

Быстрые методы интегральных уравнений для синтеза сверхразмерных волноводных компонентов в составе квазиоптических систем гиротронов

А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация: Представлен ряд методов быстрого решения интегральных уравнений для поверхностного тока, на основе которых организованы эффективные процедур синтеза поверхностей волноводных излучателей квазиоптических преобразователей гиротронов. Метод оптимального синтеза на основе интегрального уравнения электрического поля показывает свою эффективность для проектирования систем с сильной трансформацией мод волновода. Для сверхразмерных волноводных излучателей, слабо меняющих спектр волноводной рабочей моды, предложен метод ускоренного расчета уравнения итерационной физической оптики. Примеры расчетов для излучателя 184 ГГц гиротрона демонстрируют высокую эффективность устройства при возросшей в сотни раз скорости проектирования, по сравнению с синтезом на основе уравнения электрического поля.

Ключевые слова: гиротрон, квазиоптический преобразователь, интегральные уравнения

1. Введение

Гиротроны - приборы генерирующие микроволновое излучение с мощностью до 1 МВт и длительностью импульса до тысяч секунд. В таких системах контроль потерь играет важную роль. Для минимизации дифракционных потерь в гиротронах используются сложные квазиоптические системы, состоящие, как правило, из волноводного излучателя и серии зеркал. Все элементы преобразователя имеют сложную, часто неаналитическую форму для эффективного преобразования рабочей моды гиротрона в гауссов пучок.

Для проектирования формы поверхности волноводного излучателя гиротрона хорошо себя зарекомендовал гибридный подход оптимального синтеза поверхности волновода [1] и интегрального уравнения электрического поля - *EFIE* [2]. Методы хорошо соотносятся в терминах поверхностного тока, а интегральное уравнение, являясь следствием уравнений Максвелла, имеет высокую степень соответствия его решения и эксперимента.

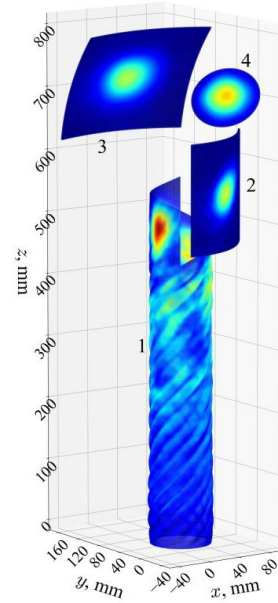
Для большого числа сверхразмерных преобразователей гиротронов высокой мощности, оказывается возможным использование упрощенной техники решения интегрального уравнения итерационной физической оптики, что позволяет ускорить проектирование квазиоптики гиротрона в сотни раз. В данном исследовании будут изложены условия применимости и принцип такого ускорения.

2. Принцип оптимального синтеза на основе интегральных уравнений для поверхностного тока

Для синтеза волноводных излучателей используется метод сочетающий в себе принцип оптимального синтеза [1] и интегрального уравнения электрического поля [2]. Принцип основан на итерационной процедуре, в которой на каждом шаге вычисляется две задачи распространения излучения в волноводе: первая - распространение входной моды от входного сечения к выходному и вторая - обращенного целевого распределения поля от выходного сечения к входному. На



(а)



(б)

Рисунок 2. Два образца излучателя для гиротрона 28 ГГц с малым углом Бриллюэна входной моды (а) и распределения тангенциального магнитного поля на поверхностях квазиоптического преобразователя гиротрона (б, 1 - излучатель, 2 - квазипараболическое зеркало, 3 - поворотное квадратичное зеркало, 4 - входное сечение гофрированной волноводной линии передачи).

3. Интегральное уравнение итерационной физической оптики. Ускорение процедуры синтеза.

Для большинства излучателей гиротронов высокой мощности характерны большая сверхразмерность, угол Бриллюэна в пределах $55^\circ..70^\circ$ и плавная деформация боковой поверхности волновода ($|\nabla(\Delta R)| \ll 1, \frac{\Delta R}{R_w} \ll 1$, где $\Delta R(\vec{r})$ - значение глубины деформации). Такая деформация не меняет сильно угловой спектр рабочей моды, а только осуществляет группировку поля, делая его распределение подобным гауссовому.

В таких условиях можно использовать уравнение, являющееся обобщением интегрального уравнения магнитного поля *MFIE* [2] для незамкнутой поверхности. Его решение имеет итерационную запись, которая называется уравнением итерационной физической оптики (ИФО) [4]:

$$\vec{J}_n(\vec{r}) = \frac{c}{2\pi} [\vec{n}, \vec{H}^{ext}(\vec{r})] + \frac{1}{2\pi} \left[\vec{n}, \int_S [\vec{J}_{n-1}(\vec{r}'), \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}')] ds' \right]. \quad (2)$$

Такое уравнение является более удобным для решения чем EFIE, так как является интегральным уравнением второго рода. Использование метода моментов с уравнением ИФО показывает выигрыш в 5-10 раз в скорости расчета по сравнению с решением EFIE. Точность решения уравнения тем выше, чем выше сверхразмерность волновода.

В сформулированных выше условиях для поверхности волновода, можно сильно поднять скорость решения уравнения ИФО, если перейти от геометрии деформированного волновода к геометрии регулярного волновода круглого сечения, а реальную деформацию поверхности волновода учитывать в виде фазового множителя в ядре интегрального уравнения:

$$\vec{j}_n(\vec{r}) = \frac{c}{2\pi} [\vec{n}, \vec{H}^{ext}(\vec{r})] + \frac{1}{2\pi} [\vec{n}, \int_{S_0} [\vec{j}_{n-1}(\vec{r}'), \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}')] e^{i\Psi(\vec{r}')} ds'], \quad (3)$$

где сам фазовый множитель выражается через глубину деформации как:

$$\Psi(\vec{r}) = 2k \cdot \Delta R(\vec{r}) \cdot \cos\gamma \quad (4)$$

В уравнении (4) γ - угол между нормалью к цилиндрической поверхности невозмущенного волновода и направлением луча падающего на данную точку поверхности в геометро-оптическом представлении волноводной моды (константа для выбранной моды) [5]. Если разложить электрический ток по продольной (z) и поперечной (φ) компонентам, то можно переписать уравнение (3) в виде системы интегральных уравнений:

$$\begin{cases} J_{\varphi,n}(\varphi, z) = J_{\varphi,0}(\varphi, z) - \frac{R_w}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{L(\varphi)} J_{\varphi,n-1}(\varphi', z') e^{i\Psi(\varphi', z')} \nabla'_r G dz' \\ J_{z,n}(\varphi, z) = J_{z,0}(\varphi, z) + \frac{R_w}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{L(\varphi)} (J_{z,n-1}(\varphi', z') \nabla'_r G - \\ - J_{\varphi,n-1}(\varphi', z') \nabla'_z G \cdot \cos(\varphi - \varphi')) e^{i\Psi(\varphi', z')} dz'. \end{cases} \quad (5)$$

В данной записи можно заметить, что интегралы в системе представляют собой свертки функций компонент тока с производными функции Грина, которые зависят только от разности координат - $(\varphi - \varphi', z - z')$. Такие интегралы можно вычислять по теореме о свертке с помощью быстрого преобразования фурье [6]:

$$I = \int J(x') e^{i\Psi(x')} K(x - x') dx' = FFT^{-1}(FFT(J e^{i\Psi}) FFT(K)). \quad (6)$$

В качестве численного примера рассмотрим синтез излучателя для 184,6 ГГц гиротрона на моде $TE_{28,13}$. Радиус волновода $R_w=22$ мм и длина всего излучателя 150 мм. Синтез данной системы быстрым уравнением ИФО происходит за время около 3 минут (50 итераций). Проверка полученного профиля единственным расчетом уравнения EFIE требует примерно 30 минут. Таким образом, ускорение при использовании быстрого уравнения ИФО по сравнению с EFIE составляет более 500 раз! Расчеты обоими методами выявили высокую эффективность синтезированного профиля, которая составляет 98,3%. На рисунке 3 приведен результирующий профиль и распределения магнитного поля на поверхности излучателя и его выходном сечении, посчитанные уравнениями EFIE и ИФО.

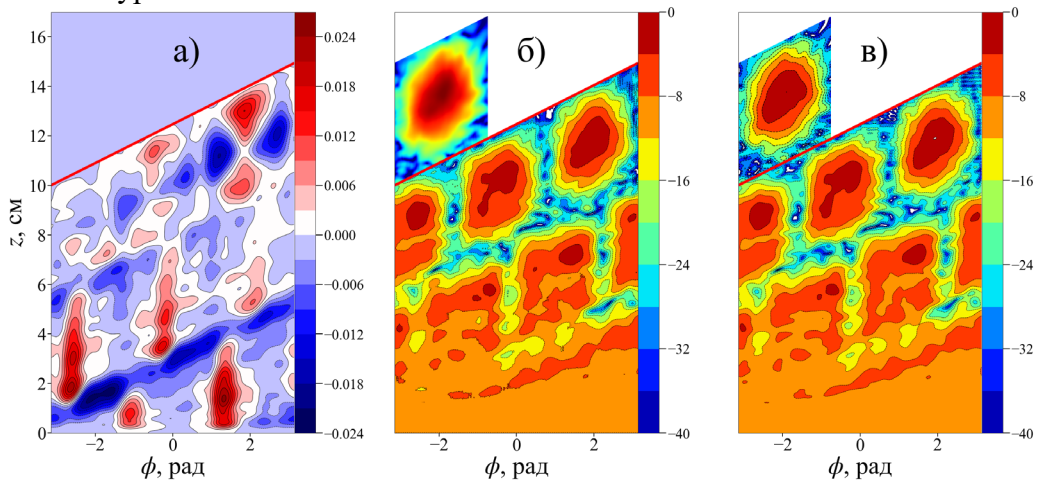


Рисунок 3. Синтезированный профиль (шкала в мм) волноводного преобразователя моды $TE_{28,13}$ в гауссово-подобное распределение поля на частоте 184,6 ГГц (а) и соответствующие распределения продольного магнитного поля ($20 \cdot \lg(|H_{||}|/|H_{||max}|)$, шкала в дБ) на стенке волновода и выходной зоне Бриллюэна, посчитанные уравнениями EFIE (б) и ИФО (в).

4. Заключение

Представленные методы интегральных уравнений в совокупности с принципом оптимального синтеза являются важными инструментами для проектирования сверхразмерных квазиоптических элементов мощных giroприборов. Метод итерационной физической оптики уступает в универсальности уравнению EFIE, тем не менее позволяет решать большинство задач синтеза сверхразмерных волноводных излучателей с многократно превосходящей скоростью относительно решения EFIE. Решение ИФО может быть использовано и как самостоятельный инструмент для проектирования подобных систем, и как предварительный расчет, который может быть уточнен методом синтеза на основе EFIE.

Исследование выполнено в рамках проекта ИПФ РАН **FFUF-2022-0007**.

Список литературы

1. D. I. Sobolev, G. G. Denisov, Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 38, no. 10, pp. 2825-2830, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPS.2010.2060365
2. Gibson W.C., The Method of Moments in Electromagnetics // Boca Raton: CRC Press, 2021
3. A.P. Gashturi et al, Highly efficient gyrotron mode converter with a launcher changing angular spectrum of the operating mode // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 71, no. 12, pp. 7831-7835, Dec. 2024, doi: 10.1109/TED.2024.3479157
4. F. Obelleiro-Basteiro, J. Luis Rodriguez and R. J. Burkholder, An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 43, no. 4, pp. 356-361, April 1995, doi: 10.1109/8.376032.
5. A. A. Bogdashov, G. G. Denisov, Asymptotic theory of high efficiency converters of higher-order waveguide modes into eigenwaves of open mirror lines // Radiophysics and Quantum Electronics, vol. 47, no. 4, pp. 283-296, Apr. 2004, doi: 10.1023/B:RAQE.0000047649.17664.6e.
6. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свёрток. — М.: Радио и связь, 1985