиотомографии и выработки рекомендаций для нее, так и в качестве одного из шагов при численном решении обратной задачи (1).

Согласно принципу взаимности [2], 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.

## 1. Метод параллельных сечений.

Для моделирования излучения морской поверхности решалась задача расчета дифракции плоской электромагнитной волны на периодическом цилиндрическом слое. В рассматриваемой нами модели система уравнений Максвелла имеет вид (при отсутствии сторонних токов и в случае  $\mu = 1$ , что соответствует отсутствию ферромагнитных свойств вещества)

$$\begin{cases} (3) & \text{rot } \bar{H} = -i\varepsilon \frac{\omega}{c} \bar{E}, \\ (4) & \text{rot } \bar{E} = \frac{\omega}{c} \bar{H}, \\ (5) & \text{div}(\varepsilon \bar{E}) = 0, \\ (6) & \text{div}(\bar{H}) = 0 \end{cases}$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma$  — комплексная проницаемость,  $\sigma_0$  - проводимость,  $\omega$  - частота электромагнитной волны,  $c$  - скорость света,  $\varepsilon_0(\bar{x})$  — комплексная диэлектрическая проницаемость.

Для расчета дифракции волны на периодической поверхности использовался метод параллельных сечений [3]. Он состоит в сведении задачи рассеивания электромагнитной волны на периодическом слое к специальной краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений по переменной, ортогональной к плоскости рассеивающего слоя. При этом краевые условия для указанной системы соответствуют так называемым "парциальным условиям излучения", выражающим в аналитической форме то обстоятельство, что рассеянная волна имеет вид суммы конечного числа плоских волн, каждая из которых переносит энергию от излучающей поверхности. Таким образом, исходная задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений вида

$$(7) \quad \begin{cases} p' = Ab \\ b' = Bp \end{cases}$$

с краевыми условиями

$$(8) \quad p + i\Gamma K b = Kc, \quad \text{при } x = x_{min} = 0,$$

$$(9) \quad p - i\Gamma K b = 0, \quad \text{при } x = x_{max} = 0,$$

где  $A, B$  - матрицы с непрерывными коэффициентами, ось  $Ox$  перпендикулярна образующим цилиндрического периодического слоя и направлена из воздуха внутрь слоя воды.

При этом, так как диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon(x)$  непостоянна (терпит разрыв при переходе через поверхность раздела воды и воздуха), отдельно рассматриваются случаи различной поляризации электромагнитных волн. В случае  $E$ -поляризации векторы  $\bar{E}$  и  $\bar{H}$  имеют вид

$$\bar{E} = (E_x, E_y, 0), \quad \bar{H} = (0, 0, H_z),$$

а в случае  $H$ -поляризации

$$\bar{E} = (0, 0, E_z), \quad \bar{H} = (H_x, H_y, 0).$$

Для решения системы (7) сначала решаются вспомогательные задачи вида

$$(10) \quad \begin{cases} p^{1,j'} = Ab^{1,j} \\ b^{1,j'} = Bp^{1,j} \end{cases}$$

с начальными условиями при  $x = 0$

$$b^{1,j} = \delta_j, p^{1,j} = 0$$

и

$$(11) \quad \begin{cases} p^{2,j'} = Ab^{2,j} \\ b^{2,j'} = Bp^{2,j} \end{cases}$$

с начальными условиями при  $x = 0$

$$b^{2,j} = 0, p^{2,j} = \delta_j.$$

Здесь

$$p^{s,j} = \left( p_{N_2}^{s,j}, p_{N_2-1}^{s,j}, \dots, p_{-N_1}^{s,j} \right)^T, \quad j = -N_1, \dots, N_2,$$

$$b^{s,j} = \left( b_{N_2}^{s,j}, b_{N_2-1}^{s,j}, \dots, b_{-N_1}^{s,j} \right)^T, \quad j = -N_1, \dots, N_2,$$

$$\delta_j = \left( \delta_{N_2,j}, \delta_{N_2-1,j}, \dots, \delta_{-N_1,j} \right)^T, \quad j = -N_1, \dots, N_2,$$

где  $\delta_{i,j} = 1$ , если  $i = j$  и  $\delta_{i,j} = 0$ , если  $i \neq j$ .

Введем равномерную сетку на отрезке  $[0, x_{max}]$  с шагом  $h = \frac{x_{max}}{N}$ :

$$(12) \quad \left\{ 0, \frac{x_{max}}{N}, \dots, (N-1) \frac{x_{max}}{N}, x_{max} \right\}$$

и будем методом прогонки на этой сетке решать системы (10) и (11).

Найдем решение исходной задачи (7), (8), (9) в виде линейной комбинации решений задач (10) и (11) с набором коэффициентов  $\bar{\alpha}$ . Пользуясь первым граничным условием (8) задачи получим, подставляя эту линейную комбинацию во второе краевое условие (9), систему линейных алгебраических уравнений на коэффициенты линейной комбинации  $\bar{\alpha}$ :

$$(13) \quad C\bar{\alpha} = D.$$

Таким образом, основные этапы алгоритма решения исходной задачи дифракции электромагнитной волны на периодическом цилиндрическом слое это:

- решение систем ОДУ (10), (11) методом прогонки на сетке (12) - всего  $2(N_2 + N_1 + 1)$  систем ОДУ;

- решение СЛАУ (13).

Описанный выше подход для Н-поляризации ранее был реализован в компьютерной программе на языке программирования python [4]. В настоящей работе эта программа была доработана для осуществления расчетов дифракции Е-поляризованных волн, было проведено распараллеливание расчётов для использования суперкомпьютера кластерного типа.

## 2. Организация параллельных вычислений.

Для проведения численных расчётов использовался вычислительный кластер HybriLIT, установленный в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ, г. Дубна (<http://hybrilit.jinr.ru/>). На данный момент он 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).

### 2.1. Время счета однопроцессорного варианта программы.

Исследуем зависимость количества времени, требуемого на один расчёт дефекта, от размера расчётной сетки  $N$ . Эта зависимость приведена в Табл. 1. Получается, что для  $N = 400$  время счета на одном вычислительном ядре  $T$  будет составлять около 2.5 минут, что вполне приемлемо при единичных расчётах, но может превращаться в часы или даже десятки часов при массовых расчётах, когда требуется делать много элементарных расчётов для различных сочетаний параметров, принимающих все значения с некоторым шагом из определённых диапазонов изменения. Более того, оказалось, что для достоверного счета необходимо брать период расчёта в 5-10 больший, чем период изменения функции, задающей поверхность. Это требует уже 1-2 часов на проведение единичного численного расчёта на одном вычислительном узле.

Таким образом, требуется реализовать параллельный алгоритм расчёта, пригодный для использования на суперкомпьютерах кластерного типа. Поскольку большинство численных экспериментов пред-

Таблица 1. Зависимость от размера расчётной сетки  $N$  времени счёта одной задачи  $T$  одним вычислительным ядром и среднего времени счёта  $T_{avg}$  при решении 48 задач на 2 вычислительных узлах (48 ядрах) одновременно.

$N$	100	200	300	400	500	600
$T$ , сек	11	43	95	167	260	375
$T_{avg}$ , сек	12	47	105	187	288	415

ставляет собой определение энергетического 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 (7)), а следует организовать параллельное осуществление элементарных расчётов дефекта при фиксированных длине волны, форме поверхности, периоде, угле падения.

## 2.2. Организация расчетов на кластере Hybrid LIT ЛИТ ОИЯИ.

Программа расчёта по проекционному методу была написана на языке python, для распараллеливания расчётов использовался python-модуль `pyrar` (<https://code.google.com/p/pyrar/>). 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 Hybrid LIT. 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.

Морская поверхность задавалась функцией  $f(x)$  следующего вида:

$$(14) \quad f(x) = l \sin(x) + l_1 \frac{1}{k_1} \sin(k_1 x) + l_2 k_2 \sin\left(\frac{x}{k_2}\right)$$

На вход управляющей программе подавался текстовый файл (либо такой файл создавался в самой программе по заданному алгоритму) со строками, задающими параметры отдельного расчёта:

$$e = \{N, M, b, \lambda, \alpha, \varepsilon, l, l_1, k_1, l_2, k_2\},$$

где  $N, M$  - количество расчетных точек по осям  $x$  и  $z$ ,  $b$  - период расчета,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $\alpha$  - угол падения,  $\varepsilon$  - комплексная диэлектрическая проницаемость морской воды,  $k_i \in N$ , амплитудные коэффициенты  $l, l_i \geq 0$ .

Итоговые результаты передавались в управляющий процесс, где они сохранялись в файл со строками следующего вида:

$$\{ 'defect' :< float >, 'passed' :< float >, 'reflected' :< float > \},$$

где в поле 'defect' выводится дефект, а в полях 'passed' и 'reflected' доли прошедшего и отраженного излучения соответственно. (Выбирается такая толщина слоя воды, чтобы доля прошедшего излучения была практически нулевой, например, менее  $10^{-8}$ .) Затем, на локальном компьютере по этому файлу строились графики с использованием python-библиотеки matplotlib (<http://matplotlib.org/>).

### 2.3. Эффективность параллельных вычислений.

При описанной выше схеме счёта, ввиду независимости отдельных расчетов, должно получиться линейное уменьшение времени счёта при увеличении количества используемых вычислительных ядер. В ходе работы с параллельной версией программы на кластере HybridIT было установлено, что эффективность вычислений действительно практически равна 1, хотя немного падает при увеличении количества используемых на узле ядер от 1 до 24, а при одновременном запуске 25 процессов время работы сразу удваивается (по сравнению с одновременным запуском 24 процессов). Среднее время одинарного расчёта практически не изменяется, когда используются более одного вычислительного узла (см. Табл. 1, нижняя строка). Таким образом, следует использовать количество MPI-процессов в точности равное суммарному количеству физических ядер процессоров, установленных на каждом узле (в нашем случае, 24 вычислительных процесса на узел).

Расчет графиков влияния возмущения волнения нерезонансными гармониками на спектр собственного излучения требовал чуть больше часа времени при использовании двух вычислительных узлов кластера, тогда как аналогичный расчёт на персональном компьютере с

использованием однопроцессного варианта организации расчётов занял бы более двух суток.

### **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**

Было установлено, что при угле визирования в 30 градусов (резонансом для заданных периода волнения и длины волны электромагнитного излучения) наблюдается резкий скачок интенсивности излучения, далее 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, было определено, что пригодными углами визирования являются углы от 30 до 60 градусов.

#### **3.2. Возмущение поверхностной волны мелкой рябью и длинной волной.**

Была исследована чувствительность параметров собственного излучения поверхности к вариациям амплитуд гармоник поверхности, причем эти гармоники по длинам волн были как резонансными по отношению к длине волны излучения, так и нерезонансными, длины которых могли быть существенно больше или существенно меньше длины волны электромагнитного излучения. Такое исследование важно для анализа возможностей решения обратной задачи восстановления спектра волнения морской поверхности по результатам измерения ее собственного излучения.

#### **3.3. Зависимость интенсивности излучения морской поверхности от периода волнения.**

Расчеты зависимости излучения морской поверхности от периода волнения показали, что короткие волны возмущения должны иметь



меньшее влияния, чем длинные; волны возмущения с близкими к основной волне периодами вносят большие возмущения. При сравнении случаев различной поляризации электромагнитной волны были обнаружены следующие отличия: в целом селективность при использовании Е-поляризации оказалась выше; если падение интенсивности для Н-поляризации с уменьшением периода от основного значения идет медленно, то в случае Е-поляризации оно идет скачками; близкие к основной волне длинные волны возмущения имеют большее влияние в случае Н-поляризации, чем в случае Е-поляризации.

#### 4. Заключение.

Был реализован кластерный суперкомпьютерный вариант организации расчёта по проекционному методу. Эта параллельная реализация использовалась на кластере HUBRIЛIT ЛИТ ОИЯИ, позволяя получать линейное (по количеству используемых вычислительных ресурсов) ускорение счёта, и позволяя существенно снижать время счета при проведении численных экспериментов.

В настоящей работе был рассмотрен случай, когда излучающая поверхность является цилиндрической по одной координате и периодической по другой, однако предложенный в настоящей работе подход к моделированию излучения поверхности допускает обобщение на случай, когда поверхность является периодической по обоим направлениям, а излучение регистрируется под произвольным к ней углом. Понятно, что такая трехмерная задача будет требовать существенно больших вычислительных ресурсов.

В ближайших планах авторов перенос основного расчетного алгоритма на язык программирования С++ и оптимизация работы написанного на python планировщика запуска заданий с тем, чтобы для расчетов разной сложности осуществлялось прогнозирование времени их работы и планирование соответствующего эффективного потока выполнения.

У авторского коллектива есть положительный опыт переноса расчетных алгоритмов дифракции на архитектуру CUDA, когда было получено почти 5-ти кратное ускорение по сравнению с CPU [5] (сравнивался случай задействования всех ядер процессора Intel Xeon 5570 и всех ядер карты Tesla C1060 на двойной точности). Планируется осуществить адаптацию описанных в настоящей работе численных алгоритмов к архитектуре карт Tesla и сопроцессоров Xeon Phi

и написать соответствующие программы. Параллельная эффективность отдельного расчета, включающего в себя решение систем ОДУ и СЛАУ, на SIMD архитектуре не столь очевидна, хотя есть основания предполагать, что одновременное решение независимых вспомогательных задач (10) и (11) на разных ядрах должно дать хорошее ускорение счета. В любом случае, от использования карт CUDA и ускорителей Xeon Phi ожидается прирост производительности из-за возможности одновременного проведения независимых отдельных расчетов при увеличении общей вычислительной мощности. Такая адаптация представляется целесообразной, поскольку большинство современных суперкомпьютеров (в том числе, доступные авторам для счета вычислители МСЦ РАН и ЛИТ ОИЯИ) имеют сейчас гибридную архитектуру.

Авторы выражают глубокую признательность руководству и сотрудникам ЛИТ ОИЯИ, любезно предоставившим возможность и техническую поддержку расчетов на кластере HybriLIT.

### Список литературы

- [1] С.В. Нестеров, А.С. Шамаев, С.И. Шамаев. Методы, алгоритмы и средства аэрокосмической компьютерной томографии приповерхностного слоя Земли. М.: Научный мир, 1996. — 272 с. ↑ 1.
- [2] М.Л. Левин, С.М. Рытов. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967. — 310 с. ↑ 2.
- [3] 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.
- [4] В.В. Черник. *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. ↑ 5.
- [5] D. Knyazkov. *Simulation of Holography Using Multiprocessor Systems* // MMCP2011. LNCS. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. Vol. 7125, p. 270-275. ↑ 9.

*Об авторах:*

**А.А. Гавриков**

ИПМех РАН

*e-mail:*

**Д.Ю. Князьков**

ИПМех РАН

*e-mail:*

[knyaz@ipmnet.ru](mailto:knyaz@ipmnet.ru)

**А.В. Романова**

МГУ

*e-mail:*

[avromm1@gmail.com](mailto:avromm1@gmail.com)

**В.В. Черник**

ИПМех РАН

*e-mail:*

[gungho424@gmail.com](mailto:gungho424@gmail.com)

**А.С. Шамаев**

МГУ

*e-mail:*

[sham@rambler.ru](mailto:sham@rambler.ru)

*Пример ссылки на эту публикацию:*

А. А. Гавриков, Д. Ю. Князьков, А. В. Романова, В. В. Черник, А. С. Шамаев. «Моделирование влияния волнения поверхности на спектр собственного излучения океана», *Программные системы: теория и приложения*, 2015, ??:?, с. ??-??.

URL

<http://psta.psiras.ru/read/>

, . . .

ABSTRACT. (*in Russian*).

*Key Words and Phrases:* HPC-computations, ocean radiometry, diffraction, parallel sections method.

*Sample citation of this publication*

, “”, *Program systems: theory and applications*, 2015, ??:?, pp. ??-??. (*In Russian*.) URL <http://psta.psiras.ru/read/>