

مقدمه.....	۴
فصل اول.....	۴
معرفی طیف کامل امواج الکترومغناطیسی و خواص آن.....	۴
۱-۱ مقدمه ای بر اصول انتشار امواج رادیویی.....	۴
۱-۲ طیف کامل امواج الکترومغناطیسی.....	۶
۱-۲-۱ طیف فرکانس های صوتی (AF).....	۶
۱-۲-۲ طیف فرکانسهای رادیویی (RF).....	۷
۱-۳ چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی.....	۹
۱-۴ سرعت امواج الکترومغناطیسی در محیط های مختلف.....	۱۱
۱-۵ انکسار موج (شکست موج).....	۱۳
۱-۶ انعکاس موج (برگشت موج).....	۱۵
۱-۷ پخش (تفرق) امواج.....	۱۷
۱-۸ پلاریزاسیون موج.....	۱۷
فصل دوم.....	
ویژگیهای امواج رادیویی.....	
۲-۱ انتشار امواج.....	۱۸
۲-۱-۱ امواج زمینی (سطحی) (Ground Wave).....	۱۸
۲-۱-۲ امواج آسمانی (امواج انعکاسی - امواج یونسفری) (SKY WAVE).....	۱۹
۲-۱-۳ امواج فضایی دید مستقیم (Line of sight wave).....	۲۳
۲-۲ ویژگیهای باندهای مختلف رادیویی.....	۲۴
۲-۲-۱ باند فرکانس خیلی کم VLF.....	۲۴
۲-۲-۲ باند فرکانس کم LF.....	۲۴
۲-۲-۳ باند فرکانس متوسط MF.....	۲۴
۲-۲-۴ باند فرکانس زیاد HF.....	۲۵
۲-۲-۵ باند فرکانس خیلی زیاد VHF.....	۲۵
۲-۲-۶ باند فرکانس ماوراء زیاد UHF.....	۲۵
۲-۲-۷ باند فرکانس فوق العاده زیاد SHF.....	۲۶
۲-۲-۸ باند فرکانس EHF.....	۲۶
۲-۳ تأثیر اتمسفر (جو) بر امواج رادیویی.....	۲۶
۲-۴ افق رادیویی.....	۲۶
۲-۵ محو موج رادیویی.....	۲۸
۲-۶ امواج ماهواره ای.....	۲۸
۲-۶-۱ انتشار ماهواره های جهانی.....	۲۹
۲-۶-۲ انتشار ماهواره های منطقه ای.....	۲۹
۲-۶-۳ انتشار ماهواره محلی.....	۲۹

..... فصل سوم	۳۰
..... اصول آنتن، ویژگیها و انواع آن	۳۰
۳-۱ اصول آنتن	۳۰
۳-۲ چگونگی ایجاد میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در یک قطعه سیم (آنتن)	۳۰
۳-۳ پلاریزاسیون آنتن	۳۱
۳-۴ آنتن	۳۲
۳-۴-۱ آنتن دو قطبی کوتاه	۳۲
۳-۴-۲ پارامترهای مهم یک آنتن	۳۳
۳-۴-۲-۱ طول آنتن	۳۳
۳-۴-۲-۲ پهنای باند آنتن	۳۴
۳-۴-۲-۳ میزان برگشتی آنتن VSWR	۳۵
۳-۴-۲-۴ سمت گرایی و بهره سمتی (جهتی) آنتن	۳۵
۳-۴-۲-۵ بهره آنتن	۳۶
۳-۴-۲-۶ پرتوقدرت آنتن (گلبرگ تشعشع)	۳۷
۳-۴-۲-۷ مقاومت (امپدانس) تشعشعی آنتن	۳۸
۳-۴-۲-۸ دهانه مؤثر آنتن (سطح مؤثر)	۴۰
۳-۴-۲-۹ زاویه فضایی آنتن	۴۰
۳-۴-۳ انتخاب نوع آنتن	۴۰
۳-۴-۴ انواع آنتن‌ها	۴۱
۳-۴-۴-۱ آنتن ایزوتروپیک	۴۲
۳-۴-۴-۲ آنتن نیم موج (دایپل ، هرتز)	۴۲
۳-۴-۴-۳ آنتن دوبلت خمیده	۴۶
۳-۴-۴-۴ آنتن یاگی	۴۶
۳-۴-۴-۵ آنتن عمودی مارکنی (آنتن متحرک ویپ WHIP)	۴۷
۳-۴-۴-۶ آنتن‌های سیم بلند (موج متحرک)	۴۹
۳-۴-۴-۷ آنتن با بار انتهایی	۵۱
۳-۴-۴-۸ آنتن L معکوس	۵۲
۳-۴-۴-۹ آنتنهای مایکروویو	۵۲
۳-۵ آنتن سهمی	۵۳
۳-۶ آنتنهای مورد استفاده در ناوا	۵۳
۳-۶-۱ آنتن های شبکه پلیس راه VHF - LB ناوا	۵۳
۳-۶-۲ آنتن های شبکه انتظامی VHF-HB ناوا	۵۳
۳-۶-۳ آنتن شبکه ترانک تترا	۵۳
..... فصل چهارم	۵۳
..... مبانی خطوط انتقال	۵۳
۴-۱ خطوط انتقال و موجبرها (تغذیه کننده‌ها)	۵۵
۴-۲ اصول کلی خط انتقال	۵۵

۴-۳	مدار معادل خطوط انتقال.....	۵۶
۴-۴	امپدانس مشخصه خط انتقال.....	۵۶
۴-۵	تلفات در خطوط انتقال.....	۵۷
۴-۵-۱	اتلاف تشعشعی.....	۵۷
۴-۵-۲	گرمایش هدایتی.....	۵۷
۴-۵-۳	گرمایش دی الکتریک.....	۵۷
۴-۵-۴	تطبیق امپدانس.....	۵۸
۴-۵-۵	موجبرها.....	۵۸
	مراجع.....	
پیوست ۱		۶۰
	نمایه.....	
	اختصار کلمات کلیدی.....	۶۷

مقدمه

در این جزوه مطالب و مباحث حاضر در مورد انتشار امواج، اصول آنتن و خطوط انتقال، از نقطه نظر تئوری و عملی بطور ساده و قابل فهم مورد بحث قرار می گیرد.

موضوعات بحث شده، بگونه ای است که خواننده ضمن فراگیری مطالب به شکل تئوری، با دیدن مثالها و اشکال، با نمونه های عملی آن آشنا خواهد شد. در شرح بعضی از موضوعات فرمولهایی نیز برای فهم و درک صحیح موضوع ارائه شده و نتیجه گیریهایی که از آنها بدست می آید مدنظر قرار گرفته است. یکی از نقاط قوت این جزوه معرفی آنتنهایی است که در سازمان ها دارای کاربرد وسیعی می باشند. این بخش می تواند به شناخت بهتر دانشجویان از تجهیزات مخابراتی بکار گرفته شده در سازمان ها کمک کند.

فصل اول

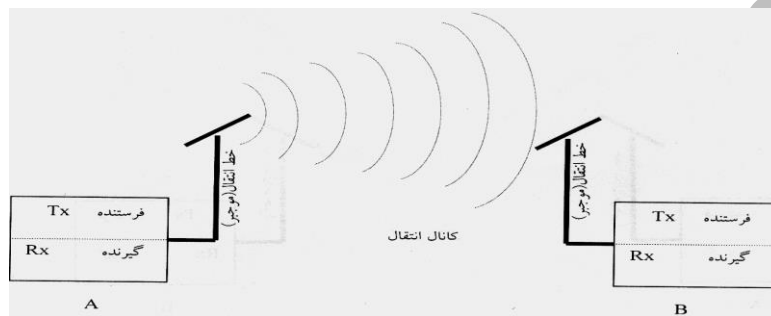
معرفی طیف کامل امواج الکترومغناطیسی و خواص آن

۱-۱ مقدمه ای بر اصول انتشار امواج رادیویی

بحث انتشار امواج رادیویی و آنتن ها بطور کلی در ارتباط با مخابرات مطرح می شود. بنابراین قبل از اینکه امواج الکترومغناطیسی و خصوصیات و چگونگی انتشار آن را مورد بررسی قرار می دهیم، در ارتباط با مخابرات و تاریخچه آن مطالبی را ارائه خواهیم نمود.

فرستادن، دریافت و تغییر و تبدیل پیام ها و اطلاعات با وسایل الکتریکی دانش مخابرات نامیده می شود. اصولاً مخابرات علمی است که از چگونگی انتقال خبر از یک نقطه به نقطه دیگر گفت و گو می کند. به عنوان مثال هدف از برقراری یک ارتباط تلفنی انتقال دو طرفه صوت از محلی به محل دیگر از طریق سیم (خط تلفن) می باشد ، بدین ترتیب که ارتعاشات صوتی صحبت کننده توسط میکروفن تبدیل به سیگنال الکتریکی با فرکانس صوتی می شود و در نتیجه صدا (صحبت) به گوش شنونده می رسد. تاریخچه دانش مخابرات از اواسط قرن نوزدهم در حدود سال ۱۸۳۸ با اولین پیام تلگرافی توسط ساموئل مورس و پس از آن اختراع تلفن در سال ۱۸۷۶ توسط الکساندر گراهام بل آغاز شد. پیدایش تلگراف و تلفن اگرچه با استقبال بی سابقه ای روبرو شد، ولی چون انتقال پیام در مورس و تلفن در آن زمان بوسیله سیم صورت می گرفت.

هزینه هنگفت سیم‌های ارتباطی در مسیرهای طولانی و همچنین عدم ارتباط بین دو نقطه که بین آنها دریاها و اقیانوس موجود بود، از نقاط ضعف این سیستم ارتباطی محسوب می‌شود. از این رو متخصصان این علم به این فکر افتادند که از عوامل طبیعی از قبیل هوا، آب و زمین برای انتقال اطلاعات به جاهای دوردست استفاده نموده و سیستم ارتباطی را از قیدوبند سیم‌های انتقال آزاد سازند. در این سیستم ارتباطی جدید، عامل انتقال اطلاعات، عوامل طبیعی (محیط فضای آزاد) بود، در نتیجه عمل انتقال بدون واسطه سیم‌های هادی انجام گرفت که این سیستم ارتباطی به نام مخابرات بیسیم (wireless communication) معروف شد. یک چنین سیستم مخابراتی از قسمتهای زیر تشکیل یافته است که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

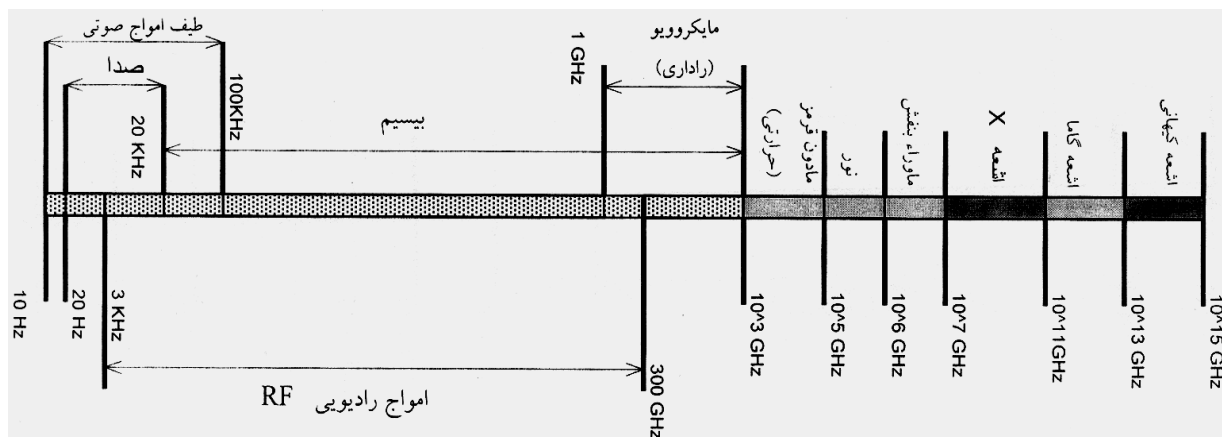


شکل (۱-۱) شمای کلی یک فرستنده گیرنده ساده

در این شکل دستگاه A در حال مخابره پیام و دستگاه B، در حال دریافت پیام است. در یک سیستم مخابراتی رادیویی، فرستنده و گیرنده به دستگاههای الکتریکی اطلاق می‌شود که قابلیت فرستادن و یا دریافت پیام را دارند و کانال انتقال، به محیطی اطلاق می‌شود که امواج در آن انتشار می‌یابند. در این سیستم کانال انتقال فضای آزاد است. فضا خاصیت انتقال امواج الکترومغناطیس را دارا می‌باشد. خط انتقال به کابلهایی گفته می‌شود که پیام را به صورت موج الکتریکی از فرستنده به آنتن و در محل گیرنده از آنتن به گیرنده انتقال می‌دهد. مهم‌ترین مسئله در ارتباط بیسیم فرستادن پیام از طریق امواج الکترومغناطیسی به فضا و گرفتن این امواج از آن می‌باشد. بطور کلی دریافت و ارسال پیام از طریق امواج الکترومغناطیس توسط دستگاههای الکتریکی گیرنده و فرستنده انجام می‌شود. ولی دادن امواج الکترومغناطیس به فضا در محل فرستنده و گرفتن این امواج از فضا در محل گیرنده به سیستم خاصی محتاج است که این سیستم آنتن نامیده می‌شود. آنتن وسیله‌ای است که سیگنال الکتریکی مدوله شده در سیستم فرستنده را به امواج الکترومغناطیسی و امواج الکترومغناطیسی دریافتی از فرستنده را به سیگنال الکتریکی در سیستم گیرنده تبدیل می‌نماید. وظیفه آنتن، ارسال امواج به فضا و همچنین جذب امواج از فضا با بهره (Gain) مناسب می‌باشد. در سیستمهای مخابراتی عموماً فرستنده و گیرنده در سیستم جدا از هم نیستند، بلکه هر سیستم به تنهایی خود هم فرستنده است و هم گیرنده. بنابراین آنتن هر دستگاه نیز به عنوان آنتن گیرنده و فرستنده بکار می‌رود.

۱-۲ طیف کامل امواج الکترومغناطیسی

در شکل (۱-۲) محدوده طیف کامل امواج الکترومغناطیسی را مشاهده می کنید، امواج رادیویی که بیسیم ها در این طیف فرکانس طراحی و ساخته می شوند فقط یک نوع از انرژی الکترومغناطیس می باشند.



شکل (۱-۲) طیف کامل امواج الکترومغناطیسی

انرژی های دیگر بصورت امواج مادون قرمز (حرارتی) امواج نورانی (طیف مرئی) ، امواج موراء بنفش ، اشعه X ، پرتوهای گاما، اشعه کیهانی می باشند. با آنکه سرعت همه آنها در خلاء یکی است ولی خواص آنها متفاوت است. به عنوان مثال، چشم انسان نمی تواند همه امواج الکترومغناطیس را ببیند، بلکه قسمت کوچکی از آن با چشم دیده می شود. بعضی از نواحی طیف روی هم همپوشانی دارند و نامگذاری آنها بستگی به این دارد که چگونه تولید می شوند و بیشتر کدام خواص را از خود نشان می دهند.

انرژی این امواج بستگی به فرکانس آنها دارد ، امواجی که ما پیرامون آن بحث خواهیم کرد، قسمت کوچکی از این طیف عریض را اشغال کرده اند که در حقیقت در قسمت پایین این طیف بنام باند فرکانسهای رادیویی آورده شده که بیسیمها و تجهیزات رادیویی در این باند ساخته می شوند

۱-۲-۱ طیف فرکانس های صوتی (AF)

امواج صوتی از نوع موج های مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید می شوند و در گازها و مایعات و جامدات منتشر می گردد. در اینجا ما صوت را به صورت موج و یا یک حرکت ارتعاشی در نظر می گیریم، با خواص موجی آن مانند فرکانس، طول موج ، سرعت انتشار و غیره آشنا می شویم.

حدود باند امواج صوتی که توسط گوش انسان قابل شنیدن هستند ، دارای فرکانسهایی بین 20Hz تا 20KHz می باشند که اصطلاحاً به آن فرکانس صوتی یا صدا (Audio Frequency) گفته می شود.

معمولاً فرکانسهای از 10Hz تا 100KHz را طیف امواج صوتی در نظر می گیرند و فرکانس های بالاتر از 20KHz که توسط گوش انسان شنیده نمی شود ، موراء صوت نامند.

صوتی که از یک منبع مولد تولید می شود فوراً به گوش نمی رسد بلکه با سرعتی که از سرعت نور به مراتب کوچکتر است ، در محیط منتشر می گردد. انتشار صوت در واقع انتشار حرکت ارتعاشی منبع مولد صوت است که به صورت طولی در مسیر خود ، مولکولهای محیط را در راستای انتشار به ارتعاش در می آورد. امواج صوتی در محیط با سرعت بین 330m/s تا 340m/s حرکت می کند که توسط جابجایی مولکولهای هوا انتقال می یابند. سرعت صوت در یک محیط (سیال) به فشار، جرم حجمی، جرم مولکولی و دمای سیال بستگی دارد. بنابراین سرعت امواج صوتی از محیطی به محیط دیگر متفاوت خواهد بود. باند فرکانسی مولدهای صوتی و کاربرد آنها در جدول (۱-۱) آمده است.

فرکانس	مولدهای فرکانس صوتی	کاربرد
امواج مادون صوت ۰-۲۵Hz	انفجارها	پژوهش های زمین شناسی، فاصله یابی پژوهش های لایه های بالای جو
امواج صوتی ۱۰-۲۰۰۰Hz	بلندگوها، آذیرها، بوق، صدای انسان، آلات موسیقی، ملخ هواپیما، موتور جت	ارتباطات، سیستم های پخش صوت، اعلام خطر، مطالعات صوتی
امواج ماوراء صوت (اولتراسونیک)	صوت های هوایی، نوسان سازهای کریستالی، پیزوالکتریک، کوارتز کریستال	ارتباط زیرآبی، مصارف شیمیایی بیولوژیکی تشخیص شکستگی و خوردگی بدنه های فلزات
سراسر طیف صوتی	تخلیه الکتریکی مدوله شده	ارتباطات

جدول (۱-۱)

۱-۲-۲ طیف فرکانس های رادیویی (RF)

باند فرکانس رادیویی دارای فرکانس هایی بین ۳ KHz تا ۱۰۰۰ GHz است که به آن باند امواج رادیویی (RF) گفته می شود. در مقایسه با امواج صوتی از فرکانس ۲۰ KHz به بالا با گوش انسان قابل شنیدن نیست و تقریباً با سرعت نور 3×10^8 متر بر ثانیه در محیط (فضای آزاد) حرکت می کند.

فرکانس های امواج رادیویی و فرکانسهای بیشتر بر خلاف طیف امواج صوتی قادرند در محیط بدون هوا (خلاء) منتشر شوند. یک موج رادیویی توسط نوسان ساز قوی و تقویت کننده قدرت فرستنده ها تولید و توسط آنتن منتشر می گردد. امواج رادیویی مجموعه ای از بردارهای الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) هستند که در فضا با یکدیگر زاویه (۹۰) درجه ایجاد کرده و هر دو در جهت انتشار، عمود می باشند. نصف انرژی امواج رادیویی شامل انرژی الکتریکی و نصف دیگر آن انرژی مغناطیسی است. به همین دلیل این امواج، امواج الکترومغناطیسی نیز گفته می شود.

باندهای فرکانس رادیویی

توسط کمیته ای به نام مقررات رادیویی بین المللی (International Radio Regulation) استاندارد باندهای فرکانسی انجام می گیرند.

باند های فرکانس رادیویی که در سیستم های ارتباطات رادیویی مطرح می باشد، در جدول (۱-۲) مشاهده می کنید.

نام باند	کاربردها	حدود فرکانس	طول موج	محیط انتقال
فرکانس خیلی کم VLF	تلفن، تلگراف و مخابرات دریایی	۳-۳۰ KHz	موج بلند	خط دو سیم
فرکانس کم LF	امواج رادیویی برای هدایت هواپیما و کشتی ها ، مخابرات بین قاره ای و مخابرات زیر دریایی	۳۰-۳۰۰ KHz	موج بلند	خط دو سیم
فرکانس متوسط MF	هواپیمایی- رادیو AM	۳۰۰-۳۰۰۰ KHz	موج متوسط	کابل کواکسیال
فرکانس زیاد HF	تجارتی و نظامی ، رادیوهای آماتوری بین المللی	۳-۳۰ MHz	موج کوتاه	کابل کواکسیال
فرکانس خیلی زیاد VHF	بی سیم-باند VHF تلویزیون-FM	۳۰-۳۰۰ MHz	موج متری	کابل کواکسیال
فرکانس ماوراء زیاد UHF	هواپیمایی و بیسیمها-باند UHF	۳۰۰-۳۰۰۰ MHz	موج سانتیمتری	کابل کواکسیال
فرکانس فوق العاده زیاد SHF	میکروویو-ارتباط زمین به ماهواره-رادار-فضانوردی	۳-۳۰ GHz	موج سانتیمتری	کابل کواکسیال و موجبر
فرکانس باند EHF	ارتباط ماهواره ای-آزمایش و نجوم رادیویی دریانوردی	۳۰-۳۰۰ GHz	موج میلیمتری	موجبر

جدول (۱-۲)

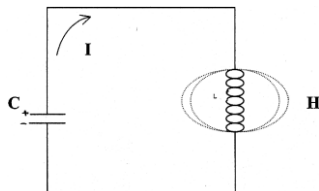
در جدول فوق وقتی گفته می شود باند VHF مقصود امواجی است که فرکانس آنها بین ۳۰ MHz تا ۳۰۰ MHz می باشد. امواج رادیویی بر حسب فرکانس ، مصارف و کاربردهای بخصوصی در مخابرات دارند. در جدول (۱-۳) حدود کاربرد هریک بیان شده است.

نام باند	فرکانس	مصارف
LW	۱۰-۵۰۰ KHz	موج بلند- برای مخابرات دریایی
MW	۵۳۵-۱۶۰۵ KHz	موج متوسط- برای فرستنده های درون مرزی
SW	۳-۲۷ MHz	موج کوتاه- برای فرستنده های برون مرزی
باند شهری C.B	۲۷-۴۷ MHz	مخابرات دولتی- پلیس ، آتش نشانی
VHF-1	۴۷-۶۸ MHz	باند پایین کانالهای (۴۲) تلویزیون
VHF	۸۸-۱۱۰ MHz	رادیوهای FM
VHF	۱۰۸-۱۷۴ MHz	هواپیمایی، هواشناسی و مصارف تجاری، نظامی پلیس، شهری و مخابرات دریایی
VHF-II	۱۷۴-۲۳۰ MHz	باند بالای VHF کانالهای تلویزیون (۱۲-۵)
VHF-UHF	۲۳۰-۴۷۰ MHz	مصارف طبی- راداری

جدول (۱-۳)

۱-۳ چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی

یک مدار الکتریکی متشکل از سیم پیچ با خود القای L ، خازن با ظرفیت C که طرح ساده ای از آن در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است. مدار نوسان کننده ای است به نام " LC " که قبلاً در دروس مدار الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است و در آن تخلیه بار الکتریکی خازن به صورت نوسانات سینوسی میرا (مستهلك شونده) انجام می گیرد.



شکل (۱-۳)

اگر مدار LC را با مجموعه ای از قطعات دیگر الکترونیکی و منبع تغذیه کنار هم قرار دهیم به طوری که تشکیل یک مدار نوسان ساز را بدهند. فرکانس جریان نوسانات ایجاد شده از فرمول (۱-۱) محاسبه می شود.

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{فرمول (۱-۱)}$$

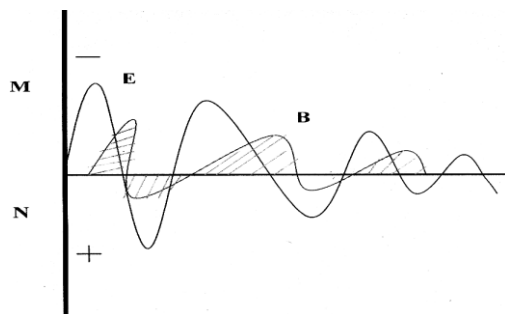
در این فرمول f فرکانس نوسانات بر حسب هرتز (Hz) و L خود القا با اندوکتانس بر حسب هانری (H) و C ظرفیت خازن بر حسب فاراد (F) می باشد. در این حالت مدار به تشدید (رزونانس) درمی آید که با تغییر L و C فرکانس مدار LC تغییر خواهد کرد، معمولاً L را انتخاب و برای انتخاب فرکانس مورد نظر C را تغییر می دهند. برای درک صحیح چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی که قصد داریم در این قسمت مطرح کنیم اصول تئوری آقای ماکسول درباره امواج الکترومغناطیسی را بیان می کنیم. او اظهار داشت تئوری الکترومغناطیس از چهار اصل زیر مایه گرفته است :

- ✓ جریان الکتریکی در یک هادی میدان مغناطیسی تولید می کند که خطوط میدان در اطراف هادی دور می زنند.
- ✓ حرکت هادی در یک میدان مغناطیسی که منجر به قطع خطوط میدان مغناطیسی شود، جریان الکتریکی در آن القا می کند.

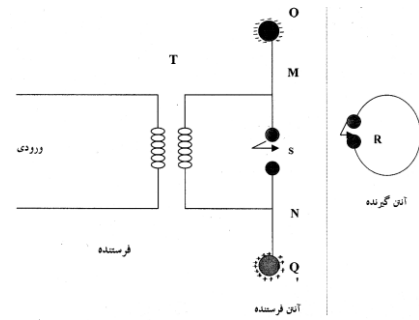
- ✓ تغییر میدان الکتریکی در فضا سبب ایجاد میدان مغناطیسی می شود.
 - ✓ تغییر میدان مغناطیسی در فضا سبب ایجاد میدان الکتریکی می شود.
- ماکسول از صورت معادلات ریاضی که روابط میان میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را آشکار می کرد نتیجه گرفت دو میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H) در هر نقطه از فضا برهم عمودند و هر دو میدان، عمود بر جهت انتشار می باشند که با سرعت نور در محیط منتشر می شوند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نور هم قاعداً باید از جنس امواج الکترومغناطیس باشد.

اولین تجربه در رابطه با تولید عملی امواج الکترومغناطیس در آزمایش توسط دانشمند جوان ایتالیایی بنام مارکونی انجام گرفت که در جریان آن توانست امواج الکترومغناطیسی را تولید و آشکار سازد و علاوه بر آن هرتز دانشمند

آلمانی ضمن تکرار آزمایش مارکونی توانست بعضی از خواص مهم این امواج مانند انعکاس و تداخل را نشان دهد. شکل (۱-۴) آزمایش هرتز را نشان می دهد که در آن فرستنده و گیرنده امواج دیده می شود.



شکل (۱-۵)



شکل (۱-۴)

دستگاه فرستنده هرتز از دو میله فلزی مستقیم M و N تشکیل شده که به یک سر هر کدام یک کره بزرگ باردار بنام Q_1 و Q و به سر دیگر آنها یک کره کوچک نصب شده است. اگر این دو میله به ثانویه بوبین القای T وصل شود، در دهانه S جرقه تولید شده و یک جریان نوسانی بین M و N برقرار می شود. علت ایجاد جریان نوسانی این است که مجموعه دو کره و میله مانند یک مدار نوسان کننده الکتریکی است. کره های Q_1 و Q مانند صفحات خازن و میله های M و N مشابه اندوکتانس عمل می کنند. گیرنده هرتز از یک حلقه ساده با شکاف R مخصوص جرقه زدن تشکیل شده است، هرتز با استفاده از این فرستنده و گیرنده ساده خود توانست علائم الکتریکی (رادیویی) را به فاصله چندصد متری ارسال و دریافت کند. او ضمن آزمایش های جالب خود متوجه شد که امواج ارسال شده از فرستنده در اثر برخورد با صفحات بزرگ فلزی منعکس می شوند و اگر امواج در امتداد عمود بر صفحه فلزی ارسال شوند پس از برخورد به مانع منعکس شده و با امواج تابش تداخل پیدا کرده و تولید گره و شکم می کند.

هرتز، سرعت انتشار این امواج را اندازه گرفت و دریافت نتیجه همان است که ماکسول پیشگویی کرده بود. یعنی در آزمایش های خود نتیجه گرفت که این امواج تمام خواص نور را (بازتابش، تفرق و تداخل) دارا می باشند.

حال شرح نحوه عملکرد مدار نوسان کننده هرتز را بررسی می کنیم. فرض کنید میله های M و N و کره های Q_1 و Q قبلاً باردار شده اند (در یک نیم سیکل موج از فرستنده T) بطوریکه Q_1 دارای بار منفی و Q دارای بار مثبت است، این دو کره باردار در فضای اطراف خود میدان الکتریکی (E) خواهند داشت که می توان اثر آن را بر روی بار مثبت آزمون در امتداد خط عمود بر M و N دریافت کرد. وقتی در دهانه S جرقه زده شود نوسان الکتریکی بین دو کره Q_1 و Q شروع می شود. در نیم پریود بعدالکترون ها از فاصله S عبور می کنند و Q_1 منفی و Q مثبت می گردد و در نتیجه شدت میدان الکتریکی در یک نقطه نسبت به نیم پریود قبلی (۱۸۰ درجه عوض می شود. بطور کلی در اثر نوسان الکترون ها بین دو کره Q_1 و Q) میدان الکتریکی متناوب در اطراف آنها ایجاد می شود که دامنه آن با دور شدن از میله M و N کاهش می یابد.

علاوه بر میدان الکتریکی در اثر حرکت نوسانی الکترون ها، میدان مغناطیسی متناوب H در اطراف مسیر حرکت الکترون ها ایجاد می شود که امتداد آن عمود بر صفحه کتاب می باشد. دامنه این میدان نیز با دور شدن از میله M و N کاهش می یابد. موج الکترومغناطیس نوسان کننده هرتز به صورت شکل (۱-۵) می باشد.

اگر در فاصله S یک سری جرقه به طور متناوب ایجاد شود، هر جرقه یک دسته نوسان میرا در MN ایجاد می کند که این نوسان به نوبه خود یک موج الکترومغناطیسی میرا به فضا می فرستد. چنانچه یک هادی که دارای بار الکتریکی مثبت و منفی می باشد در مسیر این امواج قرار گیرد (مانند یک سیم هادی که به عنوان آنتن گیرنده عمل می کند) بارهای الکتریکی در اثر نیروی وارد از امواج شروع به نوسان می کنند. اگر هادی (آنتن گیرنده) مورد نظر مدار نوسان کننده ای باشد که فرکانس طبیعی آن (فرکانس تشدید) با فرکانس امواج یکی باشد تشدید حاصل می شود و الکترون ها در مدار شروع به نوسان می کنند (نظیر این وضع در حلقه هرتز پیش می آید و در شکاف R جرقه می زند) بدیهی است با تنظیم عرض شکافی R (در گیرنده ها با تنظیم یا محاسبه طول آنتن) می توان حالت تشدید را به وجود آورد.

نتیجه ای که از این بحث و آزمایش هرتز می توان گرفت این است که هرتز در واقع با این آزمایش نشان داد، آنتن ها نیز که در مباحث آینده مورد بحث قرار خواهند گرفت از یک مدار نوسان کننده LC درست شده اند که فرستنده با اعمال جریان متناوب با فرکانس بر روی آنتن به حالت تشدید در می آید، آنتن فرستنده که با فرکانس f محاسبه شد به حالت تشدید درآمده و نوسان می کند و امواج را به فضا انتشار می دهد. اگر آنتن گیرنده نیز با فرکانس تشدید f محاسبه شود و در مسیر امواج منتشر شده توسط آنتن فرستنده قرار گیرد امواج را دریافت و به حالت تشدید (نوسان) در می آید و در گیرنده آشکار خواهد شد.

آنتن گیرنده نیز با فرکانس تشدید f محاسبه می شود و در معرض امواج انتشار داده شده توسط آنتن فرستنده قرار گیرد، امواج را دریافت و به حالت تشدید (نوسان) در می آید و در گیرنده آشکار خواهد شد.

۴-۱ سرعت امواج الکترومغناطیسی در محیط های مختلف

بنا به تئوری ماکسول هرگاه از یک سیم هادی جریان متناوب عبور نماید، مقداری از انرژی الکتریکی در سیم به صورت انرژی الکترومغناطیسی از اطراف به خارج منتشر می شود. اگر چه این انرژی تشعشعی در فرکانسهای پایین خیلی کم است اما در فرکانسهای بالامقدار آن قابل ملاحظه خواهد بود. انرژی الکترومغناطیسی منتشر شده از یک سیم به صورت میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H) در فضا منتشر می شود عامل انتقال این انرژی فوتون ها هستند. مقدار انرژی این فوتونها بستگی به فرکانس نوسانات در سیم دارد. به این معنا که هرچه فرکانس جریان در سیم حامل جریان بیشتر باشد، انرژی فوتونها بیشتر خواهد بود. گفتیم امواج الکترومغناطیسی نوساناتی هستند که در فضای آزاد با سرعت نور (3×10^8 متر بر ثانیه) حرکت می کنند، از طرفی بین فرکانس و طول موج و سرعت انتشار آن در محیط فرمول (۱-۲) برقرار است.

$$V = \lambda \cdot f \longrightarrow \lambda_{(m)} = \frac{300}{f_{(MHZ)}} \quad \text{فرمول (۱-۲)}$$

V : سرعت موج در محیط انتشار بر حسب متر بر ثانیه (m/s) که اغلب با C نمایش داده می شود.

f : فرکانس موج بر حسب هرتز و یا سیکل بر ثانیه (C/S)

λ : طول موج بر حسب متر (m) و آن عبارت است از مسافتی که موج در یک سیکل کامل موج رادیویی طی می کند.

مسئله : طول موج فرکانس 10^{10} گیگا هرتز چقدر است ؟

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10 \times 10^9 \text{ c/s}} = 0.03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

جواب:

بنابراین یک موج با سرعت انتشار معین هرچه فرکانس آن بیشتر باشد طول موج آن کمتر خواهد شد و هرچه فرکانس امواج الکترومغناطیس بیشتر شود خواص آن به خواص نور نزدیکتری گردد. سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در یک محیطی که ضریب شکست آن نسبت به هوا (خلا) n باشد از فرمول (۱-۳) محاسبه می شود .

$$V = \frac{C}{n} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}} \quad \text{فرمول (۱-۳)}$$

سرعت موج در یک محیط با ضریب شکست n ، V سرعت موج در محیط بر حسب متر بر ثانیه، C سرعت نور در خلا بر حسب متر بر ثانیه، n ضریب شکست محیط، ϵ ثابت دی الکتریک محیط که برای خلا، برابر واحد و برای هوای آزاد نیز تقریباً برابر واحد در نظر می گیرند. هدف از مطرح کردن این فرمول این است که نشان بدهیم وقتی نور از هوا وارد محیط شفاف مثل آب یا شیشه می شود سرعتش کاهش می یابد و در نتیجه شکست حاصل می شود. بنابراین علت شکست امواج در موقع انتشار آن از محیطی به محیط دیگر، تغییر ضریب شکست و در نتیجه تغییر سرعت آن می باشد. در فرمول (۱-۳)، ϵ ثابت دی الکتریک برای هر محیط متفاوت بوده لذا سرعت انتشار موج در یک محیط به جنس آن محیط بستگی دارد. محیطی که موج در آن انتشار می یابد، دارای یک امپدانس مشخصه است که از نسبت میدان الکتریکی (E) به میدان مغناطیسی (H) در محیط محاسبه می شود .

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{فرمول (۱-۴)}$$

Z امپدانس مشخصه محیط انتشار موج بر حسب اهم (Ω)، E ، مؤلفه میدان الکتریکی موج منتشره در محیط بر حسب ولت بر متر (V/m)، H ، مؤلفه میدان مغناطیسی موج منتشره در محیط بر حسب آمپر بر متر (A/M)، μ ، ضریب نفوذ مغناطیسی محیط، ϵ ، ثابت دی الکتریک محیط، ϵ, μ هر دو به جنس محیط بستگی دارند. امپدانس مشخصه فضای آزاد برابر است با :

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 376.7 \approx 377 \Omega \quad \text{فرمول (۱-۵)}$$

این امپدانس با امپدانس مدار الکتریکی فرق می کند . چون در مدار الکتریکی، امپدانس به مقدار و نوع المان آن بستگی دارد، ولی این امپدانس با هر E و H که در محیطی منتشر شود، در تمام محیط (فضا) یکی است و اگر موج منتشره در محیط (E و H) تغییر کند، باز امپدانس محیط تغییر نمی کند . امپدانس مشخصه محیط ($Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$) عامل تلفات نیست، فقط نسبت $\frac{E}{H}$ می باشد به خاطر اینکه اگر نسبت E به H را محاسبه کنیم، واحد آن اهم می شود و

$$Z = \frac{E}{H} = \frac{\frac{V}{A}}{\frac{m}{A}} = \frac{V}{m} \quad \text{فرمول (۱-۶)} \quad \text{ما می دانیم واحد اهم را برای امپدانس در نظر می گیرند .}$$

۵-۱ انکسار موج (شکست موج)

وقتی که به آب درون یک استخر نگاه می کنیم، عمق آب را به ظاهر کمتر از آنچه هست می بینیم. هنگامی که قسمتی از یک قطعه چوب را بطور مایل در آب فرومی بریم و به آن نگاه می کنیم، چوب را در محل فرورفتن در آب شکسته می بینیم و این به دلیل شکست نور است، وقتی از هوا وارد آب می شود. شکست نور عبارت است از انحراف ناگهانی مسیر پرتوهای نور (الکترومغناطیس) که بطور مایل از یک محیط شفاف مانند هوا وارد محیط شفاف دیگری مانند آب یا شیشه بشود به عبارت دیگر اگر موج یا نور از محیطی به محیط دیگر وارد شود، بعلاوه تغییر سرعت در سطح جدایی دو محیط تغییر مسیر می دهد که این پدیده را شکست موج گویند. اگر یک موج به طور عمودی بر سطح یک محیط بتابد، بدون شکست در همان راستایی که تابیده (عمود) وارد محیط دوم می شود. شکل (۹-۱) مسیر پرتوی را نشان می دهد که از هوا (با ضریب شکست کمتر n_a) وارد شیشه (با ضریب شکست بیشتر n_b) می شود و در محل ورود به شیشه شکست می یابد. باید به این نکته توجه کنیم وقتی موج از هوا یا خلأ وارد ماده چگالتری مانند شیشه یا آب می شود ($n_b > n_a$) طوری می شکند که پرتو شکست به خط عمود نزدیکتر می شود. برعکس هنگامی که موج از ماده ای چگالترا از هوا (مانند شیشه یا آب) وارد هوا می شود، پرتو شکست از خط عمود دور می گردد. مقدار موج شکست یا موج انتشار یافته به محیط دوم به ضریب انتشار محیط بستگی دارد. لازم به تذکر است که مقداری از موج تابش پس از برخورد به سطح مشترک و محیط، منعکس شده و به محیط اول برمی گردد که در جای خود راجع به آن بحث خواهیم کرد. قانون شکست موج توسط اسنل و دکارت مطرح شد که برای یادآوری آنها را بیان می کنیم.

✓ پرتو تابش پرتو شکست و خط عمود بر سطح جداکننده دو محیط در نقطه تابش، هر سه در یک صفحه هستند.

✓ برای دو محیط شفاف معین، نسبت سینوس زاویه تابش به سینوس زاویه شکست مقداری ثابت است.

این مقدار ثابت را ضریب شکست محیط (یعنی محیطی که موج شکست در آن قرار دارد) نسبت به محیط اول (یعنی محیطی که موج تابش در آن واقع است) می نامند. سرعت موج تابش پس از برخورد به سطح مشترک که مرز دو محیط غیر همگن (غیر همسان) است از V_A به V_B تغییر می یابد. بنابراین، قانون دوم شکست موج به صورت فرمول (۷-۱) نوشته می شود.

$$\frac{\sin i}{\sin v} = n_{BA} = \frac{n_B}{n_A} = \frac{V_A}{V_B} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B}$$

فرمول (۷-۱)

n_{BA} ضریب شکست محیط دوم (B) نسبت به محیط اول (A)، V_B و λ_B به ترتیب سرعت موج و طول موج در محیط دوم و V_A و λ_A به ترتیب سرعت موج و طول موج در محیط اول می باشد. حال به حالت های مختلفی که در انتشار موج از محیطی به محیط دیگر ممکن است اتفاق بیفتد توجه می کنیم.

محیط اول هوا (خلأ) و محیط دوم یک هادی باشد، در این صورت مقدار کمی از موج در هادی جاری و تقریباً مقدار زیادی از آن منعکس می شود. بنابراین اگر محیط دوم یک هادی خالص (فلزات هادی مانند مس) باشد، آنگاه تمام موج تابش

منعکس شده و موج انتشاری به داخل هادی نخواهیم داشت. به خاطر همین خاصیت از فلزات هادی بعنوان منعکس کننده امواج الکترومغناطیس استفاده می کنند. اگر رادیو را در فضایی که از فلز پوشیده شده روشن کنیم، به دلیل اینکه امواج در برخورد به پوشش فلزی تماماً منعکس شده و به داخل انتشار نمی یابد، رادیو موجی از ایستگاه های موجود را دریافت نخواهد کرد.

محیط اول یک هادی (مثلاً آنتن) و محیط دوم هوا (خلأ) باشد، برای یک موج که یک محیط هادی (آنتن) را ترک می کند شدت میدان الکتریکی در مرز تقریباً دوبرابر می شود و دامنه شدت میدان الکتریکی موج انعکاس باموج انتشار (موج اصلی) تقریباً برابر می شود و این معرف یک موج ساکن در محیط اول (آنتن) می باشد.

محیط اول یک خط انتقال و محیط دوم امپدانس بینهایت باشد (خط انتقال باز)

شکل (۶-۱) خط انتقال باز

در این حالت همه موج ارسالی در خط انتقال منعکس می شود، به همین علت در سیستم های رادیویی بیسیم به افرادی که با دستگاه کار می کنند تأکید می شود دستگاه را بدون اتصال آنتن به خروجی به حالت ارسال نبرند، زیرا خروجی بیسیم بدون اتصال آنتن مانند خط انتقال باز عمل نموده همه توان ارسالی به دستگاه برمی گردد (رفلکت) و احتمالاً به آن صدمه وارد خواهد شد.

اگر محیط اول و دوم یکسان باشد مانند یک خط انتقال پیوسته و امپدانس مشخصه یکنواخت و یاماندود محیط با امپدانس مشخصه مساوی، در این حالت تمام موج ارسال شده به محیط اول تماماً وارد محیط دوم می شود، انتشار آن به محیط دوم انتشار کامل بدون انعکاس و برگشتی می باشد. به همین منظور، انتقال تمام موج از خط انتقال به آنتن باید امپدانس مشخصه آنتن و خط انتقال یکی بوده و توجه کرد که تطبیق امپدانس صورت گرفته باشد، در انتشار امواج رادیویی هر قدر فرکانس موج بیشتر شود، شباهت آن به امواج نورانی بیشتر می گردد. بر اثر پدیده انکسار امواج شروع به خم شدن (شکستن) می کنند. شکل (۷-۱) را مشاهده کنید.



(a)

VHF- Low band



(b)

VHF-High band/UHF

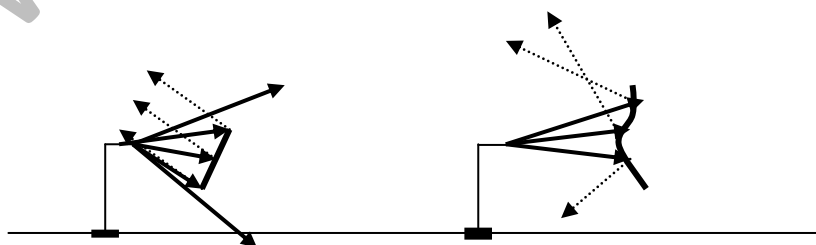
شکل (۷-۱) انکسار

در اینجا چگونگی پنهان شدن آنتن گیرنده از آنتن فرستنده دیده می شود. (a) در فرکانسهای پایین نظیر پایین باند VHF، امکان رسیدن مقداری انرژی به آنتن گیرنده وجود دارد. (b) در فرکانسهای بالا نظیر بالای باند VHF بخصوص باند UHF با وجود خم شدن امواج سیگنالی به آنتن گیرنده نمی رسد.

در اینجا آنتن گیرنده از آنتن فرستنده توسط تپه بزرگی پنهان شده است، با وجود این، آنتن گیرنده مقداری از موج رادیویی را توسط پدیدهٔ خم شدن امواج (در اثر شکستن در حین برخورد به لبه‌های محیط دوم که تپه است) در فرکانسهای پایین دریافت می‌کند. در فرکانسهای بالاتر، اثر انکسار کم می گردد. شکل (۷-۱) b در این شکل، آنتن گیرنده هیچ موجی را دریافت نمی کند، چون امواج به قدر کافی خم نمی شود برای غلبه بر این اشکال، آنتن گیرنده را باید در بالای تپه گذاشت و توسط خط انتقال (کابل هم محور) با افت کم به دستگاه که در پایین می‌باشد وصل نمود و یا با نصب یک تکرارکننده در بالای تپه موج رادیویی را به گیرنده تغذیه نمود، نقاطی که امواج بدینصورت به آنها نمی رسد به نقاط سایه معروفند. نواحی سایه در UHF بیشتر از VHF است، همچنین ساختمانها و درختها، امواج UHF را به مقدار زیاد تضعیف می کنند [۵، ۱۱، ۶].

۱-۶ انعکاس موج (برگشت موج)

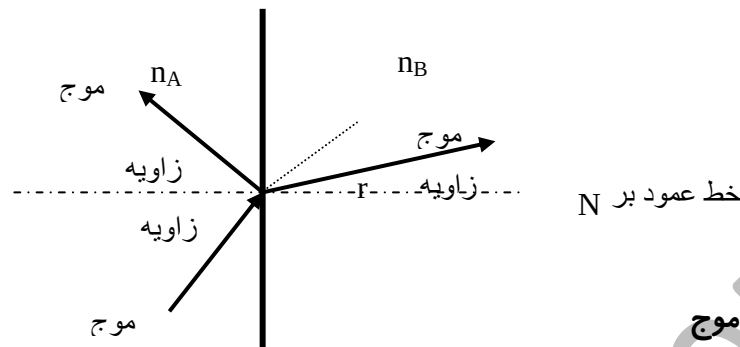
مقداری از امواج الکترومغناطیس پس از برخورد به مانع منعکس می گردد. قوانین انعکاس امواج نیز مشابه قوانین انعکاس امواج نورانی است. زاویهٔ تابش با زاویه انعکاس برابرو هر دو اشعه و خط عمود بر سطح در یک صفحه قرار دارند. بیشتر اجسام نور (امواج الکترومغناطیس) را منعکس می کنند. در معمولی‌ترین نوع انعکاس که پخش نور نامیده می شود، نور در تمام جهات منعکس می شود. کتابی که روی یک میز در اتاق قرار دارد، بوسیله یک نور، نقطه ای روشن شده است از هر گوشهٔ اتاق می‌توان آنرا دید. این نوع انعکاس وقتی اتفاق می افتد که زبری جسم که نور را منعکس می‌کند نسبت به طول موج نور (طول موج امواج الکترومغناطیسی) منعکس شده دارای ابعاد بزرگتری باشد. در نوع دیگر انعکاس که انعکاس منظم می‌باشد، یک دسته اشعه باریک نور (موج) در یک امتداد فقط منعکس می شود. این نوع انعکاس در سطح صاف که زبری آن نسبت به طول موج منعکس شده کوچک است، اتفاق می‌افتد. برای مثال، انعکاس نور روی کاغذ، نور را پخش می‌کند در صورتی که انعکاس نور در آینه پخش نمی‌شود. به هر حال انعکاس توسط سطح ناصاف



در جهات مختلف صورت می گیرد، شکل (۸-۱) را ببینید.

شکل (۸-۱) نحوهٔ انعکاس امواج از سطوح مختلف اجسام

همانطور که در بحث انکسار امواج مطرح شد مقداری از امواج بعد از برخورد به یک محیط منعکس می شود که شدت یا مقدار انعکاس به ضریب انعکاس محیط بستگی دارد. شکل (۹-۱)

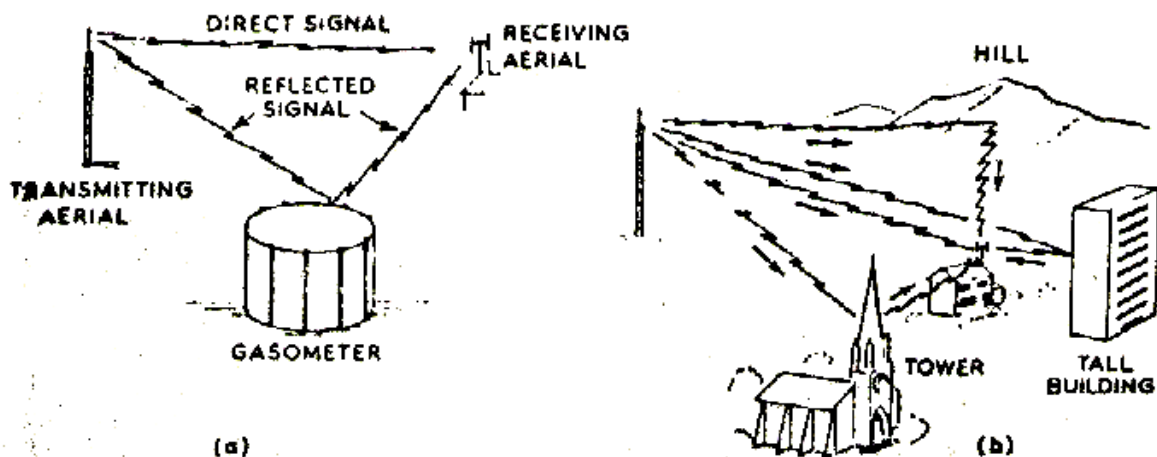


شکل (۹-۱) انعکاس موج

حال انعکاس در محیطهای مختلف را بررسی می کنیم :

(۱) بطور کلی اگر موج رادیویی از یک محیط با ضریب شکست n_A به محیط دوم با ضریب شکست n_B وارد شود در مرز دو محیط مقداری از موج تابش منعکس شده که مقدار آن به ضریب انعکاس محیط (جنس و ابعاد محیط) بستگی دارد .

(۲) اگر محیط دوم یک هادی (مثل فلزات) باشد تقریباً اکثر موج تابش منعکس شده و اگر هادی یک هادی خالص باشد تمام موج که به سطح آن برخورد می کند، منعکس می شود و همانطور که در بحث شکست موج مطرح شد، به این دلیل از فلزات هادی بعنوان انعکاس کننده امواج الکترومغناطیس استفاده می شود که در انتشار امواج کاربرد زیادی دارد. امواج با فرکانس کم مشخصه های متفاوتی با اشعه نورانی خواهند داشت. امواج با فرکانس کم (LF) متوسط (MF) و زیاد (HF) به آسانی از داخل موانع بزرگ جامد عبور می کنند، به این علت که ضریب نفوذ آنها زیاد است. امواج با فرکانس خیلی زیاد (VHF و UHF) به بالا به سختی از داخل موانع عبور کرده و در نتیجه از طرف مانع به طرف منبع موج منعکس می گردد، به این علت که ضریب انعکاس با افزایش فرکانس زیاد می شود. بطور کلی هر جسمی که بزرگتر از نصف طول موج باشد، می تواند امواج را منعکس کند. البته انعکاس در مورد اجسام فلزی بیشتر است. با وجود این، اجسام طبیعی مانند تپه ها و کوهها، در انعکاس امواج تأثیر زیادی دارند . بعضی اوقات حتی ابرها نیز امواج را منعکس می کنند. انعکاس در فرکانسهای بالاتر بیشتر می شود، مثلاً انعکاس در باند UHF بیشتر از باند VHF است.



شکل (۱۰-۱) انعکاس امواج از موانع

در شکل (۱-۱۰) حالات انعکاس امواج از موانع دیده می‌شود. در اینجا آنتن گیرنده مستقیماً سیگنال را از آنتن فرستنده و همچنین در مسیر انعکاس از موانع مختلف دریافت می‌کند، البته سیگنال منعکسه مسیر طولی‌تری نسبت به مسیر مستقیم طی کرده و به این دلیل کمی دیرتر به گیرنده خواهد رسید [۵، ۱۱، ۶].

۱-۷ پخش (تفرق) امواج

امواج نوری (الکترومغناطیسی) در اثر عبور از یک دریچه، با برخورد به لبه‌های اجسام از مسیر راست خود منحرف و به اطراف پخش می‌شوند. که به این پدیده تفرق می‌گویند. نحوه پخش امواج به طول موج و قطر دریچه بستگی دارد. به شکل (۱-۱۱) نگاه کنید. این حالت هنگامی که موج از کنار یک مانع عبور کند نیز اتفاق می‌افتد. در این حالت تفرقه در جهت مانع است. امواج با فرکانس بالا پس از برخورد به مانع متفرق شده و به همه جهات پخش می‌شوند. از این خاصیت تفرق برای ارسال امواج مایکروویو به نقاط دور دست استفاده می‌شود. آنتن‌های مایکروویو به این صورت عمل می‌کنند.



شکل (۱-۱۱) پخش موج پس از عبور از یک دریچه

۱-۸ پلاریزاسیون موج

انرژی امواج الکترومغناطیسی شامل دو قسمت است: میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H)، که در فضا دو میدان فوق برهم عمودند و جهت انتشار امواج در جهت عمود بر صفحه شامل هر دو میدان می‌باشد. چنانچه میدان الکتریکی موجی افقی باشد، موج دارای پلاریزاسیون افقی است و اگر میدان الکتریکی عمود باشد موج دارای پلاریزاسیون عمودی است. آنتنی که بطور عمودی قرار دارد موجی با پلاریزاسیون عمودی منتشر می‌کند و اگر آنتن بصورت افقی باشد موجی با پلاریزاسیون افقی منتشر می‌سازد. در عمل امواج با پلاریزاسیون افقی و عمودی در فضا به علت چرخش میدانهای آن بصورت پلاریزاسیون دایره‌ای یا بیضوی در می‌آید.

فصل دوم

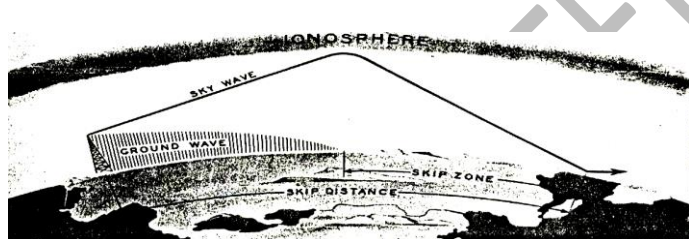
ویژگیهای انتشار امواج رادیویی در باندهای مختلف

۲-۱ انتشار امواج

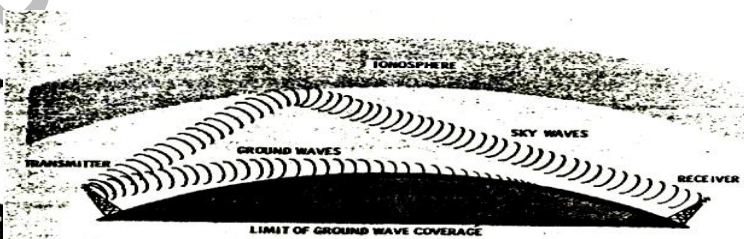
در محیط اطراف زمین، انتشار امواج الکترومغناطیسی تنها به خواص خودشان بستگی ندارد. بلکه تحت تأثیر شرایط محیط نیز می باشد. روشهای گوناگون انتشار امواج به میزان زیادی به فرکانس آنها بستگی دارد. هر آنتن که امواج را به فضا پخش می کند، همزمان دارای سه مؤلفه موج می باشد، که بستگی دارد به اینکه موج منتشر شده از آنتن دارای چه فرکانسی می باشد، یکی از مؤلفه ها نسبت به دومؤلفه دیگر قویتر منتشر می شود. عموماً امواج بطور مستقیم حرکت می کنند، بجز در مواردی که زمین و عوامل دیگر باعث تغییر مسیر آن شود. انتشار امواج رادیویی به سه صورت : امواج زمینی، امواج آسمانی و امواج فضایی (مستقیم) تقسیم می شوند [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].

۲-۱-۱ امواج زمینی (سطحی) (Ground Wave)

دسته ای از امواج رادیویی که دارای طول موج بلند (LW)، فرکانس کم و طول موجهای متوسط (MW) می باشند به گونه ای فرستاده می شوند که پس از انتشار از آنتن، مسافت بین فرستنده تا گیرنده را در سطح کره زمین و یا در مجاورت زمین طی می کنند. در شکل (۲-۱) و (۲-۲) امواج زمینی را مشاهده می کنید.



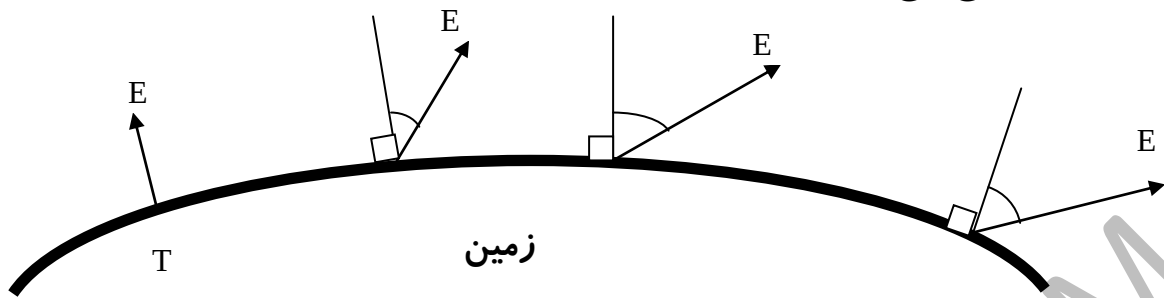
شکل (۲-۲) انتشار امواج زمینی



شکل (۲-۱)

امواج با فرکانس کمتر از ۳ MHz بر روی زمین و تا فرکانس حدود ۶ MHz روی آبها، معمولاً بصورت زمینی (سطحی) منتشر می شوند. این امواج چون در تروپوسفر منتشر می شوند (تروپوسفر فضای اطراف زمین که ابرها وجود دارند) امواج تروپوسفری نیز نامیده می شوند. امواج زمینی باید با پالاریزاسیون عمودی منتشر شوند (مؤلفه میدان الکتریکی موج عمود بر زمین است) تا از اتصال کوتاه شدن میدان الکتریکی موج جلوگیری بعمل آید. موج در حین انتشار در سطح زمین، مقداری جریان در زمین القاء می کند، و در نتیجه سبب تلفات یا جذب انرژی می شود. این مسأله تا حدی از آن است که انرژی از بخشهای بالای جبهه موج به سمت پایین متفرق می شود. تفرق سبب تضعیف موج زمینی می گردد. همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می کنید، جبهه موج در اثر انتشار، کج می شود و هر چه جلوتر می رود مقدار کجی با انحراف از حالت عمودی بیشتر می شود. انحراف جبهه موج، سبب می شود که مؤلفه میدان الکتریکی موازی زمین شده و هر چه انحراف بیشتر باشد، مؤلفه میدان الکتریکی بیشتری می شود با اتصال کوتاه شدن میدان الکتریکی روی زمین

شدت میدان کاهش می یابد و در فاصله ای از آنتن فرستنده بر حسب طول موج (به نوع زمین که انتشار روی آن صورت می گیرد، بستگی دارد) سطح موج کاملاً می خوابد و از بین می رود.

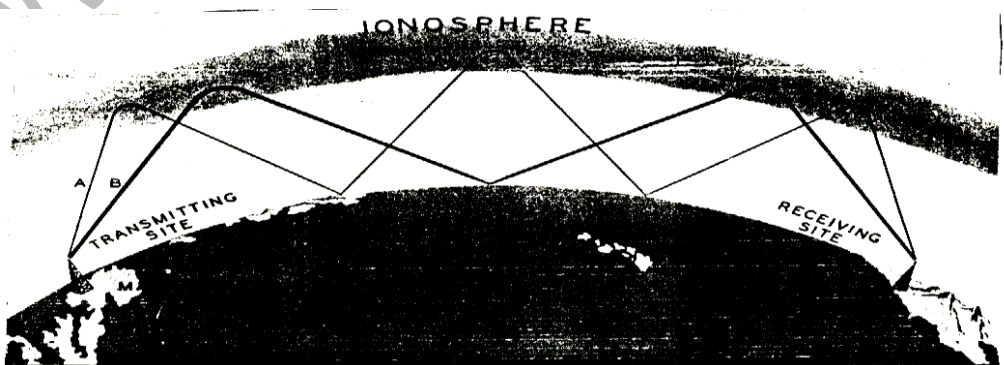


شکل (۲-۳) انتشار امواج زمینی

کیفیت حرکت و برد این امواج، به شرایط جغرافیایی و طبیعی محیط بستگی دارد. حداکثر برد امواج زمینی برای سطح آبها است (چون این امواج کمتر جذب آب می شوند) که حدود ۶۰۰ کیلومتر را طی می کنند. حداکثر برد این امواج به ترتیب در اقیانوسها و دریاها، سرزمینهای کویری، شن زارها، نواحی سنگلاخی، مناطق کوهستانی و جنگلی است، بدترین محیط برای حرکت امواج سطحی، جنگلها و نواحی پردرخت می باشند که امواج بیش از چند متر حرکت نمی کنند. انتشار امواج سطحی به دلیل برد کم، بیشتر برای انتقال اطلاعات درون مرزی مناسب هستند. تقسیم قدرت رادیویی بین دو مؤلفه موج زمینی و آسمانی به عوامل زیادی چون نوع زمین، فرکانس قابل هدایت زمین و غیره بستگی دارد. باندهای فرکانس VLF، LF و MF که حدود فرکانسهای هریک در فصل قبل آمده است و محدوده فرکانسهای هر سه باند مذکور ۳ KHZ تا ۳۰۰۰ KHZ را می پوشاند بصورت انتشار زمینی منتشر می شوند [۵،۶،۹،۱۱،۱۲].

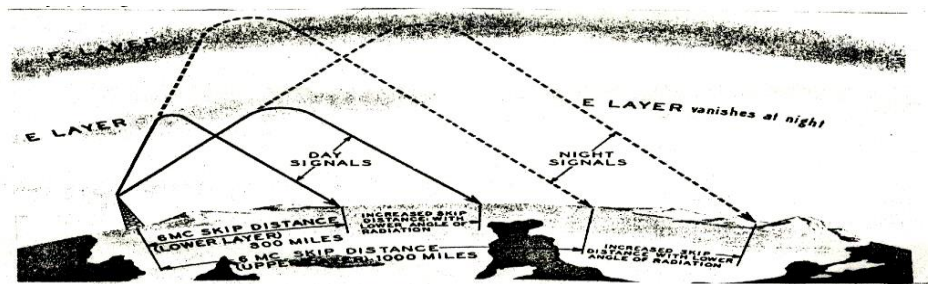
۲-۱-۲ امواج آسمانی (امواج انعکاسی- امواج یونسفری) (SKY WAVE)

امواج رادیویی با فرکانسهای ۳ تا ۳۰ مگاهرتز که طول موج آنها کمتر از طول موج باند (MW) می باشد در مقایسه با فرکانسهای باند MW در فاصله کمتری در سطح زمین انتشار می یابند، چون به سرعت جذب لایه های زمین خواهند شد. این امواج، زمین را در زاویه هایی که می تواند بین ۳۰ تا ۹۰ درجه تغییر کند، ترک می کنند و بوسیله لایه های یونیزه (لایه یونسفر) منعکس می شوند. به همین دلیل، به این امواج، امواج انعکاس یا امواج یونسفری می گویند. در این نوع سیگنال به طرف طبقه بالای جو زمین ارسال می شود که پس از انعکاس به زمین، خارج از دید افق برمی گردد. امواج آسمانی برای آنکه به آن طرف کره زمین انتقال یابند، باید چند بار از جو به زمین و از زمین مجدداً به جو منعکس گردند. شکل (۲-۴)



شکل (۲-۴) انتشار امواج آسمانی که توسط لایه یونسفر منعکس شده.

امواج زمینی و آسمانی هیچکدام در فضای بین ستارگان یا در اطراف اجسام سماوی بدون هوا مانند ماه نمی توانند وجود داشته باشند. دسته دیگری از امواج بنام امواج فضایی (امواج مستقیم) که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت، می توانند به این نواحی ارسال شوند. کیفیت انتشار امواج آسمانی، به وضع جو، تغییر فصول و تغییرات ساعات شبانه روز بستگی دارد. شکل (۵-۲) را مشاهده کنید که در آن تغییرات شبانه روز، روی امواج آسمانی چگونه تأثیر گذاشته است. امواج رادیویی در شب از لایه E منعکس شده در حالیکه در شب همان امواج از لایه F2 برگشت خورد.

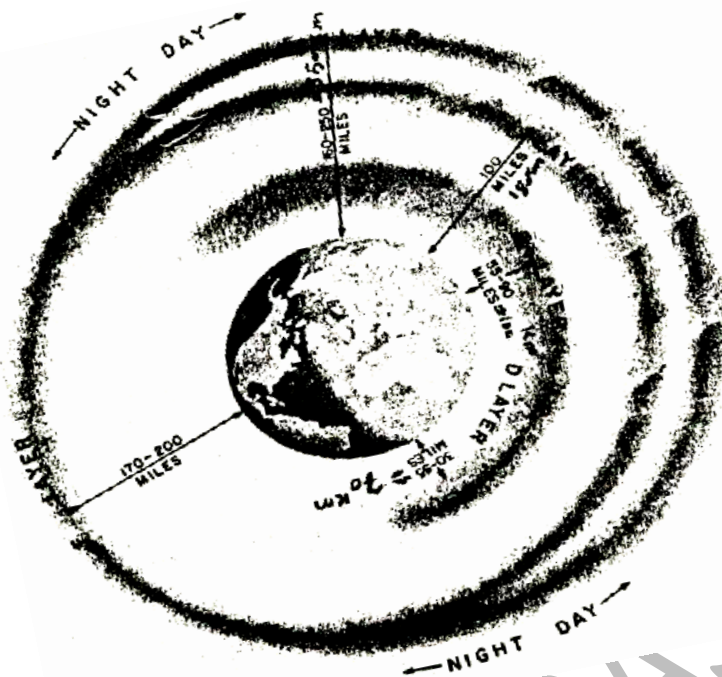
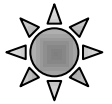


شکل (۵-۲) تأثیر شب و روز بر امواج آسمانی

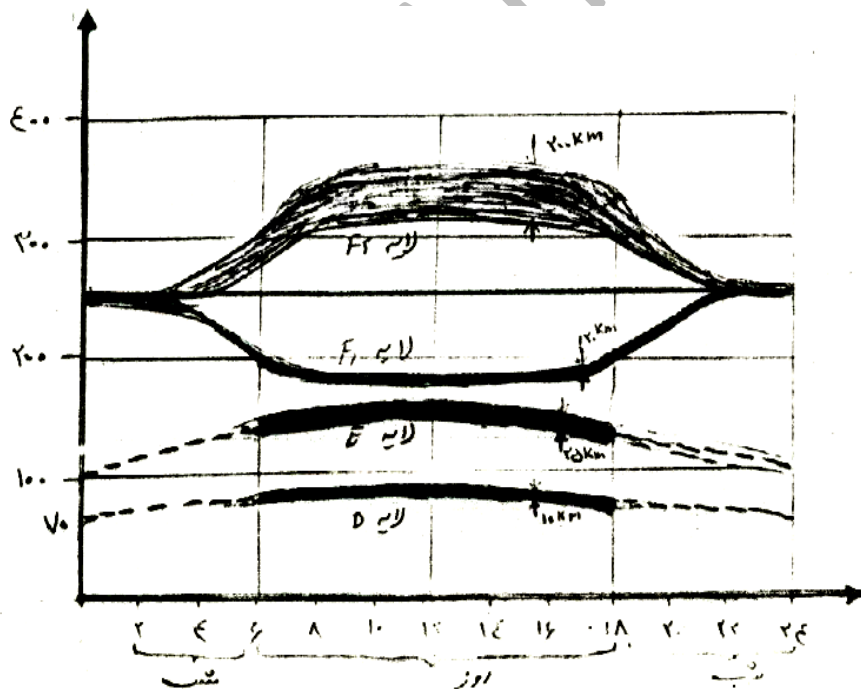
بطور مثال امواج در زمستان نسبت به پاییز بهتر انتقال می یابند. در زمستان بخاطر نفوذ کم نور خورشید لایه E کمتر بوجود می آید. یکی از ویژگیهای عمده اینگونه روش ارسال موج، آن است که امواج رادیویی در مناطق نزدیک فرستنده که آن را مسافت پرش (Skip Distance) می نامند، قابل دریافت نمی باشد. این ویژگی در فاصله بین دوبرخورد موج آسمانی به زمین نیز رخ می دهد.

الف) یونسفر و تأثیرات آن بر امواج رادیویی:

در سال ۱۹۲۵ میلادی، ادوارد آپلتن طی آزمایشهایی نشان داد که مولکولهای جو به مقدار لازم، انرژی از خورشید گرفته و به صورت یونهای مثبت و منفی تفکیک می شوند. (در یونسفر الکترونهای آزاد بوجود می آیند) و مولکولهای یونیزه شده تا یک مدت طولانی، حالت یونیزه خود را حفظ می کنند. همچنین نشان داد که لایه های یونیزه متفاوتی وجود دارند که میزان یونیزاسیون و ارتفاع آنها با یکدیگر فرق می کند و تحت شرایط معینی امواج HF را به زمین منعکس می کنند و در غیر اینصورت، امواج از آنها عبور کرده به سمت فضا می رود لایه های مختلف یونیزه اثر متفاوتی در انتشار امواج دارند که به شرح آن می پردازیم. یونسفر طبقه بالای جو است که مرتب بمیزان زیادی انرژی از خورشید گرفته و در نتیجه گرم و یونیزه می شود. تغییر پارامترهای فیزیکی جو از قبیل درجه حرارت، چگالی ترکیب و همچنین انواع تابشهای دریافت شده مانند اشعه های ماوراء بنفش، آلفا (α)، بتا (β) و گاما (γ) از خورشید و از کهکشان باعث ایجاد چهار لایه اصلی در طبقه یونسفر می گردد. که از پایین به بالا لایه های D و E و F1 و F2 نامیده می شود که در لایه F1 و F2 در شب یکی می شوند. به شکلهای (۶-۲) و (۷-۲) توجه کنید.



شکل (۲-۶) چگونگی تشکیل لایه های یونسفر در شب و روز اطراف کره زمین



شکل (۲-۷) چگونگی ارتفاع لایه های یونسفر از سطح زمین

لایه D: پایین ترین لایه به ارتفاع تقریبی متوسط ۷۰ کیلومتر و ضخامت تقریبی ۱۰ کیلومتر می باشد. یونیزاسیون آن به ارتفاع تابش خورشید بستگی دارد و به همین دلیل در شبها از بین می رود این لایه نقش چندانی در انتشار باند HF ندارد. ولی امواج VLF و LF را تحت شرایطی منعکس می کند. لایه D تا حدودی امواج HF و MF را جذب نموده و سبب تضعیف آنها می شود، به همین دلیل در شب، قدرت ایستگاه گرفتن در رادیوها بیشتر از روزهاست.

لایه E: لایه بعدی در ارتفاع تقریبی ۱۰۰ کیلومتری با ضخامت تقریبی ۲۵ کیلومتر است مانند لایه D در شب از بین می رود زیرا نبودن تابش خورشید در شب، سبب می شود که یون ها بایکدیگر ترکیب و خنثی می شوند. وظیفه اصلی این لایه کمک در انتشار زمینی امواج سطحی MF است این لایه تا حدی امواج HF را نیز در روز منعکس می کند.

لایه ES (لایه E پراکنده): لایه ای است با ضخامت کم ولی غلظت یونی بسیار زیاد که گاهی بالای لایه E وجود دارد. این لایه را، لایه E پراکنده هم می گویند. چنانچه ES وجود داشته باشد، در طول شب هم از بین نمی رود. این لایه، نقش چندانی در انتشار امواج به فاصله زیاد ندارد، ولی گاهی چنان مؤثر است که سبب دریافت غیر قابل انتظاری می گردد. علت وجود و چگونگی عمل ES هنوز به خوبی شناخته نشده است.

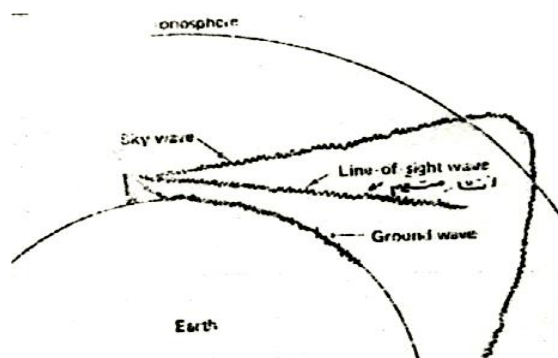
لایه F1: همانطوریکه در شکل دیده می شود، در ارتفاع ۱۸۰ کیلومتری با ضخامت تقریبی ۲۰ کیلومتر در روز وجود دارد. این لایه در شب، با لایه F2 یکی می شود. لایه F1 در انعکاس امواج HF تأثیر کمی دارد، ولی قسمت اعظم موج HF از لایه F2 منعکس می شود. توجه کنید که اثر تضعیف این لایه و لایه های دیگر باید دو برابر شود، زیرا تضعیف هم در مسیر به بالا و هم در مسیر به پایین موج موجود است.

لایه F2: این لایه مهمترین نقش را در انعکاس امواج HF دارد. این لایه در ارتفاع ۳۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتری در عرض روز و با ضخامت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر می باشد و با لایه F1 در شب یکی شده و ارتفاع تقریبی به ۳۰۰ کیلومتر نزول می کند. ارتفاع و چگالی یونیزاسیون این لایه به مقدار زیادی به ساعات شبانه روز، درجه حرارت متوسط محیط و نور خورشید بستگی دارد. لایه F بر خلاف لایه های دیگر در شب هم وجود دارد و دلایل آن این است که اولاً این لایه بالاترین لایه است لذا به میزان زیادی یونیزه می شود که امکان دوام آن در شب هم تاحدی وجود دارد. از طرفی با وجود این که غلظت یونی این لایه زیاد است، چگالی هوا در آن کم است که این خود احتمال ترکیب یونها و خنثی شدن آنها را کم می کند. یکی شدن در لایه F1 و F2 و از بین رفتن دو لایه به E و D سبب می گردد که شب انعکاس HF بهتر گردد و موج با افت کمتری به زمین برگردد، لذا دریافت امواج HF در شب بهتر می شود.

در ادامه بحث تأثیرات طبقات یونسفر، باید متذکر شویم که چگالی الکترونها به طرف وسط لایه افزایش یافته و امواج رادیویی توسط این تغییر چگالی شکسته و به زمین برمی گردد. به عبارت دیگر لایه یونیزه شده دارای یک نوع ضریب شکست می باشد که امواج در حرکت به عمق لایه، رفته رفته شکسته شده تا نهایتاً به سمت زمین منعکس می گردند. میزان خمیدگی موج در یونسفر به فاکتورهایی چون فرکانس موج، زاویه ای که تحت آن زاویه موج وارد طبقه یونسفر می شود، ضخامت و چگالی ذرات باردار یونسفر در آن لحظه و ... بستگی دارد. در فرکانسهای بالاتر برای اینکه امواج به زمین برگشت داده شود، موج رادیویی باید تحت زاویه کوچکی در طبقه یونسفر وارد شود. با افزایش فرکانس امواج رادیویی، ماکزیمم زاویه مجاز برخورد به طبقه یونسفر (جهت خم شدن کامل) کوچکتر می شود. و اگر فرکانس بازهم افزایش یابد، حالتی را به وجود می آورد که دیگر خمیدگی امواج به طرف زمین غیرممکن می شود و در این فرکانس دیگر اهمیتی ندارد که زاویه برخورد به طبقه یونسفر چقدر باشد. در هر صورت، امواج از طبقه یونسفر عبور می کند و انعکاسی وجود ندارد. در شرایط معمولی حالت فوق در یونسفر برای فرکانسهای حدود ۳۰ تا ۴۰ مگاهرتز شروع می شود [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].

۳-۱-۲ امواج فضایی دید مستقیم (Line of sight wave)

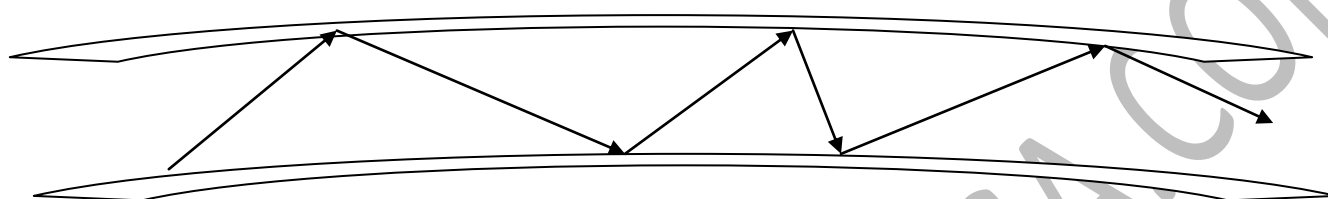
منظور از اشعه مستقیم، امواج رادیویی است که مستقیماً از سوی فرستنده به سوی گیرنده حرکت می‌کند. در فرکانسهای ۳۰ تا ۴۰ مگاهرتز، بیشتر امواج آسمانی برگشتی از طبقه یونسفر به علت ناچیز بودن یا اصلاً حذف کامل و نقش چندانی ندارند. این امواج را به روش سطحی و یا به صورت انعکاس نمی‌توان ارسال نمود. چنانچه این امواج به صورت سطحی پخش شوند، به آسانی توسط لایه های زمین جذب می‌شوند و چنانچه به صورت آسمانی منتشر شوند، در لایه های یونسفر نفوذ کرده و حرکت خود را تا مقصدهای نامعلوم ادامه خواهند داد. به این جهت، امواج فرکانس بالا (بالتر از ۳۰ مگاهرتز) نظیر امواج تلویزیونی، بطور مستقیم یا در خط دید باید ارسال شوند. ارسال در خط دید به این معناست که آنتن فرستنده بتواند آنتن گیرنده را مشایعت کند تا امواج پس از انتشار بطور مستقیم بدون برخورد به موانع جدی به گیرنده برسد. شکل (۸-۲)



شکل (۸-۲) انتشار مستقیم

امواج الکترومغناطیسی که به صورت مستقیم پخش می‌شوند، اگر به موانع طبیعی یا مصنوعی بزرگ برخورد نکنند و زمین مسطح و صاف باشد حد اکثر تا مسافت تقریباً ۸۰ مایل (حدوداً ۱۵۰ کیلومتر) را طی می‌کنند. و این برد بیشتر از برد افق رادیویی تئوری است. در اینجا خم شدن موج در اثر شکست به علت تغییر تروپوسفر کمی بیشتر از افق رادیویی را طی خواهد کرد. برای ارسال امواج مستقیم (تلویزیونی) به فواصل دورتر از مقدار ذکر شده، باید در نقاطی که در مسیر آنها کوهها و ارتفاعات قرار دارند، از دستگاههای تکرارکننده (رله) استفاده شود. (رله دستگاهی است که امواج را از فضا دریافت و بعد از تقویت لازم مجدداً به فضا منتشر می‌کند). به خاطر کاری که رله‌ها انجام می‌دهند، آنها را بر بلندی قله‌ها و ارتفاعات نصب می‌کنند. انتشار مستقیم امواج به این صورت است که امواج آسمانی را باید متمرکز کرد و مستقیماً به طرف گیرنده هدایت نمود. شرایط فوق در مورد امواج با فرکانس زیاد (بالتر از ۳۰ یا ۴۰ مگاهرتز) موجب می‌شود که فاصله ارتباطی طی شده توسط امواج با فرکانس زیاد محدود شود. تحت بعضی شرایط غیر معمول در طبقه یونسفر، گاهی ممکن است به علت تمرکز زیاد ذرات باردار و انکسار امواج رادیویی حالتی به وجود آید که خم شدن امواج رادیویی در فرکانسهایی تا حدود ۶۰ مگاهرتز نیز انجام شود. به خاطر این مسئله گاهی امواج مستقیم (تلویزیونی) تحت همین شرایط مسافت زیادی را طی کرده و در نقاط دوردست قابل دریافت خواهند بود. از آنجایی که زمان و محل دقیق پدیده فوق را نمی‌توان به دقت پیش‌گویی کرد، روی همین اصل در کارهای تجاری دارای ارزش نمی‌باشد. امواجی که با روش مستقیم ارسال می‌شوند (امواج میکروویو و امواج راداری) در حال انتشار در اتمسفر (جو) از مسیر راست منحرف می‌گردند. علت

آن همگن نبودن محیط اتمسفر است، غلظت هوا در ارتفاعات مختلف متفاوت است. این تغییر محیط باعث تغییر ضریب شکست امواج می‌گردد (قانون اسنل) و جهت انتشار امواج به سمت پایین منحرف می‌گردد. به همین دلیل، امواج راداری هدف را در محلی غیر از نقطه واقعی تشخیص خواهند داد. گاهی اتفاق می‌افتد که یک طبقه هوای گرم روی طبقه‌ای از هوای سرد برخلاف تغییرات عادی درجه حرارت در اتمسفر در مسیر انتشار قرار می‌گیرد. این پدیده کریدور یا دالانی ایجاد می‌کند که امواج در داخل اتمسفر طولانی‌تر از خط دید را طی می‌نمایند. به این طریق گاهی امواج مستقیم (فرکانسهای ۴۰ مگاهرتز به بالا) تا چندین برابر برد عادی خود افزایش می‌یابند و در فواصل دور قابل دریافت هستند که به این پدیده انتشار غیر عادی موج گویند. شکل (۹-۲) را مشاهده نمایید [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].



شکل (۹-۲) انتشار غیر عادی

۲-۲ ویژگیهای باندهای مختلف رادیویی

۲-۲-۱ باند فرکانس خیلی کم VLF

محدوده فرکانس این باند ۳ تا ۳۰ کیلو هرتز می‌باشد. امواج رادیویی در این باند به روش انتشار زمینی است. دو مؤلفه دیگر موج یعنی مؤلفه آسمانی و مؤلفه فضایی بسیار ضعیف می‌باشد. این باند برای مخابرات راه دور، بیشتر مخابرات دریایی که در روز تا فواصل چند هزار کیلومتری پوشش رادیویی دارد، به کار می‌رود. آنتن‌هایی که در این باند ساخته و به کار می‌روند بزرگ و گران قیمت هستند.

۲-۲-۲ باند فرکانس کم LF

فرکانس این باند بین ۳۰ تا ۳۰۰ کیلو هرتز می‌باشد. امواج رادیویی در این باند نیز به روش انتشار زمینی است. این باز به مخابرات راه دور دریایی اختصاص یافته است و برد آن تا حدود ۶۰۰ کیلومتر می‌رسند. ابعاد آنتن در این باند کوچکتر از باند VLF می‌باشند.

۲-۲-۳ باند فرکانس متوسط MF

فرکانس این باند از ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلو هرتز است. انتشار این باند به صورت زمینی می‌باشد در این باند مؤلفه موج آسمانی نیز وجود دارد. گاهی گیرنده‌ها موج را در این باند از طریق مؤلفه انتشار آسمانی دریافت می‌کنند، به خصوص در شب که لایه D طبقات یونسفر وجود ندارد. از طریق مؤلفه آسمانی، رادیوهای درون مرزی کشورها در کشورهای همجوار قابل دریافت می‌باشند. این باند شامل فرستنده‌های AM رادیویی درون مرزی است که تا فواصل تقریبی ۲۰۰ الی ۳۰۰ کیلومتری را تحت پوشش دارد.

۲-۲-۴ باند فرکانس زیاد HF

فرکانس این باند از ۳ تا ۳۰ مگاهرتز می باشد و گاهی اوقات از ۲ تا ۴۰ مگاهرتز راهم جزء این باند در نظر می گیرند. امواج رادیویی در این باند، به صورت انتشار آسمانی است که پس از انتشار از آنتن، به طرف طبقات یونسفر حرکت کرده و به آن برخورد می کند و منعکس می شوند و به زمین برمی گردند. زمین مجدداً این امواج را به طرف طبقات یونسفر منعکس کرده و این طریق انعکاس ادامه می یابد بطوری که امواج در نواحی دور از آنتن فرستنده قابل دریافت هستند. به همین دلیل، در مخابرات برون مرزی و راه دور از این روش انتشار استفاده می شود. مؤلفه موج زمینی در این باند، ضعیف بوده و تا چند کیلومتری پیش نمی رود.

۲-۲-۵ باند فرکانس خیلی زیاد VHF

فرکانس این باند از ۳۰ تا ۳۰۰ مگاهرتز می باشد. امواج رادیویی در این باند بصورت انتشار مستقیم است. مؤلفه موج آسمانی آن ضعیف و یا اصلاً ندارد. این باند شامل ایستگاههای فرستنده رادیویی FM و باندهای تلویزیونی VHF و همچنین بی سیمهای VHF می باشد. آنتن فرستنده و گیرنده در این باند باید همدیگر را مشایعت کنند، چون امواج به صورت مستقیم ارسال می شوند، بنابراین، باید آنتن ها در ارتفاعی بالای سطح زمین روی دکل نصب شوند. ارتفاع آنتن ها در انتشار فرکانسهای VHF بسیار مهم می باشد در حالی که قدرت ایستگاههای فرستنده به اندازه ارتفاع آنتن مهم نیست. شدت میدان (جریان القایی آنتن) مربوط به سیگنال VHF در محدوده فاصله افق را از فرمول (۲-۱) محاسبه

$$E(mv/m) = 2/85\sqrt{P_t} \frac{h_t h_r}{\lambda d^2} \quad \text{فرمول (۲-۱)} \quad \text{می کنیم:}$$

در این فرمول P_t ، قدرت (قدرت مؤثر تشعشعی) بر حسب کیلووات (kw) و h_t و h_r ارتفاع آنتنهای فرستنده و گیرنده بر حسب متر. d ، فاصله از ایستگاه فرستنده بر حسب متر. λ طول موج سیگنال ارسالی بر حسب متر می باشد. E شدت میدان القایی (ولتاژ القایی) در یک آنتن دو قطبی است. این رابطه نشان می دهد که جریان میدان القایی آنتن با ارتفاع آنتن ها و جذب قدرت فرستنده نسبت مستقیم دارد. بنابراین، اگر قدرت چهار برابر شود، شدت میدان فقط دو برابر اضافه می گردد در حالی که با چهار برابر نمودن ارتفاع آنتن، شدت میدان به همان اندازه افزایش می یابد.

۲-۲-۶ باند فرکانس ماوراء زیاد UHF

فرکانس این باند از ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاهرتز می باشد. امواج رادیویی در این باند، منحصرأً به صورت مستقیم (LOS) ارسال می شوند باید اشاره کنیم که تمام فرکانسهای بیشتر از UHF به صورت مستقیم ارسال می شوند. این باند شامل فرستنده های تلویزیونی و بی سیمهای UHF می باشد. برد امواج در این باند مطابق با فرمول (۲-۴) شدیداً به ارتفاع آنتن بستگی دارد. سیگنالهای UHF کمتر از سیگنالهای VHF خم می شوند، بدین ترتیب، سطحی که یک سیگنال UHF منتشر شده و قابلیت دریافت دارد، از سطحی که یک سیگنال VHF با همان شرایط منتشر می کند، کمتر خواهد بود. ضمناً شرایط جوی مانند رطوبت هوا، بارندگی و مه شدید. انرژی این امواج را مطابق با فرمول تجربی (۲-۲) تضعیف خواهند کرد.

۲-۲-۷ باند فرکانس قوق العاده زیاد SHF

فرکانس این باند از ۳ تا ۳۰ گیگا هرتز است. انتشار آن به صورت مستقیم است که به راحتی از طبقات یونسفر عبور می کند. ارتباط رادیویی در این باند کمتر انجام می شود، چون دستگاهها پیچیده و گران قیمت خواهد بود. این باند بیشتر برای کارهای تحقیقاتی استفاده می شود. آنتن های به کار رفته در این باند آنتن های میکروویو (آنتنهای سهمی یا بشقابی) می باشند.

۲-۲-۸ باند فرکانس EHF

فرکانس این باند از ۳۰ تا ۳۰۰ گیگا هرتز می باشد. انتشار آن بطور مستقیم و ارتباط رادیویی در این باند انجام نمی گیرد و بیشتر برای کارهای تحقیقاتی و مطالعاتی است. ساخت دستگاهها در این باند به خاطر بالابودن فرکانس، مشکل و پیچیده است. آنتن های این باند نیز از آنتنهای میکروویو (آنتنهای سهمی یا بشقابی) است.

۳-۲ تأثیر اتمسفر (جو) بر امواج رادیویی

گازهای موجود در اتمسفر انرژی امواج را جذب می کنند. از میان گازهای اتمسفر اکسیژن و بخار آب بیشترین تأثیر را در این مورد دارند. انرژی امواج، توسط اکسیژن و بخار آب جذب و تبدیل به حرارت می شوند. که در این فرمول α مقدار تضعیف موج بر حسب dB در مایل دریایی است. M مقدار رطوبت بر حسب گرم در سانتی متر مکعب. f فرکانس موج بر حسب هرتز و c سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه می باشد [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].

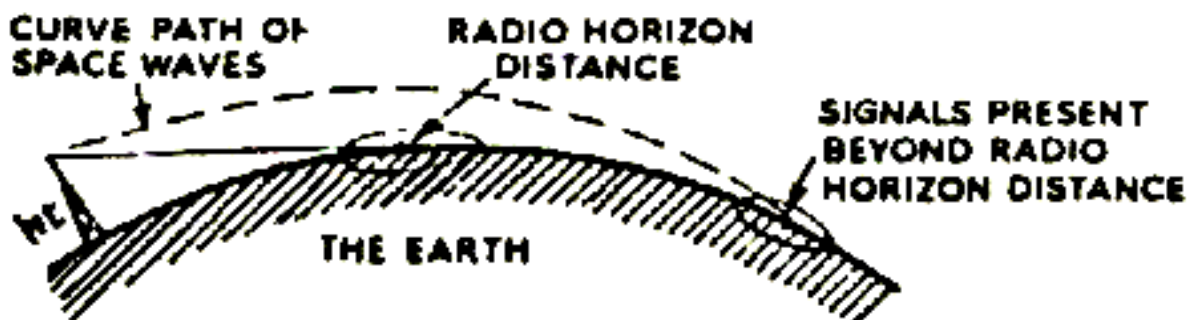
۴-۲ افق رادیویی

حد اکثر فاصله ای که گیرنده می تواند امواج مستقیم ارسالی را دریافت کند، افق رادیویی یا مسافت خط رؤیت برای امواج بافرکانس زیاد می نامند که می تواند از فرمول (۲-۳) محاسبه شود.

$$\text{فرمول (۲-۳)} \quad \text{فاصله خط افق رادیویی یا مسافت خط رؤیت} = 3.6\sqrt{h_t}$$

ht ارتفاع آنتن فرستنده بر حسب متر و فاصله خط افق رادیویی بر حسب کیلومتر.

به خاطر ضریب انکسار طبقات پایین اتمسفر بنام تروپوسفر کمی خمیدگی در امواج ایجاد می شود. بنابراین، برد واقعی امواج مستقیم بیش از برد محاسبه شده تئوری است چون امواج نوری انحنای زمین را دنبال می کنند. شکل (۲-۱۰) را مشاهده کنید.

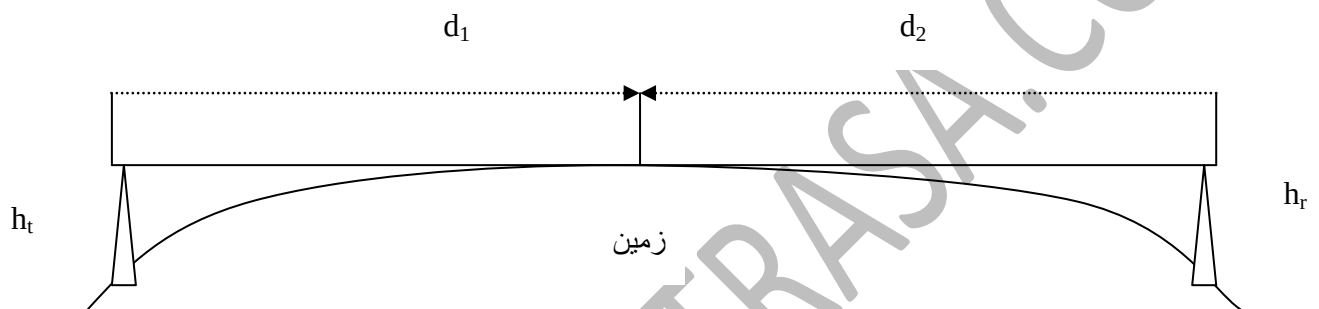


شکل (۲-۱۰)

در شکل فوق سیگنال VHF به خاطر خمیدگی امواج وقتی که از لایه تروپوسفر عبور می کند بر اثر تغییر درجه حرارت و فشار خم می گردند. با افزایش ارتفاع آنتن، می توان تعداد گیرنده هایی را که قادر به دریافت سیگنال می باشند، افزایش داد. به همین دلیل است که آنتن فرستنده هایی را که در فرکانسهای بالاتر از ۴۰ مگاهرتز به روش مستقیم انتشار می یابند، در بالای بلندترین ساختمان شهر یا روی دکل نصب می کنند. اگر آنتن گیرنده را نیز روی ارتفاعی نصب شود، با توجه به شکل ۱۱-۲ می توانیم برد امواج را زیاده تر کنیم. محاسبه برد در این حالت از فرمول (۴-۲) به دست می آید.

$$d(km) = d_1 + d_2 = 3.6(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad \text{فرمول (۴-۲)}$$

که در این رابطه h_t و h_r به ترتیب ارتفاع آنتن فرستنده و گیرنده بر حسب متر است و ماکزیمم فاصله دید امواج رادیویی بین دو آنتن بر حسب کیلومتر بدست می آید که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۲)

همانطور که اشاره کردیم، برد امواج در عمل حدود ۵٪ بیشتر از خط رؤیت هندسی است و این به خاطر خم شدن امواج به علت انکسار است. بنابراین نصب آنتن و استفاده از خصوصیات جهتی آن در این روش، در کاهش و افزایش امواج و برد آن تأثیر زیادی دارد.

مسأله: آنتن گیرنده ای امواج مستقیم را از آنتن فرستنده ای به ارتفاع ۶۰ متری از فاصله ۵۲ کیلومتری دریافت می کند. ارتفاع آنتن گیرنده را محاسبه کنید.

پاسخ مسئله:

$$d = 52km \quad h_t = 60m \quad d(km) = 3.6(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

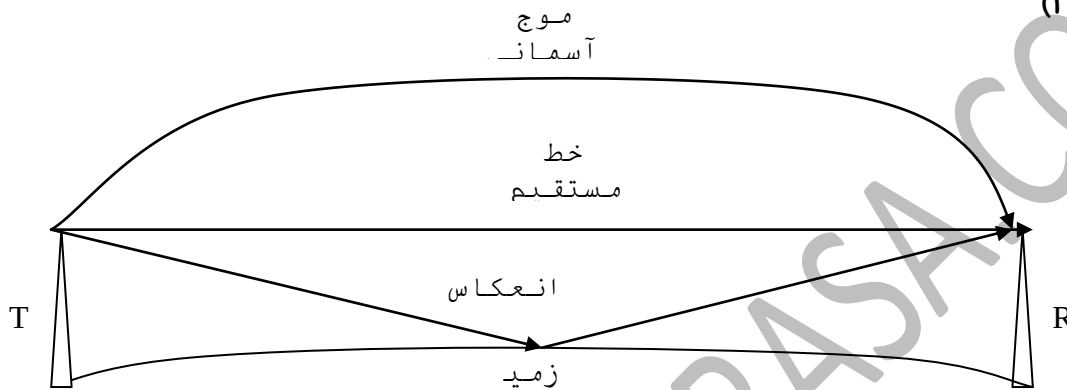
$$52 = 3.6(\sqrt{60} + \sqrt{h_r}) \Rightarrow h_r = 44.8m$$

بنابراین آنتن گیرنده باید بلندتر از تقریباً ۴۵ متر در نظر گرفته شود.

امواج با فرکانس بالا که به صورت مستقیم ارسال می شوند، پس از برخورد به موانع به همه جهات متفرق می گردند. از این خاصیت برای ارسال امواج مایکروویو به ماوراء خط افق رادیویی استفاده می کنند. برای این کار لازم است فرستنده، بسیار قوی باشد تا امواج پس از برخورد به مانع (که مانند فرستنده ثانوی عمل می کند) و پراکندگی، قدرت کافی برای رسیدن به نقاط دورتر را داشته باشند. (آنتنهای مایکروویو به این صورت عمل می کنند) [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].

۲-۵ محو موج رادیویی

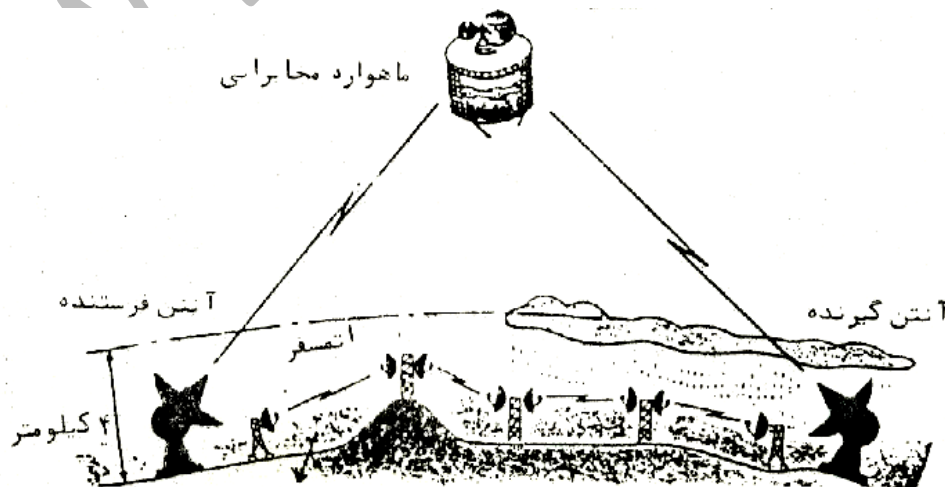
اگر آنتن فرستنده امواج مستقیم، طوری باشد که اشعه را علاوه بر این که مستقیم به هدف آنتن گیرنده می تاباند، اشعه به زمین نیز برخورد کند، زمین نیز امواج را منعکس و امواج منعکس شده از زمین به هدف اصابت می کند، همچنین ممکن است آنتن گیرنده امواج را از روش انتشار انعکاس از طبقات یونسفر دریافت کند. در هر مورد اگر امواج رسیده به آنتن هم فاز باشند، دو موج در محل گیرنده همدیگر را تقویت کرده بدین صورت برد امواج بیشتر خواهد شد (گیرنده امواج قویتری را دریافت خواهد کرد) در غیر این صورت (هم فاز نبودن) اثر همدیگر را خنثی می کنند و برد امواج کم و قدرت تضعیف خواهد شد. شکل (۲-۱۲)



شکل (۲-۱۲)

۲-۶ امواج ماهواره ای

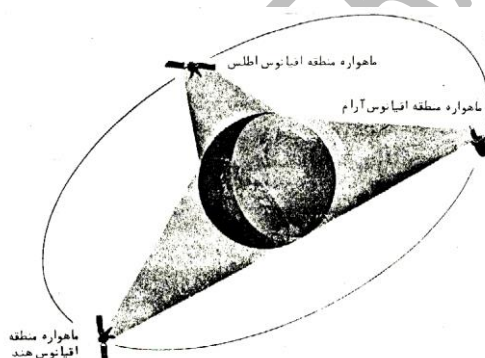
با پیشرفت و تکامل تکنولوژی الکترونیک و ساخته شدن ماهواره های مخابراتی امکان ارتباط بین المللی و منطقه ای و محلی ساده تر و بهتر گردید و مشکلات ارسال امواج تلویزیونی به نقاط دور دست برطرف شد. مثلاً در موضوع انتشار و پخش شبکه های تلویزیونی ماهواره می تواند یک فرستنده تلویزیونی را دریافت کند. و پس از تغییراتی از حیث فرکانس و دامنه، آنرا در یک ناحیه و یا یک مملکت یا قاره پخش نماید. در این صورت، گیرنده در هر موقعیت جغرافیایی قادر است به کمک آنتن ویژه امواج ارسال شده را دریافت کند [۳]. شکل (۲-۱۳)



شکل (۲-۱۳) مقایسه چند تکرار کننده زمینی با انتشار امواج ماهواره ای
ماهواره ها بسته به وسعت تحت پوشش به سه نوع تقسیم می شوند: [۱، ۳].

۱-۶-۲ انتشار ماهواره‌های جهانی

آن دسته از ماهواره‌ها که هماهنگ و بطور شبکه‌ای کلیه مناطق جهان را زیرپوشش دارند، ماهواره‌های جهانی نام دارند. هم‌اکنون مشهورترین ماهواره جهانی عبارت است از اینتلسات (intelsat) و اینترسپاتینک (intersputnik) که اولی به سرپرستی آمریکا و دومی را کشور شوروی سابق سرپرستی می‌کنند. ایران در سال ۱۹۶۹ به عضویت اینتلسات درآمد. ارتباط کشور ما با این شبکه جهانی از طریق ایستگاه زمینی اسدآباد همدان صورت می‌گیرد. البته از ایستگاه همدان، علاوه بر ارتباط تلویزیونی، برای ارتباط بین‌المللی تلفن، تلکس و تلگراف نیز استفاده می‌شود. اولین ماهواره شبکه سراسری اینتلسات در سال ۱۹۶۵ در فاصله ۳۶۰۰۰ کیلومتری زمین قرار گرفت. این ماهواره‌ها با چنان سرعتی نسبت به زمین حرکت می‌کنند که همواره نسبت به زمین در مکان ثابتی قرار دارند. ماهواره پس از دریافت امواج تلویزیونی (مستقیم) آن را به محدوده انتشار خود ارسال می‌کند. سپس ایستگاه‌های زمینی آن را دریافت و بعد به وسیله ماکروویو به ایستگاه‌های محلی می‌فرستند. ایستگاه‌های محلی پس از دریافت امواج و تبدیل آن به فرکانس مورد استفاده گیرنده‌های خانگی (محلی) آن را به وسیله آنتن خود پخش می‌کنند. برای ارتباط درون مرزی، قسمتی از ماهواره شبکه اینتلسات به عنوان تکرارکننده (Transponder) می‌باشد که ایران برای ارتباط درون مرزی رادیو و تلویزیون خود، تکرارکننده اجاره کرده است. شکل (۱۴-۲) ماهواره‌های شبکه اینتلسات را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴-۲) وضعیت قرار گرفتن ماهواره‌های فعال شبکه اینتلسات

۲-۶-۲ انتشار ماهواره‌های منطقه‌ای

به دسته‌ای از ماهواره‌ها که به منظور ایجاد ارتباط و انتشار امواج رادیو و تلویزیون و تلکس و تلفن بین چند کشور در یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند، ماهواره منطقه‌ای گویند. ماهواره منطقه‌ای معمولاً خود با ماهواره‌های جهانی در ارتباط است. بطور مثال، ماهواره منطقه‌ای (Arabset) که تحت نظارت و سرپرستی عربستان سعودی است، ارتباط و پوشش بین ۲۶ کشور عربی را برقرار می‌کند [۱، ۳].

۳-۶-۲ انتشار ماهواره محلی

این ماهواره بر فراز آسمان یک کشور برای رفع نیازهای درون مرزی آن در مدار زمین قرار می‌گیرد. از کارهای مهم ماهواره محلی، ارتباط و انتشار امواج تلویزیونی مستقیم بین ماهواره و گیرنده‌های خصوصی منازل است [۱، ۳].

فصل سوم

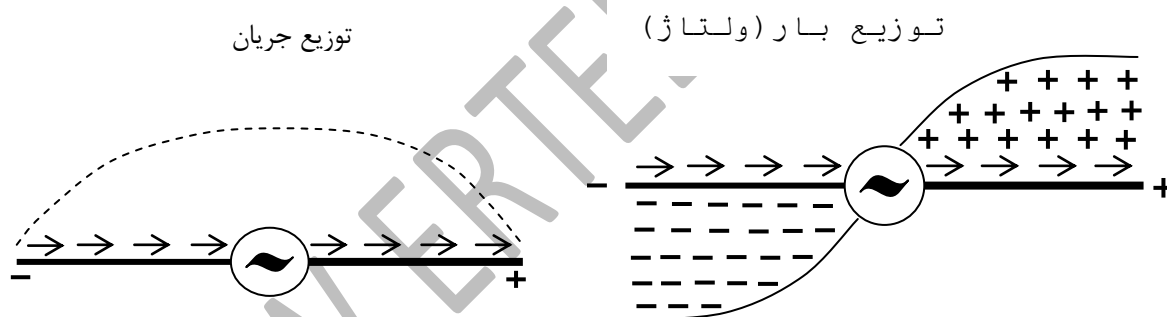
اصول آنتن، ویژگی‌ها و انواع آن

۳-۱ اصول آنتن

تا کنون تقسیم بندی امواج از نظر فرکانس و همچنین نحوه انتشار موج در محیط‌های مختلف، ویژگی‌ها و خصوصیات امواج الکترومغناطیسی در برخورد با محیط‌های متفاوت و اثرات یونسفر و اتمسفر (جو) بر روی امواج رادیویی آشنا شدیم. قبل از پرداختن به بحث آنتن، این مطلب را توضیح می‌دهیم که یک قطعه سیم اگر به یک منبع جریان متناوب وصل شود، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی چگونه و به چه صورت به وجود آمده و در فضا انتشار می‌یابند.

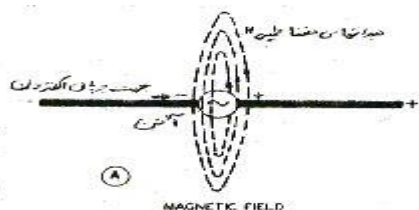
۳-۲ چگونگی ایجاد میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در یک قطعه سیم (آنتن)

یک فرستنده رادیویی به صورت منبع سینوسی و آنتن به صورت دوسیم که از ترمینال‌های آن خارج شده‌اند، را در نظر می‌گیریم. شکل (۳-۱) را ببینید.

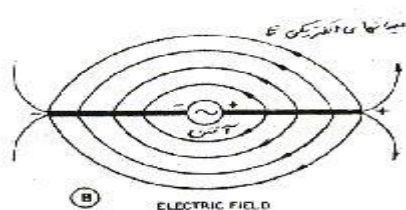


چنانچه مشاهده می‌شود، در یک لحظه پلاریته ولتاژ در دوسر منبع سینوسی (مانند شکل ۳-۱) در سمت راست مثبت و در سمت چپ منفی در نظر گرفته شده است. بنابراین، الکترون‌ها در بازوی سمت چپ سیم (آنتن) مطابق جهت نشان داده شده به طرف بازوی سمت راست حرکت کرده در نتیجه، در طول سیم یک جریان الکتریکی خواهیم داشت. منحنی توزیع جریان در طول سیم در شکل نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، چون سیم یک مدار باز است، در انتهای آن جریان، صفر و در وسط سیم، جریان ماکزیمم خواهد بود. همچنین به علت حرکت الکترون‌ها در آن، در سمت چپ بار منفی و در سمت راست بار مثبت ایجاد شده و در نتیجه در طول سیم اختلاف پتانسیل به وجود آمد که در شکل (۳-۱) به صورت توزیع ولتاژ مشاهده می‌کنید. البته باید توجه داشت چون منبع سینوسی (متناوب) است، پلاریته ولتاژ در دوسر منبع تغییر می‌کند. در نتیجه در نیم سیکل‌های بعدی، جهت جریان در آنتن و همچنین جهت بار ایجاد شده در طول آن عوض خواهد شد. از طرفی می‌دانیم که عبور جریان الکتریکی از هر سیم باعث ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف آن می‌گردد. بنابراین،

در اطراف سیم یا آنتن میدان مغناطیسی ایجاد شده که در شکل (۲-۳) مشاهده می کنید. همچنین وجود توزیع بار در طول سیم (آنتن) باعث ایجاد میدان الکتریکی در اطراف آن می شود که به صورت شکل (۳-۳) می باشد.



شکل (۲-۳)



شکل (۳-۳)

در این جا، همان طور که مشاهده می کنید، جهت میدانهای الکتریکی در راستای سیم (آنتن) بوده و اگر گفته شود پلاریزاسیون آنتن افقی است یعنی میدان الکتریکی موج منتشر شده از آن افقی می باشد. و جهت میدان مغناطیسی تولید شده عمود بر راستای آنتن است. بنابراین، میدان الکتریکی و مغناطیسی که در اطراف آن تولید شده به صورت بردارهایی عمود برهم خواهند بود. اگر فرکانس جریان سیم (آنتن) زیاد شود، مقدار انرژی الکترومغناطیسی که به فضا منتشر می شود افزایش می یابد [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۳ پلاریزاسیون آنتن

اگر آنتن را نسبت به زمین افقی نصب کنیم گفته می شود آنتن به صورت افقی نصب شده خطوط میدان الکتریکی موج ایجاد شده توسط چنین آنتنی اولاً در راستای آنتن است و ثانیاً موج به صورت افقی پلاریزه می شود و اگر نسبت به زمین عمودی نصب شود موج به صورت عمودی پلاریزه می شود.

ساختن آنتنی که بتواند فقط به صورت عمودی و یا تنها افقی امواج را منتشر نماید تقریباً محال است، چون بردارهای شدت میدان در جهات دیگر هم مولفه های کوچکی دارند که به طور تقریب پلاریزاسیون بیضوی را خواهند داشت.

امواج ارسالی از آنتن نیز در حال چرخش است و در این صورت، در هر لحظه موج دارای مؤلفه مناسب برای گیرنده می باشد. و تقریباً نصف توان ارسالی توسط آنتن گیرنده با هر پلاریزاسیونی دریافت می شود. به همین ترتیب، هنگام جستجوی علائم با پلاریزاسیون نامشخص از آنتن، با پلاریزاسیون دایره ای استفاده می شود. و برای تعیین پلاریزاسیون یک سیگنال ناشناس با استفاده از آنتن با پلاریزاسیون مسطح، آنتن آنقدر چرخانده می شود تا سیگنال دریافت شده به حداکثر برسد. اگر با چرخاندن آنتن تغییری در دامنه سیگنال دریافتی دیده نشود، مشخص می شود که علائم دایره ای پلاریزه شده اند.

آنتن هایی که در مجاورت زمین قرار دارند امواج با پلاریزاسیون قائم بهتری را از خود منتشر می کنند، ولی اگر آنتن را به ارتفاع یک طول موج، بالای زمین در نظر بگیریم، انتشار آنتن با پلاریزاسیون افقی و عمودی یکسان خواهند بود. اگر آنتن به اندازه چند طول موج بالاتر از سطح زمین باشد، آنتن با پلاریزاسیون افقی دارای وضعیت بهتری است. در آنتن های هوایی (هواپیماها)، از آنتن با پلاریزاسیون عمودی استفاده می گردد. چون امواج با پلاریزاسیون عمودی (مؤلفه میدان H موازی بر سطح زمین) است، لذا امواج برگشتی از سطح زمین کم است ولی امواج با پلاریزاسیون افقی (مؤلفه میدان H عمود بر سطح زمین) امواج برگشتی زیاد است. در آنتن های زمینی از هر دو نوع پلاریزاسیون (عمودی و افقی) و حتی دایره ای استفاده می شود [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

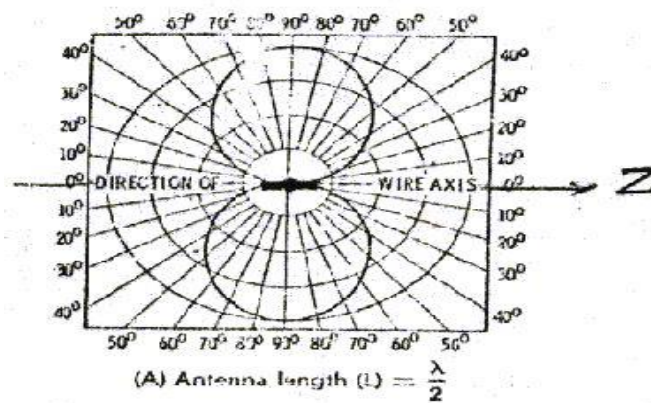
۳-۴ آنتن

در بحث آنتن بخاطر پیچیده بودن فرمولهای تئوری از اثبات آنها صرف نظر شده و بیشتر به تشریح موضوع و کاربرد عملی آنها می پردازیم. برای درک و فهم بهتر بعضی مطالب، اجباراً از فرمولهایی در این مورد استفاده می کنیم. ابتدا آنتن را تعریف و پس از ذکر پارامترهای مهم آن توضیحات لازم در مورد یک آنتن دوقطبی کوتاه ارائه خواهیم داد. تمام آنتنها از تعدادی دوقطبی کوتاه که با یکدیگر سری شده اند، تشکیل شده اند. بنابراین، ابتدا نوع انتشار و گلبزرگ تشعشع (پرتوقدرت) آنتن دوقطبی کوتاه را مورد بررسی قرار می دهیم و در پایان به بحث آنتن، خصوصیات و انواع آن خواهیم پرداخت.

آنتن عنصری است که خط انتقال (موجبر) را به فضای آزاد و یا فضای آزاد را به خط انتقال مرتبط می کند. در بررسی خط انتقال و موجبرها که درمباحث آینده مورد بررسی قرار خواهند گرفت، توجه ما به هدایت انرژی در حول یک سیستم معطوف است و در این بررسی توجهی به تشعشع، یعنی انتقال انرژی از سیستم به فضای آزاد نداریم. خط انتقال و موجبرها معمولاً طوری طراحی می شوند که تشعشع آنها در حداقل باشد. درحالی که طرح آنتن ها طوری است که انرژی با حداکثر امکان تشعشع (یا دریافت) می نماید. بعضی از آنتن ها با راندمان زیادی در محدوده وسیعی از فرکانس کار کرده و بعضی فقط در باند باریکی از فرکانس عمل می نمایند. آنتن های اولی بیشتر در دستگاه های رادیو AM به کار برده می شوند، در حالیکه از آنتن های بعدی در دستگاه های تلویزیون و بعضی از سیستم های مخابراتی دیگر مانند جنگ های الکترونیک استفاده می شود. بطور کلی، راندمان آنتن هایی که فقط در یک باند باریکی از فرکانس کار می کنند، خیلی بیشتر از آنتن هایی است که در یک محدوده وسیعی از فرکانس عمل می نمایند. در هر صورت نباید تصور شود که تمام آنتن های باند وسیع دارای راندمان خوبی نیستند زیرا می توان آنها را طوری ساخت که در باند وسیع، آنتن دارای راندمان بسیار خوبی باشد [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۱-۳-۴ آنتن دو قطبی کوتاه

آنتن دو قطبی کوتاه به یک هادی خطی کوتاه که مانند یک نقطه می توان در نظر گرفت، اطلاق می گردد. ولی از نقطه نظر تشعشعی به یک هادی خطی کوتاه گفته می شود که در موضوع ما، مورد بحث قرار می گیرد. دوقطبی کوتاه همیشه طول قابل اندازه گیری دارد، هرچند ممکن است این طول بسیار کوتاه باشد. فرض می کنیم یک هادی نازک به طول L و جریان یکنواخت I و بارهای نقطه ای Q در دو طرف انتهای آن باشد. می توان ثابت کرد گلبزرگ تشعشع (پرتوقدرت دایبل) و همچنین پرتوقدرت یک آنتن کامل در نقطه ای دور از آن به صورت شکل (۴-۳) می باشد. که آنتن در راستای محور Z قرار دارد. اگر از راستای محور Z به آن نگاه کنیم شکل پرتوقدرت آن را به صورت یک لاستیک (تیوپ) باد کرده خواهیم دید که آنتن در مرکز و عمود بر صفحه شامل آن قرار دارد [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].



شکل (۳-۴) پرتوقدرت يك دایپل (نصف طول موج)

۳-۴-۲ پارامترهای مهم یک آنتن

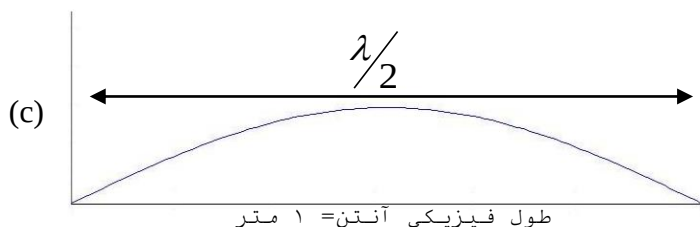
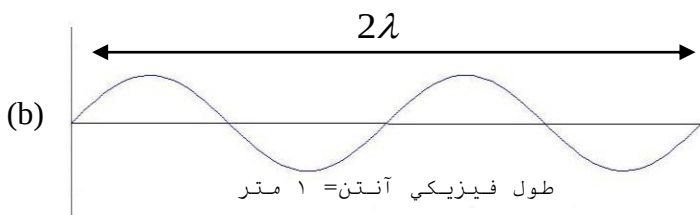
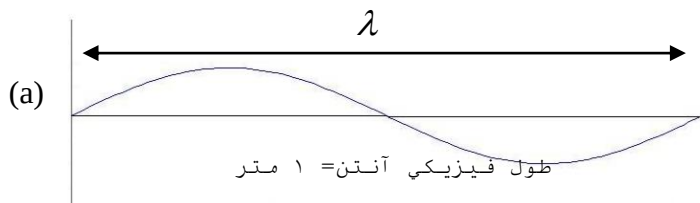
پارامترهای مهم یک آنتن عبارتند از: ۱- طول آنتن ۲- پهنای باند آنتن ۳- میزان برگشتی آنتن VSWR ۴- بهره آنتن ۵- پرتوقدرت ۶- مقاومت (امپدانس) تشعشعی آنتن ۷- سمت گرایی آنتن ۸- دهانه مؤثر آنتن (سطح مؤثر) ۹- زاویه فضایی آنتن.

۳-۴-۲-۱ طول آنتن

طول آنتن، یکی از مهمترین پارامترها در کاربرد آنتن‌ها می‌باشد که به طول فیزیکی و طول الکتریکی تقسیم می‌شود. طول فیزیکی عبارتست از طول واقعی آنتن برحسب متر، طول الکتریکی عبارتست از تعداد طول موج‌هایی که روی آنتن جای می‌گیرد. و طبق تعریف برابر است با: طول فیزیکی = _____ طول الکتریکی

طول موج λ

مثلاً چنانچه یک طول موج از فرکانس کار روی آنتن جای بگیرد، آنتن به طول الکتریکی یک λ است. (شکل ۳-۵-a). اگر دو طول موج روی آنتن جای بگیرد، طول الکتریکی آنتن 2λ است. (شکل ۳-۵-b) و اگر نصف طول موج روی آنتن جای بگیرد، طول آنتن $\lambda/2$ خواهد بود.



شکل ۳-۵-c

بنابراین طول الکتریکی آنتن به دو عامل بستگی دارد، یکی به طول فیزیکی و دیگری طول موج یعنی اگر طول فیزیکی آنتن ثابت بماند با کوتاه شدن طول موج (زیاد شدن فرکانس)، طول الکتریکی آن زیاد می‌شود. و اگر طول موج ثابت بماند (فرکانس کار آنتن تغییر نکند)، با زیاد شدن طول فیزیکی آنتن، طول الکتریکی آن نیز زیاد می‌شود. (یعنی تعداد بیشتری طول موج روی طول آنتن می‌افتد). بعد از این، در بررسی آنتن‌ها همواره طول الکتریکی را بکار می‌بریم. معمولاً طول فیزیکی آنتن ۵٪ کمتر از طول به دست آمده می‌باشد، زیرا سرعت موج روی آنتن کمتر از سرعت آن در هواست، بنابراین طول موج روی آنتن حدود ۵٪ کوتاه‌تر از هواست. که براساس فرمول زیر محاسبه می‌شود.

فرمول (۱۰-۳) ۵٪ طول الکتریکی در هوا - طول الکتریکی در هوا = طول عملی آنتن

مسئله ۱: طول فیزیکی آنتن ۳۰ متر است. طول الکتریکی برای فرکانس‌های ۳۰ mhz و ۱۰ mhz و ۳ mhz را پیدا کنید

جواب:
$$\lambda_{30mhz} = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{30000000} = 10m$$

طول الکتریکی $= \frac{30}{10} = 3\lambda$

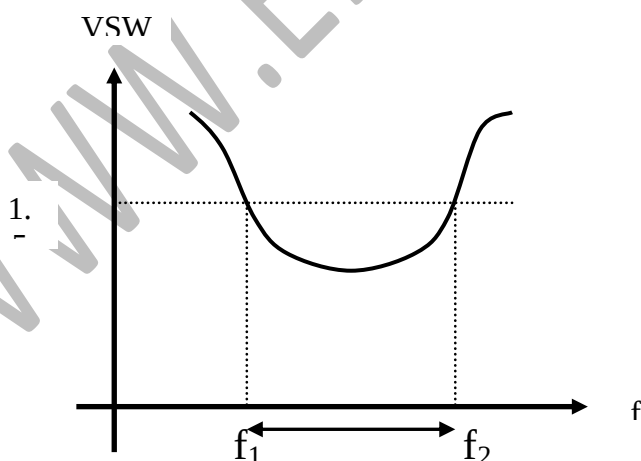
$\lambda_{10mhz} = \frac{300000000}{10000000} = 30m$

طول الکتریکی $= \frac{30}{30} = 1\lambda$ $\lambda_{3mhz} = \frac{300000000}{3000000} = 100m$

طول الکتریکی $\frac{30}{100} = 0.3\lambda$

۲-۲-۳ پهنای باند آنتن

پهنای باند آنتن عبارت است از بازه‌ی یا طیف فرکانسی است که در طول آن میزان برگشتی آنتن (VSWR) در سراسر آن مقدار معینی مثلاً کمتر از یک و نیم باشد ($VSWR \leq 1.5$) مطابق شکل ۳-۶



پهنای باند

به عبارت دیگر بازه‌ی کاری و بهینه مناسب آنتن پهنای باند موثر است که مقدار آن با توجه به منحنی VSWR برآورد و محاسبه می‌گردد.

$BW = f_2 - f_1$ پهنای باند موثر آنتن

۳-۲-۳ میزان برگشتی آنتن VSWR

VSWR معیاری است جهت اندازه گیری و ارزیابی میزان عدم تطبیق امپدانس بین آنتن و خط بار ۵۰ اهم. VSWR بیشتر به معنی عدم تطبیق امپدانس است و متعاقبا میزان VSWR پایین متناظر با تطبیق امپدانس کاملتر و در نتیجه دریافت و ارسال حداکثر انرژی توسط آنتن می باشد. به عبارت دیگر VSWR معیار برگشتی آنتن است که در شرایط ایده آل $VSWR=1$ می باشد. به این معنی که تمام توان به آنتن تحویل شده و برگشتی صفر است ولیکن در عمل با عددی بزرگتر از یک در مشخصات فنی آنتن نشان داده می شود. برای ارزیابی و انتخاب پهنای باند موثر آنتن، سازندگان باید منحنی VSWR را مانند شکل (۶-۳) برای هر آنتنی ارائه نمایند [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۲-۴ سمت گرایی و بهره سمتی (جهتی) آنتن

یکی از مشخصات مهم یک آنتن توانایی تمرکز انرژی اش در یک جهت خاص نسبت به تشعشع آن در جهات دیگر است و یا به عبارتی دیگر یک آنتن در یک جهت مشخص نسبت به دیگر جهات چه مقدار انرژی را دریافت یا منتشر می کند. این مشخصه آنتن را سمت گرایی آنتن می نامند. برای آنکه نحوه محاسبه اندازه سمت گرایی را توضیح دهیم در ابتدا به تعریف و روش محاسبه بهره سمتی آنتن می پردازیم [۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۴].

الف- بهره سمتی (Directive Gain):

نسبت شدت تشعشع در یک جهت به شدت تشعشع متوسط، بهره سمتی در آن جهت نامیده می شود که رابطه آن به شکل زیر می باشد:

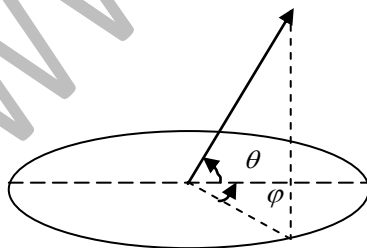
$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{ave}}$$

$U(\theta, \varphi)$: شدت تشعشع در جهت (θ, φ)

U_{ave} : شدت تشعشع متوسط

$D(\theta, \varphi)$: بهره سمتی در جهت (θ, φ)

این رابطه این مفهوم را بیان می کند که در جهات مختلف بهره سمتی آنتن چقدر می باشد به عنوان مثال در جهت $\theta = 60^\circ, \varphi = 40^\circ$ ، اندازه $D(60, 40)$ برابر 1.5dB می باشد. (هر زوج (θ, φ) نشان دهنده یک جهت می باشد).



شکل ۳-۷

ب- سمت گرایی (Directivity):

ماکزیم مقدار بهره سمتی را سمت گرایی آنتن می نامند و با D نشان می دهند پس:

$$D = \frac{U_{max}}{U_{ave}} = \frac{4\pi \times U_{max}}{P_r}$$

$$U_{ave} = \frac{P_r}{4\pi}$$

U_{max} بیانگر شدت تشعشع ماکزیمم

P_r توان منشر شده از آنتن

مقدار شدت تشعشع $U(\theta, \varphi)$ برای جهات مختلف دارای اندازه‌های مختلفی می‌باشد. در یک جهت بخصوص مقدار آن ماکزیمم می‌باشد که ما آن را $U_{\max}$ در نظر می‌گیریم. رابطه فوق این مفهوم را بیان می‌کند در جهتی که $U(\theta, \varphi)$ ماکزیمم شده آنتن در آن جهت بیشترین توان را می‌تواند دریافت یا منتشر نماید و می‌گویی سمت گرایی آنتن در آن جهت می‌باشد.

برای مثال، سمت گرایی آنتن دایپل کوتاه بیشتر از آنتن ایزوتروپیک است. درواقع، سمت گرایی همه آنتن‌ها از آنتن ایزوتروپیک بیشتر است، چون آنتن ایزوتروپیک در تمام جهات انرژی را به طور یکنواخت پخش می‌کند، در حالی که آنتن‌های دیگر، در یک جهت انرژی را بیشتر از جهات دیگر پخش می‌کنند. بنابراین سمت گرایی آنها بیشتر از یک خواهد بود. (سمت گرایی آنتن ایزوتروپیک یک می‌باشد) $[10, 9, 8, 6, 5, 4, 2]$.

۵-۲-۳ بهره آنتن

هنگامی که یک آنتن در یک سیستم رادیویی (مانند یک آنتن فرستنده) بکار می‌رود، در واقع کارایی آنتن برای تبدیل توان موجود در پایه‌های ورودی‌اش به توان تشعشعی همراه با خواص سمت گرایی آن مورد نظر است. بهره توان یا بهره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \times U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad G = \frac{4\pi \times U_{\max}}{P_{in}}$$

در رابطه بالا $U(\theta, \varphi)$ شدت تشعشع در یک جهت معین همراه با در نظر گرفتن اثرات ناشی از هرگونه تلفات روی آنتن بوده (تلفات ناشی از عدم تطبیق امپدانس و عدم تطبیق پلاریزاسیون نداریم یا به عبارتی تطبیق امپدانس در آنتن صورت گرفته و همچنین پلاریزاسیون آنتن و موج دریافتی نیز یکسان می‌باشد) و P_{in} توان ورودی به آنتن متصل به فرستنده می‌باشد. حداکثر اندازه $G(\theta, \varphi)$ را بهره (Gain) آنتن می‌گویند و برابر است با:

تنها اختلاف بین سمت گرایی و بهره در اندازه توان بکاربرده شده می‌باشد. در سمت گرایی توان تشعشع شده از آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی در بهره توان داده شده به ورودی آنتن در نظر گرفته می‌شود. اگر کل توان ورودی به صورت توان تشعشع شده ظاهر شود داریم:

$$P_{in} = P_r$$

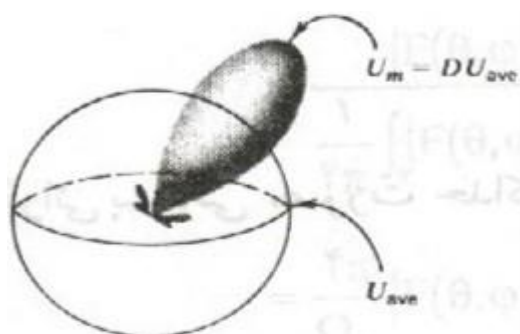
در نتیجه سمت گرایی را می‌توان به عنوان بهره توان تلقی نمود. بهره توان این واقعیت را منعکس می‌کند که مقداری از توان ورودی در آنتنهای واقعی تلف می‌شود. قسمتی از توان ورودی P_{in} که به صورت توان تشعشع شده P_r ظاهر نمی‌شود، در آنتنها و وسایل مجاور جذب شده و تلف می‌شود. بنابراین کارایی تشعشعی یا بازدهی آنتن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$e = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{P_r}{P_r + P_{ohm}} = \frac{\frac{1}{2} R_{ri} I_{in}^2}{\frac{1}{2} R_{ri} I_{in}^2 + \frac{1}{2} R_{\Omega} I_{in}^2} = \frac{R_{ri}}{R_{ri} + R_{\Omega}}$$

بنابراین هر چه مقاومت اهمیک (R_{Ω}) آنتن کم

باشد بازدهی آنتن بهتر است. برای بسیاری از آنتنها بازدهی ۱۰۰٪ می باشد. همچنین با استفاده از ترکیب روابط ذکر شده می توان $G = e * D$ در نظر گرفت.

واحد اندازه گیری بهره آنتن dB است. بطور مثال آنتنی که دارای بهره ۱۲ dB است، شدت آن در جهت انتشار dB ۱۲ بیشتر از قدرت انتشار یک آنتن ایزوتروپیک برای فرستنده با خروجی یکسان است با این فرض که توان داده شده به هر دو آنتن یکسان می باشد.



شکل (۸-۳) مقایسه بهره آنتن

بهره یک آنتن با زیاد شدن فرکانس افزایش می یابد، به همین دلیل، در طول موجهای میکروویو ساختن آنتنهایی با بهره بسیار بالا و داشتن اشعه باریک کاری ساده و عملی است [۱۰، ۹، ۸، ۶، ۵، ۴، ۲].

۳-۴-۲-۶ پرتو قدرت آنتن (گلبرگ تشعشع)

پرتو تشعشعی آنتن یک نمودار (منحنی) از خواص تشعشعی (میدان دور) آنتن در جهتهای مختلف می باشد بدین ترتیب که اندازه میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی یا توان تشعشعی را در فاصله ای معین و ثابت در ناحیه خیلی دور از آنتن بر حسب زاویه های θ و ϕ رسم می کنند. پرتو تشعشعی میدان را می توان با حرکت دادن یک آنتن در یک فاصله معین ثابت به دست آورد. برای مثال یک آنتن خطی کوچک که میدانهای آن را قبلاً محاسبه کردیم. میدان الکتریکی در جهت a_θ و میدان مغناطیسی در جهت a_ϕ می باشد. بنابراین اگر یک پروب (آنتن خیلی کوچک خطی) در فاصله مشخص r در امتداد a_θ قرار دهیم، میدان الکتریکی تشعشعی آنتن دوسر پروب و ولتاژی القا می نماید که به وسیله ولت متر اندازه گیری می شود. با تغییر مکان پروب روی دایره به شعاع r در امتداد θ شدت میدان الکتریکی E_θ را می توان بر حسب زاویه θ رسم کرد.

مشاهده می شود تغییرات E_θ متناسب با $\sin \theta$ است و به ϕ بستگی ندارد. پرتو را می توان در دو صفحه E-Plane و H-Plane دید. به عبارت کلی تر پرتو قدرت آنتن به این معناست که جهت انتشار آنتن و یا به عبارت دیگر، حداکثر تشعشع آنتن به چه شکل است و در کدام جهت است. پرتو قدرت را برای یک آنتن دایره نیم موج از روی معادله میدانهای انتشار آن در شکل (۳-۴) مشاهده نمودید. پرتو قدرت آنتن بستگی به نوع، شکل، طول و ارتفاع آنتن متفاوت خواهد بود. بدیهی است به کمک قضیه هم پاسخی می توان نشان داد که شکل میدان انتشار آنتن در حالت گیرندگی و فرستندگی یکی است [۱۰، ۹، ۸، ۶، ۵، ۴، ۲].

۷-۲-۴-۳ مقاومت (امپدانس) تشعشعی آنتن

امپدانس ورودی یک آنتن ، امپدانس است که در دو سر آنتن ظاهر می شود. ولی اکنون فرض بر این است که آنتن ایزوله است و اثر کوپلاژ آنتنها و مدارهای دیگر روی آنتن را در نظر نمی گیریم. امپدانس آنتن دارای یک قسمت حقیقی R_{in} و یک قسمت X_{in} (جزء موهومی که ناشی از خاصیت سلفی و خازنی آنتن می باشد) است.

$$Z_{in} = R_{in} + j X_{in}$$

R_{in} = به مقاومت ورودی آنتن گفته می شود

X_{in} = بیانگر انرژی ذخیره شده در میدان نزدیک آنتن است.

که مقاومت R_{in} بیانگر افتها است. توان به دو طریق تلف می شود یکی افت حرارتی روی ساختمان آنتن و دیگری توانی که از آنتن رها شده و در فضا منتشر می شود و هرگز به آنتن بر نمی گردد (توان تشعشعی) به عبارت دیگر:

$$R_{in} = R_{\Omega} + R_{ri}$$

R_{Ω} = بیانگر توان حرارتی یا افت حرارتی روی ساختمان آنتنها است.

R_{ri} = بیانگر توان که از آنتن رها می شود و در فضا منتشر می گردد.

ابتدا مقاومت ورودی را مورد بحث قرار می دهیم، توان متوسط تلف شده در یک آنتن عبارت است :

$$P_{in} = \frac{1}{2} R_{in} |I_{in}|^2$$

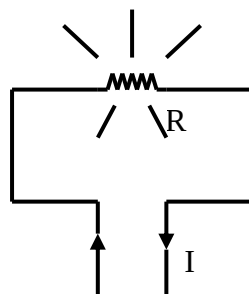
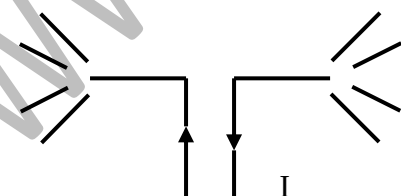
که I_{in} مقدار حداکثر (پیک) جریان ورودی به آنتن می باشد. توان تلف شده را به دو بخش جداگانه توان تشعشعی و توان اهمی تقسیم می کنیم پس داریم :

$$P_{in} = P_r + P_{ohmic} = \frac{1}{2} R_{ri} |I_{in}|^2 + \frac{1}{2} R_{ohmic} |I_{in}|^2$$

که R_{ri} را مقاومت تشعشعی آنتن می نامیم $R_{ri} = \frac{2P_r}{|I_{in}|^2}$ و چنین تعریف می شود:

و مقاومت R_{ohmic} برابر است با :

$$R_{ohmic} = \frac{2P_{ohmic}}{|I_{in}|^2} = \frac{2(P_{in} - P_r)}{|I_{in}|^2}$$



شکل (۹-۳)

I_{in} = مقدار حداکثر (پیک) جریان ورودی به آنتن است. توان حرارتی تلف شده بر روی آنتن (P_{ohm}) روی مقاومت اهمی (R_{Ω}) افت می کند، توان تشعشعی آنتن (P_r) از روی مقاومت تشعشعی آنتن (R_{ri}) منتشر می گردد.

مقاومت تشعشعی (R_{ri}) را می‌توان نسبت به جریان هر نقطه روی آنتن تعریف کرد ولی معمولاً نسبت به نقطه‌ای که جریان آنتن حداکثر است محاسبه می‌شود. قدرت تشعشع شده توسط آنتن برابر است با:

$$P_r = \frac{1}{2} R I_{in}^2 \quad \text{فرمول (۳-۳)}$$

P_r توان تشعشع شده توسط آنتن بر حسب وات، I_{in} دامنه جریان در ترمینال آنتن بر حسب آمپر و R_{ri} مقاومت تشعشعی آنتن بر حسب اهم که در ترمینال ظاهر می‌گردد و می‌توان آنرا از فرمول $R_{ri} = (2P_r) / (I_{in}^2)$ محاسبه نمود.

از طرفی توان کل تشعشعی آنتن برابر است با انتگرال بردار پوینتینگ روی سطح بسته‌ای که آنتن را در بر می‌گیرد:

$$P_r = \frac{1}{2} \int_s R_e (E \times H^*) \cdot ds$$

$$P_r = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\beta I_0 \ell)^2}{12\pi}$$

P_r برای یک آنتن خطی خیلی کوچک برابر است با :

فرمول (۳-۴)

اگر بجای $\beta = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ (ثابت انتشار موج است) و بجای μ_0 و ϵ_0 مقادیر آنها را جایگزین کنیم رابطه‌ای برای مقاومت تشعشعی یک آنتن به دست می‌آید که در فرمول (۳-۵) مشاهده می‌کنید.

مقاومت تشعشعی یک آنتن خطی کوچک

$$R = 80\pi^2 \left(\frac{\ell f}{c} \right)^2 = 80\pi^2 \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2 \quad \text{فرمول (۳-۵)}$$

ℓ طول آنتن بر حسب متر. f فرکانس امواج منتشره از آنتن بر حسب هرتز و c سرعت موج بر حسب m/s و λ طول موج منتشره از آنتن بر حسب متر می‌باشد. باتوجه به فرمول، هرچه فرکانس موج افزایش یابد، قدرت تشعشع شده از آنتن زیادتر می‌گردد.

مسأله: مقاومت تشعشعی برای یک آنتن نیم موج (طول $\frac{\lambda}{2}$) چقدر است؟

$$R = 80 \times (3/14)^2 \left(\frac{\lambda/2}{\lambda} \right)^2 = 197 \approx 200 \Omega$$

بنابراین کابلی که باید به این آنتن وصل شود باید دارای امپدانس معادل 200Ω باشد.

مسأله ۲- مقاومت تشعشعی (امپدانس آنتن) برای یک آنتن میله‌ای با طول $\lambda/4$ چقدر است؟

$$80 \times R = \frac{\lambda/2}{\lambda} \times (3/14)^2 \times = 49.3 \Omega \approx 50 \Omega$$

بنابراین برای انتقال حداکثر انرژی به آنتن باید تطبیق امپدانس بین کابل و آنتن صورت گیرد، لذا کابل با امپدانس 50Ω مناسب است. (مثلاً کابل RG58)

راکتانس آنتن (X_{in}) برابر است با انرژی ذخیره شده در میدان نزدیک آنتن و مربوط به قسمت موهومی امپدانس است. اهمیت امپدانس آنتن در انتقال توان از فرستنده به آنتن و از آنتن به محیط بوده که برای انتقال حداکثر قدرت

باید تطبیق امپدانس صورت گیرد. معمولاً گیرنده‌ها دارای امپدانس حقیقی هستند و بنابراین لازم است که راکتانس آنتن بوسیله یک مدار رزنانس خنثی شود. با فرض این که محیط آنتن بدون تلفات باشد، توان تشعشع شده توسط آنتن با قدرت ورودی به آنتن مساوی می‌باشد. برای این منظور باید، امپدانس خط انتقال با امپدانس مشخصه آنتن (مقاومت تشعشعی آنتن) برابر باشد که تمام قدرت رسیده به آنتن بدون انعکاس یا برگشتی از آنتن منتشر شود [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

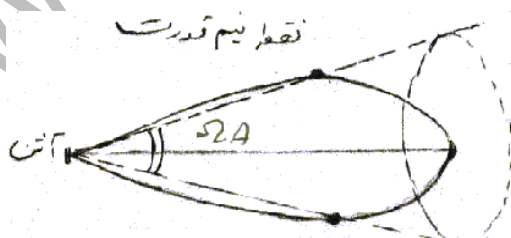
۳-۴-۲-۸ دهانه مؤثر آنتن (سطح مؤثر)

زمانی که یک آنتن فرستنده توان P_T را منتشر می‌کند می‌خواهیم توان دریافتی در آنتن گیرنده را محاسبه کنیم. در ناحیه خیلی دور امواج منتشر شده از آنتن فرستنده به صورت صفحه‌ای بوده و در یک ناحیه محدود دامنه امواج تقریباً یکنواخت می‌باشد. توان کل رسیده به آنتن گیرنده برابر با مجموع چگالی توان روی سطح آنتن گیرنده است. اینکه چگونه آنتن این توان تابش را به توان مفید در دو سر خود تبدیل می‌کند بستگی به نوع آنتن، جهت و پلاریزاسیون آن دارد. بنابراین مفید است که یک سطح معادل یا دهانه مؤثر با تعریف زیر به آنتن نسبت دهیم:

که P_R توان متوسط دریافتی دو سر آنتن، S_{ave} چگالی توان متوسط موج تابش در محل گیرنده و A_{em} (سطح مؤثر یا دهانه مؤثر بر حسب متر مربع) یک معیار جهت سنجش کارایی آنتن در تبدیل توان تابش S_{ave} (بر حسب وات بر متر مربع) به توان دریافتی دو سر آنتن (بر حسب وات) می‌باشد. البته لازم به ذکر است که باید سمت گیری آنتن در جهتی باشد که حداکثر توان را دریافت کند و حالت پلاریزاسیون آنتن همانند موج ورودی باشد

۳-۴-۲-۹ زاویه فضایی آنتن

زاویه فضایی گلبرگ (Beam) آنتن آن زاویه فضایی است که تقریباً توان کل از داخل آن تشعشع می‌شود، مشروط بر اینکه شدت تشعشع (توان در واحد زاویه فضایی) در سطح این Beam برابر حداکثر مقدارش باشد (منظور از جمله آخر این است که برای Beam اصلی آنتن این زاویه تعریف می‌شود) شکل (۳-۱۰) [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].



شکل (۳-۱۰)

۳-۴-۳ انتخاب نوع آنتن

در انتخاب آنتن مناسب برای یک سیستم الکترونیکی و مخابراتی، اغلب باید به سه سؤال اساسی جواب داد:

۱- آیا آنتن تمام جهته (omni directional) که 360° تحت پوشش رادیویی قرار گیرد، مورد نیاز است یا یک آنتن جهت دار (Directional) که تشعشع آن در زاویه شعاعی (زاویه فضایی) خاصی قرار می‌گیرد؟ آنتن تمام جهته برای

پوشش رادیویی به کار می رود که از تمام جهات خبر و اطلاعات کسب کند، بدین وسیله استفاده کننده را از بروز هر گونه خطر آگاه سازد. این سیستم، از جنگهای الکترونیکی جیمینگ (کورکردن یک سیستم رادیویی) درمان خواهد بود. آنتنهای جهتی، اساس سیستمهای پیدا کننده جهت، سیستمهای جیمینگ جهتی و رادارها و بعضی از سیستمهای مخابراتی (تلویزیون) قرار می گیرند.

۲- آیا سیستم ما به یک آنتن با پلاریزاسیون خطی احتیاج دارد یا به یک آنتن با پلاریزاسیون دایره ای؟ پلاریزاسیون خطی در مواردی مورد استفاده قرار می گیرد که آنتن دیگری با آن در ارتباط باشد، برای ما شناخته شده باشد، یعنی دارای پلاریزاسیون خطی باشد. بطور مثال اگر آنتن فرستنده دارای پلاریزاسیون خطی افقی باشد، آنتن گیرنده نیز باید دارای همان پلاریزاسیون باشد. ولی آنتن با پلاریزاسیون دایره ای در مواقعی مطرح می شود که پلاریزاسیون آنتن دیگری ناشناخته یا متغیر باشد.

۳- آیا آنتن باید یک باند وسیعی از فرکانس را پوشاند و یا سیستم ما به یک آنتن باند باریک احتیاج دارد؟ در جدول (۱-۳) انتخاب نوع آنتن را مشاهده می کنید.

System Requirement			
Patern	Polarization	Bandwith	Antenna Type
Omni directional Antenna	Liniery Polarized	Narrow band	Dipole
			Loop
		Broad band	Biconical
			Swastica
	Circulary Polarized	Narrow band	Normal Mode Helix
		Broad band	Biconical w/polarizer
			lindenblad
			4-Arm conical spiral
Directional Antenna	Liniery Polarized	Narrow band	yagi
			Dipoie array
		Broad band	Log period
			Horn
	Circulary Polarized	Narrow band	Axial mode Helix
			Horns w/polarizer
		Broad band	Cavity sprials
			Conical sprials

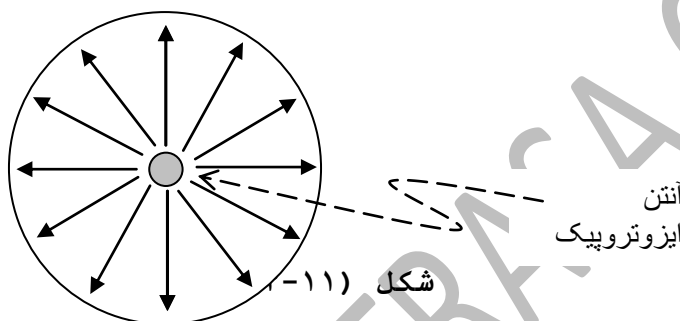
۴-۳-۴ انواع آنتن ها

طرح و کاربرد آنتنها در دستگاههای مخابراتی، برحسب فرکانس کار، نوع تشعشع آنتن، دستیابی به مشخصات مورد نظر برای مخابره و تشعشع امواج الکترومغناطیسی متفاوت بوده و از لحاظ فیزیکی دارای انواع و شکلهای مختلفی می باشند، مثلاً آنتنهایی که برای مخابره رادیویی در باندهای پایین تا HF به کار می روند، دارای طول زیادی می باشند، ولی در باندهایی مانند VHF، به بالا آنتن ها طول کوتاهتری دارند. آنتنهایی که در فرکانس مایکروویو به کار می روند، شکل و نوع آنها با آنتنهایی که اشاره کردیم کاملاً متفاوت بوده و خود نیز انواع مختلفی دارند. کاربردهای نظامی مانند: جنگهای

الکترونیک و ردیابی، تجسس و حساسیت نوع کار از نظر حفاظتی و امنیتی مخابرات، باعث می شود آنتن های نظامی از تنوع بیشتری برخوردار باشند. که ما در این قسمت تعدادی از انواع آنتن ها را مورد بررسی قرار می دهیم [۲، ۱۰، ۹، ۸، ۶، ۵، ۴].

۱-۴-۳ آنتن ایزوتروپیک

آنتنی که امواج را به همه جهات بطور یکسان انتشار می دهد. آنتن یا منبع (Isotropic) نامیده می شود. چنین آنتنی عملاً وجود ندارد، زیرا به هر حال، هر آنتن در جهت یا جهاتی تابش بیشتری دارد. آنتن ایزوتروپیک تنها در تئوری و به عنوان مأخذ مقایسه برای تعیین بهره یا (directivity) آنتن های واقعی استفاده می گردد. شکل (۹-۳) نوع تشعشع یک آنتن فرضی ایزوتروپیک را که به صورت کروی به همه جهات انرژی را پخش می کند نشان می دهد.



شکل (۱۱-۳) تشعشع یک آنتن ایزوتروپیک که به صورت کروی و همه جهته است [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

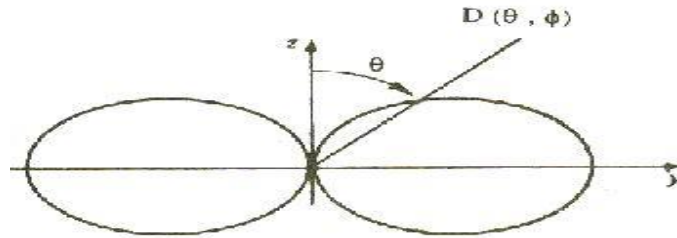
۲-۴-۳ آنتن نیم موج (دایپل، هرتز)

یک آنتن سیمی خطی مستقیم است. این آنتن از دو قطعه سیم که طول دو قطعه آن $\frac{\lambda}{2}$ بوده و در امتداد هم قرار می گیرند تشکیل می شود. امپدانس آن ۷۳ اهم است و لذا سعی می کنند با یک ترانس مثلث و تغییر امپدانس خط، با امپدانس معادل آنتن در نقطه اتصال تطبیق شود. رنج فرکانس کار این نوع آنتن در باند (۱۶ - ۲) مگاهرتز است. بطوری که، آنتن در فرکانس اصلی (فرکانسی که آنتن برای آن محاسبه شد) بهره خوبی دارد. و در فرکانس هارمونیک، فرکانس اصلی کمتر عمل می کند (فرکانسهای دو و سه و برابر فرکانس اصلی). طول عملی (طول واقعی) این آنتن از فرمول (۱۱-۳) محاسبه می شود:

طول الکتریکی محاسبه شده بر حسب متر	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f} = \frac{300}{20f(mc)} = \frac{150}{f(mc)}$	طول	واقعی (طول عملی)
الکتریکی	در هوا	$\ell = 95\%$	طول
فرمول (۱۱-۳)	$\ell = \frac{142.5}{f(mc)}$	متر	طول واقعی (طول عملی)

اگر برای باند (۱۶ - ۲) مگا هرتز بخواهیم آنتن نیم موج محاسبه کنیم باید برای فرکانس میانگین یعنی ۹ مگاهرتز در نظر گرفته شده و محاسبه شود. بطور مثال، آنتن تلویزیون برای باند VHF ((۵۴ - ۸۸)) مگاهرتز برای فرکانس ۶۵ مگاهرتز

حساب می‌شود. (فرکانس میانگین باند) لذا فرکانس رزونانس آنتن که بهره خوبی در آن آنتن دارد همان ۶۵ مگاهرتز می‌باشد. ارتفاع آنتن نیم موج برای فرکانسهای مختلف باند (۱۶ - ۲) مگاهرتز متغیر بوده و معمولاً حدود $\lambda/4$ بالای سطح زمین در نظر می‌گیرند. گلبرگ تشعشع آنتن نیم موج بستگی به طول آنتن، نوع تغذیه، ارتفاع آنتن و چگونگی نصب آن دارد. یک نمونه تشعشع آن را در شکل (۳-۱۱) مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۱۲) نمونه تشعشع آنتن نیم موج

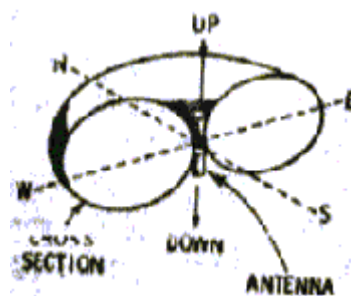
همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، انتشار آنتن نیم موج در اطراف آنتن به صورت شکل نشان داده شده می‌باشد. اگر یک طرف آنتن را یک منعکس کننده میله‌ای قرار دهیم شکل انتشار به یک طرف خواهد بود و در پشت رفلکتور انتشار قابل توجهی نخواهیم داشت به این صورت آنتن دوقطبی و نیم موج جهت دار می‌شود.



شکل (۳-۱۳) نمونه پرتو تشعشع برای آنتن نیم موج (دوقطبی) با رفلکتور

آنتن نیم موج به نامهای آنتن دوبلت، دوقطبی نیز مشهورند که همه این نمونه طولشان $\lambda/2$ و معمولاً بطور افقی و عمودی نصب می‌شوند. نمونه‌های دیگری از همین آنتن به طولهای بیشتر از $\lambda/2$ و کمتر از $\lambda/2$ نیز ساخته می‌شوند که این نمونه‌ها هم معمولاً به صورت افقی و عمودی نصب می‌شوند و دارای گلبرگ تشعشع مختلفی هستند که در مورد بعضی از آنها توضیح خواهیم داد.

بطور مثال آنتن دوبلت کوتاه که طول آن کمتر از $\lambda/4$ است و در صفحه عمود بر جهت آنتن در تمام جهات تشعشع یکنواخت دارد که در شکل (۳-۱۳) مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۱۴) تشعشع یک آنتن دوبلت کوتاه در صفحه عمود بر آن

چنانچه در شکل دیده می شود، شدت موج رادیویی در فاصله معینی از آنتن در تمام جهات به یک اندازه است ولی هرچه از آنتن دورتر می شویم، شدت موج کمتر می شود. توجه داشته باشید که گلبزرگ آنتن را در فاصله دور از آنتن در نظر می گیریم. بطور کلی فواصل از آنتن به سه ناحیه تقسیم می شود.

الف - ناحیه آنتن :

این ناحیه در نزدیکی آنتن بوده و فاصله آن از آنتن حدود نصف طول موج است. مثلاً برای یک آنتن به طول ۱۰ متر (در فرکانس ۳۰ مگاهرتز) تا فاصله حدود ۵ متری آنتن محسوب می شود.

ب- ناحیه میدان نزدیک آنتن یا ناحیه فرنل:

این ناحیه از فاصله ناحیه آنتن شروع شده و تا حدود فاصله ای برابر $R = \frac{2L^2}{\lambda}$ امتداد می یابد. در این رابطه:

L : طول آنتن بر حسب متر λ : طول موج بر حسب متر

R : فاصله میدان نزدیک می باشد، مثلاً اگر طول موج برابر ۴۵ متر و طول آنتن ۳۰ متر باشد، ناحیه نزدیک عبارت است از ۴۰ متر.

ج- ناحیه میدان دور یا ناحیه فران هوفر:

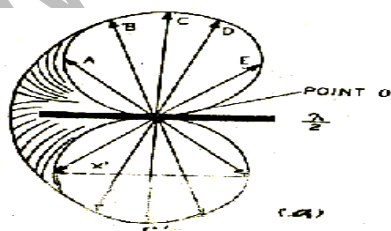
این ناحیه از میدان نزدیک شروع شده و تا جایی که شدت موج رادیویی موجود باشد، ادامه دارد. گلبزرگ آنتنهایی که در این قسمت بحث می شود، همگی مربوط به میدان دور آنتن است.

شرط لازم برای ناحیه دور $R > \frac{2L^2}{\lambda}, R \gg L, R \gg \lambda$

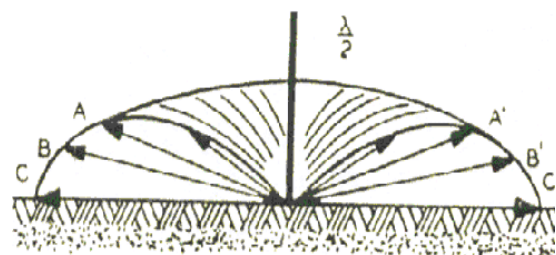
فرمول (۳-۱۲)

شرط $R = \frac{2L^2}{\lambda}$ برای آنتنهایی که در باند VHF و بالاتر کار می کند کافی است. در فرکانسهای پایینتر که آنتن ممکن است نسبت به طول موج کوچک باشد باید دقت شود دو شرط دیگر هم برآورد شود. در شکل (۳-۱۴) گلبزرگ آنتنهایی که دارای طول $\frac{\lambda}{2}$ و کمتر از $\frac{\lambda}{2}$ که آنتن دوبلت کوتاه (کمتر از $\frac{\lambda}{4}$) را نیز شامل می شود، وقتی به صورت افقی و عمودی قرار گیرند نشان می دهد.

شکل (۳-۱۴) گلبزرگ تشعشع آنتنهای دایپل با طول کمتر یا مساوی $\frac{\lambda}{2}$ وقتی به صورت افقی قرار گرفته باشد را نشان می دهد.

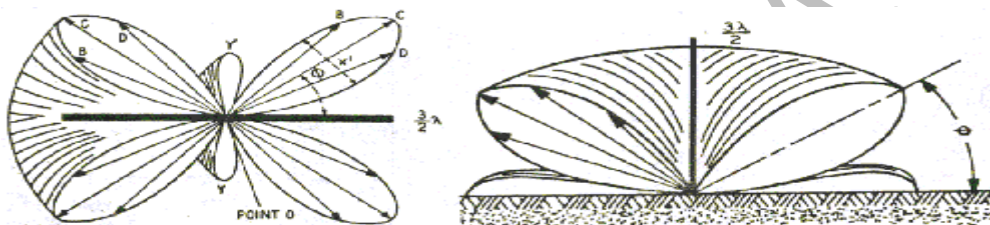


شکل (۳-۱۶)



شکل (۳-۱۵)

د- صفحه شامل آنتن شکل (۳-۱۵) گلبیگ تشعشع آنتنهای دایپل باطول کمتر یا مساوی $\frac{\lambda}{2}$ وقتی به صورت عمودی قرار گرفته باشد در صفحه عمود بر آنتن. چنانچه در شکل (۳-۱۴) دیده می شود، در جهت C و C' حد اکثر تشعشع موجود است و هرچه به طرف امتداد آنتن نزدیکتر می شویم، تشعشع کمتر می شود. تا جایی که در جهت دوانتهای آنتن، تشعشع نداریم. برای آنتنهای باطول $\frac{\lambda}{2}$ و کمتر تشعشع در صفحه عمود بر آنتن یکسان و همه جهتی (Omni directional) است، ولی تشعشع در صفحه شامل آنتن برای طولهای مختلف آن، متفاوت است. بطور مثال، تشعشع برای یک آنتن باطول $\frac{3}{2}\lambda$ که بطور افقی یا عمودی قرار گیرد به صورت شکل (۳-۱۶) نشان داده شده بطوری که ملاحظه می کنید، تعداد گلبیگهای آنتن زیادتر شده و جهت انتشار ماکزیمم آنتن نیز تغییر کرده است.



شکل (۳-۱۷)

شکل (۳-۱۸) د

شکل (۳-۱۷) گلبیگ تشعشع آنتنهای دایپل با طول $\frac{3}{2}\lambda$ وقتی به صورت افقی قرار گرفته باشد. شکل (۳-۱۶) گلبیگ تشعشع آنتنهای دایپل باطول $\frac{3}{2}\lambda$ وقتی به صورت عمودی نصب شده باشد. شکل (۳-۱۸-a) تشعشع عمودی گلبیگ یک آنتن دوبلت (دوقطبی) به طول یک طول موج ($\lambda = L$) را نشان می دهد. که نسبت به گلبیگ آنتن $\frac{\lambda}{2}$ کشیده تر (تیزتر) شده است. شکل (۳-۱۸-b) تشعشع عمومی گلبیگ آنتن دوبلت بطول دو برابر طول موج ($L = 2\lambda$) را نشان می دهد. این آنتن دارای چهار گلبیگ انتشار می باشد و گلبیگها نیز تیزتر (جهت دارتر) شده اند.



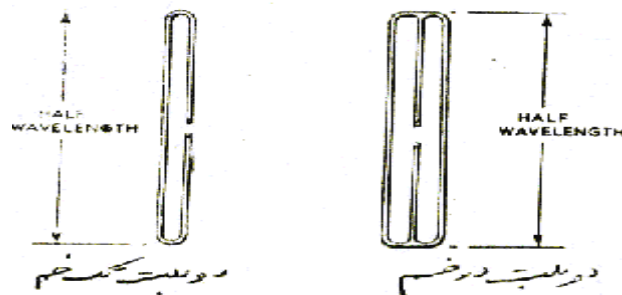
(۳-۱۹-a) (۳-۱۹-b)

شکل (۳-۱۹-b)

لازم به تذکر است گلبیگهایی که برای آنتنها شرح داده ایم، حتماً لازم نیست طول فیزیکی آنتن را تغییر دهیم. و به این نوع گلبیگ های تشعشع دست یابیم. طول فیزیکی آنتن می تواند ثابت بماند و بستگی به اینکه فرکانس کاری که به آنتن اعمال می کنیم چقدر باشد، گلبیگ های مختلفی را خواهیم داشت [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۴-۴-۳ آنتن دوبلت خمیده

در شکل (۳-۱۹) یک آنتن دوبلت خمیده (خم شده) Folded dipole دیده می شود. این آنتن معمولاً بطول $\frac{\lambda}{2}$ است. آنتن دوبلت خمیده بطول $\frac{\lambda}{2}$ ، دارای امپدانس ورودی تقریباً چهار برابر امپدانس ورودی آنتن دوقطبی نیم موج معمولی می باشد که در حدود ۳۰۰ اهم می باشد. در آنتن دوبلت خمیده مقاومت ورودی (R_{in}) و پهنای باند (BW) زیاد می باشد. به دلیل پهنای باند زیاد در کاربردهای T.V و FM که دارای پهنای باند زیاد هستند مورد استفاده قرار می گیرد. این آنتن دارای پهنای باند بیشتری نسبت به یک دوبلت (دایپل) معمولی است. و عموماً برای گیرنده های رادیویی FM و نیز گیرنده های تلویزیونی (باند VHF و UHF) به کار برده می شود. نوع دیگری دوبلت دو خم وجود دارد که دارای امپدانس به میزان ۹ برابر امپدانس دوقطبی نیم موج معمولی است. (یعنی ۶۵۷ اهم می باشد) که در شکل (۳-۱۹) مشاهده می کنید



شکل ۳-۲۰

۳-۴-۴-۴ آنتن یاگی

یک مهندس ژاپنی بنام یاگی با افزودن قسمتهایی به آنتن دوبلت تک خم آنرا کاملتر کرد و آنتن یاگی با مجموعه یاگی را که یکی از بهترین آنتنها برای باند VHF و UHF می باشد ساخت. این آنتن از یک آنتن دایپل خمیده، یک منعکس کننده یا رفلکتور و تعدادی هدایت کننده یا دایرکتور تشکیل یافته است. معمولاً دایرکتور در فاصله حدود $\lambda/10$ جلوی دایپل خمیده (دوبلت خمیده) قرار گرفته و طول آن معمولاً ۵٪ کوتاهتر از طول دوبلت می باشد. در شکل (۳-۲۰) یک آنتن یاگی با منعکس کننده دیده می شود.



طول اجزاء آنتن یاگی و فواصل آنها از یکدیگر از روی روابط زیر به دست می آید.

شکل (۳-۲۱)

$$\text{طول اولین دایرکتور به متر} = \frac{137/15}{f_{\text{MHZ}}}$$

$$\text{طول دوبلت به متر} = \frac{142/65}{f_{\text{MHZ}}}$$

$$\text{طول رفلکتور به متر} = \frac{151/55}{f_{\text{MHZ}}}$$

طول بقیه هدایت کننده‌ها به میزان ۲/۵٪ به تدریج کم می‌شود.



$$\text{فاصله بین رفلکتور و دوبلت به متر} = \frac{75}{f_{\text{MHZ}}} = .25 \lambda$$

$$\text{فاصله بین دایرکتورها به متر} = \frac{39}{f_{\text{MHZ}}} = .13 \lambda$$

هر چه تعداد دایرکتورها بیشتر شود، شکل تشعشع آنتن را تیزتر (جهت دارتر) می‌کند. ولی از حدود ۹ الی ۱۰ عدد دایرکتور، افزایش تعداد دایرکتورها تقریباً بی‌اثر است. در شکل (۳-۲۱) یک آنتن یاگی در باند UHF دیده می‌شود. این آنتن شامل ۱۶ عدد دایرکتور یک عدد دوبلت خمیده و یک رفلکتور چهار عنصری می‌باشد. برای زیاد کردن بهره این نوع آنتن، می‌توان دو یا چند عدد از آنها را به یکدیگر متصل ساخت [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۴-۵ آنتن عمودی مارکنی (آنتن متحرک ویپ WHIP)

یکی از انواع آنتن‌های عمودی، آنتن $\frac{\lambda}{4}$ است که انتهای آن به زمین متصل می‌شود (آنتن یک قطبی) و به آنتن مارکنی معروف است. جزء اصلی آنتن، متحرک آنتن $\frac{\lambda}{4}$ مارکنی می‌باشد که در صورت نصب بطور عمودی، به عنوان آنتن میله‌ای WHIP ربع موج نامیده می‌شود. این آنتن، بر روی سقف خودروها و موتورسیکلت‌ها نصب می‌شود. ساده ترین فرم یک آنتن $\frac{\lambda}{4}$ ، به صورت یک سیم عمودی است که هادی داخلی یک خط انتقال هم محور (کابل کواکسیال) به انتهای پایین آن وصل شده باشد. پوشش بیرونی کابل هم محور نیز مطابق شکل (۳-۲۲) به زمین وصل می‌گردد (سقف خودرو برای آنتن به منزله زمین محسوب می‌شود).

روابط میان یک آنتن داپیل :

$$I_{\text{mono}} = I_{\text{dipol}}$$

$$R_r = \frac{1}{2} R_{r \text{ dipol}} \quad V_{\text{mono}} = \frac{1}{2} V_{\text{dipol}} \quad \text{مقاومت تشعشعی}$$

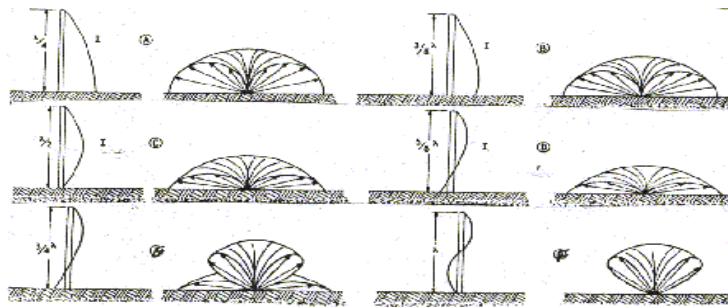
$$D_{\text{mono}} = \frac{1}{2} D_{\text{dipol}} \quad P_{\text{mono}} = \frac{1}{2} P_{\text{dipol}} \quad \text{سمت گرایی}$$

فرمول (۳-۱۴)



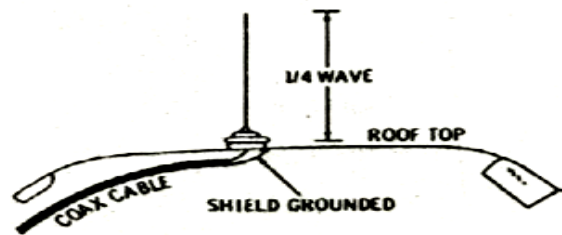
شکل (۳-۲۳)

در شکل (۳-۲۱) گلبرگ تشعشع آنتن مارکنی با طول $\frac{\lambda}{4}$ و آنتنهای دیگر با طولهای $\frac{\lambda}{8}$ و $\frac{3}{8}\lambda$ و $\frac{\lambda}{2}$ و $\frac{5}{8}\lambda$ و $\frac{3}{4}\lambda$ و λ که بطور عمودی روی زمین (خودرو) نصب می‌شوند مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۲۴) نمونه گلبرگ تشعشع آنتن‌های عمودی با طول‌های مختلف

آنتن میله‌ای $\frac{\lambda}{4}$ را به طریق مختلف می‌توان بر روی خودرو نصب نمود. مناسب‌ترین عمل برای نصب آنتن، وسط سقف خودرو می‌باشد. قسمت میله آنتن از سقف خودرو، ایزوله می‌شود و کابل هم محور به داخل خودرو امتداد می‌یابد.



شکل (۳-۲۴)

این طریقه نصب برای آنتن‌های میله‌ای در فرکانس ۱۵۰ مگاهرتز ($\frac{\lambda}{4} = 50 \text{ cm}$) و بالاتر مناسب است، زیرا در فرکانس‌های پایین‌تر، طول آنتن زیاد می‌شود. برای فرکانس‌های پایین‌تر، مثلاً در باند HF که آنتن $\frac{\lambda}{4}$ بین ۲/۵ تا ۲۵ متر طول دارد، نیز می‌توان از آنتن WHIP به طول کمتر استفاده کرد، مشروط بر این‌که بین فرستنده و آنتن عمل تطبیق انجام شود. عمل تطبیق بین گیرنده و آنتن WHIP، کوتاه‌تر از $\frac{\lambda}{4}$ نیز باید انجام گیرد. در بالای باند HF، معمولاً آنتن WHIP به عنوان $\frac{\lambda}{4}$ به کار برده می‌شود، ولی به خاطر طویل بودن آنتن، در نقطه پایین‌تری از خودرو (مثلاً روی سپر یا گلگیر) بایست‌های مخصوص نصب می‌شود. یکی از مشکلاتی که در مخابرات متحرک MOBILE در باند HF به آن برمی‌خوریم، ایجاد صفحه زمین مناسب به منظور برقراری ارتباط خوب می‌باشد. مثلاً در خودروهایی که آنتن آنها روی سپر نصب شده، تشعشع ضعیف است. برای کوتاه نمودن طول آنتن، بطوری‌که بتوان آنها را بر روی سقف خودرو یا جای مناسب دیگری قرار داده از سیم‌پیچ پوپن یا سیم‌پیچ پیوسته استفاده می‌شود تا طول آنتن کوتاه‌تر شود. در آنتن‌های WHIP، سیم‌پیچ معمولاً به صورت یک فنر محکم در انتهای آنتن وصل شده است که از نظر مقاومت الکتریکی نیز به آنتن کمک می‌کند. نمونه این نوع را در شکل (۳-۲۵) مشاهده می‌کنید [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].



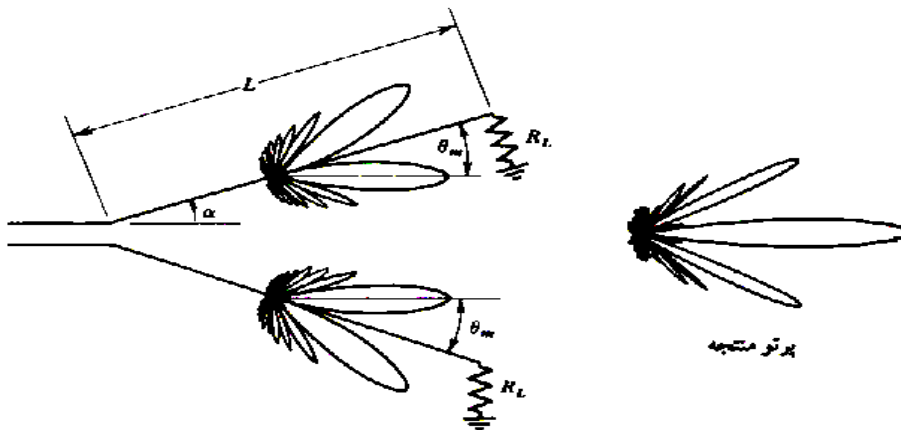
شکل (۳-۲۵) نمونه آنتن‌های عمودی

۳-۴-۴-۶ آنتن‌های سیم بلند (موج متحرک)

این نوع آنتن از یک سیم طویل که طول آن معمولاً بیشتر از نصف طول موج و گاهی بلندتر از یک طول موج می‌باشد، ساخته می‌شود. آنتن فوق معمولاً در باندهای VLF و HF به کار می‌رود. در این نوع آنتن، جریان در قسمتهای نیم موج مجاور در دو جهت مخالف عبور می‌کند. بهره این آنتن برای فرکانسی که محاسبه شده و هارمونیکهای آن خوب است، می‌باشد. به همین علت به آن آنتن‌های هارمونیکی نیز گفته می‌شود و اگرچندین آنتن سیم بلند به هم وصل شوند، تشعشع آنها بستگی به این که چگونه به هم متصل شوند به فرمهایی باهم ترکیب می‌شوند که حداکثر تشعشع در یک جهت خاص خواهد بود. دو نمونه از این نوع، آنتن Vee و آنتن رومبیک می‌باشند که درباره هر یک بحث خواهد شد.

الف- آنتن V

این نوع آنتن از دو آنتن سیم بلند افقی به شکل V ساخته شده است. طول هر قسمت آن مضربی از $\frac{\lambda}{2}$ است. نصب و ساختمان آن ساده و به خاطر خاصیت توجیهی زیاد آن، در مخابرات نظامی نقش مهمی را بازی می‌کند. و دارای بهره خوبی حدود ۱۰ db برای فرکانسهایی که نسبت آنها $\frac{1}{3}$ باشد، مانند ((۵ و ۱۵)) و ((۴ و ۱۲)) می‌باشد. در باند HF و کمتر از آن مثل VLF کار برد دارد. به خاطر پهنای باند زیادی که دارد می‌تواند برای هر دو باند VHF و UHF استفاده شود. و اگر به عنوان آنتن تلویزیون (آنتنهای سرخود) به کار رود، معمولاً طول هر قسمت آن بین (۵۰ تا ۶۰) اینچ می‌باشد و زاویه بین هر دو قسمت آن ۵۰ درجه است.



با جهت انتشار آن V شکل (۲۶-۳) نمونه يك آنتن

اگر $2\alpha = \theta_m$ باشد حداکثر تشعشع و گلبزرگ اصلی در صفحه شامل نیمساز زاویه 2α و عمود بر صفحه V می‌باشد. مشخصات آنتن V عبارت است از:

۱- رنج فرکانس ۳ تا ۳۰ مگاهرتز.

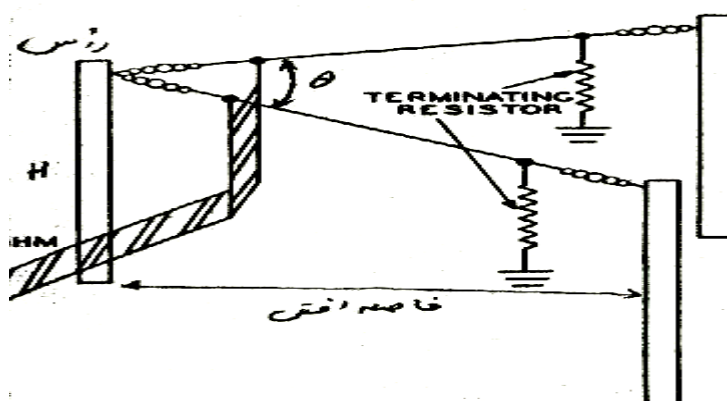
۲- حداکثر تشعشع آن در صفحه شامل نیمساز دو شاخه آنتن، که عمود بر صفحه V می‌باشد.

۳- امپدانس تقریبی آنتن، ۷۰۰ اهم. ۴- طراحی و نصب ساده. ۵- توجیهی بودن آن.

۶- بهره خوب (اگر طول هر قسمت آن زیاد شود گین آن زیاد می‌شود).

این آنتن از رأس به وسیله خط انتقال ۶۰۰ اهمی که به هریک از پایه‌های آن وصل می‌شود، تغذیه می‌گردد. جریانهای اعمال شده به دوسیم آنتن در دو جهت مخالف هستند. به طوری که پرتوهای تشعشعی دوسیم به طریقی با یکدیگر ترکیب می‌شوند که حداکثر تشعشع در جهت نیمساز زاویه بین دوسیم قرار می‌گیرد.

اگر یک مقاومت حدود ۳۵۰ اهم غیر اندوکتیو به انتهای هر قسمت سیم اتصال دهیم و به زمین وصل کنیم، در این حالت حداکثر تشعشع و یا دریافت امواج در جهت مقاومت‌های بار انتهایی خواهد بود. آنتن V چون در پهنای باند زیادی عمل می‌کند می‌تواند در باند VHF و UHF جایی که سیگنال به طور جهتی ارسال یا دریافت می‌شود (مثلاً تلویزیون) مورد استفاده قرار گیرد. به شکل ۳۰ توجه فرمایید.

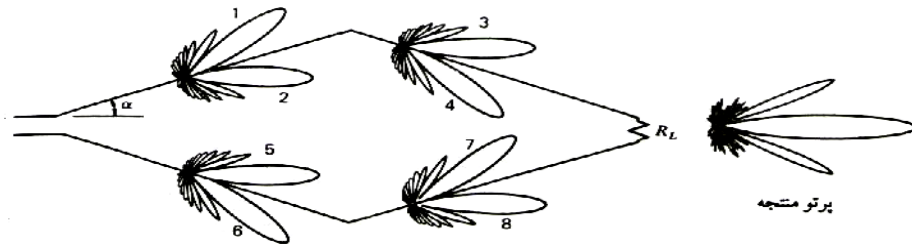


بـ با بار انتهایی V شکل (۲۷-۳) نصب یک نمونه آنتن

برای نصب آنتن‌های V از جداولی که مشخصات نصب آنتن از قبیل رنج فرکانس کار، طول هر قسمت آنتن، فاصله افقی پایه رأس تا انتهای هر ساق، ارتفاع آنتن، زاویه بین دو ساق (θ) و فاصله ارسال و دریافت سیگنال به نقطه‌ای که قرار است با آن تماس حاصل شود استفاده می‌کنند.

ب- آنتن رومبیک (لوزی شکل)

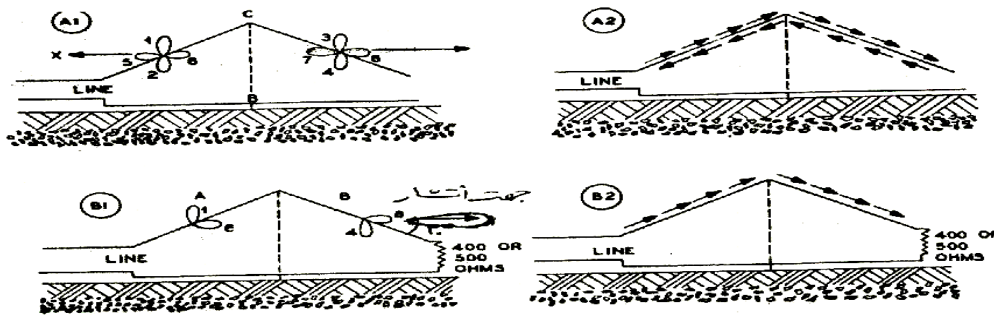
آنتنی است از نوع آنتن‌های سیم بلند که معمولاً برای ارتباطی با بهره و سمت‌گرایی بسیار عالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. و این به خاطر خصوصیتی است که آنتن رومبیک دارد. طرح و ساختمان آن ساده بوده، دارای پهنای باند و قدرت انتشار زیادی است. رنج فرکانس کاری آن ۲ تا ۳۰ مگاهرتز، انتشار آن در جهت قطر طویل لوزی یعنی مقاومت بار انتهایی آن است. امپدانس آن تقریباً ۸۰۰ اهم بوده و یک مقاومت حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ اهم غیر اندوکتیو ۱۰ وات به انتهای آن متصل می‌شود به طوری که حداکثر انتشار از روی این مقاومت تشعشع می‌کند. طول هر قسمت آن معمولاً از $\frac{\lambda}{2}$ بیشتر است. (در بعضی مواقع تا چندین برابر طول موج) که بر اساس جدولی برای فرکانس‌های مختلف و موقعیت‌های متفاوت محاسبه می‌شود. هرچه طول آنتن زیاد شود، گلبزرگ تشعشع آن تیزتر شده در نتیجه بهره آنتن بیشتر خواهد شد. زاویه 2α نیز برای طولهای مختلف متفاوت خواهد بود. برای مثال طول نمونه اضلاع ۲ تا ۷ طول موج و زاویه نمونه 2α از ۳۵ درجه تا ۱۶۰ درجه می‌باشد. این آنتن روی زمین به ارتفاع حدود یک تا دو طول موج قرار می‌گیرد. اگر مقاومت انتهایی آنتن وجود نداشته باشد تشعشع آن به شکل حرف لاتین B خواهد بود. آنتن رومبیک در باند UHF روی بیشترین و کمترین فرکانس که نسبت $\frac{2}{1}$ را دارند بهره خوبی دارد. شکل (۲۸-۳) آنتن رومبیک را مشاهده کنید.



شکل (۳-۲۸)

شکل (۳-۲۸) نمونه یک آنتن رومبیک با گلبه‌های تشعشع در هر قسمت آن و جهت انتشار.

نوعی دیگر از آنتن رومبیک آنتن نیم رومبیک است که حد اکثر تشعشع آن در جهت مقاومت انتهایی یا پلاریزاسیون عمودی است. در رنج فرکانس ۳۰ تا ۷۰ مگاهرتز به کار می‌رود و عرض باند انتشار آن، تقریباً ۲۵ درجه در جهت مقاومت انتهایی است. وقتی مقاومت به زمین وصل می‌شود، جریان انعکاس نداریم، لذا در هر قسمت آنتن، گلبه‌های تشعشع در یک جهت بوده و گلبه‌ها هر دو قسمت طوری باهم ترکیب می‌شوند که انتشار در جهت مقاومت خواهد بود. شکل (۳-۲۹) را مشاهده کنید.

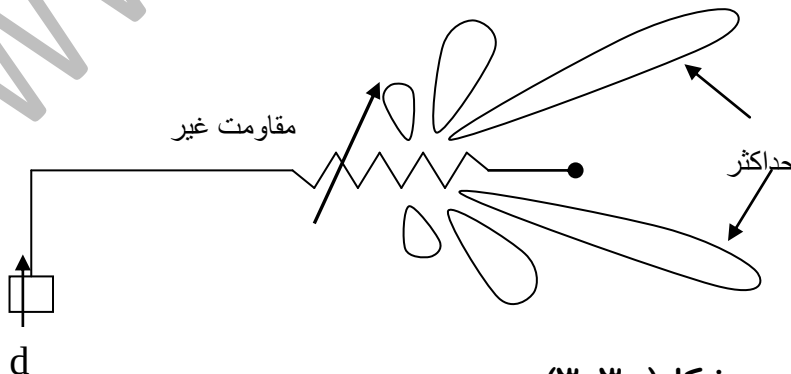


شکل (۳-۲۹)

شکل (۳-۲۹- A) نمونه آنتن نیم رومبیک بدون بار انتهایی و شکل (۳-۲۹- B) نمونه یک آنتن نیم رومبیک با بار انتهایی

۳-۴-۴-۷ آنتن با بار انتهایی

چنانچه یک بار مقاومتی به یک بار انتهای آنتن سیم بلند افزوده شود، آنتن مزبور از لحاظ تشعشع یک جهته می‌گردد. بدین ترتیب که حداکثر تشعشع و دریافت امواج در جهت مقاومت بار انتهایی خواهد بود. همانطور که قبلاً اشاره کردیم، طول سیم بلند معمولاً از $\frac{\lambda}{2}$ بیشتر است. طول این آنتن نیز از $\frac{\lambda}{2}$ بیشتر و در ارتفاع ۳ تا ۳۰ فوتی زمین نصب می‌گردد.



شکل (۳-۳۰)

$d \ll \lambda$

این آنتن برای دریافت امواج زمینی با پلاریزاسیون عمودی و همچنین موج آسمانی با زاویه کم مورد استفاده قرار می گیرد. آنتن فوق دارای خاصیت جهتی و همچنین بهره بسیار عالی روی رنج فرکانسی که نسبت آن $\frac{1}{4}$ باشد است. مشخصات آن عبارت است از:

۱- رنج فرکانس ۳۰ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز،

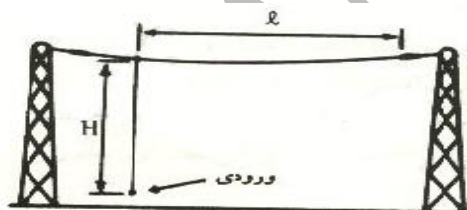
۲- طول آنتن در بیشترین فرکانس به اندازه ۲λ است،

۳- امپدانس آن ۲۰۰ تا ۳۰۰ اهم و بستگی به نوع نصب و تعداد سیمها و هدایت زمین و ارتفاع آنتن دارد.

برای رسیدن به دریافت خوب یک مقاومت متغیر غیر اندوکتیو قابل تنظیم در انتهای آنتن قرار می دهند و آن را برای دریافت بهترین نسبت سیگنال به نویز تنظیم می کنند. پس این مقاومت متغیر را با یک مقاومت جایگزین (بعد از تنظیم و دریافت خوب) که $\frac{1}{2}$ وات واترپروف کاور دار که مقدار مقاومت آن ثابت باشد عوض می کنند [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۸-۴-۳ آنتن L معکوس

آنتن تک سیم L معکوس آنتنی است با سیم بلند که برای کنترل و ارتباطات برج فرودگاهها به کار می رود. طرح و کاربرد آن در فرکانس متوسط، بدون این که احتیاج به دکل های بلندی داشته باشد، دارای راندمان خوبی است. تشعشع آنتن فوق بیشتر به روش زمینی است. در شکل (۳-۳۱) نصب یک آنتن L معکوس را مشاهده می کنید.



آنتن ال معکوس

مشخصات این آنتن عبارت است از:

۱- رنج فرکانس کار ۳۰۰ کیلوهرتز تا ۳ مگاهرتز، ۲- جهت انتشار همه جهته است، ۳- طول آن معمولاً کمتر از $\frac{1}{4}$ است،

۴- ارتفاع آن در ۶۰ تا ۹۰ فوتی نصب می گردد، ۵- نصب آن در محوطه باز صورت می گیرد. [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

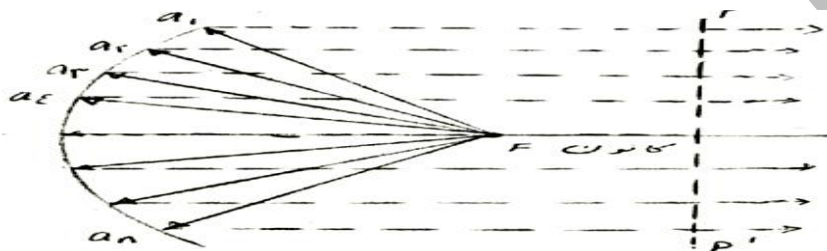
۹-۴-۳ آنتنهای میکروویو

امواج با فرکانس بالا (از یک گیگا هرتز به بالا) پس از برخورد به مانع متفرق شده و به همه جهات پخش می شود از این خاصیت تفرق، برای ارسال امواج میکروویو به نقاط دوردست استفاده می گردد. برای این کار لازم است فرستنده بسیار قوی باشد تا امواج پس از برخورد به مانع (منعکس کننده که مانند فرستنده ثانوی عمل می کند) و پراکندگی، قدرت کافی برای رسیدن به نقاط دورتر را داشته باشند. آنتنهایی که دارای منعکس کننده هستند، و به این صورت عمل می کنند، به نام آنتنهای میکروویو معروفند که برای توسعه و افزایش شدت میدان الکتریکی از مجموعه آنتنها استفاده می شود. به این منظور منعکس کننده های مختلفی از جمله: ۱- منعکس کننده سهمی، ۲- منعکس کننده با صفحه بزرگ، ۳- منعکس کننده

میله‌ای، ۴- منعکس کننده گوشه‌ای، ۵- منعکس کننده بیضوی، ۶- منعکس کننده هذلولی و انواع متنوع دیگر را به کار می‌برند. آنتنهای میکروویو را به نام منعکس کننده آنها نامگذاری می‌کنند [۱، ۳].

۳-۵ آنتن سهمی

آنتنهای که در طول موجهای میکروویو کار می‌کنند، به دودلیل هندسی (که در فیزیک نور خوانده ایم) از منعکس کننده‌های سهمی استفاده می‌شود: ۱- پرتوهای میکروویو که از نقطه کانون سهمی به منعکس کننده بتابد، پس از انعکاس به صورت موازی و هم فاز در فضا منتشر می‌شود، ۲- مجموع فاصله‌ای که هر پرتو از کانون به سطح سهمی و از سطح سهمی به صفحه مأخذ PP' طی می‌کند، مقداری است ثابت. همچنین امواج منتشر شده از کانون پس از انعکاس از سطح منعکس کننده موازی و هم فاز در فضا منتشر می‌گردند، همچنین اگر امواج به صورت دسته‌های موازی به سطح سهمی تابیده شود، همه پرتوهای اشعه به نقطه کانون سهمی می‌رسند.



شکل (۳-۳۲)

گین اینگونه آنتن‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Gain = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_e \quad \text{فرمول (۳-۱۵)} \quad A_e = \text{سطح موثر آنتن}$$

$$\lambda = \text{طول موج بر حسب متر} \quad f = \text{فرکانس آنتن} \quad C = \text{سرعت نور}$$

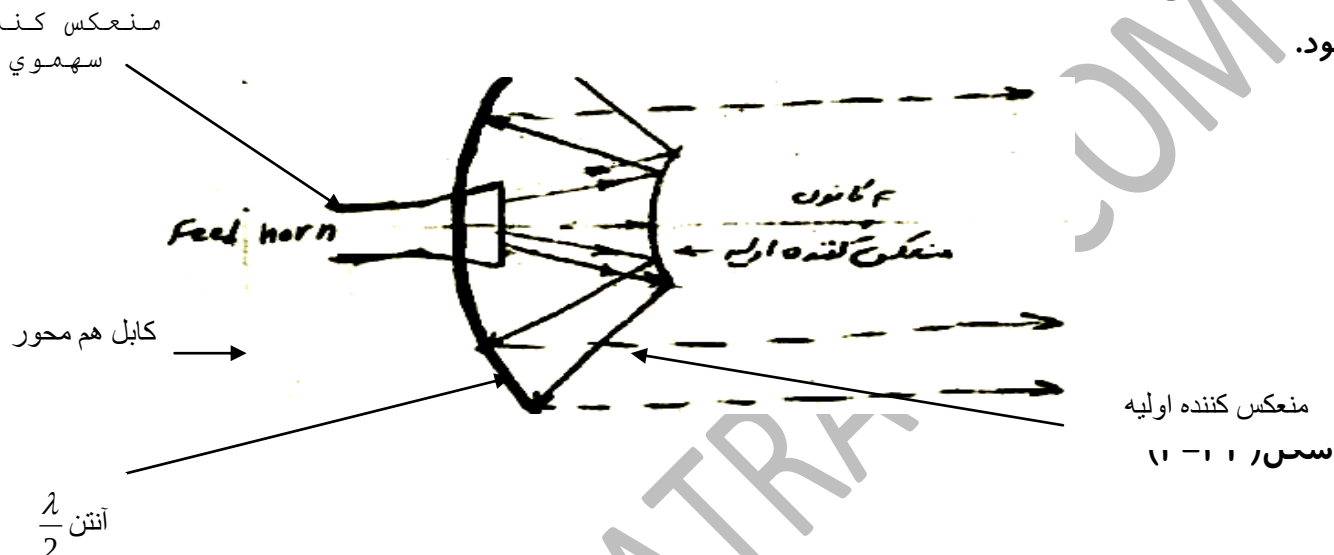
منبع اولیه انتشار که یک دایپل یا موجبر شیپوری است، در نقطه F انرژی فرستنده را از طریق کابل هم محور (کواکسیال) یا موجبر که از سوراخی در مرکز سهمی گذشته، دریافت و به سطح منعکس کننده می‌تاباند، قرار گرفتن منبع اولیه در راستای انتشار سهمی در شکل اشعه اختلااتی ایجاد می‌کند. برای رفع مشکل فوق، موجبر شیپوری (تغذیه کننده) را در کانون سهمی در نظر گرفته. ولی منعکس کننده سهمی را قسمتی از سهمی در نظر می‌گیرند که اشعه‌های منعکس شده از آن قسمت به تغذیه کننده برخورد نمی‌کند که در شکل (۳-۳۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳۳)

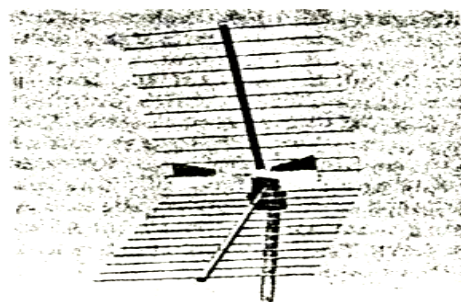
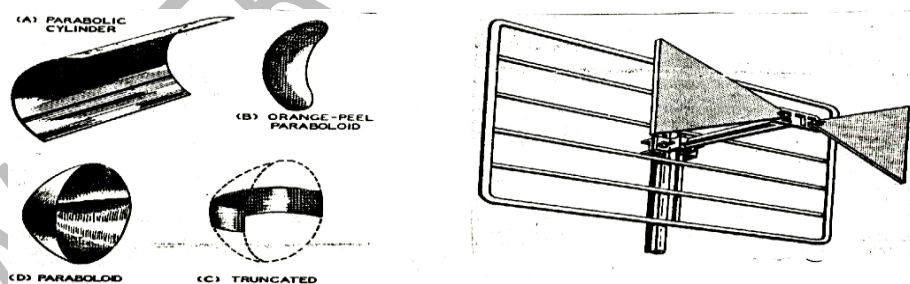
آنتنهای سهمی را با منبع‌های مختلفی می‌توان تغذیه کرد:

منبع شیپوری، موجبری است که به ابعاد مورد نیاز به شکل شیپور درآمده که دهانه آن بتدریج برای تطبیق امپدانس موجبر با فضای آزاد باز شده است شکل (۳-۳۴) و در حقیقت وظیفه دهانه شیپوری شکل، آن است که یک جبهه فازی یکنواخت با دهانه‌ای بزرگتر از خود موجبر، و در نتیجه سمت گرایی بیشتری به وجود آید و انرژی را به سطح منعکس کننده اولیه که فاصله آن تا سطح سهمی و همچنین ابعاد آن طوری محاسبه می‌شود که انرژی را در تمام سطح سهمی پخش نمی‌نماید ممکن است اشعه بطور مستقیم به منعکس کننده بتابد و نیازی به منعکس کننده اولیه نداشته باشیم، مانند شکل (۳-۳۳). منبع شیپوری خود به تنهایی به عنوان یک آنتن به کار می‌رود که اصطلاحاً آنتن شیپوری (آنتن بوقه) گفته می‌شود.



برای تغذیه آنتن سهمی ممکن است به جای منبع شیپوری، از یک کابل کواکسیال و آنتن رایپل (طول $\frac{\lambda}{2}$) استفاده گردد. شکل (۳-۳۵) را مشاهده کنید.

در آنتنهای میکروویو انعکاس دهنده‌های امواج بسیار متنوع بوده و به همین خاطر، آنتنهای فوق به شکلهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. شکل (۳-۳۶) را مشاهده کنید [۱۳].



شکل (۳-۳۶)

فصل چهارم

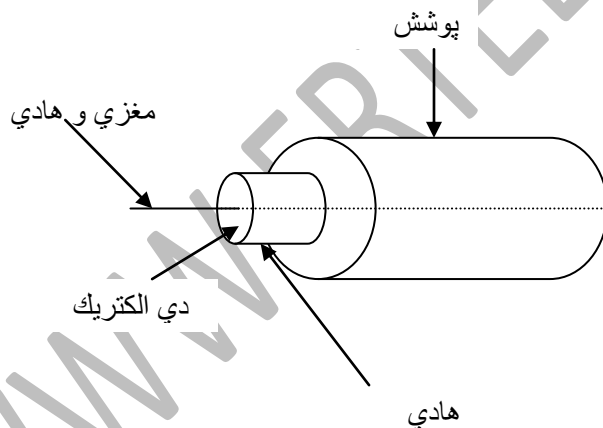
مبانی خطوط انتقال

۴-۱ خطوط انتقال و موجبرها (تغذیه کننده‌ها)

در سیستم‌های مخابراتی اغلب لازم است، نقاطی را که از یکدیگر دور هستند و می‌خواهیم سیگنال، از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل کنیم، به یکدیگر متصل سازیم، مثلاً بین فرستنده و آنتن آن. اگر فرکانس به قدر کافی زیاد باشد، این فاصله ممکن است چندین برابر طول موج باشد. بنابراین چون این خطوط مانند سیم‌های معمولی عمل نمی‌کنند، ضروری است که مشخصه‌های آنها را بررسی نمائیم. همچنین، می‌توان دید که فاصله بین نقاط و مشخصه سیستم نیز، تأثیری در عملکرد خطوط انتقال خواهند داشت. خطوط انتقال را از نقطه نظر عملی بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم. در اینجا فرض می‌شود که روش کلاسیک تئوری مدار لازم نبود، در نتیجه با روش عملی، مسائل خطوط انتقال را حل می‌کنیم. چنانکه گفته شد، خطوط انتقال برای حمل انرژی یا سیگنال از نقطه‌ای به نقطه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. توسط یک چنین تعریف جامعی، هر سیم می‌تواند عمل یک یا چند خط انتقال را ارائه دهد. در این موقع، باید مشخصه‌های چنین خطی را در نظر گرفت [۹].

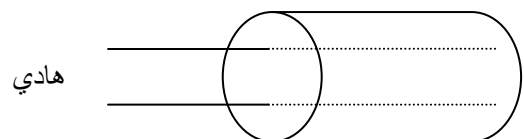
۴-۲ اصول کلی خط انتقال

دو نوع خط انتقال با مصرف عمومی در دسترس هستند، خط دو سیمه (متعادل) که در شکل (۱-۴) و خط انتقال هم محور (غیر متعادل) را در شکل (۲-۴) مشاهده می‌کنید.



شکل (۲-۴)

خط انتقال هم محور (غیر متعادل)



شکل (۱-۴)

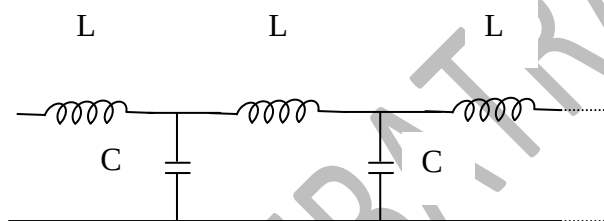
خط انتقال دو سیمه (متعادل)

خط انتقال دو سیمه در مواقعی که مشخصه‌های متعادل مورد نیاز است، به کار برده می‌شود. مثلاً در اتصال به یک آنتن دوبلت خمیده و یا آنتن رومبیک که متعادل هستند به کار می‌رود. خط انتقال هم محور در حالات نامتعادل مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً در اتصال یک فرستنده با آنتن دارای ارت (یعنی یک قطب آن به زمین متصل باشد). همچنین این خطوط را در فرکانسهای مایکروویو و UHF برای جلوگیری از احتمال تشعشع امواج به خارج به کار می‌برند. هر سیستمی

که از چند هادی تشکیل شده باشد، در صورتی که فواصل بین هادی‌ها به نصف طول موج فرکانس عمل برسد، شروع به تشعشع می‌نماید. این عمل بیشتر در یک خط دوسیمه اتفاق می‌افتد. چون در خط هم محور هادی خارجی بر هادی دافعی احاطه کرده و بازمین بودن هادی خارجی، تشعشعی به وجود نخواهد آمد. به همین دلیل خطوط دوسیمه را در میکروویو به کار نمی‌برند در حالی که از خط محور، تا فرکانس ۱۸ GHz نیز بهره گیری می‌نمایند. بطوری که بعداً مطالعه خواهیم نمود، موجبرها نیز دارای محدودیت فرکانس می‌باشند. به این ترتیب، موجبری که در فرکانس‌های پایین تر از 1GHz به کار برده می‌شود، دارای ابعاد بزرگی شده و در نتیجه موجبرها و خطوط انتقال هم محور را بین فرکانسهای ۱ تا ۱۸ گیگاهرتز مورد استفاده قرار می‌دهند. بنابراین پایین تر از ۱ GHz معمولاً از موجبر استفاده نشده و همچنین بالاتر از ۱۸ GHz خطوط انتقال (کابل هم محور) را به کار نمی‌برند بلکه حتماً باید از موجبرها استفاده نمود [۹].

۴-۳ مدار معادل خطوط انتقال

هر خط انتقال دارای طول و قطر مربوط به خودش است، و بنابراین مقاومت و سلف در جهت طولی و همچنین خازن هدایتی (سبب نشی دردی الکتریک) در جهت عرض (فاصله بین دوهادی) خواهد داشت. بنابراین، مدار معادل یک چنین خطی، وقتی که فرض کنیم در فرکانسهای رادیویی کار می‌کنیم به صورت شکل (۳-۴) خواهد بود.



شکل (۳-۴) مدار معادل خطوط انتقال

کمیت‌های L و G بر حسب واحد طول بوده و نباید آنها را به صورت عناصر مدارات الکترونیکی که در الکتریسته خوانده ایم، در نظر گرفت. چون در طول خط، توزیع گشته‌اند [۹].

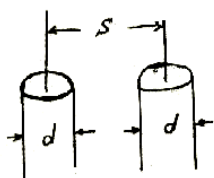
۴-۴ امپدانس مشخصه خط انتقال

هر مداری شامل امپدانسهای سری و موازی، باید یک امپدانس ورودی داشته باشد که در مورد خط انتقال، این امپدانس بستگی به طول و نوع خط، بار و شرایط انتهایی خط خواهد داشت. طبق تعریف، امپدانس مشخصه یک خط انتقال Z_0 عبارت است از امپدانس که در ورودی خط، در حالتی که خط دارای طول بی‌نهایت (زیاد) باشد، اندازه گیری می‌شود. امپدانس مشخصه یک خط انتقال، ممکن است مختلط شود که این امپدانس در نتیجه اندوکتانس (سلف) هادی و خازن بین آن دو می‌باشد. در حقیقت بیشتر اوقات، بخصوص در مخابرات، از مقاومت خط نظیر تلفن و هدایت خطوط انتقال می‌توان صرف نظر نمود. بنابراین Z_0 به صورت فرمول (۳) در خواهد آمد.

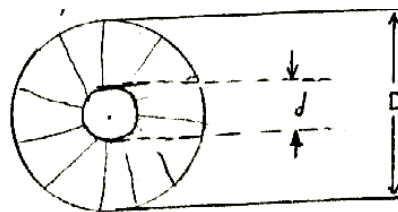
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{فرمول (۴-۱)} \quad \text{(بر حسب اهم)}$$

L بر حسب هانری بر متر و C بر حسب فاراد بر متر مشاهده می‌شود که امپدانس مشخصه یک خط انتقال در رنج فرکانسهای رادیویی، یک مقاومت خالص است.

امپدانس مشخصه دو نمونه از خطوط انتقال که بطور عمومی کاربرد دارند را، می‌توانیم بطور فیزیکی توسط اندازه و فاصله هادیهای خط انتقال از یکدیگر به دست آورد. البته ثابت دی الکتریک عایق بین هادیها نیز در این امپدانس مشخصه تأثیر خواهد داشت. با بهره گیری از تئوری میدانهای امواج، امپدانس مشخصه دونمونه خط انتقال که در شکل زیر نشان داده شده به صورت فرمولهای زیر محاسبه می‌شوند.



(۴-۵) خط انتقال دوسیمه



(۴-۴) خط انتقال کابل هم محور

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{E}} \log \frac{D}{d} \quad (\text{بر حسب اهم}) \quad \text{و} \quad Z_0 = 276 \log \frac{2s}{d} \quad (\text{بر حسب اهم})$$

در اینجا (E) ثابت دی الکتریک عایق بین دوهادی است، چون خط دوسیمه معمولاً در هوا کشیده می‌شود. از این لحاظ ثابت دی الکتریک (E) در اینجا با واحد یعنی ثابت دی الکتریک هوا در نظر گرفته شده است. اگر دو خط را در داخل دی الکتریک با ثابت (E) قرار دهیم (مثل خط انتقال دوسیمه که در بعضی تلویزیونهای قدیم استفاده می‌شد) در فرمول مربوط ۲۷۶ تبدیل به (۲۷۶ E) خواهد شد. امپدانس مشخصه خطوط متعادل دوسیمه در حدود ۱۵۰ تا ۶۰۰ اهم و خطوط هم محور ۴۰ تا ۶۰۰ اهم می‌باشد [۹].

۴-۵ تلفات در خطوط انتقال

به سه طریق انرژی سیگنال قبل از رسیدن به مقاومت بار (مثلاً آنتن) در خطوط انتقال تلف می‌گردد:

۴-۵-۱ اتلاف تشعشی

در موقعی که فاصله بین هادیها در حدود کسری از طول موج (حدود نصف طول موج) باشد، به وقوع می‌پیوندد. اتلاف تشعشی را به سختی می‌توان بر آورد نمود. این تلفات با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. بنابراین، در فرکانسهای بسیار زیاد عملاً خطوط انتقال غیر قابل استفاده خواهد شد.

۴-۵-۲ گرمایش هدایتی

این تلفات RI^2 است. که متناسب با مجذور شدت جریان خط می‌باشد. این تلفات با افزایش فرکانس سبب اثر پوستی (جریان در سطح خارجی هادی نیز به وجود می‌آید) شده و افزایش می‌یابد.

۴-۵-۳ گرمایش دی الکتریک

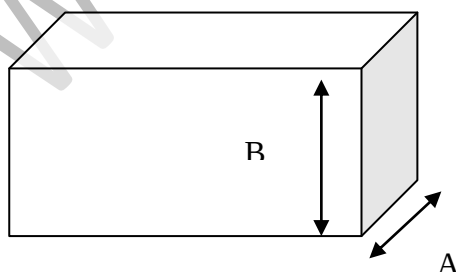
این تلفات متناسب با ولتاژ در دوسر دی الکتریک بوده و در نتیجه با افزایش ولتاژ دوسر دی الکتریک مقدار این تلفات افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس این تلفات افزایش پیدا می‌کند. دو تلفات هدایتی و گرمایشی دی الکتریک متناسب با طول خط است و معمولاً کارخانه‌های سازنده مجموع این دو تلفات را بر حسب دسیبل در متر عرضه می‌کنند.

۴-۵-۴ تطبیق امپدانس

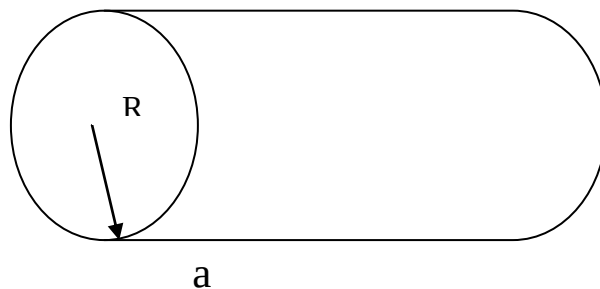
اگر خط انتقالی به امپدانس مشخصه خودش وصل شود، تمام فرکانسها که توسط مولد به یک طرف آن اعمال می‌گردد، توسط مقاومت بار در دو طرف دیگر جذب خواهد شد و بالعکس. بطور مثال، اگر یک فرستنده با خط انتقال ۳۰۰ اهم به یک آنتن با امپدانس ۳۰۰ اهم وصل شود، تمام سیگنال که توسط خط به آنتن می‌رسد، جذب آنتن شده و تشعشع می‌شود و برگشتی نخواهیم داشت به این عمل، عمل تطبیق امپدانس بین دوسیم گویند. اگر خط انتقال با طول محدودی به امپدانس که برابر امپدانس مشخصه‌اش باشد، ختم نشده باشد، مقداری از توان اعمال شده به خط، در امپدانس بار جذب شده و بقیه توان به طرف مولد منعکس می‌گردد و رفت و برگشت امواج در طول خط باعث ایجاد موجهای ولتاژ و جریان می‌شود که ترکیب آنها را موج ساکن می‌نامند. ناپیوستگی که ممکن است در اثر پیچیدن، لگد زدن، بریدن خم‌های تیز و غیره در خط انتقال به وجود آید، سبب برگشت سیگنال به منبع شده و در نتیجه مقداری از سیگنال حذف خواهد شد. بطور کلی یکی دیگر از مشخصه‌های خطوط انتقال، ضریب تضعیف آنهاست که در اثر انواع تلفات که قبلاً درباره آنها بحث شد به وجود می‌آید. ضریب تضعیف، اساساً به این صورت اندازه‌گیری می‌شود که با اعمال سیگنالی در اول خط، کاهش دامنه آنرا در آخر خط به دست می‌آورند که معمولاً بر حسب دسیبل بر متر در فرکانس مربوطه ارائه می‌گردد. حالت عدم تطبیق، ضریب تضعیف را افزایش می‌دهد. ضریب تضعیف تابعی از قطرهای‌ها و اتلاف در عایق است. برای کمترین تلفات، مقاومت هادی‌ها را با بزرگ کردن قطر آنها کم نموده و عایق‌ها را از هوا و یا از مواد پلی‌تین با افت کم اختیار می‌کنند. ضریب تضعیف خطوط انتقال متعادل (دوسیمه) با نزدیک بودن آنها به فلزات هادی افزایش می‌یابد. به همین دلیل، خط انتقال را نباید از نزدیک فلزات هادی عبور داد. رطوبت نیز تضعیف را زیاد می‌کند، البته با قراردادن پوشش (شیلد) در خطوط انتقال هم محور کم شده همچنین با افزایش قطر هادی داخلی در کابل هم محور از اتلاف آن می‌کاهند.

۴-۵-۵ موجبرها

قبلاً اشاره کردیم که برای انتقال سیگنال از یک سیستم به سیستم دیگر، از خط انتقال‌هایی نظیر خط انتقال دوسیمه و کابل هم محور استفاده می‌کنند که به معایب و محدودیت‌های آنها اشاره کردیم، کابل هم محور را تا حداکثر فرکانس ۱۸ GHZ می‌توان برای این منظور به کار برد، ولی از این فرکانس بیشتر، به دلیل محدودیت‌هایی که این خط انتقال دارد مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. تلفات آن به حدی زیاد شده که عملاً استفاده از آن مقدور نمی‌باشد. خط انتقال دوسیمه نیز با فرکانس بالای ۱۸ GHZ به خاطر تلفات و تشعشع بیش از حد، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.



موجبر مکعب مستطیل شکل



موجبر مدور

موجبرها برای فرکانسهای ویژه‌ای طراحی شده‌اند، چون ابعاد موجبر براساس $\frac{1}{4}$ طول موج ساخته و طراحی می‌شوند. بطوری که در یک موجبر مکعب مستطیل، ارتفاع موجبر $\frac{\lambda}{2}$ است ($B = \frac{\lambda}{2}$) بنابراین موجبر ساخته شده در فرکانس مشخصی مثل f_0 ، بهترین حالت انتقال را خواهد داشت. موجبر می‌تواند در فرکانسهای بالاتر عمل نماید، زیرا در این حالت، دیواره‌های موجبر بیشتر برای انتقال انرژی به کار می‌روند. پایین تر از فرکانسی که موجبر برای آن طراحی شده، موجبر کوچکتر از ابعاد مورد نظر خواهد بود (یعنی طول $\frac{\lambda}{2}$ از فرکانس مورد نظر خارج از ابعاد موجبر می‌افتد) بنابراین، فرض بر این است که موجبر دارای یک فرکانس حد به نام فرکانس قطع خواهد بود که پایین تر از آن نمی‌تواند بطور مؤثر انرژی مربوطه را انتقال دهد. برای موجبرهای مکعب مستطیل و موجبر مدور، فرکانس قطع را از روابط (۲) که به ابعاد موجبر ارتباط دارد، محاسبه می‌کنیم.

$$\text{Cut off } f = \frac{c}{2B}$$

فرکانس قطع موجبر مستطیل

$$\text{Cut off } f = \frac{c}{3.41R}$$

فرکانس قطع موجبر مدور

بطور مثال، اگر موجبر مستطیل شکلی را که ارتفاع آن $B = 0.5 \text{ cm}$ باشد در نظر بگیریم، می‌توانیم فرکانس قطع آنرا محاسبه کنیم.

$$\text{Cut off } = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 30 \text{ GHZ}$$

بنابراین، موجبر در فرکانسهای پایین تر از 30 GHZ نمی‌تواند بطور مؤثر انرژی مربوطه را انتقال دهد ولی فرکانسهای بالاتر از 30 GHZ را به خوبی انتقال می‌دهد. موجبرهای مستطیل شکل به خاطر آسان بودن نصب و نگهداری و همچنین تلفات کمتر، بیشتر از موجبرهای مدور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه B باید برابر یا بزرگتر از نصف طول موج ($B \geq \frac{\lambda}{2}$) باشد که در عمل برابر 0.7 طول موج خواهد بود ($B = 0.7 \lambda$). اندازه A در عمل برابر 0.2 یا 0.5 طول موج می‌باشد. ضرورتاً موجبرها همانند فیلترهای باند بالا بوده و برای همین منظور نیز از آنها استفاده می‌شود. (چون فیلترهای باند بالا فیلترهایی بودند که فرکانسهای پایین تر از حدی را از خود عبور نمی‌دادند و موجبر نیز همین حالت را دارد). عملکرد موجبرها در انتقال انرژی شباهت زیادی به انتشار امواج آسمانی دارد. موجبرها، امواج را از یک نقطه به نقطه دیگر در طول خط هدایت می‌نمایند. و به علت اثرات سطحی جریانه‌ها فقط در سطوح داخلی آنها بوده و به ندرت به داخل فلز موجبر نفوذ می‌کند این خود باعث می‌گردد که امواج الکترومغناطیسی به سطوح خارجی انتشار نیابند. شکل زیر انتشار امواج در یک موجبر را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴) انتشار امواج در یک موجبر

انرژی سیگنال توسط یک پروپ که داخل موجبر قرار گرفته است، تأمین می‌گردد. این پروپ به‌منزله یک آنتن، امواج را در تمام جهات انتشار می‌دهد. تمام امواج منتشره به طرق مختلف جمع و یا تفریق گردیده و نهایتاً امواج متحرک بعد از چندین انعکاس، از دیواره‌های موجبر به آنتهای آن می‌رسند. خطوط ممتد، مربوط به فرکانسهای بالا و خطوط خطچین، مربوط به فرکانسهای پایین می‌باشند. چنانچه فرکانس امواج را تا حد فرکانس قطع کاهش دهیم، امواج بالا و پایین گردیده و هیچ حرکتی به جلو نخواهند داشت [۹]

پیوست ۱

باند I تلویزیون

باند I انحصاراً به تلویزیون تخصیص داده شده و طبق جدول زیر شامل سه کانال تلویزیون است که پهنای باند هر کانال ۵,۵MHz می‌باشد. بهترین آنتن برای دریافت این امواج آنتن یاگی با عناصر کم می‌باشد.

تصویر	صدا	شماره کانال
53.75 MHz	48.25MHz	2
60.75 MHz	55.25 MHz	3
67.75 MHz	62.25 MHz	4

باند II تلویزیون

این باند نیز مخصوص امواج تلویزیونی می‌باشد و در ۶۲۵ خطی CCIR مطابق جدول زیر به ۸ کانال تقسیم می‌شود، باند I و II را می‌توان با پلاریزه افقی یا عمودی ارسال و دریافت نمود، بهترین در یافت این امواج به وسیله آنتن یاگی یا تعداد عناصر بیشتر می‌باشد. قابل ذکر این که شدت میدان در انتشار فرکانسهای بالاتر با همان توان، قری‌تر از شدت میدان در انتشار فرکانسهای پایین‌تر می‌باشد.

تصویر	صدا	شماره کانال
180.75 MHz	175.25MHz	5
187.75 MHz	182.25MHz	6
194.75 MHz	189.25MHz	7
201.75 MHz	196.25MHz	8
208.75 MHz	203.25MHz	9
215.75 MHz	210.25MHz	10
222.75 MHz	217.25MHz	11
229.75 MHz	224.25MHz	12

باندهای IV , V تلویزیون (U.H.F)

باند IV از فرکانس ۴۷۰ MHz تا ۵۲۸ MHz و از کانال ۲۱ تا ۳۴ با فاصله پهنای باند ۸ MHz برای هر کانال و باند V از ۶۱۴ MHz تا ۸۵۴ MHz از کانال ۳۹ تا ۶۹ با همان پهنای باند برای هر کانال تقسیم‌بندی گردیده‌اند. برای دریافت امواج U.H.F باید از یک آنتن باند عریض استفاده نمود. بیشتر آنتن‌های U.H.F براساس آنتن یاگی ساخته می‌شوند. که به حسب کوچکی آن، دارای مزایای بالایی نسبت به باندهای I و II می‌باشند.

فاصله بین آنتن‌ها

فاصله بین آنتن‌ها برای دریافت خوب باید حداقل برابر با طول موج پایین‌ترین کانال تلویزیون باشد، تا کمترین تأثیر منفی آنتن‌ها بر روی هم را داشته باشند.

نویز NOISE

حرکت اتفاقی الکترون‌ها در داخل وسایل فعال و هادی‌ها سبب خلق نویز شده و برای برطرف کردن این نویز که بصورت برفک و هیس صدا در تلویزیون می‌باشد، باید نسبت سیگنال اصلی به سیگنال فرعی (۱:۲۰۰) و یا ۴۶ dB تقویت شود نویز می‌تواند هم در آنتن و هم در تقویت کننده‌ها تولید شود.

انواع تداخل‌ها

بطور کلی چهار نوع تداخل وجود دارد که عبارتند از:

۱- تداخل هم کانالی

این نوع تداخل بیشتر در کانال‌های پایین به وقوع می‌پیوندد و به دلیل آن نفوذ فرکانس مشابه ایستگاه‌های قوی می‌باشد که از دوردست به آنتن تلویزیون می‌رسند.

۲- تداخل ضربه‌ای

در این نوع تداخل بر روی تصویر لکه‌های سفیدی همراه با صدای تق تق متناوب بوجود می‌آید، برای حداقل ساختن ضربه‌ای بهتر است محل آنتن را عوض کرده و برای انتقال انرژی از آنتن به گیرنده از سیم زره‌دار خوب استفاده نمود و نیز دستگاه‌های مولد جرقه الکتریکی را به سیستم جرقه گیر مجهز نمود.

۳- تداخل RF

در این نوع تداخل سیگنال ناخواسته با فرکانس مشابه از فرستنده‌های دیگر (مانند بیسیم ماشین‌های امدادی و یا فرستنده رادیو FM) وارد آنتن گیرنده می‌شود و همین امر موجب می‌شود تا در تصویر خطوط رگه‌دار و صدایی شبیه سوت در بلندگو ایجاد گردد، برای کم کردن تداخل RF باید سمت و یا محل آنتن گیرنده تغییر داد و ضمناً برای انتقال انرژی از آنتن به گیرنده از سیم‌های کواکسیال دوزرهی با حداقل مترای استفاده نمود.

۴- تداخل اتمسفری

برخی اثرات تداخل اتمسفری، نتیجه تخلیه الکتریکی ابرها می‌باشد که موجب شکستگی بر روی صدا و روشن شدن ناگهانی تصویر می‌گردد. در تداخل هم کانالی اتمسفری (در فصل بهار و تابستان) سیگنال فرستنده‌های دوردست به آنتن رسیده و موجب به هم ریختگی تصویر اصلی می‌شود.

۵- تصویر ثانوی و لرزش

این تداخل در اثر سیگنال انعکاسی به وجود آمده و تصویر ثانوی در زمینه تصویر اصلی در روی صفحه تلویزیون ظاهر می‌شود. این تصویر ثانوی شبیه به تصویر اصلی بوده ولی در جهت افقی کمی جابجایی دارد زیرا سیگنال تصویر ثانوی به وضوح تصویر اصلی نیست، ممکن است تصویر ثانوی به صورت منفی ظاهر شود، که در این صورت فاز سیگنال منعکس (برعکس) می‌باشد، این تصویر گاهی تداخل چند مسیر نیز نامیده می‌شود.

در محل هایی که هواپیما نزدیک سطح زمین حرکت می کنند، در گیرنده ها لرزش تصویر یا افتادگی یا محو کامل تصویر به وقوع می پیوندد که بهترین راه برای تقلیل این تداخل پایین آوردن سر آنتن به طرف پایین می باشد و اگر لرزش تصویر از عبور و مرور وسایل نقلیه باشد در این صورت باید سر آنتن را مقداری به طرف بالا تغییر جهت داد.

باند های مورد استفاده در ارتباطات رادیویی، خصوصیات و کاربرد آنها

نوگنس	3KHz	30KHz	300KHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	10GHz	30GHz	300GHz
طول موج	100km	10km	1000m	100m	10m	1m	10cm	3cm	1cm	1mm
نام باند نوگنس	امواج میرامریک VLF Very Low Fr.	امواج کیلومتریك LF Low Fr.	امواج مکتومتریك MF Medium Fr.	امواج کانتریك HF High Fr.	امواج تریك VHF Very High Fr.	امواج دسی تریك UHF Ultra High Fr.	امواج سانتی تریك SHF Super High Fr.	امواج میلی تریك EHF Extremely High Fr.		
نوع انتشار	امواج زمینی	امواج زمینی	امواج زمینی	امواج زمینی	امواج زمینی	امواج مستقیم	امواج مستقیم	امواج مستقیم	امواج مستقیم	امواج مستقیم
پولاریزاسیون	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی و افقی	افقی و عمودی	افقی و عمودی	افقی و عمودی	افقی و عمودی	افقی و عمودی
برد	خیلی زیاد (بالاخص روی دریا)	زیاد (چندمزار کیلومتر)	روز متوسط	چند صد کیلومتر (شبه زیاد از طریق امواج آسمانی)	مستقیم و زمینی (تا ۱۰۰ کیلومتر) آسمانی (بسیار زیاد)	مستقیم (تا ۵۰ کیلومتر) آسمانی (زیاد)	مستقیم (مسافت بیشتر باران) از طریق تریو سفر	مستقیم (مسافت بیشتر باران) از طریق ماهواره	مستقیم (مسافت بیشتر باران)	مستقیم (مسافت بیشتر باران)
قابلیت اطمینان	خوب	خوب	روز خوب	ضعیف	ضعیف	مستقیم خوب	مستقیم خوب	مستقیم خوب	مستقیم خوب	مستقیم خوب
کاربرد	مخابرات استاندارد و تلگراف	هدایت هوایی	پخش رادیویی درون شهری	پخش رادیویی درون شهری	پخش رادیویی بین المللی	ارتباط بین رسیال و تلیه زمینی	لیک های مایکرو زمینی	لیک های مایکرو زمینی	لیک های مایکرو زمینی	لیک های مایکرو زمینی
امروز	گشتیانی	پخش رادیویی بین المللی	پخش رادیویی درون شهری	پخش رادیویی درون شهری	پخش رادیویی بین المللی	پخش رادیو FM معمولی	پخش رادیو FM معمولی	پخش رادیو FM معمولی	پخش رادیو FM معمولی	پخش رادیو FM معمولی
مزایا	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار
معایب	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار
ملاحظات	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار	دور بردی و سوار
کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند	کمی پهنای باند

1. myrametric

جدول مقادیر برخی ثابت ها و کمیت های جهانی

مفهوم	نماد	پیشوند	ارزش عددی
(یک کوانتوم)	E	(اکسا)	$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$
(یک کوادریون)	P	(پتا)	$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$
(یک تریون)	T	(ترا)	$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$
(یک بیلیون)	G	(گیگا)	$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$
(یک میلیون)	M	(مگا)	$1\ 000\ 000 = 10^6$
(یک هزار)	k	(کیلو)	$1\ 000 = 10^3$
(یک صد)	h	(هکتو)	$100 = 10^2$
(ده)	da	(دکا)	$10 = 10$
(یک دهم)	d	(دسی)	$0.1 = 10^{-1}$
(یک صدم)	c	(سانتی)	$0.01 = 10^{-2}$
(یک هزارم)	m	(میلی)	$0.001 = 10^{-3}$
(یک میلیونیم)	μ	(میکرو)	$0.000\ 001 = 10^{-6}$
(یک بیلیونیم)	n	(نانو)	$0.000\ 000\ 001 = 10^{-9}$
(یک تریونیم)	p	(پیکو)	$0.000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$
(یک کوادریونیم)	f	(فمتو)	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$
(یک کوینتونیوم)	a	(آتو)	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$

مثالها: ۱ کیلو (۱ Km) = ۱۰۰۰ متر (m)
 ۱ میکرو متر (۱ μ m) = یک میلیونیم متر
 ۱ کیلو وات (۱ kW) = ۱۰۰۰ وات (W)
 ۱ میلی وات (۱ mW) = یک هزارم وات

جدول پیشوندهای اعداد

کمیت	علامت یا اختصار	مقدار اسمی	مقدار دقیق تر
واحد نجومی	AU	$1.5 \times 10^8 km$	1.496×10^8
ثابت بولتزمن	k	$1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$	1.38062×10^{-23}
جرم زمین		$6.4 \times 10^{24} kg$	5.98×10^{24}
شعاع زمین (متوسط)		$6.37 Mm$	
بار الکترون	e	$-1.6 \times 10^{-19} C$	-1.602×10^{-19}
جرم الکترون در حال سکون	m	$9.11 \times 10^{-31} kg$	9.10956×10^{-31}
نسبت بار-جرم الکترون	e/m	$1.76 \times 10^{11} C/kg$	1.7588×10^{11}
چگالی شار (توان)	Jy	$10^{-26} Wm^{-2} Hz^{-1}$	طبق تعریف 10^{-26}
اتم هیدروژن (جرم)		$1.673 \times 10^{-27} kg$	
فرکانس خط هیدروژن در حال سکون		$1420.405 MHz$	
نورتابه		$300 Mm$	
سرعت نور	c	$300 Mms^{-1}$	۲۹۹,۷۹۲۵
سال نوری	LY	$9.46 \times 10^{12} km$	9.4605×10^{12}
لگاریتم اعشاری			
لگاریتم طبیعی			
بازه لگاریتم (عدد نبرین)	e	۲,۷۲	۲,۷۱۸۲۸۲
عکس لگاریتم (عدد نبرین)	۱/e	۰,۳۶۸	۰,۳۶۷۸۸
تبدیل لگاریتم		$\ln x = 2,3 \log x$	$\ln x = 2,3026 \log x$
فاصله ماه (متوسط)		$384 Mm$	$\log x = 0,4343 \ln x$
جرم ماه		$6,7 \times 10^{22} kg$	
شعاع ماه (متوسط)		$1,738 Mm$	
پارسک	pc	$3,1 \times 10^{13} km$	$3,0856 \times 10^{13}$
پارسک	pc	$3,26 Ly$	۳,۲۶۱۵
پارسک	pc	$3,26 \times 10^5 AU$	۳,۰۶۲۶۵
ثابت مغناطیسی خلأ	μ_0	$126 nHm^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$ (مقدار دقیق)
ثابت الکتریکی خلأ	ϵ_0	$8,854 pFm^{-1}$	$8,854185 = 1/\mu_0 c^2$
عدد پی	π	۳,۱۴	۳,۱۴۱۵۹۲۷
ثابت پلانک	h	$6,63 \times 10^{-34} Js$	$6,6262 \times 10^{-34}$
جرم پروتون در حال سکون		$1,67 \times 10^{-27} kg$	$1,6726 \times 10^{-27}$
رادیان	rad	۵۷,۳°	۵۷,۲۹۵۸°
امپدانس ذاتی فضا	Z	$376,7 (\approx 120 \pi) \Omega$	$376,7304 = \mu_0 c$
زاویه فضائی کره		۱۲,۶ sr	$4\pi = 12,5664$
زاویه فضایی کره		$41253 deg^2$	۴۱۲۵۲,۹۶
مربع درجه	deg ²	$3,05 \times 10^{-4} sr$	$3,04617 \times 10^{-4}$
ثابت استفان-بولتزمن		$5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-2}$	$5,6692 \times 10^{-8}$
استرادیان (مجذور رادیان)	sr	$3283 deg^2$	$(180/\pi)^2 = 3282,806$
فاصله خورشید	AU	$1,5 \times 10^8 km$	$1,496 \times 10^8$
جرم خورشید	$M_{\odot}$	$2,0 \times 10^{30} kg$	$1,99 \times 10^{30}$
شعاع خورشید (متوسط)	$R_{\odot}$	$700 Mm$	۶۹۵,۳
سال (استوا)		$365,242 days = 3,1556925 \times 10^7 s$	

+ همان واحد مقدار اسمی. در رابطه با نفوذپذیری الکتریکی ϵ_0 و امپدانس ذاتی فضا Z_0 ، توجه شود که مقادیر این کمیت ها (با توجه به تعریف آنها) به کمک مقدار دقیق μ_0 و مقدار اندازه گیری شده c (سرعت نور) تعیین می شود.

جدول مشخصات الکتریکی برخی از مواد

ماده	مقاومت دی الکتریک $MV m^{-1}$	ضریب هدایت $\sigma, \Omega m^{-1}$	ثابت دی الکتریک نسبی	
			ϵ_r'	ϵ_r''
هوا	۳	۰	۱/۰۰۰۰۶	۰
آلومینیم	—	$3,5 \times 10^7$	۱	۰
باکلیت	۲۵	10^{-12}	۵	۰/۰۰۵
کربن	—	3×10^2	—	—
مس	—	$5,8 \times 10^7$	۱	۰
شیشه	۳۰	10^{-12}	۶	۰/۰۰۳
گرافیت	—	10^5	—	—
میکا	۲۰۰	10^{-10}	۶	۰/۰۲
روغن معدنی	۱۵	10^{-14}	۲,۲	۰/۰۰۰۰۲
کاغذ	۵۰	—	۳	۰/۰۱
پارافین	۲۰	$\sim 10^{-10}$	۲,۱	۰/۰۰۰۰۴
پلکسی گلاس	—	—	۳,۴	—
پولی فوم	—	—	$\sim 1,۰۵$	—
پولی استیرن	۲۰	10^{-16}	۲,۷	۰/۰۰۰۰۲
PVC	—	—	۲,۷	—
چینی	—	—	۵	۰/۰۰۰۴
PVC منبسط شده	—	—	$\sim 1,۱$	—
کوارتز	۳۵	10^{-17}	۵	۰/۰۰۰۱
لاستیک	۲۵	10^{-12}	۵	۰/۰۰۲
دی اکسید تیتانیوم	—	—	۱۰۰	۰/۰۰۲
برف تازه	—	—	۱,۵	$۰,۵ - ۰/۰۰۰۰۳$
خاک رس	—	5×10^{-2}	۱۴	—
ماسه	—	2×10^{-2}	۱۰	—
سنگ آهک	—	10^{-2}	—	—
تخته سنگ	—	—	۷	—
استیروفوم	—	—	۱,۰۳	—
زمین	—	2×10^{-2}	۴	—
خلأ	—	۰	۱	۰
وازلین	—	—	۲,۲	۰/۰۰۰۰۳
تفلن	۶۰	10^{-10}	۲,۱	۰/۰۰۰۵
آب	—	10^{-2}	۸۰	—
آب تازه	—	10^{-2} تا 10^{-2}	۸۰	—
آب دریا	—	۴ تا ۵	۸۰	—
چوب	—	—	۲	۰/۰۰۴

† توجه ۱: حداکثر شدت میدان الکتریکی که یک ماده می تواند بدون شکست تحمل کند مقاومت دی الکتریک ماده نامیده می شود.

توجه ۲: $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ بوده و ϵ_r' و ϵ_r'' هر دو عموماً تابعی از فرکانس هستند. مقادیر داده شده در طیف فرکانسی کیلوهرتز تا گیگاهرتز است. همچنین ثابت دی الکتریک نسبی تابعی از حرارت می باشد. مقدار کمیت ها (غیر از برف) در درجه حرارت نزدیک ۲۵ درجه سانتیگراد داده شده است.

جدول روابط ثابت خطوط انتقال دو سیمه، هم

واحد	صفحه‌ای موازی	هم محور	دوسیمه	نوع خط انتقال ← ثابت خط ↓
Ω/m	$\frac{\gamma}{w} R_s$	$\frac{R_s}{\gamma \pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	R
H/m	$\mu \frac{d}{w}$	$\frac{\mu}{\gamma \pi} \ln \frac{b}{a}$	$\frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)$	L
S/m	$\sigma \frac{w}{d}$	$\frac{\gamma \pi \sigma}{\ln \left(\frac{b}{a} \right)}$	$\frac{\pi \sigma}{\cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)}$	G
F/m	$\varepsilon \frac{w}{d}$	$\frac{\gamma \pi \varepsilon}{\ln \left(\frac{b}{a} \right)}$	$\frac{\pi \varepsilon}{\cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)}$	C
Ω	$\frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{d}{w}$ ($w \gg 2d$)	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \left(\frac{b}{a} \right)$	$\frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \left(\frac{D}{a} \right)$ ($D \gg a$)	Z_0

توجه ۱: اگر $\left(\frac{D}{2a} \right)^2 \gg 1$ باشد، $\cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right) \cong \ln \left(\frac{D}{a} \right)$

توجه ۲: در این روابط:

$$\sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma_0}} = R_s$$

a = شعاع سیم در خط دوسیمه و شعاع هادی داخلی در خط هم محور

b = شعاع داخلی هادی خارجی در خط هم محور

D = فاصله محور سیمها در خط دوسیمه

d = فاصله نوار هادی و صفحه زمین در خط صفحه‌ای موازی

w = پهنای نوار هادی در خط صفحه‌ای موازی

توجه ۳: در روابط Z_0 ، خطوط بی اتلاف فرض شده است. (یا $G \gg \omega C$ و $R \gg \omega L$) اثر

پوستی قابل چشم‌پوشی است. این شرایط در فرکانسهای بالا به علت عمق نفوذ بسیار پایین

تقریباً صادق است. همچنین فرض بر این است که خطوط در مد TEM کار می‌کنند.

جدول طیف فرکانس امواج الکترومغناطیسی از DC تا اشعه گاما

مثال برای حدود ابعاد	طول موج $\lambda = c/f$	فرکانس $f = c/\lambda$
— قطر زمین	10^6 m	$1 \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ Mm}$ $10^3 \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ km}$ $10^6 \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ m}$ $10^9 \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ mm}$ $10^{12} \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \mu\text{m}$ $10^{15} \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ nm}$ $10^{18} \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ pm}$ $10^{21} \text{ Hz} \left\{ \begin{array}{l} 1-300 \\ 10-30 \\ 100-3 \end{array} \right\} \text{ fm}$
— قله اورست	10^3 m	
— درخت تنومند	1 m	
— انسان		
— خط هیدروژن		
خط O_2		
خط مولکول		
دانه شن		
— میکروب		
— ویروس		
— فاصله اتمی		
— اتم		
— هسته اتم		

اسامی باند فرکانس رادیویی

اسم	فرکانس	کاربرد اصلی
ELF [†]	3-30 Hz	
SLF	30-300 Hz	شبکه های قدرت
ULF	300-3000 Hz	
VLF	3-30 kHz	زیردریانی
LF	30-300 kHz	هدایت هواپیمایی
MF	300-3000 kHz	رادیویی موج متوسط
HF	3-30 MHz	رادیویی موج کوتاه
VHF	30-300 MHz	FM, TV
UHF	300-3000 MHz	TV, LAN, موبایل, GPS
SHF	3-30 GHz	دنا, ماهواره, GSO, رادار
EHF	30-300 GHz	دنا, کنترل خودرو, رادار

باندهای مایکروویو		
فرکانس	جدید	قدیم
1-2 GHz	D	L
2-4 GHz	E, F	S
4-8 GHz	G, H	C
8-12 GHz	I, J	X
12-18 GHz	J	Ku
18-26 GHz	J	K
26-40 GHz	K	Ka

[†] ELF = فرکانس شدیداً کم, SLF = فرکانس بسیار کم, VLF = فرکانس خیلی کم, MF = فرکانس متوسط, HF = فرکانس زیاد, UHF = فرکانس خیلی زیاد, و ...

اختصار کلمات کلیدی

AF: Audio Frequency	فرکانس صوتی
RF: Radio Frequency	فرکانس رادیویی
IRR: International Radio Regulation	سازمان تنظیم فرکانس رادیویی
SW: Short Wave	موج کوتاه
MW: Medium Wave	موج متوسط
LW: Long Wave	موج بلند
LOS: Line Of Sight	در دید مستقیم قرار داشتن
VSWR: Voltage Standing Wave Ratio	معیار برگشتی
VLF: Very Low Frequency	فرکانس خیلی کم
LF: Low Frequency	فرکانس کم
MF: Medium Frequency	فرکانس متوسط
HF: High Frequency	فرکانس زیاد
VHF: Very High Frequency	فرکانس خیلی زیاد
UHF: Ultra High Frequency	فرکانس ماوراء زیاد
EHF: Extremely High Frequency	فرکانس فوق العاده زیاد
Tx : Transmit Signal	سیگنال ارسالی
Rx : Receive Signal	سیگنال دریافتی
SSL: Side Lobe Level	گلبرگ کناری
HPBW: Half Power Beam Width	پهنای باند در نصف توان ماکزیمم