Д. Ю. Князьков

Обратная задача дифракции электромагнитной волны на плоском слое

Аннотация. В работе рассматривается обратная задача синтеза функции пропускания плоского дифракционного слоя по формируемому им при освещении электромагнитной волной изображению. Для решения задачи применялся градиентный метод, что позволило достичь необходимого качества изображения в плоскости регистрации. Параллельный алгоритм метода градиентного спуска реализован в программе, предназначенной для использования на суперкомпьютере кластерного типа. Достигнуто практически линейное ускорение на используемых вычислительных системах.

Ключевые слова и фразы: дифракция, обратные задачи, градиентные методы оптимизации, высокопроизводительные вычисления.

1. Введение

Рассмотрим дифракцию электромагнитной волны на плоском слое. Слой имеет пренебрежимо малую толщину и полностью описывается своей функцией пропускания. Требуется подобрать такую функцию пропускания, чтобы создаваемое в плоскости регистрации изображение обладало заданными свойствами. Соответствующая оптическая схема показана на рис. 1. Такая задача возникает во многих практических приложениях, например, в задаче создания голографических изображений [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60096 мол-а-дк.

© Д. Ю. Князьков, 2018

© Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2018

© ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ (дизайн), 2018

10.25209/2079-3316-2018-9-1-21-36

Рис. 1. Схема падения волны на плоский слой

Сформулированная выше обратная задача требует больших вычислительных мощностей, так как даже прямая задача моделирования освещения дифракционной пластины электромагнитной волной сводится к расчету, требующему порядка $O(N^4)$ операций, где N — характерное количество точек в вычислительной сетке на пластине или на изображении [2]. Специально разработанный алгоритм большого пикселя, позволяющий снизить количество требуемых операций до $CN^2 \log N$ с достаточно маленькой константой C , был предложен в [3]. Этот алгоритм был реализован в виде высокопроизводительной суперкомпьютерной программы. Он основан на использовании аналитического решения задачи дифракции на квадратном отверстии и быстрого преобразования Фурье. Эффективность последнего при дополнительных, накладываемых алгоритмом метода требованиях была исследована на кластерах HybriLIT и MBC-100K в [4].

Задача оптимизации качества изображения в рассматриваемой оптической схеме методом локальных вариаций ранее решалась в [5]. Было показано, что возможно существенное улучшение качества изображения. Основным недостатком этого метода были высокие требования к вычислительным ресурсам: на каждый шаг процесса оптимизации требовалось время, равное времени двух полных восстановлений изображения с дифракционной пластинки. В настоящей статье предлагается использовать градиентный метод, что должно

снизить количество требуемых операций. Преимущество здесь может быть не только в использовании большего шага в ходе итерации, но и в возможности использовать упомянутый выше метод большого пикселя в процессе вычисления градиента.

Описанный выше подход к моделированию распространения излучения предполагает использование скалярной модели дифракции Кирхгофа в дальней зоне. Более тонкий анализ прохождения электромагнитной волны через дифракционную пластину ненулевой толщины может быть выполнен с помощью метода, предложенного в [6] для цилиндрического слоя и Н-поляризованной [7] или Е-поляризованной [8] волны. Этот метод также может быть использован в существенно трёхмерной постановке для моделирования дифракции плоской электромагнитной волны на периодическом в двух направлениях неоднородном слое ненулевой толщины.

2. Постановка задачи

Пусть электромагнитная волна $W(x, y)$ падает с положительного направления оси Oz на слой, лежащий в области Ω_L в плоскости Oxy . Считается, что слой имеет пренебрежимо малую толщину, а его пропускание задается функцией

$$T(x, y) : \Omega_L \rightarrow [0, 1],$$

где области $\{(x, y) | T(x, y) = 1\}$ полностью прозрачны для излучения, а через области $\{(x, y) | T(x, y) = 0\}$ свет не проходит. В результате дифракции электромагнитной волны на этом слое, в плоскости $O\xi\eta$, находящейся на расстоянии d от Oxy , формируется изображение с интенсивностью, задаваемой функцией $I_T(\xi, \eta)$.

В скалярном приближении интенсивность изображения, формируемого при засветки слоя T волной W , может быть в дальней зоне дифракции рассчитана с использованием интеграла Кирхгофа [9]:

$$I_T(\xi, \eta) = \left| \iint_{\Omega_L} K(x, y, \xi, \eta) W(x, y) T(x, y) dx dy \right|^2.$$

Требуется найти такую функцию пропускания слоя, чтобы в области Ω_I создать изображение

$$q_0(\xi, \eta) : \Omega_I \rightarrow \{0, 1\}.$$

Желаемое изображение — это набор геометрических объектов с около-волновыми и субволновыми размерами. Таким образом, необходимо найти такую функцию $T(x, y)$, что

$$(1) \quad \left| \iint_{\Omega_L} K(x, y, \xi, \eta) W(x, y) T(x, y) dx dy \right|^2 = q_0(\xi, \eta).$$

Функция $q_0(\xi, \eta)$ кусочно-постоянная (принимает только значения 0 и 1), поэтому точного решения задачи (1) не существует. Будем искать ее квазирешение [10] из условия

$$(2) \quad \rho(q_0(\xi, \eta), I_T(\xi, \eta)) \xrightarrow{T} \min.$$

В качестве меры отличия получающегося изображения $I(\xi, \eta)$ от заданного $q_0(\xi, \eta)$ выбрана нормализованная средняя абсолютная ошибка

$$(3) \quad \rho(q_0(\cdot, \cdot), I(\cdot, \cdot)) = \iint_{\Omega_I} \left| q_0(\xi, \eta) - \frac{I(\xi, \eta)}{\max_{\Omega_I} I(\xi, \eta)} \right| d\xi d\eta,$$

Нормализацию функций отличия изображений целесообразно применять в случае, когда умножение на вещественную константу не должно менять значение отличия [11], например, такой выбор меры ошибки используется в приложениях, связанных с моделированием восприятия изображения глазом человека, в задачах сжатия таких, предназначенных для человека, компьютерных изображений [12, 13], в задачах литографии при моделировании процесса засветки фоторезиста. В первом случае отличия в интенсивности будут нивелированы в ходе дальнейшей обработки изображения зрительной системой, во втором — продолжительностью экспонирования светочувствительного материала.

3. Оптимизация качества изображения градиентным методом

Пусть область, занятая слоем Ω_L — квадрат, и этот квадрат разбит на N^2 одинаковых ячеек $\square_i$, $i = 1, \dots, N^2$. Решение (2) будем искать на множестве G_1 кусочно постоянных на этих ячейках функций: $G_1 = \{T(x, y) \mid T(x, y) = \text{const} = t_i, (x, y) \in \square_i\}$. Интенсивность излучения в плоскости изображения в точке (ξ, η) , создаваемая слоем $T(x, y) \in G_1$ при освещении ее волной W равна

$$\begin{aligned} \left| \iint_{\Omega_L} K(x, y, \xi, \eta) W(x, y) T(x, y) dx dy \right|^2 &= \\ &= \left| \sum_{i=1}^{N^2} t_i \iint_{\square_i} K(\xi - x, \eta - y) W(x, y) dx dy \right|^2 = \\ &= \left| \sum_{i=1}^{N^2} t_i F_i(\xi, \eta) \right|^2, \quad i = 1, \dots, N^2. \end{aligned}$$

Интегралы

$$F_i(x, y) = \iint_{\square_i} K(\xi - x, \eta - y) W(x, y) dx dy$$

при $\frac{k_0 \gamma^2}{d} \ll 1$, где γ - размер ячейки, а k_0 - модуль волнового вектора, могут быть вычислены аналитически в приближении дальней зоны [14]. В качестве области Ω_I возьмем квадрат, который разобьем на равномерную сетку с M^2 узлами (ξ_l, η_m) , $l, m = 1, \dots, M$.

Тогда для нормы (3) целевая функция

$$(4) \quad J(T) = \sum_{l,m=1}^M \left| q_0(\xi_l, \eta_m) - \frac{\left| \sum_{i=1}^{N^2} t_i F_i(\xi_l, \eta_m) \right|^2}{\max_{n,p} \left| \sum_{i=1}^{N^2} t_i F_i(\xi_n, \eta_p) \right|^2} \right|,$$

где $T = \{t_1, \dots, t_{N^2}\}$ - коэффициенты пропускания соответствующих ячеек на слое:

$$(5) \quad 0 \leq t_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N^2.$$

Будем решать задачу оптимизации в $\mathbb{R}^{N^2}$

$$(6) \quad J(t_1, \dots, t_{N^2}) \xrightarrow{\{t_1, \dots, t_{N^2}\}} \min$$

для целевой функции (4) при ограничениях (5). Вообще говоря, эта задача не эквивалентна исходной, но её можно рассматривать как регуляризацию (2) на основе дополнительной информации о поведении функции $T(x, y)$, например, о плавности ее изменения, продиктованной особенностями физической реализации дифракционного слоя и необходимостью не выйти за рамки рассматриваемой скалярной модели распространения излучения. Поскольку задача (6), (5) ставится на компакте в $\mathbb{R}^{N^2}$, ее решение будет существовать, и оно будет решением задачи (2) на множестве функций G_1 .

Будем искать решение задачи (6), (5) с помощью метода градиентного спуска. На $(k + 1)$ -ой итерации этого метода

- происходит движение по антиградиенту целевой функции с постоянным шагом α :

$$(7) \quad T_{k+1} = T_k - \alpha \left\{ \frac{\partial J(T_k)}{\partial t_1}, \dots, \frac{\partial J(T_k)}{\partial t_{N^2}} \right\};$$

- вычисляется значение целевой функции в новой точке T_{k+1} :

$$(8) \quad J(T_{k+1}) = J(t_1^{k+1}, t_2^{k+1}, \dots, t_{N^2}^{k+1}).$$

Итерационный процесс завершается, если достигнута требуемая точность поиска δ :

$$(9) \quad |J(T_{k+1}) - J(T_k)| < \delta,$$

либо если сделано максимально допустимое количество шагов k_{max} :

$$k + 1 = k_{max}.$$

В качестве решения T_{opt} берется последняя рассчитанная функция пропускания слоя:

$$T_{opt} = T_{k+1}.$$

В качестве начального приближения будем использовать функцию

$$T_0(x, y) = \left| \iint_{\Omega_I} K_1(\xi, \eta, x, y) q_0(\xi, \eta) R(\xi, \eta) d\xi d\eta + \overline{W}(x, y) \right|^2,$$

представляющую собой функцию прозрачности амплитудной голограммы Габора [15], то есть результат интерференции подсвеченного волной $R(\xi, \eta)$ заданного изображения $q_0(\xi, \eta)$ и волны $\overline{W}(x, y)$, сопряженной к исходной волне $W(x, y)$. В результате освещения слоя с такой функцией пропускания $T_0(x, y)$, в плоскости изображения $O\xi\eta$ будет сформировано изображение, достаточно близкое к требуемому $q_0(\xi, \eta)$ [16].

3.1. Параллельная реализация алгоритма

Для численного вычисления компоненты $\frac{\partial J(T_k)}{\partial t_j}$ градиента используется формула

$$(10) \quad \frac{J(t_1^k, \dots, t_{j-1}^k, t_j^k + h, t_{j+1}^k, \dots, t_{N^2}^k) - J(t_1^k, \dots, t_{j-1}^k, t_j^k, t_{j+1}^k, \dots, t_{N^2}^k)}{h}.$$

Обозначим комплексные значения поля в точках (ξ_l, η_m) изображения

$$(11) \quad E_k(l, m) = \sum_{i=1}^{N^2} t_i^k F_i(\xi_l, \eta_m), \quad l, m = 1, \dots, M.$$

Тогда значение целевой функции $J(T_k)$ рассчитывается следующим образом:

$$(12) \quad J(T_k) = \sum_{l,m=1}^M \left| q_0(\xi_l, \eta_m) - \frac{|E_k(l, m)|^2}{\max_{n,s} |E_k(n, s)|^2} \right|.$$

Таким образом, для расчета производной (10) необходимо еще знать

$$(13) \quad E_k^j(l, m) = \sum_{i=1}^{N^2} t_i^k F_i(\xi_l, \eta_m) + h F_j(\xi_l, \eta_m), \quad l, m = 1, \dots, M.$$

Таблица 1. Затраты при параллельном вычислении поля

количество ядер кластера МВС-100К	16	32
время одной итерации в секундах	801	1004
время расчета $J(T)$ в секундах	97	46

Комплексное изображение (11) хранится в течение расчета всех $\frac{\partial J(T_k)}{\partial t_j}$, $j = 1, \dots, N^2$, а после определения градиента и следующего приближения T_{k+1} в соответствии с (7), новое комплексное изображение $E_{k+1}(l, m)$ рассчитывается и используется как для расчета текущего значения целевой функции (8), так и на $(k + 1)$ -ой итерации для расчета $\frac{\partial J(T_{k+1})}{\partial t_j}$, $j = 1, \dots, N^2$.

Формулы (11) и (13) отличаются только слагаемым $F_j(\xi_l, \eta_m)$. Пусть для расчета используется N_p расчетных ядер. При подсчете частных производных (10) можно параллельно рассчитывать свой набор $\frac{M^2}{N_p}$ значений интеграла $F_j(\xi_l, \eta_m)$ на каждом из вычислительных ядер. Такой способ распараллеливания был реализован ранее для расчета результата дифракции на плоском слое [2, 17] и показал близкую к 1 параллельную эффективность. Более того, такой метод использовался в настоящей работе для подсчета (8) по формулам (11), (12). Однако такой подход оказался неэффективным при расчете градиента.

В таблице 1 показан пример изменения полного времени одной итерации и времени расчета значения целевой функции (8) при удвоении количества используемых вычислительных ядер. (Расчет целевой функции (8) по известным комплексным значениям поля в плоскости изображения требует лишь $O(N^2)$ операций, поэтому время расчета (8) практически не отличается от времени расчета комплексного поля (11).)

Видно, что время расчета целевой функции падает примерно в два раза, в то время как время расчета градиента существенно превышает время расчета целевой функции, и оно не только не уменьшается, но даже растет с увеличением количества ядер. Это связано с тем, что расчет $F_j(\xi_l, \eta_m)$ соответствует расчету дифракционного интеграла не по всей площади слоя, а только по j -ой ячейке, из-за чего увеличивается

ТАБЛИЦА 2. Затраты в секундах при параллельном вычислении градиента

кластер	HybriLIT			MBC-100K		
количество ядер	6	12	24	16	24	32
время одной итерации	412	209	102	182	119	93
время расчета $J(T)$	176	94	46	92	58	47

доля накладных расходов на межпроцессорный обмен, что ведет к такому резкому падению эффективности параллельных расчетов при увеличении N_p .

Поэтому для расчета градиента был реализован следующий алгоритм параллельного расчета. Расчет $F_j(\xi_l, \eta_m)$, $l, m = 1, \dots, M^2$ осуществляется целиком на одном вычислительном ядре, при этом расчет всех компонент градиента ведется параллельно. Каждый n -ый процесс, $n = 1, \dots, N_p$ рассчитывает компоненты градиента с $j_n^1 = \frac{N^2}{N_p}(n-1)$ по $j_n^2 = \frac{N^2}{N_p}n$, для чего осуществляется расчет соответствующих $F_j(\xi_l, \eta_m)$, $j = j_n^1, \dots, j_n^2$.

Таким образом, за время расчета градиента рассчитывается N^2 интегралов $F_j(\xi_l, \eta_m)$, значит сложность такого расчета эквивалентна расчету комплексного изображения (11). Поэтому вычислительная сложность одной итерации оптимизационного процесса должна быть в два раза больше времени расчета комплексного изображения (11).

Такой способ параллельной организации вычислений был реализован в программе на языке программирования C++. Расчеты с помощью этой программы выполнялись на кластерах HybriLIT ЛИТ ОИЯИ и MBC-100K МСЦ РАН. Полное время выполнения одной итерации и время расчёта значения целевой функции $J(T)$ показаны в таблице 2. Видно, что теперь эффективность работы программы близка к 1 (ускорение почти линейно), а время одной итерации оптимизации действительно соответствует времени двух полных расчетов результата дифракции электромагнитного поля на всем слое.

Рис. 2. Уменьшение значения целевой функции на в ходе итераций градиентного метода

3.1.1. Пример оптимизации градиентным методом

Пример хода оптимизации градиентным методом показан на рис. 2. Здесь размеры расчетных сеток $N = 638$, $M = 120$, то есть дифракционный слой состоял примерно из 407 тысяч элементов, а изображение — примерно из 14 тысяч расчетных элементов. Всего было сделано 30 шагов итерационного процесса. При этом норма отлгчия изображения от заданного уменьшилась с 73.4 до 70.0. Параметр условия остановки (9) алгоритма $\delta = 0.06$, а значение нормы на последних итерациях было равно $J(T_{29}) = 70.0972$, $J(T_{30}) = 70.0391$, то есть различие составило $|J(T_{30}) - J(T_{29})| = 0,0581$. Весь процесс оптимизации занял 29 минут на 32 вычислительных ядрах суперкомпьютера МВС-100К.

Таким образом, градиентный метод оптимизации позволяет достичь улучшения качества изображения подобного улучшению, полученному ранее с помощью метода локальных вариаций [5]. При этом качество изображения существенно улучшается: например, примерно с 15 до 5 процентов уменьшается всплеск интенсивности на границе ярких и тёмных областей изображения. Этот всплеск интенсивности объясняется эффектом Гиббса — неравномерностью сходимости частичных сумм ряда Фурье функции вблизи ее точки разрыва первого

рода. В нашем случае подобный эффект проявляется, так как мы пытаемся сформировать оптическое изображение, яркость которого задается разрывной функцией $q_0(\xi, \eta)$.

3.2. Аналитическое вычисление градиента

Нет никаких оснований считать, что получаемая в ходе описанного выше оптимизационного процесса функция пропускания слоя T_{opt} является точкой минимума функции (4) либо решением (квазирешением) исходной задачи (1). Так, например, применение к результату градиентной оптимизации T_{opt} метода локальных вариаций [5] либо наоборот (к результату метода локальных вариаций — метода градиентного спуска) позволяет несколько уменьшить значение функционала отличия (3).

Целевая функция (4) имеет достаточно сложную структуру. Она не принадлежит, например, к классу квадратичных выпуклых функций, для которых применение градиентных методов оптимизации позволяет достаточно эффективно решать задачу поиска глобального минимума. Однако, метод градиентного спуска позволяет получить требуемое качество результирующего изображения с одной стороны и обладает, как было показано, высокой параллельной эффективностью на кластерных вычислительных системах, что позволяет использовать его для оптимизации изображений, получаемых с дифракционных пластин, если только сложность изображения не слишком велика.

Если же требуемое изображение состоит из большого количества элементов ($M, N = 10^4$ и более), то описанный подход будет не применим из-за высокой (порядка $O(N^4)$) сложности расчета компонент градиента по формуле (13). В этом случае, например, для нормы $\rho = L_2$, вариация соответствующего функционала

$$J_2(T) = \iint_{\Omega_I} \left| q_0 - \left| \iint_{\Omega_L} K(x, y, \xi, \eta) W(x, y) T(x, y) dx dy \right|^2 \right|^2 d\xi d\eta$$

может быть получена аналитически:

$$(14) \quad \delta J_2(T) = 4Re(V(x, y), \overline{\delta T(x, y)})_{(x, y)},$$

где

$$V(x, y) = \iint_{\Omega_I} K_1(x - \xi, y - \eta) [|K * T|^2 \cdot K * T - K * T \cdot q_0^2] (\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

здесь $K * g$ обозначает свертку

$$(15) \quad \iint_{\Omega_L} K(\xi - x, \eta - y) g(x, y) dx dy.$$

То есть расчет (14) может быть сведен к расчету четырех сверток типа (15). Такой расчет может быть выполнен уже с использованием $CN^2 \log(N)$ операций [3, 4], что делает возможной оптимизацию изображений, состоящих из большого количества элементов на современных суперкомпьютерах кластерного типа.

4. Заключение

Была рассмотрена обратная задача синтеза функции пропускания плоского дифракционного слоя по формируемому им при освещении электромагнитной волной изображению. Для решения задачи применялся градиентный метод. На языке программирования C++ была реализована параллельная версия алгоритма этого метода, были исследованы результаты ее работы и ее эффективность. Хотя метод градиентного спуска не позволяет найти глобальный экстремум в решаемой задаче, с его помощью удастся добиться требуемого улучшения качества изображения, а параллельная эффективность соответствующей программы близка к единице. Таким образом, качество результата и эффективность оптимизации оказалась близка к результатам оптимизации методом локальных вариаций, реализованному ранее.

Описан подход численно-аналитического расчета градиента, позволяющий, с использованием специального метода расчета результата дифракции волны в дальней зоне, реализовать метод градиентного спуска для слоя состоящего из 10^8 и более элементов пропускания.

Представляет интерес реализация описанного выше метода градиентной оптимизации для изображений сложной структуры, а также применение использованного в настоящей работе подхода к решению

обратной задачи дифракции электромагнитной волны на неоднородном слое ненулевой, конечной толщины.

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН): часть расчетов проводилась на высокопроизводительной системе MBC-100K.

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

Список литературы

- [1] M. V. Borisov, V. A. Borovikov, A. A. Gavrikov, D. Yu. Knyaz'kov, V. I. Rakhovskii, D. A. Chelyubeev, A. S. Shamaev. "Methods of the development and correction of the quality of holographic images of geometry objects with subwave-size elements", *Doklady Physics*, **55:9** (2010), pp. 436–440,

- [10] А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. *Методы решения некорректных задач*, Наука, М., 1985, 288 с., [↑](#)₂₄
- [11] J. R. Fienup. “Invariant error metrics for image reconstruction”, *Appl. Opt.*, **36** (1997), pp. 8352–8357, [↑](#)₂₄
- [12] A. M. Eskicioglu, P. S. Fisher. “Image quality measures and their performance”, *IEEE Transactions on Communications*, **43**:12 (1996), pp. 2959–2965, [↑](#)₂₄
- [13] A. M. Eskicioglu, P. S. Fisher. “A survey of quality measures for gray scale image compression”, *Computing in Aerospace 9*, AIAA, 1993, pp. 304–313 [↑](#)₂₄
- [14] Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. *Рассеяние волн на статистически неровной поверхности*, Наука, М., 1972, [↑](#)₂₅
- [15] D. Gabor. “A new microscopic principle”, *Nature*, **161** (1948), pp. 777–778, [↑](#)₂₇
- [16] J. R. Fienup. *Improved synthesis and computational methods for computer generated holograms*, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1975, 199 p. [↑](#)₂₇
- [17] Д. Ю. Князьков. «Эффективные методы расчета электромагнитных полей», *Вычислительные методы и программирование*, **13**:1 (2012), с. 263–270, [↑](#)₂₈

Рекомендовал к публикации

Программный комитет

Шестого национального суперкомпьютерного форума *НСКФ-2017*

Пример ссылки на эту публикацию:

Д. Ю. Князьков. «Обратная задача дифракции электромагнитной волны на плоском слое». *Программные системы: теория и приложения*, 2018, **9**:1(36), с. 21–36. [10.25209/2079-3316-2018-9-1-21-36](#)

http://psta.psiras.ru//read/psta2018_1_21-36.pdf

Об авторе:

Дмитрий Юрьевич Князьков

К.ф.-м.н., н.с. ИПМех РАН. Область научных интересов: прямые и обратные задачи дифракции, математическая теория усреднений, суперкомпьютерные вычисления, алгоритмы быстрой свертки и БПФ, радиометрия океана, сейши, голография, тепломассообмен. Автор более 40 научных публикаций и 4 патентов.

0000-0002-2622-8746

e-mail: knyaz@ipmnet.ru

UDC 519.658.4, 519.712.45, 519.688

Dmitri Knyazkov. *Inverse problem of diffraction of electromagnetic wave on a plane layer.*

ABSTRACT. In the current paper, an inverse problem of synthesis of a diffraction plane layer transparency function is considered. An image with the desired quality should be constructed in a registration plane as a result of illuminating the diffraction layer with the electromagnetic wave. The gradient method of computation is used to solve the problem. It allows to reach the desired image quality in the observation plane. The parallel algorithm is implemented for a cluster supercomputer. The program shows linear speedup for the the used computational systems. The computations are performed at the MVS-100K JSCC RAS and HybriLIT LIT JINR computational clusters. (*In Russian*).

Key words and phrases: diffraction, inverse problem, gradient optimization, high performance computations.

References

- [1] M. V. Borisov, V. A. Borovikov, A. A. Gavrikov, D. Yu. Knyaz'kov, V. I. Rakhovskii, D. A. Chelyubeev, A. S. Shamaev. "Methods of the development and correction of the quality of holographic images of geometry objects with subwave-size elements", *Doklady Physics*, **55**:9 (2010), pp. 436–440,
- [2] D. Knyazkov. "Simulation of holography using multiprocessor systems", *Mathematical Modeling and Computational Science*, Lecture Notes in Computer Science, vol. **7125**, Springer, Berlin–Heidelberg, 2012, pp. 270–275,
- [3] D. Knyazkov, A. Shamaev. "An effective method of electromagnetic field calculation", Lecture Notes in Computer Science, vol. **8236**, Springer, Berlin–Heidelberg, 2013, pp. 487–494,
- [4] D. Yu. Knyaz'kov. "Effective computation of two-dimensional FFT on a homogeneous or heterogeneous cluster", *Program Systems: Theory and Applications*, **8**:1 (2017), pp. 47–62 (in Russian),
- [5] D. Yu. Knyaz'kov. "Optimization of electromagnetic fields in holographic lithography using the method of local variations", *Journal of Computer and Systems Sciences International*, **50**:6 (2011), pp. 953–963,
- [6] A. S. Ilinskiy. "A method of investigating wave diffraction problems on a periodic structure", *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **14**:4 (1974), pp. 242–246,
- [7] D. Knyazkov. "Simulation of diffraction on a layer using the method of projections", AIP Conference Proceedings, vol. **1863**, AIP Publishing, 2017, pp. 3700061–3700064

© D. KNYAZKOV, 2018

© A. ISHLINSKY INSTITUTE FOR PROBLEMS IN MECHANICS RAS, 2018

© PROGRAM SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS (DESIGN), 2018

10.25209/2079-3316-2018-9-1-21-36

- [8] D. U. Knyazkov. “Simulating diffraction of plane wave on periodic layer with the use of the method of projections”, *2017 Days on Diffraction (DD)* (Saint-Petersburg, Russia), IEEE, 2017, pp. 180–185,
- [9] Born M., Wolf E.. *Principles of optics*, Pergamon press, New York, 1968,
- [10] A. N. Tikhonov, V. Y. Arsenin. *Solution of Ill-posed Problems*, Winston & Sons, Washington, 1977,
- [11] J. R. Fienup. “Invariant error metrics for image reconstruction”, *Appl. Opt.*, **36** (1997), pp. 8352–8357,
- [12] A. M. Eskicioglu, P. S. Fisher. “Image quality measures and their performance”, *IEEE Transactions on Communications*, **43**:12 (1996), pp. 2959–2965,
- [13] A. M. Eskicioglu, P. S. Fisher. “A survey of quality measures for gray scale image compression”, *Computing in Aerospace 9*, AIAA, 1993, pp. 304–313
- [14] F. G. Bass, I. M. Fuchs. *Wave scattering from statistically rough surfaces*, Pergamon Press, Oxford, 1978,
- [15] D. Gabor. “A new microscopic principle”, *Nature*, **161** (1948), pp. 777–778,
- [16] J. R. Fienup. *Improved synthesis and computational methods for computer generated holograms*, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1975, 199 p.
- [17] D. Yu. Knyaz'kov. “Efficient numerical methods for the analysis of electromagnetic fields”, *Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye*, **13**:1 (2012), pp. 263–270 (in Russian),

Sample citation of this publication:

Dmitri Knyazkov. “Inverse problem of diffraction of electromagnetic wave on a plane layer”. *Program Systems: Theory and Applications*, 2018, **9**:1(36), pp. 21–36. (In Russian). 10.25209/2079-3316-2018-9-1-21-36

http://psta.psir.ru//read/psta2018_1_21-36.pdf