

Проектирование сверхразмерных открытых волноводных преобразователей комбинацией методов оптимального синтеза и интегрального уравнения EFIE

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

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в данной работе представлена процедура проектирования открытых волноводных преобразователей, использующихся в гиротронах для эффективной трансформации собственной моды волновода круглого сечения в наклонный гауссов волновой пучок, что обеспечивает эффективную транспортировку СВЧ-излучения зеркальными линиями передачи. Метод оптимального синтеза определяет взаимосвязь входной и выходной структуры поля, а также поля на боковой поверхности волновода с деформацией данной поверхности для требуемого преобразования мод. Для 3D расчета электромагнитных полей применяется метод поверхностного векторного интегрального уравнения EFIE.

Ключевые слова: электродинамика, СВЧ, гиротрон, интегральное уравнение

1. Введение

Генераторы СВЧ высокой мощности, такие как гиротроны, требовательны к минимизации потерь во всех своих компонентах. Дифракционные потери, возникающие в основном при неэффективном излучении волноводной моды в открытое пространство, могут достигать 20% и более, что неприемлемо для устройств мегаваттного уровня мощности. Однако, волновод специального профиля, способен трансформировать моду, возбуждаемую в резонаторе гиротрона, в определенное распределение поля, такое, что его дифракция на открытом конце излучателя не будет вносить ощутимый вклад в потери. Основными критериями такого распределения являются малые значения поля на излучающем срезе, а также близость данного распределения к основной моде зеркальной линии передачи – гауссовому волновому пучку.

Задаче построения такого профиля волновода, который обеспечит требуемую трансформацию, посвящена данная работа. Формулировка принципа оптимального итерационного синтеза [1] выражает деформацию стенки волновода через электромагнитные поля двух пересчетов: прямого - распространение входной моды от входного сечения к выходному, и инверсного, в котором требуемое выходное излучение обращается и распространяется от выходного сечения к входному. Для расчета полей в работе используется решение поверхностного интегрального уравнения EFIE (Electric Field Integral Equation) [2, 3]. Данный метод позволяет получить полную информацию о трехмерном распределении электромагнитного поля, используя относительно небольшие вычислительные ресурсы. Удобством использования такого сочетания методов синтеза и анализа также является близость терминологий двух методов – распределения полей на синтезируемой поверхности волновода легко выражаются через распределения плотности электрического тока, которое является решением EFIE.

2. Процедура оптимального синтеза

Используемая процедура синтеза базируется на основных принципах, описанных в [1]. Мы будем рассматривать волновод с заданными входным и выходным сечениями (S_1 и S_2 , соответственно), а также известными распределениями электрического и магнитного полей на них (E_1 и H_1 на входном сечении и E_2 и H_2 – на выходном). Боковую поверхность волновода (синтезируемая поверхность) обозначим за S_0 и временную зависимость примем как $e^{-i\omega t}$. Рассчитаем два распределения поля внутри волновода, отвечающие распространению входной моды и обращенной выходной ($\vec{E}_{-2} = \vec{E}_2^*$, $\vec{H}_{-2} = -\vec{H}_2^*$, где звездочка означает комплексное сопряжение) внутри объема волновода, ограниченного входным и выходными сечениями.

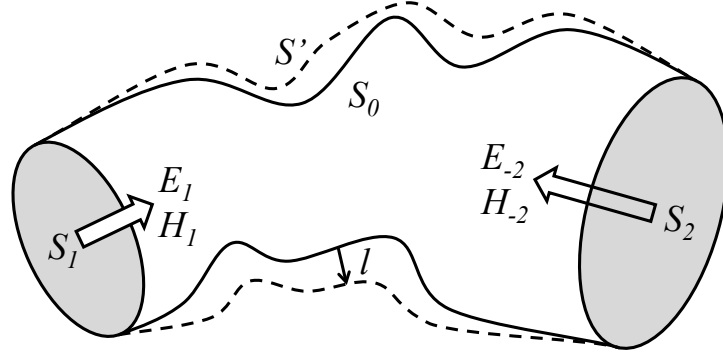


Рисунок 1. Схема процедуры синтеза: Входное и выходное сечения волновода S_1 и S_2 , стенка волновода до итерации синтеза S_0 и после S' , значение деформации l в произвольной точке поверхности волновода, входное электрическое и магнитное поля E_1, H_1 и обращенные выходные поля E_{-2}, H_{-2} .

Коэффициент преобразования мод в волноводе на каждой итерации:

$$P = \int_{S_0} ([\vec{E}_1 \times \vec{H}_{-2}] - [\vec{E}_{-2} \times \vec{H}_1]) \vec{n} dS \quad (1)$$

В данных терминах, значение деформации l в каждой итерации процедуры синтеза может быть выражено следующим образом

$$l = \alpha \operatorname{Re} F + \beta \operatorname{Im} F \quad (2.1)$$

$$F = -ik(\vec{H}_{\tau 1} \vec{H}_{\tau -2} + \vec{E}_{n1} \vec{E}_{n-2}) \quad (2.2)$$

где коэффициенты α и β выражаются через F и ΔP – приращение коэффициента преобразования после итерации [1]. Таким образом, каждая итерация представляется в виде последовательности шагов:

- Вычисление двух распределений (прямого и обратного) электромагнитных полей внутри поверхности волновода.
- Вычисление функции F на поверхности S_0 и коэффициента преобразования P .
- Установка фазы свободного параметра ΔP равной фазе P . Выбор абсолютного значения ΔP осуществляется с учетом того факта, что максимум $|P|=1$, а процедура синтеза происходит в несколько итераций.
- И, наконец, вычисление деформации l для ΔP .

3. Уравнение EFIE

Рассматривается задача рассеяния известного электромагнитного излучения на идеально проводящем теле. Интегральное уравнение EFIE представляет собой

граничное условие на поверхности идеального проводника $\vec{E}_\tau = 0$, где поле записывается в виде интеграла от искомого поверхностного тока [2, 3]:

$$E_\tau^i = \frac{k}{ic} \vec{n} \times \int_S \left(1 - \frac{\nabla \nabla'}{k^2} \right) G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}_c(r') dS' \quad (3)$$

где E_τ^i - тангенциальная проекция поля известных источников на поверхности. Для применения этого уравнения к волноводной задаче источники задаются в виде элементарных электрических и магнитных токов, расположенных на входном или выходном сечении, соответствующих известным распределениям магнитного и электрического поля на данном сечении (Рис. 2).

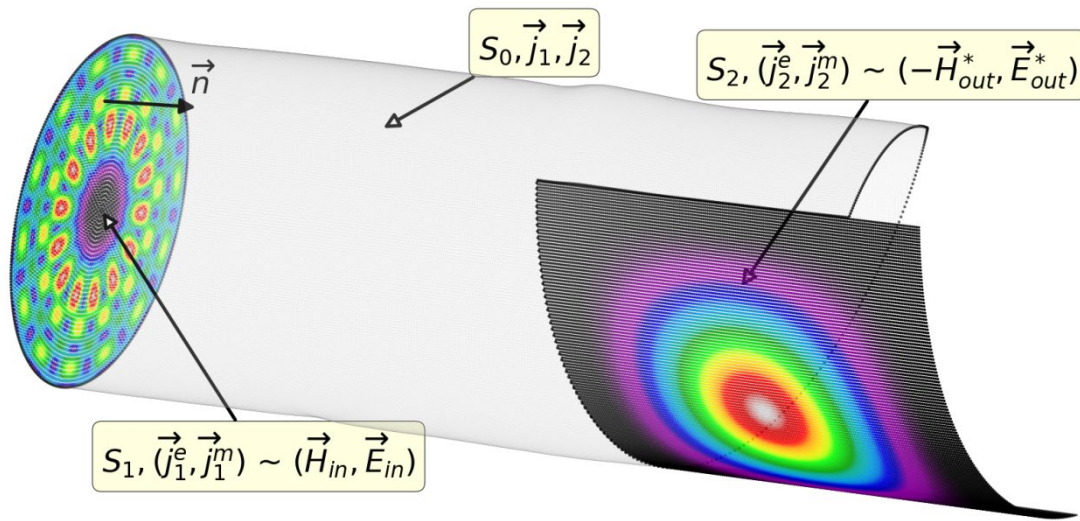


Рисунок 2. Интерпретация принципа оптимального синтеза для проектирования волноводного излучателя гиротрона. Поля H_{in}, E_{in} соответствуют собственной моде волновода круглого сечения. Поля H_{out}, E_{out} - сгруппированному пучку.

Излучатель гиротрона представляет собой участок круглого волновода со срезом специальной формы. Форма среза зависит от характера волноводной моды, и для вращающейся моды представляет собой винтовую линию вдоль распространения одного луча. Выходное сечение при таком срезе, это участок цилиндрической поверхности, ограниченный границами зоны Бриллюэна – участка поверхности, на который попадают все лучи, формирующие волну в волноводе [4].

Уравнение EFIE приводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с помощью метода моментов. Полученная СЛАУ решается итерационными методами. Для сверхразмерных систем размерность СЛАУ может достигать $N=10^6$ и более, что делает невозможным даже хранение соответствующей матрицы (требуемый размер памяти для хранения $O(N^2)$). Для ускорения расчетов и минимизации памяти используется алгоритм MLFMA (MultiLevel Fast Multipole Algorithm), который снижает расходование машинных ресурсов (количество операций и затрат ОЗУ) до $O(N \log N)$ [2, 3].

Выбор уравнения EFIE как метода расчета полей для процедуры синтеза оказывается весьма удобным еще и потому что поля H_τ и E_n на стенке волновода однозначно определяются плотностью поверхностного тока. Таким образом, не приходится рассчитывать распределения полей на поверхности, а достаточно выразить F через поверхностные токи:

$$F \sim (\vec{J}_1 \vec{J}_2 - \frac{\nabla \vec{J}_1 \nabla \vec{J}_2}{k^2}) \quad (4)$$

4. Пример расчета

Данный метод был успешно использован для синтеза ряда волноводных преобразователей. В данной работе мы рассмотрим результат работы метода на примере волноводного излучателя гиротрона, работающего на двух частотах 28,3 ГГц и 37,3 ГГц, и двух соответствующих рабочих модах TE_{6,4} и TE_{8,5}. Радиус невозмущенного волновода составляет 34,7 мм, а длина всего устройства 152 мм.

Для параллельной сходимости процедуры синтеза на двух частотах, одновременно вычисляются поправки на профиль для каждой из двух мод, а результаты складываются. Таким образом, результирующий профиль с большой эффективностью осуществляет преобразование обеих мод на соответствующих частотах.

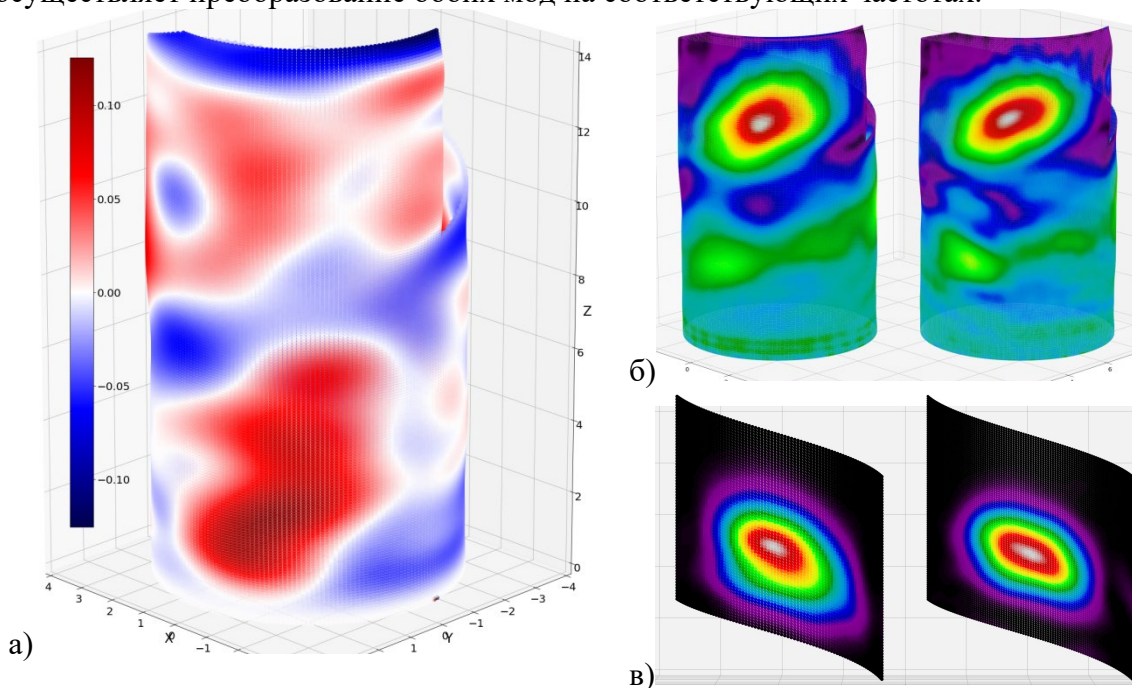


Рисунок 3. а) Глубина деформации поверхности волноводного излучателя двухчастотного гиротрона в см, б) плотность поверхностного электрического тока на поверхности излучателя на частоте 28,3 ГГц (слева) и 37,3 ГГц (справа), в) распределения мощности излучения на выходном сечении излучателя на частоте 28,3 ГГц (слева) и 37,3 ГГц (справа).

Данный преобразователь был синтезирован за 27 итераций процедуры синтеза. На персональном компьютере на одну итерацию требовалось около 5 минут. Расчетная эффективность – коэффициент преобразования мод – составила более 0,98. Глубина профиля не превышает 1,3 мм и показана на Рис. 3а, распределения плотности тока и плотности мощности на выходе показаны на Рис. 3б и Рис. 3в, соответственно.

5. Заключение

Изложенная комбинация методов синтеза и расчета полей проявляет себя как мощный инструмент для проектирования компонентов СВЧ различной конфигурации, не ограничиваясь только волноводами. Для сверхразмерных 3D систем результат может быть получен за приемлемое время без использования значительных вычислительных ресурсов.

Работа выполнена в рамках проектов ИПФ РАН 0030-2021-0001 и 0030-2021-0027.

Список литературы

1. D.I. Sobolev, G.G. Denisov, Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units //IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 38 ,no 10, pp. 2825 – 2830, Oct. 2010.
2. Chew W., Jin J., Michielssen E. and Song J., Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics //Artech House, 2001.
3. A.P. Gashturi, A.V. Chirkov et al. Comparison of Different Methods for Calculating Gyrotron Quasi-Optical Mode Converters //Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Vol. 34, No. 1, Page 62-70, (2013)
4. A. V. Chirkov , G. G. Denisov et al. *Use of Huygens' principle for analysis and synthesis of the fields in oversized waveguides*, Radiophys. Quantum Electron., 49, No. 5, pp 344-353, May 2006