

زیر سیستم مخابرات ماهواره

با پرتاب ماهواره به فضا ارتباط مستقیم اپراتور ایستگاه زمینی قطع می‌شود. لذا باید امکاناتی فراهم شود تا بتوان در ایستگاه زمینی بر موقعیت و وضعیت زیر سیستم‌های مختلف ماهواره کنترل و نظارت داشت. این ارتباط از طریق لینک مخابراتی انجام می‌شود. هر ماهواره حداقل دارای دو لینک مخابراتی تله متری و تله کامند می‌باشد. به داده‌هایی که دارای اطلاعات وضعیت زیر سیستم‌های مختلف ماهواره می‌باشند داده‌های تله متری گویند. سیستم تله متری باید به گونه‌ای طراحی شود که اطلاعات عملکرد ماهواره را در تمام حالت‌ها (عادی و بحرانی) در دسترس ایستگاه کنترل زمینی قرار دهد. وظیفه فرستنده تله متری شامل ۱- دریافت اطلاعات از پردازنده مرکزی ۲- مدولاسیون سیگنال ۳- تقویت ۴- تحویل سیگنال به آنتن تله متری می‌باشد. فرمانهای ارسالی از ایستگاه زمینی برای ماهواره، تله کامند نامیده می‌شود. این فرمان‌ها بر اساس داده‌های تله متری و نیز داده‌های کامپیوتری در ایستگاه زمینی برای کنترل عملکرد ماهواره ارسال می‌شود. گیرنده تله کامند ماهواره نیز وظیفه ۱- دریافت سیگنال از آنتن تله کامند ۲- تقویت ۳- مدولاسیون ۴- انتقال سیگنال فرمان به پردازنده را داراست

انتخاب فرکانس:

در انتخاب باند فرکانس، پهنای باند و چگالی شار توان، محدودیت‌های قانونی وجود دارد. طبق قراردادهای بین المللی تنظیم شده توسط ITU و WARC باندهای فرکانسی خاصی برای مخابرات فضایی اختصاص می‌یابد. یکی از معیارهای اختصاص باند فرکانس، توجه به احتمال تداخل یک لینک با دیگر لینک‌ها می‌باشد. پس برای استفاده از یک باند فرکانس و یک مدار باید تحلیل جامعی برای جلوگیری از تداخل با سیستم‌های موجود ضروری است. همچنین سطوح کناری گلبرگ‌های کناری آنتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سازمان FCC برای آنتن‌های ایستگاه زمینی با باندهای فرکانسی ۶ - ۳ گیگاهرتز و ۱۴ - ۱۲ گیگاهرتز بیشترین بهره گلبرگ‌های کناری آنتن را برای $1^\circ < \phi < 48^\circ$ برابر $(32-25\log\phi)\text{dBi}$ و برای $48^\circ < \phi < 180^\circ$ برابر 10dBi تعیین کرده است. ماکزیمم چگالی شار توان مجاز ماهواره در جدول (۱۲۵ - ۵) کتاب آورده شده است.

نرخ داده

میزان اطلاعاتی که در واحد زمان بین ماهواره و ایستگاه زمینی مبادله می شود مدنظر ماست. نرخ داده بالاتر مستلزم توان فرستنده زیادتر و آنتن بزرگتر است. می توان با کارهای پردازش مانند فشرده سازی حجم داده ارسالی را کاهش داد اما در عوض ماهواره پیچیده تر می شود (JPEG و JPEG2000).

اگر پهنای باند برابر w بوده یا بزرگترین فرکانس موجود در طیف فرکانس سیگنال برابر f_m باشد طبق معیار نایکوئیست (سال ۱۹۲۸) نرخ نمونه برداری باید حداقل دو برابر بزرگترین فرکانس باشد ولی به دلیل محدودیت های عملی از قبیل تحقق و ساخت فیلترها پیشنهاد می شود که فرکانس نمونه برداری حداقل ۲.۲ برابر ماکزیمم فرکانس ورودی باشد.

$$f_s \geq 2.2 f_m$$

پس نرخ داده برابر تعداد نمونه ها در ثانیه ضربدر تعداد بیت های هر نمونه است که به بیت برثانیه بیان می شود.

انتخاب کدینگ و مدولاسیون

انتخاب مدولاسیون در ماهواره پارامترهایی مانند مصرف توان، پهنای باند، سادگی یا پیچیدگی سیستم و خطای آشکارسازی را تحت تاثیر قرار می دهد. در ماهواره های کوچک سعی بر آن است که مدولاسیونی انتخاب شود که در روی برد ماهواره ساده بوده و با محدودیت توان سازگاری داشته باشد. مدولاسیون های دامنه که در زمین استفاده زیادی دارند به دلیل نیازمندی توان زیاد و حساسیت به غیرخطی بودن در ماهواره ها مورد استفاده قرار نمی گیرند. اما مدولاسیون های فاز و فرکانس به دلیل عملکرد فرستنده در آستانه اشباع و با ماکزیمم بازدهی مورد استفاده قرار می گیرند. از مدولاسیون های پرکاربرد می توان به BPSK، QPSK و FSK اشاره کرد. FSK دارای پهنای باند زیادتری نسبت به PSK است و باید حداقل فاصله بین فرکانس های f_1 و f_c در FSK دارای $\frac{1}{2T}$ باشد. البته مدولاسیون های دیگری مانند MSK، OQPSK و 8PSK نیز در بعضی از ماهواره ها استفاده شده است. MFSK به دلیل عدم حساسیت به تغییرات فاز حامل معمولاً در ماهواره های نظامی و لینک های فرمان استفاده می شوند. مدولاسیون های QPSK و BPSK به بازیابی حامل نیاز دارند جهت دمدوله شدن که خود باعث کاهش راندمان می شود. به همین جهت معمولاً از فرم دیفرانسیلی آن DPSK استفاده می شود. علاوه بر این در زمان تغییر بیت ها، فاز دارای تغییرات ناگهانی در BPSK و QPSK خواهد داشت که باعث به وجود آمدن لوب های کناری در طیف شده و با کانال های مجاور تداخل به وجود می آورد. به همین جهت راز مدولاسیون های فاز پیوسته استفاده می شود تا فاز به تدریج تغییر کند. در این صورت توان متناظر لوب های کناری سریعاً کاهش می یابد یکی از این مدولاسیون ها MSK است.

تکنیک های کدینگ

کدهای مختلفی جهت تصحیح خطا استفاده شده است. این کدها به دو دسته بلوکی و رشته ای تقسیم می شوند که متداول ترین کدهای رشته ای کد کانولوشن با دی کدینگ ویتربی است. این الگوریتم $\frac{E_b}{N_0}$ را جهت دست یابی به یک BER مشخص بطور قابل توجهی کاهش می دهد. این کد بیشتر برای کاربردهای زمان واقعی Real-Time استفاده می شود.

جهت کاربردهایی که حالت برست و قطع و وصل دارند از کدهای بلوکی مانند BCH و R-S استفاده می شود. این کد بخصوص در لینک های تله کامند بطور وسیع مورد استفاده قرار می گیرند. اگر احتمال خطا به اندازه کافی کوچک نباشد سعی می شود با استفاده از تکنیک تکرار (دایورسیتی زمانی) احتمال خطا را به اندازه کافی بهبود دهند. کدهای پیچیده تر مانند توربو کد و کدهای ترکیبی نیز در فضاهای بین سیاره ای استفاده شده است. به عنوان مثال در مریخ نورد از توربو کد استفاده شده است. در بعضی از فضاپیمها مانند گالیله نیز از کد ترکیبی کانولوشن به عنوان کد داخلی و کد Reed – Solomon به عنوان کد بیرونی استفاده شده است. در این روش کد کانولوشن خطای تصادفی را تصحیح کرده و کد RS خطاهای قالبی را تصحیح می کند. در جدول زیر عملکرد چندین روش کدینگ و مدولاسیون آورده شده است:

مدولاسیون/کدینگ	$\frac{E_b}{N_0}$ برای $BER = 10^{-5}$	راندمان طیفی R/N	مزایا	معایب
BPSK	9.6 (dB)	1	BER خوب، استفاده خوب از طیف	آسیب پذیر در برابر اعوجاج فاز
DPSK	10.3 (dB)	1	آسیب ناپذیر در برابر اعوجاج فاز	$\frac{E_b}{N_0}$ زیادتر
QPSK	9.6 (dB)	2	استفاده عالی از طیف	آسیب پذیر در برابر اعوجاج فاز
FSK	13.3 (dB)	0.5	آسیب ناپذیر در برابر اعوجاج فاز	$\frac{E_b}{N_0}$ زیاد، طیف زیاد
8FSK	9.2 (dB)	0.375	آسیب ناپذیر در برابر اعوجاج فاز و BER خوب	استفاده ضعیف از طیف
QPSK و BPSK با کانولوشن $R=1/2$	4.4 (dB)	0.5 و 1	BER خوب	پیچیده
BPSK+R_s+ convolution	2.7 (dB)	0.44	بهترین عملکرد از نظر BER	پیچیدگی زیاد، استفاده ضعیف از طیف
8FSK با کانولوشن $R=1/2$	4 dB	0.188	BER خوب و آسیب ناپذیری در برابر اعوجاج فاز	پیچیده، استفاده زیاد از طیف

پیچیدگی بیشتر	تداخل کم با کانالهای مجاور	۱.۵	9.6 (dB)	MSK
کاهش توان و پهنای باند اضافه	ارسال حامل برای اندازه گیری داپلر	$R/2R_s$	13.6 (dB)	PSK/PM

محاسبات لینک ارتباطی

یک منبع ایزوتروپ در همه جهات بطور یکسان تشعشع می کند. بنابراین اگر یک آنتن توان P_T وات را بصورت ایزوتروپ در همه جهات تشعشع کند در این صورت چگالی توان P_d در فاصله R از آنتن برابر است با:

$$P_d = \frac{P_r}{4\pi R^2}$$

وقتی آنتن دیگری جهت دریافت توان تشعشع شده بکار رود توان دریافتی در فاصله R برابر است با:

$$P_r = P_d \cdot A_e$$

که A_e سطح موثر آنتن گیرنده است و برحسب سطح فیزیکی آن و فاکتور راندمان η برابر است با:

$$A_e = \eta A$$

فاکتور η بسته به نوع آنتن از ۰.۵۴ تا ۰.۸۱ تغییر می کند. این فاکتور به شکل منعکس کننده، محل ننگه دارنده آنتن، تغذیه و سایر عوامل بستگی دارد. آنتن می تواند کل انرژی را در جهت خاصی منتشر کند بنابراین نسبت به آنتن ایزوتروپ دارای گین خواهد بود (G). به عنوان مثال گین یک آنتن سهموی مستقیماً با سطح دهانه (A) یا مربع قطر دهانه D منعکس کننده متناسب است و برابر است با:

$$G = \frac{4\pi A \eta}{\lambda^2} = \eta \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{\pi D}{2}\right)^2 = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = \eta \left(\frac{\pi D f}{c}\right)^2$$

$$\Rightarrow G = \eta \left(\frac{\pi D f}{c}\right)^2$$

بهره سایر آنتن ها مانند هلیکس و Horn در جدول ۵ - ۱۴ کتاب آورده شده است. دیده می شود که آنتن سهموی گینی بین ۱۵ - ۶۵ dBi، هلیکس ۵ - ۲۰ dBi، Horn هم ۵ - ۲۹ dBi و آنتن میله ای ۰-۵ dB است.

در صورت استفاده از نرخ داده های بالا، توان تخصیصی هر بیت و سمبل کاهش می یابد به همین جهت باید از آنتن با بهره بالا استفاده کرد. آنتن های منعکس کننده و آرایه فازی از این جمله هستند. در ایستگاه های زمینی معمولاً از آنتن های منعکس کننده سهموی استفاده می شود که بدلیل وزن و قیمت کم و آسانی در طراحی بهترین گزینه است. البته در ماهواره به دلیل محدودیت های حجم و وزن از آنتن های آرایه ای استفاده می شود. برای تغییر جهت بیم آنتن که در بعضی از ماموریت ها نیاز است، روش های الکتریکی نسبت به روش های مکانیک ارجح است بخصوص درحالتی که سرعت تغییرات زیاد باشد. با قطع و وصل کردن تغذیه در آنتن های سهموی و منعکس

کننده می توان این عمل را انجام داد اما تلفات آن زیاد است. برای دست یابی به اسکن با کیفیت بالاتر از آنتن های لنزی استفاده می شود اما با افزایش قطر آنتن ها از نیم متر وزن آن ها شدیداً افزایش می یابد. این آنتن ها و آنتن های سهموی می توانند با سوئیچ بین تغذیه ها و یا با استفاده از آرایه ی فازی به عنوان تغذیه می توان عمل جابجایی و جهش اسکن را انجام داد.

آرایه های فازی می توانند چندین بیم به صورت همزمان به وجود آورند و یا حتی در جهت یک تداخل کننده به صورت اتوماتیک یک نول قرار دهند. عیب پهنای بیم کم آنتن این است که نمی تواند همزمان چند ایستگاه زمینی را پوشش دهد. برای رفع این عیب از آنتن های لنزی مجهز به شبکه های شکل دهی بیم های متغیر که یک یا چند بیم در جهات ایستگاه ها ایجاد می کند، استفاده می شود. بعضی از ماهواره ها نیز از آنتن آرایه فازی جهت ایجاد چند بیم استفاده می کنند.

EIRP

حاصل ضرب قدرت فرستنده در بهره آنتن را EIRP گویند.

$$EIRP = P_t \cdot G_t$$

حد معمول آن در ایستگاه بین ۰ تا ۹۰ (dBw) است.

سطح تذهیب (Illumination level) یا سطح روشنایی

توان دریافتی بر واحد سطح یا قدرت دریافتی با آنتن ایده آل ($\eta=1$) با مساحت موثر یک متر مربع توان

$$W = \frac{P \cdot G}{4\pi S^2} \left(\frac{W}{m^2} \right) \Rightarrow W (dB) = EIRP - 20 \log_{10} S - 10 \log_{10} (4\pi)$$

نسبت سیگنال به نویز گیرنده

فرض بر آن است که آنتن های گیرنده و فرستنده از نوع انعکاسی سهموی است. اگر توان تشعشی P_t از یک آنتن با بهره ی G_t تشعشع شود، توان سیگنال دریافتی (S) توسط آنتن گیرنده با سطح موثر A_e برابر است با:

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t A_e$$

چون می توان A_e را بر حسب G_t نوشت، لذا

$$A_e = \frac{G_R \cdot \lambda^2}{4\pi} \Rightarrow S = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} = P_t \cdot G_t \cdot G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

پارامتر $\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ به عنوان تلفات نامیده می شود:

$$L_S = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

گیرنده علاوه بر سیگنال، نویز را نیز دریافت می کند که توان آن برابر KTB است که B پهنای باند و T دمای نویز سیستم است. پس نسبت سیگنال به نویز برابر است با:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_R}{(KT \cdot B)} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

و K برابر است با

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

البته علاوه بر تلفات مسیر، تلفات های دیگری نیز نظیر تلفات خط انتقال بین آنتن و فرستنده (L_t) و تلفات خط انتقال (L_a) است. L_a به شرایط جوی و بارندگی بستگی دارد. به خصوص این تضعیف برای فرکانس های بزرگتر از ۱۰ گیگاهرتز اثر زیادی دارند. پس

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot L_t \cdot L_S \cdot L_a \cdot G_R}{KTB}$$

که L_S تلفات فضای آزاد است.

اگر نرخ بیت برابر R بوده و E_b انرژی بیت و $N_0 = KT$ باشد در این صورت $\frac{E_b}{N_0}$ برابر است با:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot L_t \cdot L_S \cdot L_a \cdot G_R}{KTR}$$

رابطه بالا برحسب dB برابر است با:

$$\frac{E_b}{N_0} = P + L_t + G_t + L_{Pr} + L_S + L_a + G_r + 228.6 - 10 \log T - 10 \log R$$

$$= EIRP + L_{Pr} + L_S + L_a + G_r + 228.6 - 10 \log T - 10 \log R$$

و نسبت چگالی حامل سیگنال به نویز $\frac{C}{N_0}$ برابر است با:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log R$$

دمای نویز سیستم

دمای نویز سیستم T است از برهم نهش تاثیرات اجزای مختلف حاصل می شود. منابع نویز از دو گروه تشکیل می شود که یکی از دهانه آنتن سرچشمه می گیرند (در جو) آن را به دمای نویز آنتن T_{ant} می نامیم. این منابع شامل نویز کهکشان، نویز ابرها و باران در مسیر انتقال، نویز ناشی از وجود زمین (۲۹۰ درجه کلوین) نویز ایجاد شده توسط انسان ها و نویز حرارتی ناشی از تغذیه ها و آنتن است. توجه شود که وقتی پهنای باند آنتن باریک باشد (کمتر از ۰.۵ درجه) باید از نشانه روی به طرف خورشید جلوگیری شود چون دمای نویز آنتن افزایش قابل ملاحظه ای خواهد داشت. نویز دیگر نویز گیرنده است که شامل تمام منابع نویز که بین انتهای آنتن و خروجی گیرنده قرار می گیرد. نویز گیرنده از موارد زیر ناشی می شود:

- خطوط انتقال و فیلترها، معادل $(1-L)T$ است که T دمای قطعه برحسب کلوین و $L = \frac{P_0}{P_i}$ نسبت توان خروجی به ورودی است.

- تقویت کننده کم نویز (LNA) : معادل $(F-1)290k$ است که F عدد نویز بوده و برابر است با

$$F = 1 + \frac{T_r}{T_0}$$

که T_r دمای نویز گیرنده و T_0 برابر ۲۹۰ کلوین است. به عنوان مثال برای یک گیرنده با دمای ۲۹ درجه کلوین و سیستم خنک کننده $F=1.1$ است.

- دمای نویز سیستم با افزودن نویز گیرنده به نویز آنتن به دست می آید. برای به دست آوردن T باید اثر نویز خط انتقال و فیلتر میان گذر متصل شده بین آنتن و LNA را هم در نظر گرفت پس T_S برابر است با:

$$T_S = T_{ant} + \frac{T_0(1-L_r)}{L_r} + \frac{T_0(F-1)}{L_r}$$

نویز گیرنده و $\frac{T_0(F-1)}{L_r}$ نویز خط انتقال و L_r تلفات خط بین آنتن و فرستنده است.

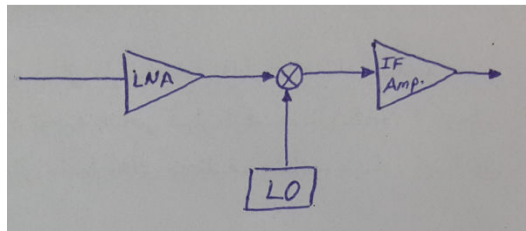
- اگر یک سری از قطعات چهار پورتی که به صورت زنجیره وار قرار دارند هرکدام دارای بهره توان G_j و دمای موثر نویز ورودی T_{ej} باشند، دمای موثر نویز کلی ورودی برابر است با:

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_2} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_3} + \dots + \frac{T_{eN}}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}$$

و عدد نویز برابر است با:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_2} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_3} + \dots + \frac{F_{N-1}}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}$$

مثال) اگر اجزای گیرنده شامل LNA، Mixer و IF بوده و $G_{LNA}=50\text{dB}$ ، $T_{LNA}=150\text{k}$ ، گین میکسر - $G_{MX}=10\text{dB}$ و دمای آن $T_{MX}=850\text{k}$ و تقویت کننده ی IF دارای گین 30dB و دمای $T_{IF}=400\text{k}$ باشد دمای موثر ورودی گیرنده را محاسبه کنید.



$$T_{eRX} = T_{LNA} + \frac{T_{MX}}{G_{LNA}} + \frac{T_{IF}}{G_{LNA}G_{MX}} = 150 + \frac{850}{10^5} + \frac{400}{10^5 \times 10^{-1}} = 150\text{k}$$

همانطور که دیده می شود مزیت تقویت کننده کم نویز LNA، محدود کردن دمای نویز گیرنده بوده و به مقدار نویز T_{LNA} تقویت کننده کم نویز محدود می شود.

مقدار دمای نویز آنتن نیز مجموع دمای زمین و آسمان است و

$$T_A = T_{Sky} + T_{Ground}$$

- دمای نویز آنتن برحسب تابعی از زاویه فراز (elevation) برای آنتن های مختلف در فرکانس های مختلف ترسیم شده است. [کتاب مارال (شکل های ۱۹ - ۵ و ۲۰ - ۵) و گزارش CCIR868]. برای فرکانسهای زیر 1GHz ، $T_{ant} \approx 290\lambda^2$ (است)
- قابل ذکر است برای آنتن های سهموی که پشت آن ها به طرف زمین است دمای نویز زمین در نظر گرفته نمی شود.

محاسبات بودجه لینک

بودجه لینک امکان طراحی سیستم با مقادیر توان فرستنده و بهره آنتن برای لینک های مختلف را فراهم می کند. روند تفصیلی طراحی یک لینک عبارت است از :

- ۱- انتخاب فرکانس حامل بر مبنای طیف اختصاص داده شده توسط ITU (جدول ۶ - ۱۵ و ۱۲ - ۵)
- ۲- انتخاب توان فرستنده بر مبنای اندازه ماهواره و محدودیت های توان
- ۳- تخمین تلفات RF مسیر بین فرستنده و آنتن های ماهواره (بین ۱- تا ۳dB -)
- ۴- تعیین پهنای باند مورد نیاز آنتن
- ۵- تخمین ماکزیمم زاویه انحراف نشانه گیری آنتن بر مبنای زاویه پوشش، خطای پایدارسازی ماهواره و...

توضیح: زاویه پهنای پرتو زاویه ای است که بهره مفروض مقدار معینی از حداکثر کمتر باشد معیار معمول θ_{3dB} است که بهره به نصف حداکثر آن می رسد. مقدار این زاویه برابر است با:

$$\theta_{3dB} = 70(\lambda/D) = 70(C/fD)$$

که D طول آنتن و λ طول موج است.

- ۶- محاسبه بهره آنتن فرستنده در جهت گیرنده
 - ۷- محاسبه تلفات فضای آزاد باتوجه به مدار ماهواره
 - ۸- در نظر گرفتن تلفات جذب ناشی از جو زمین و در نظر گرفتن اثر عدم تطبیق پلاریزاسیون آنتن ها
 - ۹- انتخاب قطر آنتن گیرنده و تخمین خطای نشانه روی
 - ۱۰- محاسبه بهره آنتن گیرنده
 - ۱۱- تخمین دمای نویز سیستم (جدول ۵ - ۱۰ کتاب wertz)
 - ۱۲- محاسبه نسبت E_b/N_0 برای دست یابی به نرخ داده لازم
 - ۱۳- یافتن E_b/N_0 مورد نیاز برای دست یابی به BER مطلوب (شکل ۵ - ۹ کتاب wertz)
 - ۱۴- اضافه کردن یک تا 2dB برای در نظر گرفتن تلفات پیاده سازی
 - ۱۵- محاسبه حاشیه لینک (اختلاف بین مقدار محاسبه شده E_b/N_0 با مقدار مورد نیاز آن شامل تلفات پیاده سازی
 - ۱۶- برآورد میزان تنزل عملکرد براثر باران (شکل ۵ - ۱۱ کتاب wertz)
 - ۱۷- تنظیم پارامترهای ورودی به نحوی که حداقل 3dB حاشیه برای میزان تنزل ناشی از باران به دست آید.
- مثال کتاب wertz برای ماهواره Firesat مطالعه شود (جدول ۱۳ - ۵)
- میزان حاشیه لینک برای لینک های باند c معمولاً ۴ تا 5dB و برای فرکانس های بالاتر از 10GHz به جهت سازگاری با میزان تلفات باران و جو به حاشیه ای حدود ۶ تا 20dB نیاز است. نرخ خطای بیت برای لینک های کامند باید تا حد ممکن کم بوده و این کدها باید مقاوم باشند. به طوری که نرخ خطای بیت این لینک ها حدود 10^{-9} تا 10^{-10} است. نهایتاً اینکه میزان حساسیت گیرنده از رابطه زیر به دست می آید:

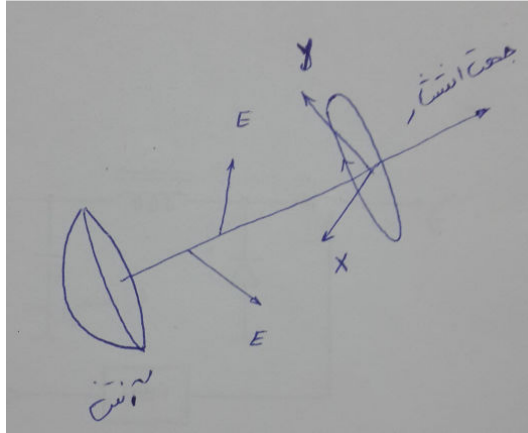
$$\text{Sensitivity (dBm)} = \text{Min.required SNR (for a typical Modul.)} + K.T_{\text{sys}}.B + 30$$

پلاریزاسیون و تغییرات آن

موج الکترومغناطیس در یک محیط ایزوتروپ دارای میدان های الکتریکی و مغناطیس عمود برهم می باشد و هر دو بر مسیر (جهت) انتشار عمودند که با فرکانس موج نوسان می کنند.

• پلاریزاسیون:

طبق قرارداد پلاریزاسیون موج همان راستای میدان الکتریکی است. این راستای میدان الکتریکی معمولاً ثابت نیست. بنابراین اگر در یک پریود، تصویر انتهای بردار میدان الکتریکی در صفحه عمود بر انتشار موج به صورت بیضی رسم شود آن را پلاریزاسیون بیضی گویند.



پلاریزاسیون با پارامترهای زیر مشخص می شود :

۱- جهت چرخش (با در نظر گرفتن راستای انتشار) به صورت راستگرد (در جهت عقربه های ساعت) یا چپگرد.

۲- نسبت محوری (AR): $AR = \frac{E_{max}}{E_{min}}$ نسبت قطر بزرگ بیضی به قطر کوچک آن. وقتی $AR = 1 = 0dB$

بوده یعنی میدان الکتریکی در یک راستا ثابت باقی مانده و پلاریزاسیون خطی است.

۳- شیب τ بیضی: دو موج هنگامی در پلاریزاسیون متعامد هستند که میدان الکتریکی آن ها به شکل بیضی های یکسان ولی خلاف جهت هم باشند، در حالت کلی موارد زیر را داریم:

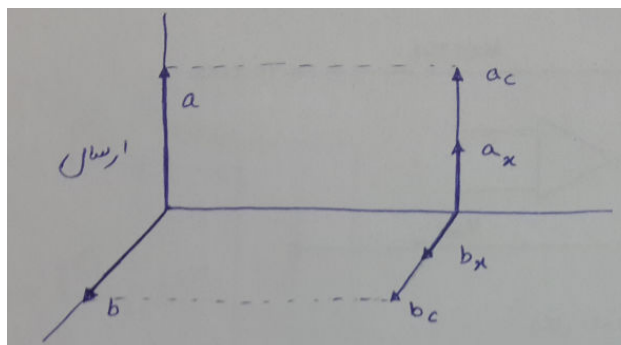
• دو پلاریزاسیون دایروی متعامد که به صورت چپگرد و راستگرد توصیف می شوند. (در راستای انتشار)

• دو پلاریزاسیون خطی متعامد که به صورت دو نوع پلاریزاسیون عمودی و افقی توصیف می شود. (نسبت به مرجع محلی)

آنتنی که برای ارسال و دریافت موج با یک نوع پلاریزاسیون طراحی می شود در پلاریزاسیون متعامد نمی تواند ارسال یا دریافت داشته باشد. البته از این ویژگی می توان در یک زمان، مکان و یک فرکانس جهت برقراری دو لینک با پلاریزاسیون متعامد استفاده کرد که این مساله به عنوان استفاده مجدد فرکانس با پلاریزاسیون متعامد معروف است.

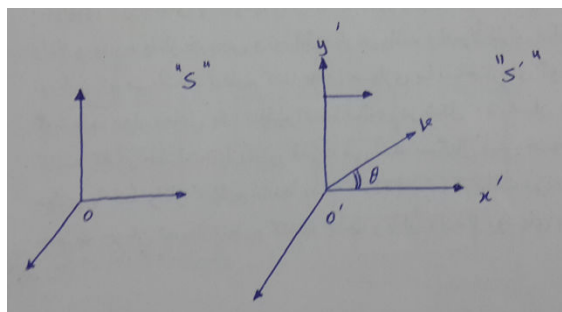
به دلیل اینکه سیگنال ماهواره مسیر زیادی را می پیماید در اثر چرخش فارادی ناشی از میدان مغناطیسی زمین صفحه پلاریزاسیون موج ارسالی دچار تغییر می شود. میزان این تغییر به مدار ماهواره بستگی داشته و دارای ماهیتی تصادفی با توزیع رایلی است. در این صورت اگر فرض کنیم دو موج a و b به صورت متعامد ارسال شده

باشند، در این صورت a_c و b_c دامنه های موج رسیده با همان پلاریزاسیون موج ارسالی و a_x و b_x دامنه های رسیده با پلاریزاسیون متعامد هستند.



اثر داپلر در ماهواره

فرکانس دریافتی ماهواره ارسالی کننده زمانی که ماهواره به ایستگاه نزدیک می شود افزایش می یابد و هنگامی که دور می شود این فرکانس کاهش می یابد. این پدیده را می توان طبق نظریه ی نسبیت انیشتن توجیه کرد (کتاب: آشنایی با نسبیت خاص، رابرت رزنیک ص ۹۴ - ۸۷). فرض کنید یک موج در دستگاه S' با مختصات x', y' و زاویه انتشار موج θ' با محور x منتشر شود. انتشار این موج با عبارت زیر توصیف می شود:



$$\cos 2\pi \left(\frac{x' \cos \theta' + y' \sin \theta'}{\lambda'} - f' t' \right) \quad (1)$$

این عبارت نشان دهنده موجی با سرعت $\lambda' f' = c$ را نشان می دهد که در جهت θ' حرکت می کند.

در راستای محور S معادله انتشار به همان فرجه بوده و عبارت است از:

$$\cos 2\pi \left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{\lambda} - f t \right) \quad (2)$$

که λ و ν طول موج و فرکانس اندازه گیری شده در چارچوب S هستند و θ زاویه ای است که پرتو با محور x می سازد. از تئوری امواج می دانیم که $\lambda' f' = c$ و $\lambda f = c$ که c سرعت نور است. با توجه به این که حرکت در جهت x است پس در جهت y تغییری نداریم و از معادلات تبدیل نسبیتی سرعت ها می دانیم که بین x' و x با t' و t روابط زیر برقرار است (معادلات لورنتس)

$$x' = \frac{x - f t}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t' = \frac{t - (f/c^2)x}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (۳)$$

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

با جایگزینی روابط لورنتس در رابطه (۱) داریم:

$$\cos 2\pi \left[\frac{1}{\lambda'} \frac{x - f t}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cos \theta' + \frac{y \sin \theta'}{\lambda'} - f' \frac{(t - f/c^2 x)}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right]$$

$$= \cos 2\pi \left[\frac{\cos \theta' + \beta}{\lambda' \sqrt{1 - \beta^2}} x + \frac{\sin \theta'}{\lambda'} y - \frac{f' (\beta \cos \theta' + 1)}{\sqrt{1 - \beta^2}} t \right] \quad (۴)$$

این عبارت باید با رابطه (۲) یکی باشد پس :

$$\frac{\cos \theta}{\lambda} = \frac{\cos \theta' + \beta}{\lambda' \sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\frac{\sin \theta}{\lambda} = \frac{\sin \theta'}{\lambda'}$$

$$f = \frac{f' (1 + \beta \cos \theta')}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\lambda v = \lambda' v' = c$$

سه مجهول λ و f و θ را داریم و چهار معادله و چون کاملاً از هم مستقل نیستند می توان یکی را حذف کرد. با تقسیم دو رابطه اول برهم داریم :

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta' \sqrt{1 - \beta^2}}{\cos \theta' + \beta}$$

رابطه معادله نسبیتی اثر داپلر را نشان می دهد. و داریم :

$$f = \frac{f' (1 + \beta \cos \theta')}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$f' = \frac{f (1 - \beta \cos \theta)}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

بنابراین اگر در سرعت های پایین از $\beta^2 = v^2/c^2$ صرف نظر کنیم در این صورت :

$$f = f'(1 + \beta) = f'(1 + v/c) \Rightarrow f_d = \frac{v}{c} \cos \theta$$

جبران سازی داپلر

جهت طراحی باید به پهنای باند سیگنال ارسالی $2f_d$ را نیز اضافه کرد تا پهنای باند واقعی سیستم به دست آید. بنابراین یک راه برای مقابله با اثرات داپلر استفاده از گیرنده با پهنای باند بزرگ به نحوی است که داپلر را تحت پوشش قرار دهد که این خود منجر به افزایش توان نویز می شود. پس اگر داپلر جبران نشده و از گیرنده پهن تر به این منظور استفاده کنیم پهنای باند سیستم برابر است با :

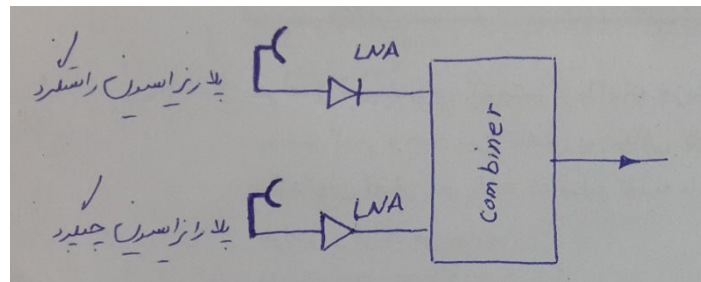
$$W = W_{\text{signaling}} + 2f_d + 2f_{PPM}$$

که f_{PPM} به دلیل ابهام فازی اسیلاتور است.

در روش های مدولاسیونی که در طیف ضربه وجود دارد مانند FSK که دو فرکانس f_0 و f_1 را دارد می توان با استفاده از مکان این ضربه داپلر را به دست آورده و آن را جبران کرد. در واقع می توان در طیف مورد انتظار یک FFT گرفت و مکان ماکزیمم پیک آن را به دست آورد و از روی آن مقدار داپلر به دست آمده و آن را جبران کرد. در مدولاسیون هایی که چنین حالتی وجود ندارد می توان یک پیلوت در نول طیفی ارسالی قرار داد و باتوجه به مشخص بودن مکان آن و استفاده از FFT می توان فرکانس داپلر را به دست آورد. البته به دلیل مشخص بودن مشخصات مداری ماهواره و موقعیت ایستگاه می توان یک تقریب از داپلر زده و جبران سازی را در فرستنده انجام داده تا در گیرنده نیازی به جبران سازی داپلر نداشته باشد.

نکته :

دقت شود که در ماهواره ها بخصوص ماهواره های چرخان بدلیل حرکت ماهواره مقداری از انرژی موج در راستایی غیر از راستای انتشار بوده و اگر موج با یک پلاریزاسیون باشد مقداری از انرژی موج در راستای متعامد بر آن وجود خواهد داشت. به همین جهت نیاز است که یا انرژی زیادتری ارسال شده یا از دو آنتن با پلاریزاسیون دایروی راستگرد و چپگرد استفاده شود و خروجی آنها با هم ترکیب گردد. نحوه ترکیب به این فرم است که اگر خروجی یک آنتن 10dB بیشتر از دیگری بود آنتن دیگر در نظر گرفته نشده اما اگر اختلاف آنها کم بود هر دو به نسبت مساوی باهم جمع می شوند.



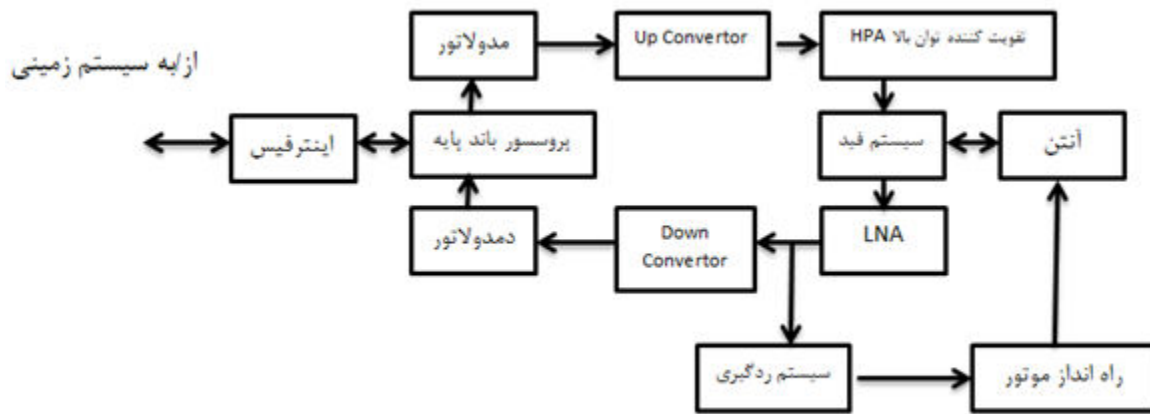
ایستگاه های زمینی ماهواره های LEO :

۱- ایستگاه TT&C : حفظ موقعیت ماهواره، تصحیح وضعیت آن، ردیابی ماهواره و دریافت اطلاعات تله متری و تله کامند

۲- ایستگاه های کاربران: پرشمارترین ایستگاه ها با توجه به نوع محموله می باشند. این داده ها که تله متری عمومی نیز گفته می شوند شامل داده های سیستم تصویربرداری، داده های آزمایش های فضایی، داده های علمی و پخش سراسری نیز می باشند.

• اجزای اصلی ایستگاه های زمینی:

- (۱) آنتن، فرستنده و گیرنده
- (۲) سیستم ردیابی ماهواره
- (۳) سیستم تنظیم آنتن
- (۴) کامپیوتر مرکزی
- (۵) نرم افزارهای مربوطه :
 - (a) ردیابی
 - (b) فرمان
 - (c) تله متری
 - (d) مخابراتی
 - (e) ذخیره سازی
- (۶) شبکه کامپیوتری برای ارتباط سایر دستگاه ها



بلوک دیاگرام کلی یک ایستگاه زمینی

آنتنهای مورد استفاده بسته به ماموریت ایستگاه می تواند از نوع دیپل، یاگی، هلیکس، QHA، Turn stile و سهموی باشد. تقویت کننده توان بالا نیز بسته به توان مورد نیاز می تواند از نوع TWT، لامپ کلاسترون و تقویت کننده های نیمه هادی (SSPA) با بهره حدود ۱۰ dB باشد. تقویت کننده های TWT و لامپ کلاسترون بهره ای از ۴۰ تا ۶۰ dB دارند همچنین TWT و HPA برای داشتن بهره بالا در ناحیه اشباع یا نزدیک آن کار می کنند. (معمولا ۱ dB کمتر) پس مدولاسیون پوش ثابت نیاز دارند.