

Г. В. ПИСЬМЕННЫЙ

**АНАЛИЗ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ
МЕТОДОМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФОВ**

В работе [1] рассмотрены выражения, полученные с помощью метода ориентированных графов, используя которые можно рассчитать параметры слоистых сред и найти коэффициенты отражения, прозрачности и затухания электромагнитной волны (ЭМВ) в среде, состоящей из плоскопараллельных слоев. Минимальное количество слоев — один, максимальное — ограничивается объемом памяти и быстродействием конкретной ЭВМ. Рассчитывая параметры, задают характеристики каждого из слоев — его относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости и толщину, частоту падающей ЭМВ, а также описывают полупространства, находящиеся перед поглотителем и за ним, указав диэлектрическую и магнитную проницаемости.

На этом основании разработана математическая модель слоистого радиопоглощающего материала (РПМ), с помощью которой исследовались его характеристики, в частности, зависимости коэффициента отражения от характера изменения поглощающих свойств в диэлектрическом слое РПМ по толщине.

Рассмотрим задачу об отражении нормально падающей плоской ЭМВ от многослойного поглощающего материала. На поглотитель,

основанием которого служит идеально проводящий материал, волна падает из свободного пространства 1 (рис. 1) с диэлектрической и магнитной проницаемостями, равными соответственно ϵ_0 , μ_0 . Исходя из положений электродинамики, для более эффективного поглощения СВЧ-излучения, т.е. для достижения максимально возможного коэффициента поглощения, лучше использовать материалы с высокими значениями мнимых частей комплексной диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей.

При падении электромагнитной волны на РПМ наряду с процессами поглощения происходит отражение волны от границы раздела сред, что обусловлено различием волновых сопротивлений свободного пространства и радиопоглощающего материала. Чем больше различие, тем больше коэффициент отражения R [2]. В целях получения минимального коэффициента отражения необходимо добиться хорошего согласования РПМ со свободным пространством. При исключении из рассмотрения поглотителей, работа которых основана на интерференционных явлениях, потери в слоистом материале должны нарастать с каждым слоем. Причем диэлектрические слои должны хорошо экранировать металл и в то же время сами вносить минимальное рассогласование, зависящее от различия волновых сопротивлений на границах разделов сред.

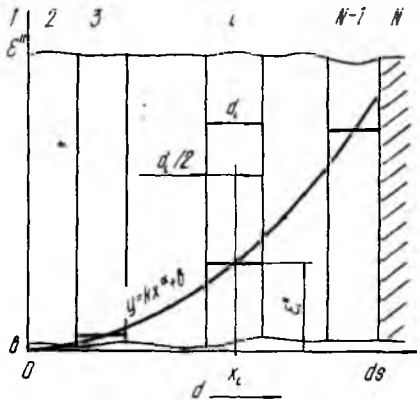


Рис. 1

Чтобы исключить влияние на коэффициент отражения действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и исследовать его зависимость только от мнимой ϵ'' или от тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, значение ϵ' для каждого слоя было положено равным единице, т.е. значению действительной части относительной диэлектрической проницаемости первой среды.

Таким образом, коэффициент отражения падающей ЭМВ $R = F(\epsilon''_i; d_i)$ (1), где ϵ''_i — мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости i -й среды, т.е. $(i-1)$ -й слой; d_i — толщина $(i-1)$ -го слоя; $i = 2 + N - 1$ — номер среды.

Даже при такой упрощенной постановке задачи, когда магнитная и действительная часть диэлектрической проницаемости являются константами для всех сред, уравнением (1) описывается гиперповерхность, зависящая от $2(N-2)$ параметров, где N — количество сред. Согласно оптимизации математической модели в этом случае уменьшается вероятность унимодальности целевой функции. Кроме того, множество элементов, образующих многомерное пространство поиска, гораздо мощнее одномерного пространства. Объем вычислений, необходимый для сужения интервала неопределенности в многомерном пространстве, есть степенная функция. Ее показатель равен

размерности пространства [3]. Поэтому естественно стремление уменьшить количество проектных параметров функции (1). Зная, что поглощение должно плавно увеличиваться с толщиной, минимально ухудшая согласование со свободным пространством, выбираем закон нарастания мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости от слоя к слою: $\epsilon_i'' = kx_i^\alpha + b$ (2). Здесь k — угловой коэффициент; α — показатель степени; b — функция при нулевом аргументе; x_i — нормированное по суммарной толщине поглотителя (ds) расстояние от передней плоскости РПМ до середины $(i - 1)$ -го слоя, для которого определяется значение мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ_i'' ,

$$x_2 = d_2/(2ds); \quad x_i = \left(\sum_{j=2}^{i-1} d_j + d_i/2 \right) / ds; \quad i = 3, 4, \dots, N - 1.$$

Учитывая, что с увеличением b ухудшается согласование на передней границе поглотителя, так как $\epsilon_1'' = 0$, полагаем $b = 0$.

Второй шаг к уменьшению размерности пространства проектных параметров — условие равенства толщин всех слоев: $d_i = ds / (N - 2)$ (3), где ds — суммарная толщина поглотителя, состоящего из $(N - 2)$ слоев; N — количество сред.

Описанные меры привели к уменьшению количества проектных параметров от 2 $(N - 2)$ до 3, причем размерность пространства поиска теперь не зависит от количества слоев в поглотителе. Это очень важный результат с точки зрения возможности оптимизации математической модели. Теперь уравнение (1) перепишем в виде $R = F(k, \alpha, ds)$ (4).

В процессе оптимизации большое значение имеют топологические свойства поверхности функции, поскольку от них зависит выбор наиболее эффективного алгоритма [4]. Для анализа таких свойств широкие возможности открывает Графор — библиотека графических подпрограмм и функций. С этой целью был построен ряд поверхностей функции (4) при нескольких фиксированных значениях k . На рис. 2 показаны линии уровня функции двух переменных — α и отношения ds/λ , где λ — длина падающей ЭМВ. Для рассматриваемого случая угловой коэффициент $k = 2$, $\lambda = 3$ см, поглотитель состоит из семи слоев. Из рисунка видно, что функция не является унимодальной, а содержит глобальный минимум в области $ds/\lambda > 1$, $\alpha > 1$ и ряд локальных: $ds/\lambda = 0,35$, $\alpha = 0,9$; $ds/\lambda = 0,45$, $\alpha = 1,3$; $ds/\lambda = 0,55$, $\alpha = 1,7$. Наличие локальных минимумов объясняется малым количеством слоев в поглотителе, поэтому наблюдаются остаточные интерференционные явления. С увеличением количества слоев эти минимумы растянутся и образуют овраг с гладким дном в направлении от $ds/\lambda = 0,3$, $\alpha = 0,8$ к $ds/\lambda = 0,75$, $\alpha = 2,6$ и далее перейдут в глобальный экстремум. Анализ зависимостей $R = F(\alpha)$ показывает, что при малых значениях ds/λ функция имеет минимум. Это объясняется тем, что увеличение α для тонких поглотителей приводит к ухудшению экранирования идеально проводящей подложки, а при уменьшении показателя степени нарушается согласование слоев со свобод-

ным пространством, поскольку волновое сопротивление резко нарастает в первых слоях, а далее с толщиной рост уменьшается. Для толстых поглотителей ($ds/\lambda > 1$) первый фактор утрачивает свое значение в выбранных пределах изменения α . ЭМВ успевает поглотиться, и отражение от подложки не вносит существенного вклада в коэффициент R .

На основе топологического анализа поверхности функции (4) для оптимизации была выбрана комбинация методов случайного и направленного поиска [5]. Метод случайного поиска имеет два преимущества: он пригоден для любой целевой функции, независимо от того, является она унимодальной или нет; вероятность успеха при попытках не зависит от размерности пространства. Этот метод не позволяет

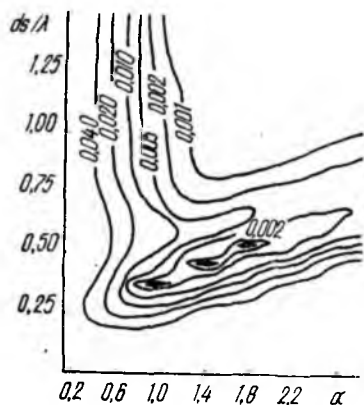


Рис. 2

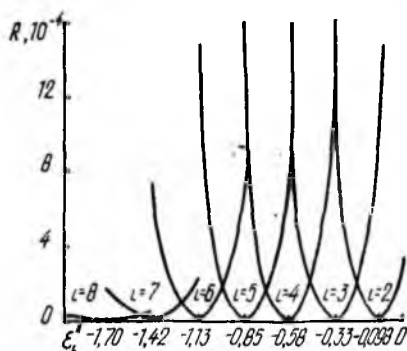


Рис. 3

непосредственно найти оптимальное решение, он создает подходящие предпосылки применения в дальнейшем других методов, в частности — направленного поиска.

Поскольку толстые поглотители особого интереса не представляют, при оптимизации было наложено ограничение на толщину: $ds \leq 0,5\lambda$, после чего получены оптимальные значения параметров для семислойного поглотителя: $\alpha = 1, 1127$; $k = 1, 8506$; $ds = 1, 4425$ см. Значение коэффициента отражения в этой точке $R = 1,7405 \cdot 10^{-10}$. Для оценки влияния параметров сред на величину R проводился анализ чувствительности, который показал, что действительно найден оптимум. Изменение любой из переменных α , k , ds приводит к нежелательному росту коэффициента отражения. Обычно в задачах с ограничениями оптимальная точка лежит на границе пространства проектирования (в данном случае ds могло бы принять значение 1,5 см). При наложении условия $ds \leq 0,5 \lambda$ экстремумы отсечены не были и оказались глубже, чем значения, принимаемые функцией на границах, поэтому в процессе оптимизации был найден именно экстремум, что и подтвердилось результатами анализа чувствительности.

Принятие мер по усечению пространства проектирования (2), (3) внесло некоторые взаимные зависимости между проектными параметрами

рами исходного уравнения (1). Так, изменение ds приводило к одновременному изменению толщин всех слоев (3), увеличение α — к уменьшению модуля мнимой части диэлектрической проницаемости в основном средних, а увеличение k — к увеличению $|\epsilon''|$ задних слоев (2). Поэтому значения ϵ_i'' и d_i , вычисленные по оптимальным значениям α , k и ds , могли не соответствовать оптимуму функции (1). Для возможного уточнения законов изменения ϵ'' и толщин слоев проводился анализ чувствительности непосредственно по ϵ_i'' , d_i . Результаты оказались положительными. Из рис. 3 видно, что изменение ϵ'' от ϵ_{i-1} до ϵ_{i+1} не приводит к уменьшению коэффициента отражения. Наибольшее влияние на него оказывают изменения мнимой части ϵ первых четырех слоев, седьмой же слой практически не влияет на R . Из анализа чувствительности R к изменению d_i вытекает, что слои должны быть одинаковыми по толщине: согласно уравнению (3) $d_i = ds_{\text{opt}}/7 \approx 0,206$ см. В наибольшей степени увеличивает коэффициент отражения изменение в большую или меньшую сторону значения толщины любого из последних четырех слоев, однако R практически не чувствителен к вариациям толщины первого слоя. Изменение d_i лежало в пределах $\pm 10\%$, причем с уменьшением толщины отражение возрастало резче, чем при увеличении.

Чтобы окончательно убедиться в правильности подхода к решению поставленной задачи оптимизации, была проведена оптимизация математической модели по исходным параметрам (1). За исходную взята оптимальная точка, полученная при рассмотрении модели с усеченным пространством проектирования (4). В небольшой окрестности вокруг значений ϵ_i'' и d_i , полученных из уравнений (2), (3) для оптимальных α , k , ds , точки с меньшим коэффициентом R не оказалось. Отсюда следует, что выбор закона нарастания потерь в слоистом поглотителе и изменения толщин слоев сделан правильно. Он позволяет резко уменьшить размерность пространства проектирования и не зависит от количества слоев. Это важный результат для постановки задач оптимизации подобных моделей РПМ.

Найденный оптимум не единственный. Выясняя его практическую ценность, необходимо определить окрестность изменения параметров, в которой функция принимает значения меньше некоторого критического, например $R \leq 0,01$, другими словами, насколько широким является найденный оптимум. По результатам анализа чувствительности такую оценку сделать невозможно, так как с изменением одного из параметров остальные остаются оптимальными, что редко встречается на практике. Статистический анализ позволяет получить информацию о рассеянии выходного параметра в зависимости от случайного разброса всех независимых параметров в некоторых заданных пределах относительно оптимума. Для этого в программе оптимизации методом случайного поиска генератор псевдоравномерного распределения в окрестности начальной точки был заменен генератором псевдонормального распределения, наиболее отвечающим характеру разброса независимых параметров. За исходную точку взята оптимальная точка, размеры окрестности задавались по уровню

0,1. При изменении α , k , ds в пределах $\pm 10\%$ от оптимальных значений часть поглотителей имела $R > 0,01$. В случае сужения частотного диапазона до $\pm 1\%$ меньше 2% поглотителей имели коэффициент отражения больше заданного. Таким образом, найденный оптимум имеет устойчивые и воспроизводимые характеристики.

Рассмотренная методика применима при анализе слоистых поглотителей, у которых изменяются не только мнимая часть диэлектрической проницаемости, но и действительная, а также значения комплексной магнитной проницаемости. Результаты работы могут быть использованы в САПР слоистых радиопоглощающих материалов.

Список литературы: Терещенко А. И., Письменный Г. В., Мелихов П. И. Применение метода ориентированных графов для расчета параметров слоистых сред на СВЧ // Радиотехника.— 1986.— Вып. 79.— С. 78 — 83. 2. Ковнеристый Ю. К., Лазарева И. Ю., Раваев А. А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения.— М.: Наука, 1982.— 164 с. 3. Шун Т. Решение инженерных задач на ЭВМ.— М.: Мир, 1982.— 238 с. 4. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн. / Под ред. И. П. Норенкова.— М.: Высш. шк., 1986.— Кн. 5: П. К. Кузьмик, В. Б. Маничев. Автоматизация функционального проектирования.— 144 с. 5. Бейко И. В., Бублик Б. Н., Зинько П. Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации.— К.: Вища шк., 1983.— 512 с.

Поступила в редколлегию 12.12.86