به نام خدا

الکترونیک و فاصله یاب

تالیف:

مهندس محمدرضا افشار

فهرست

فصل اول "مقدمه و تاریخچه"

۱_۱ مقدمه
۱-۲ طبقه بندی طولها
۱-۳ تاریخچه
۱-۴ اصول اولیه کار طولیابها

فصل دوم " امواج الکترومغناطیس"

۲-۱ مقدمه
۲-۲ معادلات ماکسول
۲-۳ هندسه امواج
۲-۴ معادله حرکت موج
۲-۵ طیف امواج الکترومغناطیس
۲-۶ سرعت امواج الکترومغناطیس
۲-۷ ضریب شکست
۳-۸ تصحیح صول

فصل سوم " مدولاسیون"

۳-۱ مقدمه
۳-۲ روشهای مدولاسیون
۳-۳ منابع موج و روشهای مدولاسیون
۳-۴ ملاحظاتی درباره موج

فصل چهارم " اصول اندازه گیری فاصله"

۴-۱ مقدمه
۴-۲ روش اختلاف باز
۴-۳ روش پالس

فصل پنجم " الکترونیک طولیابها"

۵-۱ مقدمه
۵-۲ یادآوری برخی اصول اولیه
۵-۳ اختلاف فازیاب الکترومکانیکی (ممیز فاز)
۵-۴ نیمه هادیها- دیودها
۵-۵ نوسانسازها (اسیلاتور)
۵-۶ منبع اشعه لیزر
۵-۷ آنتن ها

فصل ششم " خطاها و ملاحظات هندسی"

۶-۱ مقدمه
۶-۲ تعاریف اولیه
۶-۳ خطاهای موثر در عملیات صحرایی
۶-۴ تصحیحات هندسی
۶-۵ ملاحظات هندسی نصب طولیاب روی تئودولیت
۶-۶ پری آنالیز در طولیابها و توتال استیشن ها

فصل اول

مقدمه و تاریخچه

مقدمه

اندازه گیری طول و زاویه اساس اکثر عملیات نقشه برداری را تشکیل می دهد. اندازه گیری مستقیم فاصله یکی از دشوارترین عملیات از نقطه نظر اجرایی است؛ خصوصاً اینکه دقت بالایی هم مورد نیاز باشد. در نتیجه روش های مختلفی برای اندازه گیری غیرمستقیم طول ابداع شده است که یکی از آنها بکارگیری طولیابهای الکترونیکی[۱] است.

امروزه عملاً نوارهای مترکشی و روشهای دیگر اندازه گیری غیرمستقیم طول مانند میرپارالاکتیک و غیره در غالب عملیات نقشه برداری جای خود را به طولیابهای الکتریکی داده اند. همانگونه که با ساخت نوارهای فلزی مترکشی، زنجیرهای مساحی، واحدهای مربوطه و قواعد استفاده از آنها رفته رفته منسوخ شدند، با پیدایش طولیابهای الکترونیکی نیز سرنوشتی مشابه برای نوارهای مترکشی رقم خورد.

با پیشرفت علوم الکترونیکی، تجهیزات نقشه برداری نیز چهره کاملاً جدیدی پیدا کردند. اما ارمغان تکنولوژی نوین بیش از آنکه بر اندازه گیری زاویه اثر بگذارد به طور فاحشی نحوه اندازه گیری طول را دگرگون کرد.

روند پیشرفت فنی تجهیزات نقشه برداری با ساخت طولیابهای الکترونیکی پایان نیافت، بلکه با ساخت طولیابهای نسبتاً کوچک، امکان الحاق آنها به تئودولیتهای اپتیکی و الکترونیکی فراهم آمد. محصول جدید را که توتال استیشن[۲] می نامند، به تدریج در حال جایگزینی طولیابهای منفرد است. با روند موجود، یعنی با عرضه رو به تزاید سیستم های تعیین موقعیت جغرافیایی (جی پی اس)[۳] از یک سو و ساخت توتال استیشن ها از سوی دیگر، خط تولید اکثر طولیابهای مستقل و منفرد[۴] رو به تعطیلی دارد.

تکنولوژی ساخت طولیابهای الکترونیکی در انحصار کشورهای پیشرفته صنعتی قرار دارد و از اینرو بنا به علل اقتصادی و فنی تولید اینگونه تجهیزات در اکثر کشورهای دیگر مقرون به صرفه نیست. در حال حاضر کشورهای ایالات متحده آمریکا، ژاپن، سوئد سویس، آلمان، فرانسه، بریتانیا و آفریقای جنوبی و روسیه عمده ترین سازندگان طولیابهای الکترونیک هستند. با افزایش موج رقابتهای تجاری چندی است شرکت های مشهور اقدام به انتقال کارخانجات خود به چین کرده اند. به این ترتیب چین نیز به جرگه تولید کنندگان طولیابهای الکترونیکی پیوسته است.

۲ ـ طبقه بندی طولیابها

طولیابها را می توان به روشهای مختلف طبقه بندی کرد. یکی از این راهها می تواند براساس طول موجی باشد که آنها ارسال و دریافت می کنند. به این ترتیب این طولیابها در دسته بزرگ قرار می گیرند:

---

۱. EDM: Electronic Distance Meter

۲. Total Station

۳. GPS: Global Positioning System

۴. خصوصاً انواع مایکروویو که دیگر از خط تولید اکثر تولیدکنندگان خارج شده اند.

الف- *طولیابهای الکترواپتیکی:* **به آندسته از دستگاه ها اطلاق می شود که از نور یا محدوده مادون قرمز مجاور نور مرئی و یا لیزر استفاده می کنند.**

ب- *طولیابهای میکروویو (و رادیوئی):* **به آندسته از دستگاهها اطلاق می شود که از امواج رادیوئی و مایکروویو (با فرکانس های به مراتب پایین تر نسبت به دسته اول) استفاده می کنند.**

راه دیگر، دسته بندی طولیابها بر پایه برد مؤثر آنهاست. بر این اساس می توان آنها را در دو گروه بزرگ طبقه بندی کرد.

الف- *کوتاه برد:* **دستگاههای این دسته بردی حداکثر ۵ کیلومتر دارند و عموماً اندازه آنها در حدی است که می توان آنها را بر روی یک تئودولیت نصب کرد. محدوده فرکانسی آنها در محدوده مادون قرمز و نور مرئی قرار می گیرد. اکثراً کاربرد این دستگاهها در کارهای نقشه برداری موضعی است.**

ب- *متوسط/دوربرد*: حداکثر برد این دستگاهها قریب به ۱۰۰ کیلومتر می رسد ولی برد عملیاتی آنها در حد ۴۰- ۵۰ کیلومتر قرار دارد. معمولاً حجیم و سنگین هستند و بیشتر برای عملیات ژئودزی، آبنگاری و اقیانوس نگاری[۵] و یا ناوبری دریایی- هوایی استفاده می شود. سیستمهای که از لیزر استفاده می کنند اگر چه در طبقه بندی قبل در میان سیستمهای الکترواپتیکی قرار گرفتند، لیکن نظر به برد آنها در این نوع طبقه بندی در کنار سیستم های میکروویو قرار می گیرند.

۳ - تاریخچه

تسلا[۶] در سال ۱۸۸۹ استفاد از بازتاب امواج میکروویو را جهت اندازه گیری طول پیش بینی کرده بود. نخستین ثبت اختراع در طولیاب با کاربرد امواج الکترومغناطیسی در سال ۱۹۲۳ توسط لووی[۷] انجام گرفت. نخستین طولیاب مایکروویو که براساس اصول تداخل کار می کرد در سال ۱۹۲۶ سه دانشمند روسی بنامهای شگولف، برورشکو و ویلر[۸] در لنینگراد ساخته شد.

فاصله یابی الکترونیکی غیر نقشه برداری در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی ابداع و به طور عملی برای نخستین بار در طول جنگ جهانی دوم توسط نیروهای نظامی آلمان و بریتانیا با کمک امواج رادار[۹] انجام می گرفت. نحوه اندازه گیری فاصله به این ترتیب بود که امواج رادیوئی پس از برخورد با بدنه فلزی هواپیماها به فرستنده باز می گشت و بر مبنای جهت آنتن و زمان رفت و برگشت موج امکان تعیین فاصله، جهت حرکت و سرعت تقریبی هواپیمای مورد نظر میسر می شد. دقت حاصله اگر چه برای رهگیری هوایی و امور نظامی کفایت می کرد، اما در حد دقتهای مورد توجه عملیات نقشه برداری نبود.

همانطور که در قسمت عنوان شد، دستگاههای طولیاب الکترونیکی در دو دسته بزرگ دستگاههای الکترواپتیکی و مایکروویو/ رادیوئی طبقه بندی می شوند. لذا از نقطه نظر تاریخی نیز تحولات انجام گرفته در این دو دسته به طور جداگانه بررسی می شود. با توجه به تقدم و تأخر زمانی ابتدا تاریخچه سیستمهای الکترواپتیکی ذکر می شوند.

در زمینه طولیابهای با کاربرد نقشه برداری، در سال ۱۹۳۶ سه دانشمند روسی به نامهای لبدیف، بالاکوف و وافیادی[۱۰] از انستیتو اپتیک اتحاد جماهیر شوروی مدعی ساخت نخستین طولیاب الکترواپتیکی دنیا شدند. در پی آن در سال ۱۹۴۰،

---

۵. Hydrograph & Oceanography
۶. N. Tesha دانشمند آمریکایی یوگسلاوی الاصل
۷. Lowy
۸. Schegolew, Boruschko, Viller
۹. RADAR: Radio Detection And Ranging بمعنی ردیابی و تعیین فاصله رادیوئی
۱۰. Lebedew, Balaakoff, Wafiadi

هوتـــــــــــــــــــــــــل[۱۱] آلمـــــــــــــــــــــــــــــانی مقاله ای را منتشر کرد که در آن از یک سلول کر[۱۲] در بخش ارسال و یک فوتولوله[۱۳] در بخش دریافت استفاده شده بود. این مقاله موجب شد تا دانشمند سوئدی اریک برگشترند[۱۴] برانگیخته شد تا براساس این مقاله آزمایشاتی را در زمینه اندازه گیری سرعت نور انجام دهد. دستگاه ساخته او در سال ۱۹۴۳ تکمیل شد و ژئودیمتر[۱۵] نام گرفت.

در آن زمان تعیین دقیق سرعت نور مورد توجه بسیاری از دانشمندان بود و در وهله اول تصور نمی شد این وسیله کاربردی در نقشه برداری پیدا کند. اما در سال ۱۹۴۷، برگ اشترند به کمک شرکت آگا ساخته اش را به صورت یک محلول تجاری بعنوان نخستین طولیاب تجاری جهان با نام ان ای اس ام- ۲[۱۶] به بازار فروش ارائه کرد. این دستگاه با استفاده از نور مرئی قادر بود فواصل تا ۴۰ کیلومتر را (فقط در شب) اندازه گیری کند. از آن به بعد شرکت آگا- ژئودیمتر همواره با ساخت دستگاه های جدیدتر در ردیف شرکتهای معتبر سازنده تجهیزات الکترونیکی نقشه برداری قرار داشته است.

رخداد مهم دیگر در زمینه دستگاههای الکترواپتیکی در سال ۱۹۵۴ اتفاق افتاد و آن کشف تکنیک هترودین[۱۷] بود که امکان تعیین اختلاف زاویه فاز را تحت فرکانسهای پایینتر ممکن ساخت. نخستین دستگاهی که از این روش استفاده کرد دستگاه ژئودیمتر مدل ؟ بود. سیستمهای لیزری از سال ۱۹۶۸ اندک اندک در میان طولیابهای الکترواپتیکی ظاهر شدند و نخستین آنها ژئودیمتر مدل ۸ با برد ۶۰ کیلومتر بود.

اما نخستین طولیاب ساخته شده براساس استفاده از امواج مایکروویو و اندازه گیری اختلاف فاز توسط دکتر وادلی[۱۸] در سال ۱۹۵۴ ساخته شد.

تا آن زمان برای حصول دقت و برد بالای سیستمهای الکترواپتیکی اندازه گیری طول می بایست الزاماً در شب انجام می گرفت که با استفاده از امواج مایکروویو این اشکال مرتفع شد. در سال ۱۹۵۷، دکتر وادلی ساخته اش را در آفریقای جنوبی به صورت تجاری با نام تلورومتر[۱۹] عرضه کرد که بلافاصله جهت شبکه درجه یک ژئودزی استرالیا بکار گرفته شد. این ساخته با استفاده از امواج نامرئی مایکروویو[۲۰] به بردی معادل ۸۰ کیلومتر دست یافت. شرایط محیطی از قبیل شب و روز و حتی مه تأثیر اندک و یا حداقل اثر قابل محاسبه ای داشت. تلورومترها کاربردی وسیع در عملیات ژئودزی یافتند و بعد از مدتی به همین سبب به هر طولیاب الکترونیکی که از امواج مایکروویو استفاده می کرد به اشتباه تلورومتر نام می دادند. حتی اگر ساخت شرکت دیگری مانند زیمنس[۲۱] بود! باید توجه داشت که تلورومتر تنها یک نام تجاری است.

در اواخر دهه ۱۹۶۰ استفاده از لیزر در محدوده امواج مایکروویو نیز عملی شد و با پیشرفت فنون الکترونیکی امکان ساخت طولیابهای جمع و جورتری مانند سی ای ۱۰۰۰ ساخت شرکت تلورومتر فراهم شد.

شوق نقشه بردارها در نتیجه امکان اندازه گیری مستقیم فواصل طولانی و رهایی از کار توانفرسای کشیدن نوارهای مترکشی و تمهیدات دست و پاگیر حصول دقتهای مورد نیاز بسیار زیاد بود. لذا این امر باعث شد تا در روزهای اولیه طولیابهای

---

۱۱. Huttle

۱۲. Keer Cell: در فصول آینده مورد بحث قرا رمی گیرد.

۱۳. Phototube: در فصول بعد معرفی خواهد شد.

۱۴. Erik Bergstrand

۱۵. Geodimeter: Geodetic Distance Meter

۱۶. NASM

۱۷. Heterodyne technique: در فصول بعد مورد بحث قرار می گیرد.

۱۸. Dr. T.L. Wadley

۱۹. Tellurometer

۲۰. در فصول بعد خصوصیات این امواج بررسی می شود.

۲۱. امروزه این رسم غلط در اطلاق نام تجاری دیستومات شرکت ویلد (لایکا) به کلیه طولیابها و بعضاً طولیابهای مادون قرمز دیگر شرکتها تکرار می شود.

الکترونیکی، به خستگی ناشی از محاسبات عدیده برای استخراج مقدار طول از میان انبوهی از اعداد مشاهداتی توجه چندانی نشود. اما بزودی نیاز به افزایش دقت و فزونی سرعت اندازه گیری و حذف روشهای مطول محاسبه طول به امری اجتناب ناپذیر جلوه گر شد و کار تا آنجا پیش رفت که امروزه اغلب دستگاهها تنها با زدن یک کلید، طول تصحیح شده را بدست می دهند.

در اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی، تکنولوژی ساخت نیمه هادیها و در پی ساخت آن ساخت مدارهای مجتمع یا (آی سی) ها[۲۲] باعث شد تا شرکتها موفق به تولید انبوه طولیابهای کوچک الکترونیک شوند. به این ترتیب دستگاههایی که تنها کاربردی محدود در زمینه ژئودزی داشتند و فقط توسط کاربران ماهر قابل استفاده بودند، کاربردی وسیع و عام تر یافتند. دیگر نتیجه موج نوین الکترونیک این بود که تعداد سازندگان طولیابهای الکترونیک که زمانی از تعداد انگشتان یک دست فراتر نمی رفت به یکباره به بیش از دهها شرکت افزایش یابد. در فصول بعد ضمن آشنایی با تعداد بیشتری از دستگاههای طولیاب الکترونیکی، تاریخچه هر یک به تفضیل ذکر خواهد شد.

۲ ـ اصول اولیه کار طولیابها:

گر چه برای درک اصولی و عمیق کارکرد یک طولیاب باید اطلاعاتی در زمینه فیزیک، الکترونیک، مخابرات و .... داشت، لیکن آگاهی از اصول کار دستگاههای طولیاب بشکلی کلی حتی با دانش و علم دروس دبیرستانی میسر است. لذا قبل از آنکه اساس اصلی ترین روشهای اندازه گیری طول یعنی روش اندازه گیری اختلاف فاز و روش پالس میان جزئیات مبهم بماند در قدم اول این روشها مورد توجه قرار می گیرند. طبیعی است با آشنایی بیشتر با مباحث فصول بعدی، ایده های خام اولیه کامل و کاملتر شده و علت وجودی هر جزء طولیاب بهتر دانسته خواهد شد.

همانطور که در دروس اولیه نقشه برداری گفته شده طولیاب موجی را ارسال می کند و پس از بازتاب آنرا دریافت می کند. در برخی از دستگاهها این موج توسط دستگاهی مشابه دریافت و پس از تقویت باز پس فرستاده می شود (دستگاههای تلورومتر) به عبارت دیگر برای اندازه گیری نیاز به دو دستگاه وجود دارد. در دسته دیگر موج ارسالی توسط یک مانع مانند آینه بازتاب کننده یا رفلکتور (در دستگاههای مادون قرمز) و یا سطح یک جسم (برخی از دستگاههای لیزری) به دستگاه باز می گردد. با نخستین فرمول دانش فیزیک در زمینه سرعت یکنواخت با در دست داشتن سرعت امواج و زمان طی مسیر می توان طول را بدست آورد. البته باید توجه داشت چون موج مسیر مورد اندازه گیری را یکبار هنگام ارسال و یکبار هنگام بازگشت پیموده، طول بدست آمده را باید بر ۲ تقسیم کرد.

گر چه در کل این تعبیر می تواند قابل قبول باشد لیکن در بررسی جزئیات امر در می یابیم که اینگونه برداشت تنها در مورد بخش کوچکی از طولیابها یعنی طولیابهای مبتنی بر روش پالس صحیح است و تعمیم آن اشتباهی بزرگ است، زیرا اصولاً در اکثر طولیابها به هیچ وجه اندازه گیری زمان رفت و برگشت به طور مستقیم انجام نمی گیرد.[۲۳] علت اصلی این کار وابستگی شدید دقت اندازه گیری طول به دقت اندازه گیری زمان است. برای وقوف کامل از این واقعیت مثال زیر را مورد بررسی قرار می دهیم:

مثال ۱ **ـ سرعت امواج مادون قرمز در یک دستگاه طولیاب ۳×۱۰^{۸} متر هر ثانیه است.**

الف- مطلوبست خطای طول اگر دقت اندازه گیری زمان $۱۰^{-۶}$ ثانیه باشد.

---

[۲۲] . IC: Integrated Circuits

[۲۳] در فصلهای بعد حالتهای استثنا را بررسی خواهیم کرد.

ب- مطلوبست دقت اندازه گیری در صورتیکه دقتی در حد یک متر لازم باشد.

پاسخ- (الف)

$$x = vt$$

$$dx = vdt$$

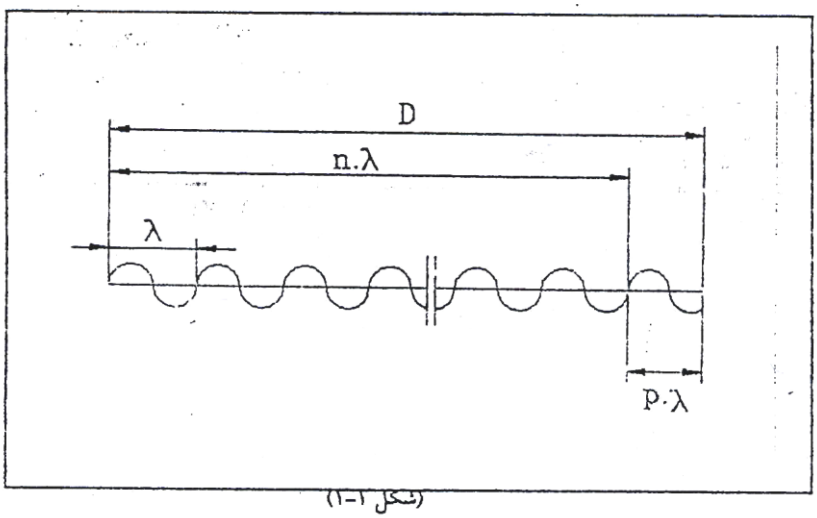
$$dx = ۳ \times ۱۰^{۸} \times ۱۰^{-۶} = ۳ \times ۱۰^{۲}\, m!!$$

- (ب)

$$dt = \frac{dx}{v} = \frac{۱}{۳ \times ۱۰^{۸}} \approx ۱۰^{-۱}\, sec$$

جالب است بدانیم تنها ساعتهای اتمی با ابعادی قابل توجه دارای دقتهای چنین هستند. در عمل نیز آندسته از طولیابها که از اندازه گیری زمان استفاده می کنند به طور غیرمستقیم زمان و از طریق شمارش پالس زمان را بدست می آورند. این روش را روشی پالسی تعیین فاصله می نامند. روش دیگر روش اختلاف فاز است که اکثر طولیابهای امروزی از این روش استفاده می کنند و در ادامه به آن پرداخته می شود.

به طور کلی با توجه به رابطه طول موج و فاصله مورد اندازه گیری از روی شکل ۱-۱ می توان نوشت:



(شکل ۱-۱)

که در آن D طول مورد اندازه گیری، λ طول موج، n مضارب صحیح طول موج موجود در D و p جز کسری طول موج است. در عمل طولیابها با استفاده از مدارات الکترونیکی خود قادر به اندازه گیری مقدار p هستند ولی مقدار n به صورت مبهم باقی می ماند. لذا تنها به کمک یک موج نمی توان هر دو مجهول D و n را بدست آورد. دستگاههای طولیاب راههای مختلفی را برای بدست آوردن طول و حصول مجازی مقدار مبهم n (به تعبیری رفع ابهام) اتخاذ می کنند. یکی از این معمول ترین راهها استفاده از چند موج (۲-۶ فرکانس) است.

اصطلاحاً مقدا p را اختلاف زاویه فاز موج می گویند و مقدار آن بستگی به اختلاف زاویه فاز موج ارسالی و برگشتی دارد. مفهوم فیزیکی و توضیحات بیشتر در مورد مفهوم زاویه فاز در فصل بعد خواهد آمد. در عمل رابطه اساسی طولیابی را به صورت زیر مورد استفاده قرار می دهند.

(معادله ۱- ۱)

$$S = \frac{1}{2}(n\lambda + \frac{\varphi}{360})$$

(معادله ۱-۱)

مثال ۲- یکی از طولیابهای ساخته شرکت هیولت پاکارد از ۴ فرکانس استفاده می کند. با توجه به جدول زیر فاصله اندازه گیری شده بدست آمده است.

$\frac{1}{2}\left(\frac{\phi}{360}\lambda\right)$	طول موج (متر)	اختلاف فاز	فرکانس
۷ر۱۳۹	۲۰	۲۵۷ °	۱۴ ر ۹۸۹۶۲۵ MHz
۱۷	۲۰۰	۶۲ °	۱ ر ۴۹۸۹۶۲۵ MHz
۴۱۶	۲۰۰۰	۱۵۰ °	۱۴۹ ر ۸۹۶۲۵ KHz
۳۴۱۶	۲۰.۰۰۰	۱۲۳ °	۱۴ ر ۹۸۹۶۲۵ KHz

طول نهایی: ۱۳۹ ر ۳۴۱۷

فصل دوم

امواج الکترومغناطیس

۲ـ۱ مقدمه

انرژی شکلهای متنوعی چون نور مرئی، گرما و غیره دارد که توسط امواجی موسوم به الکترومغناطیس قابل انتقال هستند. انتشار اغلب امواج یعنی اشعه ایکس، ماوراء بنفش و مایکروویو نیز به صورت تشعشع الکترومغناطیسی است.
برخلاف امواج مکانیکی (مانند امواج صوتی) که برای انتقال نیاز به یک محیط واسط دارند، امواج الکترومغناطیس حتی در خلاء نیز منتشر می شوند. سرعت انتشار این امواج در خلاء برابر با سرعت سیر نور است. اگر چه از نقطه نظر فیزیک نوین نسبت دادن مطلق ماهیت موجی به نور پذیرفته نیست و ماهیت دوگانه ذره- موج برای آن در نظر گرفته می شود، لیکن در مبحث طولیابهای الکترونیکی با نادیدن گرفتن ماهیت ذره ای نور، خللی در کلیت بحث وارد نمی شود.
اساساً کلیه طولیابهای الکترونیکی بر مبنای ارسال امواج الکترومغناطیس ساخته شده اند و تفاوت آنها تنها در محدوده ای از طیف الکترومغناطیسی است که مورد استفاده قرار می دهند. در میان سیستمهای نقشه برداری تنها تعداد معدودی از دستگاهها و از آن جمله دستگاههای آبنگاری (اکوساندرها)[۲۴] هستند که برای اندازه گیری از امواج مکانیکی (صوتی) استفاده می کنند ولی اکثریت دستگاهها از امواج الکترومغناطیسی بهره می برند.

۲ـ۲ معادلات ماکسول

در سال ۱۸۶۴ میلادی جمیز ماکسول[۲۵]، دانشمند اسکاتلندی طی ۴ معادله دیفرانسیل حرکت امواجی را تبین کرد که امروزه با نام امواج الکترومغناطیس شناخته می شوند. اهمیت این چهار معادله را- که علم الکتریسیته را به علم مغناطیسی پیوند می زند- همپای قوانین حرکت نیوتن دانسته اند. آنچه امروز معادلات ماکسول نامیده می شود، در واقع شکل جامع پدیده هایی است که دانشمندان دیگر قبل از ماکسول به آنها دست یافته اند و ماکسول موفق به بیان ریاضی آنها تحت قالب ۴ معادله دیفرانسیل شده است. در ادامه به این معادلات به طور مختصر اشاره شده است:
الف- معادله شماره ۱: این معادله در مورد ذرات باردار و میدان الکتریکی حاصله است و به نام قانون الکتریکی گاوس[۲۶] مشهور است.این معادله به صورت زیر نوشته می شود و مفهوم آن اینست که اولاً بارهای مشابه یکدیگر را دفع و بارهای همنام یکدیگر را جذب می کنند و شدت جذب و دفع بستگی به مربع فاصله آنها دارد. ثانیاً در جسم هادی ولی ایزوله شده، بار الکتریکی بر سطح آن پوشش می شود. در این معادله **E** میدان الکتریکی، ؟ ثابت گذرهی[۲۷]، **ds** المان انتگرالگیری سطح و **q** بار الکتریکی است.

---

۲۴. Echo- sounder (عمق یاب)
۲۵. James C.Maxweel
۲۶. Karl Friedrich Gauss
۲۷. Permittivity (8.85×10^{-12} S^2 C^2/ m^3Kg)

$$\varepsilon_0 \oint \boldsymbol{E}.\boldsymbol{ds} = \boldsymbol{q}$$

ب- *معادله شماره ۲ :* این معادله در مورد مغناطیس است و به نام قانون مغناطیس گاوس مشهور است. این معادله به صورت زیر نوشته می شود و مفهوم آن اینست که همتای مغناطیسی بار الکتریکی وجود ندارد و عملاً قطبهای مغناطیسی منزوی قابل ایجاد نیست. در این معادله B شدت میدان مغناطیسی و ds المان انتگرالگیری سطح است.

$$\oint B.ds = \cdot$$

ج- *معادله شماره ۳ :* این معادله در مورد اثر الکتریکی ناشی از یک میدان مغناطیسی است و به نام قانون القای فارادی[۲۸] مشهور است. این معادله بصورت زیرنوشته می شود و مفهوم آن اینست که اگر یک میله مغناطیسی داخل یک سیم دایره ای شکل شود، باعث ایجاد جریان الکتریکی داخل سیم خواهد شد. در این معادله E میدان الکتریکی، dl المان انتگرالگیری طول و $d\varphi_B$ تغییرات شارژ مغناطیسی و dt تغییرات زمان است.

$$\oint \boldsymbol{E}.\boldsymbol{dl} = \frac{-\boldsymbol{d\phi_B}}{\boldsymbol{dt}}$$

د- *معادله شماره ۴ :* این معادله حرکت برعکس معادله فوق است یعنی در مورد اثر مغناطیسی ناشی از میدان متغیر الکتریکی با شدت جریان متغیر است و به شکل تعمیم یافته قانون آمپر[۲۹] مشهور است. این معادله بصورت زیر نوشته می شود و مفهوم آن اینست که سرعت نور را می توان به طور کامل با اندازه گیری های الکترومغناطیسی بدست آورد و همچنین شدت جریان عبوری از یک سیم در اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می کند. B میدان مغناطیسی، dl المان انتگرالگیری طول و $d\varphi_E$ و dt تغییرات زمان و μ_0 ثابت تراوائی و I شدت جریان است.

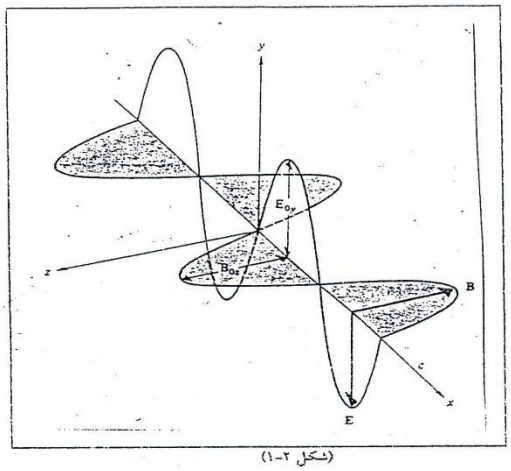
$$\oint \boldsymbol{B}.\boldsymbol{dl} = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{\boldsymbol{d\phi_E}}{\boldsymbol{dt}} + \boldsymbol{i} \right)$$

۲-۳ هندسه امواج

امواجی که بر پایه معادلات ماکسول انتشار می یابند، امواج الکترومغناطیسی نامیده می شوند و متشکل از ۲ میدان مغناطیسی و الکتریکی عمود برهم و عمود بر امتداد انتشار هستند. (شکل ۲-۱)

---

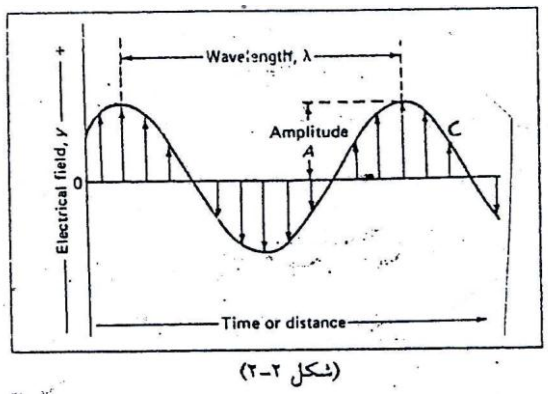
[۲۸] Michael Faraday
[۲۹] Andre Marie Ampere



(شکل ۲-۱)

از آنجا که انرژی توسط میدان الکترونیکی انتقال داده می شود، بیشتر مورد توجه قرار می گیرد. امواج مورد استفاده در اندازه گیری طول همگی عرضی هستند زیرا در راستای آنها بر امتداد انتشار آنها عمود است. همچنین پلاریزه نیز هستند زیرا راستای ارتعاش آنها در یک صفحه قرار دارد و علاوه بر این کروماتیک هستند زیرا دارای فرکانس ثابت هستند.

در واقع هرگاه منابع اولیه موج امکان پدید آوردن نور پلاریزه را نداشته باشند با تمهیداتی این عمل بروشهای غیرمستقیم انجام می شود. به این ترتیب موج مورد مطالعه جهت اندازه گیری طول به ساده ترین شکل ممکن یعنی یک موج سینوسی ساده در می آید. برای سهولت فهم، شکل شماره ۲-۲ را در نظر می گیریم.



(شکل ۲-۲)

در شکل شماره ۲-۲ جهت فلشها بردار الکترونیکی را نشان می دهند که طبعاً عمود بر امتداد انتشار هستند. همانطور که دیده می شود شدت این بردارها به طور تناوبی تغییر می کند. از این رو منحنی پیوسته C به عنوان نماینده تغییرات شدت میدان الکترونیکی که با گذشت زمان (یا فاصله) مشخص شده است.

می دانیم فاصله ۲ نقطه همسان مانند نقاط اکسترمم (ماکزیمم و مینیمم) را طول موج می نامند و به λ نشان می دهند. همچنین فاصله زمانی بین این دو نقطه را پریود یا زمان تناوب می نامند و به T نشان می دهند. معکوس پریود را فرکانس یا

بسامد می نامند و به f نمایش می دهند. مفهوم فرکانس تعداد نوسانات در واحد زمان (مثلاً ثانیه) است. روابط اصلی بین پارامترهای بالا در زیر خلاصه شده است.

$$f = \frac{1}{T} \qquad c = f\lambda \qquad E = hf$$

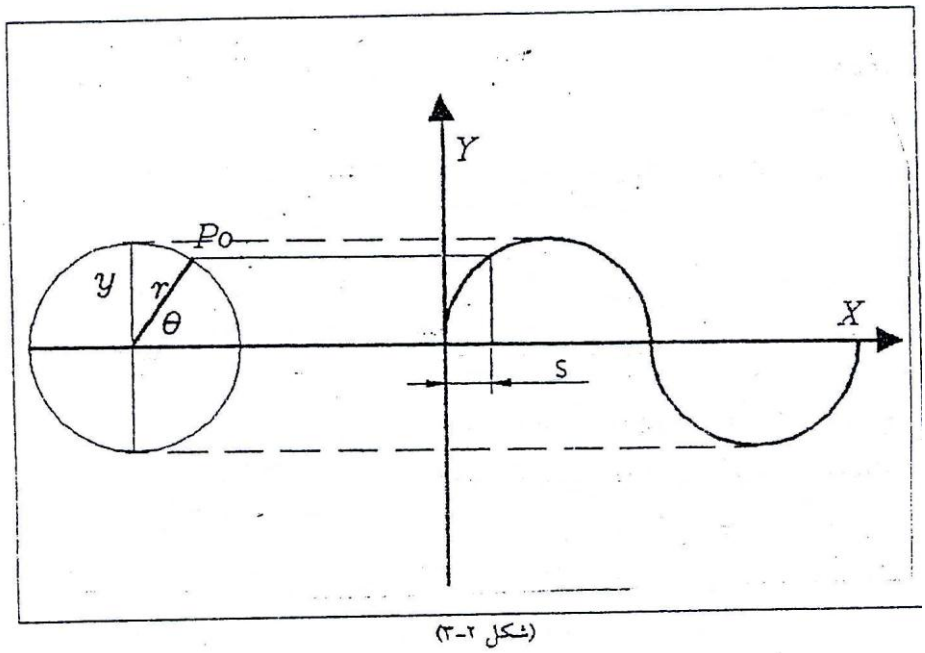
که در آن h و E و c به ترتیب ثابت پلانک، انرژی و سرعت مسیر نور هستند.

۲-۴ معادله حرکت موج

برای درک عمیق تر، بهتر است حرکت دورانی بر روی یک دایره بنام دایره مرجع مانند شکل شماره ۲-۳ بررسی شود. در این شکل می توان هر نقطه را بر روی دایره مرجع تصویر کرد. مقدار y را اصطلاحاً بعد حرکت می گویند. طبیعی است که بیشترین مقدار y همان دامنه حرکت است که از نظر عددی برابر با شعاع دایره مرجع می باشد داریم:

(معادله ۲-۱)

$$y = r\sin\theta$$



(شکل ۲-۳)

حال اگر نقطه P روی دایره مرجع با سرعت ثابت بچرخد مقدار Θ ثابت نبوده و خواهیم داشت:

$$\omega = \frac{\theta}{t} = 2\pi f$$

و رابطه ۲-۱ تبدیل به $y= r \sin(\omega t)$ می شود. این معادله برای حرکت از مبدأ صحیح است و برای نقطه ای مانند P باید زاویه اولیه Θ_0 را در نظر گرفت. زاویه Θ که تعیین کننده موقعیتP روی دایره مرجع است را زاویه فاز و یا فاز حرکت می نامند.

در طولیابی بر اساس زاویه فاز، اختلاف زاویه فاز موج رفت و برگشت را بدست می آورند و مطابق مثال ۲-۱ را محاسبه می کنند.

مثال ۲-۱ **: بکمک شکل ۲-۲ و مفهوم فاز حرکت، فاصله افقی نقطه P را از مبدأ (پاره خط S) را بدست آورید.**

پاسخ **– اگر نقطه P را از مبدأ روی دایره مرجع یک دایره کامل (۲π) دوران کند به اندازه یک طول موج جلو خواهد رفت.**

حال اگر به اندازه Θ بچرخد به نسبت $\frac{\Theta}{2\pi}$ جلو خواهد رفت، پس داریم:

$$\frac{S}{\theta} = \frac{\lambda}{۲\pi} \quad \Rightarrow S = \frac{\theta}{۲\pi}\lambda$$

باید توجه داشت که در طولیابی چون اختلاف فاز ناشی از یک رفت و برگشت موج است، در عمل نصف مقدار فوق باید بحساب آید، همانطور که در مثال ۲-۱ دیده شد.

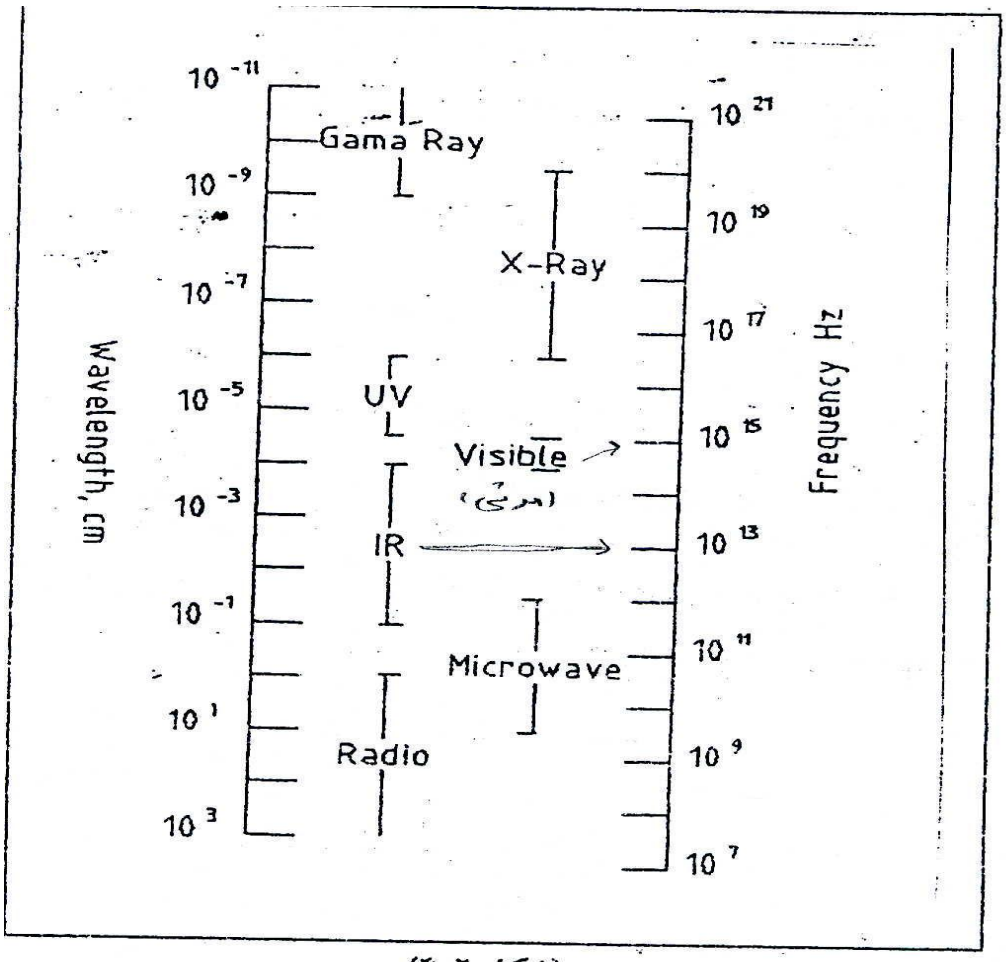
$$S = \frac{1}{2}\left(\frac{\Theta}{2\pi}\lambda\right)$$

۲-۵ طیف امواج الکترومغناطیس و انتشار آنها

در سال ۱۸۸۷ هاینریش هرتز[۳۰] آلمانی توانست در آزمایشگاه امواج رادیویی را تولید کند. در زمان هرتز تنها دو نوع نور مرئی و امواج رادیویی از طیف وسیع امواج شناخته شده بودند. امروزه این طیف وسیع به طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته است و هر بخش آن نامی خاص پیدا کرده است. شکل ۲-۴ دامنه این طیف و جدول ۲-۱ این ناحیه ها را بر اساس تقسیمات عددی نشان می دهد. در طولیابها بیشتر از امواج مادون قرمز و امواج مایکروریو استفاده می شود. همانطور که در شکل ۲-۳ دیده می شود امواج مادون قرمز نسبت به امواج میکروریو طول موجی کمتر ولی فرکانسی بیشتر برخوردارند. چنانچه در فصول بعد اشاره خواهد شد دستگاه هایی که بر اساس امواج با طول موج بلندتر کار می کنند بردی بیشتر و دقتی کمتر دارند و بلعکس امواج با طول موج کوچک دارای برد محدودتر ولی دقتی بیشتری را بدست می دهند. امواج با فرکانس بیشتر از امواج نوری دارای انرژی زیاد و عموما سرطانزا و مخرب سلولهای زنده هستند و از این رو در طولیابهای الکترونیک نقشی ندارند.

---

[۳۰] Heinrich Rudolph Hertz



(شکل ۲-۴)

مثال۲-۳: **فرکانس به کار رفته در دو طولیاب برای اندازه گیری طول به ترتیب عبارتست از $۱۰^{۱۰}$ و $۱۰^{۱۴}$ هرتز. مطلوبست محاسبه طول موج هر یک و همچنین نام دسته ای از طولیابها که این دو به آن متعلقند.**

پاسخ_

$$\lambda_1 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^{10}} = 3 \times 10^{-2} m = 3cm$$ مایکروویو

$$\lambda_2 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^{14}} = 3 \times 10^{-6} m = 3\mu m$$ فروسرخ

نام	طول موج (حد بالا)	طول موج (حد پایین)	فرکانس (حد بالا)	فرکانس (حد پایین)
اشعه گاما	۶×۱۰ $^{-۱۲}$ متر	۳×۱۰ $^{-۱۴}$ متر	۱۰ ^{۲۲} هرتز:	۵×۱۰ ^{۱۹} هرتز
اشعه ایکس	۱ نانومتر	۶×۱۰ $^{-۱۲}$ متر	۵×۱۰ ^{۱۹} هرتز	۳×۱۰ ^{۱۷} هرتز
ماوراء بنفش	۳۹۰ نانومتر	۱ نانومتر	۳×۱۰ ^{۱۷} هرتز	۷/۶۹×۱۰ ^{۱۴} هرتز
نور مرئی	۷۸۱ نانومتر	۳۹۰ نانومتر	۷/۶۹×۱۰ ^{۱۴} هرتز	۳/۸۴×۱۰ ^{۱۴} هرتز
مادون قرمز	۱ میلیمتر	۷۸۱ نانومتر	۳/۸۴×۱۰ ^{۱۴} هرتز	۳×۱۰ ^{۱۱} هرتز
EHF[۳۱]	۱ سانتیمتر	۱ میلیمتر	۳×۱۰ ^{۱۱} هرتز	۳×۱۰ ^{۱۰} هرتز
SHF[۳۲]	۱۰ سانتیمتر	۱ سانتیمتر	۳×۱۰ ^{۱۰} هرتز	۳×۱۰ ^{۹} هرتز
UHF	۱متر	۱۰ سانتیمتر	۳×۱۰ ^{۹} هرتز	۳×۱۰ ^{۸} هرتز
VHF	۱۰متر	۱متر	۳×۱۰ ^{۸} هرتز	۳×۱۰ ^{۷} هرتز
HF	۱۰۰متر	۱۰متر	۳×۱۰ ^{۷} هرتز	۳×۱۰ ^{۶} هرتز
MF	۱کیلومتر	۱۰۰متر	۳×۱۰ ^{۶} هرتز	۳×۱۰ ^{۵} هرتز
LF	۱۰ کیلومتر	۱کیلومتر	۳×۱۰ ^{۵} هرتز	۳×۱۰ ^{۴} هرتز
VLF	۱۰۰ کیلومتر	۱۰ کیلومتر	۳×۱۰ ^{۴} هرتز	۳×۱۰ ^{۳} هرتز

نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی بستگی به فرکانس آنها دارد، لذا نحوه انتشار آنها در دو دسته بزرگ بررسی می شود.

[۳۱] به ترتیب مخفف: EHF(Extera high Frequency), UHF (Ultra high Frequency) , VHF (Very high Frequency), HF (High Frequency), MF (Medium Frequency), LF (LOW Frequency), VLF (very low Frequency)

[۳۲] امواج با طول موج بین ۱ تا ۳۰ سانتی متر را اصطلاحاً مایکروویو می نامند.

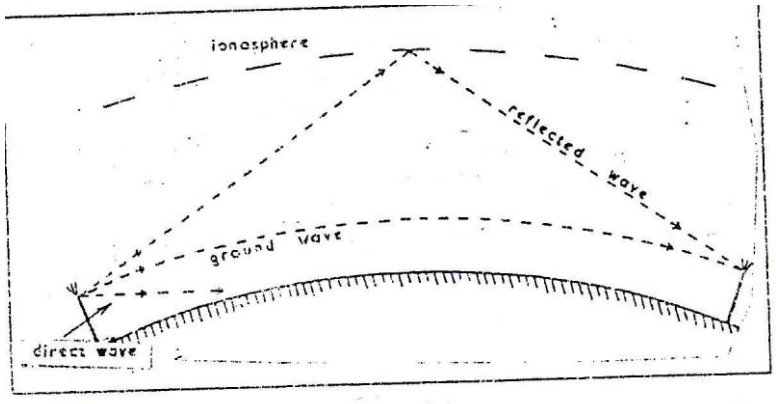
۱- *امواج با فرکانس کمتر از ۳۰ مگاهرتز*: بیشتر دستگاه های اندازه گیری طول در سیستم های غیرنقشه برداری از این رده فرکانسها استفاده می کنند. همانطور که در شکل ۲-۵ دیده می شود.

این دسته از امواج به سه حالت قابل انتشار هستند.

الف- مسیر مستقیم در امتداد خط دید

ب- مسیر موازی با سطح زمین با قابلیت بکارگیری در طولهای ماورآء افق

ج- امواج بازتاب شده از لایه یونسفر[۳۳].



(شکل ۲-۵)

امواج با فرکانس کم و در نتیجه طول موج بلند برای اندازه گیری طولهای بلند (بیش از ۱۰۰ کیلومتر) کاربرد دارند، لذا مشخصاً امواج دسته الف کارآیی مطلوبی ندارند امواج انعکاس یافته از لایه یونسفر نیز پارازیت محسوب شده و در صورت وجود موجب خطای اندازه گیری می شود. امواج منعکس شده از لایه یونسفر را امواج آسمانی می نامند و تداخل آنها با امواج زمینی را مسبب جابجایی فاز و منبع خطا می دانند. ارتفاع لایه یونسفر، فاصله منبع ارسال تا این لایه، میزان اغتشاش این لایه و ضریب جذب یا بازتاب این لایه قدرت میدان الکتریکی امواج آسمانی را تعیین می کند. افزایش اغتشاش این لایه در روز برای ارسال امواج مخابراتی که از بازتاب این لایه استفاده می کنند اثر نامطلوب و برعکس در کارهای طولیابی اثر مطلوب ارزیابی می شود. نهایتاً این امواج دسته ب هستند که برای اندازه گیری طول مناسب تشخیص داده می شوند. این امواج موازی با سطح زمین انتشار می یابند و از این رو امواج زمینی[۳۴]، نامیده می شوند.

۲- *امواج با فرکانس بیش از ۳۰ مگاهرتز*: این امواج شامل هم امواج مادون قرمز- نور مرئی و همچنین امواج مایکروویو می شود. عمده سیستم های نقشه برداری از این دسته از امواج استفاده می کنند. این دسته از امواج نیز همانطور که درشکل ۲-۶ دیده می شود به سه حالت منتشر می شوند.

الف- مسیر مستقیم در امتداد خط دید

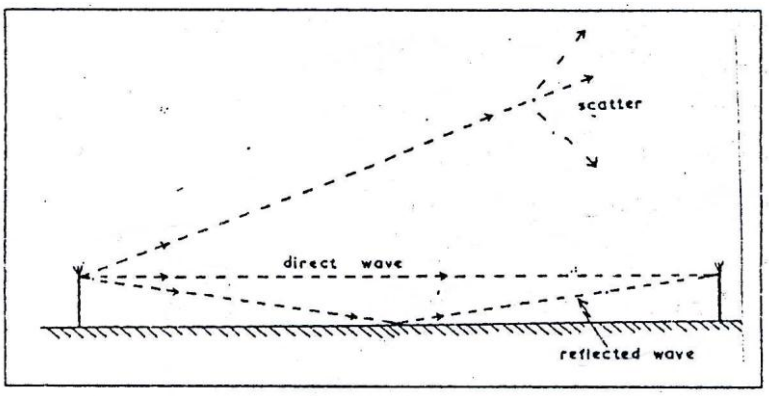
ب- مسیر انعکاس یافته از سطح زمین

---

[۳۳] Ionosphere: در ارتفاع ۷۰-۶۰ کیلومتری سطح زمین ذرات باردار و یونهای تولید شده توسط تشعشعات خورشیدی افزایش می یابد و بصورت یک لایه پدیدار می شود امواج رادیویی از روی این لایه بازتاب می کنند واز این رو برای کارهای مخابراتی دوربرد جهت اجتناب از محدودیت برقراری خط دید جهت تماس مناسب است. ارتفاع توسط این لایه در روز ۷۰ متر و در شب ۹۰ کیلومتر است.

[۳۴] Ground Wave

ج- پراکنده شده از سطح لایه تروپوسفر[۳۵] و یونسفر



(شکل ۲-۶)

اکثر طولیابها از این دسته امواج استفاده می کنند و جملگی از امواج دسته الف بهره می برند. با توجه به شعاع انحناء زمین، حداکثر برد این دستگاه ها به ۱۰۰ کیلومتر می رسد (مگر آنکه طولیاب از آسمان به کار رود) انعکاس از سطح زمین منبع خطاست و خود کاربردی ندارد.در این نحوه ی انتشار،مسیر موج بطرف زمین می رسد و با انعکاسهای ناخواسته روانه ی دستگاه دوم و یا دستگاه ارسال کننده ی موج می شود و موجب خطا شده و از اینرو به آن اصطلاحا خطای زمین می گویند.در طولیابی در امواج مایکروویو یکی از منابع خطا امواج انعکاس یافته از سمت زمین است. امواج پراکنده شده از لایه های فوقانی جو در سیستم های مخابراتی استفاده می شود و در طولیابها کاربردی ندارد. سرعت این امواج بستگی به عواملی دارد که در قسمت بعد بررسی می شود.

۲_۶ سرعت امواج الکترومغناطیس

طبق پیش بینی ماکسول امواج الکترومغناطیس با سرعتی معادل سرعت سیر نور حرکت می کنند. ماکسول به کمک قانون چهارم خود پیش بینی کرد که سرعت نور از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\times10^{-4}\times8085\times10^{-12}}} \approx 3\times10^{8}\,\mathrm{msec}^{-1}$$

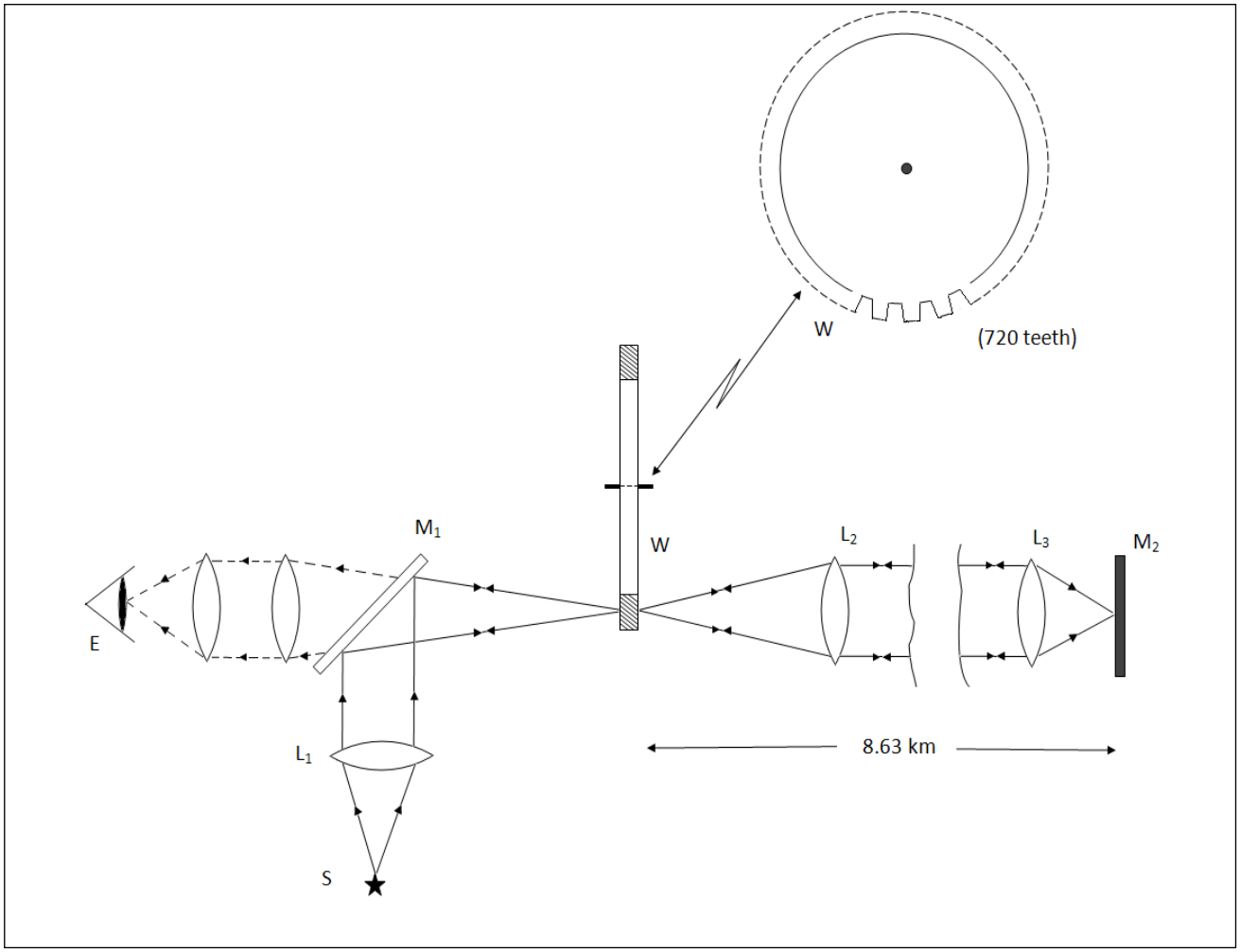
در این معادله μ_0 قابلیت نفوذ در خلا و ε_0 ضریب فرمول جذب و دفع کولن است. علت آنکه ان عدد آشنا به نظر می رسد این است که همان سرعت نور است. بنابراین آنچه بعنوان سرعت نور بعنوان باریکه ی کوچکی از طیف الکترومغناطیس یاد می شود قابل تعمیم به کل طیف است. سرعت امواج الکترومغناطیس به شدت تابع محیط است و از سرعت آن در محیط های غیر خلا کاسته می شود.

قبل از آنکه ماکسول بکمک روابط خود در صدد تعیین سرعت نور برآید، دانشمندان زیادی در این راه تلاش کردند. شاید معروفترین ناکام این زورآزمائی علمی گالیله ایتالیائی باشد. او و همکارش یک مایل از هم فاصله گرفتند. قرار بود ابتدا گالیله از روی فانوس خود پرده بردارد و همکارش با دیدن نور همین کار را تکرار کند. گالیله امیدوار بود با اندازه گیری زمان و معلوم بودن فاصله، بتواند به سرعت نور دست یابد. طبعاً با توجه به آنکه نور بر پیمودن فاصله یک مایلی تنها ۱۱ میلی ثانیه زمان داشته، کاری از ساعت شنی او برنمی آمده است.

---

[۳۵] Troposhereلایه ای است که از سطح زمین (یا دریا) شروع شده و تقریباً تا ارتفاع ۱۱ کیلومتری توسعه می یابد. غالب اندازه گیری های طول در این لایه انجام می گیرد.

فیزو [۱]، دانشمند فرانسوی در سال ۱۸۴۹ با استفاده از روش قطع موج با چرخ دندهٔ [۲] سرعت نور را برابر با ۳۱۳۳۰۰ کیلومتر بر ثانیه بدست آورد. با توجه به تشابه روش اندازه گیری نور توسط فیزو و ساختمان برخی از طولیابها روش فیزو به اختصار بررسی می شود. اسبابی که فیزو بکار برده است را در کتابهای فیزیک دبیرستان دیده اید (شکل ۲-۷)



چرخ دندهٔ فیزو دارای ۷۲۰ دندانه بود. با توجه به سرعت نور، اگر چرخ دنده با سرعت کم به چرخش درآید، پرتوهای نورانی میتواند از خلال برخی از روزنه های بین دندانه ها خود را به چشم شخص برسانند. حال با افزایش بطیع و تدریجی سرعت چرخ دنده در یک لحظه خاص دیگر نور دیده نمی شود. میتوان نتیجه گرفت نوری که از میان دو دندانه عبور کرده، در راه برگشت به دندانه بعدی برخورد کرده و همین دندانه مانع از عبور آن شده است. پس سرعت نور توانسته در مدت زمانیکه یک روزنه جای خود را به یک دندانه داده، مسیر رفت و برگشت بین M_1وM_2که در آزمایش فیزو برابر با ۱۷.۲۶کیلومتر بوده را طی کند. فیزو دریافت برای آنکه تابش نور را بطور کامل قطع کند باید به سرعت زاویه ای دور در ثانیه برسد.حال باید زمان جابه جایی یک دندانه با یک روزنه را حساب کنیم. محیط چرخ دنده کلا ۱۴۴۰ دندانه و روزنه دارد که در هر ثانیه ۱۲.۶ بار از جلوی چشم شخص عبور می کند. یعنی کلا $12.6 \times 1440 = 18144$ روزنه و دندانه در هر ثانیه از مقابل چشم شخص عبور می کند و طبعا زمان عبور یک جابه جایی برابر با معکوس این مقدار خواهد بود. پس اینک با این اطلاعات می توان سرعت نور را محاسبه کرد.

$$c = \frac{x}{t} = \frac{17036}{1/18144} = 313165044 Kmsec^{-1}$$

جالب است بدانید دسته ای از طولیابها با روشی بسیار شبیه به این روش، طول را اندازه می گیرن که در فصول بعد ۲۹۹۷۹۲ می باشد که در .خواهد آمد. بهترین عدد بدست آمده برای سرعت نور که از اقبال عام برخوردار است برابر ٤٥٧٤ سال ۱۹۷۳ توسط سه دانشمند آمریکائی بدست آمد. جدول ۲-۲ لیستی از سرعتهای بدست آمده برای نور را نشان می دهد که به روشهای حصول آنها نیز اشاره شده است.

نام دانشمند	تاریخ / کشور	سرعت(در خلاء)[۱]	روش
رومر	۱٦۷٦ / فرانسه	۰۰۰.۲۱٤	خسوف اقمار مشتری
فیزو	۱۸٤۹ / فرانسه	۰۰۰.۳۱۳	قطع موج با چرخ دنده
برگشترند	۱۹۵۰ / سوئد	۷.۷۹۲,۲۹۹	ژئودیمتر
اونسون/ولز/پیترسون	۱۹۷۳ / آمریکا	٤٥٧٤.۷۹۲,۲۹۹	تکنیکهای لیزری

(جدول ۲-۲)

با توجه به اثر مقدار عددی سرعت بر طول بدست آمده، شرکتهای مختلف بطور تجربی از اعداد خاصی بعنوان سرعت نور استفاده می کنند که این عدد بستگی به عوامل محیطی و شرایط مبنا و تنظیمهای دستگاهی دارد. برای مثال شرکت ویلد عدد ۹۸۵،۷۰۷، ۲۹۹ متر بر ثانیه را برای این منظور استفاده می کند.

۲-۷ *ضریب شکست*

سرعت امواج الکترومغناطیسی بر اثر شرایط محیطی تغییر می کند و همواره کمتر از مقدار آن در خلاء است. به نسبت سرعت امواج در خلاء به سرعت آنها در جو اصطلاحاً ضریب شکست می گویند.

$$n = \frac{c}{v}$$

که در آن c سرعت نور در خلاء و v سرعت امواج الکترومغناطیسی در محیط است. باید توجه داشت در دستگاههای طولیاب مدارهای الکترونیکی فرکانس خاصی را تولید می کنند(و نه طول موج خاصی را). اما محاسبه طول براساس طول موج است و مقدار طول موج بسته به مقدار واقعی سرعت امواج تعیین می شود. در نتیجه آگاهی از مقدار ضریب شکست و در پی آن سرعت امواج از اهمیت زیادی برخوردار است. مقدار ضریب شکست به عوامل زیر بستگی دارد:

الف – ترکیب گازی شکل محیط (که در لایه های مجاور سطح زمین تقریباً ثابت است)

ب – فرکانس موج

ج- دما و فشار

د- میزان بخار آب موجود در محیط (اتمسفر)

جو عمدتاً از نیتروژن و اکسیژن و بخار آب تشکیل شده که حدود ۹٦،۹۹ درصد از چگالی هوا را تشکیل می دهد مقدار اندکی نیز دی اکسید کربن تعدادی از گازهای بی اثر نیز در ترکیب هوا دیده می شود. اثر تغییر این ترکیب مستقیماً بر چگالی خواهد بود و طبق رابطه لورنتز و لورنتز [۲] محاسبه می شود:

$$\frac{n^2-1}{(n^2+2)p} = \text{const}$$

که در آن n ضریب شکست و ρچگالی مخلوط گازی هواست. البته ترکیب هوا غالب اوقات تقریباً ثابت است و معادله لونتز – لرونتز بیشتر جنبه نظری دارد و در محاسبات نقشه برداری بکار نمی آید.

فرکانس و به طبع آن طول موج اثری اساسی در سرعت سیر امواج دارد و این بنوبه خود بر مقدار واقعی ضریب شکست محیط برای فرکانس مربوطه تاثیر می گذارد. رفتار امواج بکار رفته در دستگاههای الکترواپتیکی با امواج بکار رفته در دستگاههای رادیوئی و مایکروویو فرق دارد. در میان عوامل چهارگانه ذکر شده،در مورد دستگاههای الکترواپتیکی سه عامل نخست(عملاً تنها فرکانس،دما و فشار) و در دستگاههای مایکروویو سه عامل آخر (عملاً فرکانس، دما، فشار و بخار آب موجود) اهمیت دارد.

لذا شایسته است تغییرات ضریب شکست بطور جداگانه در مورد هر دسته بررسی شود.

الف – دستگاههای الترواپتیکی **: امواج مورد استفاده در این دستگاهها مرکب از دو موج است که عمل بر هم نهی یا مودلاسیون[۲] بر روی آنها انجام شده است. ضریب شکست برای هر یک از آنها تفاوت دارد، لذا برای اجتناب از معرفی یک ضریب شکست برای هر یک، ضریب شکست گروه تعریف می شود. این معادله دارای شکل کلی** $n_g = A + \frac{B}{\lambda^{-2}} + \frac{C}{\lambda^{-2}}$ **بوده و بنام معادله ی کوشی معروف است.** n_g **ضریب شکست گروه و** A **و** B **و C ضرایب ثابتی هستند که به محیط واسط بستگی دارند. در اکثر دستگاههای الکترواپتیکی معادله کوشی بشکل زیر استفاده می شود اما بسته به شرکت سازنده مقادیر عددی تفاوتهائی جزئی وجود دارد.**

$$n_g = 1 + (287,604 + 4,8864\lambda^{-2} + 0,068\lambda^{-4}) \times 10^{-6}$$

در این معادله بجای λ **(برحسب** μm **) طول موج اصلی ترین موج یا موج حامل[۲] قرار داده می شود. برای مثال در یک دستگاه طولیاب که طول موج حامل آن ۸۶۵ میکرومتر بوده و مقادیر ثابت معادله کوشی آن مطابق معادله ۲-۱۳ می باشد، ضریب شکست گروه برابر۱.۰۰۰۲۹۴ است.**

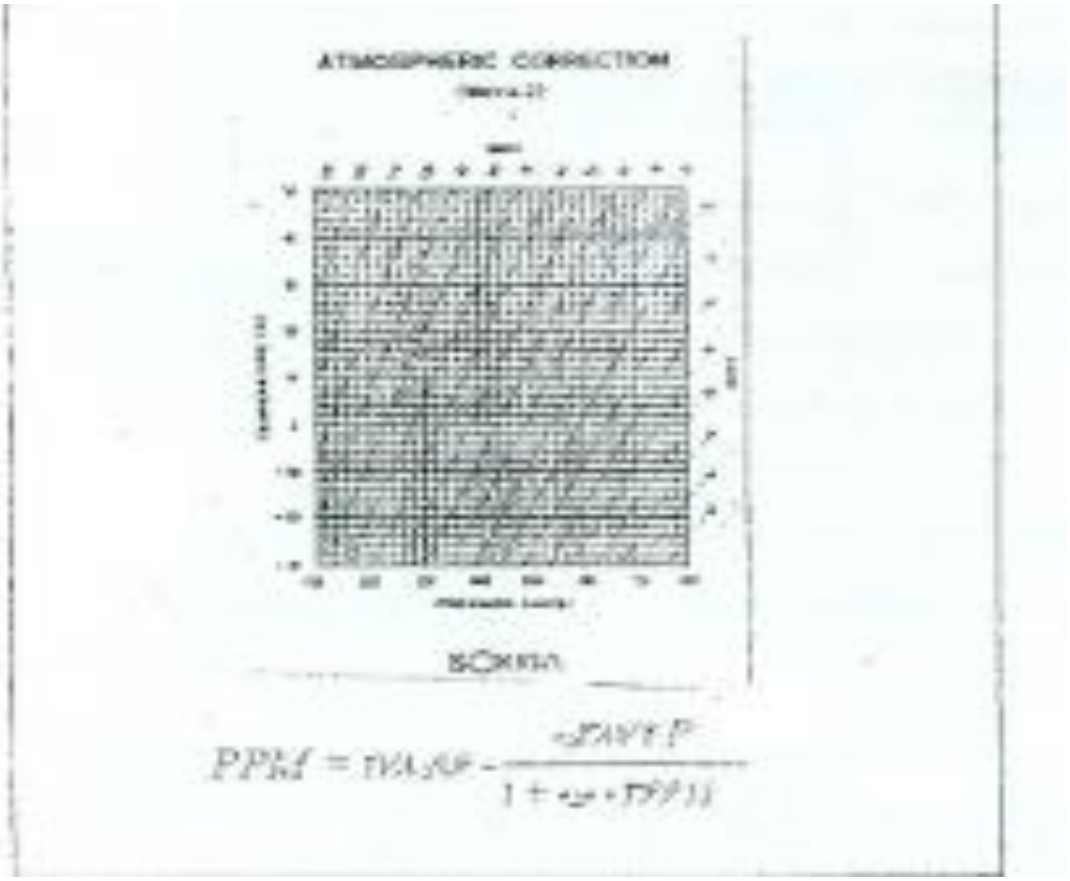
معمولاً هر شرکت ضریب شکست گروه را با توجه به طول موج حامل محاسبه می کند و اغلب کاربران نیازی به استفاده از این معادله ندارند. علاوه بر اثر فرکانس، اثر دما، فشار نیز بر ضریب شکست باید مورد توجه قرار گیرد. رابطه زیر که با نام بترل و سیرز[۳]ضریب شکست حاصله را بدست می دهد.

$$n_a = 1 + \frac{-0,359474(ng-1)p}{273,15+t} - \frac{15,02}{273,15+t}10^{-6}e$$

که در آن P **فشار بارومتریک (بر حسب** μm**)،** t **دما (بر حسب درجه سانتیگراد سلسیوس) و** e **فشار بخار جزئی آب بر حسب میلیمتر جیوه است. همانطور که پیشتر ذکر شده از اثر رطوبت هوا یعنی کسر دوم در محاسبات مربوط به این دستگاهها صرف نظر می شود.**

اگر λ**=۰.۹۰میکرومتر باشد در شرایط استاندارد یعنی فشار یک اتمسفر (۷۶۰ میلی متر جیوه) و دمای صفر درجه، مقدار ضریب شکست** n_a **برابر با ۱.۰۰۰۲۹۴ خواهد شد.برای سهولت کار مقدار** n_a **را به صورت** $n_a = 1 + 10^{-6}N$ **نشان می دهند که** N **را مقدار** ppm **می نامند. برای مثال در ضریب شکست استاندارد موج فوق الذکر۲۹۴=N است. هر دستگاه دارای یک N طراحی است که در شرایط عملیاتی مقدار اختلاف ضریب شکست موجود با حالت استاندارد مد نظر قرار می گیرد. برای مثال در طولیاب فوق اگر مقدارN برابر ۲۹۸ باشد، عدد ۴+ به عنوان مقدار** ppm **به دستگاه معرفی می شود (و نه مقدار ۲۹۸)**

اغلب سازندگان همراه با دستگاههای طولیاب چارتهائی ویژه مانند شکل ۲-۸ را نیز در اختیار کاربران قرار می دهند تا بتوان بر اساس دما و فشار مقدار ppm**را بدست آورد. برخی از سازندگان مانند شرکت سوکیا حتی فرمول بدست آوردن مقدار** ppm **را در اختیار قرار می دهند. در دستگاههای مدرنتر نه نیازی به استفاده از چارت و نه فرمول مربوطه است و تنها با ورود دما و فشار، دستگاه خود نسبت به تعیین مقدار** ppm **و اعمال اقدام می کند.**



ب- دستگاههای مایکروویو(رادیوئی) : **محاسبه ضریب شکست در دستگاههای مایکروویو با توجه به اثر مقدار رطوبت نسبی و جذب اتمی و مولکولی شکلی پیچیده تر دارد. باید توجه داشت با توجه به ساختمان مولکولی آب و همچنین ساختمان اتمی اکسیژن، در این محدوده با جذب انتخابی دسته ای از امواج روبرو هستیم. لذا باید با محاسبه دقیق ضریب شکست از بروز خطا جلوگیری کرد. جذبهای مذکور که در ناحیه EHF و SHF قرار دارند بصورت زیر خلاصه شده اند:**

۱- جذب در فرکانس ۲۲ گیگاهرتزی (۲۲×۱۰^{۶}) توسط بخار آب

۲- جذب در فرکانس ۶۰ گیگاهرتزی توسط مولکولهای اکسیژن

۳- جذب در فرکانس ۳۰۰ گیگاهرتزی ناشی از جذب قوی مولکولهای بخار آب

ضریب شکست استاندار گروه n_s برای امواج رادیوئی از رابطه ایدلن[۱] بصورت زیر بدست می آید.

$$(n_s - 1) \times 10^8 = 28756.9 + 3 \times 162.06\,\lambda^{-2} + 5 \times 1.39\lambda^{-4}$$

در معادله فوق مانند مشابه برای دستگاههای الکترواپتیکی است و از معادله کلی کوشی مشتق شده است . برای استفاده از طولیاب، در عمل، نیازی وجود ندارد تا این معادله مورد استفاده قرار گیرد. برای اعمال اثر دما، فشار و رطوبت روابط زیادی وجود دارد که نشان دهنده تحقیقات جامع فیزیکدانان در این زمینه است. بسته به دقت مورد نیاز و شرایط ویژه و مدل فیزیکی مورد توجه یکی از روابط استفاده می شود. معمولاً بهتر است برای محاسبه ضریب شکست از رابطه پیشنهاد شده در کتابچه راهنمای دستگاه استفاده شود ولی جهت آشنائی بیشتر به مهمترین آنها اشاره می شود. در اکثر مواقع رابطه زیر که موسوم به معادله فروم و اسن[۲] است بکار می رود.

$$(n_g - 1) = \frac{103{,}49}{T}\,10^{-6}p + \left(\frac{0{,}496}{T^2} - \frac{17{,}23}{T}\right)10^{-6}e$$

که در آن n_g ضریب شکست واقعی، **P** فشار بارومتریک (بر حسب میلیمتر جیوه) و T دمای محیط یا خشک (بر حسب درجه کلوین)[۱] و e فشار جزئی بخار آب[۲] است. برای محاسبه e از دو روش استفاده می کنند. در روش اول فرض بر آن است از دستگاه رطوبت سنج استفاده می شود و رطوبت نسبی در دست است. در این حالت از رابطه $e = E(t_w) \times f / 100$ استفاده می شود که در آن **f** رطوبت نسبی $E(t_w)$ فشار بخار اشباع در دمای تر است و از نمودارهای مربوطه استخراج می شود. خلاصه ای از نمودار مذکور در جدول زیر آورده شده است.

دمای تر	-10 ^{0}C	0 ^{0}C	10 ^{0}C	20 ^{0}C	30 ^{0}C
$E(t_w)$	۲	٦.٤	۲.۹	٥.۱۷	۹.۳۱
ΔE / ^{0}C	۲.±۰	۳٥.±۰	٦.±۰	۰.±۱	۸.±۱

توضیح اینکه ردیف آخر جدول برای محاب فشار بخار اشباع در دماهای بین دماهای مندرج در جدول استفاده می شود. در عمل ثابت شده است که استفاده از دستگاههای رطوبت سنج نسبت به روش دوم که مشاهده مستقیم دمای تر و خشک است دقت کمتری دارد. برای بدست آوردن دمای تر، دماسنج را در حالت مرطوب نگه میدارند. این عمل با قرار دادن دماسنج در میان پنبه خیس و روشهای مشابه بدست می آید. در این حالت از معادله اشپرونگ [۳] استفاده می کنند.

$$e = E(t_w) - 0.000662 \times P \times (t_d - t_w)$$

که در آن $E(t_w)$ فشار بخار آب اشباع است که از نمودار و یا جدول فوق بدست می آید.**P** فشار بارومتریک بر حسب میلی بار، t_d و t_w بترتیب دمای خشک و تر بر حسب درجه سسیوس می باشند. دستگاههای ویژه ای برای اندازه گیری صحیح دمای خشک و تر طراحی شده اند که سایکرومتر نام دارند.

همانطور که گفته شد، شرکتها نیز برای راحتی کاربران خود، معادلات و راه های ساده تری را پیشنهاد می کنند. برای مثال شرکت تلورومتر برای محاسبه ضریب شکست دو روش پیشنهاد می کند.

الف – روش محاسباتی : با استفاده از روابطی شبیه به موارد بالا

ب- روش گرافیکی: در این روش از چارت ویژه ای مانند شکل ۲-۹ استفاده می شود. معادله مورد اشاره در مورد الف در گوشه بالا سمت راست قابل مشاهده است. برای استفاده از چارت ابتدا محل برخورد دمای تر و اختلاف دمای خشک و تر را روی شبکه پیدا می کنیم و آنرا با توجه به مقدار بارومتریک روی محور P (محور منتهی الیه سمت چپ متصل می کنیم. محل برخورد این خط با محور **N** (محور میانی) مقدار **N** را یعنی مقدار واحد در میلیون ضریب شکست را بدست می دهد.

ضریب شکست همچنین تابع ارتفاع است که بنوبه خود توسط فشار محاسبه می شود. اما بدون محاسبه دقیق و در یک حساب سرانگشتی تغییرات ضریب شکست به ازای هر کیل.متر فاصله از سطح زمین بشرح زیر است که می تواند در محاسبات تقریبی بکار رود.

برای امواج نوری و مادون قرمز $\frac{\partial n}{\partial h} \approx -23 ppm/Km$ (٤۰- برای امواج مایکروویو)

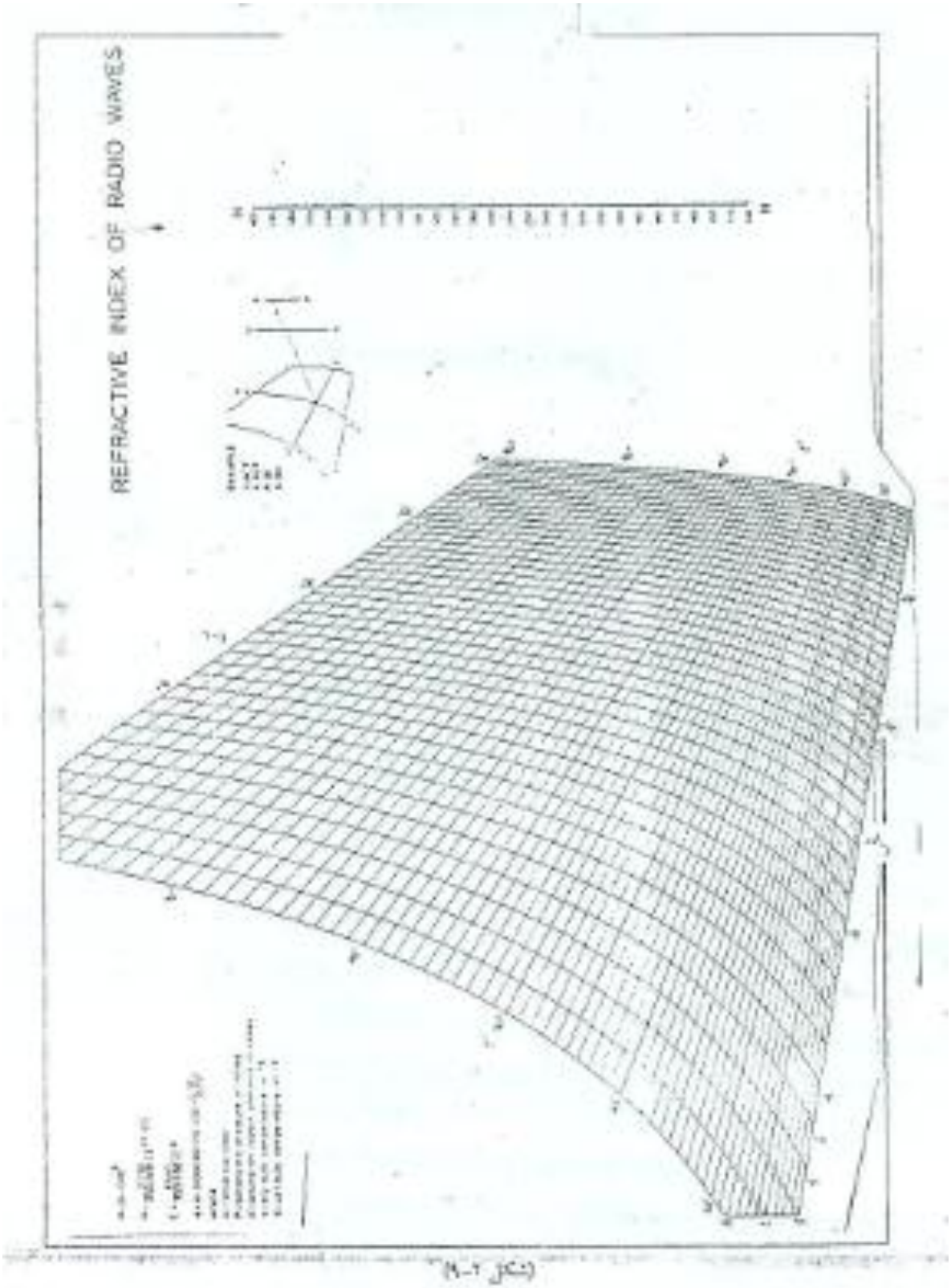
۲-۸ تصحیح طول

با توجه مطالب فوق مشخص شد که با توجه به شرایط دمائی و فشار و رطوبت طول بدست آمده باید تصحیح شود. بطور خلاصه این تصحیح سه شکل انجام می شود.

۱- در دستگاههای توتال استیشن پیشرفته با معرفی دما و فشار
۲- در دستگاههای نیمه پیشرفته، اندازه گیری دما و فشار و معرفی مقدار **ppm**
۳- در دستگاههای عادی: محاسبه مقدار ضریب شکست واقعی و استفاده از رابطه

$$S_{corrected} = S_{measured} \times \frac{ndesign}{nreal}$$

یعنی طول بدست آمده را باید در ضریب شکست طراحی دستگاه که مقدار ثابتی است و در کتابچه دستوالعمل دستگاه آمده ضرب و بر ضریب شکست واقعی محاسبه شده تقسیم کرد.



فصل سوم

مُدولاسیون

۳-۱ مقدمه

سرعت و مسیر موجها تابعی از پارامترهای فیزیکی محیط و فرکانس موج است. در فصل قبل این نکته مورد تاکید قرار گرفت که اثر محیط برای طول موجهای کوتاه کمتر از اثر مشابه بر طول موج های بلند است. ولی چنانچه در روشهای تعیین اختلاف فاز نیز گفته خواهد شد، اصولاً صحت قابل حصول در مورد طول موجهای بلند بعلت کاهش فرکانس بیشتر از طول موجهای کوتاه است.

در وهلهٔ نخست طبیعی جلوه می کند. که برای حصول دقت بیشتر، بهتر است از امواج با طول موج کوچک استفاده کرد. اما در عمل به دلایل زیر، نمیتوان از این امواج بطور منفرد استفاده کرد:

۱_ حفظ پایداری فرکانس در موجهای با فرکانس بالا (طول موج کوچک) دشوار است.
۲_ بسبب کوچکی طول موج، پیدا کردن مقدار مضرب صحیح نصف طول موج دشوار است و نیاز به فرکانسهای متعددی است.(دشواری رفع ابهام و محاسبه طول نهائی)
۳_ در فرکانسهای بالا اندازه گیری اختلاف فاز دشوار است.
۴_ در فرکانسهای بالا با افزایش فاصله یکنواختی تغییرات فاز مختل می شود.

پس با توجه به سطور فوق، با شرایطی متناقض روبرو هستیم. از یک سو برای بهبود شرایط انتشار و دقت بیشتر، ملزم به استفاده از امواج با طول موج کوچک وجود دارد و از سوی دیگر برای اندازه گیری بدون اشکال و مطمئن باید به فرکانسهای کمتر رو بیاوریم.

راه حل نهائی این مشکل، ترکیب و یا بر هم نهی هر دو گونه امواج کم فرکانس و فرکانس بالا است. بدین معنی که از امواج با فرکانس بالا برای انتقال امواج استفاده کنیم تا اثرات محیطی بر آنها اندک باشد و از امواج با فرکانس کم برای اندازه گیریها استفاده می کنیم. این عمل را مُدولاسیون و موج حاصل را موج مدوله شده می نامند. به زبان دیگر اصطلاحاً موجها

بر هم سوار می شوند. موج اصلی که به موج حاصل شباهت بیشتری به آن دارد را موج حامل می نامند و موجی که به آن اضافه می شود را موج مدوله کننده و یا سیگنال و یا موج اندازه گیری می نامند. معمولاً موج حامل دارای فرکانس بیشتری نسبت به موج سگنال است. اساس طبقه بندی طولیابها مطابق آنچه در بند ۱-۳ آمده، فرکانس موج حامل مورد استفاده در این طولیابها است.

در سیستمهای مخابراتی نیز از روش مدولاسیون استفاده می کنند. در این سیستمها برای استفاده از برد قابل توجه امواج رادیوئی، این امواج را با امواج صوتی مدوله می کنند و پیامهای صوتی را بین فاصله طولانی انتقال می دهند. در این حالت امواج رادیوئی نقش موج حامل و موج صوتی نقش سیگنال را موج مدوله کننده را ایفا می کند. در سیستمهای طولیابی غیر نقشه برداری (سیستمهای ناوبری رادیوئی) از امواج رادیوئی با طول موج بلند استفاده می شود. غالب این امواج بدون انجام مدولاسیون و بصورت تک فرکانسی (موج سینوس ساده) استفاده می شود. طبعاً عدم نیاز به دقتهای قابل توجه می تواند یک دلیل این امر باشد. در سیستمهای نقشه برداری منابع مختلفی برای ایجاد موجهای حامل و سیگنال وجود دارد که در فصل های بعد با جزئیات بیشتری مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۳-۲ روشهای مدولاسیون

با توجه به معادله کلی موج حامل یعنی $e = E \times \sin(\omega t + \Theta)$ با اعمال یک جمله متناوب سینوسی در هر بخش این معادله با فرکانس دلخواه، می توان موج حامل را مدوله کرد. برای مثال دامنه این موج که مقدار ثابت E را دارد را میتوان با الحاق موج سگنال بعنوان یک پارامتر تناوبی، بصورت متناوب درآورد. در این روش می گوئیم موج حامل بروش مدولاسیون دامنه مدوله شده است. با توجه به متغییرهای معادله موج ٤ روش مدولاسیون وجود دارد که عبارتند از :

۱_ مدولاسیون دامنه
۲_ مدولاسیون فرکانس
۳_ مدولاسیون فاز
۴_ مدولاسیون پالس (با ایجاد پالس بر روی موج حامل)

در جدول زیر روشهای مختلف مدولاسیون که در فرکانسهای خاص مورد استفاده قرار می گیرند، مرتب شده اند.

نوع موج	روش مدولاسیون
امواج رادیوئی با طول موج بلند (امور ناوبری)	مدولاسیون پالسی / فاقد مدولاسیون
مایکروویو	مدولاسیون مستقیم فرکانس
مادون قرمز و لیزر	مدولاسیون دامنه
نور مرئی	مدولاسیون غیر مستقیم دامنه

۳-۲-۱ مدولاسیون دامنه

میتوان معادله موج حامل و موج اندازه گیری را بشکل زیر نوشت.$\omega = 2\pi f$با توجه به رابطه

$$\begin{cases} e_s = E_S \sin(2\pi f_s t) \\ e_{cs} = E_c \sin(2\pi f_c t) \end{cases}$$

طبعاً موج حامل دارای فرکانس بیشتری نسبت به موج سیگنال است. پس از انجام مدولاسیون معادله موج بصورت معادله زیر در می آید.در مدولاسیون دامنه موج مدوله دارای همان فرکانس موج حامل است، اما دامنه آن توسط موج مدوله شکلی تناوبی پیدا می کند.

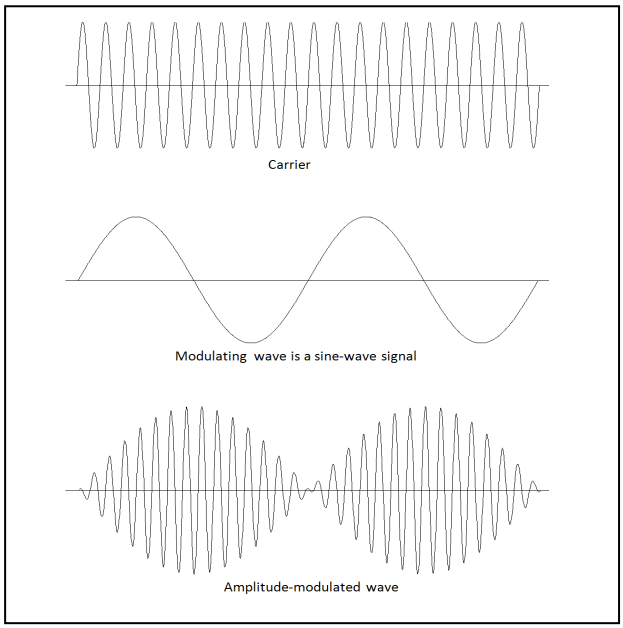
$$e_m = (E_c + KE_sSin(2\pi F_s t))Sin(2\pi f_c t)$$

که در آن Kضریبی ثابت و نسبت $\frac{KE_s}{E_c}$ را ضریب یا درجه مدولاسیون می نامند و آنرا به m نشان می دهند. باید توجه داشت مقدار m همواره باید کوچکتر از یک باشد زیرا در غیر اینصورت حالت اعوجاج پیش می آید. با توجه به تعریف ضریب مدولاسیون معادله فوق بشکل زیر در می آید.

معادله ۳-۱

$$e_m = E_c (1+ m_s Sin(2\pi F_s t))Sin(2\pi f_c t)$$

ضریب m شدت مدولاسیون و بخش سینوسی آن میزان تناوب را معین می کند. بعبارت دیگر ضریب مقدار نقاط ماکزیمم و می نیمم پوش مدولاسیون (خط نماینده موج مدوله) و بخش سینوسی تناوب پوش مدولاسیون را تعیین می کند. شکل ۳-۱ نحوه مدولاسیون دامنه را نشان می دهد.



۳-۲-۲ *مدولاسیون فرکانس*

در این روش دامنه موج حامل ثابت می ماند ولی فرکانس موج بطور تناوب زیاد و کم می شود. با توجه به معادله کلی موج حامل و سیگنال داریم:

$$e_m = E_c Sin(2\pi f_c t)$$

در این معادله مقدار فرکانس متشکل از فرکانس موج عامل و یک فرکانس متغییر است که تناوب تغییرات فرکانس آن توسط فرکانس موج سیگنال تعیین می شود(دامنه تغییرات فرکانس معمولاً مضربی از فرکانس موج حامل است که آنرا میزان انحراف فرکانسی و یا انحراف باند می نامند.) هر گاه این دامنه کوچک باشد مدولاسیون را مدولاسیون با باند باریک و غیر اینصورت باند عریض اطلاق می کنند. فرکانس موج مدوله بصورت زیر بدست می آید :

$$f_m = f_c + Kf_c Sin(2\pi f_s t)$$

با جایگزینی این عبارت در معادله بالا، نهایتاً معادله موج مدوله حاصل می شود:

$$e_m = E_c Sin(2\pi f_c(1+KSin(2\pi F_s t))\, t\,)$$

پرسش ۳-۱ : فرکانس موج حامل و موج سیگنال یک موج مدوله بترتیب برابر با ۱۰۰ مگاهرتز و ۱ کیلوهرتز است. اگر به ازای هر ولت از مقدار سیگنال ۲ کیلوهرتز تغییر فرکانس وجود داشته باشد، مطلوبست:

الف – باند فرکانسی و تناوب تغییرات فرکانس بشرط آنکه دامنه موج سیگنال برابر با ۲۵ ولت باشد.

ب – باند فرکانسی و تناوب تغییرات فرکانس بشرط آنکه فرکانس نصف شود.

ج – باند فرکانسی و تناوب تغییرات فرکانس بشرط آنکه دامنه نصف مقدار مورد الف باشد.

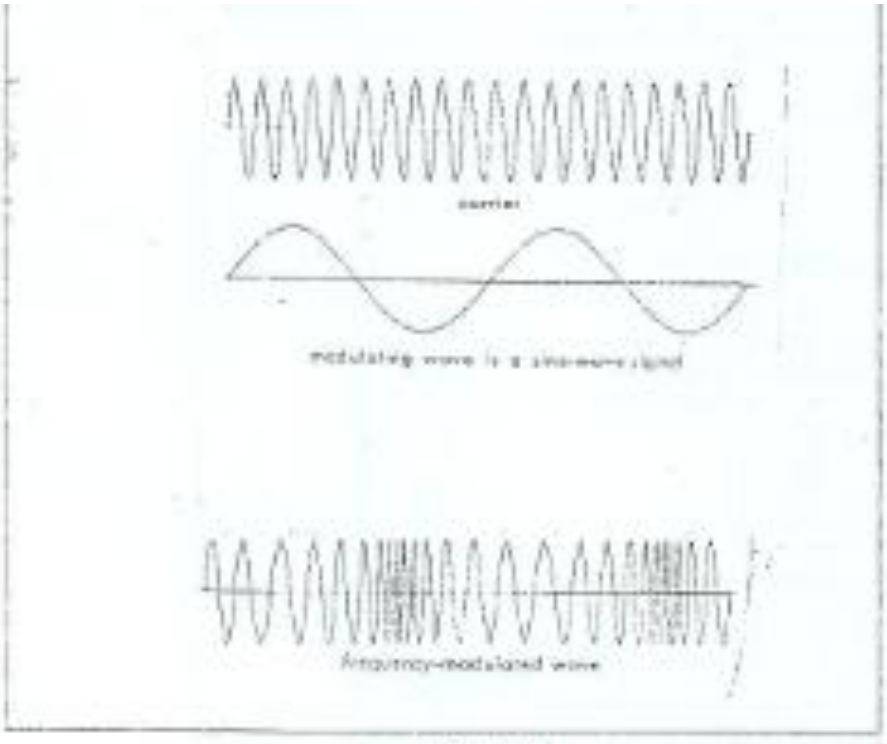
***پاسخ* :**

الف_ با توجه مقدار دامنه، انحراف فرکانسی برابر با ۲۵*۲۰۰۰ هرتز برابر با ۰.۰۵ مگا هرتز است. لذا باند فرکانسی موج مدوله برابر با محدوده ۱۰۰.۰۵_۹۹.۹۵ مگاهرتز است. (تناوب تغییرات فرکانس بستگی به فرکانس موج سیگنال دارد) یعنی فاصله زمانی بین این دو مقدار حداکثر و یا حداقل برابر با ۱۰۰۰ ثانیه است.

ب – در این حالت باند فرکانسی ثابت بوده ولی این بارهر ۵۰۰ ثانیه مقدار فرکانس به حداکثر (و یا حداقل) می رسد.

ج – در این حالت تناوب تغییرات فرکانس برابر با حالت الف است ولی باند فرکانسی بین ۹۹.۹۷۵ تا ۱۰۰.۰۲۵ تغییر می کند.

مدولاسیون فرکانس را معمولاً با علامت FM و مدولاسیون دامنه را با علامت AM نشان می دهند. در بخش صدا هر دو نوع مدولاسیون بکار می رود. در بخش تلویزیون تصویر با AM و صدا با FM پخش می شود. شکل۳_۲ نحوه مدولاسیون فرکانس را نشان می دهد.



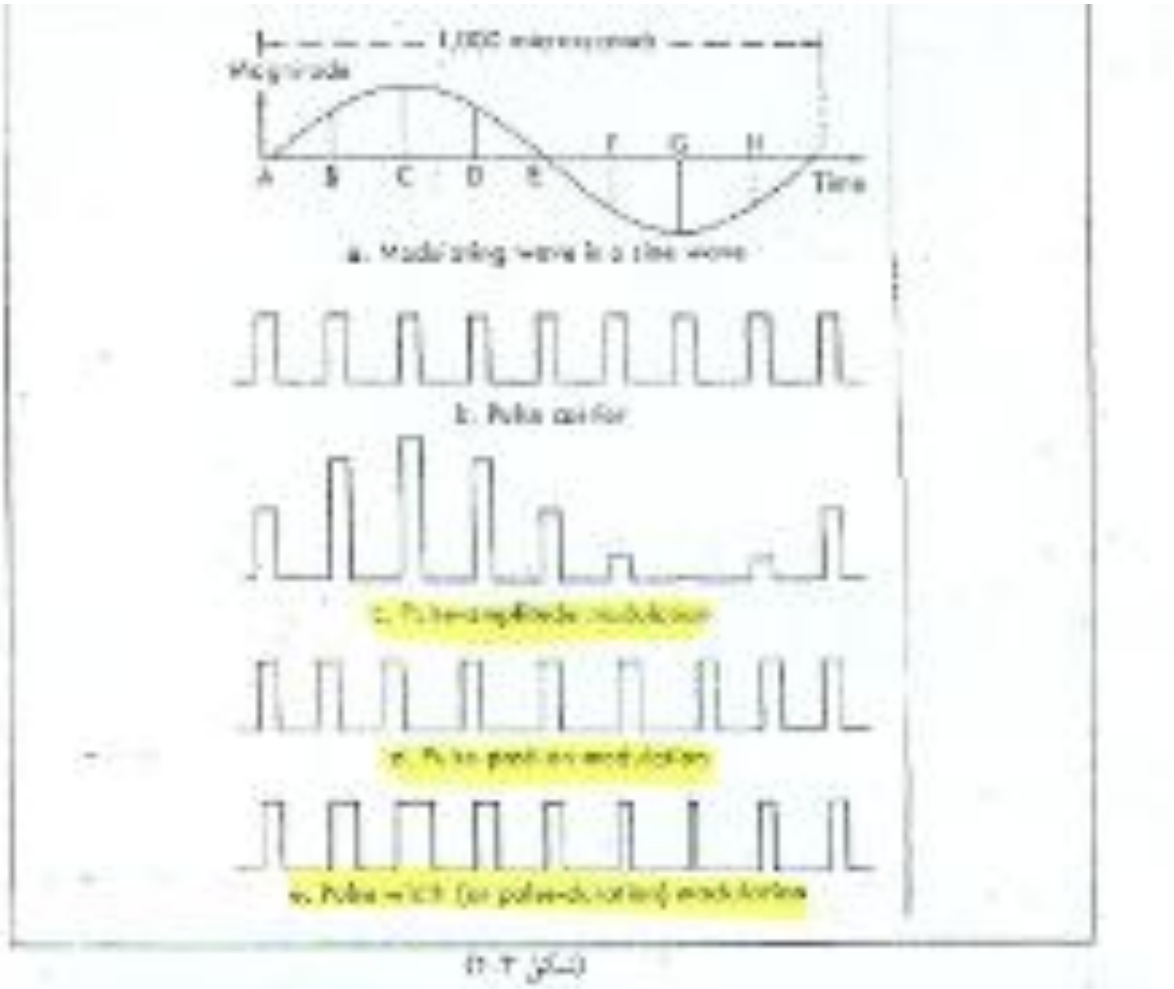
(شکل ۳-۲)

۳-۲-۳ مدولاسیون فاز

در روش مدولاسیون فاز بشکلی مشابه با مدولاسیونهای پیشگفته، مقدار فاز شکل تناوبی پیدا می کند. بدیهی است بعلت مبتنی بودن اکثر روشهای اندازه گیری طول بر تعیین اختلاف فاز، این روش کاربردی در تکنیکهای طولیابی ندارد.

۳-۲-٤ مدولاسیون پالس

ضربان و یا پالس به شکلهای مختلف در سیستمهای طولیابی مورد استفاده قرار می گیرد. اصطلاحاً تغییر آنی و کوتاه مدت ولتاژ را پالس می گویند. در شکل زیر مشخصات اساسی یک پالس نشان داده شده است. پالس هم بصورت منفرد و هم بصورت موج حامل (جهت مدولاسیون توسط یک موج سیگنال) استفاده می شود. شکل ۳-۲ انواع مدولاسیونهای پالسی را نشان می دهد.



(شکل ۳-۲)

۳-۳ منابع موج و روشهای مدولاسیون

هر روش مدولاسیون معایب و مزایای خاص خود را دارد که این امر مبتنی بر روش انجام مدولاسیون است. بسته با ماهیت فیزیکی منبع موج الکترومغناطیس روشی خاص برای مدولاسیون استفاده می شود. مثلاً بطور کلی، مصونیت مدولاسیون

دامنه در مقابل فرکانسهای مزاحم و یا نویز کمتر است. در مدولاسیون فرکانس این مصونیت بهتر و مدولاسیونهای پالسی بهترین کیفیت را دارند. نویز، طبق تعریف، هر گونه آشفتگی الکتریکی است که با سیگنال مخابره شده تداخل کند. نویز می تواند ناشی از منابع ناخواسته و نوسانات تصادفی ولتاژها و جریانها تشکیل شده باشد. در طراحی سیستمها همواره یکی از اهداف بالا نگه داشتن هر چه بیشتر نسبت توان مطلوب سیگنال به توان نویز است. حال به بررسی منابع امواج حامل و سیگنال پرداخته می شود.

در سیستمهای الکترواپتیکی از امواج نور مرئی، مادون قرمز و یا لیزر بعنوان موج حامل استفاده می شود. منابع مورد استفاده در این سیستمها در بخشهای بعدی با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار می گیرند و در اینجا تنها به ذکر نام آنها اشاره می شود.

الف – دیود نوری گالیوم ارسنیک (ارستاید) برای امواج مادون قرمز

ب – لیزری گازی هلیوم نئون برای نور مرئی

ج – دیود لیزری برای نور لیزر

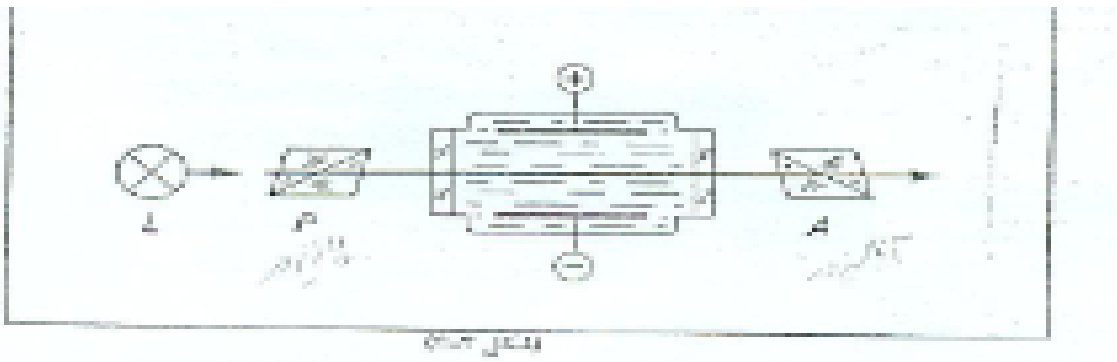
د – لامپ فلاش گاز زنون برای نور مرئی

ه – لیزر لامپ رشته ای تنگستن با ولتاژ کم برای نور مرئی

و – لامپ بخار جیوه برای نور مرئی

در سیستمهای الکترواپتیکی معمولاً از روش مدولاسیون دامنه استفاده می کنند. علت اصلی این عمل عدم سنخیت ماهیت موج حامل و موج سیگنال است. سیستم مدولاسیون بدو صورت مستقیم و غیر مستقیم است.

در دستگاههای مادون قرمز و یا لیزر، موج تولیدی خود پلاریزه است و تنها با تغییر متناوب منبع ولتاژ بر اساس فرکانس موج سیگنال، موج بطور مستقیم مدولاسیون دامنه می شود. برای مثال در مورد دیود نوری یا LED[1] هرگاه این منبع به مولد برق مستقیم متصل شود، شدت یا دامنه نور مقدار ثابتی خواهد داشت. اما اگر همین منبع نور به مولد متناوب متصل شود حامل نوری با شدت متناوب خواهد بود. حال اگر تناوب مولد الکتریکی توسط موج سیگنال تعیین شود، حاصل یک موج مدوله با دامنه متناوب خواهد بود. یکی از علل سادگی سیستمهای مادون قرمز و لیزر نسبت به سیستمهای قدیمی تر همردیف که بر اساس نور مرئی کار می کردند همین روش مدولاسیون است.
در سیستمهائی که با نور مرئی کار می کنند مدولاسیون بایستی بطریق غیر مستقیم انجام شود. بمنظور انجام مدولاسیون دامنه در این سیستمها از سلولهای الکترواپتیکی بنامهای سلول کر یا کی دی پی[2] استفاده می شود. این سلولها که توسط یک جریان متناوب الکتریکی کنترل می شوند که فرکانس تناوب توسط فرکانس موج سیگنال تعیین می شود. این سلولها مانند یک دروازه یا اصطلاحاً شاتر[3] عمل می کنند و بسته به شدت میدان الکتریکی وارده راه را بر بخشی از نور عبوری می بندند. در نتیجه با توجه به تناوبی بودن این میدان، شدت نور و یا دامنه آنرا متناوب می کنند. علاوه بر این بر خلاف منابع رادیوئی و مایکروویو و خمچنین منابع مادون قرمز و لیزر، منابع نور مرئی مورد اشاره هیچیک پلاریزه نیستند. در نتیجه این منابع در ضمن ندولاسیون بایستی پلاریزه هم شوند که این باعث پیچیده تر شدن سیستمهای نور مرئی می شود. وجود دو صافی پلاریزه کننده (بنامهای پلاریزوز و آنالیزور) در قبل و بعد سلولهای الکترواپتیکی بهمین منظور است. شکل ۳-۳ یک سلول کر را نشان می دهد.



در سیستمهای رادیوئی از مدارهای نوسانساز میدان الکتریکی (اسیلاتورها[۱]) و آنتن برای ایجاد موج استفاده می شود. مدارهای نوسانساز همگی مبتنی بر وجود یک کریستال هستند[۲] و در بخش الکترونیک خلاصه ای از آنها بررسی می شود. با توجه به سنخیت هر دو موج عمل مدولاسیون به کمک روشهای الکترونیکی امکان پذیر است. با توجه به پیشرفت علم الکترونیک و ساخت انواع آی سی ها، عمل مدولاسیون با وارد دو ورودی به پایه های خاص آی سی مربوطه و گرفتن موج مدوله در خروجی انجام می شود. در برخی از سیستمهای مایکروویو از لامپهای تقویت و مولد میدانهای متناوب الکتریکی موسوم به لامپهای کلایسترون و مگنترون[۳] استفاده می شود. جزئیات بیشتر در نحوه کار این لامپها ضمن بررسی سیستمهای مایکروویو ذکر خواهد شد.

۳-٤ ملاحظاتی درباره موج مدوله

الف : فرآیند هترودین : در قسمتهای قبل ضمن بررسی مدولاسیون دامنه، معادله موج مدوله بصورت معادله ۳-۱ بدست آمد. با بسط این معادله خواهیم داشت:

$$e_m = E_c \sin(2\pi f_c t) + mE_c \sin(2\pi F_s t)\sin(2\pi f_c t)$$

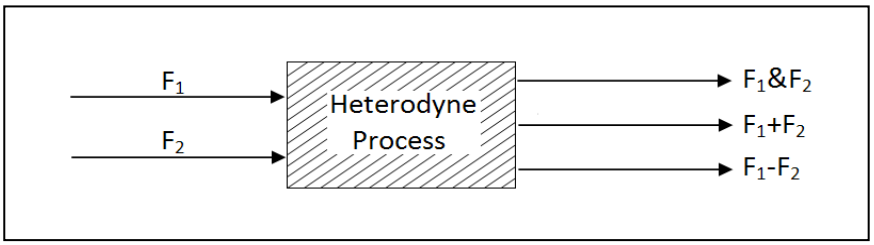
حال با توجه به تبدیل ضرب ۲ تابع سینوسی به تفریق ۲ تابع کسینوسی خواهیم داشت :

$$e_m = E_c \sin(2\pi f_c t) + \frac{mEc}{2}\cos 2\pi(F_s - F_c)t - \frac{mEc}{2}\cos 2\pi(F_s + F_c)$$

مفهوم عبارت ریاضی فوق یعنی موج مدوله دارای سه مولفه است. با روشی مشابه می توان همین مطلب را برای مدولاسیون فرکانس نیز نشاند داد. در عمل نیز مشاهده می شود زمانیکه دو موج بطرق الکترونیکی یا الکتریکی بیدیگر مطلق می شوند، موج حاصل یا موج مدوله ماهیتی پیچیده پیدا می کند. الحاق دو موج را در صورتیکه اختلاف فرکانس زیاد باشد را به مدولاسیون تغییر می کنند ولی الزما در هر نوع الحاقی فرکانس دو موج زیاد نیست. در هر دو صورت موج مدوله همانطور که روابط ریاضی نیز حکم می کند از مولفه های زیر تشکیل می شود.

۱_ مولفه های با فرکانسهای امواج پایه[۱] .
۲_ مولفه های با فرکانسی معادل جمع دو فرکانس پایه (حامل و سیگنال)
۳_ مولفه های با فرکانسی معادل تفاضل دو فرکانس پایه (حامل و سیگنال)

در نتیجه بدیگر روی از اتحاق (یا مدولاسیون) دو موج ۳ دسته موج حاصل می شود. به این فرآیند اصطلاحاً فرآیند هترودین[۲] می گویند. معمولاً در سیستمهای طولیابی این ۳ موج حاصل بروشهای الکترونیکی از یکدیگر شده و غالباً از مولفه حاصل از تفریق و جمع ۲ فرکانس استفاده و موج های پایه کاربردی ندارند[۳] . جداسازی این امواج و فیلتر کردن آنها باعث می شود تا موج حاصل دارای دامنه اختلاف فرکانسی کمتر بوده و از اینرو در سیستمهای مخابراتی کاربرد وسیعی دارد. شکل زیر فرآیند هترودین را نشان می دهد.



نکته حائذ اهمیت در فرآیند هترودین که باعث کاربرد وسیع آن شده این واقعیت است که هر یک از موج های حاصل از نظر زاویه فاز با مبداء خود تفاوتی ندارند یعنی :

۱_مولفه های امواج اصلی دارای همان زاویه فاز امواج پایه هستند.
۲_مقدار لحظه ای زاویه فرکانس مجموع برابر با جمع مقادیر لحظه ای زاویه فاز دو موج پایه است.
۳_مقدار لحظه ای زاویه فرکانس تفاضل برابر با تفاضل مقادیر لحظه ای زاویه فاز دو موج پایه است.
ثبات زاویه فاز و بقای اختلاف فاز در صورت مدولاسیون یا الحاق دو موج با توجه به استوار بودن روش اندازه گیری طول بر زاویه فاز اهمیت زیادی دارد. در سیستمهای طولیابی از فرآیند هترودین در امر تقلیل فرکانس استفاده می کنند و منظور از این عمل در ۲ مورد زیر اشاره شده است.

تقلیل فرکانس جهت اندازه گیری اختلاف فاز عملی بسیار حیاتی است. اختلاف فاز موج سیگنال ارسالی و دریافتی اساس اندازه گیری است. از طرفی مقدار زمانی یک پریود موج سیگنال مقدار زمان کوچکی است. برای مثال در یک دستگاه نوعی که از موج ۱۵ مگاهرتز استفاده می کند، زمان پریود برابر با ٦٧ نانوثانیه است. از اینرو باید تدبیری اندیشید تا ضمن تقلیل فرکانس افزایش وضوح اختلاف فاز اولیه از بین نرود. بنابراین موج اصطلاحاً کاری با فرکانس مشابهی اصطلاحاً سوپر هترودین می کنند. یعنی آنرا با موجی مشابه (از نظر زاویه فاز) ملحق کرده، موج فرکانس تفاضل را فیلتر می کنند. برای مثال برای موج ۷۵ کیلوهرتزی از یک موج ٦۰ کیلوهرتزی استفاده می کنند تا موج تفاضل فرکانس برابر با ۱۵ کیلوهرتز باشد. در نتیجه فرکانس موج اولیه ۵ برابر کوچک می شود. حال با وضوح بیشتری میتوان اختلاف فاز را تعیین کرد.

تقلیل فرکانس جهت محدودیت مدارهای دستگاه نیز اهمیت زیادی دارد. موج برگشتی پس از ردیابی باید تقویت شود. تقویت کننده های میدانهای متناوب دارای مدوده های خاص فرکانسی هستند که جهت آنها طراحی شده اند. به این فرکانسهای خاص اصطلاحاً فرکانس واسط[1] می گویند. این فرکانسها عموماً بسیار پائینتر از فرکانس امواج حامل هستند. لذا باید با استفاده از یک اسیلاتور داخلی با هترودین کردن موج دریافتی، موج رسیده را جهت استفاده تقویت کننده آماده ساخت. بدیهی است فرکانس اسیلاتور (F1) باید برابر با اختلاف فرکانس موج واسط (IF) و موج دریافتی(F2) باشد تا پس از هترودین شدن موج حاصل برابر باF1_F2=IF بوده و قابل استفاده برای تقویت کننده شود.
در دستگاههای مایکروویو برای اجتناب از اینوع اسیلاتور داخلی، فرکانس موج حامل برگشتی را بگونه ای تنظیم می کنند تا اختلاف فرکانس موج حامل از رفت و فرکانس موج حامل برگشت برابر با مقدار فرکانس کاری تقویت کننده باشد. از اینرو اگر فرکانس خاص تقویت کننده برابر با ۳۳ مگاهرتز باشد، دستگاه ارسال، فرکانس موج خامل خود را به اندازه ۳۳ مگاهرتز پائین تر از دستگاه مقابل تنظیم می کند. لازم بتوضیح است در سیستمهای مایکروویو دستگاه مقابل (ریموت) پس از دریافت موج از دستگاه ارسال کننده (مستر) آنرا بسوی دستگاه ارسال کننده باز پس می فرستد. با توجه به توضیحات فوق، علت لزوم تنظیم بودن فرکانس دستگاه ریموت و مستر در این سیستمها معلوم می شود.

***ب : فرآیند دمولاسیون :* همانطور که گفته شد هدف از مدولاسیون استفاده همزمان از مزایای امواج کم فرکانس و با فرکانس بالا است. اما باید توجه داشت این موج مدوله کننده است که جهت اندازه گیری اختلاف فاز بکار می رود و پس از دریافت موج برگشتی دیگر نیاز به وجود موج حامل نیست. بنابراین با روشهائی شبیه به مدولاسیون موج حامل را از موج دریافتی حذف می کنند که این فرآیند دمودلاسیون نامیده می شود. این فرآیند دقیقاً برعکس مدولاسیون است و معمولاً از هر روشی برای مدولاسیون استفاده شود، با همان روش دمدولاسیون نیز انجام می شود. برای مثال در دستگاههائی که از سلول کر – روش غیر مستقیم مدولاسیون – استفاده می شود، برای دمدولاسیون نیز از همین سلولهای الکترواپتیکی استفاده می شود.**

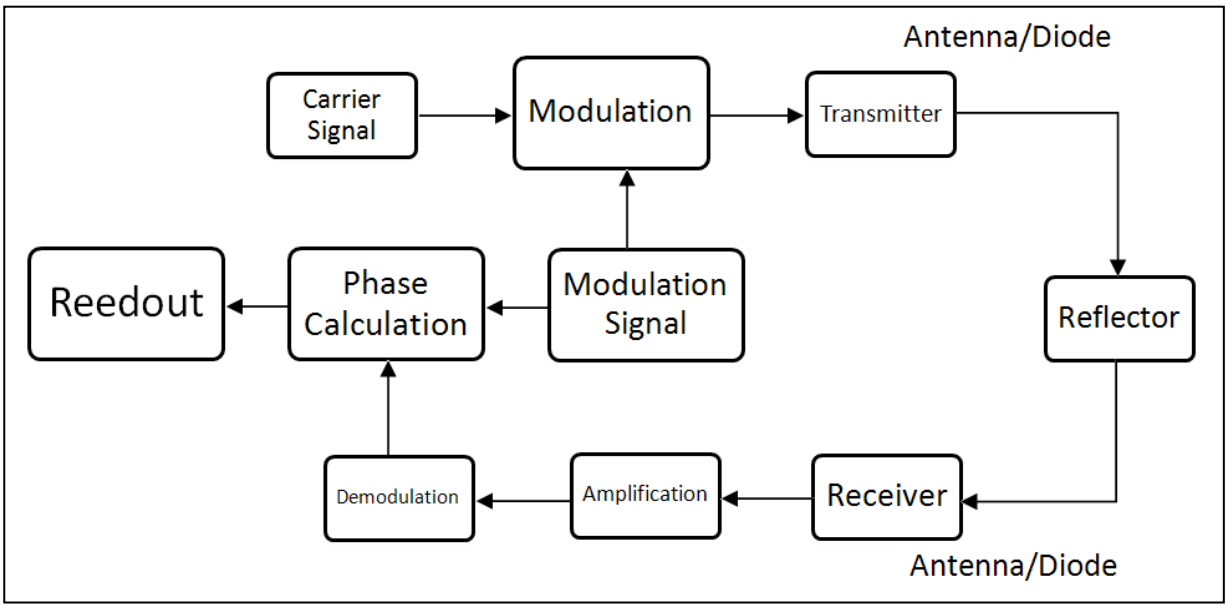
فصل چهارم_اصول اندازه گیری فاصله

٤-١ مقدمه

برای درک اساسی نحوه اندازه گیری فاصله، نیاز به آگاهی از مفاهیمی اولیه بود که در فصول قبل مورد مطالعه قرار گرفت. حال می توان به بررسی موضوع اصلی اندازه گیری فاصله بروشهای الکترونیکی پرداخت.

بطور کلی برای اندازه گیری یک طول و یا آنطور که نقشه برداران می نامند یک طول باز، امواج مدوله شده از یک سر این باز به انتهای دیگر گسیل می شوند. حال بعد از رسیدن امواج به نقطه دیگر دو حالت پیش می آید. در حالت نخست این امواج توسط یک عامل انعکاس کننده مانند یک رفلکتور یا پریزم یا منشور شیشه ای (آینه ای) بازتاب داده می شود. سیستمهای الکترواپتیکال معمولاً به این صورت موج ارسالی دریافت می کنند. در سیستمهای مایکروویو عامل بازتاب دهنده، دستگاهی مشابه دستگاه ارسال کننده موج است که موج دریافتی را بهمان صورت و یا اندکی تغییر و گاهی بعد از تقویت باز پس می فرستد.

شکل ٤-١ نمای عمومی نحوه اندازه گیری طول را نشان می دهد.



(شکل ٤-١)

شکل ٤- ١ نمایش عمومی سیستمهائی است که بر اساس اندازه گیری اختلاف زاویه فاز کار می کنند. گرچه کماکان اکثریت قریب به اتفاق سیستمهای طولیاب منفرد و از جمله طولیابهای تعبیه شده در توتال استیشنها بر مبنای اندازه گیری اختلاف فاز کار می کنند ولی بجز روش اندازه گیری اختلاف فاز از روش دیگری موسوم به روش پالس زمانی[1] استفاده می شود. با توجه به کاربرد وسیعتر و همچنین تقدم تاریخی روش اول در مرحله مورد بررسی قرار می گیرد.

٤-۲ روش اختلاف فاز

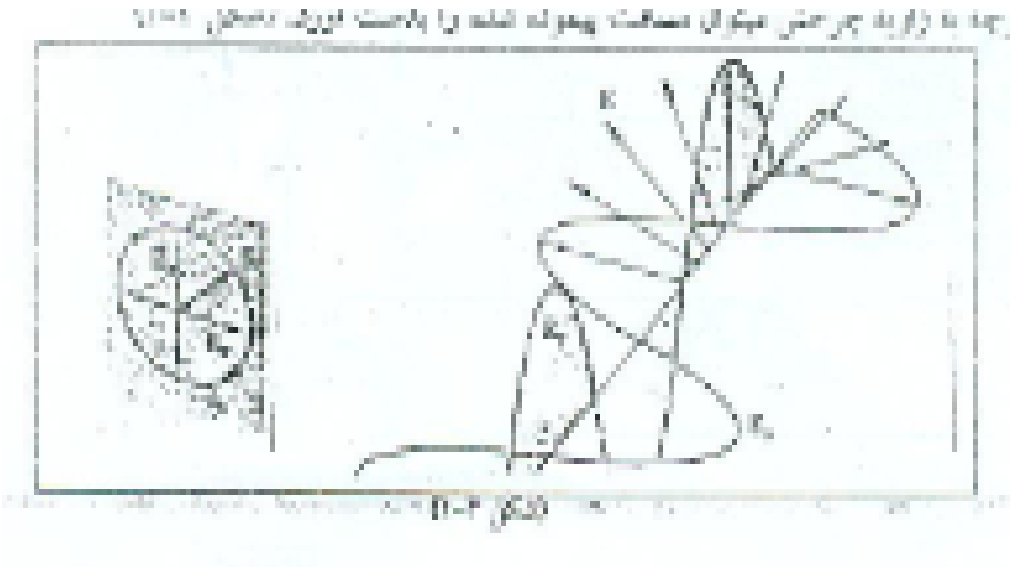
در حال حاضر بیش از ۹۵% از طولیابهای الکترونیک از روش تعیین فاصله بر اساس اختلاف زاویه فاز موج ارسالی و موج برگشتی استفاده می کنند. اختلاف زاویه فاز و یا بعبارتی اختلاف فاز را بسته به روشهای رایج می توان به یک مقدار از طول و یا زمان نسبت داد. در فصل ۲ اشاره شد که چگونه مقدار این زاویه منجر به دستیابی به یک مقدار از کمیت طول شود.

طی سی ساله اخیر دقت اندازه گیری فاز پیشرفت زیادی داشته است و قدرت تکنیک اندازه گیری فاز از یکصدم طول موج (یا تناوب کامل) به ده هزارم یک طول موج افزایش یافته است. بهر رو قدرت تفکیک یک هزارم طول موج استانداردی معمولی بحساب می آید.

قبل از به روشهای اندازه گیری زاویه فاز پرداخته شود، ضروری بنظر می رسد تصویری عینی از این مقدار مورد اندازه گیری وجود داشته باشد. میدانیم امواج الکترومغناطیس متشکل از ۲ بردار الکتریکی و مغناطیسی عمود بر یکدیگر و عمود بر امتداد انتشار هستند. هر گاه ناظری در امتداد انتشار قرار گیرد، این بردارها را بصورت شعاعهای که از امتداد انتشار خارج می شوند (امتداد انتشار از دید ناظر بصورت یک نقطه دیده می شود.) در حالت کلی این شعاعها در همه جهت امتداد می یابند و از اینرو به موج مزبور موج غیر پلاریزه می گویند. هر شعاع با یک امتداد مرجع یک زاویه می سازد که ما از آن بعنوان زاویه فاز تعبیر می کنیم. در نور غیر پلاریزه مانند نور لامپ تنگستن زوایای فاز شعاعها به یکدیگر برابر نیستند.

از فیزیک دبیرستان می دانیم که با عبور این موج از یک صفحه پلاریزه کننده تنها آندسته از امواج که زاویه فازشان با جهت پلاریزاسیون صفحه مطابق است از آن عبور می کنند. موج حاصل متشکل از شعاعهای است که دارای یک زاویه فاز مشخص هستند و از اینرو به آنها امواج پلاریزه سطحی و یا خطی گویند. چرا تناوب بردارهای الکتریکی در یک صفحه قرار دارد و یا خط نماینده تغییرات میدان بر روی یک خط قرار می گیرد.

علاوه بر پلاریزاسیون سطحی، پلاریزاسیون دایره ای نیز وجود دارد، به این ترتیب که موج پلاریزه ضمن پیشرفت در محیط بطور متناوب زاویه فازش تغییر می کنند. به تعبیر دیگر هر بردار مانند ملخ هواپیما و یا یک پیچ ضمن حرکت بجلو حول امتداد انتشار دوران می کند. لذا با توجه به زاویه چرخش میتوان مسافت پیموده شده را بدست آورد. شکل(٤-۲)



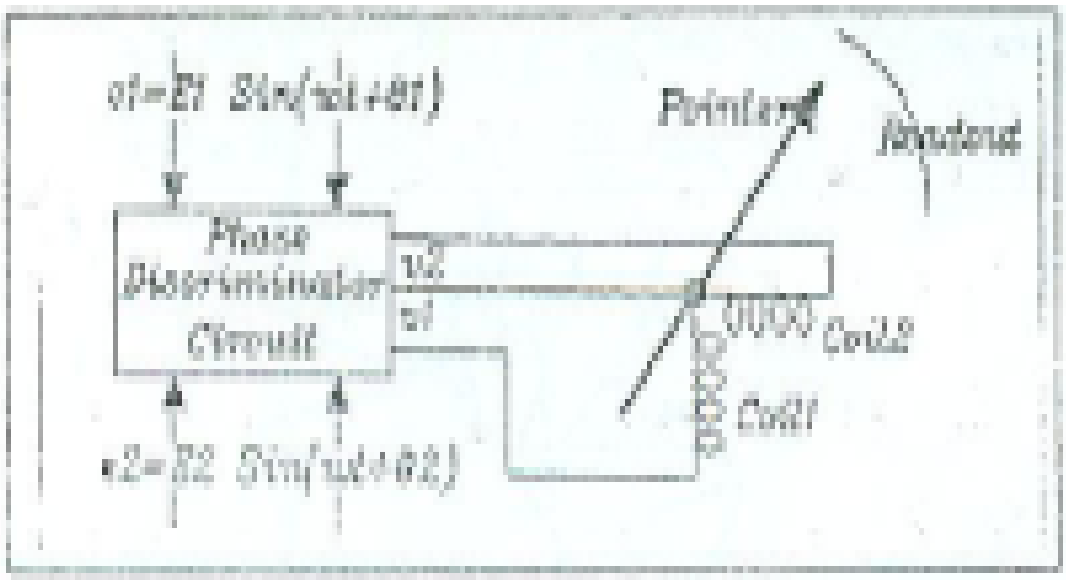
نحوه محاسبه طول را پس از آنکه حرکت ماپیچی موج بروی دایرهای مبنا و یا مرجع تصویر شده مورد مطالعه قرار گرفت. یادآوری می شود در روش اندازه گیری اختلاف فاز، تنها فاصله غیر مبهم بدست می آید. تنها پس از ترکیب منطقی طولهای

غیر مبهم بدست آمده توسط فرکانسهای مختلف است که طول نهائی قابل محاسبه است. در انتهای این فصل به روش حصول عملی فاصله بر مبنای طولهای غیر مبهم اشاره شده است.

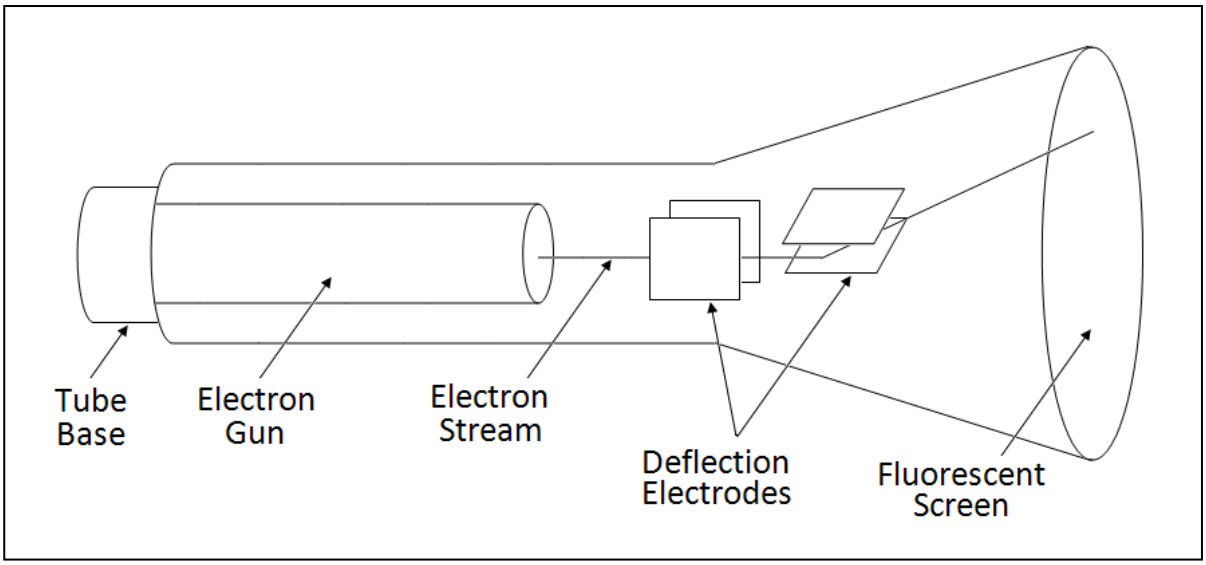
٤-٢-١ روشهای اندازه گیری اختلاف فاز

روشهای اندازه گیری اختلاف فاز را میتوان در سه دسته بزرگ طبقه بندی کرد:

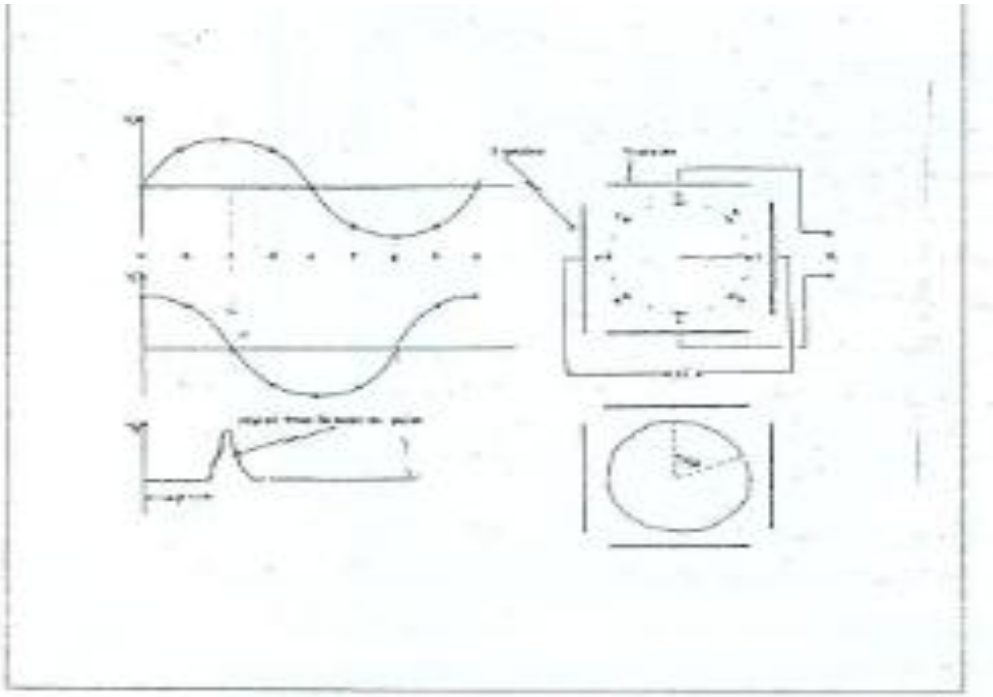
الف) روش مدار ممیزی[1] **: جزئیات مدار در این روش خارج از بحث و تنها به ذکر این نکته اکتفا می شود که ورودی این مدار دو موج ارسالی (موج مرجع) و موج دریافتی (امواج سیگنال) است که فرکانس و دامنه آنها برابر است که تنها اختلافشان در اختلاف فازشان است. ولتاژ خروجی این مدار تنها تابعی از اختلاف فاز دو موج است. برای نمایش این اختلاف فاز از روشهای گوناگونی استفاده می شود که به دو مورد آن اشاره می شود. در برخی سیستمهای غیر نقشه برداری مانند دکا**[2] **خروجی مدار ممیزی فاز به دو صورت سینوسی و کسینوسی درآمده به دو خود القا عمود بر هم اعمال می شود. برآیند میدانهای مغناطیسی ایندو خود القا باعث انحراف یک عقربه می شود که میتوان به این ترتیب اختلاف فاز را بروی یک صفحه مدرج تعبیه شده در زیر عقربه خواند و یا میتوان عقربه را از طریق مکانیسمهای به سیستمهای نمایشگر و یا شمارنده متصل کرد.(شکل ٤-٣)**



راه دیگر نمایش اختلاف فاز از طریق مدار ممیزی استفاده از یک تیوپ (لامپ) اشعه کاتدی است. ساختمان این لامپ همانطور که در شکل ٤-٤ دیده می شود، متشکل از چهار صفحه دو بدو موازی و دو بدو عمود بر هم است که بسته به ولتاژ وارده مسیر اشعه الکترونیکی را منحرف می سازد. توپ الکترونی یا گان[1] **موجود نیز شدت اشعه تابیده شده به صفحه حساس لامپ را کنترل می کند.**



در این روش ولتاژ موج اندازه گیری که توسط دستگاه فرستنده تولید شده بعنوان موج مرجع به صفحات موازی موسوم به X متصل می شود. همین ولتاژ پس از ۹۰ درجه اختلاف فاز به دو صفحه Y متصل می شود. این عمل باعث می شود تا اشعه الکترونی حول دایره ای با فرکانسی برابر با فرکانس موج اندازه گیری بچرخد که در عمل بصورت یک دایره نورانی دیده می شود. در بالای شکل ٤-٥ ولت مشاهده دایره نورانی بعلت اثرات دو موج با اختلاف فاز ۹۰ درجه نشان داده شده است. حال اگر ولتاژ رسیده از موج اندازه گیری انعکاس شده (که حاوی اختلاف فاز است) بصورت یک پالس با دامنه بزرگ و زمانهای صعود و تنزل کوچک به بخش گان اعمال می شود، امکان تعیین اختلاف فاز ممکن می شود. اگر این تقویت دامنه مانند آنچه در شکل ٤-٥ آمده بصورت مثبت باشد، الکترونها در برخورد با صفحه حساس شتاب بیشتری می گیرند و حاصل بصورت یک نقطه نورانی بر محیط دایره مشاهده می شود. در حالت پالس منفی، حاصل بصورت جای خالی یک نقطه بر محیط دایره دیده می شود. زاویه ای که شعاع مرجع (مثلاً شعاع قائم بطرف بالا) با شعاع مار از این نقطه مقدار اختلاف زاویه فاز را نشان می دهد. روش لامپ کاتدی در سیستمهای اولیه تلورومتر استفاده می شد و امروزه کاربرد زیادی ندارد.



ب) *روشهای نقطه هیچ*[1] : در میان روشهای دقیق اندازه گیری طول روشهای نقطه هیچ از محبوبیت زیادی برخوردار است. در این روش بجای تلاش برای اندازه گیری مستقیم خروجی یک مدار ممیزی فاز، مقدار زاویه فاز اعمال شده به یکی از دو موج برای آنکه اختلافشان به صفر برسد مورد مشاهده قرار می گیرد. فاز اضافی که را میتوان بروشهای مختلفی اعمال کرد که عبارتند از:

- استفاده از مدار خودالقائی متغییر – خط تاخیر[2]

- استفاده از یک اختلاف فازیاب الکترومکانیکی[3]

- استفاده از مسیر متغییر برای تحقق شرط $x + \Delta x = m\lambda$

- استفاده از فرکانس متغییر برای تحقق شرط

$$X = m(\lambda + \Delta\lambda)$$

روش اول و دوم در سیستمهای قدیمی مانند ژئودیمترهای اولی بکار می رفت. روش سوم در طولیابهای نور مرئی معروف و دقیقی مانند مکوکتر ام ئی ۳۰۰۰ ساخت شرکت کرن[4] مورد استفاده قرار گرفته است. روش چهارم نیز در دیگر محصول شرکت کرن یعنی مکومتر ام ئی ۵۰۰۰ بکار رفته است. جالب است بدانیم روش اندازه گیری نور توسط فیزو نیز شباهت زیادی به روش آخر دارد.در مدلهای جدیدتر تلورومتر روشهای مدار ممیزی و لامپ اشعه کاتدی جای خود را به روشهای نقطه هیچ (استفاده از یک اختلاف فازیاب الکترومکانیکی) دادند.

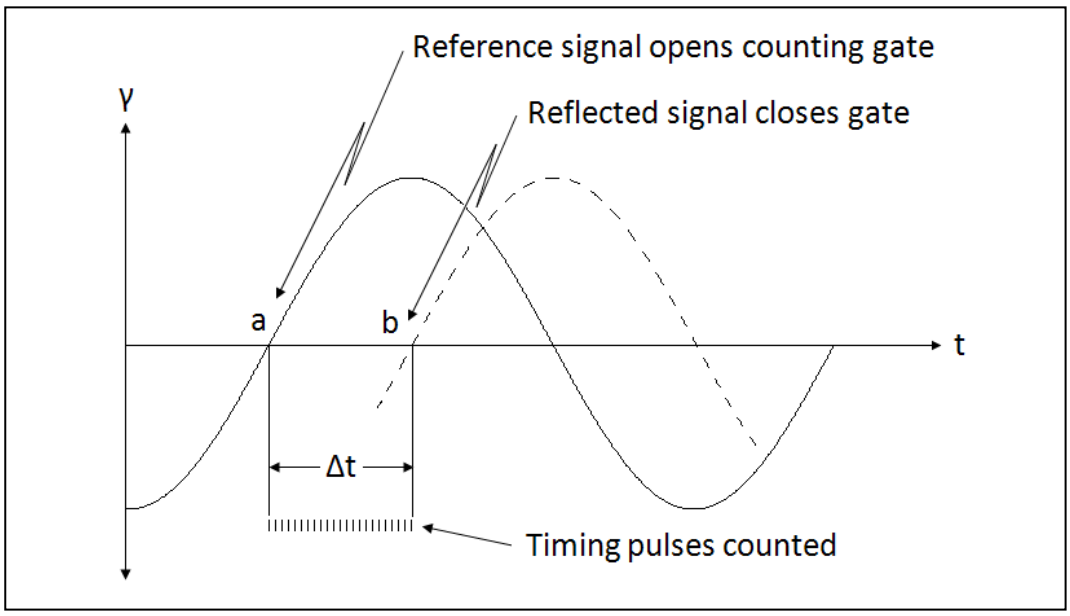
در روشهای نقطه هیچ که بطور غیر خودکار هستند معمولاً یک کلید چرخان برای به صفر رساندن مقدار قرائت شده یک عقربه نشانگر استفاده می شود. در نمونه جدیدتر سیستمهای موتور دار موسوم به موتور سروو[5] صفر کردن اختلاف فاز بطرق خودکار صورت می گیرد.

در میان روشهای بالا روش مسیر متغییر نور از آن جهت که در دستگاههای مکومتر بکار میرود حائذ اهمیت است و مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش بسبب امکان کنترل و هدایت نور مرئی توسط آینه عدسی و منشور در سیستمهائی که با نور مرئی کار می کنند استفاده پیدا می کند.

برای به صفر رساندن اختلاف فاز موج ارسالی با موج دریافتی حداکثر مقدار تغییر فاصله برابر با نصف طوا موج مدوله کننده یعنی موج سیگنال است. بنابراین هرگاه طول موج اندازه گیری از حدی بزرگتر باشد امکان استفاده از این دستگاه ۳۰ سانتیمتر است و این فاصله از طریق انعکاسهای .ممکن نیست. در دستگاه مکومتر نصف طول موج تقریباً برابر با ٤٨ مکرر از اجزای اپتیکی متعدد حاصل می شود. حاصل کار این روش دقت فوق العاده بالای دستگاههای مکومتر است که در قسمتهای بعد به آن پرداخته می شود.

ج) *روشهای دیجیتالی* : امروزه روش دیجیتالی بیش از بقیه روشها بکار می رود. غالب طولیابهای توتال استیشنها و دستگاهائی که از موج مادون قرمز و یا لیزر استفاده می کنند از این روش تعیین اختلاف فاز بهره می برند. این روش در اوائل دهه ۱۹۸۰ میلادی ابداع شده و یکی از نخستین دستگاههائی که از آن استفاده کرده است دستگاهSMLL ساخت شرکت آلمانیZeiss است.

در وهله اول دو موجی که قرار است اختلاف فاز آنها بدست آید تا میزان فرکانس مطلوبتر هترودین می شوند. در برخی از دستگاهها مانند سیستمهای ساخت شرکت ژاپنی سوکیای ژاپن موج از حالت سینوسی بحالت مربعی در آیند. یک دروازه و یا شاتر می تواند هنگامیکه زاویه فاز به صفر می رسد بحرکت درآمده و جلوی موج ارسالی را بگیرد و یا از جلوی موج را آزاد بگذارد. در ابتدا کنترل دروازه بر عهده موج ارسالی و یا موج مرجع گذاشته می شود به این معنی که وقتی فاز این موج از مقدار صفر بطرف مقادیر مثبت می رود شاتر باز شده و سیستم شمارنده پالس بکار می افتد. سپس کنترل شاتر بر عهده موج برگشتی گذاشته می شود و بهمین ترتیب هنگام عبور مقدار فاز برگشتی از مقدار صفر شاتر بسته شده و پالس شماری پایان می پذیرد. معمولاً فرکانس پالس شمارنده برابر با فرکانس موج سیگنال است. برای مثال در دستگاهی که فرکانس موج سیگنال آن ۱۵ مگاهرتز است و نصف طول موج آن برابر با ۱۰ تر است، با احتساب قدرت تفکیک یک دهزارم طول موج هر پالس معادل یک میلیمتر است. لذا پالس شماری بمعنای شمارش میلیمتری اختلاف فاز به جای ارتباط ریاضی وار زاویه فاز به فاصله غیر مبهم است. با وجود حصول قدرت تفکیک در حد میلیمتری برای دستیابی به دقتهای قابل توجه باید تعداد مشاهدات را بالا برد و در عمل نیز در دستگاههای طولیاب این عمل هزاران بار تکرار می شود تا دقتهای مندرج در کاتاگوهای مشخصات بدست آید. شکل ٤-٦ نحوه بدست آوردن اختلاف فاز بروش دیجیتالی را نشان می دهد.



(شکل ٤-٦)

٤-۲-۲ رفع ابهام

همانطور که در فصل اول و دوم اشاره شد، فاصله مورد اندازه گیری را می توان بصورت زیر نوشت :

$$2x = m\lambda + \Delta\lambda$$

که در آن m مضرب صحیح طول موج است. بدیهی است در معادله بالا بسبب آنکه تنها مقدار λ معلوم است ، با وجودیکه مقدار $\Delta\lambda$قابل اندازه گیری است نمی توان مقدار x را بدست آورد. در این زمینه مقدار مبهم m بزرگترین مانع قلمداد می شود. راههای مختلفی برای بدست آوردن مقدار m وجود دارد که ساده ترین آنها استفاده از چند فرکانس مختلف و حل دستگاه معادلات حاصله است. راه عملی دیگر تلفیق اعداد بدست آمده بعنوان $\Delta\lambda$ و حصول طول نهائی است. غالب طولیابها با استفاده از روش اخیر طول نهائی را بدست می آورند. در روزهای اولیه طولیابی خصوصاً سیستمهای مایکروویو $\Delta\lambda$ در جداولی که به همین منظور آماده شده بود، بطور منظم زیر هم نوشته می شد و طول نهائی به این طریق بدست می آمد.

در میان روشهای فرکانسهای متعدد،متداولترین روش بکار بردن فرکانسهایب وابسته به طول موج هائی است که هر یک ده برابر یکیگر هستند. بدیهی است با توجه به قدرت تفکیک اندازه گیری فاز تقریباً یک صدم طول موج مربوطه است با افزایش طول موج از دقت اندازه گیری کاسته می شود و برای هر طول موج تنها ۲-۳ رقم سمت چپ معنی دار هستند. از اینرو در جداول یاد شده در سطور فوق محلی برای نگارش ارقام غیر معنی دار خودداری و یا در صورت نگارش در محاسبات بکار گرفته نمی شد و جنبه کنترل داشت.

برای درک بهتر مثالی در مورد سیستم ٥ فرکانسی[1] نحوه حصول مقدار مبهم طول و رفع ابهام در اعداد بدست آمده برای هر فرکانس اشاره می شود. بدیهی است با توجه به دقت حاصله از هر طول موج، اعداد دقیق تر بالای جدول از ریزترین طول موج (بالاترین فرکانس) حاصل شده اند و اعداد پائین تر جدول از بلندترین طول موج (کوچکترین فرکانس) بدست آمده اند. باید توجه داشت برد نظری طولیاب بر اساس نصف طول موج بزرگترین طول موج آن طولیاب تعیین می شود. تنها در این طول موج است که امکان اندازه گیری بدون ابهام طول وجود دارد، اما می دانیم اشکال طول بدست آمده اینست که از دقت بالائی برخوردار نیست.

مثال ۱ :

A 2.65

B 32

C 13

D 51

E 45

45132.65

مثال فوق حالت ایده الی است که هر طول موج، طول موج مابعد را تایید می کند، اما در عمل همواره چنین نیست و امکان دارد حالت متناقضی هم پیش آید که نیاز به رفع ابهام وجود دارد. در دستگاههای امروزی هر گاه در هر طول موج بیش از یک واحد در رقم هم ارزش با طول موج دیگر اختلاف داشته باشد در صفحه نمایش اعلام خطا و یا مناسب نبودن شرایط اندازه گیری بنمایش در می آید. معمولاً در رفع ابهام طول موج کوتاهتر ملاک قرار می گیرد.

مثال ۲ :

A 1.05

B 50

C 86

D 48

E 14

148??.05

در مثال فوق طول موجB وC و همچنین B و A با یکدیگر مغایر هستند. در مورد B محتمل تر است که یک واحد در مورد آن اشتباه شده باشد(عدد ٥١ صحیح باشد) تا اینکه مقدار ١.٠٥برای توافق با مقدار ٥٠ تبدیل به ٠٥. شود. همینطور در مورد C محتمل تر آنست که یک واحد در ٨٦ اشتباه شده باشد (مقدار ٨٥ صحیح باشد) تا اینکه مقدار ٥٠ برای توافق با مقدار ٨٦ با ١٠ واحد تغییر به ٦٠ تبدیل شود. لذا طول بدون ابهام بصورت زیر خواهد بود.

A 1.05

B 51

C 85

D 48

E 14

14851.05

استفاده از فرکانسهائی که هر یک مضری ده فرکانس بعدی است تنها در طولیابهای مایکروویو کاربرد دارد و در طولیابهای مادون قرمز و نور مرئی معمولاً محاسبه مقدار مبهم و حصول طول با فرکانسهای کمتر انجام می گیرد. برای مثال در طولیابهای اولیه سریDM شرکت کرن تنها از دو فرکانس استفاده می شد. جدول زیر نحوه محاسبه طول را نشان می دهد.

مرحله I	مشاهده (اندازه گیری) $\frac{\Delta\phi i}{2\pi}$	طول واحد $U_i = \frac{\lambda}{2}$	طول(غیر مبهم) $L_i=\frac{\Delta\phi i}{2\pi} U_i$
١	٠.٨٢٥٣	١٠ متر	٨.٢٥٣ متر
٢	٠.٤٣٨٤	١٠٠٠متر	٤٣٨.٤٠٠
طول نهایی			٤٣٨.٢٥٣

با توجه به جدول بالا می توان دریافت که این طولیاب حتی در صورت دریافت بازتاب موج از فاصله ای بیش از ١٠٠٠ متر قادر نخواهد بود تا از طریق رفع ابهام فاصله را بدست آورد. بعبارت دیگر طول واحد (نصف طول موج) کوچکترین فرکانس یکی از عوامل تعیین کننده حداکثر برد عملیاتی طولیاب است.

در تعدادی دستگاهها از فرکانسهائی استفاده می شود که با ضریب ١٠، ١٠٠ و ١٠٠٠ بهم مربوط نمی شوند. در این دستگاهها از فرکانسهای نزدیک بهم استفاده می شود و از تفریق آنها فرکانسهای مجازی جهت تعیین فاصله حاصل می شود. بدیهی برای تفریق این امواج از فرآیند هترودین استفاده می شود و لذا روابط ریاضی مطرح شده در مورد فرآیند هترودین (فصل ٣) بر آنها حکم فرما است. این روش برای نخستین بار توسط ژنودیمتر ٤ بکار رفت و بعدها توسط شرکتهای نیکون و لایکا مورد استفاده قرار گرفت. اعداد مندرج در مثال زیر مربوط به طولیاب DTM_1 ساخت نیکون است.
در این طولیاب از فرکانسهای زیر برای مدولاسیون استفاده می شود. در مقابل هر فرکانس طول واحد (نصف طول موج) محاسبه شده است.

$$f_1 = 14.973MHz \Rightarrow U_1 = 10.00000m$$

$$f_2 = 14.935MHz \Rightarrow U_2 = 10.02508m = (\frac{400}{399})U_i$$

$$f_3 = 14.224MHz \Rightarrow U_3 = 10.52678m = (\frac{20}{19})U_i$$

همانطور که گفته شد از تفاضل این فرکانسها ، فرکانسهای مجازی با طول های واحد مورد نظر بدست می آید یعنی :

$$f_1 - f_2 = 0.038\ MHz \Rightarrow U_4 = 4000m$$

$$f_1 - f_3 = 0.749\text{MHz} \Rightarrow U_5 = 200\text{m}$$

در جدول زیر نحوه محاسبه طول نشان داده شده است. باید توجه داشت بنابر فرآیند هترودین زاویه های اختلاف فاز نیز از هم کم می شود.

مرحله i	مشاهده (اندازه گیری) $\frac{\Delta\phi i}{2\pi}$	زاویه فاز ترکیبی	طول واحد $U_i = \frac{\lambda}{2}$	طول(غیر مبهم) $L_i=\frac{\Delta\phi i}{2\pi} U_i$
۱	۰.۳۶۵۸	۰.۳۶۵۸	۱۰ متر	۳.۶۵۸ متر
۲	۰.۹۰۹۶	۰.۳۶۵۸-۰.۲۳۹۹	۲۰۰متر	۲۵.۱۸۰ متر
۳	۰.۲۳۹۹	۰.۳۶۵۸-۰.۹۰۹۶	۴۰۰۰متر	۱۸۲۴.۸۰۰متر
طول نهائی				۱۸۲۳.۶۵۸

پیچیده ترین روش رفع ابهام مقدار طول بدست آمده را شاید بتوان روش بکار رفته در دستگاه مکومتر ۵۰۰۰ ساخت شرکت کرن دانست. در این دستگاه همانطور که در روش هیچ گفته شد از طریق مدولاسیون فرکانسهای متغییر استفاده می شود. بعبارت دیگر سینتی سایزر با تغییر فرکانس آنچنان طول موج را تغییر می دهد تا طول مورد اندازه گیری دقیقاً مضرب صحیحی از طول موج (در واقع نصف طول موج) شود و از اینرو اختلاف فاز به صفر خواهد رسید در این دستگاه اندازه گیری طول از طریق صفر کردن اختلاف فاز در ٤ فرکانس مختلف انجام می گیرد. چون در این فرکانس ها مقدار بخش غیر مبهم طول برابر صفر است داریم :

$$d = m_i U_i$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

که در آن U_i طول واحد وابسته به فرکانس مربوطه و m مضرب صحیحی از طول واحد است که در طول مورد اندازه گیری وجود دارد. با توجه به آنکه طول واحد نصف طول موج است و رابطه طول موج و فرکانس، برای فرکانس اول می توان نوشت: $m_1 = \frac{2df_1}{c}$ که در آن c سرعت نور است. فرکانس دوم زمانی مورد قبول است که شرایط برقرار باشد. یعنی فرکانس اول و دوم باید نقاط هیچ بلافصل را بدست دهند. این شرط بنوبه خود شرط بعدی راباعث می شود که:

$$\frac{2df_2}{c} = 1 + \frac{2df_1}{c} \Rightarrow d = \frac{c}{2(f_2 - f_1)}$$

در عمل استفاده از همین دو فرکانس نمی تواند دقت مورد نیاز را پاسخگو باشد، از اینرو فرکانسهای سوم و چهارم نیز مورد نیاز هستند. برای فرکانس سوم شرط بالفصل بودن نقاط هیچ مطرح نیست و داریم $m_3 = m_1 + K$ که هر سه اعداد طبیعی هستند. با روشی مشابه با آنچه برای فرکانس دوم انجام شد، رابطه زیر بدست می آید.

$$\frac{2df2}{c} = K + \frac{2df1}{c} \Longrightarrow d = \frac{kc}{2\,(f3-f1)} \Longrightarrow m_1 = \frac{kf1}{f3-f1}$$

$$K = \frac{2d(f3-f1)}{c} = \frac{f_3-f_1}{f_2-f_1}$$

عبارت آخر از جایگزینی مقدار d از رابطه بالا حاصل شده است. با روشی مشابه برای فرکانس چهارم رابطه زیر بدست می آید:

$$k' = \frac{f_4-f_1}{f_2-f_1}$$

از آنجا که فرکانس اندازه گیری شده برای حصول نقطه هیچ همراه با خطاست مقادیر K'، K، m_i مقدار صحیح بدست نمی آیند لذا برای محاسبات مقدار صحیح این مقادیر بکار می رود. با بازآرائی معادلات اولیه داریم :

$$d' = m_1U_1 = INT\left(\frac{Kf1}{f3-f1}\right)\frac{c}{2f1}$$

$$d'' = m_3U_3 = INT\left(\frac{Kf1}{f3-f1} + K\right)\frac{c}{2f3}$$

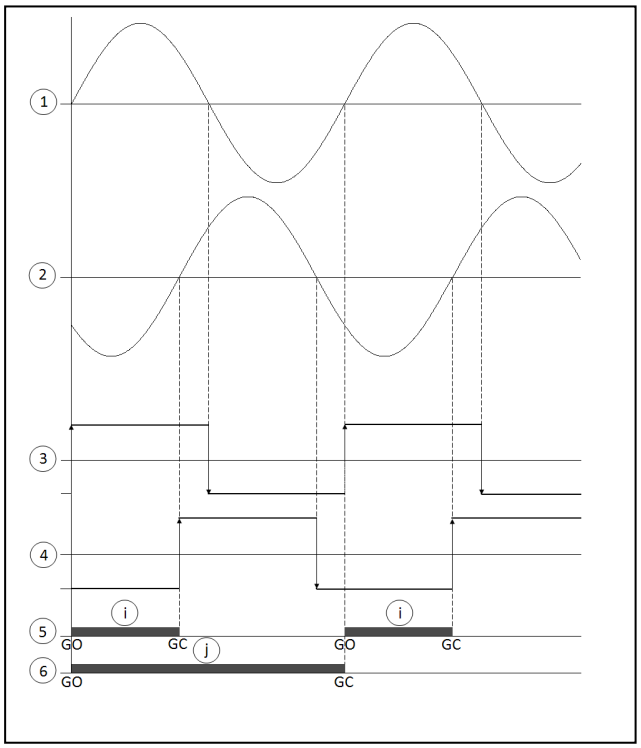
$$d''' = m_4U_4 = INT\left(\frac{Kf1}{f3-f1} + K'\right)\frac{c}{2f4}$$

در پایان دستگاه میانگین ۳ مقدار را بعنوان طول نهائی روی صفحه نمایش نشان می دهد.

٤-٢-٣ نحوه پردازش موج

در شکل ٤-٧ بشکلی ساده نحوه پردازش امواج را که به منظور اندازه گیری اختلاف فاز وابسته به هر طول موج را نشان می دهد. موج شماره ۱ در واقع شکل سینوسی امواج دریافتی و ارسالی است که مثلاً فرکانسی معادل ۱۵ مگاهرتز دارند. هر دو موج از طریق روش هترودین بکمک مدار مخلوط کننده [۱] تا ۱۵ کیلوهرتز سوپر هتودین می شوند تا کار اندازه گیری در فرکانس پائینتر راحت تر صورت گیرد. سپس هر دو موج مربعی می شوند. اختلاف فاز این دو موج در واقع فاصله زمانی است که آندو از حالت صفر به حالت یک می رسند. موج شماره ۵ این اختلاف را بصورت یک موج مربعی نشان می دهد.

مئتی که موج حالت یک می گیرد معیاری از اندازه اختلاف فاز است. این مقدار بکمک یک مقایسه با پالسهای ساعت طولیاب اندازه گیری می شود. فرکانس پالسهای ساعت بگونه ای تنظیم می شود تا یک طول موج کامل معادل ۱۰۰۰۰ پالس شود. یک شمارنده پالس، تعداد پالسهای موجود در مدت زمانیکه موج مربعی حالت ۱ دارد را حساب می کند. اختلاف فاز یا از طریق نسبت ساده پالسهای شمارش شده به عدد ۱۰۰۰۰ ضربدر 2π بدست می آید و یا براساس مدت زمان پالس ضربدر تعداد پالس، اختلاف فاز مستقیماً به زمان مربوط می شود.



٤-٣ *روش پالس*

هائی که تاکنون مورد بحث قرار گرفتند همگی مبتنی بر استفاده از موج پیوسته سینوسی بودند. در ابتدا روشهای پالسی تنها در سینوسهای مایکروویو اندازه گیری طول جهت ناوبری دریائی و هوائی استفاده می شدند اما با پیدایش روشهای جدید و دقیق زمانسنجی در طولیابهای الکترواپتیکال نیز کاربرد یافتند. معروفترین طولیاب این رده طولیاب دیستومات دی آی – ۳۰۰۰ شرکت لایکا (ویلد – لایتنز) است. قبل از جزئیات از این تکنیک ذکر شود، به مزایا و معایب آن اشاره می شود.

الف) مزایا

- **به ازای یک قدرت خروجی برد سیستمهای پالسی بیشتر است.**
- **نیاز به استفاده از فرکانسهای متعدد نیست.**
- **احتمال تداخل موج ارسالی و دریافتی در حداقل مقدار ممکن قرار دارد.**
- **با استفاده از منبع مناسب حتی میتوان بدون رفلکتور (منشور بازتاب دهنده) به کار پرداخت.**
- **نظراً حتی بکمک یک پالس می توان طول را بدست آورد.**

ب) معایب

- **تولید یک پالس تیز (نسبت طول پالس به دامنه بالا) دشوار است.**
- **نیاز به ولتاژهای بسیار بالا است.**
- **برای کاربرد مناسب تکنیک پالس باید از لیزر استفاده کرد و در نتیجه استفاده برخی از لیزرهای قوی ممکن است برای سلامتی انسان زیان بار باشد.**
- **دقت اندازه گیری سرعت رفت و برگشت پالس باید در ۱۵ پیکوثانیه صورت گیرد که تازه دقتی بهتر از ۵ میلیمتر را بدست نمی دهد[1].**

روشی پالسی در واقع همان روشی که در توضیح نحوه کار کلیه طولیابها به دانشجویان سال اول نقشه برداری توضیح داده می شود. در این روش زمان رفت و برگشت یک پالس با دقت اندازه گیری می شود و چون سرعت موج در دست است میتوان فاصله را بدست آورد.

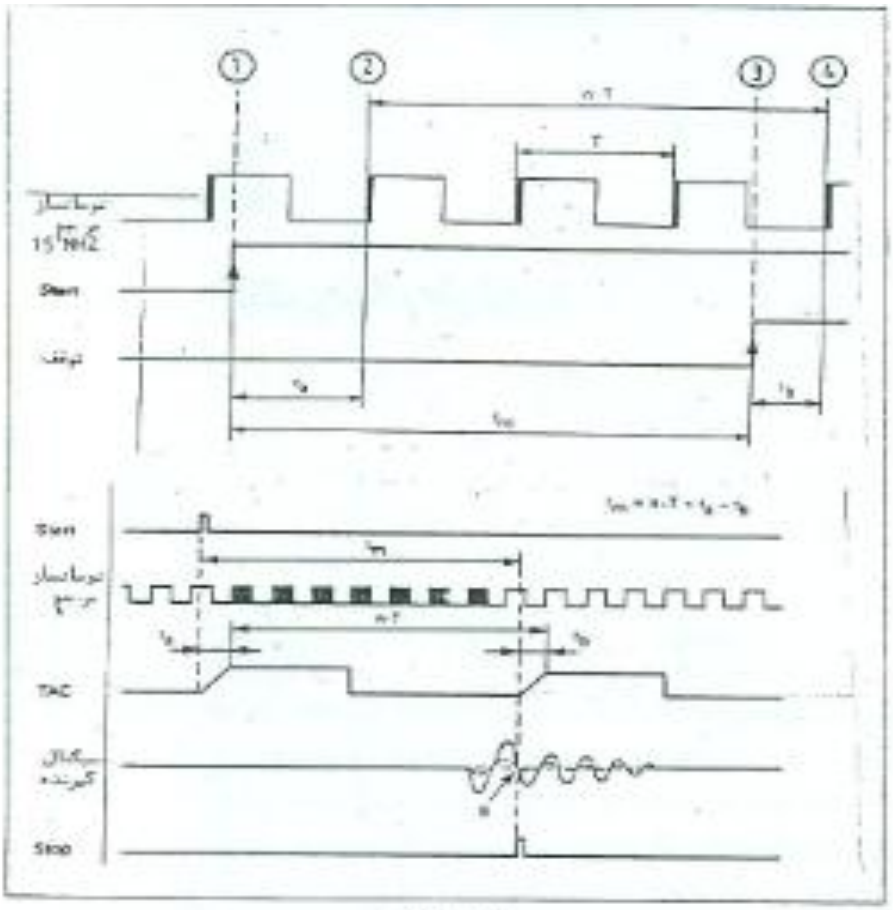
در طولیاب دیستومات DI3000 فرکانس تکرار پالس ها برابر با ۲۰۰۰ هرتز است (۲۰۰۰ پالس در ثانیه) در نتیجه فاصله هر پالس ۰.۵ میلی ثانیه است. طول هر پالس برابر با ۱۲ نانوثانیه تنظیم شده است. طول هر پالس متناظر با فاصله ۳.۶ متر است. در عمل هر پالس باید قبل از ارسال پالس بعدی به دستگاه بازتاب داده شود، لذا چون در فاصله ۰.۵ میلی ثانیه نور ۱۵۰ کیلومتر طی می کند، برد نظری این دستگاه ۷۵ کیلومتر است. برای تولید پالس ها با شدت مناسب در عرض ۱۲ نانوثانیه دهها آمپر از دیود گالیوم آرسناید دستگاه عبور می کند. چنانچه گفته خواهد شد، زمان بطور مستقیم بکمک یک نوسانساز بدست می آید. با توجه به طول موج نور پالس که برابر با ۸۶۵ نانومتر است، این دستگاه در رده دستگاههای مادون قرمز طبقه بندی می شود.

زمان بکمک یک نوسانساز مرجع که معمولاً فرکانس آن برابر با ۱۵ مگاهرتز است، شمرده می شود. اما این فرکانس بمعنی آن است که به دقتی بهتر از ۱۰ متر نمیتوات رسید. بدتر آنکه شمارنده فقط قادر به شمارش مضارب صحیح می باشد که برای حصول دقت میلی متری بهیچ وجه کفایت نمی کند. برای اندازه کسرهائی از مضارب صحیح پالس از روش ذخیره ولتاژ در یک خازن و اندازه گیری ولتاژ و ربط آن به زمان استفاده می شود.

شکل ٤-٨ نحوه محاسبه زمان رفت و برگشت پالس یا اصطلاحاً زمان پرواز[1] را نشان می دهد. شمارنده تنها قادر به شمارش تعداد پالسهای بین نقطه ۲ تا ۳ است. طبعاً مقدار فاصله ۱ تا ۲ احتساب نشده و فاصله ۳ تا ٤ اضافه حساب شده است و بنابراین با توجه به شکل می توان رابطه زیر را نوشت.

$$t_m = nT + t_a - t_b$$

مقدار nT را اندازه گیری غیر دقیق[2] و انجام اندازه گیریهای مربوط به t_a - t_b را اندازه گیری دقیق[2] می نامند. با ارسال پالس یک خازن شروع به شارژ شدن می کند، با انجام نخستین پالس شمارنده عمل شارژ شدن متوقف می شود. مقدار ولتاژ ذخیره شده در خازن به ریزپردازنده گسیل شده و حاصل اندازه زمان وابسته به این ولتاژ است. پس از حصول مقدار t_a خازن تخلیه شده و آماده انجام اندازه گیری دوم می شود. با دریافت پالس ارسالی بار دیگر خازن شروع به شارژ می شود که با اولین پالس شمارنده متوقف می شود و به طریق مشابه t_b نیز بدست می آید.
با تکرار چندین بار اندازه گیری طول در حد میلیمتر بدست می آید.



(شکل ۲-۸)

فصل پنجم_الکترونیک طولیابها

۵-۱ مقدمه

قسمت عمده یک طولیاب الکترونیک همانطور که از نام آن بر می آید مدارهای الکترونیک است. هم پیچیدگی این مدارات که از حوصله ی بحث خارج بوده و هم استفاده گسترده از مدارات مجتمع خاص باعث می شود تا از بحث در جزئیات خودداری شود. اما برای درک کلی از این موضوع به مواردی کاربردی اشاره می شود که خود باعث درک بهتر دیگر بخشهای نظری خواهد شد. طبعاً در این بخش هدف ارائه یک بخش فشرده جامع در مورد الکترونیک نبوده، بلکه اندکی موشکافی در برخی از اجزای الکترونیک طولیابها بوده است.

۵-۲ یادآوری برخی اصول اولیه

در فصل قبل گفته شد اندازه گیری اختلاف فاز اهمیتی خاص در تعیین فاصله دارد. یکی از وسایلی که در این راه بکار می رود ممیز الکترومکانیکی فاز است. برای درک نحوه این وسیله و البته دیگر وسایل باید به یادآوری برخی از اصول پرداخت.

می دانیم وقتی از یک مدار جریان الکتریسته می گذرد بین دو سر هر یک از اجزاء مدار اختلاف پتانسیل الکتریکی برقرار می شود . اگر جریانی که از مدار می گذرد متناوب و شدت لحظه ای آن بصورت سینوسی باشد اختلاف پتانسیل آن نیز سینوسی و با همان زمان تناوب است . اما معمولاً بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل یک اختلاف فاز وجود دارد . بنابراین معادله اختلاف پتانسیل لحظه ای بین دو نقطه مورد نظر زیر نوشته می شود :

$$\nu = V_m Sin(wt \div \varphi)$$

- اگر $\phi > 0$ باشد می گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان جلو است . این امر زمانی اتفاق می افتد که مدار شامل یک خود القا (سلف یا سیم پیچ) باشد . در این حالت اختلاف پتانسیل به اندازه $\frac{\pi}{2}$ نسبت به شدن جریان جلو است .
- اگر $\phi < 0$ باشد می گوئیم اختلاف پتانسیل نسبت به شدت جریان عقب است . این امر زمانی اتفاق می افتد که مدارشامل یک خازن باشد . در این حالت اختلاف پتانسیل به اندازه $\frac{\pi}{2}$ نسبت به شدت جریان عقب است .
- گر $\varphi = 0$ باشد می گوئیم اختلاف پتانسیل وشدت جریان هم فاز هستند . این امر زمانی اتفاق می افتد که مدار فقط شامل یک مقاومت باشد .

باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی و خازن و خود القا هر یک به تنهایی یا با هم نقش موثری در مدار جریان متناوب دارند . هر قطعه الکترونیکی در جریان متناوب مقاومتهایی بصورتهای زیر از خود نشان می دهد .

۱- مقاومت معمولی (رزیستانس) که در جریانهای پیوسته یکسان است .

۲- مقاومت ظاهری خود القا که تنها در جریان متناوب دیده می شود . این مقاومت که مقاومت القائی نیز نامیده می شود تابع اندوکتانس و فرکانس جریان است و از رابطه زیر بدست می آید.

$$X_L = L\omega = 2\pi f L$$

که در آن L برحسب هانری f برحسب هرتز و X برحسب اهم است .

۳- مقاومت ظاهری خازن که درجریان پیوسته برابر با بینهایت و در جریان متناوب قابل اندازه گیری است . این مقاومت ظرفیتی نیز نامیده می شود تابع ظرفیت خازن و فرکانس جریان است و از رابطه زیر بدست می آید .

$$X_c = \frac{1}{c\varpi} = \frac{1}{2\pi fC}$$

که در آن C برحسب فاراد و F برحسب هرتز و X برحسب اهم است .

حال می توان حالتی را در نظر گرفت که مدار شامل هرسه مورد بالا باشد . در این حالت مقاومت ظاهری کل مدار را امپدانس مدار نامیده و رابطه زیر بدست می آورند.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$$

در این حالت اختلاف فاز بین شدت جریان و اختلاف پتانسیل از رابطه زیر بدست می آید :

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

درترکیب مقاومت خازن و خود القا حالتهای ویژه ای وجود دارد که کاربردی اساسی در مدارهای طولیاب داشته باشد. برای مثال اگر در اتصال سری این سه جزء مقاومت ظاهری خود القاو خازن با هم برابر باشد و مقاومت ساده نداشته باشیم امپدانس مداربرابر با صفر می شود . این حالت را اصطلاحاً رزنانس مدار می نامند . این مدار بطور انتخابی در فرکانس خاصی به حالت امپدانس صفر می رسد که به آن فرکانس رزنانس می گویند . این فرکانس از رابطه زیر محاسبه می شود .

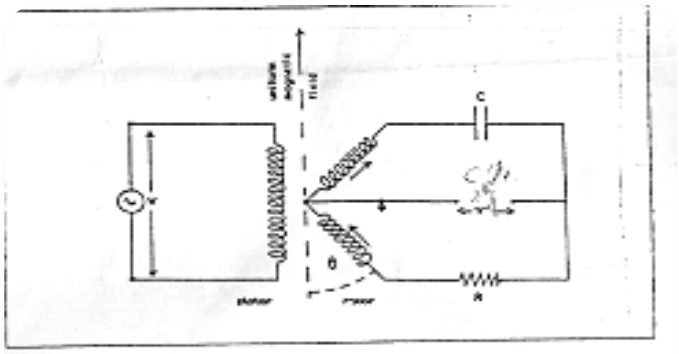
$$\boldsymbol{Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2} = 0, R = 0}$$

$$\boldsymbol{X_L = X_C \rightarrow 2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

کاربرد این مدار که مدار قبول کننده نامیده می شود در داشتن مقاومت صفر در فرکانس رزنانس و مقاومت بالا در فرکانسهای دیگر است . با موازی بستن خود القا و خازن و سری کردن آن با یک مقاومت در هنگام رزونانس حالت حداکثر امپدانس اتفاق می افتد که به مدار حاصل مدار رد کننده می گویند .

۵-۳- اختلاف فازیاب الکترومکانیکی (ممیز فاز)

در روشهای نقطه هیچ ، اسبابی به این نام ممیز فاز مطرح شد که امکان اعمال یک اختلاف فاز دلخواه را بدست می داد . این وسیله در بسیاری در طولیابهائی که براساس نقطه هیچ کار می کنند وجود دارد . شکل ۵-۱- مدار ساده این وسیله را نشان می دهد .



(شکل ۵-۱)

این وسیله از یک بخش ثابت (که درسمت چپ شکل نشان داده شده) و یک بخش متحرک در مقابل آن تشکیل شده است.بخش ثابت از یک خود القاء تشکیل شده که با عبور جریان متناوب یک فلوی مغناطیسی ایجاد می کند.بخش متحرک که توسط یک الکتروموتورمی چرخد ازدوخود القای عمودبرهم و یک خازن و یک مقاومت تشکیل یافته است.برحرکت این دو خود القا در قسمت متحرک شدت جریانی براثر قطع شار مغناطیسی ایجاد می شود . نحوه کار آن به این ترتیب است که با توجه به زاویه خود القای پائینی با امتداد قائم ولتاژ تولیدی درمقاومت و خازن تغییر می کند یعنی :

$$vc = kvSin\theta, \qquad VR = kvCos\theta$$

که در آن k فاکتور تبدیل ولتاژ است و به نسبت دور سیم پیچ بخش ثابت و متحرک دارد حال اختلاف پتانسیل نسبت به جریان تولید شده در خازن دچار عقب افتادگی می شود یعنی :

$$V_C = kV\sin(\omega t - \pi/2)\sin\theta$$

اما در مدار مقاومت ساده چنین نیست . حال اگر ولتاژ v بعنوان خروجی مد نظر باشد از طریق روابط زیر بدست می آید :

$$v' = V_R - V_C$$

$$v' = KV(Sin\varpi tCos\theta + Cos\varpi tSin\theta)$$

$$v' = KVSin(\varpi t + \theta)$$

بعبارت ساده تر با تنظیم زاویه بین بخش متحرک و ثابت میتوان اختلاف فاز مورد نیاز را اعمال کرد .

۵-۴نیمه هادی ها -دیودها

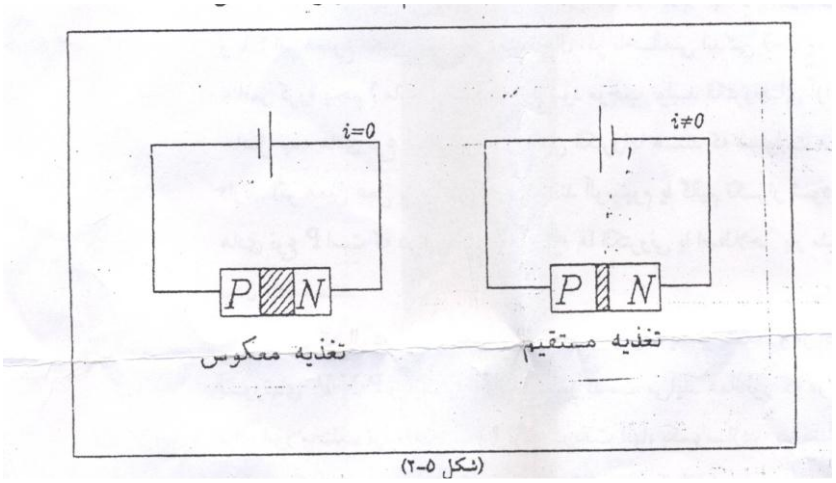
در ميان عناصرگروهي هستند كه فلز كامل ونه غير فلز كامل هستند. به همين ترتيب اين عناصر نه رساناي خوب ونه نارساناي خوب هستند. از اين رو به ان ها نيمه رسانا يا نيمه هادي مي گويند رسانايي اين عناصركه درگروه چهارم جدول تناوبي هستند با اندكي ناخالصي از عناصر گروه سوم وپنم جدول تناوبي تقويت مي شود.

عناصر گروه چهارم (مانند سليسيوم يازرمانيوم)درلايه اخر خود ۴الكترون دارند وبا ۴اتم همنوع مجاور پيوند مي دهند حال اگرناخالصي اندكي(حدوديك درميليون)ازعناصر گروه پنجم مانند ارسنيک وارد می شود موجب تولید الکترون های ازاد می شود .به ماده حاصل نیمه هادی نوع Nگویند. زیرا این الکترون ها هستند که مسولیت هادی بودن ماده را دارند .اگر همین عمل با عناصر گروه ۳ مانند الومینیوم یا گالیم تکرار شود حاصل یک نیمه هادی نوع Pاست که دراین نوع مواد حفره های الکترونی یا اصطلاحا"بار مثبت مسولیت هادی بودن ماده هستند.

ازاتصال دونیمه رسانای *P-N* یک یکسو کننده وازاتصال سه نیمه رسانا به صورت هایP-N-PویاN-P-Nترانزیستور بدست می اید. از دیود برای تولید موج مادون قرمز دریافت ان ها یکسو سازی یانمایش اعداداستفاده می شود. واز ترانزیستور برای یکسو سازی یا نمایش اعداد استفاده می شود واز ترانزیستور برای یکسو سازی و تقویت جریان های ضعیف استفاده می شود امروزه با پیدایش مدارات مجتمع دیودها وترازیستورها به صورت منفرد استفاده نمی شود وبلکه تعداد زیادی (هزاران بلکه میلیون ها) ازان ها رابه صورت مدارات مینیاتوری در یک جیپ الکترونیکی به کار می برند.

با توجه به گستردگی بحث ترانزیستورها از ارائه توضیح بیشتر دراین زمینه خودداری می شود ولی با توجه به اهمیت دیودها جزئیات بیشتری درمورد ان ها ذکر می کنیم . اصولا"دیودها به غیر از ایفای نقش به عنوان یک قطعه الکترونیکی که درمدارات به کار می رود مستقیم به عنوان یک بخش مستقل واساسی دستگاه های طول یاب به کار می رود. دیودها بیشتر در سیستم های الکترواپتیکال به کار می رود.

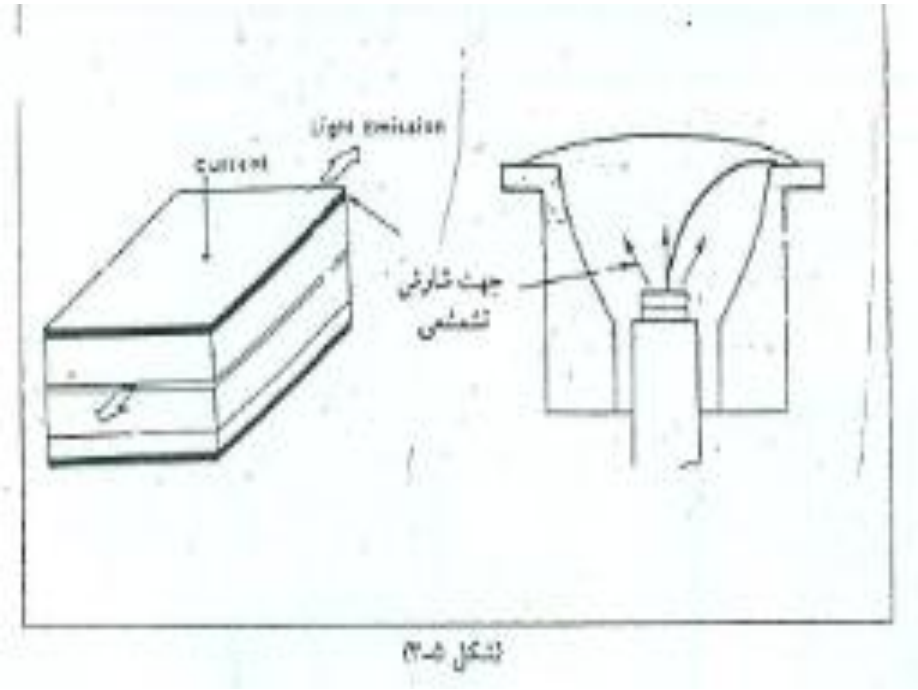
دیودهای نیمه هادی **:زمانی که به دوسر یک دیود اختلاف پتانسیل اعمال می شودبسته به نحوه اتصال قطب مثبت ومنفی به بخش p یا nدوحالت تغذیه مستقیم یا معکوس بدست می اید .درتغذیه معکوس قطب منفی به بخشp که حاوی حفره الکترونی است وصل می شود وقطب مثبت به بخش Nدر نتیجه با جذب حفره ها توسط قطب منفی وجذب الکترون ها توسط قطب مثبت دیود پلاریزه شده و جریانی عبور داده نمی شود .اما درتغذیه معکوس دیود امکان عبور الکتریسیته را معین می سازد شکل ۲-۵ تغذیه مستقیم ومعکوس را نشان می دهد.**



(شکل ۵-۲)

دیود های مولد اشعه مادون قرمز :دردستگاههای مادون قرمز ازدیودهای خاصی استفاده می شود که ساختمان ان ها اسا سا"همان پیوند مواد نیمه رسانایp-nاست دراین نیمه هادی ها ازنیمه هادی گالیم ارستاید (ارسنیک)که با افزودن ناخالصی های بدل به مواد pوnشده اند استفاده می شود .علت تولید اشعه مادون قرمز ترکیب شدن الکترون های لایه nبا حفره های لایه pدرمحل تماس وازادشدن انرژی به صورت فوتون می باشد .

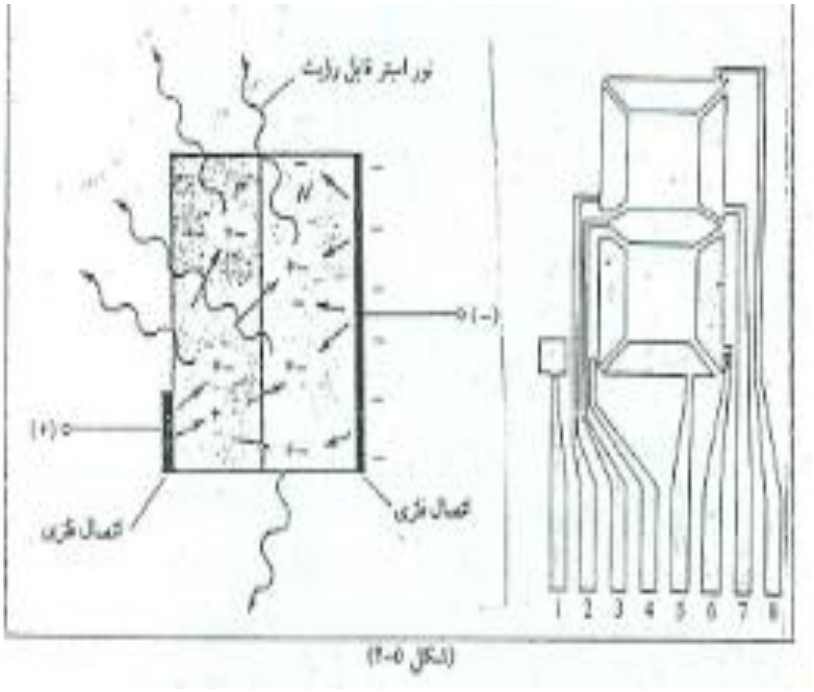
یکی از نخستین دستگاههایی که از دیود گالیم ارسناید استفاده کرد دیستومات D110ساخت شرکت ویلد در سال ۱۹۶۸بود .شکل ۳-۵ نمائی از چنین دیودها را نشان می دهد .استفاده از صمغ دیوکسی برفراز ناحیه نشر اشعه مادون قرمز باعث پلاریزه شدن نوروجبران پراکندگی زاویه فاز موجیتولیدی است .سرعت بالای این دیودها نسبت به تغییرات ولتاژاعمال شده باعث می شود تا براحتی بتوان از طریق مدولاسیون مستقیم دامنه عمل مدولاسیون را به انجام رساند. مصرف اندک این دیودها نیز از دیگر مزایای آنهاست.



با استفاده از دیودهای با مقداری ناخالصی افزونتر و شدت جریان عبوری قوی تر می توان به کمک این دیودها اشعه ی لیزری تولید کرد. در مورد سیستم لیزر بیشتر از اشعه ی پالسی استفاده می شود تا موج پیوسته. امروزه در سیستم های لیزری بسته به مورد هراجاره که امکان آن باشد بجای سیستم های گازی لیزر از دیودهای تولید کننده اشعه ی لیزر استفاده می شود.

دیودهای نوری: **اساس کار این دیود مانند دیود نوع قبل است.در دیودهای گالیوم آرستاید انرژی تولیدی بیشتر به صورت حرارت(اشعه ی مادون قرمز)و در دیودهای گالیوم فسفات یا گالیوم آرسناید فسفات بصورت نور مرئی است. فرآیند ایجاد نور به وسیله ی کاربرد منابع الکتریکی را الکترولومیناتس نامیده می شود. شکل ۵_۴نمای یک دیود نوری یا LED را نشان می دهد.**

امروزه دیودهای نوری با شکل ها و رنگهای مختلفی ساخته می شوند. در شکل ۵_۴ همچنین یک دیود نوری مرکب از هفت دیود دیده می شود که به آن هفت قطعه یا سون سگمنت می گویند. در واقع با وصل کردن ولتاژ مناسب به چند قطعه از این سون سگمنت می توان اعداد بین صفر تا ۹ را نشان داد. در سیستم های جدید برای نمایش طول اندازه گیری شده از مجموعه ای از چند سون سگمنت استفاده می شود. طبعا کنترل نحوه ی روشن شدن این دیودها توسط مدار منطقی و ریزپردازنده ی موسوم به واحد کنترل پردازش یا سی پی یو صورت می گیرد. عمر دیودها نوری به صدهزار ساعت می رسد.



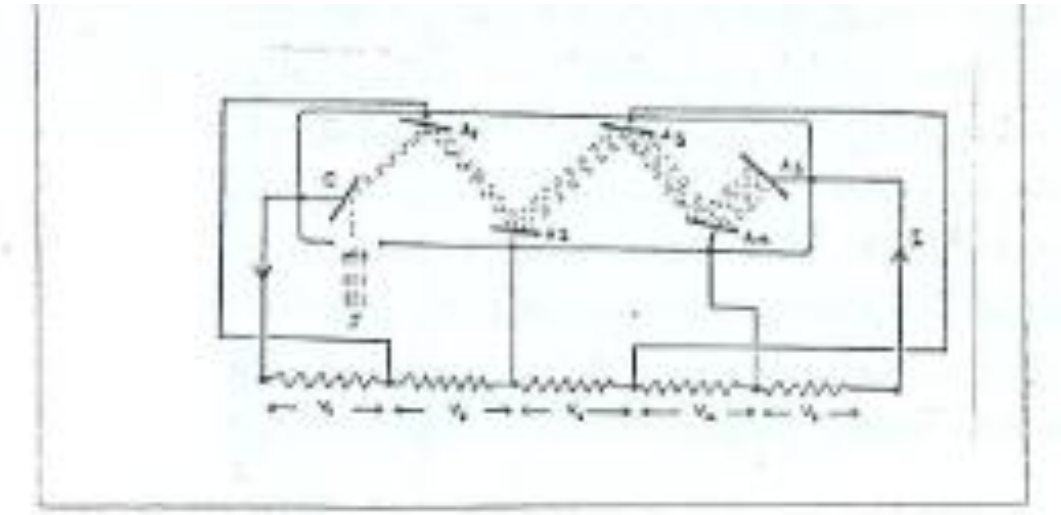
(شکل ۵-۴)

با گسترش تکنولوژی دیودهای نوری نوع دیگری از این دیودها موسوم به نمایشگرهای کریستال مایع کاربردی بیشتر یافته است. مزیت بارز نمایشگرهای کریستال مایع توان مصرفی ناچیز آنهاست. اما همین امر به ضعف آنها در زمینه ی عمر محدودتر و آسیب پذیری بیشتر نسبت به دیودهای نوری تفوق دارد. نمایشگرهای کریستال مایع از خود نوری ایجاد نمی کنند بلکه به یک منبع داخلی یا خارجی نور وابسته اند.

دیودهای آشکار ساز موج برگشتی: **همانطور که مورد تاکید قرار گرفت دیودها ر دستگاههای الکترواپتیکال کاربردی وسیع دارند. از دیودهاهمچنین برای آشکارسازی موج برگشتی نیز استفاده می شود. دیودهای آشکار ساز نور شدت متناوب نور برگشتی را به شدت جریان متناوب تبدیل می کند.**

برای این منظور از دیودهای نوری یا فتودیودهای سیلیکونی استفاده و یا فتودیودهای آوالانشه سیلیکونی یا ای پی دی استفاده می شود. نوع اول دارای ژرمانیوم نیز هست ولی نوع دوم اساسا سیلیکونی است و به علت نسبت خوب سیگنال به نویز در طولیابهای برد کوتاه استفاده می شود. ساختمان این دیودها با دیودهای ارسال تفاوت اساسی در موارد به کار رفته دارد.

راه دیگر آشکار سازی نور با استفاده از فتولوله هایا فتوتوبهاست. در این لوله ها پس از برخورد نور به سطح آنها بعلت ماهیت فتوالکتریک آنها الکترون تولید می شود و با استفاده از یک رشته قطب های مثبت و منفی متوالی تعدادالکترونهاتقویت می شود. از اینرو به برخی از آنها فتومولتی پلایر می گویند. شگل۵_۵ نمایی از یک فوتو مولتی پلایر را نشان می دهد.



(شکل ۵-۵)

۵_۵نوسانسازها (اسیلاتورها)

اسیلاتورها یا نوسانساز ها یکی از بخشهای اصلی الکترونیک یک طولیاب را تشکیل می دهند. وظیفه ی اسیلاتورها ایجاد فرکانس لازم برای ایجاد موج مدولاسیون در دستگاههای الکترواپتیکال و مایکروویو و همچنین ایجاد موج حامل در دستگاههای مایکروویو است. اسیلاتور برمبنای یک کریستال کوارتز و یا ترکیبی از یک کریستال و مدارهای الکترونیکی است که فرکانس خاصی را با کمترین دامنه تغییر تولید می کند. هرچه دامنه ی تغییر کمتر باشد فرکانس تولیدی خالص تر ارزیابی می شود. برای مثال برای حصول دقیق طول موج ۱۰ متر نیاز به تولید فرکانس ۱۵ مگاهرتز است. فرکانس حاصل تابع اندازه و شکل کریستال است. تغییرات دما و عمر عملیاتی کریستال عوامل موثر بر تعیین دامنه تغییر فرکانس هستند. کریستال طولیابها باید از طریق مراقبتهای دوره ای هر چند سال یکبار تنظیم شوند زیرا معمولا به تدریج فرکانس تولیدی آنها دچار نقصان می شود. در هر دستگاه پیچ تنظیمی برای این امر وجود دارد.بنابر اهمیت دما انواع اسیلاتورها بر اساس نحوه ی مراقبت از ثبات فرکانس نسبت به تغییرات دما طبقه بندی می شوند.

۱_ *اسیلاتور های مبتنی بر کریستال کنترل شده با آون (OCXO)*: در این سیستم کریستالها در یک محفظه فلزی موسوم به تابه یاآون قرار دارند. برای رساندن کریستال به دمای عملیاتی و نگهداشتن کریستال در آن دما از رشته های سیم و عبور الکتریسیته استفاده می شود. این امر مدتی به درازا می انجامد و بین ۱۵_۲۰ دقیقه وقت می گیرد. این نوع اسیلاتورها معمولا در سیستم های مایکروویو به کار می رود. دستگاههای بسیار دقیق از ۲ آون متداخل استفاده می کنند و در این دقت که حدودا در حد۱ قسمت در میلیون است را به ۰.۰۱افزایش می دهد.

۲_ *اسیلاتورهای مبتنی بر کریستال با دمای تعدیل شده(TCXO)*: در بعضی از سیستم های الکترواپتیکال از این نوع اسیلاتورها استفاده می شود و از این رو برای کار با آنها نیازی جهت گرم شدن کریستال ها نیست. وظیفه ی کنترل دما در این اسیلاتورها بر بخشهای چون خازن های حساس به دما، ترمیستور۱استفاده می شود.این سیستمهای کریستال در دماهای بسیار بالا مثل مورد قبل کار نمی کنند و مقدار اندکی تعدیل حرارتی که از طریق مدارها میسر است اعمال می شود.

۳-*اسیلاتورهای مبنی بر کریستال کنترل شده با ولتاژ(VCXO):* در اکثر سیستم های الکترواپتیکال امروزی از این نوع اسیلاتورها استفاده می شود.همان طور که از نام آنها بر می اید فرکانس کریستال از طریق ولتاژ اعمال شده تنظیم می شود.با توجه به دقت و راحتی انجام این روش در تنظیم فرکانس کریستال،فراگیرترین روش قلمداد می شود.

۴-*اسیلاتورهای مبتنی بر کریستال فعال در دمای اتاق(RTXO):* در این اسیلاتورها کمترین مقدار تعدیل صورت می گیرد تا کریستال تقریبا در دمای اتاق کار کنند.از همین جهت دارای کمترین دقت هستند.(با ثبات ۵ قسمت در ملیون)و معمولا در طول یاب های الکترواپتیکال ارزان قیمت بکار می روند.

ایجاد بخشی از فرکانس های رادیویی در حد گیگا هرتز توسط مدارهای اسیلاتور یا سیتیسایزرهای مبتنی بر کریستال میسر نیست و باید از اسبابی به نام لامپ های ویژه ای استفاده کرد.با کاهش تولید سیستم های ماکروویو این لامپ ها نیز کمتر

بکار می روند زیرا کاربردی در سیستم های الکترواپتیکال ندارند.لامپ های مزبور عموما جهت انجام مدولایسون فرکانسی و جهت تقویت امواج رادیویی و بعضا جهت تولید پالسهای ماکروویو بکار می رود.

مهم ترین لامپهای ماکروویوی عبارت اند از:لامپ کلایسترن انعکاسی و لامپ مگنترون۴.

***لامپ کلایسترن*:اساس کار لامپ کلایسترن نوسان دادن الکترون ها میان یک رشته سیم ملتهب و یک صفحه باز دارنده با بار منفی از خلال یک شبکه توری مانند است.**

شبکه مزبور با توجه به ولتاژهای اعمال شده به نوسان در می اید و به این ترتیب فرکانس ها چند مگاهرتز تا چند گیگاهرتز قابل تولید است.خروجی لامپ از سطح مشبک زیرین شبکه موسوم به حفره۱ به کمک یک کابل هم محور(کواکسیال)به خارج انتقال می یابد. لامپ کلایسترن به طور ثابت در محصولات شرکت تلورومترهای اولیه مورد استفاده قرار می گرفت.

***لامپ مگنترن*:لامپ مگنترن کاربردی مشابه با لامپ گلایسترن دارد ولی به کمک آن می توان پالس های ماکروویوی تولید کرد.کارکرد لامپ شباهت اندکی با لامپ کلایسترن دارد و در آن از اثر مغناطیسهای قوی بر جریان الکترون ها استفاده می شود.پالسهای ماکروویوی یک لامپ با خروجی تنها ۲۰ وات می تواند پالسی با توان تا ۲۰۰۰۰ وات در مدت یک هزارم ثانیه تولید کند.**

۵-۶ منبع اشعه لیزر

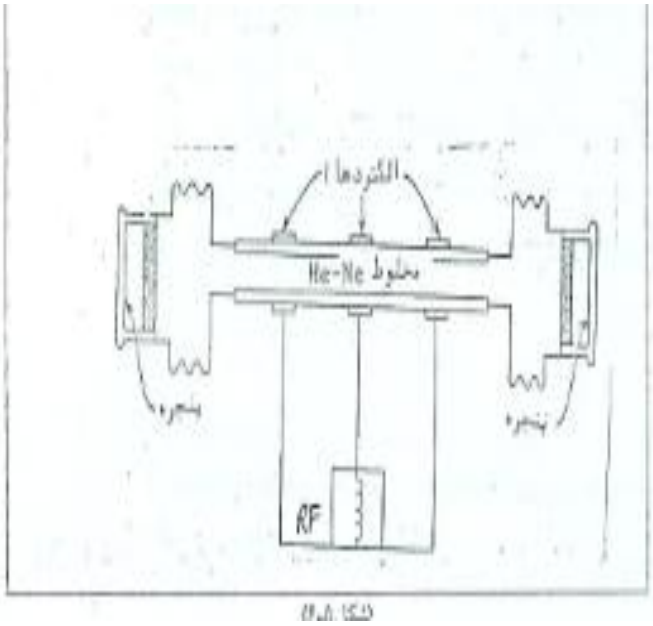
امروزه استفاده از منابع اشعه لیزری محبوبیت بیشتری یافته است.از آنجا که می توان به کمک لیرز هم موج حامل در محدوده امواج نور مرئی و هم مادون قرمز تولید کرد،از این منبع بخصوص در طولیاب های الکترواپتیکال استفاده می شود.سیستمهای لیزری نسبت به نمونه های مشابه از دقت کمتر و برد بیشتری برخوردارند.مزیت دیگر اکثر سیستم های لیزری اینست که در فواصل کم نیاز به عامل بازتاب دهنده ندارند و عملا بدون رفلکتور کار می کنند.۳ همان طور که در بخش دیود ها ذکر شد،چندی است که با پیدایش دیودهای لیزری،استفاده از لیزرهای گازی محدود شده ولی برای درک بهتر مکانیزم کار و انواع لیزر به موارد زیر اشاره می شود.

لیزر مخفف کلمات تقویت نور با نشر تشعشع تحریک شده۴ است و برای نخستین بار در سال ۱۹۶۰ کشف شد.امروزه لیزر به وسیله ای اطلاق می شود که از انرژی بازگشت اتم یا ملکول تحریک شده به حالت پایه قادر به تولید اشعه های پر قدرت نور(در محدوده نور مرئی یا مادون قرمز)کند.نور مرئی از فتون های حاوی انرؤی تشکیل شده که دارای انرژی های مختلف و طبعا فرکانسهای مختلف تشکیل شده است. این نور را ناهمساز می نامند. اما فوتونهای سازنده لیزر همگی دارای یک انرژی و یک فرکانس و لذا مونوکروماتیک هستند. اهمیت نور لیزر اینست که نظرا انرژی آن میتواند بدون حدی افزایش یابد.

هرگاه اتم یا مولکولی دقیقا انرژی لازم برای یک جهش را از یک فوتون دریافت کند به تراز انرژی بالاتر رفته و با برگشت به تراز انرژی اول یا پایه همان فوتون را بازتابش می کند. حال اگر این مولکول در حالت تحریک شده مورد اصابت فوتونی حاوی دقیقا همان مقدار انرژی اول قرار گیرد،با زگشت به تراز پایه دو فوتون با همان انرژی تولید می کند که این فوتون ها میتوانند به نوبه ی خود به اتم ها و مولکول های دیگر برخورد کنند و با تشعشع فوتونهایی با یک فرکانس و انرژی معین بپردازند که به ان تشعشع تحریک شده می گویند.برای انکه بتوان از این فرایند استفاده ی عملی کرد باید ترازهایی که اتم ها و یا مولکول ها تحریک می شوند محدود باشد تا از تشدد انرژی فوتونها جلوگیری شود.

سه گونه سیستم لیزری یعنی لیزر گازی،لیزر حالت جامد و دیودهای نیمه هادی ساخته می شوند.

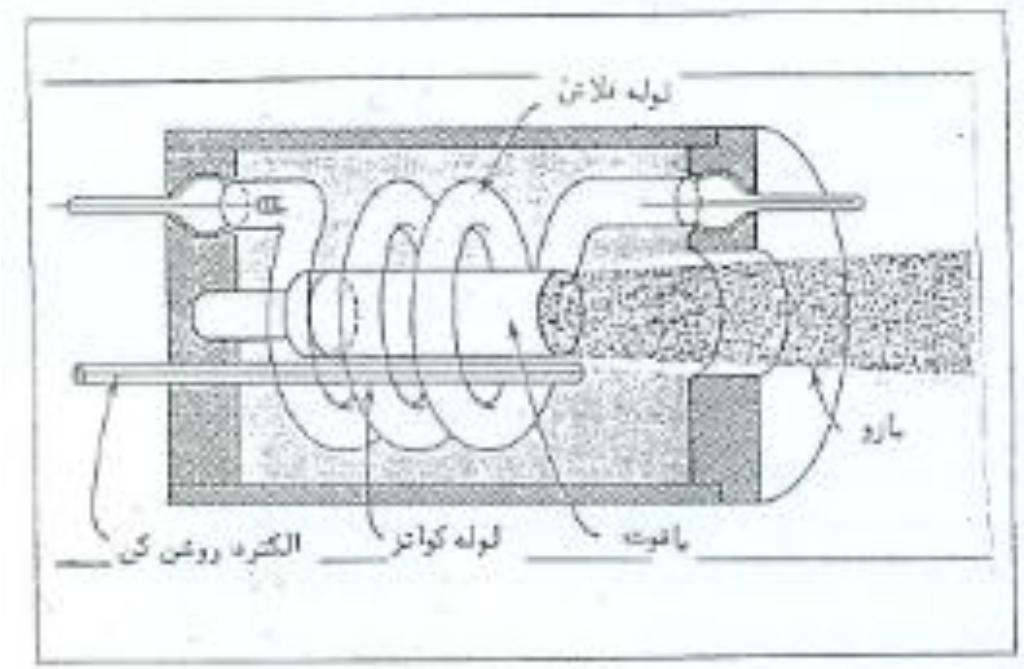
***لیزر حالت گازی*:به لحاظ تقدم تاریخی بعد از لیزر حالت جامد ساخته شد ولی بنا بر کاربرد ان در طولیابها ابتدا این لیزر معرفی می شود.در همه طولیابهایی که از لیزر استفاده می شود از لیزر گالری هلیوم نیون استفاده می شود.شکل زیر ساختمان یک لوله ی لیزری نشان داده شده است.**



همانطور که در شکل دیده میشود،یک لوله تخلیه الکتریکی محتوی مخلوطی از دو گاز هلیوم نیون و دو اینه موسوم به رزوناتورها(تشدید کننده) در دو انتهای ان وجود دارد و یکی از آینه ها نیمصورت مارپیچه شفاف و دیگری کاملا منعکس کننده است.در اثر تخلیه الکتریکی اتم هلیوم و نیون تحریک شده و به علت فرایند بالا نور تولید می کند که توسط آینه ها بازتاب می شود. در هر انعکاس به علت عبور فوتون ها در میان اتمهای تحریک شده،اتمهای بیشتری تحریک می شوندتا اینکه در یک انعکاس خاص نور انقدر شدت دارد تا از اینه نیمه شفاف به خارج راه یابد و حاصل نور لیزر است.معمولا با استفاده از یک فیلتر پلاریزه کننده،نور صادره را کاملا پلاریزه میکنند.

لیزر حالت جامد **:نام دیگر این لیزر،لیزر پالسی یا یاقوتی است.در لیزر حالت جامد از یک کریستال یاقوت(اکسید الومینیوم با ناخالصی اکسید کروم) بجای لوله تخلیه الکتریکی استفاده می شود. همچنین بجای سیستم تخلیه الکتریکی گاز از یک لامپ فلاش زنون که بصورت مارپیچ یاقوت استوانه ای شکل را در بر گرفته استفاده می شود.(شکل ۵-۷). هر بار که لامپ فلاش مارپیچ فلاشی میزند اکسید کروم تحریک شده که با بازگشت به تراز پایه فوتون نشر می کنند. باز از وجود دو آینه نیمه شفاف و انعکاس دهنده موسوم به رزوناتور برای تولید لیزر استفاده می کنند.**

امروزه از مواد مختلف دیگری برای انواع لیزر با شدت ها و طول موج ها ی مختلف استفاده می کنند. لیزر های کلاس یک کاملا بی ضرر هستند ولی لیزر های کلاس ۲ به چشم اسیب می رسانند و نباید به نور آنها خیره شد. لیزرهای کلاس های دیگر قابلیت اسیب رسانی شدید به سلول های زنده هستند ودارای کابردهای خاص پزشکی و نظامی هستند. در صنایع فضایی و صنایع پیشرفته از لیزر برای امور مخابراتی و کاربرد های خاص نیز استفاده می کنند.



(شکل ۵-۷)

۵-۷ آنتن ها

بر خلاف سیستمهای الکترواپتیکال که برای ارسال و در یافت موج مدوله از انواع دیود ها و یا لامپ های نوری استفاده می کنند، سیستمهای مایکروویو به این منظور از آنتن استفاده می کنند. علت این است که در سیستم های رادیویی ویا مایکروویو موج ارسالی و در یافتی ماهیتی رادیویی دارد. آنتن ها گونه ها و انواع مختلفی دارد ولی همگی برای ارسال امواج الکترومغناطیس در محدوده ی رادیویی و مایکروویو بکار می روند. در این بخش تنها به آنتن هایی اشاره می شود که در طولیاب های مایکروویو استفاده می شود.

نخستین تجارب انسان در زمینه ی ارسال امواج رادیویی به دوره دانشمند آلمانی هرتز باز می گردد. در ابتدا از یک سیم ساده متصل به دو پایه عایق بصورت مستقیم یا مدور (لوپ) استفاده می شود. به تجربه معلوم شد که این نوع آنتن برای تشعشع موجی مناسب است که موجش دو برابر طول موثر سیم است. به این آنتن ها اصطلاحا آنتن نصف طول موج و یا آنتن هرتز می گویند چرا که برای تشعشع طول موجی خاص باید آنتن دارای طولی معادل نصف موج داشته باشد.

آنتن دارای خواص یک خازن و خودالقا است و لذا دارای یک فرکانس تشدید وابسته به مقاومت ظرفیتی(رکتانس کاپاسیتانس) و مقاومت القایی(رکتانس اندوکتانس) است. امواج الکترومغناطیسی ارسالی و دریافتی هر چه نزدیک به این فرکانس باشد، بهره دهی آنتن بهتر و در نتیجه نسبت سیگنا به نویز آنتن عدد بزرگتری خواهد بود.

نوع خاصی از آنتن های نیم موج استفاده از دو بخش ربع طول موج است که در کل همان نیم طول را می سازد . این نوع آنتن را دی پل می گویند و شایع ترین آنتن های بکار رفته در طولیابهای مایکروویواست.در اغلب موارد گرچه سیستم نیم موج دی پل در اکثر فواصل قابلیتی مناسب دارد ولی برای فراهم آوردن بهتری شرایط از رفلکتور سهمی شکل نیز استفاده می شود. رفلکتورهای سهمی شکل یا پارابولیکی بهره بیشتری نسبت به دی پل های ساده دارند. همانطور که در شکل نشان

داده شده است هنگام ارسال موج، دی پل امواج الکترومغناطیس را بسوی رفلکتور گسیل می کند. بشرط آنکه دی پل در محل کانون سهمی قرار داشته باشد این امواج پس از انعکاس هم فازی خود را از دست نمی دهند. نکته حایذ اهمیت این است که مسیر موجهای ارسال و دریافت بگونه ای تنظیم شده اند که با یکدیگر زاویه ۹۰ درجه بسازند مسیله تداخل امواج در کمترین مقدار تثبیت شود. شکل ۵-۸ یک آنتن دی پل را نشان می دهد.

مارکونی برای نخستسن بار ایده آنتن ربع طول موج را مطرح کرد. او با اتصال یک سر سیم به زمین و تحریک آن در نقطه اتصال زمین به کمک یک سیم پیچ فرکانس مورد نظر را انتشار داد. زمانیکه آنتن بر یک سطح عایق قرار گیرد جبهه موج مانند یک دی پل با طول نصف موج در فضا عمل می کند. نیمه دیگر آنتن ربع موج را می توان بعنوان انعکاس نظری (مجازی) بخش بالایی در نظر گرفت که واقعا وجود خارجی ندارد. لذا در آنتنهای ربع موج که بیشتر در سیستمهای ناویری رادیویی استفاده می شود نیمی از قدرت مصرفی جهت ارسال موج بکار می رود.