

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	11
<b>1. Электромагнитные волны</b> .....	13
1.1. Электромагнитное поле .....	14
1.1.1. Электрическое поле .....	14
1.1.2. Магнитное поле .....	15
1.1.3. Зависимость между электрическим и магнитным полями .....	15
1.1.4. Переменное электромагнитное поле .....	15
1.1.5. Плоские волны .....	16
1.1.6. Напряженность электрического поля .....	16
1.1.7. Поляризация электромагнитных волн .....	17
1.1.8. Классификация радиоволн .....	18
<b>2. Распространение электромагнитных волн</b> .....	19
2.1. Атмосфера Земли .....	19
2.1.1. Тропосфера .....	19
2.1.2. Стратосфера .....	20
2.1.3. Ионосфера .....	20
2.2. Поверхностная и пространственная волны .....	21
2.2.1. Распространение поверхностной волны .....	21
2.2.2. Распространение пространственной волны .....	21
2.3. Распространение коротких волн .....	25
2.3.1. Солнечная активность .....	25
2.3.2. Солнечная активность и ионосфера .....	28
2.3.3. Распространение волн любительских КВ диапазонов .....	32
2.4. Распространение метровых волн .....	34
2.4.1. Квазиоптическое распространение .....	34
2.4.2. Сверхдальняя связь .....	35
2.5. Распространение сверхдлинных радиоволн .....	39
2.6. Отражение, рефракция и дифракция .....	39
2.7. Замырение (фединг) .....	40
2.8. Разнесение .....	40
<b>3. Принцип действия и характеристики антенн</b> .....	43
3.1. Полуволновый вибратор .....	43
3.1.1. Распределение тока и напряжения в полуволновом вибраторе .....	43
3.1.2. Импеданс антенны .....	45
3.1.3. Сопротивление излучения .....	46
3.1.4. Полуволновый вибратор как колебательный контур .....	46
3.1.5. Коэффициент укорочения .....	47
3.1.6. Эффективные длина и высота полуволнового вибратора .....	49
3.2. Направленность и усиление антенны .....	50
3.2.1. Диаграмма направленности .....	50
3.2.2. Закономерности излучения полуволнового вибратора .....	52
3.2.3. Усиление и коэффициент направленности .....	57
3.3. Шумы антенн .....	62
3.4. Петлевой вибратор .....	64
3.5. Волновый вибратор .....	66
<b>4. Типы антенн</b> .....	69
4.1. Введение .....	69
4.2. Классификация антенн .....	69
4.3. Элементы излучателей .....	70
4.3.1. Простейшие излучатели .....	70
4.3.2. Линейные антенны .....	70
4.3.3. Фигурные антенны .....	70
4.3.4. Рамочные антенны .....	71
4.3.5. Щелевые антенны .....	71
4.3.6. Активные антенны .....	71
4.4. Групповые излучатели .....	71
4.4.1. Линейные группы .....	72
4.4.2. Плоскостные группы .....	72
4.4.3. Пространственные группы .....	72
4.4.4. Группы с сетевым питанием .....	72
4.5. Строение излучателей .....	72
4.5.1. Плоские структуры .....	73
4.5.2. Пространственные структуры .....	73
4.6. Апертурные излучатели .....	73
4.6.1. Рефлекторные антенны .....	73
4.6.2. Рупорные антенны .....	73
4.6.3. Линзовые антенны .....	73
4.6.4. Диелектрические антенны .....	74
4.6.5. Антенны на рассеянных волнах .....	74
<b>5. Питание антенн</b> .....	76
5.1. Фидеры .....	76
5.1.1. Волновое сопротивление проводника .....	76
5.1.2. Двухпроводная линия .....	80
5.1.3. Коаксиальный кабель .....	81
5.1.4. Затухание в высокочастотных линиях .....	82
5.1.5. Рекомендации по применению высокочастотных линий .....	84
5.1.6. Характеристики высокочастотных линий .....	85
5.1.7. Однопроводный фидер .....	86
5.2. Физические свойства высокочастотных линий .....	88
5.2.1. Распределение напряжения в двухпроводной линии .....	88
5.2.2. Добавочные потери в линии вследствие стоячих волн .....	90
5.2.3. Двухпроводная линия в качестве согласующего элемента .....	93
5.3. Способы питания антенн .....	96
5.3.1. Согласованный фидер .....	96
5.3.2. Настроенный фидер .....	97
<b>6. Согласующие и трансформирующие элементы</b> .....	101
6.1. Дельта-согласование .....	101
6.2. Согласующий Т-трансформатор .....	102
6.3. Гамма-согласование .....	103
6.4. Омга-согласование .....	104
6.5. Четвертьволновый трансформатор .....	105
6.6. Согласующий шлейф .....	107
6.7. Согласование с помощью дискретных радиокомпонентов .....	112
6.7.1. Г-образный элемент .....	112
6.7.2. Мост Бушера в качестве согласующего элемента .....	114
6.7.3. Т-образный элемент .....	115
6.7.4. П-образный элемент .....	115
6.7.5. Резонансное преобразование .....	115
6.8. Широкополосный трансформатор .....	116
<b>7. Симметрирующие и запирающие цепи</b> .....	118
7.1. Введение .....	118
7.2. Основные принципы .....	119
7.3. Симметрирующие цепи .....	120
7.3.1. Трансформаторы .....	120
7.3.2. Петлевые шлейфы .....	123
7.3.3. Симметрирующие шлейфы .....	125
7.3.4. Симметрирующие мосты .....	129
7.3.5. Симметрирующие объемные контуры .....	130
7.4. Блокирующие цепи .....	132
7.4.1. Резонансные фильтры .....	132
7.4.2. Широкополосные затворы .....	134
7.4.3. Поглотители .....	136

7.5. Специальные способы .....	138	10.6. Широкополосные вибраторы .....	194
7.5.1. Симметрирование подбором сопротивлений .....	138	10.6.1. Волновые вибраторы .....	194
7.5.2. Схема X/2 .....	139	10.6.2. Антенна T2FD .....	195
7.5.3. Симметрирование по электрическому полю .....	139	10.6.3. Замкнутый широкополосный вибратор .....	197
7.5.4. Симметрирование с помощью резонатора .....	139	10.7. Антенны особой формы .....	198
7.5.5. Симметрирование с помощью объемного контура .....	139	10.7.1. Оптимизированный вибратор .....	198
7.5.6. Клинообразные симметрирующие трансформаторы .....	140	10.7.2. Удлиненный вибратор .....	198
7.5.7. Трансформатор на ответвителях .....	140	10.8. Настройка вибратора .....	199
7.5.8. Полуволновый барьер .....	140	<b>11. Длиннопроводные антенны</b> .....	202
7.5.9. Симметрирующий трансформатор на базе петлевого вибратора .....	141	11.1. Г-образные антенны .....	204
7.5.10. Гамма-согласование .....	141	11.2. Антенна Фукса .....	206
7.5.11. Омега-согласование .....	141	11.3. Многодиапазонная антенна DL7AB .....	207
7.5.12. L-согласование .....	141	11.4. V-образная антенна .....	208
7.5.13. Емкостный трансформатор .....	142	11.4.1. Звезда из V-образных антенн .....	210
<b>8. Связь фидера с оконечным каскадом передатчика</b> .....	145	11.4.2. Составные V-образные антенны .....	211
8.1. Подключение согласованных фидеров .....	146	11.4.3. Тупоугольная V-образная антенна .....	211
8.1.1. Подключение коаксиальных кабелей .....	146	11.5. Открытая ромбическая антенна .....	212
8.1.2. Подключение симметричного согласованного фидера .....	149	11.6. Удлиненный двойной «Цепелин» .....	212
8.2. Подключение согласованных фидеров .....	151	11.7. Длиннопроводная шестидиапазонная антенна K4EF .....	214
8.3. Согласование передатчика с фидером .....	155	<b>12. Аперийодические длиннопроводные антенны</b> .....	217
8.3.1. Базовый СЛП .....	155	12.1. Замкнутая длиннопроводная антенна .....	217
8.3.2. T-образный СЛП .....	155	12.2. Однопроводная антенна бегущей волны .....	218
8.3.3. СЛП на последовательно- параллельных емкостях .....	155	12.3. Замкнутые V-образные антенны .....	220
8.4. Промышленное согласование антенн .....	156	12.4. Замкнутые ромбические антенны .....	221
8.5. Применение согласующих устройств .....	157	12.4.1. Питание ромбической антенны .....	222
<b>9. Практика высокочастотных антенн</b> .....	159	12.4.2. Нагрузочное сопротивление .....	222
9.1. Обзор .....	159	12.4.3. Устройство ромбической антенны .....	223
9.1.1. Полуволновый излучатель .....	159	12.4.4. Многодиапазонный режим .....	224
9.1.2. Длиннопроводные антенны .....	160	12.4.5. Специальные типы ромбических антенн .....	224
9.1.3. Поперечные (рамочные) излучатели .....	160	<b>13. Излучатели с поперечным излучением</b> .....	227
9.1.4. Вращающийся направленный излучатель .....	161	13.1. Вибраторные ряды .....	227
9.1.5. Вертикальные антенны .....	161	13.2. Вибраторный столбец .....	229
9.2. Лучшая антенна дальней связи .....	163	13.3. Вибраторные группы .....	230
9.3. Доказательство оценок усиления .....	164	13.4. Практические варианты проволочных направленных антенн .....	231
9.4. Затраты на направленные антенны .....	165	13.4.1. Двухэлементный коллинеарный вибратор .....	231
<b>10. Полуволновые излучатели</b> .....	167	13.4.2. Антенна Франклина .....	232
10.1. Однодиапазонные вибраторы .....	167	13.4.3. Синфазная горизонтальная антенна .....	233
10.1.1. Y7образная антенна .....	167	13.4.4. Квадратная рамочная антенна DJ4VM .....	235
10.1.2. Вибратор с коаксиальным фидером .....	167	13.4.5. Двусторонний излучатель .....	236
10.1.3. Суррогатный вибратор .....	168	13.4.6. Многоэтажный волновой вибратор .....	238
10.1.4. Петлевой вибратор .....	168	13.4.7. Шестиэлементная антенна .....	238
10.2. Многодиапазонные вибраторы .....	169	13.4.8. Антенна Брюса .....	239
10.2.1. Антенны типа «Цепелин» .....	169	13.4.9. Антенна Стербы .....	239
10.2.2. Антенна Виндома .....	172	<b>14. Продольные излучатели</b> .....	242
10.2.3. Согласованный трехдиапазонный вибратор .....	178	14.1. Направленная антенна W8JK .....	243
10.2.4. Согласованный четырехдиапазонный вибратор .....	178	14.2. Однонаправленные продольные излучатели .....	246
10.2.5. Многодиапазонный вибратор .....	179	14.2.1. Остронаправленная антенна ZL .....	246
10.2.6. Многодиапазонная антенна G5RV .....	181	14.2.2. Антенна NV9CV .....	248
10.2.7. Вибраторы с зазирающим контуром .....	184	14.2.3. Переключаемый двухэлементный направленный излучатель .....	251
10.3. Компактные антенны .....	189	<b>15. Направленные антенны с волновыми петлевыми вибраторами</b> .....	253
10.3.1. Вложенные многодиапазонные вибраторы .....	189	15.1. Квадратная рамка как элемент антенны .....	253
10.3.2. Укороченные вибраторы .....	190	15.2. Горизонтальный прямоугольник .....	255
10.3.3. Проволочная пирамида .....	191	15.3. Дельтообразная рамка .....	256
10.4. Угловые вибраторы .....	192	15.4. Волновые рамки с рефлекторами .....	258
10.4.1. Волновой угловой вибратор с круговой диаграммой направленности .....	193	15.4.1. Квадратный куб .....	258
10.5. Наклонные антенны .....	194	15.4.2. Кольцевая остронаправленная антенна .....	262
		15.4.3. Антенна «птичья клетка» .....	263

15.4.4. Волновые рамочные антенны с активным рефлектором .....	265
15.4.5. Направленные антенны с дельтообразными рамками .....	269
15.5. Сравнение волновых петлевых излучателей .....	272
<b>16. Направленные поворотные излучатели с пассивными элементами</b> .....	274
16.1. О расходе на создание направленных поворотных антенн .....	276
16.2. Горизонтальный двухэлементный поворотный направленный излучатель .....	278
16.3. Горизонтальная трехэлементная директорная антенна .....	279
16.4. Питание направленных вращающихся антенн .....	280
16.5. Несущая траверса антенны .....	281
16.6. Монтаж направленной антенны на несущей опоре .....	281
16.7. Особые типы однодиапазонных направленных вращающихся антенн .....	282
16.7.1. X-образная направленная антенна .....	282
16.7.2. Антенна G3LDO .....	283
<b>17. Направленные антенны с укороченными элементами</b> .....	286
17.1. Миниатюрная направленная антенна VK2AOU .....	287
17.2. Миниатюрная направленная антенна W8YIN .....	289
17.3. Укороченный излучатель 10-метрового диапазона на удлинителях .....	290
17.4. Укороченная рамочная антенна .....	290
<b>18. Многодиапазонные направленные излучатели</b> .....	293
18.1. Трехдиапазонная направленная поворотная антенна G4ZU .....	293
18.1.1. Образец для копирования остронаправленной трехдиапазонной антенны G4ZU .....	297
18.1.2. Модификация антенны G4ZU .....	300
18.2. Трехдиапазонная остронаправленная антенна VK2AOU .....	301
18.3. Трехдиапазонная остронаправленная антенна DL1FK .....	304
18.4. Трехдиапазонная остронаправленная антенна W3DZZ .....	307
18.5. Трехдиапазонная рамочная антенна VK2AOU .....	309
18.6. Многодиапазонная рамочная антенна DJ4VM .....	313
18.7. Многодиапазонные антенны Delta-Loop с простыми рамками .....	317
18.7.1. Укороченная двухдиапазонная антенна Delta-Loop .....	317
18.7.2. Трехдиапазонная антенна Delta-Loop .....	317
18.7.3. Многодиапазонная антенна Delta-Loop HB9ADQ .....	318
18.8. Вложенные многодиапазонные директорные антенны .....	320
18.8.1. Двухдиапазонная директорная антенна KN6OR на 20 и 15 м .....	320
18.8.2. Двухдиапазонная директорная антенна с вложенными элементами W8FYR на 20 и 15 м .....	321
18.8.3. Двухдиапазонная директорная антенна с вложенными элементами W4KFC на 15 и 10 м .....	321
18.8.4. Конструкция остронаправленной антенны VK2ABQ .....	321
18.9. Вложенные трехдиапазонные двойные рамочные антенны .....	324
18.9.1. Трехдиапазонная рамочная антенна W4NNQ .....	324
18.9.2. Трехдиапазонная рамочная антенна CQ7RA .....	327
18.9.3. Вантовая трехдиапазонная рамочная антенна .....	329
18.9.4. Многодиапазонные рамочные антенны с директорами .....	332
18.9.5. Трехдиапазонная антенна типа «птичья клетка» .....	336
18.10. Прочие многодиапазонные антенны Delta-Loop .....	337
18.10.1. Вложенные многодиапазонные дельтообразные антенны .....	337
18.10.2. Комбинированная многодиапазонная антенна Delta-Loop .....	338
18.11. Рамка с низким цоколем .....	340
18.12. Логопериодические антенны .....	341
18.12.1. Введение .....	341
18.12.2. Логопериодические вибраторные антенны .....	341
18.12.3. Логопериодические директорные антенны .....	347
18.12.4. Логопериодические антенны с уголковыми вибраторами .....	348
<b>19. Коротковолновые антенны вертикальной поляризации</b> .....	351
19.1. Высокочастотное заземление .....	351
19.1.1. Сеть заземления .....	352
19.1.2. Противовес .....	354
19.2. Параметры вертикальных антенн .....	354
19.3. Свойства излучения вертикальных антенн .....	356
19.4. Конструкции вертикальных антенн с круговым излучением .....	359
19.4.1. Антенна Groundplane .....	359
19.4.2. Вертикальные полуволновые излучатели и вибраторные ряды .....	372
19.4.3. T- и Г-образные антенны вертикальной поляризации .....	376
19.4.4. Коаксиальные вертикальные антенны .....	378
19.4.5. Двухдиапазонная T-образная антенна .....	379
19.5. Вертикально поляризованные антенны для работы в многодиапазонном режиме .....	380
19.5.1. Многодиапазонные антенны Groundplane с переключаемыми удлиняющими катушками .....	380
19.5.2. Переключаемые многодиапазонные вертикальные антенны .....	383
19.5.3. Многодиапазонные вертикальные антенны без переключений .....	386
19.5.4. Вертикальные многодиапазонные антенны с многодиапазонными контурами .....	388
19.5.5. Двухдиапазонная вертикальная антенна W1JF для 30 и 12 м .....	392
19.6. Вертикально поляризованные кольцевые антенны .....	393
19.6.1. Антенна DRRR .....	393
19.6.2. Полуволновая кольцевая антенна .....	396
19.7. Вертикально поляризованные широкополосные антенны .....	396
19.7.1. Вертикальная многодиапазонная антенна T2FD .....	397
19.7.2. Дisko-конусная антенна .....	397
19.7.3. Двухконусные широкополосные антенны .....	402
19.8. Антенны Delta-Loop вертикальной поляризации .....	403
19.8.1. Антенна Delta-Loop с концевой емкостью (антенна TLDL) .....	404

19.8.2. Половинчатая антенна Delta-Loop .....	405
19.9. Направленные антенны вертикальной поляризации .....	406
19.9.1. Двухэлементная вертикальная антенна со сменными элементами .....	407
19.9.2. Остронаправленная антенна с быстрой сменой ориентации .....	408
19.9.3. Двухэлементная антенна Delta-Loop на 3,5 МГц .....	409
19.10. Специальные типы антенн .....	412
19.10.1. Коротковолновые спиральные антенны .....	412
<b>20. Рамочные антенны .....</b>	<b>415</b>
20.1. Принцип действия рамочных антенн .....	415
20.2. Практика создания рамочных антенн .....	420
20.3. Электрически-магнитная антенна Groundplane .....	423
20.4. Преимущества рамочных антенн .....	425
20.5. Особенности излучения рамочных антенн .....	426
20.6. Указания по проектированию рамочных антенн .....	426
<b>21. Активные антенны .....</b>	<b>429</b>
21.1. Введение .....	429
21.2. Принципиальные положения .....	429
21.3. Применение .....	432
21.4. Заключение .....	433
21.5. Рекомендации по разработке .....	433
<b>22. Практика применения антенн метрового и дециметрового диапазонов .....</b>	<b>438</b>
22.1. Поляризация антенн УКВ и ДМВ диапазонов .....	438
22.2. Рекомендации по устройству и монтажу антенн УКВ и ДМВ диапазонов .....	439
22.3. Рациональный выбор антенны для УКВ и ДМВ диапазонов .....	440
22.4. УКВ и ДМВ антенны: мифы и реальность .....	441
22.5. Эталонные антенны для диапазонов УКВ и ДМВ .....	443
<b>23. Продольные излучатели для УКВ и ДМВ диапазонов .....</b>	<b>446</b>
23.1. Направленные УКВ и ДМВ антенны с двумя элементами .....	446
23.1.1. Двухэлементная антенна для диапазона 2 м .....	446
23.1.2. Антенны NV9CV для диапазонов 2 м и 70 см .....	446
23.2. Директорные антенны для диапазонов УКВ и ДМВ .....	448
23.2.1. Принцип действия и усиление антенны «волновой канал» .....	448
23.2.2. Советы по самостоятельному изготовлению директорных антенн .....	451
23.3. Короткие и длинные директорные антенны .....	457
23.3.1. Короткие директорные антенны для диапазона 2 м .....	457
23.3.2. Короткие директорные антенны для диапазона 70 см .....	461
23.3.3. Длинные директорные антенны для двухметрового диапазона .....	462
23.3.4. Длинные директорные антенны для диапазона 70 см .....	470
23.4. Квадратно-рамочные директорные антенны .....	473
<b>24. Антенные решетки и многоэтажные директорные антенны для УКВ и ДМВ диапазонов .....</b>	<b>476</b>
24.1. Антенные решетки .....	477
24.1.1. Питание антенных решеток .....	482
24.1.2. Антенные решетки с рефлекторами .....	482
24.1.3. Антенные решетки с рефлекторным полотном .....	482
24.1.4. Практика антенных решеток .....	483
24.2. Многоэтажные директорные антенны .....	489
24.2.1. Принцип суперпозиции .....	490
24.2.2. Формирование антенных групп с оптимальными расстояниями .....	491
24.2.3. Возбуждение групповых директорных антенн .....	493
24.2.4. Практика построения групповых директорных антенн .....	495
24.2.5. Особые типы многоэтажных директорных антенн .....	500
<b>25. Антенны кругового излучения для УКВ и ДМВ диапазонов .....</b>	<b>506</b>
25.1. Круговой УКВ излучатель вертикальной поляризации .....	506
25.1.1. Коаксиальная антенна .....	507
25.1.2. J-образная антенна .....	507
25.1.3. Вертикальная антенна длиной 5λ/8 .....	510
25.1.4. Многоэтажный круговой излучатель вертикальной поляризации .....	511
25.1.5. Многоэтажный излучатель длиной 5λ/8 .....	517
25.1.6. Антенна DRRR на частоту 145 МГц .....	519
25.1.7. Дискусунный широкополосный круговой излучатель .....	519
25.2. УКВ и ДМВ круговые излучатели горизонтальной поляризации .....	520
25.2.1. Кольцевой вибратор .....	520
25.2.2. Угловой вибратор .....	521
25.2.3. Турникетная антенна .....	523
25.2.4. Рамочная антенна Алфорда .....	523
25.2.5. Антенна «мальтийский крест» .....	524
25.2.6. Антенна Big Wheel .....	526
25.2.7. Антенна Batwing и супертурникетная антенна .....	529
25.2.8. Антенна кругового излучения с парной спиралью .....	530
25.2.9. Круговой излучатель с двойной рамкой DL7QZ .....	531
<b>26. Особые типы антенн для УКВ и ДМВ диапазонов .....</b>	<b>534</b>
26.1. Плоские вибраторы и их комбинации .....	534
26.1.1. Плоский вибратор .....	534
26.1.2. Верный вибратор .....	535
26.1.3. Угловой плоский вибратор .....	536
26.2. Антенны с отражателем .....	537
26.2.1. Широкополосные антенны с отражателем .....	538
26.2.2. Многоэтажные широкополосные вибраторы с отражателями .....	539
26.2.3. Угловой отражатель .....	540
26.3. Особые типы продольных излучателей .....	542
26.3.1. Двухзеркальная антенна .....	543
26.3.2. Короткая двухзеркальная антенна .....	544
26.4. Щелевые антенны .....	546
26.5. Антенны круговой поляризации .....	547
26.5.1. Спиральная антенна .....	548
26.5.2. Директорные антенны круговой поляризации .....	553
26.6. Логопериодические антенны для УКВ и ДМВ диапазонов .....	559
26.7. Спиральные антенны .....	565
26.8. Двойная спиральная антенна .....	566
26.9. Антенна Helikon .....	566
<b>27. КВ антенны в диапазонах УКВ и ДМВ .....</b>	<b>569</b>
27.1. Двухъярусная V-образная УКВ антенна .....	569
27.2. Ромбические антенны УКВ и ДМВ диапазонов .....	570

27.3. Двойной квадрат для УКВ .....	572	29.3.8. 13-элементная многоканальная директорная антенна .....	619
27.3.1. Простой двойной квадрат .....	572	29.3.9. 20-элементная многоканальная директорная антенна .....	621
27.3.2. Многоэтажный двойной квадрат .....	573	29.3.10. Телевизионные антенные решетки .....	621
27.3.3. Многовibratorная антенна из двойных квадратов диапазона 2 м .....	573	29.3.11. Многоэтажные телевизионные директорные антенны .....	621
27.3.4. Двойной квадрат и гибридный двойной квадрат DL7KM .....	574	29.3.12. Телевизионные антенны дециметрового диапазона .....	625
27.3.5. Четырехэтажный двойной квадрат .....	578	29.4. Приемные антенны УКВ ЧМ диапазона .....	631
27.4. Многопроводная квадратно-рамочная антенна .....	579	29.5. Приемные антенны спутникового телевидения .....	631
27.5. Многоэлементные квадратно-рамочные антенны .....	581	29.5.1. Введение .....	631
27.5.1. Антенна Quagi .....	581	29.5.2. Искусственные спутники Земли .....	633
27.5.2. Квадратно-рамочная антенна с X-образными элементами .....	581	29.5.3. Антенны .....	634
27.6. Остронаправленная кольцевая УКВ антенна .....	582	<b>30. Защита от радиопомех</b> .....	638
27.7. Двухдиапазонная оконная рамка .....	583	30.1. Общие мероприятия по подавлению помех .....	638
<b>28. Любительские антенны для мобильной связи</b> .....	584	30.2. Фильтры .....	639
28.1. Антенны портативных радиостанций .....	584	30.2.1. Фильтр нижних частот .....	640
28.2. КВ антенны для мобильной связи .....	585	30.2.2. Фильтр верхних частот .....	641
28.2.1. Механическое исполнение укороченных вертикальных антенн .....	585	30.2.3. Полосовой фильтр .....	641
28.2.2. Электрические свойства укороченных вертикальных антенн .....	586	30.2.4. Режекторный фильтр .....	642
28.3. УКВ антенны для мобильной связи .....	593	30.3. Антенный фильтр для любительского передатчика .....	643
28.3.1. Мобильные УКВ антенны вертикальной поляризации .....	594	30.3.1. Фильтр нижних частот для передатчика QRP .....	643
28.4. Антенны для «охоты на лис» .....	595	30.3.2. Сдвоенный ФНЧ .....	644
28.4.1. Пеленгаторные антенны 80-метрового диапазона .....	595	30.3.3. Трехсекционный ФНЧ .....	645
28.4.2. Пеленгаторные антенны для «охоты на лис» в двухметровом диапазоне .....	598	30.3.4. Блокировка поверхностных волн .....	646
28.5. Антенны Си-Би связи .....	600	30.3.5. ФНЧ для передатчика УКВ .....	646
28.5.1. Антенны для карманных радиотелефонов 11-метрового диапазона .....	602	30.4. Практические реализации фильтров для бытовой электроники .....	649
28.5.2. Антенны для автомобильных радиотелефонов на длину волны 11 м .....	602	30.4.1. Фильтры верхних частот .....	649
28.5.3. Антенны для стационарных радиотелефонов 11-метрового диапазона .....	603	30.4.2. Высокочастотный разделительный трансформатор .....	650
28.5.4. Остронаправленная мини-антенна 11-метрового диапазона .....	604	30.4.3. Высокочастотный шлейф .....	652
<b>29. Антенны для приема теле- и радиовещания</b> .....	607	30.4.4. Фильтры нижних частот .....	652
29.1. Распространение волн в диапазонах АМ вещания .....	607	30.4.5. Дополнительные средства защиты от помех .....	653
29.1.1. Особенности распространения коротких волн .....	608	<b>31. Измерительные приборы и измерения характеристик антенн</b> .....	656
29.1.2. Особенности распространения средних волн .....	608	31.1. Приборы .....	656
29.1.3. Особенности распространения длинных волн .....	608	31.1.1. Индикаторы тока и напряжения .....	656
29.2. Радиовещательные приемные антенны коротких, средних и длинных волн .....	609	31.1.2. Индикатор резонанса .....	657
29.2.1. Высокие антенны .....	609	31.1.3. КСВ-метры .....	663
29.2.2. Антенны на ферритовых стержнях .....	612	31.1.4. Измерители полного внутреннего сопротивления .....	670
29.2.3. Автомобильные антенны .....	613	31.1.5. Измерительная линия .....	676
29.3. Антенны для приема телевизионных передач .....	614	31.1.6. Измерители напряженности поля .....	677
29.3.1. Одноэлементная антенна .....	616	31.2. Измерения .....	679
29.3.2. Двухэлементная антенна .....	616	31.2.1. Измерения резонанса .....	679
29.3.3. Трехэлементная директорная антенна .....	616	31.2.2. Измерения согласования .....	681
29.3.4. Четырехэлементная директорная антенна .....	616	31.2.3. Измерение входного сопротивления .....	681
29.3.5. Шестиэлементная многоканальная директорная антенна .....	617	31.2.4. Измерения характеристик линий передачи .....	684
29.3.6. Восьмиэлементная директорная антенна .....	618	31.2.5. Измерение усиления .....	685
29.3.7. Девятиэлементная директорная антенна .....	618	31.2.6. Измерения на моделях .....	687
		31.3. Принадлежности .....	688
		31.3.1. Эквивалентные нагрузки .....	688
		31.3.2. Аттенуаторы .....	689
		<b>32. Символьные методы и круговая диаграмма полных сопротивлений</b> .....	693
		32.1. Комплексное представление переменных величин .....	693
		32.1.1. Временной ход гармонической переменной величины .....	693
		32.1.2. Комплексные числа .....	693
		32.1.3. Комплексное представление синусоидальных переменных величин .....	695
		32.1.4. Комплексное сопротивление .....	695

32.2. Амплитудно-фазовые характеристики .....	696	36.2. Многовibratorные антенны .....	747
32.3. Круговая диаграмма полных сопротивлений .....	697	36.2.1. Директорная антенна для диапазона 23 см .....	747
32.3.1. Гауссова числовая плоскость и диаграмма Смита .....	698	36.2.2. 40-элементная антенная решетка для диапазона 23 см .....	747
32.3.2. Представление комплексных сопротивлений и проводимостей на диаграмме Смита .....	698	36.2.3. Рамочно-директорная антенна для диапазона 23 см .....	748
32.3.3. Преобразование сопротивлений в проводимости .....	699	36.3. Спиральные антенны .....	748
32.3.4. Преобразование сопротивлений с помощью диаграммы Смита .....	700	36.3.1. Спиральная антенна для диапазона 23 см .....	748
32.3.5. Преобразование сопротивления с помощью двух реактивных сопротивлений .....	702	36.3.2. Квадрифилярная спиральная антенна .....	749
32.3.6. Диаграмма Смита для линий передачи .....	704	36.4. Антенны с отражателем .....	750
<b>33. Практика создания антенн .....</b>	<b>708</b>	36.4.1. Антенна с уголковым отражателем .....	750
33.1. Материалы для изготовления антенн .....	708	36.4.2. Параболическая антенна .....	750
33.1.1. Антенный канатик .....	708	<b>37. Антенные усилители .....</b>	<b>753</b>
33.1.2. Натяжные тросы .....	709	37.1. Введение .....	753
33.1.3. Трубы для антенн .....	712	37.2. Определения .....	753
33.1.4. Принадлежности .....	712	37.2.1. Шумы .....	753
33.2. Мачты для антенн .....	713	37.2.2. Взаимная модуляция .....	756
33.2.1. Мачты и трубы .....	714	37.2.3. Точка пересечения .....	757
33.2.2. Прочность .....	715	37.3. Рекомендации по созданию антенных усилителей .....	758
33.2.3. Принадлежности .....	716	<b>38. Опасность электромагнитного излучения .....</b>	<b>760</b>
33.3. Материалы .....	716	38.1. Введение .....	760
33.4. Коррозия .....	718	38.2. Основные понятия .....	760
33.5. Поворотные устройства .....	718	38.3. Эффекты электромагнитных волн .....	761
33.6. Высоочастотные разъемы .....	719	38.4. Предельно допустимые значения и минимальные расстояния .....	762
33.7. Грозозащита и заземление .....	720	38.5. Заключение .....	762
33.7.1. Общие положения .....	720	<b>39. Программы и программное обеспечение .....</b>	<b>765</b>
33.7.2. Основные понятия .....	721	39.1. Общие сведения .....	765
33.7.3. Защита от перегрузок по напряжению .....	722	39.2. Программы для расчета антенн .....	765
33.8. Стандарты антенн .....	723	39.2.1. Программы МККР для расчета антенн .....	766
33.9. Сооружение антенн и правила .....	723	39.2.2. Антенные программы MININEC .....	766
33.9.1. Разрешения .....	723	39.2.3. Прочие программы для расчета антенн .....	768
33.9.2. Заявка .....	724	39.2.4. Профессиональные программы для расчета антенн .....	769
<b>34. Стационарные специальные антенны .....</b>	<b>728</b>	39.3. Программы для расчета распространения радиоволн .....	769
34.1. Радиовещательные передающие антенны .....	728	<b>40. Указатель литературы .....</b>	<b>773</b>
34.1.1. Длинно- и средневолновые передающие антенны .....	728	40.1. Общие замечания .....	773
34.1.2. Передающие КВ антенны .....	730	40.2. Книги об антеннах .....	773
34.1.3. Передающие, УКВ и телевизионные антенны .....	732	40.3. Сообщения об антеннах .....	780
34.2. Антенны направленной радиосвязи .....	734	40.4. Специализированные технические журналы .....	783
34.2.1. Антенны на частоты от 200 МГц до 2 ГГц .....	734	40.5. Журналы для радиолюбителей .....	785
34.2.2. Антенны для диапазона 2–22 ГГц .....	735	<b>41. Приложения .....</b>	<b>787</b>
<b>35. Специальные мобильные антенны .....</b>	<b>739</b>	41.1. Частотные диапазоны .....	787
35.1. Автомобильные радиоантенны .....	739	41.2. Длины антенн .....	788
35.1.1. Сотовая и транкинговая радиосвязь .....	739	41.3. Коаксиальные кабели .....	788
35.1.2. Антенны .....	739	41.4. Единицы измерений .....	788
35.2. Судовые антенны .....	741	41.5. Пересчет величин и параметров .....	797
35.2.1. Радиосвязь на море .....	741	41.6. Перевод англосаксонских мер .....	799
35.2.2. Антенны для связи .....	741	41.7. Диаграммы .....	807
35.3. Самолетные антенны .....	744		
35.3.1. Авиационная радиосвязь .....	744		
35.3.2. Антенны .....	745		
<b>36. Микроволновые антенны .....</b>	<b>747</b>		
36.1. Введение .....	747		

# Предисловие

Радиолюбители уже много лет неизменно обращаются к справочному пособию Ротхаммеля, ставшему стандартом технической литературы.

Книга выдержала 11 изданий в ГДР и 9 лицензированных изданий в ФРГ. Такой спрос и частые ссылки на книгу свидетельствуют о том, что принятый в ней способ изложения материала – ориентация на практическое применение – находит признание не только среди радиолюбителей.

Карл Ротхаммель улучшал каждое издание своей книги, со знанием дела перерабатывал и расширял ее, не позволяя ей устареть, включая в нее все новые иллюстрации, таблицы и ссылки на оригинальные работы. Объем справочника вырос с 1959 г. почти втрое.

Книга Ротхаммеля об антеннах – это целый этап в истории техники. Сжатые упрощенные теоретические сведения в сочетании с подробным описанием практических решений позволяют успешно строить описанные в книге антенны даже тем, кто слабо разбирается в технике. Однако и профессионалы найдут здесь немало интересного для собственных разработок.

При бешеном темпе развития современной техники теряет смысл кустарное изготовление аппаратуры. Напротив, самостоятельное построение антенн по-прежнему привлекает радиолюбителей, побуждая их к творчеству. Некоторые типы антенн (например, рамочные с их многочисленными вариантами), возникнув как местное достижение, приобрели международную известность благодаря описанию в любительской литературе.

Согласно воле автора содержание настоящего лицензионного издания вновь расширено и дополнено за счет новейших технических разработок. Устаревшие сведения

опущены, а устоявшиеся представления и данные приведены в соответствие с новой информацией. При этом сохранено прежнее разделение по трем главным направлениям: основные понятия, типы антенн и их конструкции.

В книге появились новые главы, посвященные микроволновым антеннам (36), антенным усилителям (37), опасностям микроволнового излучения (38), а также указатель литературы (40).

Заново переписаны главы о типах антенн (4), симметрирующих и запирающих звеньях (7), аппаратуре и методах измерений параметров антенн (31).

Дополнением к различным главам послужили сведения о распространении очень низких частот, замираниях, разнесении, резонансных трансформаторах, вибраторах с запирающим контуром, укороченных вибраторах, сети заземления, противовесах, оптимизированном вибраторе, растянутом вибраторе, двухдиапазонной Т-образной антенне, антеннах типа Х-квадрат и двухполосном квадрате, антеннах персональной радиосвязи, пеленгаторных антеннах двухметрового диапазона, расходных материалах, коррозии, передающих УКВ и телевизионных антеннах, а также о принципах распространения радиоволн. Кроме того, приведены указания по проектированию магнитных и активных антенн.

Во всех главах обновлены списки литературы, а в сведения о патентах включен год подачи заявки (дата приоритета).

Мы с благодарностью примем советы и предложения, направленные на совершенствование книги.

Издательство Алоиз Кришке,  
DJOTR/OE 8 AK

## Коротко об авторах

Карл Ротхаммель (1914–1987). Во время войны служил радистом в авиации, затем был владельцем гостиницы и фермы в Баварии. В течение 10 лет руководил радиовещанием и телевидением в почтовом ведомстве ГДР, потом 25 лет работал в отделе информации и документации радиозавода «Штерн-Радио». Радиолобитель с 1932 г. (DE 3040/L); с 1954 г. его позывным стал DM2ABK, а с 1980 – Y21BK. Долгое время Ротхаммель возглавлял клубную радиостанцию в Зоннеберге (Тюрингия), входил в состав квалификационной комиссии округа Зуль. За достижения в области радио был удостоен золотого нагрудного знака. В радиолобительстве отдавал предпочтение работе на УКВ. В течение длительного периода являлся референтом по УКВ, писал обзоры на эту тему для журнала *Funkamateur*. Автор книг «Ультракороткие волны» и «Практика телевизионных антенн» (части 1 и 2). Соавтор книг «Практика радиолобительства» и «Электроникум», а также «Карманного справочника коротковолновика-любителя», «Справочника радиолобителя», «Электронного ежегодника».

Алоиз Кришке (1936), инженер по образованию, изучал технику связи в Венском

техническом институте и уже тогда специализировался по антеннам. С 1968 г. работал в мюнхенской компании Rohde & Schwarz, затем – в Техническом центре. Много лет занимается разработкой антенн, а также сбытом систем и продуктов, системным проектированием и реализацией проектов в области радиообнаружения и радиолокации, будучи ответственным по вопросам электромагнитной совместимости. Радиолобитель с 1956 г. (OE8AK, а с 1968 г. – DJOTR). Наряду с обширной библиотекой и впечатляющим собранием документации по профессиональным антеннам ему принадлежит замечательная частная коллекция патентов, начиная от первых антенных патентов Маркони (Англия, 1896 г.), Брауна (Германия, 1898 г.) и Фессендена (США, 1899 г.) и вплоть до современных заявок. Призер многолетних соревнований по «Охоте на лис». В течение пяти лет состоит членом региональной организации по радиопомехам немецкого радиоклуба (DARC). Имеет различные публикации по антеннам, антенным новинкам и патентам. Соавтор справочника «Antennen-Lexicon», выпущенного в 1988 г.

# 1. Электромагнитные волны

Энергия, излучаемая передающей антенной, распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн.

Образование волн проще всего наблюдать на спокойной водной поверхности, когда брошенный предмет порождает ее колебания, но продвижение волн не вызывает течения воды. Это легко заметить по поведению поплавков в безветренную погоду: они поднимаются и опускаются в ритме волн, находясь на одном и том же месте. Серия волн распространяется в форме колец, тогда как поверхность воды остается неподвижной.

Серия волн описывается следующими параметрами:

- длина волны  $\lambda$  – минимальное расстояние между двумя точками, принадлежащими одинаковым участкам волны, например между ближайшими гребнями или ближайшими впадинами волн;
- частота  $f$  – число волновых движений за секунду;
- скорость распространения  $c$  – скорость, с которой гребень волн удаляется от источника энергии.

Соотношение этих параметров выражается формулой

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

Для электромагнитных волн  $c = 3 \times 10^8$  м/с (скорость света).

Эти соотношения по аналогии с колеблющейся водной поверхностью можно применить к распространению электромагнитных волн. Они также характеризуются длиной волны, измеряемой в метрах в диапазонах длинных, средних, коротких и метровых волн.

Длина волны – это расстояние между двумя волновыми фронтами одинаковой фазы. Обычно переменный ток синусоидальной формы представляют в виде графика, приведенного на рис. 1.1.

Если по горизонтали откладывать время, а по вертикали – напряжение, которое

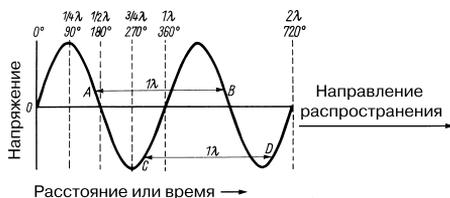


Рис. 1.1. График электромагнитной волны

измерено в какой-либо точке провода, то окажется, что это напряжение с течением времени будет изменяться по синусоидальному закону, как показано на рис. 1.1. Аналогичный график служит «мгновенным снимком» незатухающей электромагнитной волны: его можно получить, если одновременно измерить напряжение в каждой точке провода. Мгновенное значение напряжения изменяется по величине и знаку со временем (с расстоянием). Очевидно, что длину волны допустимо измерять на нулевом или любом ином уровне между произвольными соседними точками одинаковой фазы (отрезки А–В и С–D равны).

Принято выражать фазу в угловой мере, полагая, что полный колебательный процесс (одна длина волны) соответствует  $360^\circ$ . Благодаря этому легко сравнивать фазы и характеризовать фазовые сдвиги.

Частота колебательного процесса измеряется в герцах (Гц):

- 1 Гц = одному колебанию за 1 с,
- 1 кГц (1 килогерц) =  $10^3$  Гц,
- 1 МГц (1 мегагерц) =  $10^6$  Гц,
- 1 ГГц (1 гигагерц) =  $10^9$  Гц.

В безвоздушном пространстве скорость распространения электромагнитных волн составляет 300 000 000 м/с (скорость света). Под безвоздушным пространством понимают абсолютную пустоту, некое идеальное, несуществующее состояние. Однако даже космическое пространство не является абсолютно пустым, поэтому реальная

скорость электромагнитных волн оказывается меньше 300 000 000 м/с. Уменьшение скорости зависит от среды распространения волны. В случае атмосферного воздуха это уменьшение мало и обычно им пренебрегают.

В радиотехнических расчетах используют значение  $c = 300\,000\,000$  м/с, что при подстановке в формулу (1.1) дает

$$\lambda_M = \frac{3 \times 10^8}{f_{ГЦ}}$$

или

$$\lambda_M = \frac{3 \times 10^5}{f_{кГЦ}}$$

и, соответственно,

$$\lambda_M = \frac{300}{f_{МГЦ}}.$$

Из формулы следует также, что

$$f_{кГЦ} = \frac{3 \times 10^5}{\lambda_M} \text{ и } f_{МГЦ} = \frac{300}{\lambda_M}.$$

В приложении приведены таблицы для пересчета частоты в длину волны и наоборот.

## 1.1. Электромагнитное поле

Электрический ток, меняющийся во времени, порождает электромагнитное поле вокруг проводника, в котором он протекает. Это поле имеет электрическую и магнитную составляющие. Чтобы наглядно представить формирование электромагнитного поля, до сих пор пользуются приемом Майкла Фарадея, предложившего изображать силовое поле с помощью силовых линий.

Силовое поле характеризуется величиной и направлением сил, меняющихся в пространстве. Направление силовых линий передает направление действующей силы, а расстояние между ними, или густота линий, отображает ее величину.

Силовое поле, в котором величина и направление силы всюду одинаковы, называют однородным. Если же направление и величина силы меняются (силовые линии распределены неравномерно), то говорят о неоднородном поле.

### 1.1.1. Электрическое поле

Если два разноименно заряженных предмета, например шары или пластины, поместить на некотором расстоянии один от другого, то между ними образуется электрическое поле. Когда заряд и, следовательно, поле неизменны, поле называют электростатическим.

На рис. 1.2 представлен конденсатор с разноименно заряженными пластинами. Направление и сила электрического поля отображаются силовыми линиями.

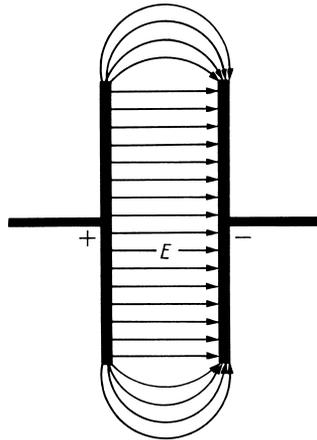


Рис. 1.2. Электрическое поле конденсатора

Здесь показано сечение пластин конденсатора. Сила электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов между пластинами (напряжению) и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Напряжение однородного электрического поля, отнесенное к единице длины, называют напряженностью электрического поля. Следовательно, напряженность электрического поля  $E$  равна разности потенциалов на отрезке линии поля единичной длины и выражается в вольтах на метр.

#### Пример

Две пластины отстоят одна от другой на 0,2 м, и к ним приложено напряжение 10 В. Тогда напряженность электрического поля составляет

$$\frac{10}{0,2} = 50 \text{ В/м}.$$

Если к пластинам конденсатора приложить переменное напряжение, то вместе с ним будут меняться направление и сила электрического поля. При этом переменный ток в проводах между пластинами и генератором может служить мерой переменных зарядов, текущих к пластинам.

### 1.1.2. Магнитное поле

Магнитное поле возникает вокруг проводника с током. Если ток постоянен, то сила и направление магнитного поля остаются неизменными. Такое поле называют магнито-статическим. Вокруг прямолинейного отрезка проводника магнитные силовые линии образуют концентрические окружности (рис. 1.3) и в любом случае являются замкнутыми.

Сила и направление магнитного поля вокруг проводника с переменным током меняются вместе с током. Напряженностью магнитного поля  $H$  называют величину магнитной составляющей переменного электромагнитного поля, зависящую от координат. Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр. При синусоидальном характере изменения поля его характеризуют эффективным значением напряженности.

### 1.1.3. Зависимость между электрическим и магнитным полями

Напряжение порождает электрическое поле, тогда как электрический ток вызывает магнитное поле. Но ток способен протекать лишь при наличии разности потенциалов, то есть напряжения. Изменение магнитного поля обязательно влияет на электрическое поле. Любое изменение тока наводит электромагнитное поле.

Две составляющие электромагнитного поля всегда взаимно перпендикулярны.

### 1.1.4. Переменное электромагнитное поле

Излучение электромагнитных волн объясняется свойствами электромагнитного поля, порождаемого переменным током в проводнике антенны. Любое поле несет энергию, поступающую от генератора питания. Через некоторое время (поскольку электрическая энергия распространяется не мгновенно, а со скоростью света) после

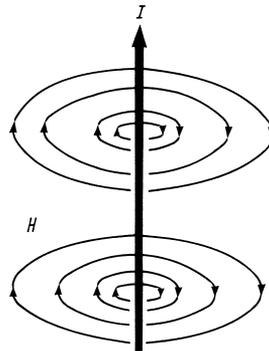


Рис. 1.3. Магнитное поле проводника с током

включения генератора проводник отдает энергию окружающей среде, инициируя появление поля. При выключении генератора исчезнет и поле, так как энергия переменного электромагнитного поля расходуется на возбуждение в проводнике переменного тока. Данный процесс также требует времени, поэтому самые удаленные области поля вернуться в проводник последними.

Исчезающее магнитное поле вызовет напряжение в проводнике, которое вновь породит электрическое поле. Такое напряжение, возникающее при прерывании тока в замкнутой цепи, действует, к примеру, в системе зажигания двигателя внутреннего сгорания.

Прохождение постоянного тока не нарушает состояния покоя электрического и магнитного полей. Описанные изменения происходят лишь при включении (поле образуется) и выключении (поле исчезает) источника тока. Во время протекания переменного тока в проводнике процесс включения-выключения повторяется непрерывно в зависимости от частоты.

Нарастание переменного тока порождает (с некоторой задержкой) усиление электромагнитного поля. Когда ток убывает, энергия поля (также с задержкой) уменьшается. Но вследствие задержки не вся энергия успевает исчезнуть, что оказывает воздействие на проводник антенны, наводя в нем ток электромагнитной индукции. Этот новый ток вызывает появление нового поля, которое препятствует исчезновению прежнего. «Отвергнутые» линии электрического поля образуют замкнутые контуры, обвитые линиями магнитного поля.

Поскольку данный процесс постоянно повторяется с периодичностью переменного тока, распространение электромагнитной волны происходит с частотой (то есть на длине волны), в точности соответствующей возбуждающему переменному току. Волна удаляется от проводника в окружающее пространство со скоростью света.

Этот механизм действует, если генератор в строго определенные моменты времени вырабатывает ток противоположного направления, чтобы не допустить исчезновения убывающего поля и вытолкнуть его обратно в окружающую среду.

Электромагнитные волны распространяются в свободном пространстве в направлении, перпендикулярном векторам напряженности электрического и магнитного полей, как это показано на рис. 1.4 ( $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  обозначают напряженности электрического и магнитного полей соответственно). Их векторное произведение называют вектором Умова-Пойнтинга  $\vec{S}$ . Этот вектор описывает перенос энергии в направлении распространения волн, перпендикулярен  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  и определяет количество энергии, переносимой за одну секунду в указанную сторону сквозь площадку размером  $1 \text{ м}^2$ , нормальную к направлению распространения радиоволн.

### 1.1.5. Плоские волны

Электромагнитные волны от точечного источника распространяются с одинаковой скоростью во всех направлениях. Процесс можно представить себе как непрерывное образование расширяющихся сферических оболочек, центр которых совпадает

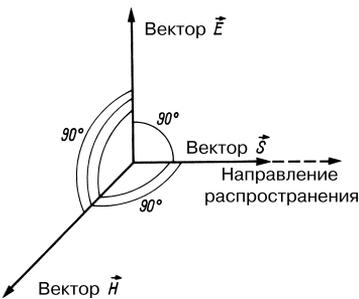


Рис. 1.4. Направление векторов напряженности и распространения волн в свободном пространстве

с точечным источником энергии. Если бы оболочки удалось увидеть, то вблизи источника, когда их радиус мал, они бы выглядели как сферы. Однако вдалеке от источника (радиус велик) оболочка уже не кажется искривленной и воспринимается как плоскость – точно так же, как поверхность Земли. В таких случаях говорят о плоском волновом фронте. Направление линий электрического и магнитного полей изменяется на  $180^\circ$  каждые полпериода колебаний (направление стрелок становится обратным), но волновой фронт распространяется в прежнем направлении, оставаясь перпендикулярным к нему.

### 1.1.6. Напряженность электрического поля

В случае плоских волн напряженность электромагнитного поля соответствует напряженности электрического поля  $E$ . Она выражается напряжением, действующим вдоль отрезка линии поля определенной длины в плоскости волнового фронта. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (В/м) и в свободном пространстве линейно убывает с расстоянием. Поскольку по мере удаления от постоянного источника одна и та же энергия должна распределяться по все большей

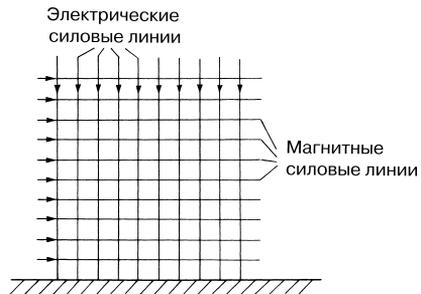


Рис. 1.5. Плоский волновой фронт с вертикальной поляризацией

площади поверхности сферы, ее плотность тоже убывает с расстоянием. К примеру, если источник излучения в свободном пространстве на расстоянии 1 км создает напряженность  $E = 1000$  мкВ/м, то на удалении 10 км она составит 100 мкВ/м, на 100 км – 10 мкВ/м и на 1000 км – 1 мкВ/м. Так как условия распространения радиоволн в околосферном пространстве далеки от идеальных характеристик свободного пространства, реальное ослабление напряженности с увеличением расстояния оказывается еще более быстрым.

### 1.1.7. Поляризация электромагнитных волн

Поляризация электромагнитной волны определяется направлением электрической составляющей поля. Из представления об эллиптической поляризации, согласно которому вектор электрического поля описывает эллипс, следуют особые случаи круговой и линейной поляризации.

Очевидно, что при круговой поляризации конец электрического вектора описывает круг. Различают право-круговую поляризацию (вектор электрического поля вращается по часовой стрелке, если смотреть в направлении распространения волны) и лево-круговую (вектор вращается против часовой стрелки). Эллиптическая поляризация не играет особой роли при приеме в диапазоне коротких волн, но все шире применяется на более высоких частотах, особенно в космическом телевидении и радиоастрономии.

При линейной поляризации линии электрического поля прямые и определенным образом расположены по отношению к земной поверхности как опорной плоскости. В соответствии с их направлением различают горизонтальную поляризацию (линии электрического поля параллельны поверхности Земли) и вертикальную (линии перпендикулярны поверхности Земли). Так, волна на рис. 1.5 поляризована вертикально, поскольку линии электрического поля идут по нормали к горизонту. Однако возможны случаи промежуточного направления поляризации, в том числе под углом  $45^\circ$ . Такую поляризацию иногда применяют в УКВ радиовещании (например, в Великобритании), поскольку подобное излучение одинаково хорошо принимается стационарными горизонтальными и вертикальными штыревыми антеннами (в частности,

автомобильными). Недавно построены передающие антенны с круговой поляризацией, одинаково пригодные для решения обеих задач. На рис. 1.6 изображено электрическое поле вертикального диполя.

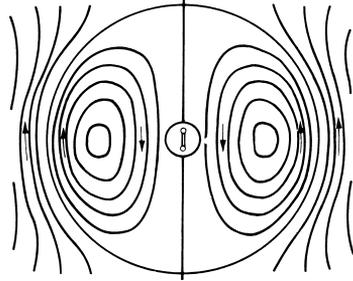


Рис. 1.6. Линии поля вертикального диполя в представлении Герца (мгновенная картина в момент  $t = 0$ )

Табл. 1.1 наглядно демонстрирует потери при различных соотношениях поляризации поля и антенны. Потери отсутствуют (0 дБ), если поле и антенна характеризуются одинаковой поляризацией. Если же их поляризация взаимно перпендикулярная линейная или круговая противоположных направлений, то прием теоретически невозможен, так как затухание оказывается бесконечно большим.

Когда поляризация поля круговая (представляет собой результат сложения одинаковых составляющих с горизонтальной и вертикальной поляризацией), а антенна поляризована линейно, будет принято лишь 50% сигнала, так что потери составят 3 дБ.

Это справедливо и для диагональной поляризации под углом  $45^\circ$ , при которой любые антенны с линейной или круговой поляризацией теряют 3 дБ. Есть лишь два исключения: поляризация антенны и поля одинаковы (потери составляют 0 дБ) или их поляризации взаимно перпендикулярны (потери теоретически могут быть бесконечно велики). Во время распространения коротких волн в ионосфере их поляризация непрерывно меняется, что порождает так называемые поляризационные замирания. Препятствия на пути распространения волн также способны изменять их поляризацию; такой процесс называют деполяризацией.

Таблица 1.1. Потери при несовпадении поляризации

Поляризация антенны, дБ	Поляризация поля			
	вертикальная	горизонтальная	правокруговая	левокруговая
Вертикальная	0 дБ	$\infty$	3 дБ	3 дБ
Горизонтальная	$\infty$	0 дБ	3 дБ	3 дБ
Правокруговая	3 дБ	3 дБ	0 дБ	$\infty$
Левокруговая	3 дБ	3 дБ	$\infty$	0 дБ

Тип поляризации коротких волн не играет роли вследствие непостоянства поляризации на пути распространения. В метровом диапазоне, напротив, он важен, но и здесь едва ли возможно полное гашение сигнала при взаимно перпендикулярной поляризации: как правило, затухание составляет около 20 дБ (см. раздел 2.6.5). Вообще говоря, антенна горизонтальной конструкции излучает горизонтально поляризованную волну, а отвесный антенный провод – вертикально поляризованную. Однако характер поляризации не всегда можно предсказать по виду антенны: например, это затруднительно в случае щелевой или кубической рамочной

антенн. Столь же сложно предложить универсальное правило для эллиптической поляризации.

### 1.1.8. Классификация радиоволн

Общее понятие радиоволны относится к диапазону длин волн от 100 км до 1 мм и интервалу частот от 3 кГц до 300 ГГц соответственно (табл. 1.2). Однако шкала электромагнитных колебаний охватывает не только радио-, но и световые волны, которые различаются лишь длиной волны. Поэтому радиоволны, как и свет, испытывают отражение, преломление и дифракцию.

Таблица 1.2. Классификация радиоволн

Обозначение	Сокращенное	Английское название	Английское сокращение	Диапазон частот	Диапазон длин волн
		Extremely Low Frequencies	ELF	Ниже 300 Гц	Более 1000 км
—	—	Ultra Low Frequencies	ULF	300–3000 Гц	1000–100 км
Мириаметровые	ОНЧ	Very Low Frequencies	VLF	3–30 кГц	100–10 км
Километровые	НЧ	Low Frequencies	LF	30–300 кГц	10–1 км
Гектометровые	СЧ	Medium Frequencies	MF	300 кГц – 3 МГц	1000–100 м
Декаметровые	ВЧ	High Frequencies	HF	3–30 МГц	100–10 м
Метровые	ОВЧ	Very High Frequencies	VHF	30–300 МГц	10–1 м
Дециметровые	УВЧ	Ultra High Frequencies	UHF	300 МГц – 3 ГГц	10–1 дм
Сантиметровые	СВЧ	Super High Frequencies	SHF	3–30 ГГц	10–1 см
Миллиметровые	КВЧ	Extremely High Frequencies	EHF	30–300 ГГц	10–1 мм