

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 11 |
| 1. Электромагнитные волны | 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 |
| 2. Распространение электромагнитных волн | 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 волн | 34 |
| 2.4.2. Сверхдальняя связь | 35 |
| 2.5. Распространение сверхдлинных радиоволн | 39 |
| 2.6. Отражение, рефракция и дифракция | 39 |
| 2.7. Замирание (феддинг) | 40 |
| 2.8. Разнесение | 40 |
| 3. Принцип действия и характеристики антенн | 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. Эффективная 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 |

| | |
|---|-----|
| 4. Типы антенн | 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. Диэлектрические антенны | 74 |
| 4.6.5. Антенны на рассеянных волнах | 74 |
| 5. Питание антенн | 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 |
| 6. Согласующие и трансформирующие элементы | 101 |
| 6.1. Дельта-согласование | 101 |
| 6.2. Согласующий Т-трансформатор | 102 |
| 6.3. Гамма-согласование | 103 |
| 6.4. Омега-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 |
| 7. Симметрирующие и запирающие цепи | 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 |
| 7.5.1. Симметрирование подбором сопротивлений | 138 |
| 7.5.2. Схема $X/2$ | 139 |
| 7.5.3. Симметрирование по электрическому полю | 139 |
| 7.5.4. Симметрирование с помощью резонатора | 139 |
| 7.5.5. Симметрирование с помощью объемного контура | 139 |
| 7.5.6. Клинообразные симметрирующие трансформаторы | 140 |
| 7.5.7. Трансформатор на ответвителях | 140 |
| 7.5.8. Полуволновый барьер | 140 |
| 7.5.9. Симметрирующий трансформатор на базе петлевого вибратора | 141 |
| 7.5.10. Гамма-согласование | 141 |
| 7.5.11. Омега-согласование | 141 |
| 7.5.12. L-согласование | 141 |
| 7.5.13. Емкостный трансформатор | 142 |
| 8. Связь фидера с оконечным каскадом передатчика | 145 |
| 8.1. Подключение согласованных фидеров | 146 |
| 8.1.1. Подключение коаксиальных кабелей | 146 |
| 8.1.2. Подключение симметричного согласованного фидера | 149 |
| 8.2. Подключение согласованных фидеров | 151 |
| 8.3. Согласование передатчика с фидером | 155 |
| 8.3.1. Базовый СЛП | 155 |
| 8.3.2. T-образный СЛП | 155 |
| 8.3.3. СЛП на последовательно-параллельных емкостях | 155 |
| 8.4. Промышленное согласование антенн | 156 |
| 8.5. Применение согласующих устройств | 157 |
| 9. Практика высокочастотных антенн | 159 |
| 9.1. Обзор | 159 |
| 9.1.1. Полуволновый излучатель | 159 |
| 9.1.2. Длиннопроводные антенны | 160 |
| 9.1.3. Поперечные (рамочные) излучатели | 160 |
| 9.1.4. Вращающийся направленный излучатель | 161 |
| 9.1.5. Вертикальные антенны | 161 |
| 9.2. Лучшая антенна дальней связи | 163 |
| 9.3. Доказательность оценок усиления | 164 |
| 9.4. Затраты на направленные антенны | 165 |
| 10. Полуволновые излучатели | 167 |
| 10.1. Однодиапазонные вибраторы | 167 |
| 10.1.1. Y-образная антенна | 167 |
| 10.1.2. Вибратор с коаксиальным фидером | 167 |
| 10.1.3. Суррогатный вибратор | 168 |
| 10.1.4. Петлевой вибратор | 168 |
| 10.2. Многодиапазонные вибраторы | 169 |
| 10.2.1. Антенны типа «Цепелин» | 169 |
| 10.2.2. Антенна Виндома | 172 |
| 10.2.3. Согласованный трехдиапазонный вибратор | 178 |
| 10.2.4. Согласованный четырехдиапазонный вибратор | 178 |
| 10.2.5. Многодиапазонный вибратор | 179 |

| | |
|--|------------|
| 10.2.6. Многодиапазонная антенна G5RV | 181 |
| 10.2.7. Вибраторы с запирающим контуром | 184 |
| 10.3. Компактные антенны | 189 |
| 10.3.1. Вложенные многодиапазонные вибраторы | 189 |
| 10.3.2. Укороченные вибраторы | 190 |
| 10.3.3. Проволочная пирамида | 191 |
| 10.4. Угловые вибраторы | 192 |
| 10.4.1. Волновой угловой вибратор с круговой диаграммой направленности | 193 |
| 10.5. Наклонные антенны | 194 |
| 10.6. Широкополосные вибраторы | 194 |
| 10.6.1. Волновые вибраторы | 194 |
| 10.6.2. Антенна T2FD | 195 |
| 10.6.3. Замкнутый широкополосный вибратор | 197 |
| 10.7. Антенны особой формы | 198 |
| 10.7.1. Оптимизированный вибратор | 198 |
| 10.7.2. Удлиненный вибратор | 198 |
| 10.8. Настройка вибратора | 199 |
| 11. Длиннопроводные антенны | 202 |
| 11.1. Г-образные антенны | 204 |
| 11.2. Антенна Фукса | 206 |
| 11.3. Многодиапазонная антенна DL7AB | 207 |
| 11.4. V-образная антенна | 208 |
| 11.4.1. Звезда из V-образных антенн | 210 |
| 11.4.2. Составные V-образные антенны | 211 |
| 11.4.3. Тупоугольная V-образная антенна | 211 |
| 11.5. Открытая ромбическая антенна | 212 |
| 11.6. Удлиненный двойной «Цепелин» | 212 |
| 11.7. Длиннопроводная шестидиапазонная антенна K4EF | 214 |
| 12. Аперийодические длиннопроводные антенны | 217 |
| 12.1. Замкнутая длиннопроводная антенна | 217 |
| 12.2. Однопроводная антенна бегущей волны | 218 |
| 12.3. Замкнутые V-образные антенны | 220 |
| 12.4. Замкнутые ромбические антенны | 221 |
| 12.4.1. Питание ромбической антенны | 222 |
| 12.4.2. Нагрузочное сопротивление | 222 |
| 12.4.3. Устройство ромбической антенны | 223 |
| 12.4.4. Многодиапазонный режим | 224 |
| 12.4.5. Специальные типы ромбических антенн | 224 |
| 13. Излучатели с поперечным излучением | 227 |
| 13.1. Вибраторные ряды | 227 |
| 13.2. Вибраторный столбец | 229 |
| 13.3. Вибраторные группы | 230 |
| 13.4. Практические варианты проволочных направленных антенн | 231 |
| 13.4.1. Двухэлементный коллинеарный вибратор | 231 |
| 13.4.2. Антенна Франклина | 232 |
| 13.4.3. Синфазная горизонтальная антенна | 233 |
| 13.4.4. Квадратная рамочная антенна DJ4VM | 235 |
| 13.4.5. Двусторонний излучатель | 236 |
| 13.4.6. Многоэтажный волновой вибратор | 238 |
| 13.4.7. Шестиэлементная антенна | 238 |
| 13.4.8. Антенна Брюса | 239 |
| 13.4.9. Антенна Стербы | 239 |
| 14. Продольные излучатели | 242 |
| 14.1. Направленная антенна W8JK | 243 |
| 14.2. Однонаправленные продольные излучатели | 246 |

| | |
|--|------------|
| 14.2.1. Остронаправленная антенна ZL | 246 |
| 14.2.2. Антенна HB9CV | 248 |
| 14.2.3. Переключаемый двухэлементный направленный излучатель | 251 |
| 15. Направленные антенны с волновыми петлевыми вибраторами | 253 |
| 15.1. Квадратная рамка как элемент антенны | 253 |
| 15.2. Горизонтальный прямоугольник | 255 |
| 15.3. Дельтообразная рамка | 256 |
| 15.4. Волновые рамки с рефлекторами | 258 |
| 15.4.1. Квадратный куб | 258 |
| 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 |
| 16. Направленные поворотные излучатели с пассивными элементами | 274 |
| 16.1. О расходах 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 |
| 17. Направленные антенны с укороченными элементами | 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 |
| 18. Многодиапазонные направленные излучатели | 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 KH6OR 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 CQ-PA | 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 угловыми вибраторами | 348 |
| 19. Коротковолновые антенны вертикальной поляризации | 351 |
| 19.1. Высоочастотное 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. Т- и Г-образные антенны вертикальной поляризации | 376 |
| 19.4.4. Коаксиальные вертикальные антенны | 378 |
| 19.4.5. Двухдиапазонная Т-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 DDDR | 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 |

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 позволял 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 λ – 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

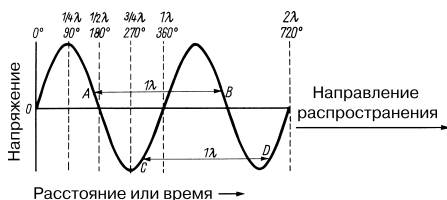


Рис. 1.1. График электромагнитной волны

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° . 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 волн. 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.

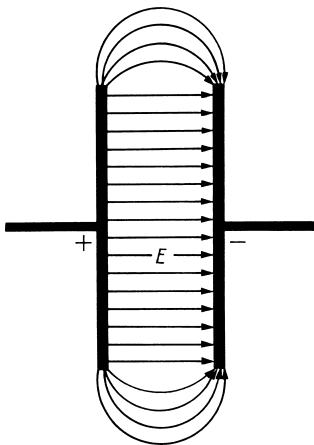


Рис. 1.2. Электрическое поле конденсатора

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 магнитостатическим. Вокруг прямолинейного отрезка проводника магнитные силовые линии образуют concentric 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

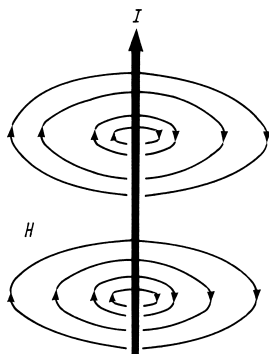


Рис. 1.3. Магнитное поле проводника с током

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 напряженность 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 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

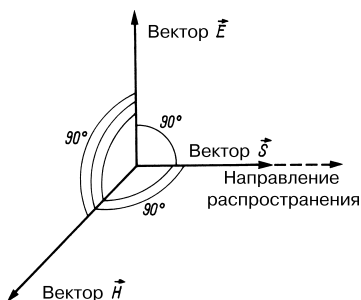


Рис. 1.4. Направление векторов напряженности и распространения волн в свободном пространстве

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. Поэтому электромагнитные волны на достаточном удалении от источника считаются плоскими. Мгновенная картина плоской волны с линиями электрического и магнитного полей представлена на рис. 1.5. Здесь стрелки указывают мгновенное направление поля волны, идущей из рисунка к наблюдателю в виде плоскости. В таких случаях говорят о плоском волновом фронте. Направление линий электрического и магнитного полей изменяется на 180° 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

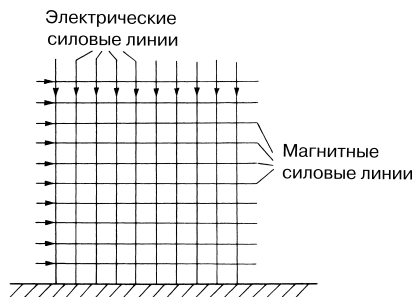


Рис. 1.5. Плоский волновой фронт с вертикальной поляризацией

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 околоземном 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° . 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.

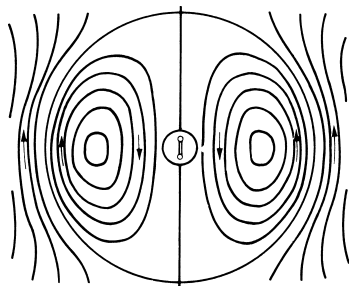


Рис. 1.6. Линии поля вертикального диполя в представлении Герца (мгновенная картина в момент $t = 0$)

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° , 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 | ∞ | 3 дБ | 3 дБ |
| Горизонтальная | ∞ | 0 дБ | 3 дБ | 3 дБ |
| Правокруговая | 3 дБ | 3 дБ | 0 дБ | ∞ |
| Левокруговая | 3 дБ | 3 дБ | ∞ | 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 |

2. Распространение электромагнитных волн

2.1. Атмосфера Земли

Значительную роль при распространении электромагнитных волн играет земная атмосфера. Эта газовая оболочка Земли достигает высоты 2000–3000 км и состоит главным образом из азота, кислорода и водяного пара. Атмосферу разделяют на три

основных слоя: тропосферу, стратосферу и ионосферу (рис. 2.1).

2.1.1. Тропосфера

Тропосфера простирается от поверхности Земли примерно до высоты 11 км и содержит приблизительно 75% всей воздушной

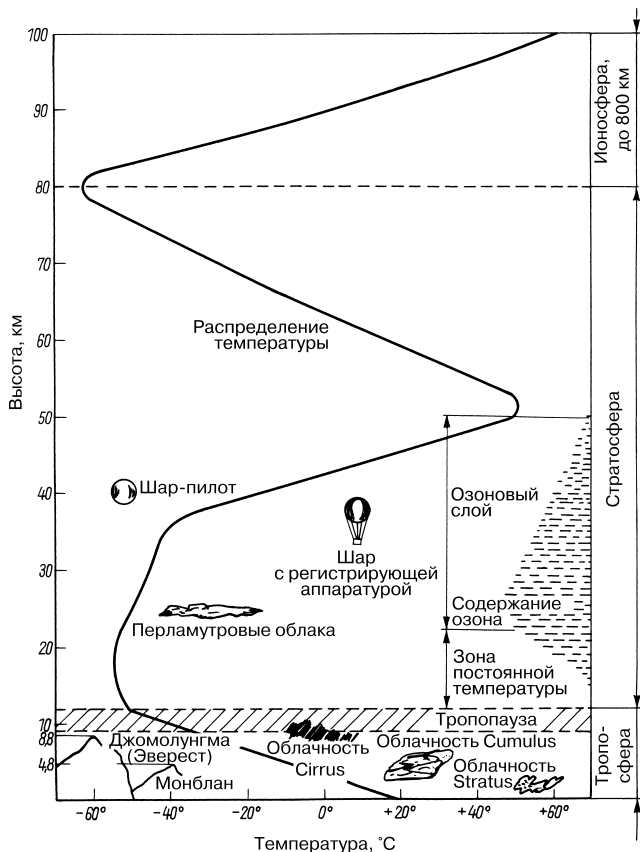


Рис. 2.1. Расслоение атмосферы и изменение температуры в ее нижней части

массы. Ее называют также метеосферой, так как именно в ней происходят метеорологические процессы, определяющие погоду.

Температура тропосферы, как правило, падает с увеличением высоты примерно на 6–8 градусов на каждые 1000 метров подъема. На своей верхней границе, в так называемой тропопаузе, она достигает минимума (около -50°C). Высота тропопаузы может меняться. На наших широтах в марте она находится в своей нижней точке (в среднем на высоте 9,7 км), а в июле – в верхней точке (11,1 км).

Состояние тропосферы имеет особое значение для распространения метровых волн.

2.1.2. Стратосфера

На высоте 11–80 км расположена стратосфера – слой, характеризующийся полным отсутствием водяных паров. Температура воздуха здесь остается почти неизменной примерно до 20 км (зона постоянной температуры). Дальше она непрерывно повышается и на расстоянии 50 км от поверхности Земли достигает приблизительно $+50^{\circ}\text{C}$. Эту область роста температуры называют также озоновым слоем, поскольку там довольно большая концентрация озона. Озоновый слой важен для развития и поддержания жизни на Земле: он поглощает значительную часть ультрафиолетового излучения Солнца, губительного для растений, бактерий и животных организмов.

Выше 50 км температура вновь снижается, а на высоте 80 км – при переходе к ионосфере – опять начинает расти.

2.1.3. Ионосфера

На расстоянии более 80 км от земной поверхности располагается ионосфера, которая простирается до высоты 450–800 км и постепенно переходит в космическое пространство (эту переходную область называют экзосферой). Ионосфера изобилует электрически заряженными частицами – ионами и электронами, возникающими вследствие распада (ионизации) нейтральных молекул воздуха. Ионизация в первую очередь вызывается ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями Солнца. Космические лучи и потоки метеоритов, которые беспрерывно сгорают в атмосфере Земли (десятки миллиардов метеоритных

частиц в сутки), также участвуют в ионизации.

Излучение в верхних слоях атмосферы обладает большой энергией и может выбивать электроны из атомных структур газов. Атом, лишенный одного электрона, образует с оставшимися электронами положительный заряженный ион. Свободный электрон устремляется к нейтральному атому и образует отрицательно заряженный ион или объединяется с положительным ионом, превращая его в нейтральный атом. Такой процесс новообразования атомов называется рекомбинацией. Количество свободных электронов в единице объема (концентрация) зависит от интенсивности облучения. Благодаря присутствию электрически заряженных частиц – ионов – верхняя зона атмосферы становится электрическим проводником, который отражает электромагнитные волны определенной частоты.

При более подробном рассмотрении оказывается, что этот процесс нельзя называть отражением, так как электромагнитные волны в ионосфере отклоняются не сразу, а постепенно, в соответствии с постоянно меняющейся по высоте концентрацией ионов и изменением связанной с этим диэлектрической постоянной. Поэтому нужно говорить скорее о рефракции (преломлении) радиоволн.

Еще в 1902 г. профессор Гарвардского университета американец А. Е. Кеннелли (А. Е. Kennelly) и английский физик, член Лондонского королевского общества О. Хевисайд (О. Heaviside) независимо друг от друга предположили существование на большой высоте электропроводящего слоя. Англичанам Эпплтоу (Appleton) и Барнету (Barnet) в 1925 г. удалось экспериментально доказать наличие отражающих слоев в верхней части атмосферы, подтвердив тем самым гипотезу Кеннелли и Хевисайда. Позднее с помощью эхолокации было установлено, что в верхней части атмосферы находится не один так называемый слой Кеннелли-Хевисайда, а целая система подобных слоев. Знания об особенностях ионосферы были дополнены и уточнены благодаря измерениям, проведенным с искусственных спутников Земли и геофизических ракет.

На высоте около 70–90 км в дневное время образуется так называемый слой D, отсутствующий ночью. В следующем за ним слое E (слой Кеннелли-Хевисайда)

наблюдается большая концентрация электронов на высоте примерно 90–125 км. Выше лежит слой F (Эпплтон-слой), который летом в дневное время разделяется на слои F_1 и F_2 . Достаточная (для обеспечения отражающих свойств) ионизация в слое F_1 возникает на высоте около 200 км, а в слое F_2 – 200–400 км. Ионизация растет от слоя к слою и достигает своего максимума в слое F_2 (на высоте приблизительно 400 км). За слоем F_2 ионизация уменьшается и наконец совершенно исчезает.

Последние исследования показали, что говорить о структуре ионосферы как о системе слоев неверно, поскольку между областями с различной концентрацией электронов наблюдаются постепенные переходы. Но поскольку гипотеза о слоистой структуре уже превратилась в устоявшуюся теорию, допустимо пользоваться ею и дальше. Показанное на рис. 2.2 строение ионосферы нельзя рассматривать в виде застывшей системы расположенных друг над другом слоев. Степень ионизации постоянно меняется и зависит от сезона, времени суток, циклического изменения солнечной активности, географической широты и других факторов.

2.2. Поверхностная и пространственная волны

Если передатчик и приемник находятся на земле, то радиоволны могут распространяться двумя путями (рис. 2.3):

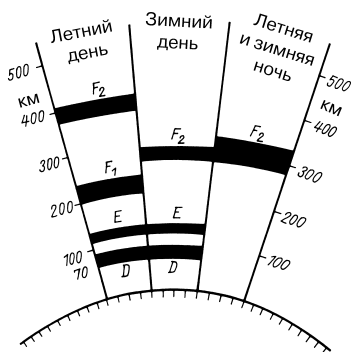


Рис. 2.2. Слои ионосферы

- в тропосфере вдоль земной поверхности как поверхностные или земные волны;
- через отражение в ионосфере как пространственные волны.



Рис. 2.3. Пути распространения поверхностной и пространственной электромагнитных волн

2.2.1. Распространение поверхностной волны

Поверхностная волна следует кривизне поверхности Земли и при этом поглощается поверхностью, над которой она распространяется. Поглощение волны усиливается с увеличением частоты сигнала, поэтому очень низкие частоты (например, длинные волны) имеют большой радиус действия поверхностных волн. На распространение поверхностной волны существенно влияет электропроводность почвы и структура земной поверхности (застройка, растительность и т.д.); дальность зависит также от мощности излучения.

Поверхностные волны коротковолнового диапазона имеют небольшую дальность действия. При мощности, характерной для любительского передатчика, в диапазоне 80 м можно рассчитывать на радиус действия поверхностной волны до 100 км; при той же мощности передатчика в диапазоне 10 м ее дальность падает до 15 км. Для увеличения дальности поверхностных волн антенны должны иметь вертикальную поляризацию. Большие расстояния в метровом диапазоне могут быть преодолены путем искривления, отражения и рассеивания радиоволн в тропосфере.

2.2.2. Распространение пространственной волны

Распространение коротких волн на большие расстояния происходит благодаря отражению пространственных волн в ионосфере. Скорость распространения фронта

волны в ионосфере (фазовая скорость) v_1 несколько больше той же скорости в тропосфере и зависит от концентрации электронов N (см^{-3}) и рабочей частоты f . Из соотношения

$$v_1 = \frac{c}{\sqrt{1 - k_i \left(\frac{N}{f^2} \right)}} \quad (2.1)$$

где k_i – постоянный коэффициент,
 c – скорость света,

следует, что рост концентрации электронов при данной частоте увеличивает фазовую скорость.

Если же волновой фронт входит в ионосферу под углом, то лежащие выше «более быстрые» части фронта обгонят нижние. Вследствие такой разницы фазовых скоростей фронт волны отклоняется и при достаточной концентрации электронов может быть отражен в направлении Земли.

Существует следующая взаимосвязь: для отражения коротких волн в ионосфере концентрация электронов N должна быть тем больше, чем выше рабочая частота f . Пространственная волна отклоняется к Земле тем легче, чем меньше угол излучения φ антенны, то есть чем более полого волна входит в ионосферу.

Эту закономерность распространения пространственных волн коротковолнового диапазона хорошо иллюстрирует рис. 2.4.

Волна 1, которую передающая антенна излучает под малым углом θ , относительно полого входит в ионосферу под углом φ

и отклоняется в ней таким образом, что достигает земной поверхности лишь на значительном удалении: малый угол излучения θ соответствует скачку большой протяженности. Этот скачок будет тем длиннее, чем выше расположен отражающий слой. В самой высокой области ионосферы – слое F_2 – максимальное расстояние превосходит 4000 км, в слое E оно составляет не более 2000 км.

Отсюда понятно, насколько важен для дальнего распространения коротких волн угол излучения антенны θ (его называют также вертикальным углом возвышения): его нужно выбирать как можно меньшим.

На рис. 2.5 схематически изображены некоторые типичные пути распространения волн благодаря отражениям в слоях E и F .

Между пунктами излучения волны и ее новой встречи с земной поверхностью находится мертвая зона приема (см. рис. 2.4). При ближайшем рассмотрении оказывается, что радиоволна распространяется от области затухания поверхностной волны до точки, где отраженная пространственная волна снова достигает Земли. Если же пренебречь довольно малой дальностью поверхностной волны в коротковолновом диапазоне, то протяженность мертвой зоны можно считать совпадающей с минимальной дистанцией скачка волны. Волна снова отразится от земной поверхности в направлении ионосферы и при достаточной концентрации ионов в ионосфере будет вторично отражена. Как правило, данный процесс многократно повторяется,

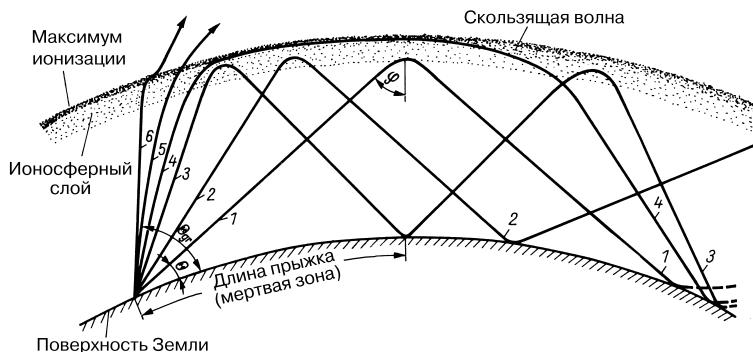


Рис. 2.4. Влияние угла излучения на отклонение волны в ионосфере: θ_{gr} – граничный угол; φ – угол падения при входе в слой ионосферы

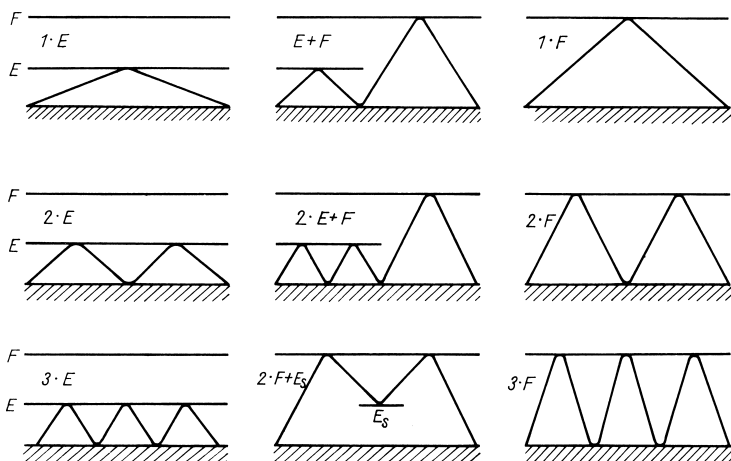


Рис. 2.5. Схематическое изображение некоторых ионосферных отражений радиоволн

и случается даже, что волна несколько раз огибает земной шар. В целом механизм многократных скачков волны очень сложен, так как состояние ионосферы изменяется от точки к точке. При этом иногда волна, уже отраженная от слоя E, вновь отражается слоем F_2 или скачет между ними.

У волны 2 угол излучения θ больше, она несколько глубже проникает в отражающий слой, и протяженность ее скачка значительно меньше. Третья волна излучается уже довольно круто. Она должна идти почти до области максимальной ионизации, чтобы быть отраженной, и нуждается в двух скачках (тогда она сможет преодолеть такое же расстояние, как первая волна). Особый случай – это волна 4. Она достигает нижней кромки зоны максимальной концентрации электронов и успевает пробежать вдоль нее большую дистанцию до момента, когда каким-либо возмущением в этом слое не отразится снова к Земле. Такую волну называют скользящей или «супермодой» (Supermode).

Почти отвесно излученные волны 5 и 6 будут лишь незначительно отклоняться слоями ионосферы, поэтому они пробьют зону максимальной ионизации и уже не вернутся к Земле. Если же допустить, что в описываемой ситуации речь идет о слое E, то возможно, что эти волны будут отражены лежащим выше слоем F. Волны 1–4 в этом случае окажутся покрытыми слоем E

вместо слоя F. Такое покрытие играет негативную роль при распространении коротких волн на дальние дистанции.

Угол излучения пятой волны обозначается как критический угол θ_{gr} . Это означает, что посланная под таким углом волна будет первой, которая пройдет сквозь весь ионизированный слой.

В табл. 2.1 указаны дистанции скачка волны, отраженной в слоях E и F_2 соответственно, в зависимости от вертикального угла излучения θ . При этом высота отражения от слоя E принята равной 105 км, а от слоя F_2 – 320 км.

Критическая частота и максимально применимая частота

Критической частотой f_c называют наибольшую частоту, при которой излучение, проникающее в ионосферу под прямым углом, еще отражается от данного слоя. Радиолокация позволяет определять f_c и оценивать высоту отражающего слоя по задержке измеряемого отраженного сигнала. В результате находят кажущуюся высоту. На самом деле нижняя граница отражающего слоя залегает несколько глубже кажущейся высоты, поскольку при измерении запаздывания не учитывается небольшая разница скоростей электромагнитной волны в пределах и вне ионизированного слоя. Критическая частота пропорциональна квадратному корню из концентрации электронов N; она имеет смысл применительно

Конец ознакомительного фрагмента.

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