

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	13
Глава 1. Основные методы расчета распространения волн через многослойные структуры	19
1.1. Общий обзор различных методов расчета	19
1.1.1. Метод прямой	19
1.1.2. Метод усреднения	20
1.1.3. Метод характеристической матрицы	21
1.1.4. Метод импеданса	21
1.1.5. Метод исключения	22
1.1.6. Метод пошагового алгоритма	22
1.1.7. Метод переотражений	23
1.2. Сравнительные характеристики различных методов расчета	23
1.2.1. Метод прямой (параллельный)	23
1.2.2. Метод усреднения (параллельный)	24
1.2.3. Метод матрицы (последовательный)	24
1.2.4. Метод импеданса (последовательный)	24
1.2.5. Метод исключения (последовательный)	25
1.2.6. Метод пошагового алгоритма (последовательный)	25
1.2.7. Метод переотражений (параллельный)	26
Выводы по главе 1	26
Глава 2. Укороченный метод пошагового алгоритма	27
2.1. Получение амплитуд распространяющихся волн прямым методом	27
2.1.1. Две среды, разделенные одной границей	28
2.1.2. Три среды, разделенные двумя границами	29
2.1.3. Четыре среды, разделенные тремя границами	31
2.1.4. Пять сред, разделенные четырьмя границами	33
2.2. Последовательное вычисление детерминантов	35
2.2.1. Нулевые детерминанты	35
2.2.2. Первые детерминанты	37
2.3. Математический аппарат укороченного алгоритма	40
2.3.1. Геометрия задачи	40
2.3.2. Решение прямым методом	41
2.3.3. Последовательные действия алгоритма	42
2.3.4. Решения для трех, четырех и пяти сред	43
2.4. Схема реализации алгоритма на ЭВМ	45

2.5. Применение укороченного алгоритма для вычисления амплитуд внешних волн	46
2.5.1. Линейно-ступенчатое измерение волнового числа	46
2.5.2. Интерференционное отражение падающей волны при воздействии встречной волны	49
2.5.3. Изменение фазы встречной волны	49
2.5.4. Изменение параметров структуры	50
2.6. Применение алгоритма для исследования свойств неоднородной среды.	53
2.6.1. Общий характер зависимостей амплитуд внешних волн от числа слоев структуры	53
2.6.2. Критическое число ступенек при различном интервале волнового числа	55
2.6.3. Параметры отражения при малом изменении длины волны	57
2.6.4. Осцилляции отражения при малой длине волны	58
2.6.5. Соотношение между числом ступенек и точностью приближения	60
2.7. Критерий выбора оптимального числа ступенек при ступенчатом приближении неоднородной среды	63
2.8. Обобщение на случай электромагнитных волн	64
Выводы по главе 2	65
Глава 3. Полный метод пошагового алгоритма	67
3.1. Математический аппарат полного алгоритма	67
3.1.1. Общая схема полного алгоритма	68
3.1.2. Схема пошагового получения детерминантов	68
3.1.3. Детерминанты для трех, четырех и пяти сред	71
3.2. Схема реализации алгоритма на ЭВМ.	74
3.3. Применение алгоритма для исследования волн в структуре с линейным изменением волнового числа.	74
3.3.1. Линейное нарастание волнового числа	74
3.3.2. Роль степени нарастания волнового числа	78
3.3.3. Линейное убывание волнового числа	80
3.3.4. Влияние падения волны встречного направления	82
3.4. Локальная неоднородность структуры	86
3.5. Роль потерь энергии в структуре	89
3.6. Роль геометрической длины структуры	91
3.7. Распространение волн через многослойные структуры с неоднородностью степенного вида	93
3.7.1. Поворот графика функции относительно оси симметрии второго порядка	93
3.7.2. Поворот графика степенной функции	95
3.7.3. Построение ступенчатой зависимости волнового числа от координаты	96
3.7.4. Отражение и прохождение волн через многослойные структуры с неоднородностью степенного вида	98
Выводы по главе 3	100

Глава 4. Применение метода алгоритма для расчета распространения одномерных волн через периодические структуры	104
4.1. Общая геометрия структуры с периодической неоднородностью	104
4.2. Амплитуды волн в крайних слоях структуры	106
4.2.1. Общая геометрия структуры	106
4.2.2. Изменение среднего волнового числа	106
4.2.3. Амплитуды волн внутри полос непропускания	106
4.3. Амплитуды волн в различных слоях структуры.	108
4.3.1. Изменение номера слоя структуры	108
4.3.2. Изменение среднего волнового числа	110
4.4. Неоднородность пилообразного вида	112
4.4.1. Общая геометрия пилообразной неоднородности	112
4.4.2. Амплитуды волн в различных слоях структуры	114
4.4.3. Сопоставление со случаем меандровой неоднородности . .	114
4.5. Пространственная модуляция амплитуды.	115
4.5.1. Условия существования пространственной модуляции . . .	115
4.5.2. Основные режимы пространственной модуляции	116
4.5.3. Интервалы существования различных режимов	123
4.5.4. Динамика переходов между режимами	124
4.5.5. Структура областей существования режимов по волновому числу	127
4.6. Отражающие свойства структуры.	127
4.7. Пропускающие свойства структуры.	130
4.7.1. Замечание о частотных свойствах структур с периодическими неоднородностями	130
Выводы по главе 4	132
Глава 5. Применение метода алгоритма для расчета распространения электромагнитных волн через периодические структуры	134
5.1. Геометрия задачи	134
5.2. Обобщение постановки задачи на случай электромагнитных волн	135
5.2.1. Введение электродинамических параметров	135
5.2.2. Электродинамические параметры в случае проводящей среды	136
5.2.3. Индексация волн прямого и обратного направлений	137
5.2.4. Особенности геометрии задачи для случая электромагнитных волн	138
5.3. Схема расчета методом пошагового алгоритма	139
5.3.1. Общая схема пошагового алгоритма	139
5.3.2. Аналитическая реализация алгоритма	140
5.4. Амплитуды волн в крайних слоях структуры	142
5.5. Изменение числа барьеров.	145
5.5.1. Минимальные значения амплитуды	145
5.5.2. Максимальные значения амплитуды	148

5.6. Распределение амплитуд в слоях при большой вариации параметров	149
5.6.1. Переход между распределениями амплитуды	152
5.7. Слабая и сильная неоднородности.	155
5.8. Изменение соотношения проницаемостей слоев.	158
Выводы по главе 5	159
Глава 6. Применение метода алгоритма для расчета распространения электромагнитных волн в среде с магнитными периодическими неоднородностями	162
6.1. Геометрия задачи	162
6.2. Электромагнитные волны в магнитной среде	163
6.3. Скалярная магнитная проницаемость	163
6.3.1. Частотные характеристики при малой проницаемости	163
6.3.2. Распределение амплитуд в слоях при большой вариации параметров	164
6.4. Тензорная магнитная проницаемость	167
6.4.1. Волна в среде с тензорными параметрами	167
6.4.2. Ориентация волнового вектора по нормали к оси гиротропии	169
6.4.3. Поля гиромангнитной волны	170
6.4.4. Полярная система координат	171
6.4.5. Импедансы и адмиттансы	172
6.5. Падение гиромангнитной волны на границу раздела двух сред	173
6.6. Тензор магнитной проницаемости	176
6.6.1. Характерные частоты	178
6.6.2. Параметр расходимости	179
6.6.3. Три интервала параметра затухания	179
6.6.4. Затухание слабое	180
6.6.5. Затухание среднее	182
6.6.6. Затухание сильное	184
6.7. Распределение амплитуд	186
6.8. Баланс потоков энергии	188
6.9. Отражение и прохождение в широком диапазоне частот.	191
Выводы по главе 6	194
Глава 7. Применение метода алгоритма для расчета распространения волн в среде с периодическими неоднородностями, обладающими диссипацией	197
7.1. Геометрия задачи	197
7.2. Распределение амплитуд для одномерной волны	198
7.2.1. Роль комплексного характера волнового числа	201
7.2.2. Отражающие и пропускающие свойства структуры для одномерной волны	202

7.3. Электромагнитная волна в проводящей среде	204
7.3.1. Волновое число и адмиттанс в присутствии проводимости	206
7.3.2. Характер проникновения волны в металл	209
7.4. Распределение амплитуд для электромагнитной волны	209
7.4.1. Сочетание различных видов распределений	214
7.5. Сравнение эффективности диссипации	215
7.6. Отражающие и пропускающие свойства структуры для электромагнитной волны	218
7.6.1. Диссипативный резонанс	222
7.6.2. Аномалия баланса потоков энергии	222
7.7. Особенности случая металлической проводимости	224
7.7.1. Распределение амплитуд при металлической проводимости	224
7.7.2. Отражающие и пропускающие свойства структуры при металлической проводимости	227
Выводы по главе 7	230
Глава 8. Некоторые общие свойства одномерных и электромагнитных волн	233
8.1. Волновые уравнения для проводящей среды	233
8.1.1. Гармоническая зависимость от времени	235
8.1.2. Замечание о комплексных волновых числах	236
8.1.3. Комплексное волновое число при гармонической зависимости от времени	238
8.1.4. Разделение переменных	238
8.2. Одномерная волна в среде с затуханием	239
8.2.1. Амплитуда волны спадает в пространстве	240
8.2.2. Амплитуда волны спадает во времени	241
8.2.3. Физическая реализация полученных решений	242
8.3. Возможные виды решения для волны, спадающей в пространстве	243
8.3.1. Экспоненциальное решение	243
8.3.2. Тригонометрическое решение	245
8.4. Распространение электромагнитной волны через границу, разделяющую две среды	246
8.4.1. Общая геометрия задачи	247
8.4.2. Решения волновых уравнений	247
8.4.3. Коэффициенты отражения и прохождения по полям	250
8.4.4. Коэффициенты отражения и прохождения по энергиям	251
8.5. Распространение электромагнитной волны через две границы, разделяющие три среды	252
8.5.1. Общая геометрия задачи	252
8.5.2. Решения волновых уравнений	253
8.5.3. Поля распространяющихся волн	254
8.5.4. Коэффициенты отражения и прохождения по электрическому полю	255
Выводы по главе 8	256

Глава 9. Общие энергетические характеристики распространяющихся волн	258
9.1. Общие определения энергетических характеристик распространяющейся волны	258
9.1.1. Объемная плотность энергии волны	258
9.1.2. Поток энергии волны	259
9.1.3. Плотность потока энергии волны	261
9.1.4. Вектор Умова–Пойнтинга	262
9.2. Энергетические характеристики волны в струне	262
9.3. Энергетические параметры электромагнитной волны	265
9.3.1. Общие соотношения для электромагнитной волны	265
9.3.2. Объемная плотность энергии волны	266
9.3.3. Усредненная по времени объемная плотность энергии волны	267
9.3.4. Поток энергии волны	268
9.3.5. Плотность потока энергии волны	268
9.3.6. Усредненная по времени плотность потока энергии волны	269
9.4. Вектор Пойнтинга для электромагнитной волны	270
9.4.1. Получение выражения для вектора Пойнтинга из уравнений электродинамики	270
9.4.2. Соотношение полученного выражения для вектора Пойнтинга с его общим определением	273
9.4.3. Усредненный по времени вектор Пойнтинга	274
9.4.4. Вектор Пойнтинга при экспоненциальном решении	274
9.5. Общие свойства плотности потока энергии распространяющихся волн	276
9.5.1. Замечание о размерности	278
9.6. Общие правила работы с потоками энергии электромагнитной волны	279
9.6.1. Некоторые дополнительные замечания	281
Выводы по главе 9	281
Глава 10. Энергетические характеристики распространения волны через границы раздела сред с комплексными параметрами	285
10.1. Общий обзор работ по энергетическим характеристикам волн в многослойных структурах	285
10.2. Энергетические параметры — традиционные формы определения	288
10.2.1. Одна граница раздела сред	288
10.2.2. Две границы раздела сред	293
10.3. Баланс энергии на границах раздела сред	294
10.3.1. Баланс на одной границе раздела сред	295
10.3.2. Баланс на двух границах раздела сред	295
10.4. Энергетические коэффициенты, характеризующие распространение одномерной волны через две границы раздела трех сред	300
10.4.1. Геометрия задачи и амплитуда распространяющихся волн	300

10.4.2. Потоки энергии распространяющихся волн	302
10.4.3. Энергетические коэффициенты (аналитические выражения)	303
10.4.4. Совпадение конечных точек структуры с границами раздела сред	305
10.4.5. Энергетические коэффициенты при различных параметрах сред	305
10.4.6. Влияние диссипации во второй среде	307
10.4.7. Произвольные начальная и конечная точки распространения волн	309
10.5. Основные правила работы с потоками энергии волн, распространяющихся в слоистой среде	311
10.5.1. Общая постановка задачи	311
10.5.2. Нахождение амплитуд волн	311
10.5.3. Нахождение потоков энергии	312
10.5.4. Баланс энергии на точечной границе	312
10.5.5. Баланс энергии на участке, ограниченном двумя точечными границами	312
10.5.6. Баланс энергии на структуре, содержащей несколько однородных участков, разделенных точечными границами	313
Выводы по главе 10	313
Глава 11. Энергетические характеристики распространения встречных волн через многослойную структуру	315
11.1. Баланс потоков энергии для встречных волн в структуре с произвольным числом слоев	315
11.1.1. Геометрия и постановка задачи	316
11.1.2. Балансы потоков энергии на границах внутри многослойной структуры	317
11.1.3. Балансы потоков энергии на многослойной структуре в целом	319
11.2. Энергетические коэффициенты выхода при падении встречных волн на многослойную структуру	321
11.2.1. Общая постановка задачи	321
11.2.2. Коэффициенты выхода для трех сред	322
11.2.3. Коэффициенты выхода для произвольного числа сред	325
11.2.4. Интерпретация зависимости коэффициентов от толщины сред	327
Выводы по главе 11	333
Глава 12. Энергетические характеристики распространения электромагнитной волны через границы раздела сред с комплексными параметрами	334
12.1. Общее состояние работ по распространению волн в проводящей среде	334
12.2. Геометрия задачи	335
12.3. Амплитудные параметры распространяющихся волн	337

12.4. Традиционные энергетические параметры распространяющихся волн	338
12.5. Традиционные энергетические характеристики при изменении параметров сред	339
12.5.1. Диэлектрическая пластина между двух диэлектрических сред	339
12.5.2. Диэлектрическая пластина между двух проводящих сред	339
12.6. Комплексные энергетические параметры распространяющихся волн	340
12.7. Энергетические характеристики при изменении параметров сред	342
12.7.1. Диэлектрическая пластина между двух диэлектрических сред	342
12.7.2. Диэлектрическая пластина между двух проводящих сред	343
12.7.3. Проводящая пластина между двух проводящих сред	344
12.8. Замечание о возможном развитии исследований	345
Выводы по главе 12	346
Глава 13. Интерференционный поток энергии распространяющихся волн	348
13.1. История понятия интерференционного потока	348
13.2. Общие положения о потоке энергии	349
13.2.1. Поток энергии в непоглощающей среде	349
13.2.2. Поток энергии в поглощающей среде	349
13.2.3. Баланс энергии для непоглощающих сред	350
13.2.4. Баланс энергии для поглощающих сред	351
13.3. Механизмы формирования интерференционного потока	351
13.3.1. Механизм стоячих волн	351
13.3.2. Механизм фиктивного слоя	353
13.3.3. Дополнительное замечание	355
13.4. Потоки энергии при интерференции независимых волн	355
13.4.1. Замечание о дальнейшем изложении	356
13.5. Общая схема формирования интерференционного потока	356
13.5.1. Традиционное определение интерференционного потока	357
13.5.2. Неадекватность традиционного представления реальной картине распространения волн	358
13.5.3. Определение потока энергии для одномерной задачи	358
13.5.4. Образование интерференционного потока в области перекрытия двух волновых пучков	359
13.5.5. Корректное рассмотрение потока энергии в области перекрытия	361
13.5.6. Независимость потоков энергии в области перекрытия и некорректность понятия «интерференционный поток»	363
13.5.7. Потоки энергии электромагнитных волн	363
13.6. Законы сохранения в задаче о падении волны на границу раздела сред	363

13.7. Механическая аналогия задачи о падении волны на границу. . .	365
13.7.1. Математический аппарат обеих задач	366
13.7.2. Эквивалентность и различие законов сохранения для обеих задач	367
13.7.3. Качественная картина превышения в задаче о распространении волн	368
13.7.4. Качественная картина превышения в задаче о соударении шаров	369
Выводы по главе 13	369
Глава 14. Применение метода конечных разностей для расчета распространения волн в многослойной структуре	373
14.1. Уравнения электродинамики в конечных разностях	373
14.1.1. Волновые уравнения для полей	375
14.1.2. Замечание о представлении производных в виде конечных разностей	376
14.1.3. Последовательные выражения для электрического и магнитного полей	377
14.2. Сетка и шаблон для одномерной задачи.	378
14.2.1. Сравнение шаблона с разностными уравнениями	382
14.3. Число Куранта и импеданс	383
14.4. Полные конечно-разностные представления полей.	384
14.4.1. Замечание о других возможных вариантах шаблона	384
14.5. Представление задачи Даламбера в конечных разностях.	386
14.6. Схема машинного расчета задачи Даламбера	388
14.7. Графическое представление решения задачи Даламбера	390
14.7.1. Схема представления импульса	390
14.7.2. Иллюстрация развития во времени решения задачи Даламбера	391
14.7.3. Подавление отражения от края сетки	394
14.8. Формирование вторичного поля от импульсов различной формы	394
14.8.1. Импульс в виде равнобедренного треугольника	395
14.8.2. Импульс произвольной формы	397
14.8.3. Единичный импульс	399
14.9. Качественная картина задания единичного импульса	400
14.10. Компенсация вторичных импульсов магнитным полем	402
14.10.1. Единое расположение импульсов	402
14.10.2. Упреждающее расположение магнитного импульса	402
14.10.3. Заключительное замечание	403
14.11. Интерпретация компенсации вторичных импульсов на сетке	405
14.11.1. Отсутствие компенсации	405
14.11.2. Компенсация при едином расположении импульсов	406
14.11.3. Компенсация при упреждающем расположении магнитного импульса	407

14.12. Универсальный характер компенсации	408
14.12.1. Развитие вторичных импульсов без компенсации	409
14.12.2. Введение компенсирующих импульсов	410
14.13. Некоторые дополнительные свойства пилообразных структур . .	411
14.13.1. Распространение волн в обе стороны	412
14.13.2. Аддитивность пилообразных структур	413
14.14. Представление задачи Даламбера на плоскости координата– время.	414
14.14.1. Схема машинного расчета водопада	414
14.14.2. Водопад для задачи Даламбера без компенсации	415
14.15. Водопад для единичного импульса	417
14.15.1. Отсутствие компенсации	417
14.15.2. Введение компенсации	419
14.15.3. Единое расположение импульсов	419
14.15.4. Упреждающее расположение магнитного импульса	419
14.15.5. Формирование двух расходящихся лучей	420
14.16. Распространение волны через одну границу, разделяющую две среды.	422
14.16.1. Коэффициенты отражения и прохождения	424
14.16.2. Формирование дополнительных лучей	425
14.16.3. Заключительное замечание	426
Выводы по главе 14	427
Литература	431