

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1.	
ОБЩАЯ ТЕОРИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ	11
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ	11
1.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН МЕЖДУ ДВУМЯ	
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ	15
1.3. СКАЛЯРНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА	
ДЛЯ РЕГУЛЯРНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	
И ИХ ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ	19
1.4. ДИСПЕРСИЯ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ	26
1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ СВОБОДНЫХ ВОЛН	
В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	32
1.6. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ	
ДЛЯ МЕМБРАННОЙ ФУНКЦИИ.....	37
1.7. СПЕКТР ТИПОВ ВОЛН	
В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ И ИХ ОРТОГОНАЛЬНОСТЬ	41
1.8. ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ	
И ЗАТУХАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ.....	49
Контрольные вопросы	56
ГЛАВА 2.	
ОДНОСВЯЗНЫЕ ЗАКРЫТЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	58
2.1. Прямоугольный волновод.....	58
2.2. Основной тип волны	
В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ.....	65
2.3. Круглый волновод	71
2.4. Волноводы со сложной формой	
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.....	81
Контрольные вопросы	87

ГЛАВА 3.

МНОГОСВЯЗНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	89
3.1. ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ В МНОГОСВЯЗНЫХ ЛП.....	89
3.2. НОРМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛП	96
3.3. ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ И ЗАТУХАНИЕ	99
3.4. ДВУХПРОВОДНАЯ СИММЕТРИЧНАЯ ЛП	102
3.5. КОАКСИАЛЬНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ.....	105
3.6. РАДИАЛЬНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ	111
3.7. ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	113
Контрольные вопросы	123

ГЛАВА 4.

ОТКРЫТЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	125
4.1. МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОТКРЫТЫЕ ЛП	125
4.2. Общие свойства	
диэлектрических волноводов.....	127
4.3. Плоский диэлектрический волновод	131
4.4. Круглый диэлектрический волновод	140
4.5. Структура и параметры	
диэлектрических волноводов. Световоды	146
4.6. Квазиоптические линии передачи	151
Контрольные вопросы	153

ГЛАВА 5.

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	154
5.1. Условия существования медленных волн	154
5.2. Свойства симметрии замедляющих систем...	159
5.3. Волны в периодических структурах.	
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ГАРМОНИКИ	166
5.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ	
замедляющих систем	175
5.5. Основные типы замедляющих систем	182
5.5.1. Гребенчатые замедляющие системы.....	182
5.5.2. Спиральные замедляющие системы	189
5.5.3. Стержневые замедляющие системы	194
5.5.4. Резонаторные замедляющие системы.....	201
Контрольные вопросы	207

ГЛАВА 6.**ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ.....209****6.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

и основные типы объемных резонаторов 209

6.2. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ

свободных колебаний в резонаторах 215

6.3. ЗАКРЫТЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ 225**6.4. ЗАКРЫТЫЕ**

аксиально-симметричные резонаторы 237

6.5. Диэлектрические резонаторы 248**6.6. Открытые волноводные резонаторы 251****6.7. Открытые зеркальные резонаторы 259**

Контрольные вопросы 262

ГЛАВА 7.**НЕРЕГУЛЯРНЫЕ****ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....264****7.1. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ**

264

7.2. ЭЛЕМЕНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

268

7.3. ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

в объемных резонаторах 272

7.4. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ

в ЛП и резонаторах 279

7.5. ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

285

7.6. НЕОДНОРОДНОСТИ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ.....292

Контрольные вопросы 302

ГЛАВА 8.**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ****ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

304

8.1. ПОСТАНОВКА

начально-краевых задач электродинамики

и основные этапы их решения 304

8.2. ОСНОВНЫЕ КЛАССЫ

начально-краевых задач электродинамики

и их математическая формулировка 307

8.3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

краевых задач электродинамики 313

8.4. МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

325

8.5. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

330

8.6. СТРУКТУРА ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	337
8.7. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	342
Контрольные вопросы	346
ЛИТЕРАТУРА	348

ПРЕДИСЛОВИЕ

Направленные электромагнитные волны играют очень важную роль в современных микроволновых устройствах. Они позволяют существенно сократить потерю энергии при распространении от генератора к потребителю, ограничивая направления распространения волн в одном или двух измерениях. Начало теории и техники направленных волн было положено английским физиком О. Хэвисайдом. В 1874–1881 гг. он опубликовал ряд работ, в которых были предложены «телефрафные уравнения», описывающие распространение сигналов по длинным двухпроводным линиям. Это было очень важно в то время, когда телеграфные кабели быстро соединяли города и страны и был проложен первый трансатлантический кабель. Работы Хэвисайда позволили уменьшить искажения сигналов в этих кабелях и тем самым повысить скорость передачи информации.

В настоящее время в микроволновой технике используются самые разные типы линий передачи, но при анализе распространения сигналов в них до сих пор используются обобщенные телеграфные уравнения как частный случай уравнений Максвелла.

В зависимости от частотного диапазона, мощности передаваемого сигнала и допустимого затухания в микроволновой технике используют самые разные направляющие системы. Эти системы ограничивают распространение электромагнитных волн в одном или двух измерениях. Изучение законов распространения волн в этих системах составляет существенную часть теории направленных электромагнитных волн.

Изучение электромагнитных колебаний в объемных резонаторах — устройствах, в которых распространение

электромагнитных волн ограничено во всех направлениях, составляет другую важную часть теории направленных волн. Наконец, изучение распространения электромагнитных волн в новых материалах, таких как фотонные кристаллы, двумерные материалы типа графена, составляют еще одну, быстро развивающуюся область теории направленных волн.

Настоящий учебник, как надеется автор, позволит студентам достаточно подробно ознакомиться с направленными электромагнитными волнами и системами, ограничивающими их распространение в одном или двух измерениях. Он написан на основе лекций, читаемых автором для магистрантов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ).

Автор выражает глубокую благодарность всем, кто помогал ему написать эту книгу, — коллегам по университету и работникам издательства.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что первые устройства, осуществляющие направленную передачу электромагнитных волн, появились еще в конце XIX в., быстрое развитие этой отрасли науки и техники началось только в 1930-е гг., когда появилась возможность создавать электромагнитные колебания высокой и сверхвысокой частоты. Большой импульс получило развитие направленных волн в связи с совершенствованием радаров в годы Второй мировой войны.

В настоящее время устройства, ограничивающие распространение электромагнитных волн в одном или двух измерениях (направляющие системы), широко используются в радиолокационных станциях, системах телекоммуникаций, в том числе системах связи с искусственными космическими объектами, в радиотелескопах, радиоспектроскопии, ускорителях заряженных частиц, в биологии и медицине, в технологических установках тепловой обработки материалов.

Типы направляющих систем, используемых в микроволновых устройствах, зависят от частоты сигналов. На сравнительно низких частотах (до 3 ГГц) обычно используются двухпроводные или коаксиальные линии передачи. На более высоких частотах используются прямоугольные волноводы и волноводы сложной формы (П-образные, желобковые, гребневые). На еще более высоких частотах (100 ГГц и выше) используются диэлектрические волноводы, волноводы на основе фотонных кристаллов, квазиоптические линии передачи.

Для передачи энергии на небольшие расстояния (в пределах печатной платы или интегральной схемы) используются микрополосковые и щелевые линии передачи.

дачи, копланарные волноводы, а также передающие линии на основе графена. Большим разнообразием форм и размеров отличаются объемные резонаторы.

В передачах, которые используются, в частности, для создания замедляющих систем — линий передачи, фазовая скорость волн меньше скорости света в среде, заполняющей эти линии.

Основы теории направляющих систем заложили Л. Хаксли, Л. Бриллуэн, С. Рамо, Дж. Унинери, Р. Фано, Дж. Саутворт, Дж. Гинзтон и ряд других ученых. Большой вклад в теорию направляющих систем внесли Л. А. Вайнштейн, Ю. А. Юров, Б. В. Каценеленбаум, Г. В. Кисунько, В. В. Никольский, Р. А. Силин и многие другие исследователи.

Для анализа электромагнитного поля во всех этих устройствах используются уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями. Во многих случаях аналитического решения этих уравнений не существует и приходится решать их численно с помощью специальных компьютерных программ.

В данной книге рассматриваются основные типы микроволновых линий передачи, замедляющих систем и резонаторов, их параметры и характеристики, описываются численные методы решения уравнений Максвелла.

ГЛАВА 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

До сих пор рассматривались электромагнитные поля и волны, существующие в неограниченном пространстве. Однако часто требуется передавать электромагнитную энергию в определенном направлении. Эта задача решается с помощью специальных технических устройств — *направляющих систем*, обеспечивающих распространение волн только в одном или двух координатных направлениях. К таким системам относятся, в частности, устройства, создающие волновые пучки. Отметим, что существуют и природные направляющие системы. Примером может служить воздушное пространство между поверхностью и ионосферой Земли. Последовательно отражаясь от ионосферы и поверхности Земли, радиоволны декаметрового диапазона огибают земную поверхность, благодаря чему осуществляется радиосвязь на большие расстояния при незначительной мощности передатчиков.

Более точно *электромагнитной направляющей системой* называют совокупность металлических и диэлектрических тел, осуществляющих передачу (канализацию) электромагнитной энергии в определенных направлениях с малым затуханием без излучения в окружающее пространство. Примером могут служить две параллельные, идеально проводящие плоскости $z = \text{const}$. Ясно, что электромагнитная волна (свет) может распространяться между этими плоскостями (т. е. в

плоскости xOy) в любом направлении, но не может распространяться в направлении оси z .

Важный класс направляющих систем составляют *линии передачи (ЛП)*, обеспечивающие распространение энергии только в одном направлении — вдоль своей оси. Линии передачи различаются конфигурацией и материалом тел, из которых они образованы. В зависимости от конструкции и материалов направляющие системы и ЛП разделяют на отдельные типы.

Регулярными считают ЛП, свойства которых вдоль направления распространения неизменны или меняются по периодическому закону. В первом случае регулярную ЛП называют *продольно-однородной*, во втором — *периодической*. Если свойства ЛП вдоль направления распространения меняются по произвольному закону, ее считают *нерегулярной (продольно-неоднородной)*. В настоящей книге рассматриваются в основном регулярные ЛП.

Если электромагнитное поле ЛП не ограничено в направлениях, перпендикулярных направлению передачи энергии, то ее называют *открытой*. В *закрытых* ЛП электромагнитное поле существует только внутри замкнутой металлической оболочки.

В соответствии с материалом тел, образующих ЛП, их делят на *металлические, диэлектрические и металлодиэлектрические*.

Свойства линий передачи существенно зависят от связности их поперечного сечения. Если любой контур, расположенный в этом сечении, можно стянуть в точку, не пересекая границу раздела диэлектрик — металл, то ЛП называют *односвязной*. В противном случае ЛП *многосвязна*, причем степень связности равна числу различных типов контуров, которые можно выделить в ее поперечном сечении. Различают также ЛП, заполненные однородным в поперечном сечении диэлектриком (*поперечно-однородные ЛП*), и ЛП с *поперечно-неоднородным заполнением*.

Проиллюстрируем приведенную классификацию примерами.

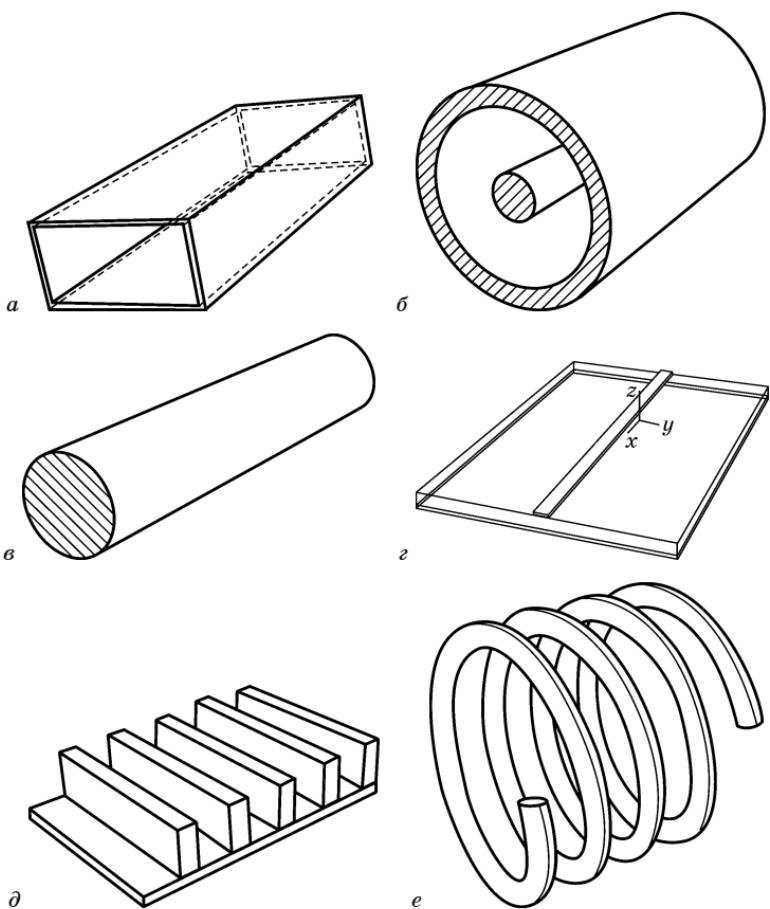


Рис. 1.1
Некоторые типы регулярных линий передачи

На рисунке 1.1а изображен *прямоугольный волновод* — закрытая односвязная металлическая ЛП. Как будет показано, по таким металлическим трубам различного поперечного сечения могут при определенных условиях распространяться электромагнитные волны. *Коаксиальный волновод* (рис. 1.1б) — хорошо известный пример закрытой металлической двухсвязной ЛП. *Круглый диэлектрический волновод (ДВ)* (рис. 1.1в) — открытая диэлектрическая односвязная ЛП, которая также может использоваться для передачи электромагнитной энергии

на достаточно высоких частотах, включая оптический диапазон. На рисунке 1.1 ε изображена открытая двухсвязная поперечно-неоднородная металлодиэлектрическая ЛП, называемая *микрополосковой линией передачи (МПЛ)*. Такие ЛП широко используются в интегральных схемах микроволнового диапазона. Все перечисленные типы линий передачи продольно однородны.

Гребенчатая (рис. 1.1 δ) и *спиральная* (рис. 1.1 ε) ЛП относятся к периодическим линиям передачи. В микроволновой электронике они используются для замедления электромагнитных волн. Существуют и двухмерно периодические направляющие системы, некоторые конструкции которых показаны на рисунке 1.2 a (*штыревая*) и 1.2 b (*гребенчатая*).

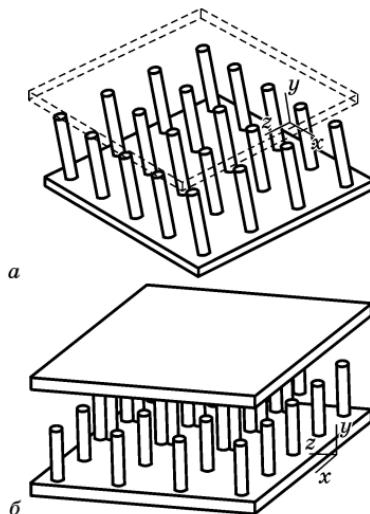


Рис. 1.2
Двухмерно периодические направляющие системы

Параметры нерегулярных ЛП могут меняться скачком (соединение двух прямоугольных волноводов с различными поперечными размерами, рис. 1.3 a) и плавно (круглый волновод с плавным изменением радиуса трубы, рис. 1.3 b). Такую ЛП называют *плавно-неоднородной*.

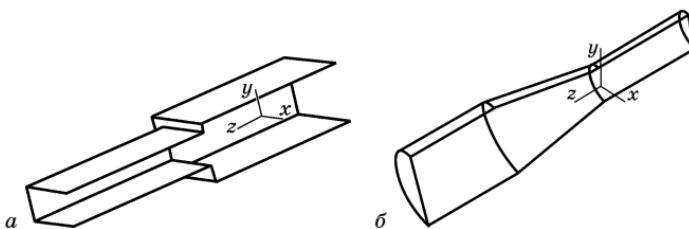


Рис. 1.3
Нерегулярные линии передачи

1.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН МЕЖДУ ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся между двумя параллельными, идеально проводящими плоскостями P и Q , многократно отражаясь от них под углом θ (рис. 1.4). Для простоты считаем, что пространство между плоскостями заполнено воздухом ($n = 1$). Предположим, что волна линейно поляризована так, что вектор \mathbf{E} параллелен плоскостям P и Q ($\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_y$). В точке C происходит интерференция волны, падающей на нижнюю плоскость в точке O и отраженной от этой плоскости. Фронты этих волн AC и BC показаны на рисунке 1.4 пунктиром. Из граничных условий на идеально проводящей поверхности следует, что суммарное электрическое поле в точке C равно нулю. Отсюда сдвиг фазы волны $\Delta\varphi$ на пути AOB должен быть кратен π :

$$\Delta\varphi = 2kl - \pi = \pi(2m - 1), \quad m = 1, 2, \dots,$$

где l — длина отрезка AO . Фазовый угол π в левой части учитывает тот факт, что коэффициент отражения от идеально проводящей поверхности равен минус единице, т. е. фаза волны при отражении меняется на 180° . Приведя подобные члены, получим

$$l = \pi m / k = m\lambda / 2,$$

где $\lambda = c/f$ — длина волны в среде, заполняющей направляющую систему, f — частота изменения поля волны.

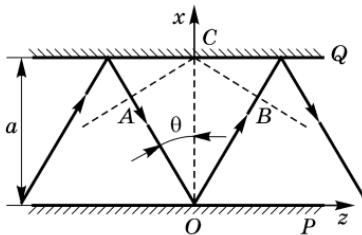


Рис. 1.4

Распространение электромагнитной волны между двумя параллельными, идеально проводящими плоскостями

Из треугольника AOC следует, что $l = a \cos\theta$, где a — расстояние между плоскостями. Отсюда

$$\cos\theta = m\lambda/(2a). \quad (1.1)$$

Таким образом, угол отражения связан с длиной волны, а следовательно, и с частотой плоской электромагнитной волны. На высоких частотах ($m\lambda \ll a$) угол отражения $\varphi \ll \pi/2$, и волна распространяется почти прямолинейно. По мере увеличения длины волны угол φ уменьшается и при $\lambda = 2a/m$ становится равным нулю. На более низких частотах правая часть (1.1) становится больше единицы, т. е. не существует такого значения угла φ , при котором выполняются граничные условия для обеих плоскостей.

Электромагнитное поле между плоскостями представляет собой суперпозицию падающих и отраженных волн:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &= \dot{E}_0 [e^{-ikx \cos\varphi} - e^{-ikx \cos\varphi}] e^{-ikz \sin\varphi} \mathbf{e}_y = \\ &= 2i\dot{E}_0 \sin(kx \cos\varphi) e^{-ikz \sin\varphi} \mathbf{e}_y = \\ &= 2i\dot{E}_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) e^{-ikz \sin\varphi} \mathbf{e}_y; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{H}} &= Y_0 \dot{E}_0 [(\mathbf{e}_x \sin\varphi + \mathbf{e}_z \cos\varphi) e^{-ikx \cos\varphi} - \\ &\quad - (\mathbf{e}_x \sin\varphi - \mathbf{e}_z \cos\varphi) e^{-ikx \cos\varphi}] e^{-ikz \sin\varphi} \mathbf{e}_y \\ &= 2Y_0 \dot{E}_0 \left(i\mathbf{e}_x \sin\varphi \sin\frac{m\pi x}{a} + \mathbf{e}_z \cos\varphi \cos\frac{m\pi x}{a} \right) e^{-ikz \sin\varphi}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru