

Построение программных систем моделирования дифракции на идеально проводящих экранах, лежащих в диэлектрическом полупространстве

В. О. Мищенко

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

It makes sense to base computer modeling of diffraction of electromagnetic waves on three-dimensional plane-parallel structures on general approach which belong to Yu.V. Gandel. In the article this approach has been developed in the direction of modeling of diffraction on thin metal structures that were built into a few layers in a dielectric. Requirements of a program system of modeling have been formulated and analyzed. The method for construction of the program system has been created.

1. Постановка задачи на основе обзора проблемы

Точное решение задачи математической теории дифракции для случая, когда электромагнитная волна падает на плоский идеально проводящий экран, лежащий в плоскости раздела диэлектрических сред, можно свести [1] к решению системы псевдодифференциальных уравнений в свёртках вида

$$\begin{aligned} G_{1,1} * u_1 + G_{1,2} * u_2 &= -f_1(x'), \\ G_{2,1} * u_1 + G_{2,2} * u_2 &= -f_2(x') \quad (x' \in \sigma \subset R^2), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $u_i(x')$ - искомые функции, определяющие рассеянное поле; $f_i(x')$ - это предельные значения на экране i -х компонент электрической составляющей падающей плоской волны (с учётом её частичного прохождения и отражения от границы сред); экран в плоскости $x_3 = 0$ представлен областью σ ;

$$G_{i,j} * u = \int_{\sigma} G_{i,j}(x' - y') \cdot u(y') dy' \quad (1.2)$$

(оператор свёртки), причём ядра $G_{i,j}(x')$ являются согласно [1] обобщенными преобразованиями Фурье функций

$$\begin{aligned} g_{i,i} &= \lambda_i^2 \frac{(\gamma_+^{-1}, \gamma_-^{-1})_{\mu}}{D} - \frac{(k_+^2 \gamma_-^{-1}, k_-^2 \gamma_+^{-1})_{\mu}}{D} \quad (i = 1, 2), \\ g_{i,j} &= \lambda_i \lambda_j \frac{(\gamma_+^{-1}, \gamma_-^{-1})_{\mu}}{D} \quad (i \neq j), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где

$$k_{\pm} = \sqrt{\varepsilon_{\pm} \varepsilon_0 \mu_{\pm} \mu_0} \quad (1.4)$$

$$\gamma_{\pm} = \gamma_{\pm}(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - k_{\pm}^2}, \quad \gamma_{\pm}^{-1} = 1/\gamma_{\pm} \quad (\sqrt{1} = 1, \sqrt{-i} = ((-1+i)/\sqrt{2})) \quad (1.5)$$

$$(a, b)_\mu = \frac{\mu_-}{\mu_- + \mu_+} \cdot a + \frac{\mu_+}{\mu_- + \mu_+} \cdot b = \alpha \cdot a + (1 - \alpha) \cdot b, \quad (1.6)$$

$$D = \begin{pmatrix} -q^2 - \alpha(1 - \alpha) \cdot (\lambda^2(k_+^2 + k_-^2) - 2k_+^2 k_-^2) \cdot \gamma_+^{-1} \gamma_-^{-1} \\ q^2 = -(k_+^2, k_-^2)_\mu \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

Принципиальных проблем с существованием и единственностью решения системы (1.1) нет, поскольку в [1] методом параметрических представлений гиперсингулярных интегральных и псевдодифференциальных операторов (ППГИПО) [2] показано, что она является следствием корректной краевой задачи для уравнения Гельмгольца, и единственное решение этой краевой задачи можно восстановить по решению (1.1).

В основу компьютерного моделирования рассматриваемого процесса дифракции можно положить выполненную в [1] на основе подхода МДО дискретизацию системы (1.1) и численное решение соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Актуальность построения программной системы, которая бы реализовала такое моделирование, объясняется новизной задачи, большей адекватностью приложениям (в сравнении с рассмотрением рассеивающих экранов в однородной среде) и, главное, тем, что несомненный интерес представляют обобщения, в которых может рассматриваться большее число идеально-проводящих экранов и диэлектрических слоёв. Такие структуры могут выступать как модели элементов современных и перспективных технических устройств, принимающих электромагнитные волны или управляющих их прохождением.

Поэтому целью работы является создание такого подхода к реализации программной системы моделирования дифракции электромагнитных волн на плоско-параллельных структурах, который бы, будучи однажды отлажен применительно к наиболее простому случаю постановки [1], сохранял применимость в общем случае.

К задачам исследования, позволяющим добиться указанной цели, относятся:

- анализ характера модели на базе гиперсингулярных интегральных (псевдодифференциальных) операторов в общем случае плоскопараллельных рассеивающих структур и выработка соответствующих требований к инструментарию компьютерного моделирования;

- доработка вопросов алгоритмического обеспечения реализации программной системы моделирования, которые остались за рамками работ [1,3],

- определение метода моделирования структурной организации требуемой программной системы;

- определение модели оценивания используемых методов в отношении качества проектных решений и процесса разработки.

Наряду с [1] в данном исследовании использованы результаты работ [3] (построение подсистемы реализации преобразования Ганкеля), [4-6] (некоторые аспекты численных методов для программных систем моделирования на основе МДО, в частности, в задачах дифракции), [7] (численные методы), [8-9]

(информационные технологии), [11-13] (контроль качества программной продукции).

2. Общая модель дифракции на плоскопараллельных структурах и её эквивалентное преобразование к системе гиперсингулярных уравнений

На практике дифрагирующие системы часто представляют собой не сплошной экран, а решетку, «фрактал» или шахматную систему конгруэнтных элементов (к примеру, плоских колец). Формально это всё частные случаи одного (не обязательно односвязного) экрана. На практике такие решетчатые структуры еще и многослойны, то есть в несущий диэлектрик в плоскостях, параллельных его поверхности, монтируется несколько (подобных между собой или нет) решетчатых структур. Покажем, как в этой обобщенной постановке построить систему граничных ГСИУ.

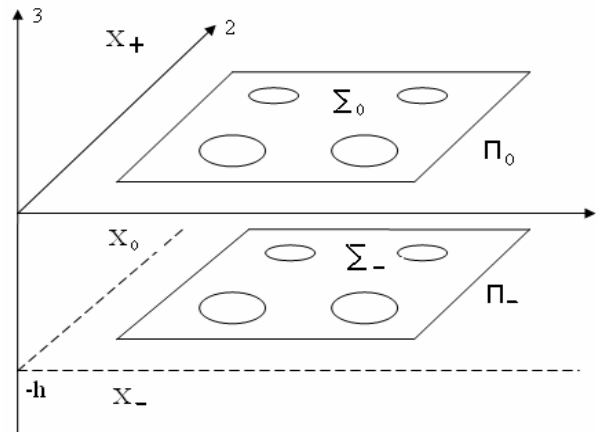


Рис. 2.1. Два (решетчатых) экрана Σ_0 и Σ_- на поверхности и в толще диэлектрика, заполняющего области X_0 и X_- .

В общем случае нужно построить модель в форме системы псевдодифференциальных уравнений с гиперсингулярными ядрами для рассеянного поля, возбуждённого падением со стороны полупространства X_0 плоской монохроматической волны на многослойную конечную структуру, составленную из s параллельных экранов $\Sigma_0, \Sigma_-, \dots, \Sigma_{(s-1)-}$ слои $X_-, \dots, X_{(s-2)-}$ между которыми заполнены диэлектриками (вообще говоря, разными). Точная постановка такова.

Рассматриваются амплитуды электромагнитных волн вида

$$\exp(-i\omega t) \cdot (E(x), H(x))$$

$$(x = (x', x_3), x' \in \mathbb{R}^2, x_3 \in \mathbb{R}, E(x), H(x) \in \mathbb{R}^3), \quad (2.1)$$

которые далее сами называются «полями». В качестве падающего поля рассматривается

$$(E^0(x), H^0(x)) \quad (2.2)$$

- решение квазистационарной системы уравнений Максвелла, которое принято считать результатом прохождения плоской волны через многослойную среду [14], соответствующую разбиению пространства

$$R^3 = X_+ \cup X_{-..} \cup X_{(s-1)} \quad (2.3)$$

где первая и последняя в объединении области суть полупространства (верхнее и нижнее), а остальные – плоские взаимно параллельные слои с границами

$$\Pi_{k-} = (R^2, -h_k) \quad (k=0..s-1, \quad h_0=0, h_{k-1} < h_k) \quad (2.4)$$

На этих границах рассмотрим идеально проводящие плоские экраны

$$\Sigma_{k-} = (\sigma_{k-}, -h_k) = \langle x \in R^3 \mid x_3 = h_k, \quad \sigma_{k-} \in R^2 \rangle \quad (2.5)$$

Классическая постановка задачи включает систему уравнений Максвелла, условия на разделе сред, на экране, на бесконечности и на краях экранов:

$$\text{rot } H = -i \varepsilon_{+/k-} \varepsilon_0 \omega \cdot E \quad (x \in X_+ \cup \bigcup \{X_{k-}\}_{k=0..s-1}), \quad (2.6)$$

$$\text{rot } E = i \mu_{+/k-} \mu_0 \omega \cdot H \quad (x \in X_+ \cup \bigcup \{X_{k-}\}_{k=0..s-1}), \quad (2.7)$$

$$\text{div } E = 0, \quad \text{div } H = 0 \quad (x \in X_+ \cup \bigcup \{X_{k-}\}_{k=0..s-1}); \quad (2.8)$$

$$i=1, 2 \Rightarrow [E_i]_{-0}^{+0} = E_i(x', -h_{k-} + 0) - E_i(x', -h_{k-} - 0) = 0, \quad (2.9)$$

$$[H_i]_{-0}^{+0} = 0 \quad (x' \in \Pi_{k-} \setminus \Sigma_{k-}); \quad (2.10)$$

$$i=1, 2 \Rightarrow E_i(x', -h_{k-} + 0) = -E_i^0(x', 0) = E_i(x', -h_{k-} - 0) \quad (x' \in \sigma_{k-}); \quad (2.11)$$

$$E, H = O\left(\frac{1}{R}\right) \quad (R \rightarrow \infty), \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial R} E - ik_{+/k-} E = o\left(\frac{1}{R}\right), \quad \frac{\partial}{\partial R} H - ik_{+/k-} H = o\left(\frac{1}{R}\right) \quad (R \rightarrow \infty, x \in X_{+/k-}), \quad (2.13)$$

где

$$R = \sqrt{|x'|^2 + x_3^2}, \quad k_{+/k-} = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_{+/k-} \varepsilon_0 \mu_{+/k-} \mu_0}; \quad (2.14)$$

$$E, H \in L_2^{loc}(R^3) \quad (2.15)$$

Имеет место единственность решения данной краевой задачи.

Для того, чтобы свести моделирование процесса, который можно описать с помощью (2.6)-(2.15), к решению системы гиперсингулярных интегральных уравнений, нужно следовать схеме метода параметрических представлений гиперсингулярных интегральных и псевдодифференциальных операторов, как она дана в [1] (где была развита для случая, который соответствует $s = 1$). Для этого представим решение краевой задачи в форме 2-мерного преобразования Фурье по x' , зависящего от параметра x_3 , с учётом необходимости сразу удовлетворить (2.6)-(2.8), (2.12):

$$E_i = F^{-1} \left[C_i^+(\lambda') \exp(-x_3 \gamma_+(\lambda)) \right] \quad (0 < x_3, i=1, 2, 3) \quad (2.16)$$

$$E_i = F^{-1} \left[C_i^{k-} sh((x_3 + h_{k-}) \gamma_{k-}(\lambda)) + D_i^{k-} sh((x_3 + h_{(k+1)-}) \gamma_{k-}(\lambda)) \right] \\ (-h_{(k+1)-} < x_3 < -h_{k-}, \quad k=0..s-2) \quad (2.17)$$

$$E_i = F^{-1} \left[D_i^-(\lambda') \exp(x_3 \gamma_-(\lambda)) \right] \quad (x_3 < -h_{s-1}, i=1, 2, 3) \quad , \quad (2.18)$$

где

$$\lambda' = (\lambda_1, \lambda_2), \quad \lambda = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2},$$

$$\gamma_{\pm} = \gamma_{\pm}(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - k_{\pm}^2}, \quad \gamma_{\pm}^{-1} = 1/\gamma_{\pm} \quad (\sqrt{1} = 1, \sqrt{-i} = ((-1+i)/\sqrt{2}) \quad), \quad (2.19)$$

$$F[u] = F[u](\lambda') = F[u(x')](\lambda') = \frac{1}{2\pi} \int_{R^2} u(x') \cdot \exp(-i\lambda'x') dx' \quad (2.20)$$

(преобразование Фурье при необходимости будет также рассматриваться в пространстве обобщенных функций медленного роста $\mathfrak{S}'[10]$), а

$$C_i^{+|k-}(\lambda'), \dots D_i^{k-}(\lambda') \quad (k = 0..s-1) \quad (2.21)$$

- искомые функции. Магнитная составляющая искомого рассеянного поля полностью определяется по (2.16)-(2.18) на основании (2.7). Сразу отметим, что (2.15) обеспечивается поиском решения в определённых функциональных классах, но при осуществлении компьютерного моделирования следует проверять, в какой мере это условие отражается на поведении численных решений, определённых согласно дискретной модели.

В общем случае, учитывая громоздкость формул, мы только проследим, можно ли корректным образом свести решение системы (2.6)-(2.15) к отысканию системы псевдодифференциальных уравнений.

Представление (2.16)-(2.18) требует отыскания $6s$ независимых функций. Условие непрерывности тангенциальных компонент E_1, E_2 на стыках сред (см. (2.9)), дополненное их непрерывностью на экранах (в силу (2.11)), приводит к соотношениям, которые позволяют исключить $2s$ неизвестных функций: Первое из уравнений (2.8) (второе в данном случае ему эквивалентно) позволяет исключить еще $2s$ функций. От остающихся $2s$ неизвестных функций двух переменных необходимо (это – ключевая часть метода ППГИПО) перейти к новым неизвестным, для которых гарантирована сосредоточенность их носителей на областях экранов σ_k . В этом качестве, как и в [1], можно выбрать определённые на границах диэлектрических слоёв функции, пропорциональные скачкам тангенциальных магнитных составляющих, поскольку вне экранов имеем (2.10). Теперь для $2s$ неизвестных функций остаётся ровно $2s$ уравнений (2.12). На уровне спектральных представлений они – линейные алгебраические, так что в исходных переменных будут представлять собой систему свёрточных уравнений. Характеристики их ядер, включая гиперсингулярность, можно проверить методами, использованными в [1].

Выкладки по указанному плану мы продемонстрируем для показанного на рис. 2.1 случая $s = 2$, в котором формулы еще обозримы и довольно изящны. Непрерывность тангенциальных составляющих электрической компоненты в силу взаимной однозначности преобразования Фурье даёт:

$$D_i^0 = C_i^+ / sh(h\gamma_0), \quad C_i^0 = -D_i^- / sh(h\gamma_0) \quad (i = 1, 2) \quad . \quad (2.22)$$

Вследствие отсутствия зарядов (и взаимной однозначности преобразования Фурье):

$$\begin{aligned} C_3^+ &= (i\lambda_1 C_1^+ + i\lambda_2 C_2^+) / \gamma_+ , \\ D_3^- &= -(i\lambda_1 D_1^- + i\lambda_2 D_2^-) / \gamma_- . \end{aligned} \quad (2.23)$$

Полагая

$$\tau_{\pm/0} = -\frac{i}{\mu^{\pm/0} \mu_0} , \quad (2.24)$$

и выразив компоненты магнитной составляющей поля через частные производные компонент электрической составляющей, для новых неизвестных

$$u_i^+(x') = \frac{1}{\tau_0} [H_i]_{x_3=0}^{+0} , \quad u_i^-(x') = \frac{1}{\tau_0} [H_i]_{x_3=-h-0}^{-h+0} \quad (i = 1, 2) \quad (2.25)$$

получим:

$$\begin{aligned} u_1^+ &= F^{-1} \left[i\lambda_2 \left(C_3^+ \frac{\tau_+}{\tau_0} - D_3^0 sh(h\gamma_0) \right) + C_2^+ \frac{\tau_+}{\tau_0} \gamma_+ + \gamma_0 (C_2^0 + D_2^0 ch(h\gamma_0)) \right] , \\ u_2^+ &= F^{-1} \left[-C_1^+ \frac{\tau_+}{\tau_0} \gamma_+ - \gamma_0 (C_1^0 + D_1^0 ch(h\gamma_0)) - i\lambda_1 \left(C_3^+ \frac{\tau_+}{\tau_0} - D_2^0 sh(h\gamma_0) \right) \right] , \\ u_1^- &= F^{-1} \left[i\lambda_2 \left(-C_3^0 sh(h\gamma_0) - D_3^- \frac{\tau_-}{\tau_0} \right) - \gamma_0 (C_2^0 ch(h\gamma_0) + D_2^0) + D_2^- \frac{\tau_-}{\tau_0} \gamma_- \right] , \\ u_2^- &= F^{-1} \left[\gamma_0 (C_1^0 ch(h\gamma_0) + D_1^0) - D_1^- \frac{\tau_-}{\tau_0} \gamma_- - i\lambda_1 \left(-C_3^0 sh(h\gamma_0) - D_2^- \frac{\tau_-}{\tau_0} \right) \right] . \end{aligned} \quad (2.26)$$

Если выразить в этих равенствах $C_i^0, D_i^0, C_3^+, D_3^-$ на основании (2.22)-(2.23) через оставшиеся 4 неизвестные функции и к обеим частям каждого равенства применить преобразование Фурье, то получим при каждом λ' линейную систему 4 порядка, которая не вырождена и позволяет выразить посредством формул Крамера старые неизвестные, а вместе с ними все компоненты E_i, H_i , только через преобразования Фурье функций вида (2.25). Поскольку эти выражения в целом являются обратными преобразованиями Фурье, то в итоге они имеют вид свёрток функций (2.25) с известными ядрами. При этом формальные предельные переходы по параметру $x_3 \rightarrow 0, x_3 \rightarrow -h$ под знаками интегралов приводят, как обычно в МДО, к функциям с неинтегрируемыми особенностями («гиперсингулярные ядра»). Следовательно, такие предельные переходы невозможны при использовании для функций топологий поточечной сходимости или сходимости в среднем. Но в более слабой топологии обобщенных функций предельный переход, как обычно, возможен. Используя это обстоятельство, можно придать равенствам (2.11) форму системы уравнений в свёртках вида

$$\begin{aligned} G_{1,1}^{++} * u_1^{++} + G_{1,2}^{++} * u_2^{++} + G_{1,1}^{+-} * u_1^{-} + G_{1,2}^{+-} * u_2^{-} &= -E^0_1(x', 0), \\ G_{2,1}^{++} * u_1^{+} + G_{2,2}^{++} * u_2^{+} + G_{2,1}^{+-} * u_1^{-} + G_{2,2}^{+-} * u_2^{-} &= -E^0_2(x', 0) \quad (x' \in \sigma) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} G_{1,1}^{-+} * u_1^{++} + G_{1,2}^{-+} * u_2^{++} + G_{1,1}^{--} * u_1^{-} + G_{1,2}^{--} * u_2^{-} &= -E^0_1(x', -h), \\ G_{2,1}^{-+} * u_1^{+} + G_{2,2}^{-+} * u_2^{+} + G_{2,1}^{--} * u_1^{-} + G_{2,2}^{--} * u_2^{-} &= -E^0_2(x', -h) \quad (x' \in \sigma) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Где структура ядер аналогична (1.1), и можно проверить, что данная система гиперингулярна в том же смысле, как это понимается в [1].

3. Требования к методу создания программной системы моделирования

Общие требования к программным системам моделирования дифракции на базе МДО вытекают из стандартного перечня задач, решаемых такими системами [11].

Особые требования - по линии надёжности. Нет тестов, выполненных для 3-мерных структур другими методами. Точные данные на основе физических экспериментов получить также трудно. Следовательно, реализация обязана на всех этапах вычислительного процесса обеспечить контроль путем сопоставления промежуточных результатов, используя принцип диверсности.

Необходимость дальнейших модификаций программной системы для более сложных постановок задач дифракции на плоскопараллельных структурах требует заложить базу этой возможности в структуру системы.

4. Диверсный подход к работе с матрицей дискретной модели

Шаг 2-2 алгоритмической схемы [1] предусматривает замену системы (1.1), где правые части - следы падающей плоской волны на экране,

$$f_1(x') = E^0_1(x', 0), \quad f_2(x') = E^0_2(x', 0) \quad (x' \in \sigma) \quad (3.1)$$

дискретной системой, используя галёркинские приближения в подпространстве функций, натянутом на N характеристических функций ячеек дискретизации

$$I_\alpha(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i^\alpha \leq x_i \leq x_i^\alpha + \Delta x_i \quad (i = 1, 2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

(эти ячейки составляют σ_N - аппроксимацию плоской области σ). То есть,

$$u_i(x') \approx \sum_\alpha u_{i,\alpha} \cdot I_\alpha(x') \quad (i = 1, 2) \quad (3.3)$$

где $\alpha = (j_1, j_2)$ - мультииндекс ($j_{1,2}$ - номера проекций ячеек на осях x_1, x_2).

Сопряженные функционалы – это дельта-функции точек - середин данных ячеек. Получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{\beta} G_{i,j,\alpha,\beta} \cdot u_{j,\beta} = -E_i^0(x'_\alpha + \Delta x_i/2, 0) \quad (i = 1, 2; \text{cardinal}\{\forall \alpha\} = N) \quad (3.4)$$

(отличие от формулы (5.1) из [1] только в деталях обозначений и нормировки).

Аналогично строится и дискретизация системы (2.27)-(2.28), которая приводит к СЛАУ для соответствующих скалярных коэффициентов $u_{i,\alpha}^\pm$.

Вычисление коэффициентов в (3.4) сведено в [1] к вычислению значений преобразования Ганкеля. Алгоритмы, аспекты их реализации рассмотрены в [2].

Теперь проблема размерности матрицы системы (3.4), которая стоит особенно остро для систем с ограниченными ресурсами, как, например, персональный компьютер. Сюда относятся: экономия памяти, отводимой под матрицу, экономия времени заполнения матрицы, экономия времени, которое тратится на решение СЛАУ. Последний вопрос является общим для множества применений СЛАУ, и варианты ответов в теории известны. Но характеристики методов предполагают, что скорость доступа к элементам матрицы неизменна (на самом деле отсутствие свободного ресурса памяти влечёт замедление на несколько порядков). Важный факт состоит в том, что для СЛАУ МДО эталон - решение по методу Гаусса. Причины: экономия на выборе главного элемента вследствие тенденции к доминированию близких к диагонали элементов, экономичность оценки обусловленности в процессе решения, давний опыт.

В типичных матрицах МДО находим множество одинаковых элементов, на чём достигается большая экономия, если отслеживать при счёте эти повторения [5]. Проанализируем повторяемость элементов в матрице СЛАУ (3.4).

Ядра системы (1.1) «зависят от разности» (см. (1.2)). Значит элементы

$$G_{i,j,\alpha,\beta} = G_{j,i,\alpha,\beta} \quad (i, j = 1, 2; \alpha = (k_1, k_2), \beta = (l_1, l_2)) \quad (3.4)$$

матрицы (3.4), зависящие от мультииндексов α, β пары ячеек регулярной сетки, зависят фактически от пары разностей $(k_1 - l_1), (k_2 - l_2)$. Поэтому для числа ячеек $N > p$ найдётся область $\sigma_p^* \supseteq \sigma, \sigma_N$ и «начальная» ячейка в ней, что любая пара ячеек может быть параллельным переносом смещена в σ_p^* и первая ячейка пары совместится с «начальной». Таким образом, число разных элементов (3.4) имеет порядок N , а не N^2 (при $N \rightarrow \infty$). Следовательно, на хранении матрицы можно сэкономить память порядка в N раз. Тем более, что имеем перестановочность по i, j , а ядра в (1.1) представимы двумя центрально-симметричными функциями и их производными (см. в [1] формулы (3.26)-(3.27), (5.3)). Значения элементов (3.4) в программе можно получать вызовом функции, которая использует выборку из хэш-таблицы порядка N элементов.

Но тогда неприменимы общие методы решения СЛАУ, которые модифицируют матрицу. Остаются итерационные методы. К счастью, диагональное преобладание и для этих методов обеспечивает корректность [7].

5. Схема программной системы: эскиз и его уточнение

Наша программная система моделирования дифракции на базе МДО, следуя общим требованиям для таких систем (см. [11]), решает следующие задачи:

- реализация управляющей программы (назовём этот модуль DSM);
- средства ввода данных о плоскопараллельной структуре, средства их преобразования (входят в интерфейсный модуль, названный нами Flat_Paral);
- средства формирования и решения системы уравнений дискретной модели (с ними интерфейс предусмотрен через модуль SLAE);

- средства расчёта рассеянного поля (модуль Results) и анализа картины дифракции (модуль Analysis);
- средства визуализации результатов, включенные в систему проблемно-ориентированного интерфейса данной системы (именуемого Frandly_Interface).

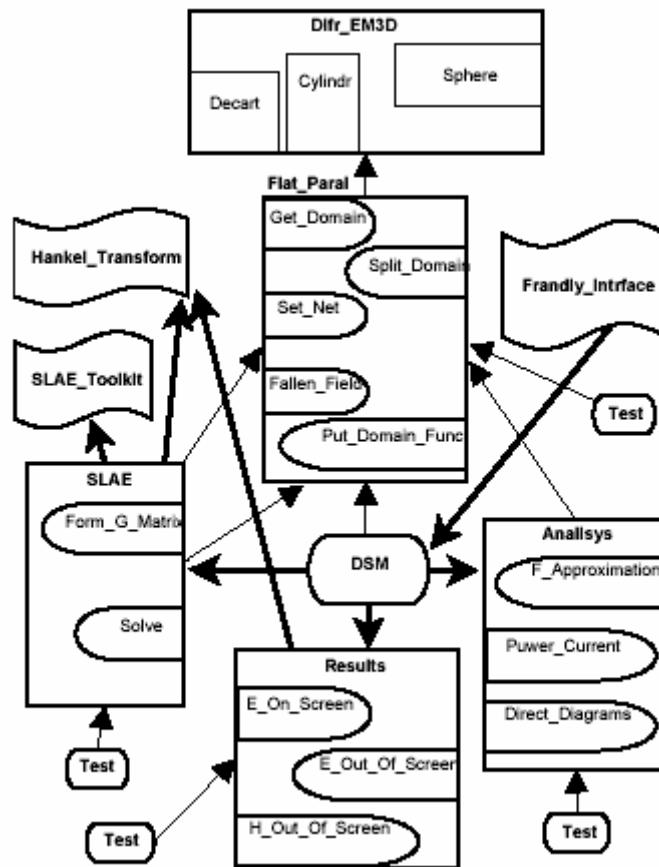


Рис.5.1. Схема программной системы компьютерного моделирования на основе МДО дифракции электромагнитных волн на плоскопараллельной структуре.

Требование 3-е из пункта 3 влечёт необходимость построения интерфейсного модуля в форме дочернего по отношению к модулю абстракции интерфейса Difr_EM3D для систем моделирования дифракции на 3-мерных структурах.

Численное построение преобразований Ганкеля различных функций обеспечит библиотека Hankel_Transform [3].

Алгоритмическую диверсность работы со СЛАУ обеспечит SLAE_Toolkit.

Архитектура системы предусматривает тестирование основных модулей.

Перечисленные решения отражены на рис. 5.1 эскизом схемы программной системы (СПС), которая представляет проект системы моделирования дифракции на плоскопараллельных структурах, как подсистемы Difr_EM3D средств моделирования дифракции на различных структурах.

При построении проекта эскиз СПС дополнен проработкой каждой из её частей. Пример доработанного фрагмента данной СПС представляет рис. 5.2. Уточнен состав модулей и связи между ними, указаны параметры, файлы.

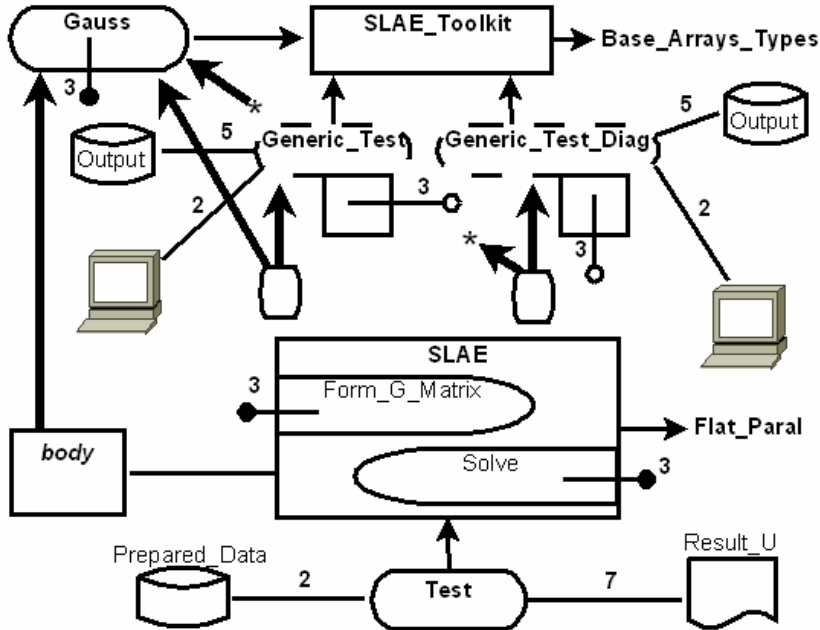


Рис.5.2. Пример проработанного фрагмента СПС. Пунктиром показаны модули-заготовки (их конкретизации тоже показаны, но не именованы), формальные параметры модулей, блоков символизируют чёрные кружочки, а параметры настройки заготовок – белые.

6. Расширение схемы программной системы

Допустим, сильно упрощая, что разработчик программной системы разбивает эту систему и её документированные спецификации на примерно равноценные по своей сложности единицы. Предположим, требуется m программных единиц и n единиц документации. При компьютерном моделировании таких сложных физических процессов, как дифракция, документация – это научные статьи, монографии, книги и другие источники по средствам построения и преобразования моделей (математическая физика, функциональный анализ, МДО), по методам вычислений. Поскольку традиционная семантическая организация компьютерных программ и научной литературы совершенно различны, сложность разработки в общем случае следует характеризовать величиной

$$multicomplexity = m \cdot n \quad (6.1)$$

Однако, если к программам и научным текстам будет применяться аналогичная трактовка семантической структуры, и к каждой программной единице требуемые ей по смыслу единицы документации будут «подвязаны» в рамках той же трактовки, то можно будет считать, что сложность определяется общим числом единиц:

$$complexity = m + n \quad (6.1)$$

При этом нужно иметь в виду, что обсуждается создание программных систем одним человеком-разработчиком или очень небольшим коллективом при ограничениях на ресурсы, которые практически исключают разделение труда в соответствии со специализацией, дублирование и постоянный контроль работ.

Однако даже при очень скромных ресурсах поддержки проекта можно использовать систему семантической структуризации научных текстов [8, 9], которая следует образцу программной структуры языка Ада. Эта модель семантической структуризации [8] позволяет отразить связи таких материалов, как статьи и книги, между собой, а также выделить структурные единицы внутри материалов, отразить смысловые зависимости между этими единицами.

На самом деле проекция некоторых структур языка программирования на специальные научные тексты, которая носит форму смысловой их разметки согласно [9], в основном привносит в них схему программной системы. Потому соответствие между единицами создаваемой программы и единицами документации можно считать расширением СПС этой программы.

Покажем логику расширенной СПС на примере одного относительно изолированного фрагмента нашего проекта.

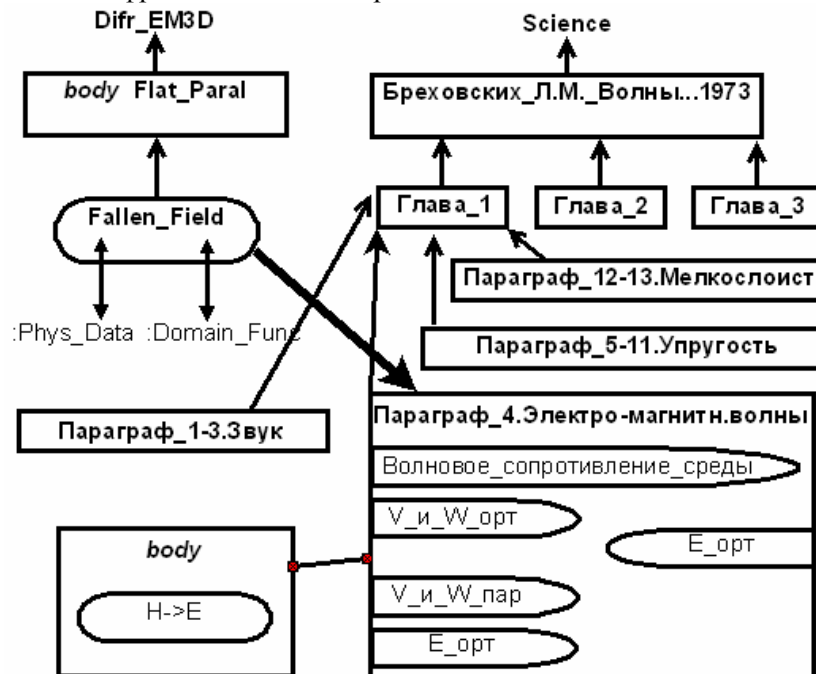


Рис. 6.1. Фрагмент расширенной СПС, отражающий зависимость процедуры расчёта падающего поля от теории отражения и преломления электромагнитных волн в слоистой среде [14].

По рис. 6.1 можно заключить, что реализующий блок `Fallen_Field` вынесен из тела `Difr_EM3M` в submodule и зависит от четвёртого параграфа первой главы монографии Бреховских [14]. Общее содержание указанного параграфа представляет интерфейсный модуль `Параграф_4`, где выделены результаты, относящиеся к расчёту полей и коэффициентов отражения и прохождения в

дискретно-слоистом диэлектрике. Полный текст параграфа отвечает телу этого модуля. В этом теле также могут быть выделены локальные вспомогательные результаты. В целом благодаря разметке книги разработчик, просмотрщик или модификатор исходного текста программы, основанной на материале книги, в соответствующем месте кода располагает ссылкой на нужное место в этой книге.

Опустим всякие подробности разметки научных материалов (которые текстовыми названы весьма условно, ибо могут содержать, например, рисунки). Синтаксису языков разметки посвящена работа [9]. Обратим внимание на «размещение» модулей материала (в подходящей для этого базе данных). Оно является аналогом компиляции программных модулей. Подобно тому, как успешная компиляция приводит к появлению объектных модулей, так и успешное размещение научного материала приводит к появлению сопряженных ему файлов на том же языке программирования, который используется для разработки программной системы (пока это обеспечено только для ЯП Ада). Поэтому расширение СПС на самом деле приводит и к расширению программы, которое не влияет на её функциональные возможности (объектный код лишнего не содержит), но позволяет проследить реализацию вычислений за пределами программы по её смысловым истокам. Далее показан (с купюрами) фрагмент расширенной программы, схематическим отражением которой является рис. 6.1. Код - на языке Ада, который, как известно, базируется на нотацию языка Паскаль. Комментарии в этом языке - после двух минусов до конца строки.

```
package Science is
  type Text is (Text_with_Formulas_and_Pictures);
end Science

package Science.Brekhovskih is
-- Annotation of [14], P.2
end Science.Brekhovskih

Science.Brekhovskih.Glava_1 is
-- Annotation of Glava_1, P.5
end Science.Brekhovskih.Glava_1

package Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4 is
  function Volnovoe_Soprotivlenie_Sredy return Text;
  procedure V_and_W_Ort;
  procedure E_Ort;
  procedure V_and_W_Par;
  procedure E_Par;
end Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4

package body Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4
  is
  procedure From_H_to_E is
    pragma Inline;
  begin null;
    -- P.22, (4.1)
  end;
  function Volnovoe_Soprotivlenie_Sredy return Text is
    pragma Inline;
  begin return Text_with_Formulas_and_Pictures;
    -- P.23-24, (4.13)
  end;
  procedure V_and_W_Ort is
    pragma Inline;
  begin null;
```

```

-- P.24, (4.16)-(4.19)
end;
procedure E_Ort is
pragma Inline;
begin
V_and_w_Ort;
-- P.23, (4.9)-(4.10)
end;
-- другие описания и операторы
end Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4

with Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4;
use Science.Brekhovskih.Glava_1.Paragraf_4;
-- другие спецификаторы контекста
separate (Difr_EM3D.Flat_Paral)
procedure Fallen_Field ( E0 : Complex; Param : in out Phys_Data;
Func : in out Domain_Func )
is
-- описания типов и объектов
Specific_Z0: constant Science.Text:= volnovoe_soprotivlenie_sredy;
Z0 : value := (
P1s => Sqrt (Param (Myu).P1s / Param (Eps).P1s),
Mns => Sqrt (Param (Myu).Mns / Param (Eps).Mns) );
-- другие описания
begin
-- операторы
Paragraf_4.V_Ort;
V_Ort:= ( Z0.Mns/Cos(Param(Psi).Mns) - Z0.P1s/Cos(Param(Psi).P1s) )
/ ( Z0.Mns/Cos(Param(Psi).Mns) + 0.P1s/Cos(Param(Psi).P1s) );
-- другие операторы
Paragraf_4.E_Ort;
Func.F(I):= E0*Double(1.0+V_Ort)*Exp(Ii*Double(P(X_1)));
-- другие операторы
end Fallen_Field;

```

В тексте программного модуля `Fallen_Field` сложным выражениям предшествуют вызовы подпрограмм из расширения `Science` программной системы `Difr_EM3D.Flat_Paral`. При исполнении эти вызовы не значимы. Но, работая с исходным текстом программы, можно проследить источники её решений в сфере математического моделирования и численных методов. Так выходное значение `Func` формируется на основании `E_Ort`, то есть, формул (4.9)-(4.20) книги [1], которые основаны на `V_Ort`, то есть, на (4.16)-(4.19) этой книги.

7. Об эффективности метода построения программных систем компьютерного моделирования дифракции

Поскольку завершена только первая версия данного проекта, актуальной является оценка качества в проектировании [12].

Определённых методов построения программных систем реализации МДО в электродинамике ранее не предлагалось. Это затрудняет сравнительную оценку наших проектных решений.

Руководствуясь положениями стандарта в области качества ПО ИСО 9126 (см., напр., [12]), мы предлагаем рассматривать эффективность, как одну из формализуемых характеристик качества в проектировании программных систем реализации математического моделирования. Под этим можно понимать степень потенциальной полезности проектной документации и методик разработки кода для этапа реализации (и последующих этапов жизненного цикла разрабатываемой системы).

Далее перечислены и кратко описаны подхарактеристики и основные метрики для комплексной оценки вводимой характеристики.

Планирование функциональности: метрики согласованности (доля функций, получивших полную спецификацию) и полноты (доля функций, требуемых стандартом данной области, которые намечены к реализации). Обеспечение надёжности: тестовая полнота (доля модулей, по которым спроектированы тестовые решения) и застрахованность (доля причин потенциальных отказов, парирование которых обеспечено в проектных решениях). Обеспечение практичности: полнота описания пользовательской документации, полнота планируемого контроля. Обеспечение эффективности: оценённость затрат, оценённость ресурсов, повторно используемые компоненты. Обеспечение сопровождаемости: компоненты, планируемые к повторному использованию, планируемая доступность конечных спецификаций. Планирование переносимости: полиплатформенность предусмотренных инструментов.

Пока лишь в исследованиях [6, 13] собирались данные, которые можно использовать для сравнительных оценок проектов по введенной характеристике.

Опыт оценивания показал: повышение стабильности измерения примитивов новых метрик требует доработки их формальных описаний. В этом смысле табл. 1 содержит предварительные результаты.

Табл.1. Пример сравнительного комплексного оценивания эффективности проектных решений, которое согласовано с системой стандартов ИСО 9126.

Проект	№3 [13]	№1 [13]	№2 [13]	Difraction [6]	Difr_EM3D (1-я вер.)
Продолжит.разработки(годы)	1.5	1.5	2.0	2.0	1.0
Планир.функциональности	0.1	0.55	0.35	0.65	0.85
Обеспечение надёжности	0	0	0	0.16	0.8
Обеспечен. практичности	0.1	0.25	0.2	0.45	0.75
Обеспечен. эффективности	0	0.3	0	0.6	0.7
Обесп. сопровождаемости	0.15	0.35	0.4	0.5	0.7
Планир. переносимости	0.9	0.4	0.8	1.0	1.0

8. Итоговые выводы

Анализ общей постановки задачи математического моделирования дифракции электромагнитных волн на плоскопараллельных структурах, состоящих из слоёв разных диэлектриков и идеальных металлических экранов, доказал применимость подхода параметрических представлений гиперсингулярных интегральных и псевдодифференциальных операторов аналогично [1]. Сформулированы перспективные требования к реализации системы компьютерного моделирования, обоснованы проектные решения.

Описан метод соединения научной и технической документации с создаваемым кодом в рамках «расширенной программы».

Предложен метод оценивания проектных решений для программных систем моделирования, и дана предварительная оценка проекта создаваемой системы, которая подтверждает эффективность разработанных и примененных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гандель Ю.В., Мищенко В.О. Псевдодифференциальные уравнения электромагнитной дифракции на плоскопараллельной структуре и их дискретная модель // Вестник Харк. нац. ун-та., – 2006. – № 733. Сер. «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления», вып. 6. – С. 58-75.
2. Гандель Ю.В. Парные и гиперсингулярные интегральные уравнения задач дифракции электромагнитных волн на плоских решетках и экранах // Труды XI Международного симпозиума МДОЗМФ-2003.-Харьков-Херсон,2003.- С.53-58.
3. Мищенко В.О. Гибкая модель приближенных вычислений ядер двумерных гиперсингулярных операторов и архитектура программной реализации // Вестник Харк. нац. ун-та. – 2008. – № 809. Сер. «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления», вып. 9. – С. 132-147.
4. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. – М.: ТОО «Янус», 1995. – 520 с.
5. Гахов А. В. Эффективность вычислений МДО в скалярной задаче 3-мерной дифракции на экране, лежащем в плоскости раздела сред // Вестник Харк. нац. ун-та. – 2006. – № 733. Сер. "Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления", вып. 6. – С. 76-91.
6. Gahov A.V. Testing a New Approach to the Analysis of the Projects Development Using Generalization Parameters Offered by Software Science // Proceedings of SCALNET-2004. – Kremenchug: KSPU, 2004. – P. 118-120.
7. Воеводин В. В. Матрицы и вычисления . М.: 1984, 320 с.
8. Мищенко В.О. Семантическая структуризация текстовых данных в базе данных, поддерживающей распределенную разработку программного обеспечения // Вестник ХГТУ. – 2002, № 1 (14). – С. 304-307.
9. Мищенко В.О. Прикладной язык семантической структуризации научных текстов как некоторая проекция языка Ада // Вестник Харк. нац. ун-та., – 2003. – № 605. Сер. «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления», вып. 2. – С. 90-105.
10. Владимиров В.С. Обобщенные функции в математической физике. – М.: Наука. –1979, 320 с.
11. Gahov A.V., Mishchenko V.O. The Validation of the Software that Was Developed for Calculations Related to the Design of Antennas // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – N 6. – P. 180-185.926.
12. Харченко В.С, Скляр В.В., Тарасюк О.М. Методы моделирования и оценки качества и надёжности программного обеспечения. – учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац.ин-т», 2004. – 159 с.
13. Гахов А.В., Мищенко В.О. Поиск математической модели при анализе связи между видами качества расчетных программ // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, №6 (33), Харків, 2008, С. 214-218.
14. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.