

Содержание

Об авторах книги	20
Введение	21
Толковый словарь условных обозначений, используемых в книге	29
Глава 1. Основные положения	33
1.1 Импеданс стационарной линейной цепи с сосредоточенными параметрами	33
1.2 Отношение мощностей	35
1.3 Правила подобия	38
1.3.1 Масштабирование физических размеров	39
1.3.2 Масштабирование мощности	42
1.3.3 Изменение масштаба времени	43
1.3.4 Масштабирование импеданса цепи при сохранении неизменными напряжений в ней	47
1.3.5 Масштабирование диэлектрической проницаемости	49
1.3.6 Масштабирование магнитной проницаемости	52
1.4 Понятие резонанса	53
1.5 Дополнительная информация для искушенных: максимальный отклик линейной системы на цифровой входной сигнал	60
Глава 2. Параметры линий передачи	69
2.1 Телеграфные уравнения	71
2.1.1 Как здорово работает линия связи из колючей проволоки	76
2.1.2 Принцип сохранения токов	78
2.2 Вывод телеграфных уравнений	82
2.2.1 Определение волнового сопротивления Z_C	83
2.2.2 Частотная зависимость волнового сопротивления	85
2.2.3 Вычисление волнового сопротивления Z_C по известным значениям параметров R , L , G и C	86
2.2.4 Определение постоянной распространения	89
2.2.5 Определение постоянной распространения через параметры R , L , G и C	91

2.3	Идеальная линия передачи	93
2.4	Сопротивление по постоянному току	100
2.5	Проводимость утечки по постоянному току	103
2.6	Поверхностный эффект	104
2.6.1	Природа поверхностного эффекта	105
2.6.2	Вихревые токи в проводнике	109
2.6.3	Низкочастотное и высокочастотное приближения для последовательного сопротивления	111
2.7	Индуктивность, связанная с поверхностным эффектом	114
2.8	Моделирование внутреннего импеданса	116
2.8.1	Инженерные модели внутреннего импеданса	120
2.8.2	Особенности расчета в случае проводников прямоугольного поперечного сечения	123
2.9	Модель поверхностного эффекта в виде концентрических колец	125
2.9.1	Моделирование поверхностного эффекта	126
2.9.2	К вопросу о моделировании поверхностного эффекта	129
2.10	Эффект близости	130
2.10.1	Коэффициент близости	132
2.10.2	Эффект близости в случае коаксиального кабеля	136
2.10.3	Эффект близости в случае микрополосковых и полосковых линий	137
2.10.4	Еще несколько слов по поводу эффекта близости	137
2.11	Шероховатость поверхности	143
2.11.1	Степень влияния шероховатости поверхности	144
2.11.2	Пороговая частота эффекта шероховатости	145
2.11.3	Шероховатость материалов печатных плат	145
2.11.4	Контроль шероховатости	147
2.12	Влияние диэлектрика	149
2.12.1	Тангенс угла диэлектрических потерь	154
2.12.2	Правило смещения	155
2.12.3	Тангенс угла потерь однородной смеси диэлектриков	158
2.12.4	Вычисление тангенса угла потерь в случае, когда коэффициент заполнения q не известен	160
2.12.5	Причинность и соотношения функций цепи	161
2.12.6	Вычисление $ \epsilon_r $, соответствующего измеренному тангенсу угла потерь	167
2.12.7	Соотношения Крамерса–Кронига	173
2.12.8	Комплексная магнитная проницаемость	174
2.13	Последовательный импеданс возвратного проводника	174
2.14	Замедляющий режим во внутрикристалльных межсоединениях	176

Глава 3. Рабочие области	181
3.1 Модель распространения сигнала	182
3.1.1 Получение эквивалентных параметров для программ имитационного моделирования	188
3.2 Иерархия рабочих областей	189
3.2.1 Линия передачи всегда остается линией передачи	192
3.3 Необходимая математика: входной импеданс и передаточная функция	194
3.4 Область сосредоточенных параметров	198
3.4.1 Границы области сосредоточенных параметров	198
3.4.2 П-модель	200
3.4.3 Аппроксимация функции H разложением в ряд Тейлора	201
3.4.4 Входной импеданс (область сосредоточенных параметров)	203
3.4.5 Передаточная характеристика (область сосредоточенных параметров)	206
3.4.6 Переходная характеристика (область сосредоточенных параметров)	209
3.5 RC-область	212
3.5.1 Границы RC-области	213
3.5.2 Входной импеданс (RC-область)	215
3.5.3 Волновое сопротивление (RC-область)	216
3.5.4 Особенности поведения линии передачи в RC-области	217
3.5.5 Постоянная распространения (RC-область)	220
3.5.6 Коэффициент передачи (RC-область)	220
3.5.7 Нормированная переходная характеристика (RC-область)	222
3.5.8 Компромисс между длиной линии и скоростью передачи (RC-область)	223
3.5.9 Аналитическое выражение для переходной характеристики (RC-область)	224
3.5.10 Оценка величины задержки (RC-область)	225
3.6 LC-область (область постоянных потерь)	231
3.6.1 Границы LC-области	232
3.6.2 Волновое сопротивление (LC-область)	234
3.6.3 Влияние последовательного сопротивления на результаты рефлектометрических измерений	236
3.6.4 Постоянная распространения (LC-область)	240
3.6.5 Возможность возникновения сильных резонансов в LC-области	244
3.6.6 Согласование линии передачи, работающей в LC-режиме	247

3.6.7	Компромисс между длиной линии и скоростью передачи (LC-область)	252
3.6.8	Смешанный режим работы (LC- и RC-области)	252
3.7	Область поверхностного эффекта	253
3.7.1	Границы области поверхностного эффекта	254
3.7.2	Волновое сопротивление (область поверхностного эффекта)	255
3.7.3	Влияние поверхностного эффекта на результаты рефлектометрических измерений	257
3.7.4	Постоянная распространения (область поверхностного эффекта)	259
3.7.5	Возможность возникновения сильных резонансов в области поверхностного эффекта	263
3.7.6	Переходная характеристика (область поверхностного эффекта)	266
3.7.7	Компромисс между длиной линии и скоростью передачи (область поверхностного эффекта)	271
3.8	Область диэлектрических потерь	272
3.8.1	Границы области диэлектрических потерь	272
3.8.2	Волновое сопротивление (область диэлектрических потерь)	274
3.8.3	Влияние диэлектрических потерь на результаты рефлектометрических измерений	278
3.8.4	Постоянная распространения (область диэлектрических потерь)	279
3.8.5	Возможность возникновения сильных резонансов в области диэлектрических потерь	285
3.8.6	Переходная характеристика (область диэлектрических потерь)	287
3.8.7	Компромисс между длиной линии и скоростью передачи (область диэлектрических потерь)	291
3.9	Область волноводной дисперсии	292
3.9.1	Границы области волноводной дисперсии	292
3.10	Пограничные точки рабочих областей	294
3.11	Принцип эквивалентности передающих сред	297
3.12	Масштабирование проводниковых передающих структур на основе меди	303
3.13	Масштабирование волоконно-оптических кабелей	308
3.14	Линейная коррекция: пример кросс-платы с длинными печатными дорожками	309
3.15	Адаптивная коррекция: трансивер компании Accelerant Networks	314

Глава 4. Частотное моделирование	317
4.1 Прежде чем приступать к нелинейному моделированию	317
4.2 Методы приближенного преобразования Фурье	320
4.3 Квантование времени	322
4.4 Другие ограничения, налагаемые алгоритмом БПФ	325
4.5 Нормирование результатов выполнения процедуры БПФ	325
4.5.1 Вывод нормирующих коэффициентов ДПФ	326
4.6 Полезные парные функции преобразования Фурье	327
4.7 Эффект неадекватной частоты квантования по времени	331
4.8 Пример реализации частотного моделирования	333
4.9 Полезные мелочи	336
4.9.1 Что делать, если из-за большой величины групповой задержки сигнал выползает за пределы временного окна	336
4.9.2 Как выполнить преобразование в случае произвольной последовательности данных	336
4.9.3 Как сдвинуть временные кривые сигналов	337
4.9.4 Моделирование более сложных систем?	338
4.9.5 Моделирование дифференциальной передачи сигналов	338
4.10 Проверьте, правильно ли работает используемая вами программа БПФ	339
Глава 5. Печатные дорожки	341
5.1 Распространение сигнала в печатной линии передачи	343
5.1.1 Волновое сопротивление и постоянная задержки	343
5.1.2 Резистивные эффекты	344
5.1.3 Диэлектрические эффекты	359
5.1.4 Смешанное влияние поверхностных и диэлектрических потерь	375
5.1.5 Типы волн, отличные от TEM	377
5.2 Предельно достижимая длина линии передачи	385
5.2.1 Кодирование данных по стандарту SONET	390
5.3 Шумы и взаимные помехи в печатных линиях	394
5.3.1 Печатная дорожка: отражения	394
5.3.2 Перекрестные помехи в печатных линиях	424
5.4 Соединители, используемые в печатных платах	435
5.4.1 Согласованность	435
5.4.2 Зазоры вокруг сквозных отверстий	438
5.4.3 Измерения в разъемах	441
5.4.4 Клиновидные согласующие переходы	443
5.4.5 Разъемы двустороннего монтажа	448
5.4.6 Заземление экранов кабелей	449

5.5	Моделирование межслойных перемычек	452
5.5.1	Дифференциальные параметры межслойной перемычки	452
5.5.2	Три модели межслойной перемычки	455
5.5.3	Незадействованные межслойные перемычки	459
5.5.4	Расчетные данные емкости межслойной перемычки	461
5.5.5	Расчетные данные индуктивности межслойной перемычки	469
5.6	Будущее внутрикристалльных межсоединений	479
Глава 6. Дифференциальная передача сигналов		483
6.1	Однопроводные цепи	483
6.2	Двухпроводные цепи	490
6.3	Дифференциальная схема передачи сигналов	492
6.4	Дифференциальные и синфазные напряжения и токи	497
6.5	Скорость распространения дифференциального и синфазного сигналов	500
6.6	Синфазный баланс	500
6.7	Диапазон входного сигнала по синфазному напряжению	501
6.8	Превращение дифференциального сигнала в синфазный, и наоборот	502
6.9	Дифференциальное сопротивление	504
6.9.1	Связь между нечетным и развязанным сопротивлениями	507
6.9.2	Почему нечетное сопротивление всегда меньше развязанного сопротивления	508
6.9.3	Отражения на стыках дифференциальных линий передачи	508
6.10	Топологии двухпроводных печатных линий	510
6.10.1	Импеданс дифференциальной (микрострипной) структуры	511
6.10.2	Полосковая линия со связью по боковой стороне дорожек	516
6.10.3	Разнесение дорожек дифференциальной пары	524
6.10.4	Полосковая линия со связью по широкой стороне дорожек	528
6.11	Области применения дифференциальных печатных линий	533
6.11.1	Согласование с внешней симметричной линией дифференциальной передачи	534
6.11.2	Нейтрализация дребезга земли	535
6.11.3	Снижение уровня радиоизлучений с помощью дифференциальной передачи сигналов	535
6.11.4	Передача сигнала через разъем, создающий помехи	538

6.11.5	Уменьшение расфазировки тактовых импульсов	541
6.11.6	Снижение локальной перекрестной связи	543
6.11.7	Хороший справочник по линиям передачи	546
6.11.8	Дифференциальная передача синхросигналов	546
6.11.9	Дифференциальное согласование	548
6.11.10	Дифференциальная линия: разворот токов	552
6.11.11	Расфазировка, создаваемая поворотами дифференциальной пары дорожек	554
6.11.12	Когда задержка приносит пользу	556
6.12	Кабельные соединения оборудования	559
6.12.1	Плоские кабели на основе витой пары	561
6.12.2	Защищенность от больших напряжений сдвига земли	562
6.12.3	Подавление внешних радиочастотных помех	565
6.12.4	Дифференциальные приемники обладают исключительной нечувствительностью к потерям, обусловленным поверхностным эффектом, и иным высокочастотным потерям	566
6.13	Технология низковольтной дифференциальной передачи сигналов	568
6.13.1	Выходные уровни	568
6.13.2	Синфазный сигнал на выходе передатчика	570
6.13.3	Допустимый уровень синфазных помех	571
6.13.4	Допустимый уровень дифференциальных помех	571
6.13.5	Гистерезис	572
6.13.6	Требования к точности сопротивлений	572
6.13.7	Паразитные излучения дорожек	576
6.13.8	Время установления сигнала	577
6.13.9	Входная емкость	577
6.13.10	Расфазировка	577
6.13.11	Защита от нарушений режима работы	578
Глава 7. Общие стандарты кабельных сетей		581
7.1	Архитектура стандартных кабельных сетей	585
7.2	Расчет бюджета “сигнал-шум”	590
7.3	Словарь терминов, используемых в технике кабельных сетей	591
7.4	Предпочтительные комбинации типов кабеля	594
7.5	Часто задаваемые практические вопросы по кабельным сетям	595
7.6	Перекрещивание пар	597
7.7	Кабели, разрешенные к прокладке в нише над подвесными потолками	599
7.8	Прокладка кабелей на неохлаждаемом чердаке	601

7.9	Часто задаваемые вопросы: старые типы кабелей	601
Глава 8.	100-омный симметричный кабель на основе витой пары	605
8.1	Распространение сигнала в UTP-кабеле	607
8.1.1	Модель UTP-кабеля	609
8.1.2	Подгонка модели распространения сигнала в проводниковой линии	612
8.2	Пример линии передачи на неэкранированной витой паре: стандарт 10BASE-T	616
8.3	Шумы и взаимные помехи в кабельных сетях на основе неэкранированной 100-омной витой пары (UTP)	623
8.3.1	UTP-кабель: отражения на дальнем конце	624
8.3.2	UTP-кабель: отражения на ближнем конце	629
8.3.3	UTP-кабель: использование гибридных схем	637
8.3.4	UTP-кабель: перекрестная помеха на ближнем конце (NEXT)	644
8.3.5	UTP-кабель: внешние перекрестные помехи	648
8.3.6	UTP-кабель: перекрестная помеха на дальнем конце (FEXT)	649
8.3.7	Суммарная мощность перекрестных помех на ближнем конце (NEXT) и равноуровневых перекрестных помех на дальнем конце (ELFEXT)	653
8.3.8	UTP-кабель: радиочастотные помехи	653
8.3.9	UTP-кабель: паразитные излучения	658
8.4	Разъемы для UTP-кабелей	660
8.5	Вопросы, связанные с экранированием	664
8.6	Влияние повышенной температуры на характеристики UTP-кабеля категории 3	665
Глава 9.	150-омный кабель STP-A	667
9.1	Распространение сигнала в 150-омном кабеле STP-A	668
9.2	150-омный кабель STP-A: шумы и взаимные помехи	668
9.3	150-омный кабель STP-A: расфазировка	670
9.4	150-омный кабель STP-A: паразитное излучение и безопасность эксплуатации	671
9.5	150-омный кабель STP-A в сравнении с UTP-кабелем	672
9.6	Разъемы для 150-омного кабеля STP-A	673
Глава 10.	Коаксиальный кабель	677
10.1	Распространение сигнала в коаксиальном кабеле	679
10.1.1	Многожильные центральные проводники	690
10.1.2	Почему именно 50 Ом?	691

10.1.3	Отклики на статью “Почему именно 50 Ом?”	694
10.2	Шумы и наводки в коаксиальном кабеле	698
10.2.1	Коаксиальный кабель: отражения на дальнем конце	698
10.2.2	Коаксиальный кабель: радиочастотные наводки	699
10.2.3	Коаксиальный кабель: паразитное излучение	699
10.2.4	Коаксиальный кабель: вопросы безопасности	700
10.3	Разъемы для коаксиального кабеля	703
Глава 11. Волоконно-оптический кабель		709
11.1	Технология изготовления оптического волокна	710
11.2	Характеристики готового оптического волокна	712
11.3	Конструкция волоконно-оптического кабеля	714
11.4	Рабочие длины волны	717
11.5	Многомодовый волоконно-оптический кабель	719
11.5.1	Распространение сигнала в многомодовом оптическом волокне	721
11.5.2	Почему оптическое волокно с параболическим профилем показателя преломления лучше оптического волокна со ступенчатым профилем?	727
11.5.3	Стандарты на многомодовое оптическое волокно	729
11.5.4	Какими соображениями оправдывается использование 50-микронного оптического волокна	731
11.5.5	Бюджет оптических характеристик для многомодового волокна	733
11.5.6	Джиттер	750
11.5.7	Шум и взаимные помехи в многомодовой волоконно-оптической линии	752
11.5.8	Безопасность при работе с многомодовой волоконно-оптической линией связи	754
11.5.9	Многомодовое оптическое волокно с лазерным источником	754
11.5.10	VCSEL-диоды	758
11.5.11	Разъемы для многомодовых волоконно-оптических кабелей	759
11.6	Одномодовый волоконно-оптический кабель	761
11.6.1	Распространение сигнала в одномодовом волокне	762
11.6.2	Шум и взаимные помехи в одномодовом оптическом волокне	764
11.6.3	Безопасность при работе с одномодовой волоконно-оптической линией связи	764

11.6.4	Разъемы для одномодовых волоконно-оптических кабелей	764
Глава 12. Распределение сигналов тактовой синхронизации		765
12.1	Еще чипсов, пожалуйста	769
12.2	Элементарная математика расфазировки синхросигналов	771
12.3	Повторители тактовых импульсов	779
12.3.1	Активная коррекция расфазировки	784
12.3.2	Повторители тактовых импульсов с нулевой задержкой	786
12.3.3	Компенсация длины линии передачи	787
12.4	Сравнительный анализ задержек полосковой и микрополосковой линий	790
12.5	Важность согласования линий синхронизации	793
12.6	Влияние зоны неопределенности порога приемника синхросигнала	797
12.7	Эффект составной согласующей нагрузки	798
12.8	Преднамеренная коррекция задержки	801
12.8.1	Элементы фиксированной задержки	801
12.8.2	Настраиваемые элементы задержки	804
12.8.3	Автоматически программируемые элементы задержки	807
12.8.4	Зигзагообразные линии задержки	809
12.8.5	Взаимная связь изломов дорожки	812
12.9	Возбуждение одновременно нескольких линий, согласованных на стороне источника	816
12.9.1	Разветвлять или не разветвлять	820
12.9.2	Работа на две нагрузки	828
12.10	Шлейфовое распределение сигнала тактовой синхронизации	831
12.10.1	Подробный анализ шлейфовой схемы распределения сигнала тактовой синхронизации	834
12.11	Джиттер	840
12.11.1	Когда джиттер синхросигнала становится важным	843
12.11.2	Измерение джиттера сигнала тактовой синхронизации	858
12.12	Фильтрация напряжения питания источников синхросигналов, повторителей и систем ФАПЧ	870
12.12.1	Качественное питание	873
12.12.2	Чистое питание	876
12.13	Преднамеренная модуляция тактового сигнала	878
12.13.1	Отклики на статью “Преднамеренная модуляция тактового сигнала”	881
12.13.2	Тактовые сигналы, свободные от джиттера	884
12.14	Передача сигналов пониженного напряжения	886

12.15	Защита линий синхронизации от перекрестных помех	887
12.16	Снижение электромагнитных излучений	888
Глава 13. Средства и методы имитационного моделирования во временной области		
		893
13.1	“Звон” в новую эру	893
13.2	Процесс моделирования целостности сигнала	895
13.2.1	Как определить необходимый уровень детализации модели?	897
13.2.2	Что происходит после выделения параметров?	897
13.2.3	Предупреждение	899
13.3	Механизм, лежащий в основе моделирования	900
13.3.1	Шаг за шагом — вперед	902
13.3.2	Недостатки алгоритмов, используемых в программах моделирования типа SPICE	903
13.3.3	Линии передачи	906
13.3.4	Критическая оценка результатов моделирования	908
13.3.5	Используйте SPICE рационально	909
13.4	IBIS (Унифицированное описание внешних электрических параметров компонентов)	910
13.4.1	Что представляет собой IBIS	911
13.4.2	Кто создавал IBIS	912
13.4.3	Что нравится в IBIS	912
13.4.4	Что не нравится в IBIS	913
13.4.5	Как поддержать IBIS	914
13.5	IBIS: прошлое, настоящее и будущее	915
13.5.1	Исторический обзор развития IBIS	916
13.5.2	Сравнение со SPICE	917
13.5.3	Направление развития IBIS в будущем	918
13.6	IBIS: проблемы, связанные с интерполяцией	919
13.7	IBIS: проблемы, связанные с комбинационными коммутационными помехами	924
13.8	Проблема электромагнитной совместимости	927
13.8.1	Имитационное моделирование электромагнитных помех	927
13.9	Резонанс в структуре, образованной слоями питания и земли	929

Литература	933
На заметку	941
Приложение А. Создание отдела целостности сигналов	977
Приложение Б. Расчет углового коэффициента кривой потерь	981
Приложение В. Анализ методом четырехполюсников	983
В.1 Простые варианты цепей, имеющих отношение к линии передачи	985
В.2 Полностью скомпонованная линия передачи	987
В.3 Сложные конфигурации	989
Приложение Г. Точность П-модели	991
Г.1 П-модель линии передачи в LC-области	993
Приложение Д. Функция ошибок erf()	995
Предметный указатель	997