

۴	مقدمه.....
۴	فصل اول.....
۴	معرفی طیف کامل امواج الکترومغناطیسی و خواص آن.....
۴	۱-۱ مقدمه ای بر اصول انتشار امواج رادیویی.....
۶	۱-۲ طیف کامل امواج الکترومغناطیسی.....
۶	۱-۲-۱ طیف فرکانس های صوتی (AF).....
۷	۱-۲-۲ طیف فرکانسهای رادیویی (RF).....
۹	۱-۳ چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی.....
۱۱	۱-۴ سرعت امواج الکترومغناطیسی در محیط های مختلف.....
۱۳	۱-۵ انکسار موج (شکست موج).....
۱۵	۱-۶ انعکاس موج (برگشت موج).....
۱۷	۱-۷ پخش (تفرق) امواج.....
۱۷	۱-۸ پلاریزاسیون موج.....
	Error! Bookmark not defined.
	Error! Bookmark not defined.
۱۸	۲-۱ انتشار امواج.....
۱۸	۲-۱-۱ امواج زمینی (سطحی) (Ground Wave).....
۱۹	۲-۱-۲ امواج آسمانی (امواج انعکاسی- امواج یونسفری) (SKY WAVE).....
۲۳	۲-۱-۳ امواج فضایی دید مستقیم (Line of sight wave).....
۲۴	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.....
۲۵	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.....
۲۶	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.....
۲۸	۲-۵ محو موج رادیویی.....
۲۸	۲-۶ امواج ماهواره ای.....
۲۹	۲-۶-۱ انتشار ماهواره های جهانی.....
۲۹	۲-۶-۲ انتشار ماهواره های منطقه ای.....
۲۹	۲-۶-۳ انتشار ماهواره محلی.....

فصل سوم.....	Error! Bookmark not defined.
اصول آنتن، ویژگیها و انواع آن.....	Error! Bookmark not defined.
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 میکروویو.....	۵۲
۳-۵ آنتن سهمی.....	۵۳
۳-۶ آنتنهای مورد استفاده در ناچا.....	Error! Bookmark not defined.
۳-۶-۱ آنتن های شبکه پلیس راه VHF - LB ناچا.....	Error! Bookmark not defined.
۳-۶-۲ آنتن های شبکه انتظامی VHF-HB ناچا.....	Error! Bookmark not defined.
۳-۶-۳ آنتن شبکه ترانک ترا.....	Error! Bookmark not defined.
فصل چهارم.....	Error! Bookmark not defined.
مبانی خطوط انتقال.....	Error! Bookmark not defined.
۴-۱ خطوط انتقال و موجبرها (تغذیه کننده‌ها).....	۵۵
۴-۲ اصول کلی خط انتقال.....	۵۵

۵۶.....	۴-۳ مدار معادل خطوط انتقال.....
۵۶.....	۴-۴ امپدانس مشخصه خط انتقال.....
۵۷.....	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.....
۵۸.....	۴-۵-۴ تطبیق امپدانس.....
۵۸.....	۴-۵-۵ موجرها.....
.....	Error! Bookmark not defined..... مراجع
۶۰..... پیوست ۱
.....	Error! Bookmark not defined..... نمایه
۶۷..... اختصار کلمات کلیدی

WWW.ERTEBATRASA.COM

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

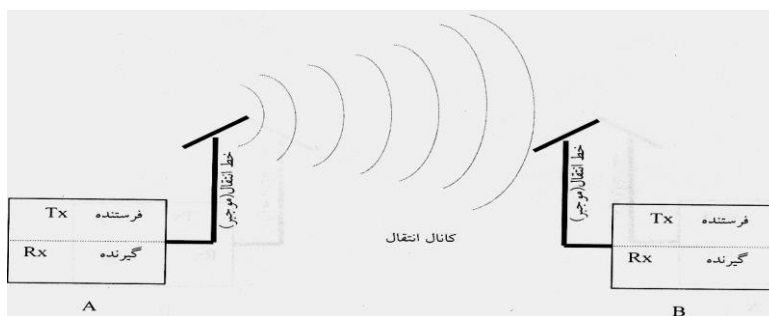
معرفی طیف کامل امواج الکترومغناطیسی و خواص آن

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 قید و بند 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.

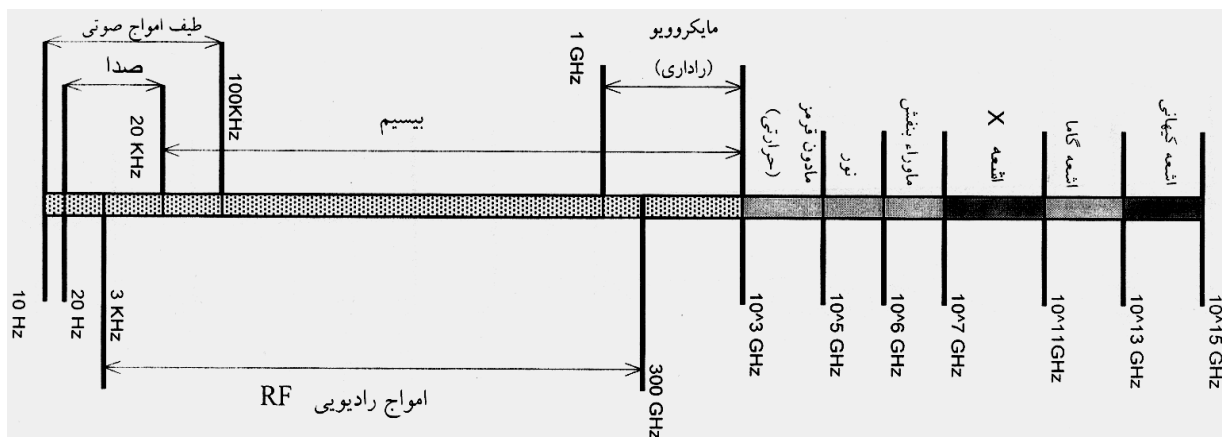


شکل (۱-۱) شمای کلی یک فرستنده گیرنده ساده

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 می یابند. 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. مهم ترین 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 می شود. 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 وسیله ای 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 میکنید، امواج رادیویی که بیسیمها در این طیف فرکانس طراحی و ساخته میشوند فقط یک نوع از انرژی الکترومغناطیس میباشند.



شکل (۱-۲) طیف کامل امواج الکترومغناطیسی

انرژی های دیگر بصورت امواج مادون قرمز (حرارتی) امواج نورانی (طیف مرئی) ، امواج ماوراء بنفش ، اشعه X ، پرتوهای گاما، اشعه کیهانی میباشند. با آنکه سرعت همه آنها در خلاء یکی است ولی خواص آنها متفاوت است. به عنوان مثال، چشم انسان نمیتواند همه امواج الکترومغناطیس را ببیند، بلکه قسمت کوچکی از آن با چشم دیده میشود. بعضی از نواحی طیف روی هم همپوشانی دارند و نامگذاری آنها بستگی به این دارد که چگونه تولید میشوند 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 میشوند

۱-۲-۱ طیف فرکانس های صوتی (AF)

امواج صوتی از نوع موجهای مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید میشوند 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 میگیریم، 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 میشود.

معمولاً فرکانسهای از 10Hz تا 100KHz را طیف امواج صوتی در نظر میگیرند و فرکانس های بالاتر از 20KHz که توسط گوش انسان شنیده نمی شود ، ماوراء 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 میآورد. امواج صوتی در محیط با سرعت بین 330m/s تا 340m/s حرکت می کند که توسط جابجایی مولکولهای هوا انتقال مییابند. 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، آژیرها، بوق، صدای انسان، آلات موسیقی، ملخ هواپیما، موتور جت	ارتباطات، سیستم های پخش صوت، اعلام خطر، مطالعات صوتی
امواج ماوراء صوت (اولتراسیونیک)	صوت های هوایی، نوسان سازهای کریستالی، پیژوالکتریک، 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)

۲-۲-۱ طیف فرکانسهای 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 ۳×۱۰^8 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 میباشند. 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) IRR استاندارد باندهای فرکانسی انجام میگیرند.

باندهای فرکانس رادیویی که در سیستم های ارتباطات رادیویی مطرح می باشد در جدول (۱-۲) مشاهده میکنید.

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 قاره‌ای 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 فوقالعاده زیاد SHF	میکروویو-ارتباط زمین به ماهواره-رادار-فضانوردی	۳-۳۰ GHz	موج سانتیمتری	کابل کواکسیال و موجبر
فرکانس باند EHF	ارتباط ماهواره‌ای-آزمایش و نجوم رادیویی دریانوردی	۳۰-۳۰۰ GHz	موج میلیمتری	موجبر

جدول (۱-۲)

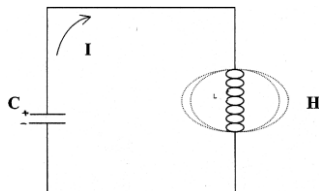
در جدول فوق وقتی گفته می شود باند VHF مقصود امواجی است که فرکانس آنها بین ۳۰ MHz تا ۳۰۰ MHz می باشد. امواج رادیویی بر حسب فرکانس ، مصارف و کاربردهای بخصوصی در مخابرات دارند. در جدول (۱-۳) حدود کاربرد هر یک بیان شده است.

نام باند	فرکانس	مصارف
LW	۱۰-۵۰۰ KHz	موج بلند- برای مخابرات دریایی
MW	۵۳۵-۱۶۰۵ KHz	موج متوسط- برای فرستندههای درون مرزی
SW	۳-۲۷ MHz	موج کوتاه- برای فرستندههای برون مرزی
باند شهری C.B	۲۷-۴۷ MHz	مخابرات دولتی- پلیس ، آتش نشانی
VHF-1	۴۷-۶۸ MHz	باند پایین کانالهای (۴و۲) 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 (۵-۱۲)
VHF-UHF	۲۳۰-۴۷۰ MHz	مصارف طبی- راداری

جدول (۱-۳)

۱-۳ چگونگی تولید و انتشار امواج الکترومغناطیسی

یک مدار الکتریکی متشکل از سیمپیچ 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 خودالقا 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 میدهند.

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 میزنند.
 ✓ حرکت هادی در یک میدان مغناطیسی که منجر به قطع خطوط میدان مغناطیسی شود، جریان الکتریکی در آن القا می کند.

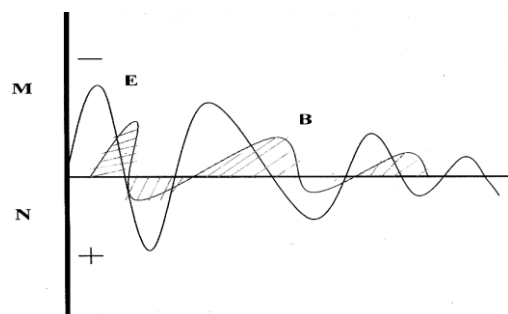
✓ تغییر میدان الکتریکی در فضا سبب ایجاد میدان مغناطیسی می شود.

✓ تغییر میدان مغناطیسی در فضا سبب ایجاد میدان الکتریکی می شود.

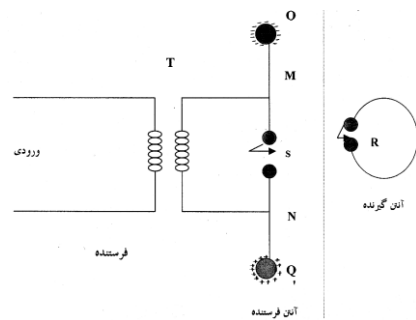
ماکسول از صورت معادلات ریاضی که روابط میان میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را آشکار می کرد نتیجه گرفت دو میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H) در هر نقطه از فضا برهم عمودند و هر دو میدان، عمود بر جهت انتشار میباشند که با سرعت نور در محیط منتشر می شوند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نور هم قاعدتاً باید 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 هرگز 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 میتوان 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 بعدالکترونها 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 (180° 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 میشود 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 (۲-۱) برقرار است.

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

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.

مسأله : طول موج فرکانس 10^9 GHz گیگا هرتز چقدر است ؟

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

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 (۳-۱) محاسبه می شود .

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

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 (۳-۱)، 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 .

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

Z امپدانس مشخصه محیط انتشار موج بر حسب اهم (Ω)، 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 :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376.7 \cong 377 \Omega \quad \text{فرمول (۵-۱)}$$

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

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

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 نوراز محیطی به محیط دیگر وارد شود، بعلت 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 تاییده (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، هرسه 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.

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

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 (۱-۶) 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 یامانددو 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 (۱-۷) را مشاهده کنید.



(a)

VHF- Low band



(b)

VHF-High band/UHF

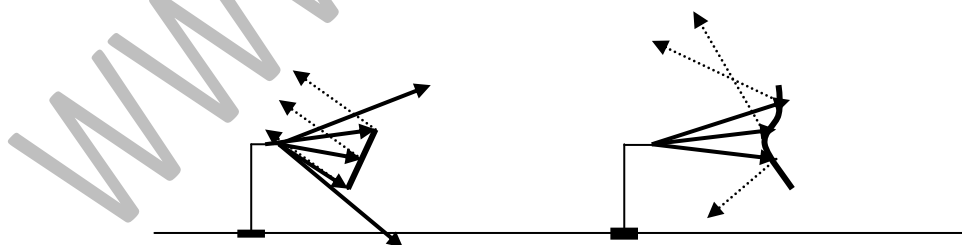
شکل (۱-۷) انکسار

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 پدیده خم شدن امواج (در اثر شکستن در حین برخورد به لبه های محیط دوم که تپه است) در فرکانسهای پایین دریافت میکند. در فرکانسهای بالاتر، اثر انکسار کم می گردد. شکل (۷-۱) 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] .

۶-۱ انعکاس موج (برگشت موج)

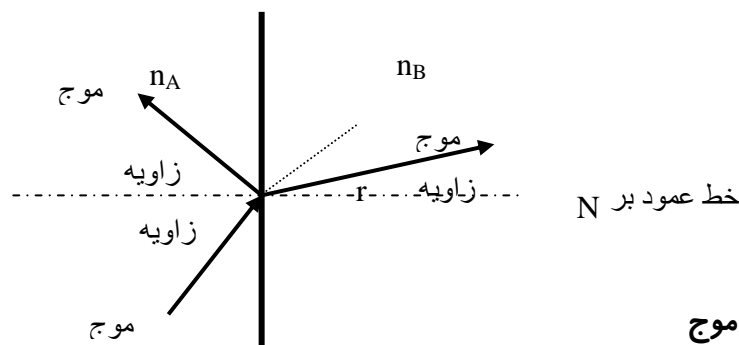
مقداری از امواج الکترومغناطیس پس از برخورد به مانع منعکس می گردد. قوانین انعکاس امواج نیز مشابه قوانین انعکاس امواج نورانی است. زاویه تابش با زاویه انعکاس برابری هر دو اشعه و خط عمود بر سطح در یک صفحه قرار دارند. بیشتر اجسام نور (امواج الکترومغناطیس) را منعکس می کنند. در معمولی ترین نوع انعکاس که پخش 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 گوشه اتاق می توان آنرا دید. این نوع انعکاس وقتی اتفاق می افتد که زبری جسم که نور را منعکس می کند نسبت به طول موج نور (طول موج امواج الکترومغناطیسی) منعکس شده دارای ابعاد بزرگتری باشد. در نوع دیگر انعکاس که انعکاس منظم می باشد، 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 می افتد. برای مثال، انعکاس نور روی کاغذ، نور را پخش می کند در صورتی که انعکاس نور در آینه پخش نمی شود. به هر حال انعکاس توسط سطح ناصاف



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

شکل (۸-۱) نحوه 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)

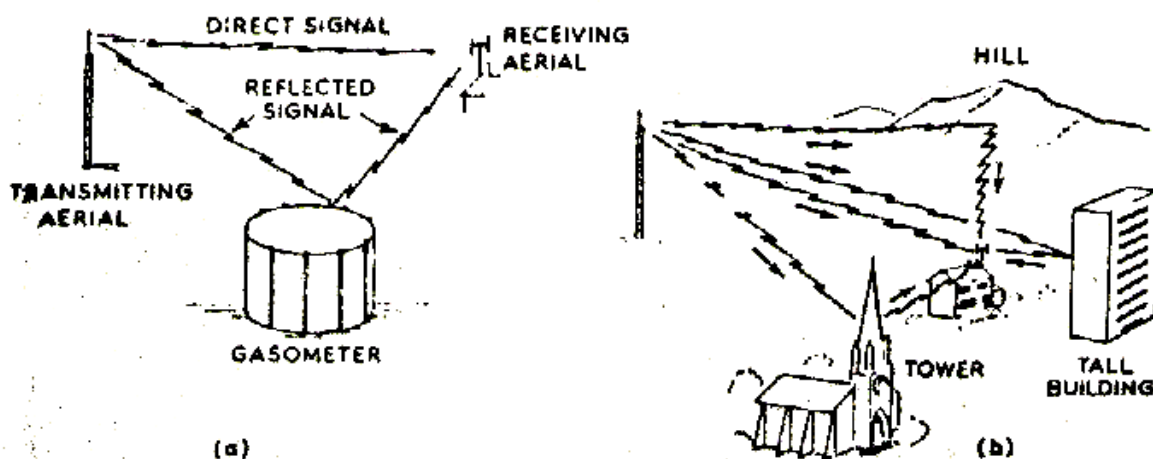


شکل (۹-۱) انعکاس موج

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 (۱۰-۱) 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 طویل‌تری 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 (۱۱-۱) 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 (۱۱-۱) 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

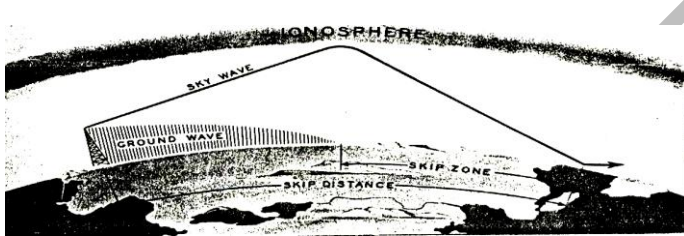
ویژگیهای انتشار امواج رادیویی در باندهای مختلف

۲-۱ انتشار امواج

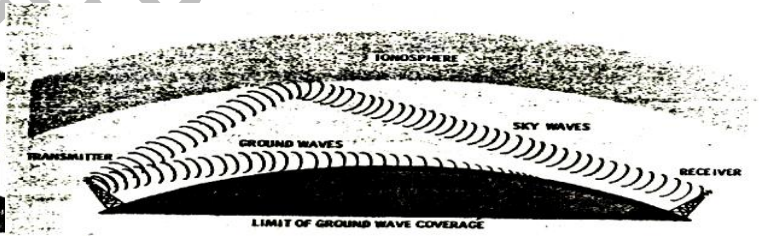
در محیط اطراف زمین، انتشار امواج الکترومغناطیسی تنها به خواص خودشان بستگی ندارد. بلکه تحت تأثیر شرایط محیط نیز می باشد. روشهای گوناگون انتشار امواج به میزان زیادی به فرکانس آنها بستگی دارد. هر آنتن که امواج را به فضا پخش می کند، همزمان دارای سه مؤلفه موج می باشد، که بستگی دارد به اینکه موج منتشر شده 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.



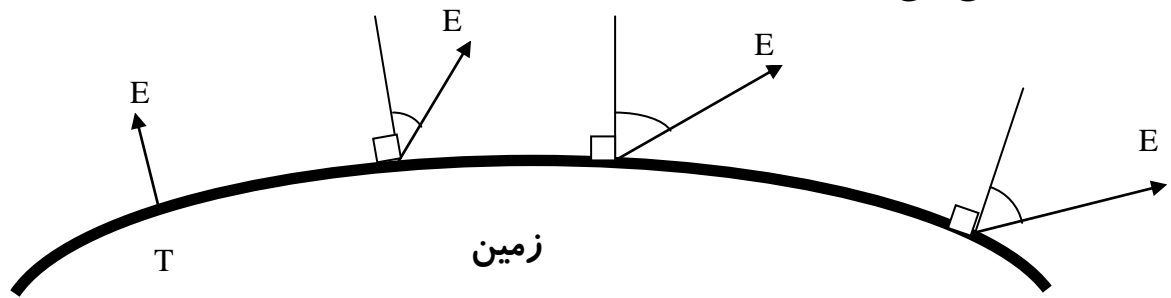
شکل (۲-۲) انتشار امواج زمینی



شکل (۲-۱)

امواج با فرکانس کمتر از ۳ MHz بر روی زمین و تا فرکانس حدود ۶ MHz روی آبرها، 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 پلاریزاسیون 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 بیشتر افقی 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.

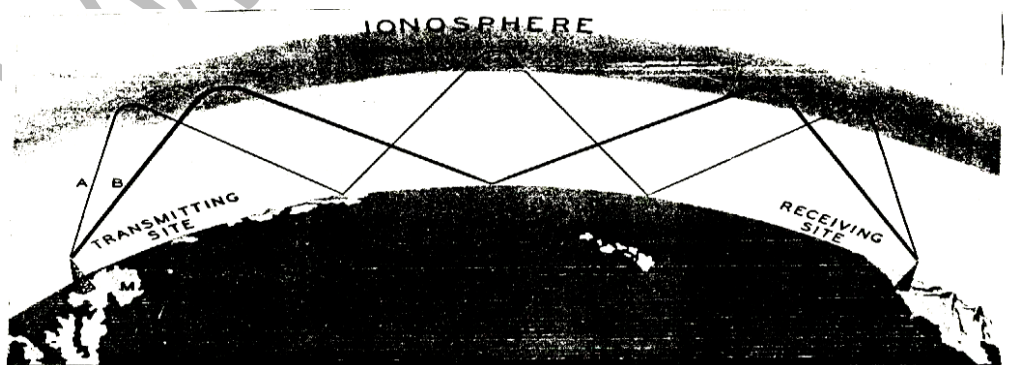


شکل (۲-۳) انتشار امواج زمینی

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 کوهستانی، 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 رُوع 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 میشوند [۵،۶،۹،۱۱،۱۲].

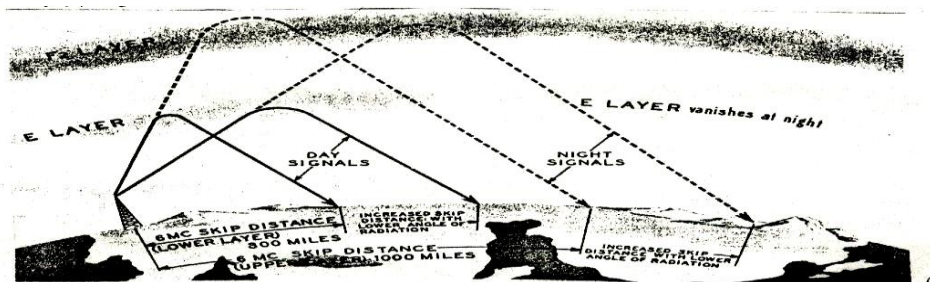
۲-۱-۲ امواج آسمانی (امواج انعکاسی- امواج یونسفری) (SKY WAVE)

امواج رادیویی با فرکانسهای ۳ تا ۳۰ مگاهرتز که طول موج آنها کمتر از طول موج باند (MW) میباشد 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 انعکاسی 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.

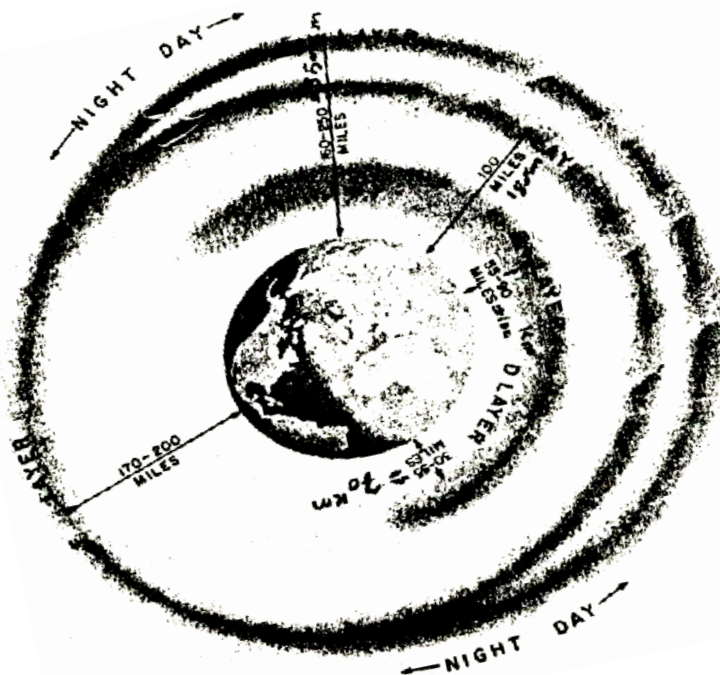
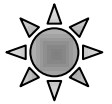


شکل (۵-۲) تأثیر شب و روز بر امواج آسمانی

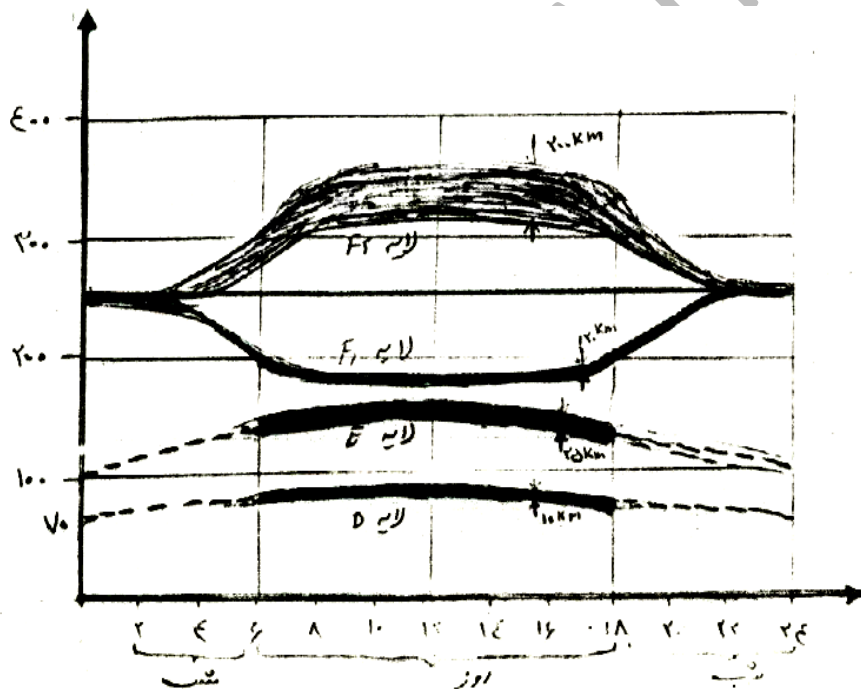
بطور مثال امواج در زمستان نسبت به پاییز بهتر انتقال می یابند. در زمستان بخاطر نفوذ کم نور خورشید لایه E کمتر بوجود می آید. یکی از ویژگیهای عمده اینگونه روش ارسال موج، آن است که امواج رادیویی در مناطق نزدیک فرستنده که آن را مسافت پرش (Skip Distance) می نامند، قابل دریافت نمی باشد. این ویژگی در فاصله بین 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 الکترونها 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 میباشد. یونیزاسیون آن به ارتفاع تابش خورشید بستگی دارد و به همین دلیل در شبها از بین میرود 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.

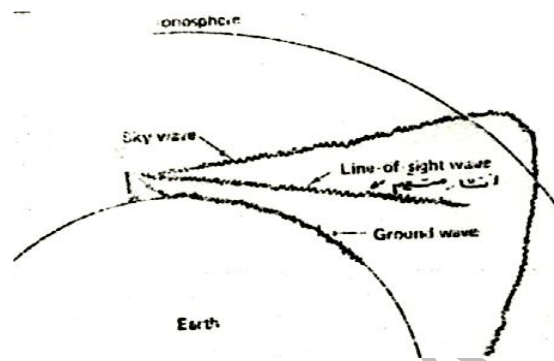
لایه F1: همانطوریکه در شکل دیده می شود، در ارتفاع ۱۸۰ کیلومتری با ضخامت تقریبی ۲۰ کیلومتر در روز وجود دارد. این لایه در شب، با لایه F2 یکی می شود. لایه F1 در انعکاس امواج HF تأثیر کمی دارد، ولی قسمت اعظم موج HF از لایه F2 منعکس می شود. توجه کنید که اثر تضعیف این لایه و لایه های دیگر باید دو برابر شود، 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 برمیگردد. 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 بازم افزایش یابد، حالتی را به وجود می آورد که دیگر خمیدگی امواج به طرف زمین غیر ممکن 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)

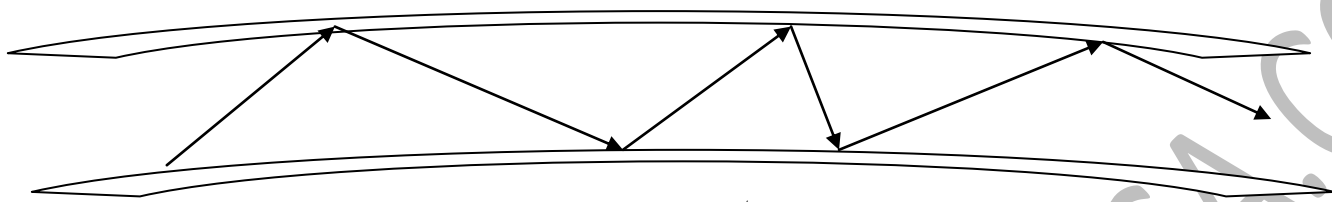
منظور از اشعه مستقیم، امواج رادیویی است که مستقیماً از سوی فرستنده به سوی گیرنده حرکت می‌کند. در فرکانسهای ۳۰ تا ۴۰ مگا هرتز، بیشتر امواج آسمانی برگشتی از طبقه یونسفر به علت ناچیز بودن یا اصلاً حذف کامل و نقش چندانی ندارند. این امواج را به روش سطحی و یا به صورت انعکاس نمی‌توان ارسال نمود. چنانچه این 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 (۲-۸)



شکل (۲-۸) 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 تریوپوسفر 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 انعکاس 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 غیرعادی موج گویند. شکل (۹-۲) را مشاهده نمایید [۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۲].



شکل (۹-۲) انتشار غیرعادی

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

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

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 میباشد. 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، منحصراً 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) میباشد.

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 میباشد [۵،۶،۹،۱۱،۱۲].

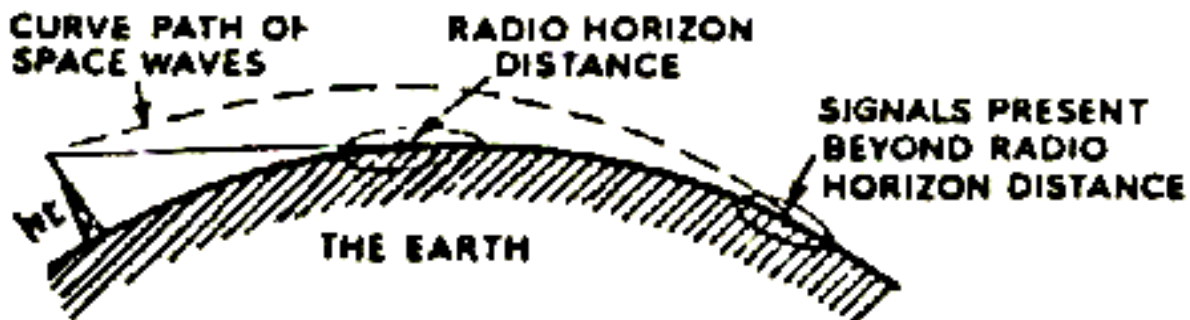
۲-۴ افق رادیویی

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.

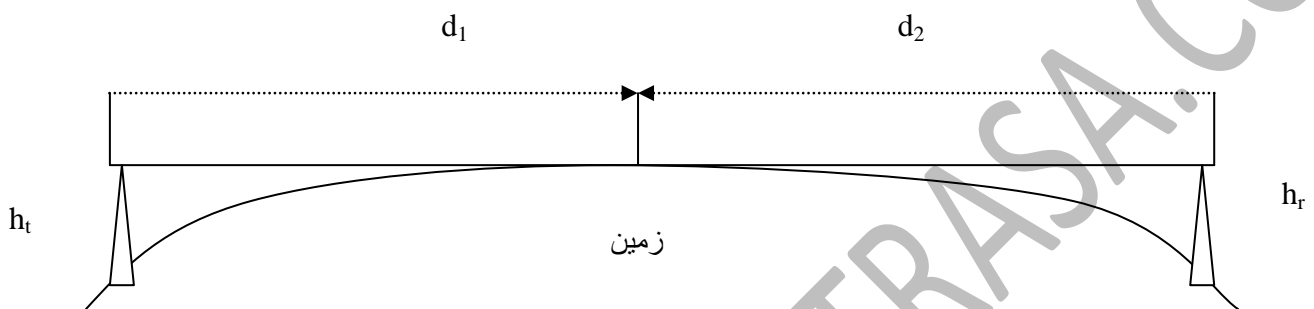


شکل (۲-۱۰)

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 زیادتر کنیم. محاسبه برد در این حالت از فرمول (۲-۴) به دست می آید.

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

که در این رابطه h_t و h_r به ترتیب ارتفاع آنتن فرستنده و گیرنده بر حسب متر است و ماکزیم 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 ۱۵٪ 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.

مسئله: 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:

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

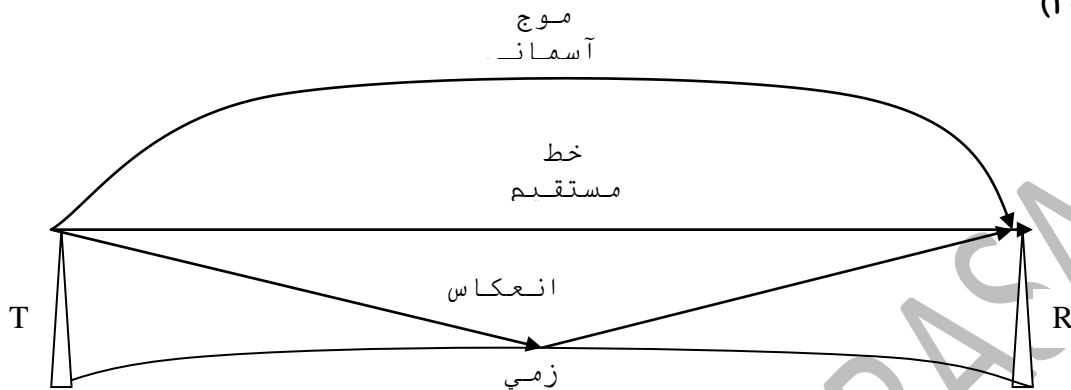
$$52 = 3.6(\sqrt{60} + \sqrt{h_r}) \Rightarrow h_r = 44.8m$$

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) [۱۲، ۱۱، ۹، ۶، ۵].

۲-۵ محو موج رادیویی

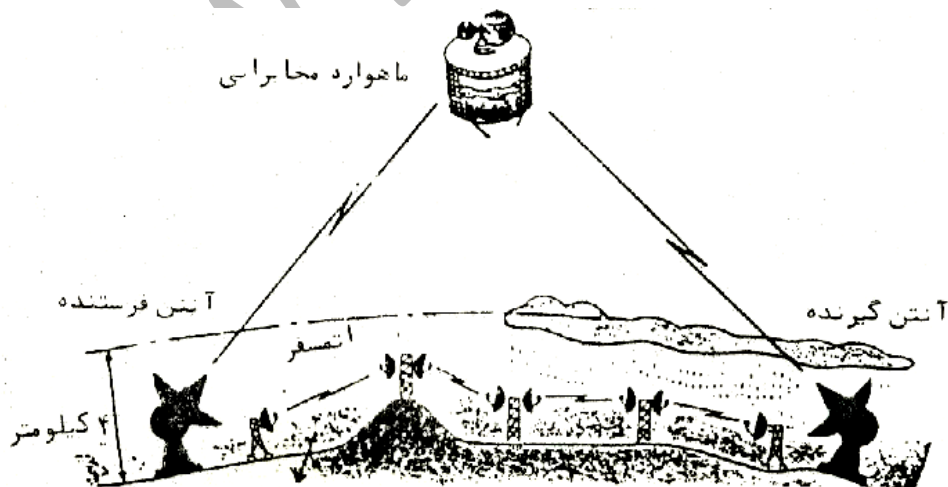
اگر آنتن فرستنده امواج مستقیم، طوری باشد که اشعه را علاوه بر این که مستقیم به هدف آنتن گیرنده می تاباند، اشعه به زمین نیز برخورد کند، زمین نیز امواج را منعکس و امواج منعکس شده از زمین به هدف اصابت می کند، همچنین ممکن است آنتن گیرنده امواج را از روش انتشار انعکاس از طبقات یونسفر دریافت کند. در هر مورد 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

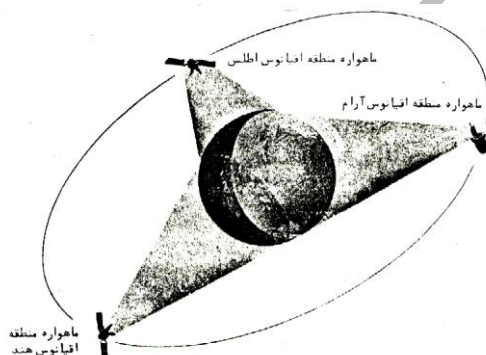
با پیشرفت و تکامل تکنولوژی الکترونیک و ساخته شدن ماهواره های مخابراتی امکان ارتباط بین المللی و منطقه ای و محلی ساده تر و بهتر گردید و مشکلات ارسال امواج تلویزیونی به نقاط دور دست برطرف شد. مثلاً در موضوع انتشار و پخش شبکه های تلویزیونی ماهواره می تواند یک فرستنده تلویزیونی را دریافت کند. و پس از تغییراتی 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 (2-13) 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 زیر پوشش دارند، ماهواره‌های جهانی نام دارند. هم‌اکنون مشهورترین ماهواره جهانی عبارت است از اینتلسات (intelsat) و اینترسپاتینک (intersputink) 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 می‌فرستد. 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

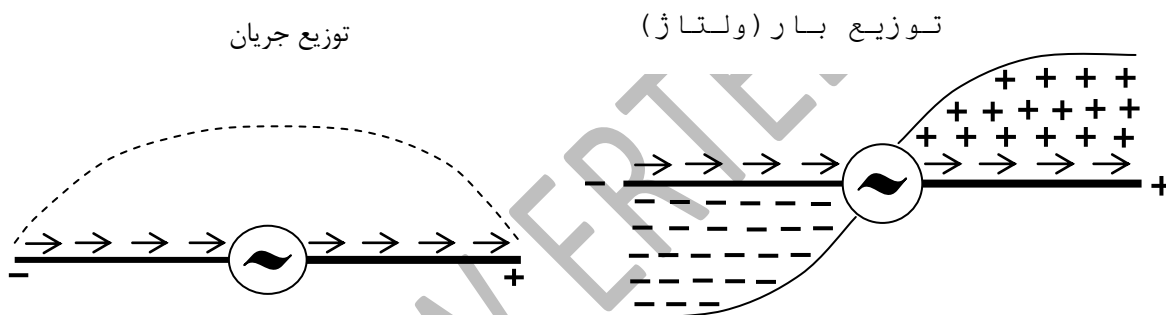
اصول آنتن، ویژگیها و انواع آن

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 می دهیم 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 می یابند

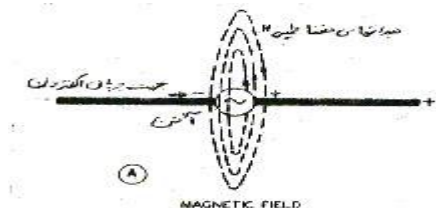
۳-۲ چگونگی ایجاد میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در یک قطعه سیم (آنتن)

یک فرستنده رادیویی به صورت منبع سینو سری و آنتن به صورت دوسیم که از ترمینالهای آن خارج شده اند، را در نظر می گیریم. شکل (۳-۱) را ببینید.

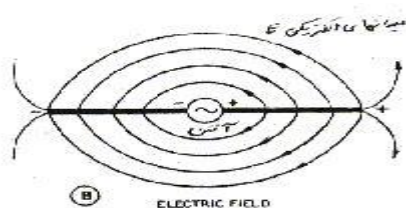


چنانچه مشاهده میشود، در یک لحظه پلاریته ولتاژ در دوسر منبع سینو سری (مانند شکل ۳-۱) در سمت راست مثبت و در سمت چپ منفی در نظر گرفته شده است. بنابراین، الکترونها در بازوی سمت چپ سیم (آنتن) مطابق جهت نشان داده شده به طرف بازوی سمت راست حرکت کرده در نتیجه، در طول سیم یک جریان الکتریکی خواهیم داشت. منحنی توزیع جریان در طول سیم در شکل نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود، 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 می کنید. البته باید توجه داشت چون منبع سینوی (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 می دانیم که عبور جریان الکتریکی از هر سیم باعث ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف آن می گردد. 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 (3-2)



شکل (3-3)

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 میباشد. 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 میشود 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 میشود و اگر نسبت به زمین عمودی نصب شود موج به صورت عمودی پلاریزه میشود. 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 مولفههای 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 پلاریز شده اند.

آنتنهایی 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 آنتنهای 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 آنتنهای زمینی از هر دو نوع پلاریزاسیون (عمودی و افقی) و حتی دایره ای استفاده می شود [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰] .

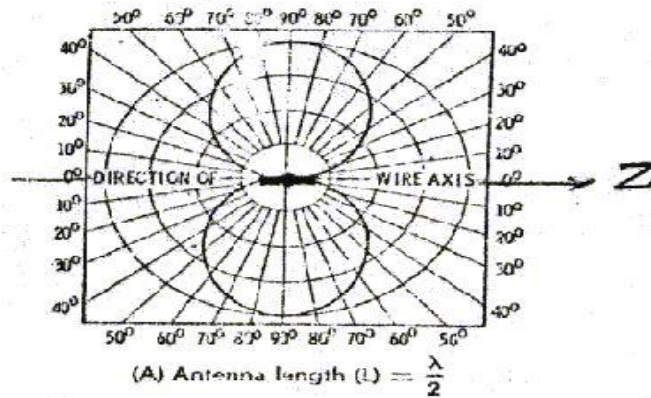
۳-۴ آنتن

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 گلبرگ تشعشع (پرتوقدرت) آنتن دوقطبی کوتاه را مورد بررسی قرار میدهیم 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، هر چند 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 گلبرگ تشعشع (پرتوقدرت) dA و همچنین پرتوقدرت یک آنتن کامل در نقطه ای دور از آن به صورت شکل (۳-۴) 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 (3-4) پرتوقدرت يك دایپل (نصف طول موج)

۲-۴-۳ پارامترهای مهم یک آنتن

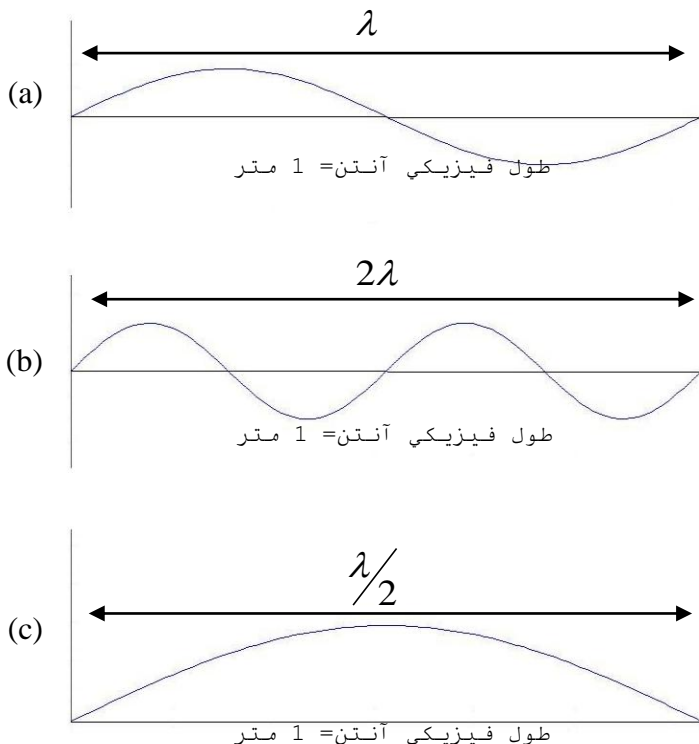
- پارامترهای مهم یک آنتن عبارتند از: ۱- طول آنتن ۲- پهنای باند آنتن ۳- میزان برگشتی آنتن VSWR ۴- بهره آنتن ۵- پرتوقدرت ۶- مقاومت (امپدانس) تشعشعی آنتن ۷- سمت گرایی آنتن ۸- دهانه مؤثر آنتن (سطح مؤثر) ۹- زاویه فضایی آنتن.

۱-۲-۴-۳ 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 بر اساس 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

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

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

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

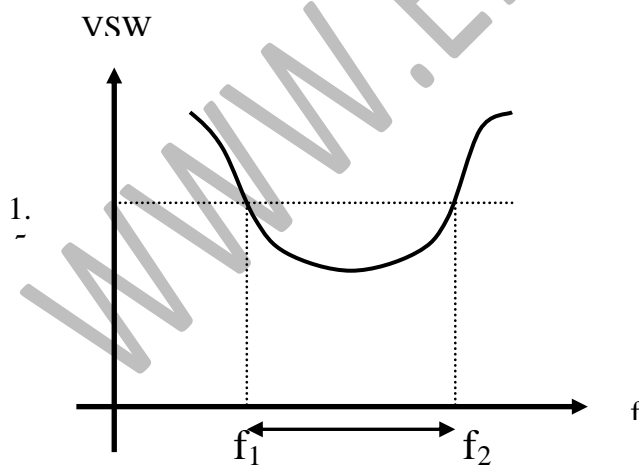
$$\lambda_{3\text{mhz}} = \frac{300000000}{3000000} = 100\text{m} \quad \text{طول الکتریکی} = \frac{30}{30} = 1\lambda$$

$$\text{طول الکتریکی} = \frac{30}{100} = .3\lambda$$

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 1.5) ≤ مطابق شکل ۶-۳



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.

$$\text{BW پهنای باند موثر آنتن} = f_2 - f_1$$

۳-۲-۳-۳ 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 میباشد. به عبارت دیگر VSWR معیار برگشتی آنتن است که در شرایط ایده‌آل $VSWR=1$ می‌باشد. 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 میشود. برای ارزیابی و انتخاب پهنای باند موثر آنتن، سازندگان باید منحنی VSWR را مانند شکل (۳-۶) برای هر آنتنی ارائه نمایند [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۲-۴-۳ 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 میکند. این مشخصه آنتن را سمت گرایی آنتن مینامند. برای آنکه نحوه محاسبه اندازه سمت گرایی را توضیح دهیم در ابتدا به تعریف و روش محاسبه بهره سمتی آنتن میپردازیم [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

الف- بهره سمتی (Directive Gain):

نسبت شدت تشعشع در یک جهت به شدت تشعشع متوسط، بهره سمتی در آن جهت نامیده میشود که رابطه آن به شکل

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

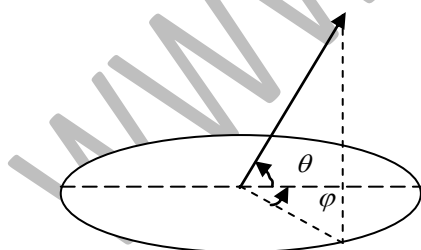
زیر میباشد:

$U(\theta, \varphi)$: 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 میکند که در جهات مختلف بهره سمتی آنتن چقدر میباشد به عنوان مثال در جهت $\theta = 60^\circ, \varphi = 40^\circ$ ، اندازه $D(60, 40)$ برابر 1.5dB میباشد. (هر زوج (θ, φ) نشان دهنده یک جهت میباشد).



شکل ۳-۷

ب- سمت گرایی (Directivity):

ماکزیم مقدار بهره سمتی را سمت گرایی آنتن مینامند و با D نشان میدهند 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 ماکزیم

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 گرای آنتن در آن جهت می‌باشد.

برای مثال، سمت گرای آنتن دایپل کوتاه‌تر از آنتن ایزوتروپیک است. در واقع، سمت گرای 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 گرای آنها بیشتر از یک خواهد بود. (سمت گرای آنتن ایزوتروپیک یک می‌باشد) [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

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 ورودی به توان تشعشعی همراه با خواص سمت گرای آن مورد نظر است. بهره

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \times U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad \text{توان یا بهره به صورت زیر تعریف میشود:} \quad G = \frac{4\pi \times U_{\max}}{P_{in}}$$

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 گرای و بهره در اندازه توان بکاربرده شده می‌باشد. در سمت گرای توان تشعشع شده از آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی در بهره توان داده شده به ورودی آنتن در نظر گرفته می‌شود. اگر

$$P_{in} = P_r \quad \text{کل توان ورودی به صورت توان تشعشع شده ظاهر شود داریم:}$$

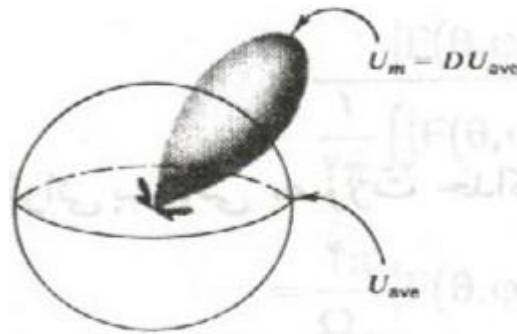
در نتیجه سمت گرای را میتوان به عنوان بهره توان تلقی نمود. بهره توان این واقعیت را منعکس میکند که مقداری از توان ورودی در آنتنهای واقعی تلف می‌شود. قسمتی از توان ورودی P_{in} که به صورت توان تشعشع شده P_r ظاهر نمی‌شود، در آنتنها و وسایل مجاور جذب شده و تلف می‌شود. بنابراین کارایی تشعشعی یا بازدهی آنتن 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٪ میباشد. همچنین با استفاده از ترکیب روابط ذکر شده میتوان $G = e * D$ 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 میباشد.



شکل (3-8) 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 داشتن اشعه باریک کاری ساده و عملی است [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۴-۲-۶ پرتو قدرت آنتن (گلبرگ تشعشع)

پرتو تشعشعی آنتن یک نمودار (منحنی) از خواص تشعشعی (میدان دور) آنتن درجهتهای مختلف می باشد بدین ترتیب که اندازه میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی یا توان تشعشعی را در فاصلهای 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 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 میشود تغییرات E_θ متناسب با $\sin\theta$ است و به φ بستگی ندارد. پرتورا می توان در دو صفحه E-Plane و H-Plane دید. به عبارت کلیتر 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 دایپل 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 میتوان نشان داد که شکل میدان انتشار آنتن در حالت

گیرندگی و فرستندگی یکی است [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۷-۲-۴-۳ مقاومت (امپدانس) تشعشعی آنتن

امپدانس ورودی یک آنتن ، امپدانس است که در دو سر آنتن ظاهر میشود. ولی اکنون فرض بر این است که آنتن ایزوله است و اثر کوپلاژ آنتنها و مدارهای دیگر روی آنتن را در نظر نمیگیریم. امپدانس آنتن دارای یک قسمت حقیقی R_{in} و یک قسمت X_{in} (جزء موهومی که ناشی از خاصیت سلفی و خازنی آنتن میباشد) 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 میشود یکی افت حرارتی روی ساختمان آنتن و دیگری توانی که از آنتن رها شده و در فضا منتشر میشود و هرگز به آنتن بر نمیگردد (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 میدهم، توان متوسط تلف شده در یک آنتن عبارت است :

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

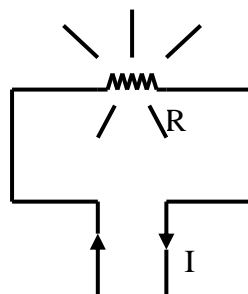
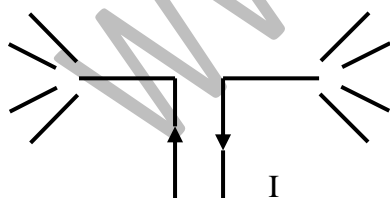
که I_{in} مقدار حداکثر (پیک) جریان ورودی به آنتن میباشد. توان تلف شده را به دو بخش جداگانه توان تشعشعی و توان اهمی تقسیم میکنیم پس داریم :

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

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

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 (9-3)

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 میگردد.

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 ϵ_0 و μ_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

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

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؟

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

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 $\frac{\lambda}{4}$ چقدر است؟

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

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].

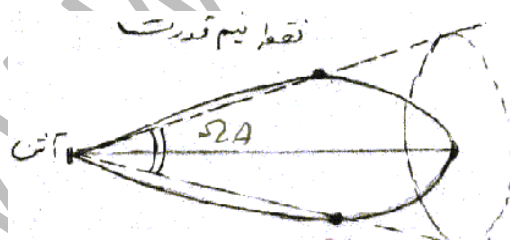
۳-۴-۲-۸ دهانه مؤثر آنتن (سطح مؤثر)

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 صفحه‌های 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 گلبگ (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 (3-10)

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 (کور کردن یک سیستم رادیویی) درامان 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		
	Circularly Polarized	Narrow band	Normal Mode Helix
			Biconical w/polarizer
Broad band		lindenblad	
	4-Arm conical spiral		
Directional Antenna	Liniery Polarized	Narrow band	yagi
			Dipoie array
		Broad band	Log period
	Horn		
	Circularly Polarized	Narrow band	Axial mode Helix
			Horns w/polarizer
Broad band		Cavity sprials	
	Conical sprials		

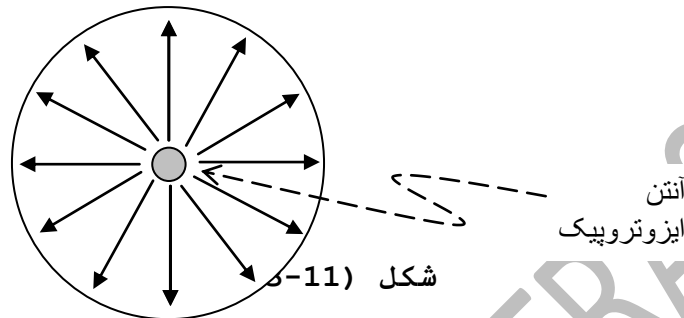
۴-۳-۴ انواع آنتن ها

طرح و کاربرد آنتنها در دستگاههای مخابراتی، بر حسب 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 آنتنها 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 می‌شود آنتن‌های نظامی از تنوع بیشتری برخوردار باشند. که ما در این قسمت تعدادی از انواع آنتن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۱-۴-۳ آنتن ایزوتروپیک

آنتنی که امواج را به همه جهات بطور یکسان انتشار می‌دهد. آنتن یا منبع (Isotropic) نامیده می‌شود. 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) آنتن‌های واقعی استفاده می‌گردد. شکل (۹-۳) نوع تشعشع یک آنتن فرضی ایزوتروپیک را که به صورت کروی به همه جهات انرژی را پخش می‌کند نشان می‌دهد.



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 می‌گیرند تشکیل می‌شود. امپدانس آن ۷۳ اهم است و لذا سعی می‌کنند 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 می‌کند (فرکانسهای دو و سه و برابر فرکانس اصلی). طول عملی (طول واقعی) این آنتن از فرمول (۱۱-۳) محاسبه می‌شود:

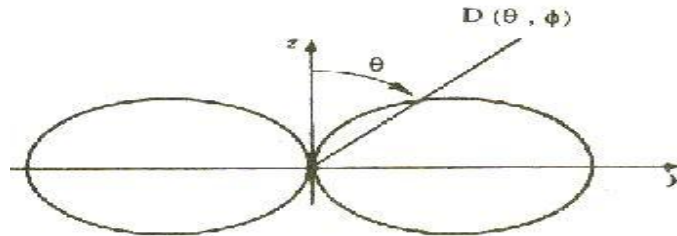
$$\text{طول الکتریکی محاسبه شده بر حسب متر} \quad L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f} = \frac{300}{20f(mc)} = \frac{150}{f(mc)}$$

$$\text{الکتریکی در هوا} \quad = 95\% \quad \ell \text{ طول واقعی (طول عملی)}$$

$$\text{فرمول (۱۱-۳)} \quad \ell = \frac{142.5}{f(mc)} \quad \text{متر} \quad \ell \text{ طول واقعی (طول عملی)}$$

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 (۱۱-۳) مشاهده می‌کنید.



شکل (3-12) نمونه تشعشع آنتن نیم موج

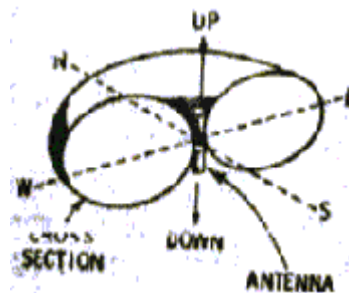
همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، انتشار آنتن نیم موج در اطراف آنتن به صورت شکل نشان داده شده می‌باشد. اگر یک طرف آنتن را یک منعکس کننده میله‌ای قرار دهیم شکل انتشار به یک طرف خواهد بود و در پشت ر فلکتور انتشار قابل توجهی نخواهیم داشت به این صورت آنتن دوقطبی و نیم موج جهت دار می‌شود.



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

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 (۱۳-۳) مشاهده می‌کنید.



شکل (3-14) 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 نزدیک 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 فرل:

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:

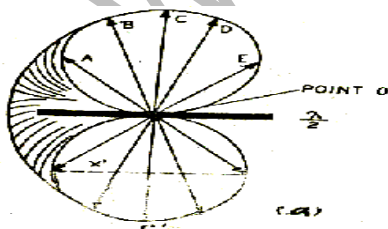
این ناحیه از میدان نزدیک شروع شده و تا جاییکه شدت موج رادیویی موجود باشد، ادامه دارد. گلبزرگ آنتنهایی که در این قسمت بحث می شود، همگی مربوط به میدان دور آنتن است.

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

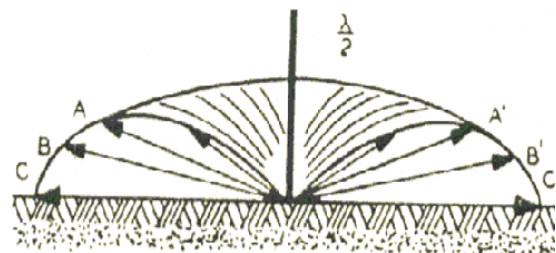
فرمول (۱۲-۳)

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

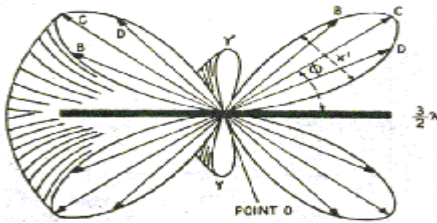


شکل (۱۶-۳)

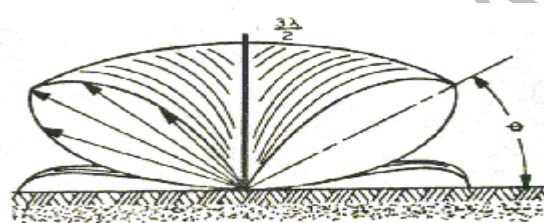


شکل (۱۵-۳)

د- صفحه شامل آنتن شکل (۳-۱۵) گلبیگ تشعشع آنتنهای دایپل با طول 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 دو انتهای آنتن، تشعشع نداریم. برای آنتنهای با طول $\frac{\lambda}{2}$ 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 با طول $\frac{3}{2}\lambda$ 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 (3-18) د



شکل (3-17)

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 با طول $\frac{3}{2}\lambda$ 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 با طول 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.



شکل (3-19-b)

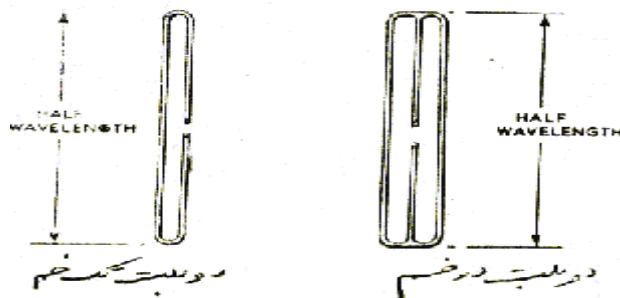


شکل (3-19-a)

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 امپدانسی به میزان ۹ برابر امپدانس دوقطبی نیم موج معمولی است. (یعنی ۶۵۷ اهم می باشد) که در شکل (۳-۱۹) مشاهده می کنید



شکل 3-20

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 0.1λ 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.

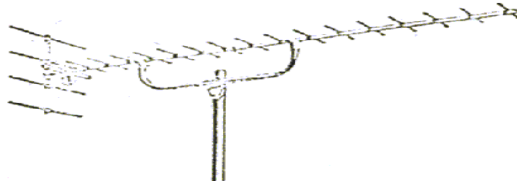
شکل (3-21)

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

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

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

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



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

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

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 [۴، ۲، ۱۰، ۹، ۸، ۶، ۵].

۳-۴-۴-۵ 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، به‌عنوان آنتن میله‌ای WHIP ربع موج نامیده می‌شود. این آنتن، بر روی سقف خودروها و موتورسیکلت‌ها نصب می‌شود. ساده‌ترین فرم یک آنتن $\frac{\lambda}{4}$ ، به‌صورت یک سیم عمودی است که هادی داخلی یک خط انتقال هم محور (کابل کوالسیال) 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 دایپل :

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

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

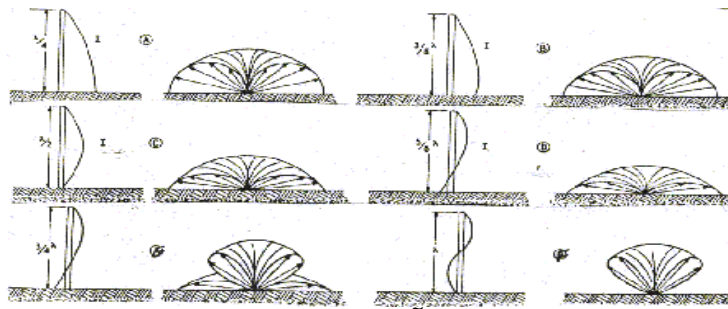
$$D_{\text{mono}} = \frac{1}{2} D_{\text{dipol}} \quad P_{\text{mono}} = \frac{1}{2} P_{\text{dipol}} \quad \text{سمت گرایی}$$

فرمول (۳-۱۴)



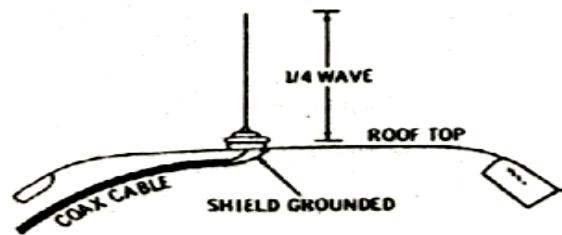
شکل (۳-۲۳)

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



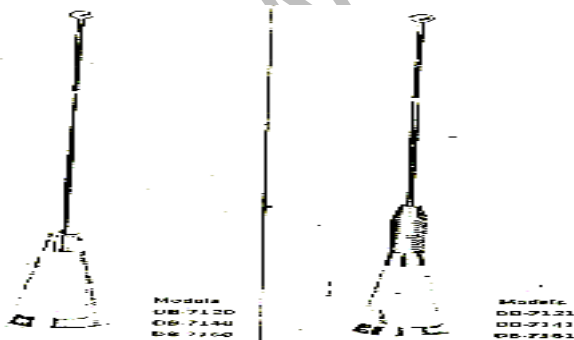
شکل (3-24) نمونه گلبرگ تشعشع آنتن‌های عمودی با طولهای مختلف

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 (3-24)

این طریقه نصب برای آنتن‌های میله‌ای در فرکانس ۱۵۰ مگاهرتز ($\frac{\lambda}{4} = 50 \text{ cm}$) و بالاتر مناسب است، زیرا در فرکانسهای پایین تر، طول آنتن زیاد می‌شود. برای فرکانسهای پایین تر، مثلاً در باند HF که آنتن $\frac{\lambda}{4}$ بین $\frac{2}{5}$ تا ۲۵ متر طول دارد، نیز می‌توان از آنتن WHIP به طول کمتر استفاده کرد، مشروط بر این که بین فرستنده و آنتن عمل تطبیق انجام شود. عمل تطبیق بین گیرنده و آنتن WHIP، کوتاه تر 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 پایینی از خودرو (مثلاً روی سپر یا گلگیر) بایست های 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، بطوری که بتوان آنها را بر روی سقف خودرو یا جای مناسب دیگری قرار داده از سیم پیچ پوپن یا سیم پیچ پیوسته استفاده می‌شود تا طول آنتن کوتاهتر شود. در آنتن‌های WHIP، سیم پیچ 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].



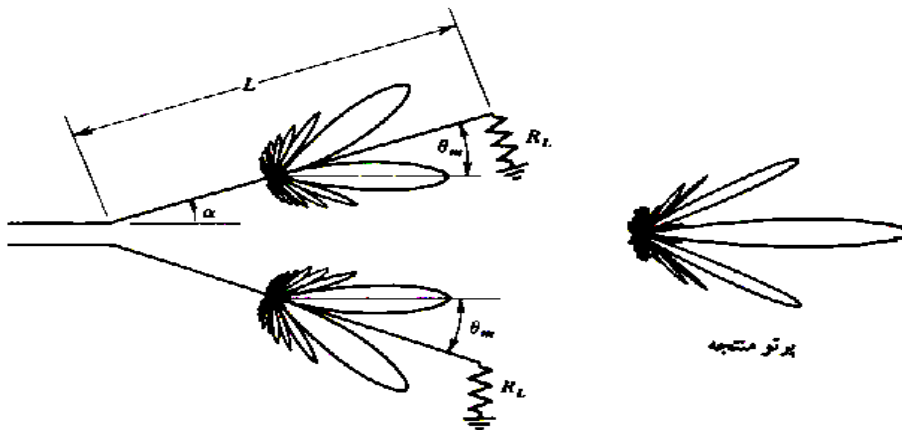
شکل (3-25) نمونه آنتنهای عمودی

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 داکتر تشعشع در یک جهت خاص خواهد بود. دو نمونه از این نوع، آنتن Vee و آنتن رومییک 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 توجیعی 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 ۵)) و ((۱۲ و ۴)) 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.



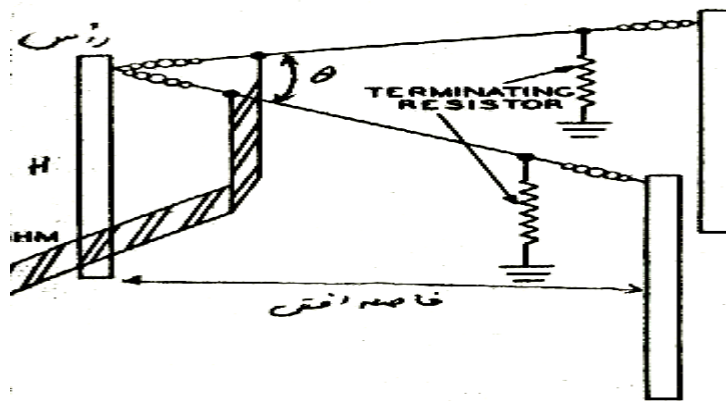
با جهت انتشار آن شکل (3-26) نمونه يك آنتن

اگر $2\alpha = \theta_m$ باشد حداکثر تشعشع و گلبرگ 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- توجیعی 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 حد اکثر تشعشع در جهت نیمساز زاویه بین دوسیم قرار می‌گیرد.

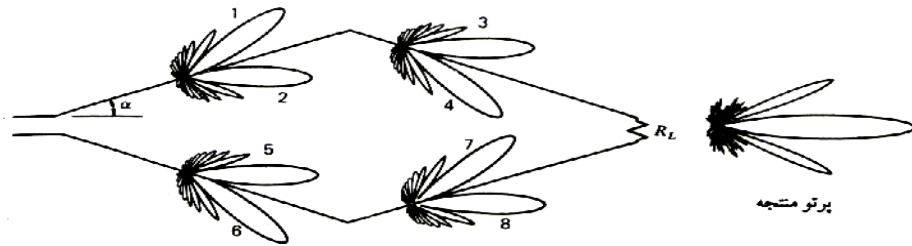
اگر یک مقاومت حدود ۳۵۰ اهم غیر اندوکتیو به انتهای هر قسمت سیم اتصال دهیم و به زمین وصل کنیم، در این حالت حداکثر تشعشع و یا دریافت امواج در جهت مقاومت‌های بار انتهایی خواهد بود. آنتن V چون در پهنای باند زیادی عمل می‌کند می‌تواند در باند VHF و UHF جایی که سیگنال به طور جهتی ارسال یا دریافت می‌شود (مثلاً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



با بار انتهایی V شکل (3-27) 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 رومییک (لوزی شکل)

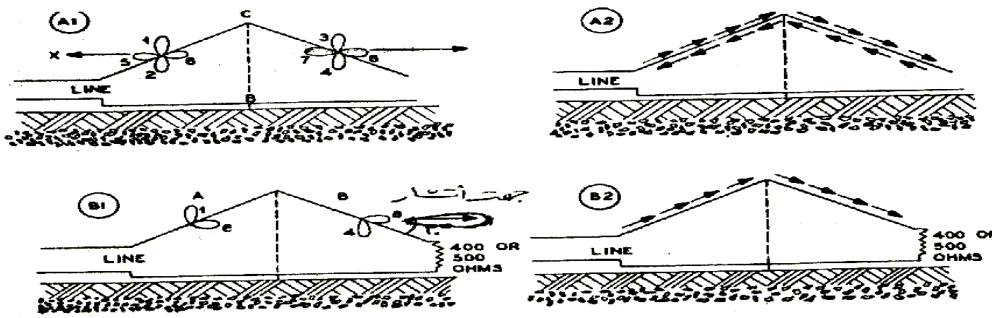
آنتنی است از نوع آنتن‌های سیم بلند که معمولاً برای ارتباطی با بهره و سمت‌گرایی بسیار عالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. و این به خاطر خصوصیتی است که آنتن رومییک دارد. طرح و ساختمان آن ساده بوده، دارای پهنای باند و قدرت انتشار زیادی است. رنج فرکانس کاری آن ۲ تا ۳۰ مگاهرتز، انتشار آن در جهت قطر طویل لوزی 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 رومییک در باند UHF روی بیشترین و کمترین فرکانس که نسبت $\frac{2}{1}$ را دارند بهره خوبی دارد. شکل (۲۸-۳) آنتن رومییک را مشاهده کنید.



شکل (3-28)

شکل (3-28) نمونه یک آنتن رومییک با گلبرگهای تشعشع در هر قسمت آن و جهت انتشار.

نوعی دیگر از آنتن رومییک آنتن نیم رومییک است که حد اکثر تشعشع آن در جهت مقاومت انتهایی یا پلاریزاسیون عمودی است. در رنج فرکانس ۳۰ تا ۷۰ مگاهرتز به کار می رود و عرض باند انتشار آن، تقریباً ۲۵ درجه در جهت مقاومت انتهایی است. وقتی مقاومت به زمین وصل می شود، جریان انعکاس نداریم، لذا در هر قسمت آنتن، گلبرگهای تشعشع در یک جهت بوده و گلبرگ هر دو قسمت طوری باهم ترکیب می شوند که انتشار در جهت مقاومت خواهد بود. شکل (3-29) را مشاهده کنید.

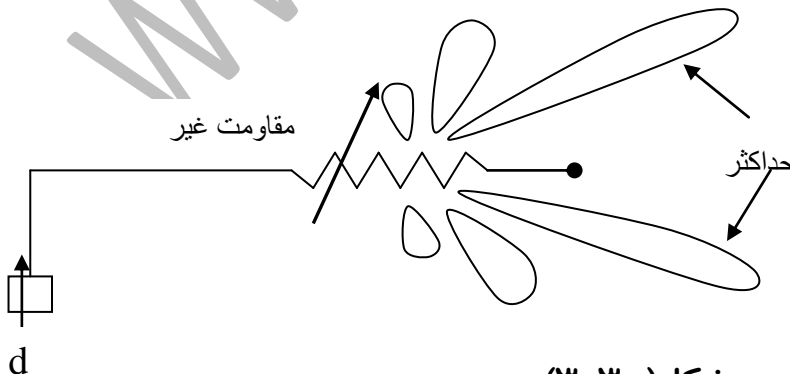


شکل (3-29)

شکل (3-29-A) نمونه آنتن نیم رومییک بدون بار انتهایی و شکل (3-29-B) نمونه یک آنتن نیم رومییک 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 می گردد. 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 می گردد.



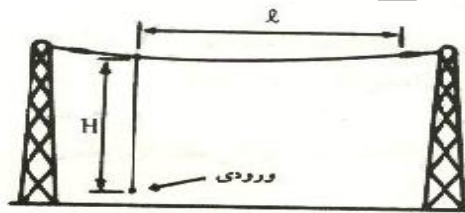
شکل (3-30)

این آنتن برای دریافت امواج زمینی با پلاریزاسیون عمودی و همچنین موج آسمانی با زاویه کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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 2λ 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 می‌دهند و آن را برای دریافت بهترین نسبت سیگنال به نویز تنظیم می‌کنند. 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 می‌کنند [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

۳-۴-۴-۸ آنتن L معکوس

آنتن تک سیم L معکوس آنتنی است با سیم بلند که برای کنترل و ارتباطات برج فرودگاهها به کار می‌رود. طرح و کاربرد آن در فرکانس متوسط، بدون این که احتیاج به دکل‌های 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 می‌کنید.



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 می‌گردد، ۵- نصب آن در محوطه باز صورت می‌گیرد. [۲، ۴، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰].

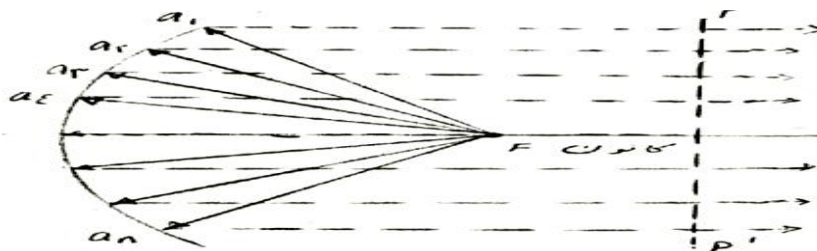
۳-۴-۴-۹ آنتنهای میکروویو

امواج با فرکانس بالا (از یک گیگا هرتز به بالا) پس از برخورد به مانع متفرق شده و به همه جهات پخش می‌شود از این خاصیت تفرق، برای ارسال امواج میکروویو به نقاط دوردست استفاده می‌گردد. برای این کار لازم است فرستنده بسیار قوی باشد تا امواج پس از برخورد به مانع (منعکس کننده که مانند فرستنده ثانوی عمل می‌کند) و پراکندگی، قدرت کافی برای رسیدن به نقاط دورتر را داشته باشند. آنتنهایی که دارای منعکس کننده هستند، و به این صورت عمل می‌کنند، به نام آنتنهای میکروویو معروفند که برای توسعه و افزایش شدت میدان الکتریکی از مجموعه آنتنها استفاده می‌شود. به این منظور منعکس کننده‌های 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)

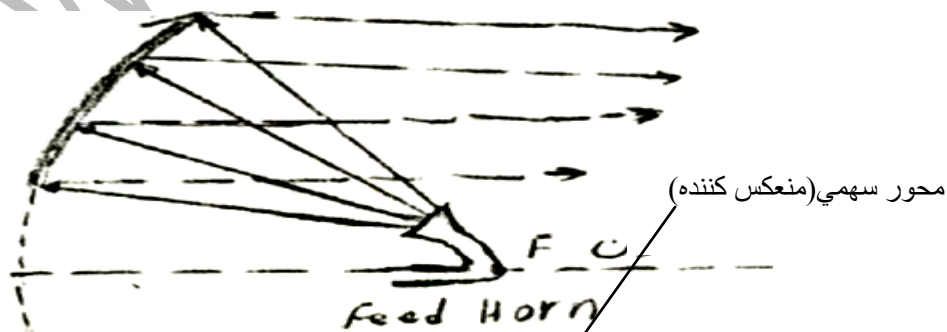
گین اینگونه آنتن‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

A_e = سطح موثر آنتن

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

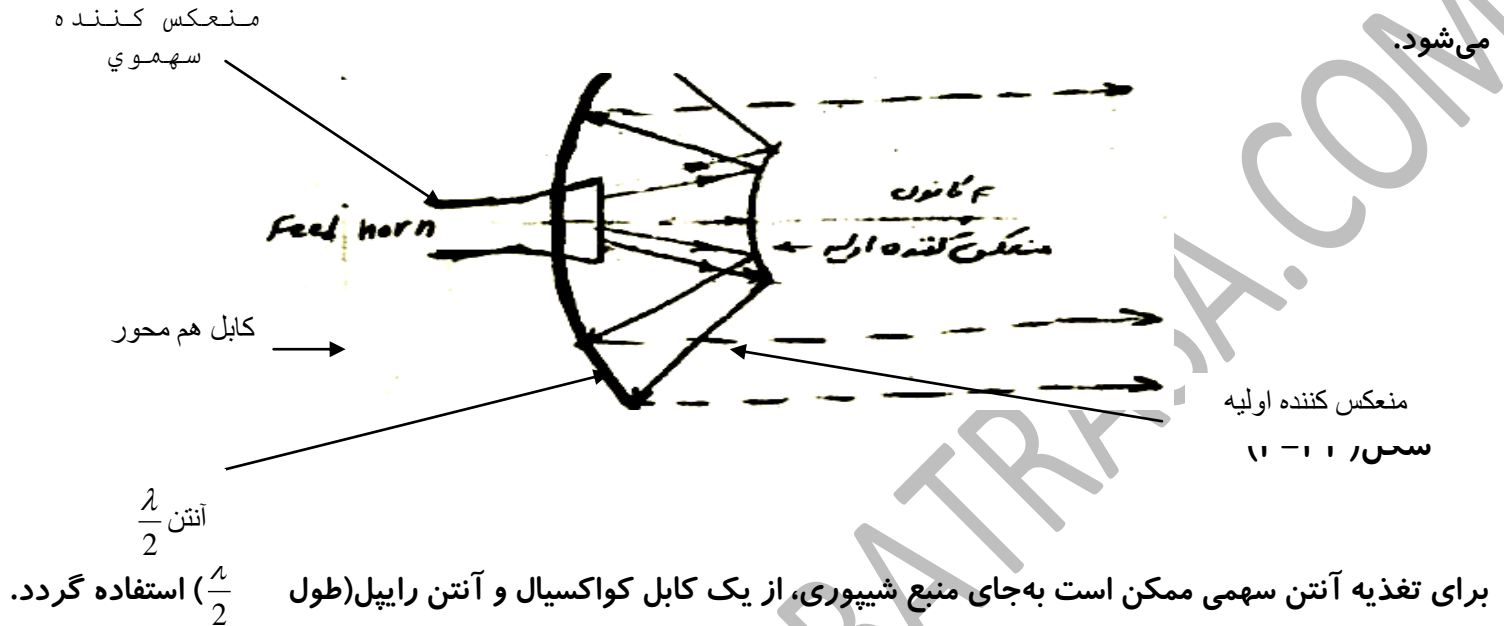
منبع اولیه انتشار که یک دایپل یا موجبر شیپوری است، در نقطه F انرژی فرستنده را از طریق کابل هم محور (کواکسیال) یا موجبر که از سوراخی در مرکز سهمی گذشته، دریافت و به سطح منعکس کننده می‌تاباند، قرار گرفتن منبع اولیه در راستای انتشار سهمی در شکل اشعه اختلالاتی ایجاد می‌کند. برای رفع مشکل فوق، موجبر شیپوری (تغذیه کننده) را در کانون سهمی در نظر گرفته. ولی منعکس کننده سهمی را قسمتی از سهمی 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)

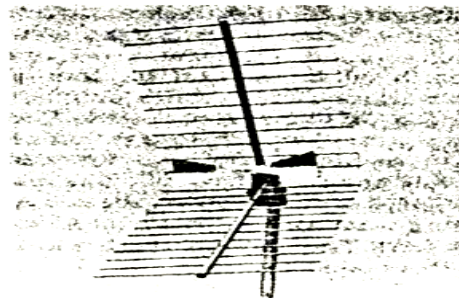
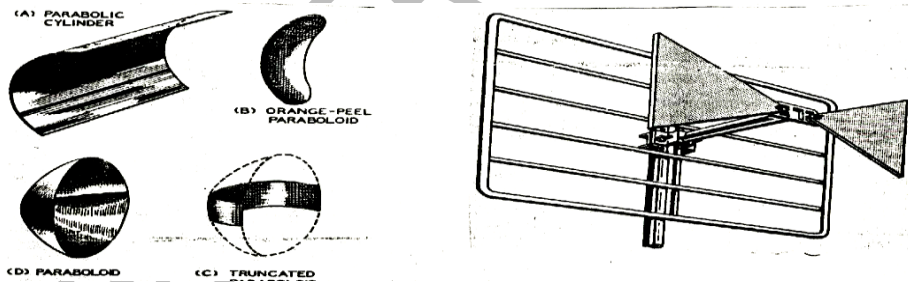
آنتنهای سهمی را با منبع‌های مختلفی می‌توان تغذیه کرد:

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 گرای 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 کوکسیال و آنتن رایپل (طول 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

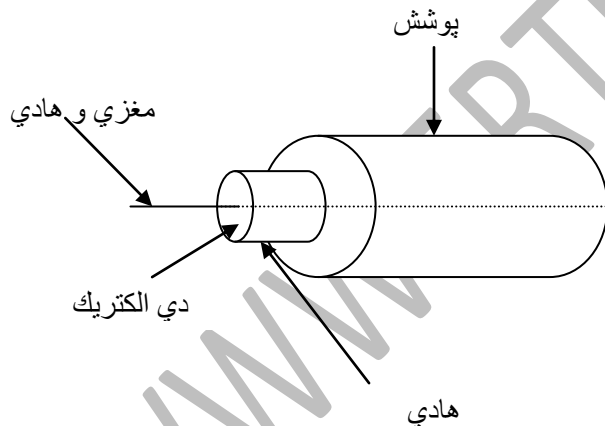
مبانی خطوط انتقال

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].

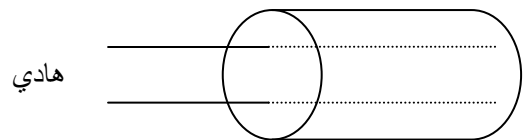
۴-۲ اصول کلی خط انتقال

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



شکل (۴-۲)

خط انتقال هم محور (غیر متعادل)



شکل (۴-۱)

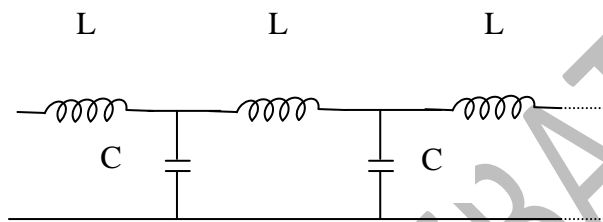
خط انتقال دو سیمه (متعادل)

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 رومی 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 بهره‌گیری 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] .

۳-۴ 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 نشستی دردی الکتریک) در جهت عرض (فاصله بین دو هادی) 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 الکتریسیته خوانده ایم، در نظر گرفت. چون در طول خط، توزیع گشته‌اند [۹] .

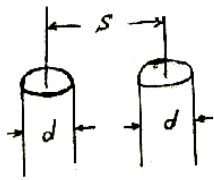
۴-۴ امپدانس مشخصه خط انتقال

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 امپدانسی که در ورودی خط، در حالتی که خط دارای طول بی‌نهایت (زیاد) باشد، اندازه‌گیری 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.

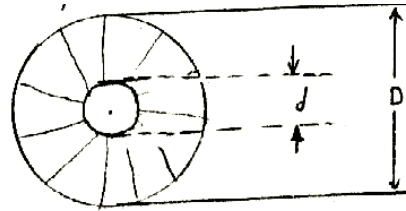
$$\text{فرمول (۱-۴)} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{بر حسب اهم})$$

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، می توانیم 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 دو نمونه خط انتقال که در شکل زیر نشان داده شده به صورت فرمولهای زیر محاسبه می شوند.



(۴-۵) خط انتقال دوسیمه



(۴-۴) خط انتقال کابل هم محور

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

در اینجا (E) ثابت دی الکتریک عایق بین دوهادی است، چون خط دوسیمه معمولاً در هوا کشیده می شود. 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 می شد) 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 می باشد [۹].

۴-۵ تلفات در خطوط انتقال

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

۴-۵-۱ اتلاف تشعشی

در موقعی که فاصله بین هادیها در حدود کسری از طول موج (حدود نصف طول موج) باشد، به وقوع می پیوندد. اتلاف تشعشی را به سختی می توان بر آورد نمود. این تلفات با افزایش فرکانس افزایش می یابد. 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 می باشد. این تلفات با افزایش فرکانس سبب اثر پوستی (جریان در سطح خارجی هادی نیز به وجود می آید) شده و افزایش می یابد.

۴-۵-۳ گرمایش دی الکتریک

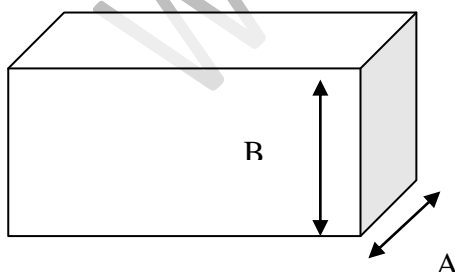
این تلفات متناسب با ولتاژ در دوسر دی الکتریک بوده و در نتیجه با افزایش ولتاژ دوسر دی الکتریک مقدار این تلفات افزایش می یابد. با افزایش فرکانس این تلفات افزایش پیدا می کند. دو تلفات هدایتی و گرمایشی دی الکتریک متناسب با طول خط است و معمولاً کارخانه های سازنده مجموع این دو تلفات را بر حسب دسیبل در متر عرضه می کنند.

۴-۵-۴ تطبیق امپدانس

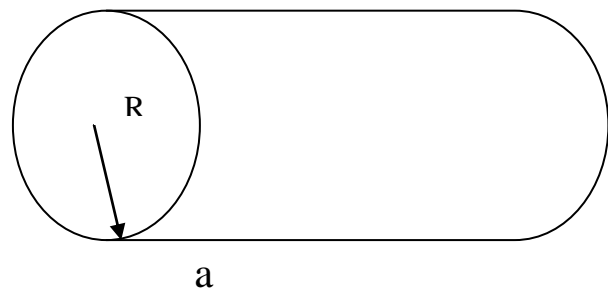
اگر خط انتقالی به امپدانس مشخصه خودش وصل شود، تمام فرکانسها که توسط مولد به یک طرف آن اعمال می‌گردد، توسط مقاومت بار در دو طرف دیگر جذب خواهد شد و بالعکس. بطور مثال، اگر یک فرستنده با خط انتقال ۳۰۰ اهم به یک آنتن با امپدانس ۳۰۰ اهم وصل شود، تمام سیگنال که توسط خط به آنتن می‌رسد، جذب آنتن شده و تشعشع 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 برحسب دسیبل بر متر در فرکانس مربوطه ارائه می‌گردد. حالت عدم تطبیق، ضریب تضعیف را افزایش می‌دهد. ضریب تضعیف تابعی از قطر هادی‌ها 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 ۱۸GHZ 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 پایینتر 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 جریانه 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 (۴-۷) انتشار امواج در یک موجبر

انرژی سیگنال توسط یک پوپ که داخل موجبر قرار گرفته است، تأمین می‌گردد. این پوپ به منزله 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.

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

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، قری تر از شدت میدان در انتشار فرکانسهای پایین تر می‌باشد.

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

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 گاهاً تداخل چند مسیر نیز نامیده می‌شود.

در محل هایی که هواپیما نزدیک سطح زمین حرکت می کند، 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

نوع امواج	۳kHz	۳۰kHz	۳۰۰kHz	۳MHz	۳۰MHz	۳۰۰MHz	۳GHz	۱۰GHz	۳۰GHz	۳۰۰GHz
طول موج	۱۰۰km	۱۰km	۱۰۰۰m	۱۰۰m	۱۰m	۱m	۱۰cm	۱cm	۱۰mm	۱mm
نام باند	امواج بیامریک VLF Very Low Fr.	امواج کمترین LF Low Fr.	امواج متوسط MF Medium Fr.	امواج کانتریک HF High Fr.	امواج تریک VHF Very High Fr.	امواج اسی تریک UHF Ultra High Fr.	امواج سانی تریک SHF Super High Fr.	امواج میلی تریک EHF Extremely High Fr.		
نوع انتشار	امواج زمینی - امواج دانی	امواج زمینی - امواج آسمانی	امواج زمینی - امواج آسمانی	امواج زمینی - امواج آسمانی	امواج آسمانی - امواج مستقیم	امواج آسمانی - امواج مستقیم	امواج آسمانی - امواج مستقیم	امواج آسمانی - امواج مستقیم		
کاربرد	کاربرد استاندارد و تلگراف	هدایت هواپیما - تلگراف	پخش رادیویی - پخش رادیویی - پخش رادیویی	پخش رادیویی - پخش رادیویی - پخش رادیویی	پخش رادیویی بین المللی - کشتیرانی	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا		
امروز	کشتیرانی - زمرد رادیویی و سونار	پخش رادیویی - بین المللی - کشتیرانی	پخش رادیویی - پخش رادیویی - پخش رادیویی	پخش رادیویی - پخش رادیویی - پخش رادیویی	پخش رادیویی بین المللی - کشتیرانی	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا	ارتباط بین رستل تیلی رادیویی - پخش رادیویی FM معمولی - با کیفیت بالا		
ملاحظات	پرتودت تا چند نگارن - حجم بزرگ فرستنده و آنتن - کمبود ظرفیت به دلیل - کمی پهنای باند	قدرت فرستنده تا چند صد KW - موج آسمانی - روز تضعیف زیاد - شب: نیدینگ در مسافت - متوسط - مطلوب برای مسافت بالا - آنتن های بزرگ تا ۱۰۰ متر	مدیونیک در - مسافت متوسط به دلیل - تداخل امواج زمینی و آسمانی - رستن های رطوبی	امواج زمینی - با تضعیف زیاد - امواج آسمانی - امکان انتشار مطلوب	تضعیف دانه موج با - عکس فاصله - تابش نماندن پولا ریسون	تضعیف زیاد در جو - انعکاس شدید روی موانع - دارای تضعیف بالا	انعکاس شدید روی موانع - جذب شدید انرژی توسط - باران برف و ابر ... - کاهش کیفیت ارتباط	انعکاس خیلی قوی - روی موانع حتی - با ابعاد بسیار کوچک		

1. myrametric

جدول مقادیر برخی ثابت ها و کمیت های جهانی

مفهوم	نماد	پیشوند	ارزش عددی
(یک کوئینتون)	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 کوینتونیم)	a	(آتو)	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$

مثالها: ۱ کیلو (۱Km) = ۱۰۰۰ متر (m)
 ۱ میکرو متر (۱ μ m) = یک میلیونیم متر
 ۱ کیلو وات (۱KW) = ۱۰۰۰ وات (W)
 ۱ امیلی وات (۱MW) = یک هزارم وات

جدول پیشوندهای اعداد

مقدار دقیق تر	مقدار اسمی	علامت یا اختصار	کمیت
$1,496 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8 km$	AU	واحد نجومی
$1,38062 \times 10^{-23}$	$1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$	k	ثابت بولتزمن
$5,98 \times 10^{24}$	$6,1 \times 10^{24} kg$		جرم زمین
$-1,602 \times 10^{-19}$	$6,27 Mm$		شعاع زمین (متوسط)
$1,602 \times 10^{-19}$	$-1,60 \times 10^{-19} C$	e	بار الکترون
$1,10906 \times 10^{-31}$	$9,11 \times 10^{-31} kg$	m	جرم الکترون در حال سکون
$1,75882 \times 10^{-36}$	$1,76 \times 10^{-36} Ckg^{-1}$	e/m	نسبت بار-جرم الکترون
طبق تعریف 10^{-26}	$10^{-26} Wm^{-2} Hz^{-1}$	Jy	چگالی شار (توان)
	$1,672 \times 10^{-27} kg$		اتم هیدروژن (جرم)
	$1420,405 MHz$		فرکانس خط هیدروژن در حال سکون
	$300 Mm$		نورتابه
299,7925	$300 Mms^{-1}$	c	سرعت نور
$9,4605 \times 10^{17}$	$9,46 \times 10^{17} km$	LY	سال نوری
			لگاریتم اعشاری
2,718282	2,72	e	لگاریتم طبیعی
-0,36788	0,368	1/e	پایه لگاریتم (عدد نپرین)
$\ln x = 2,302585 \log x$	$\ln x = 2,3 \log x$		عکس لگاریتم (عدد نپرین)
$\log x = 0,434294 \ln x$	$\log x = 0,43 \ln x$		تبدیل لگاریتم
	$380 Mm$		فاصله ماه (متوسط)
	$6,7 \times 10^{24} kg$		جرم ماه
	$1,738 Mm$		شعاع ماه (متوسط)
$3,10806 \times 10^{17}$	$3,1 \times 10^{17} km$	pc	پارسک
3,2615	$3,26 Ly$	pc	پارسک
3,08569	$3,08 \times 10^6 AU$	pc	پارسک
400π (مقدار دقیق)	$1260 nHm^{-1}$	μ_0	ثابت مغناطیسی خلأ
$1,804185 = 1/\mu_0 c^2$	$1,804 pFm^{-1}$	ϵ_0	ثابت الکتریکی خلأ
3,1415927	3,14	π	عدد پی
$6,6262 \times 10^{-34}$	$6,62 \times 10^{-34} Js$	h	ثابت پلانک
$1,6726 \times 10^{-27}$	$1,67 \times 10^{-27} kg$		جرم پروتون در حال سکون
0,7,30	0,7,30	rad	رادیان
$376,7304 = \mu_0 c$	$376,7 (\approx 120 \pi) \Omega$	Z	امپدانس ذاتی فضا
$4\pi = 12,5664$	$12,6 sr$		زاویه فضایی کره
41252,96	$41252 deg^2$		زاویه فضایی کره
$3,1415927 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-2} sr$	deg ²	مربع درجه
$5,6692 \times 10^{-8}$	$5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-2}$		ثابت استفان-بولتزمن
$(180/\pi)^2 = 3282,806$	$3283 deg^2$	sr	استرادیان (مجذور رادیان)
$1,496 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8 km$	AU	فاصله خورشید
$1,99 \times 10^{30}$	$2,0 \times 10^{30} kg$	M_{\odot}	جرم خورشید
365,25	$365,25 days = 3,1556925 \times 10^7 s$	R_{\odot}	شعاع خورشید (متوسط)
			سال (استوا)

f 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) یکمک مقدار دقیق μ_0 و مقدار اندازه گیری شده c (سرعت نور) تعیین می شود.

جدول مشخصات الکتریکی برخی از مواد

ثابت دی الکتریک نسبی		ضریب هدایت $\sigma, \Omega m^{-1}$	مقاومت دی الکتریک $MV m^{-1}$	ماده
ϵ'_r	ϵ''_r			
۱,۰۰۰۰۶	۰	۰	۳	هوا
۱	۰	$2,5 \times 10^{-7}$	—	آلومینیم
۵	۰,۰۰۵	10^{-12}	۲۵	باکلیت
—	—	3×10^2	—	کربن
۱	۰	$5,8 \times 10^{-7}$	—	مس
۶	۰,۰۰۳	10^{-12}	۳۰	شیشه
—	—	۱۰۵	—	گرافیت
۶	۰,۰۲	10^{-15}	۲۰۰	میکا
۲,۲	۰,۰۰۰۰۲	10^{-14}	۱۵	روغن معدنی
۳	۰,۰۱	—	۵۰	کاغذ
۲,۱	۰,۰۰۰۰۴	$\sim 10^{-15}$	۲۰	پارافین
۳,۴	—	—	—	پلکسی گلاس
$\sim 1,05$	—	—	—	پولی فوم
۲,۷	۰,۰۰۰۰۲	10^{-16}	۲۰	پولی استیرن
۲,۷	—	—	—	PVC
۵	۰,۰۰۰۴	—	—	چینی
$\sim 1,1$	—	—	—	PVC منبسط شده
۵	۰,۰۰۰۱	10^{-12}	۳۵	کوارتز
۵	۰,۰۰۲	10^{-12}	۲۵	لاستیک
۱۰۰	۰,۰۰۲	—	—	دی اکسید تیتانیوم
۱,۵	۰,۰۵ - ۰,۰۰۰۰۳	—	—	برف تازه
۱۴	—	5×10^{-2}	—	خاک رس
۱۰	—	2×10^{-2}	—	ماسه
—	—	10^{-2}	—	سنگ آهک
۷	—	—	—	تخته سنگ
۱,۰۳	—	—	—	استیروفوم
۴	—	2×10^{-2}	—	زمین
۱	۰	۰	—	خلأ
۲,۲	۰,۰۰۰۰۳	—	—	وازلین
۲,۱	۰,۰۰۰۵	10^{-15}	۶۰	تفلن
۸۰	—	10^{-2}	—	آب
۸۰	—	10^{-2} تا 10^{-2}	—	آب تازه
۸۰	—	۴ تا ۵	—	آب دریا
۲	۰,۰۰۴	—	—	چوب

† 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	$\frac{\gamma}{w} R_s$	$\frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	R
H/m	$\mu \frac{d}{w}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$	$\frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)$	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	$\frac{\gamma \gamma \gamma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{d}{w}$ ($w \gg 2d$)	$\frac{\gamma \gamma \gamma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \left(\frac{b}{a} \right)$	$\frac{\gamma \gamma \gamma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \left(\frac{D}{a} \right)$ ($D \gg a$)	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 چشم پوشی 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 می کنند.

WWW.V

جدول طیف فرکانس امواج الکترومغناطیسی از DC تا اشعه گاما

مثال برای حدود ابعاد	$\lambda = c/f$ طول موج	$f = c/\lambda$ فرکانس
- قطر زمین	10^6 m	1 Hz - { 1-300 } Hz { 10-30 } 100-3
- قله اورست	10^3 m	10^3 Hz - { 1-300 } kHz { 10-30 } 100-3
- درخت تنومند - انسان	1 m	10^6 Hz - { 1-300 } MHz { 10-30 } 100-3
- خط هیدروژن خط O_2 خط مولکول دانه شن	10^{-10} m	10^9 Hz - { 1-300 } GHz { 10-30 } 100-3
- میکروب	10^{-6} m	10^{12} Hz - { 1-300 } THz { 10-30 } 100-3
- ویروس	10^{-8} m	10^{15} Hz - { 1-300 } PHz { 10-30 } 100-3
- فاصله اتمی	10^{-10} m	10^{18} Hz - { 1-300 } EHz { 10-30 } 100-3
- اتم	10^{-12} m	10^{21} Hz - { 1-300 } { 10-30 } 100-3
- هسته اتم	10^{-14} m	{ 1-300 } { 10-30 } 100-3

رادیو
 مادون قرمز
 مرئی
 ماوراء بنفش
 اشعه X-
 اشعه γ

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