

состоящий из детектора колебаний, модулированных по амплитуде, и широкополосного усилителя видеосигналов, собранного по схеме усилителя на сопротивлении с дополнительными электрическими цепями, которые компенсируют вредное влияние емкостей между электродами ламп и емкостей, внесенных монтажом¹); 4) канал синхронизации и развертки; этот канал начинается *селектором*—лампой, на управляющую сетку которой дано такое отрицательное напряжение, что лампа оказывается «запертой» для всех импульсов, кроме импульсов синхронизации, имеющих, как упоминалось выше, максимальную амплитуду напряжения. Таким образом, в этот канал проникают только импульсы синхронизации. Они подводятся к сеткам блокинг-генераторов (стр. 520), управляющих действием генераторов пилообразных импульсов для строчной и кадровой развертки. Отделение строчных импульсов синхронизации от кадровых синхромпульсов производится электрическими цепями из сопротивлений и конденсаторов с соответствующим образом подобранными постоянными времени (CR) этих цепей.

§ 97. Сантиметровые волны и их распространение в волноводах

В обширном диапазоне ультракоротких волн (10 м—1 см) волны, имеющие длину в несколько сантиметров, возникающие при частоте колебаний порядка тысяч мегагерц, занимают особое положение по своим свойствам и областям применения. Их используют в радиолокации, в радиорелейных линиях²) и вообще в остронаправленной, «лучевой» радиосвязи в пределах видимости антенны (например, для управления ракетами, для передачи телевизионной программы от «телепередвижки» на центральной телевизионной станции и т. п.).

При частотах колебаний в тысячи мегагерц обычные ламповые генераторы и усилители непригодны, так как при таких высоких частотах даже небольшие сторонние («паразитные») емкости создают короткое замыкание для высокочастотных токов и, кроме того, сказывается (в особенности при наличии нескольких сеток в лампе) инерционность электронного потока в лампе³). Более того, вследствие чрезмерной индуктивности деталей обыкновенных радиоприемников⁴) все они в их обычном виде непригодны к использованию в усилителях и генераторах колебаний частотой в несколько тысяч мегагерц. Действительно, напри-

¹) Приблизительное представление о том, как действует каждый из перечисленных блоков, входящих в указанные три канала телевизора, дают сведения, сообщенные при разборе принципов радиоприема, усиления и детектирования (§ 94).

²) Радиорелейные линии (стр. 515) обеспечивают многоканальную и высококачественную передачу телефонных переговоров, телеграфных сообщений, фото- и телепередач и поэтому с каждым годом все шире вводятся в эксплуатацию.

³) Обычные радиолампы применимы для частот порядка 75 Мгц (т. е. для длин волн до 4 м). Лампы с конструктивно пониженными межэлектродными емкостями (типа так называемых «пальчиковых» и «желудей») используются до частот порядка 500 Мгц. Для волн длиной 10—60 см, т. е. в диапазоне частот 3000—5000 Мгц, в усилительной аппаратуре применяются особые *дисковые триоды* («маячковые» лампы), в которых вывод электродов к цоколю заменен выводом их к дискам, охватывающим лампу и непосредственно воспринимающим из волновода энергию электромагнитных колебаний. Усиление колебаний еще более высоких частот осуществляют посредством *ламп с бегущей волной*, описанных наряду с генераторами сверхвысокочастотных колебаний в следующем параграфе.

⁴) Индуктивность свойственна каждому проводнику, включая конденсаторы. Так называемые «безындукционные» бумажные конденсаторы при $C=5000$ см в действительности имеют индуктивность 20—50 см. При специальной конструкции индуктивность слюдяных конденсаторов небольшой емкости удается понизить до долей сантиметра.

мер для частоты 3000 Мгц, т. е. для колебаний с длиной волны 10 см, резонансный контур (стр. 483) при емкости всего в 1 см должен иметь индуктивность 2,54 см, что в десятки раз меньше индуктивности одного витка толстого провода.

Однако такой резонансный контур, и притом с чрезвычайно высокой добротностью, осуществляется предельно просто—в виде *полого резонатора*, образованного замкнутой металлической оболочкой.

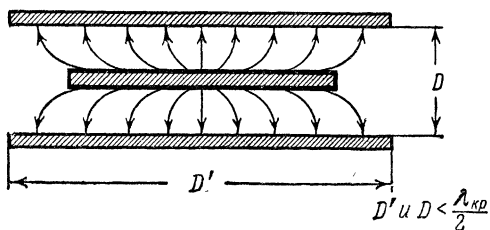
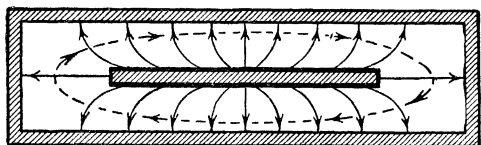
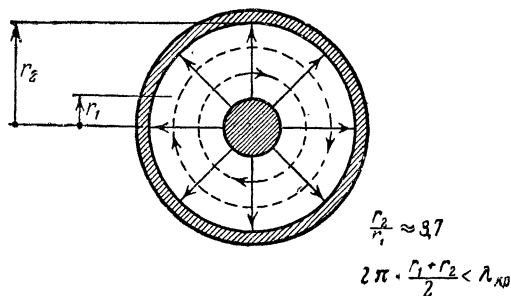


Рис. 452. Сопоставление картин поля в коаксиальной, сплюсненной коаксиальной и трехполостной линиях.

Для соединения с антенной усилителей и генераторов волн длиной более 8—10 см часто пользуются *коаксиальными фидерами* (металлическими трубами со стержневым проводником). При меньшей длине волны коаксиальные фидеры создают ощутительные потери, и их применяют только в случаях, когда необходимо, чтобы аппаратура была возможно более компактной. Электрические свойства любого фидера, в частности коаксиального, в высокой мере зависят от его длины и поперечных размеров. Необходимый для фидера (в отличие от антенны и резонансного контура) режим бегущей волны и лучшее согласование с нагрузкой (стр. 506) обеспечивают, выбирая длину фидера так, чтобы она составляла нечетное число четвертей длины волны (в связи с этим коаксиальный фидер часто называют также *резонансной линией*).

Потери в коаксиальной линии минимальны, когда радиус внешней экранирующей металлической оболочки в 3,7 раза превышает радиус стержневого проводника; вместе с тем, вследствие возрастания сопротивления, вызываемого скин-эффектом, стержневой проводник должен иметь значительный радиус сечения. Однако при слишком большом поперечном сечении фидер становится непригодным: в нем возбуждаются колебания с совершенно иным строением поля,

Металлическая оболочка совершенно экранирует высокочастотное поле, создаваемое в полости резонатора, от влияния внешних полей и практически полностью устраняет потери на излучение; вследствие большой электропроводности сплошной металлической оболочки потери от токов в ней ничтожны; диэлектрические потери в воздухе, заполняющем полость, также ничтожны, поэтому добротность Q полого резонатора в сотни раз превышает добротность обычных резонансных контуров и имеет порядок нескольких десятков тысяч.

Для соединения с антенной усилителей и генераторов волн длиной более 8—10 см часто пользуются *коаксиальными фидерами* (металлическими трубами со стержневым проводником). При меньшей длине волны коаксиальные фидеры создают ощутительные потери, и их применяют только в случаях, когда необходимо, чтобы аппаратура была возможно более компактной. Электрические

чем поле *основных* электромагнитных колебаний (описанных в §§ 89—91), и потери энергии в фидере резко возрастают. Это происходит, когда длина окружности для среднего радиуса проводящих оболочек фидера $\left(2\pi \frac{r_1 + r_2}{2}\right)$ становится равной длине передаваемой волны (или превышает ее). Такую длину волны называют *критической длиной волны*.

Разновидностью коаксиальной линии являются так называемые *трехполостные линии*. Это — как бы надрезанные и сплюснутые коаксиальные фидеры: две тонкие медные заземляемые полоски (верхняя и нижняя) заменяют экранирующую оболочку коаксиальной линии, а внутренняя, более узкая серебряная полоска заменяет стержневой проводник (рис. 452). Два слоя диэлектрика (например, полистирена или волокнистого стекла, связанного тефлоном), разделяющие полоски фольги, имеют в сумме толщину не больше половины критической длины волны; ту же величину не должна превышать и ширина внешних металлических полосок. Расчетные исследования поля, эксперименты, проведенные многочисленными научными учреждениями, и практика показали, что трехполостные линии для длин волн более 10 см по добротности не уступают коаксиальным фидерам; вместе с тем, они во многих случаях удобнее (в особенности для электрического соединения отдельных узлов аппаратуры, для изготовления электрических фильтров в виде скрученных в спираль полос и для применения метода печатных схем; стр. 543). «Полосковые линии» наиболее широко применяют при изготовлении самых миниатюрных приемников сантиметровых волн.

Для передачи с наименьшими потерями колебаний большой мощности, в особенности при длинах волн меньше 8—10 см, служат *волноводы*, представляющие собой каналы прямоугольного сечения (реже цилиндрические) с высокоэлектропроводными (медными или серебряными) стенками. По волноводу энергия колебаний передается волнами, у которых в отличие от основных электромагнитных волн один из векторов напряженности полей (E или H) не перпендикулярен к направлению распространения, т. е. к оси волновода. Если по направлению распространения имеется не равная нулю составляющая вектора напряженности электрического поля, волну называют *E-волной*; если же не равна нулю аналогичная составляющая вектора H , волну называют *H-волной*¹⁾.

Анализ, произведенный посредством применения уравнений Максвелла, показывает, что волны, не имеющие продольной составляющей поля, т. е. основные волны, не могут распространяться в волноводе²⁾. Этим определяется главное отличие волновода от двухпроводной (§ 90) и коаксиальной линий, а также и от трехполостной линии. Второе отличие заключается в том, что скорости распространения возможных в волноводе волн, т. е. волн, имеющих продольную составляющую поля (E -волн и H -волн), различны для волн разной длины. Скорость, с которой происходит перенос энергии колебаний в волноводе (групповая

¹⁾ Иначе те же волны называют так:

основные — *поперечными электромагнитными* (или сокращенно ТЕМ, от англ. transverse electromagnetic);

E -волны — *поперечно-магнитными* (сокращенно ТМ);

H -волны — *поперечно-электрическими* (сокращенно ТЕ).

²⁾ Действительно, ведь линии магнитного поля всегда являются замкнутыми, и в полости, образованной совершенным проводником, они могут существовать только в том случае, если они окружают ток проводимости (как это имеет место в коаксиальной линии) или ток смещения. Но наличие тока смещения по оси волновода означает, что электрическое поле имеет продольную составляющую. В другом же возможном случае, когда ток смещения направлен перпендикулярно к продольной оси волновода, не равна нулю продольная составляющая магнитного поля.

скорость волн), определяется формулой:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}, \quad (20)$$

где ε — диэлектрическая постоянная среды, заполняющей волновод, λ — длина волны; физический смысл константы $\lambda_{\text{кр}}$ ясен из строения формулы: при $\lambda > \lambda_{\text{кр}}$ величина, стоящая под знаком радикала, становится отрицательной, т. е. скорость переноса энергии — мнимой; это означает, что перенос энергии в волноводе может производиться только такими волнами, длина которых меньше некоторой критической длины волны $\lambda_{\text{кр}}$, определяемой размерами и формой поперечного сечения волновода и типом волн.

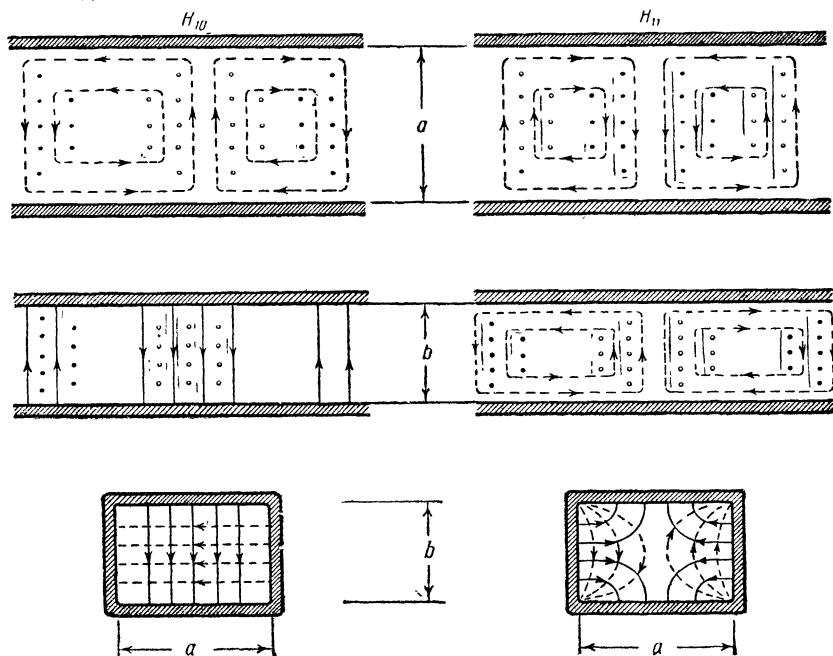


Рис. 453. Мгновенная картина поля H -волн низшего порядка. Наверху — продольные разрезы волновода, внизу — картина поля в поперечном сечении (для середины изображенных продольных разрезов). Пунктирными линиями изображено магнитное поле, сплошными — электрическое. Точки — линии, идущие на нас, кружки — от нас.

Для прямоугольного волновода, имеющего большую сторону сечения a и меньшую b , критическая длина волны для всех возможных в этом волноводе типов волн определяется соотношением

$$(\lambda_{\text{кр}})_{m,n} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (21)$$

где m и n — целые числа, характеризующие так называемый порядок волн: они указывают, сколько полуволн укладывается по широкой и узкой частям попереч-

ного сечения волновода. Принято числа m и n применять в качестве индексов для обозначения возможных в волноводе волн ($E_{m,n}$ -волны и $H_{m,n}$ -волны). Различным сочетаниям наименьших значений целых чисел m и n соответствует, как пояснено ниже на примерах, неодинаковое строение поля волны.

Для волн с продольной составляющей магнитного поля наименьшим значением o и o o из чисел (m или n) является нуль, т. е. в волноводе возможно распространение волны H_{10} . Но для волн с продольной составляющей электрического поля ни одно из чисел m и n не может быть равно нулю; это означает, что наименьшими по своему порядку E -волнами являются волны E_{11} .

Чем меньше порядок волны, т. е., как ясно из выражения (21), чем больше длина волн, способных переносить энергию в волноводе, тем меньше затухание этих волн. Волны высоких порядков быстро затухают и поэтому не представляют практического интереса.

Как правило, для передачи энергии посредством волновода в нем возбуждают волны H_{10} , так как они являются волнами наименьшего возможного порядка и их затухание минимально. Согласно формуле (21) их критическая длина $(\lambda_{кр})_{10} = 2a$, т. е. вдоль широкой стороны волновода укладывается половина волны. Строение поля этих волн, а также волн H_{11} показано на рис. 453. Вследствие высокой электропроводности стенок волновода силовые линии электрического поля всюду подходят перпендикулярно к внутренней поверхности стенок (если они не замкнуты вокруг переменного магнитного поля). В стенках волновода возникают токи, направленные противоположно в симметричных участках стенок. Рис. 453 отражает характерную особенность поля H_{10} -волн: линии магнитного поля все время остаются перпендикулярными к узкой стенке волновода, а электрического — к широкой (и, как и во всех H -волнах, к продольной оси волновода). В поле H_{11} -волн ни одна компонента полей (кроме, конечно, продольной компоненты E -поля) не равна нулю.

На рис. 454 показано поле E_{11} -волн. Если представить себе, что здесь линии сил электрического поля замкнуты линиями тока вдоль проводящих стенок, и сравнить поле E_{11} -волн с полем в зоне, прилегающей к вибратору Герца (рис. 383 на стр. 496 и рис. 397 на стр. 509), то нетрудно заметить, что эти поля имеют одинаковое строение. Поэтому E_{11} -волны называют также волнами дипольного излучения. Поле E -волн второго порядка (E_{21} и E_{22}) аналогично полю так называемого квадрупольного излучения, т. е. излучения, производимого сочетанием двух тесно расположенных диполей с равными по величине, но противоположно направленными или взаимно-перпендикулярными токами.

Аналогично картина H -волн первого порядка в основных чертах воспроизводит строение поля в зоне излучающего магнитного диполя — витка

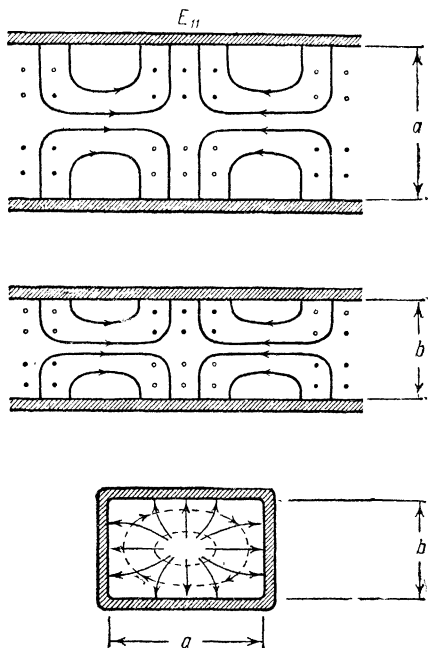


Рис. 454. Мгновенная картина E -волн наименьшего порядка. (Обозначения те же, что и на рис. 453.)

с током; H -волны второго порядка соответствуют излучению «магнитного квадруполь».

Чтобы перенос энергии в волноводе производился волнами типа H_{10} , широкое сечение волновода a , как уже упоминалось, должно превышать половину длины волны. Но оно должно оставаться хотя бы на 1% меньше целой длины волны, так как иначе, кроме волн H_{10} , в передаче энергии примут участие более затухающие волны H_{20} [для которых по формуле (21) $\lambda_{кр} = a$]. Когда нужно исключить также и волны H_{11} и принято, как это часто делают, $b \approx \frac{a}{2}$, то согласно

формуле (21) широкое сечение волновода a должно быть приблизительно на 11% меньше длины волны в волноводе.

Расчетная длина волн в волноводе λ_B и длина волн λ , создаваемых генератором в открытом пространстве, находятся в простом соотношении, которое определяется тем, что период колебаний в волноводе $T = \lambda_B \cdot v$ должен, понятно, совпадать с периодом генерируемых колебаний $T = \lambda c$. Следовательно,

$$\lambda_B = \lambda \frac{c}{v} = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (22)$$

В отличие от конца двухпроводной или коаксиальной линии, которые не создают излучения без антенны, настроенной на режим стоячих волн, из открытого конца волновода происходит непосредственное излучение бегущих волн. Но, чтобы излучение это было достаточно эффективным, нагрузка открытого конца волновода как излучателя должна быть равна (§ 90) волновому сопротивлению волновода¹⁾. Поэтому для реализации остронаправленного излучения открытый конец волновода оснащают антенной: в виде рупора прямоугольного сечения, или в виде металлического параболического зеркала (диаметром около 1—2 м), или щелевой, спиральной и т. п. Генераторы сантиметровых волн передвижных передатчиков часто располагают в герметизированном баке непосред-

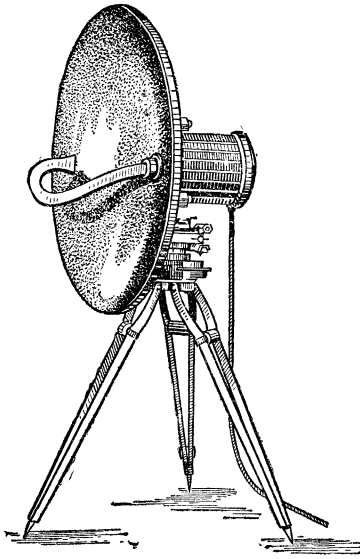


Рис. 455. Параболическая антенна с генератором сантиметровых волн.

или щелевой, спиральной и т. п. Генераторы сантиметровых волн передвижных передатчиков часто располагают в герметизированном баке непосред-

¹⁾ Волновое сопротивление волновода (с сечением $a \times b$) для волн типа H_{10} , имеющих длину в волноводе λ_B , а в открытом пространстве λ , вычисляется по формуле:

$$R_{\text{волн}} = \rho_0 \frac{\pi}{2} \frac{b}{a} \frac{\lambda_B}{\lambda}.$$

Здесь ρ_0 — волновое сопротивление открытого пространства, которое определяется как отношение амплитуды напряженности электрического поля в плоской электромагнитной волне к амплитуде напряженности магнитного поля (как меры смещения). Согласно формуле (10) § 89 и численным значениям магнитной и диэлектрической проницаемостей в практической системе единиц (§ 69):

$$\rho_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0^*}{\epsilon_0^*}} = 377 \text{ ом.}$$

ственно за антенной, как это показано, например, на рис. 455. На этом рисунке видно, что открытый конец волновода помещен в фокусе рефлектора.

Литые металлические зеркала—антенны больших радиотелескопов, рассчитанных на прием сантиметровых волн,—имеют диаметр 10—15 м, причем внутренняя поверхность их отличается от идеального парабооида не более чем на 1 мм.

§ 98. Радиолокация. Генерирование ультракоротких волн (клистроны и магнетроны)

Отражение ультракоротких (метровых и сантиметровых) волн от препятствий, встретившихся на пути их прямолинейного, лучевого распространения (§ 91), используют в радиолокации для определения местоположения крупных предметов, скрытых в темноте, в тумане или за облаками. Радиолокационные передатчики и приемники [радиолокаторы ¹⁾], установленные на кораблях и самолетах, позволяют водителям кораблей и самолетов видеть на экране очертания незримого берега, рельеф местности, другие корабли и самолеты. В годы войны радиолокаторы сыграли большую роль при защите от внезапных нападений с моря и воздуха.

Радиолокационные сигналы, подаваемые с аэродрома, предотвращают аварии при посадке самолетов в условиях плохой видимости. Сигналы радиомаяков помогают пилотам устанавливать правильный курс самолетов при полном отсутствии видимости ²⁾.

Высокая чувствительность радиолокационных приемников и большая мощность генераторов позволили еще в 1946 г. провести успешный опыт приемов сигналов, отраженных от поверхности Луны.

Радиолокационные установки работают преимущественно на дециметровых и сантиметровых волнах. Антенны радиолокационных установок обеспечивают острую направленность излучения. Излучающая антенна служит вместе с тем и для приема отраженных волн. Излучение производится к р а т к о в р е м е н н ы м и и м п у л ь с а м и: волны излучаются сериями продолжительностью каждая серия в миллионные доли секунды; одна серия излучаемых волн отделена от другой излучаемой серии паузой порядка тысячной доли секунды. Во время пауз производится прием отраженных волн. Мгновенная мощность излучаемых волн значительна (десятки и сотни киловатт), но так как продолжительность

¹⁾ От лат. locus—место.

²⁾ На трассе движения пассажирских самолетов устанавливается много десятков, иногда сотни радиомаяков. При полете летчик проворачивает «переключатель карт», в котором каждая карта имеет перфорированные отверстия, расположенные по особому коду так, что приемник самолета автоматически настраивается на волну радиомаяка, находящегося в центре местности, обозначенной на карте. Пилот видит на экране спроектированное на экран изображение карты, а также силуэт своего самолета над тем местом, над которым он находится в данный момент. Имеются также приборы, которые осуществляют автоматическое управление самолетом для сохранения заданного курса.