

طراحی شبه کلید مخابراتی غیرفعال به منظور افزایش قابلیت اطمینان زیرسیستم تله کامند ماهواره

حسین بلندی^۱، سیدحسن صدیقی^{۲*}، محمد خیری دستگردی^۳، رضا رضوانی نسب^۴

بهمن قربانی واقعی^۵، سید مجید اسماعیل زاده^۶

۱- استاد، دانشکده مهندسی برق، مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه علم و صنعت ایران

۳ و ۴- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه علم و صنعت ایران

۵ و ۶- استادیار، مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۵)

چکیده: در این مقاله یک شبه کلید غیرفعال مخابراتی ساده به منظور افزایش قابلیت اطمینان زیرسیستم تله کامند یک ماهواره طراحی و ساخته شده است. در ماهواره‌ها زیرسیستم تله کامند واسط ارتباطی ماهواره با مدیریت ماهواره در ایستگاه زمینی است که دستورات و داده‌هایی را که در طول ماموریت لازم است به ماهواره انتقال یابد از طریق لینک مخابراتی تله کامند در اختیار ماهواره قرار می‌دهد. در ماهواره، این دستورات از طریق بخش گیرنده مخابراتی ماهواره در اختیار بخش تله کامند قرار می‌گیرد و بخش تله کامند نیز فعالیت‌های مقتضی را به تناسب دستورات دریافتی انجام می‌دهد. در مقاله، ابتدا بلوک دیاگرام کلی زیرسیستم تله کامند یک ماهواره LEO طراحی و پیاده‌سازی شده، مورد اشاره قرار می‌گیرد و در ادامه به تشریح هر یک از اجزای زیرسیستم که متشکل از آنتن تله کامند، شبکه تغذیه تله کامند، گیرنده مخابراتی تله کامند و بخش تله کامند می‌باشد، پرداخته شده و مشخصات محصول ساخته شده و تست شده نیز ارائه گردیده است. سپس افزایش قابلیت اطمینان زیرسیستم تله کامند یک ماهواره LEO با افزونگی دوگانه و طراحی یک شبه کلید غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به سری بودن کلید مخابراتی در طرح افزونگی، قابلیت اطمینان آن بسیار حائز اهمیت است. به همین جهت، پس از بررسی و محاسبه قابلیت اطمینان تمام اجزای زیرسیستم تله کامند، یک کلید غیرفعال مخابراتی با قابلیت اطمینان بسیار بالا طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. سادگی بسیار زیاد، پیاده‌سازی آسان، حجم، جرم و هزینه بسیار کم از ویژگی‌های طرح پیشنهادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، کلید مخابراتی، تله کامند.

۱- مقدمه

تکنیک‌های افزونگی سخت‌افزاری، روش افزونگی دوگانه، روشی متداول است [۱-۳].

در استفاده از روش‌های افزونگی دوگانه در بخش‌های RF، نکاتی مضاعف بر سایر بخش‌ها وجود دارد. با توجه به محدودیت‌های جرمی و حجمی ماهواره و از سوی دیگر قابلیت اطمینان بالای المان‌های غیرفعال مخابراتی مانند آنتن و شبکه تغذیه‌های آن، افزونگی برای این بخش‌های غیرفعال مخابراتی در نظر گرفته نمی‌شود. اما برای بخش‌هایی مانند گیرنده‌ها و فرستنده‌ها که به صورت فعال کار

با توجه به ماموریت و طول عمر و مدار ماهواره‌های LEO، بودجه قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها تعیین می‌شود. در مورد ماهواره‌هایی که در کمربند ون آلن قرار داشته و در معرض تابش تشعشعات کیهانی و اثرات مخرب SEE قرار می‌گیرند، بر اساس طول عمر و نوع ماموریت باید با استفاده از تکنیک‌های مختلف قابلیت اطمینان را بهبود بخشید. یکی از رایج‌ترین روش‌های افزایش قابلیت اطمینان، به کارگیری افزونگی‌های سخت‌افزاری است. در دسته

را می‌توان ماشین‌هایی با کنترل الکترومکانیکی به شمار آورد که تلفات پایین و ایزولاسیون بالایی دارند. این کلیدها در سطح وسیعی برای کاربردهای مخابراتی مانند شیفتهنده‌های فازی، فیلترهای قابل تنظیم و روترهای سیگنال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طول عمر مورد نیاز برای این کلیدها به کاربرد آن‌ها وابسته است و می‌تواند بین ۱۰۰ میلیون چرخه در برای کاربردهای کوتاه مدت تا چند صد میلیارد چرخه در کاربردهای طولانی مدت تغییر کند.

در سال‌های گذشته، نیاز بهبود به قابلیت اطمینان این کلیدها بسیار محسوس بوده است [۲۰-۹]. تلاش‌های مختلفی برای افزایش قابلیت اطمینان کلیدهای مخابراتی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال در [۲۱] به‌منظور تحلیل قابلیت اطمینان کلیدهای MEMS در دماهای بالا و پایین روشی ارائه شده است که پیچیدگی‌های محاسباتی زیادی را به‌همراه دارد. بررسی قابلیت اطمینان کلیدهای مخابراتی MEMS در [۲۲] مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان‌گر آن است که این کلیدهای مخابراتی در برابر شرایط فضایی مانند لرزه و شتاب‌های پرتاب قابلیت اطمینان خوبی در مقایسه با سایر کلیدهای مخابراتی از خود نشان می‌دهند.

مطالعات ارائه‌شده در [۲۳] برای یک نوع کلیدهای مخابراتی MEMS، میزان ۵۰ خطا در ۱۰۹ ساعت کار را نشان می‌دهد. این خطاها از خطاهای مکانیکی ناشی از خستگی، لایه لایه شدن، شک و لرزه و خطاهای الکتریکی مانند اتصال کوتاه و مدار باز، ESD، قوس الکتریکی در فاصله‌های کوچک، باردار شدن دی الکتریک و خوردگی آن می‌باشد. اگرچه ارتقا تکنولوژی ساخت کلیدهای MEMS باعث افزایش درخور توجه قابلیت اطمینان آن‌ها شده است، اما در بهترین حالت علاوه بر خطاهای مکانیکی به‌دلیل ظرافت ساختار مکانیکی کلید، خطاهای الکتریکی نیز وجود خواهند داشت.

در این مقاله افزایش قابلیت اطمینان زیرسیستم تله‌کامند ماهواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های ماهواره با استفاده از یک کلید مخابراتی با قابلیت اطمینان بسیار بالا مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بخش تله‌کامند را می‌توان مغز سیستم ماهواره دانست که بدون وجود آن قابلیت هدایت و بهره‌برداری از سیستم به

می‌کنند، نیاز به افزونگی در بسیاری از کاربردها اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. افزونگی در بخش‌های فعال مخابراتی بدان معناست که دو یا چند بخش فعال مانند گیرنده بایستی به یک بخش غیرفعال مانند آنتن و یا شبکه تغذیه آنتن متصل گردد. در فرکانس‌های بالا، تطبیق امپدانس خطوط انتقال اتصال دهنده بخش‌های رزو و اصلی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند. چنانچه عدم تطبیق وجود داشته باشد، موج ایستای بزرگی ایجاد خواهد شد و بخش قابل توجهی از توان تولیدی و یا دریافتی تلف خواهد گردید. در نتیجه استفاده از یک کلید مخابراتی برای کلیدزنی بین بخش‌های فعال مانند گیرنده‌ها اجتناب ناپذیر است.

از سوی دیگر با توجه به سری بودن این کلیدها در مدار، نقش بسیار زیادی در قابلیت اطمینان سیستم دارند. نکته مهم آن است که بسیاری از کلیدهای مخابراتی به‌صورت فعال بوده که با یک فرمان کنترلی بین دو مدار متصل به آن کلیدزنی می‌کنند. فعال بودن این کلید باعث کاهش قابلیت اطمینان آن نسبت به سایر المان‌های غیرفعال مدار می‌گردد و این قابلیت اطمینان پایین منتج به کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌گردد. به‌عبارت دیگر قابلیت اطمینان کل زیرسیستم مخابرات و در نتیجه قابلیت اطمینان کل سیستم تحت تاثیر قابلیت اطمینان کلید قرار خواهد گرفت. قابلیت اطمینان سیستم‌های ماهواره‌ای در منابع مختلفی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، اما در بسیاری از آنها بحث افزونگی در بخش RF و اثر انتخاب کلید مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است [۴-۸].

از طرف دیگر عموماً در بسیاری از تحقیقات، پژوهش‌ها به‌سمت طراحی و ساخت یک کلید با قابلیت اطمینان بالا معطوف شده است. کلیدها یکی از المان‌های مهم در سیستم‌های مخابراتی می‌باشند که نقش مهمی در کنترل سیگنال‌های مخابراتی دارند. تاکنون کلیدهای گوناگونی به‌منظور استفاده در سیستم‌های فرستنده و گیرنده مخابراتی ارائه شده است. کلیدهای پیاده‌سازی شده با دیویدهای پین اگرچه بازدهی خوبی دارند اما با ترانزیستورهای HEMT سازگار نیستند. اما هنوز کلیدهای ترانزیستوری FET پرکاربرد هستند، چرا که پیاده‌سازی آن‌ها با مدارات مجتمع MMIC و یا سایر مدارها بر روی یک تراشه ساده است. کلیدهای مخابراتی میکروالکترومکانیک

دستورات مذکور توسط بخش گیرنده مخابراتی تله کامند، به بخش تله کامند ماهواره انتقال می‌یابند. (۳) در بخش تله کامند پس از پردازش و تفسیر داده‌های دریافتی تصمیم متناسب اخذ و در زمان مربوطه اجرا می‌شود. (۴) در پیوند پایین‌رو ماهواره تمامی اطلاعات مربوط به صحت عمل کرد زیرسیستم‌های مختلف ماهواره اعم از مقادیر ولتاژ، جریان، میدان مغناطیسی، دما و ... جمع‌آوری شده و از طریق فرستنده مخابراتی برای ایستگاه زمینی ارسال می‌شوند. (۵) داده‌های تله متری دریافت شده در ایستگاه زمینی مبنای استخراج وضعیت ماهواره و اتخاذ سناریوهای پروازی مناسب می‌باشد.

زیرسیستم تله کامند ماهواره وظیفه برقراری ارتباط بالارو بین ماهواره و ایستگاه زمینی را برعهده دارد. زیرسیستم تله کامند ماهواره یکی از معدود بخش‌هایی است که در تمامی طول عمر ماهواره روشن می‌باشد و لازم است ضمن عملکرد درست و با کم‌ترین میزان احتمال خطا، با اجرای فرامین ایستگاه زمینی، هدایت ماهواره را در کنترل داشته باشد. عملکرد نادرست تله کامند می‌تواند موجب عملکرد نامطلوب بخش‌های دیگر ماهواره، اتلاف توان مصرفی در جهتی ناخواسته و یا حتی بروز مشکلاتی جبران ناپذیر گردد.

با توجه به اهمیت زیرسیستم تله کامند ماهواره، لازم است در طراحی این بخش دقت مضاعفی منظور شود. همچنین بعد از طراحی، بایستی محاسبات و آنالیزهای مربوط به قابلیت اطمینان آن انجام گیرد. بدین ترتیب می‌توان به نقاط ضعف و قوت طراحی پی برده، و زیربخش‌های آسیب پذیر و بحرانی را شناسایی کرد. در نهایت می‌توان به اصلاح طراحی پرداخته و در جهت بهبود آن گام برداشت.

در شرایط عادی و به صورت پیش فرض تمامی قطعات و زیرسیستم‌ها به صورت یکتا در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۱) نمای بلوک دیاگرام نوعی از زیرسیستم تله کامند یک ماهواره LEO را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱) این زیرسیستم از بخش‌های تله کامند (TC)، شبکه تغذیه آنتن‌ها (AFN)، آنتن و گیرنده مخابراتی تله کامند تشکیل شده‌است که در ادامه هر یک از این بخش‌ها به صورت اجمالی شرح داده شده است. لازم به ذکر است که تنها بخش‌های تله کامند و گیرنده تله کامند، المان‌های فعال هستند و بقیه اجزا به صورت غیرفعال عمل می‌کنند. در نتیجه آنتن و شبکه

شدت کاهش خواهد یافت. در نتیجه زیر سیستم تله کامند بایستی با قابلیت اطمینان بسیار بالایی طراحی گردد. ساختار مقاله به این شرح می‌باشد.

در ابتدا زیر سیستم تله کامند نوعی برای یک ماهواره LEO، معرفی گردیده و سپس اجزای اصلی آن به صورت جداگانه معرفی شده‌اند. همچنین مشخصات هر یک از این اجزای ساخته شده براساس تکنولوژی بومی در دسترس در کشور ارائه شده است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم از روش افزونگی دوگانه با رزرو سرد استفاده شده است. سپس نقش هر یک از بخش‌ها در تعیین قابلیت اطمینان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تحلیل‌ها نشان‌گر آن است که کلید مخابراتی بیشترین نقش را در تعیین قابلیت اطمینان سیستم دارد.

به همین جهت یک کلید غیرفعال مخابراتی ساده با قابلیت اطمینان بسیار بالا طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. این کلید که از خطوط انتقال مایکروستریپی معمولی تشکیل شده است، ساختار بسیار ساده‌ای در مقایسه با کلیدهای مخابراتی MEMS دارد. این ساختار بسیار ساده باعث کاهش چشم‌گیر خطاهای مکانیکی این نوع کلید خواهد شد. همچنین غیرفعال بودن کلید، خطاهای الکتریکی آن از بین خواهد برد. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان این کلید در مقایسه با سایر کلیدهای مخابراتی بسیار بالاتر خواهد بود. در نهایت نیز، قابلیت اطمینان زیر سیستم تله کامند با افزونگی برای گیرنده مخابراتی و کلید غیرفعال طراحی شده محاسبه شده است. با طرح ارائه شده برای کلید مخابراتی، قابلیت اطمینان کل سیستم به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

۲- معرفی زیرسیستم تله کامند

یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های سامانه‌های فضایی بخش ارتباطی سامانه با کاربرهای زمینی است. زنجیره‌ای که در بسته شدن ارتباط میان ایستگاه‌های زمینی و ماهواره به عنوان یک سامانه فضایی وجود دارد، عبارت است از: (۱) دستورات، داده‌ها و مقادیر مربوط به کالیبراسیون زیرسیستم‌های مختلف ماهواره در ایستگاه زمینی بر اساس نیازمندی‌های سناریوی انتخابی تولید شده و از طریق پیوند بالارو برای ماهواره ارسال می‌شوند. (۲) در ماهواره پس از دریافت

جدول ۱: مشخصات سخت افزاری و نرم افزاری برد تله کامند ساخته شده

مشخصات نرم افزاری	مشخصات منابع سخت افزاری
دریافت داده از گیرنده مخابرات	۵۶ کیلو بیت حافظه توزیع شده
ارسال داده‌های Play-Back به تله متری	۲۸۸ کیلو بیت حافظه Block RAM
ارسال داده‌های زمان واقعی و سیگنال صحت به تله متری	۴ واحد مدیریت کلاک
ارسال داده به محموله تصویربرداری	۴۰۰ کیلو سیستم گیت
ارسال داده به OBC	۴۶ IO دفرانسیلی
تولید و نگهداری زمان واقعی ماهواره	۶ پورت ارسال و دریافت RS232
دیگد کردن اطلاعات دریافتی از زمین	پورت ارتباط SPI
رای گیری روی داده‌های دریافتی از زمین	پورت ارتباط I-wire
مدیریت زمان اجرای کامندهای مربوط به زیرسیستم های مختلف	RTC با دقت 4ppm
مدیریت روند اجرای کامندها و کلیه رویدادها	
دریافت سیگنال‌های صحت از زیرسیستم‌های مختلف	
جولوگیری از هنگ کردن FPGA	



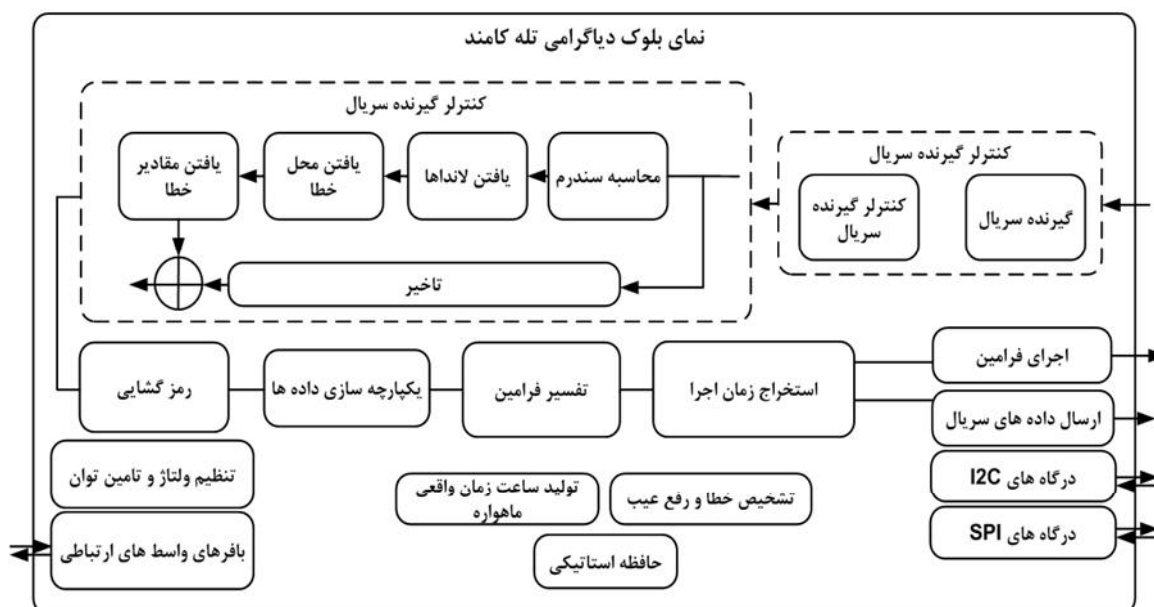
شکل ۱: بلوک دیاگرام زیرسیستم تله کامند ماهواره

تغذیه آن تاثیر بسیار اندکی در قابلیت اطمینان سیستم ایفا خواهند کرد. در ادامه به توصیف هر یک از این بخش‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲- بخش تله کامند

دستورات ارسال شده از ایستگاه زمینی توسط لینک مخابرات در اختیار بخش تله کامند قرار می‌گیرند. این دستورات که به صورت کد شده هستند، توسط توابع نرم‌افزاری کدگشایی و رمزگشایی شده و بعد از تفسیر یا توسط خود تله کامند اجرا می‌شوند و یا جهت اجرا به زیر سیستم‌های دیگر ارسال می‌شوند. در واقع تله کامند از یک سری لینک‌های ارتباطی برای برقراری ارتباط با سایر زیرسیستم‌ها استفاده می‌کند. وظیفه دیگر بخش تله کامند حفظ زمان واقعی ماهواره است.

با توجه به وظایف تله کامند و توابعی که باید پیاده‌سازی نماید، این بخش متشکل از اجزایی خواهد بود که در شکل (۲) در قالب بلوک دیاگرام ارائه شده است همچنین مشخصات سخت‌افزاری و نرم افزاری بخش تله کامند ساخته شده در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام تله کامند ماهواره

۲-۲- بخش گیرنده تله کامند

جدول ۲: مشخصات گیرنده ساخته شده تله کامند

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	باند فرکانسی	VHF
۲	نرخ خطای بیت	10^{-6}
۳	نرخ داده ارسالی	۱/۲ Kbps
۴	حساسیت	- ۱۱۵ dbm
۵	جبران داپلر	± 10 KHz dbm
۶	امپدانس ورودی و کانکتور	SMA و 50Ω
۷	مدلاسیون	BFSK
۸	وزن	۲۴۹ Gr
۹	توان مصرفی	کمتر از ۱ وات
۱۰	تست‌های لرزش اتفاقی	MIL-STD- 1540-C
۱۱	تست‌های خلا حرارتی	ECSS-E-10-03

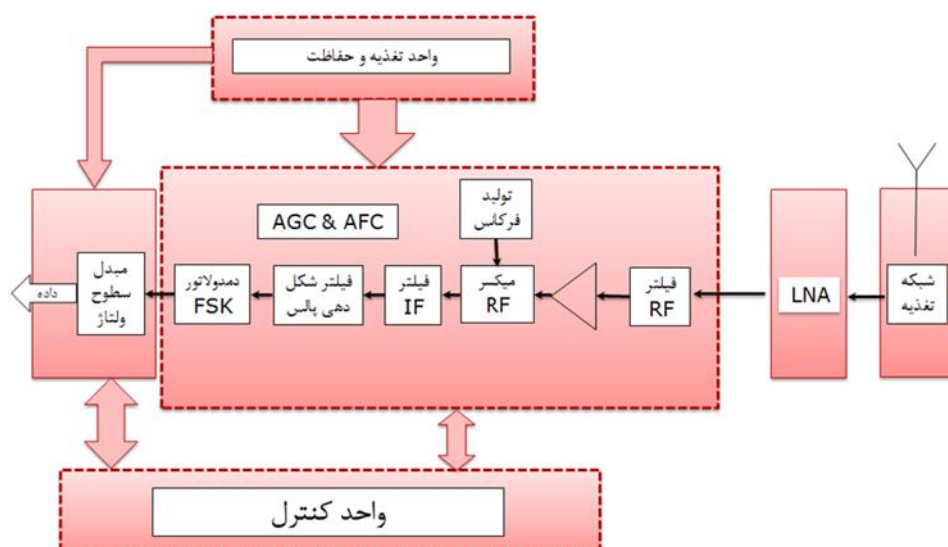
بر کاربرد در پیوندهای تله کامند ماهواره‌های LEO، آنتن Turnstile می‌باشد که شامل چهار آنتن تک قطبی می‌باشد که بر روی سازه ماهواره نصب می‌شوند و به وسیله یک شبکه تغذیه، با اختلاف فازهای ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه تغذیه می‌گردد. این آنتن به همراه شبکه تغذیه متناظر آن باعث ایجاد الگوی همه جهته و قطبش دایروی نسبتاً خالص در بسیاری از زوایا می‌شود و در نتیجه امکان برقراری پیوند مطمئن مخابراتی را افزایش می‌دهد. ساختار مکانیکی آنتن‌ها

گیرنده تله کامند وظیفه دریافت سیگنال‌های فرمان ارسال شده از ایستگاه زمینی را به عهده دارد. به منظور کنترل و مدیریت کامل ماهواره، لازم است که گیرنده تله کامند در تمامی وضعیت‌های کنترلی و تمامی زوایای فراز امکان دریافت سیگنال را داشته باشند. به این منظور از آنتن‌های همه جهته و گیرنده با حساسیت بسیار بالا استفاده می‌گردد. بلوک دیاگرام کلی یک گیرنده تله کامند نوعی در شکل (۳) نشان داده شده است.

سیگنال ورودی از بخش تغذیه آنتن به یک فیلتر مخابراتی وارد شده تا پهنای باند نویز ورودی تا حد امکان یابد. سپس سیگنال ورودی توسط یک تقویت کننده کم نویز تقویت می‌گردد. فرکانس سیگنال تقویت شده سپس پس از عبور از ضرب کننده به فرکانس پایین تر تغییر پیدا کرده و دمودوله می‌گردد. هم چنین به منظور جبران شیفت فرکانسی داپلر و تنظیم خودکار بهره دو واحد AGC، AFC در نظر گرفته شده است. واحد کنترل نیز به منظور مدیریت بخش‌های مختلف در نظر گرفته شده است که معمولاً بر روی یک تراشه مانند میکروکنترلر پیاده سازی می‌شود. در جدول (۲) مشخصات گیرنده ساخته شده تله کامند ارائه شده است.

۲-۳- بخش آنتن

به منظور دریافت سیگنال فرمان ارسال شده از ایستگاه زمینی، آنتن و شبکه تغذیه آنتن تله کامند طراحی می‌گردد. یکی از آنتن‌های



شکل ۳: بلوک دیاگرام گیرنده تله کامند

خطا که منجر به بروز آن حادثه شده‌اند دست می‌بایم، اما در آنالیز اثر مدهای خرابی (FMEA) از مودهای خطا به رویدادهای نامطلوب سطح بالا دست می‌بایم. در این راستا در ابتدا درخت خطا را تشکیل داده و ارزیابی کمی از آن انجام می‌شود. سپس بر اساس اثر نهایی خطا در سطح تجهیز، درخت خطا را در سطح زیرسیستم‌های مرتبط با بخش مورد نظر بیان می‌نماییم.

پیش از استخراج درخت خطا جهت انجام آنالیزهای کمی درخت به بررسی روش‌های استخراج نرخ رخداد خطا و تجزیه و تحلیل کمی درخت خواهیم پرداخت. در شکل (۴-الف) نمونه‌ای از درخت خرابی واحد تغذیه بخش تله‌کامند ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است خرابی واحد تغذیه در کنار خرابی سایر بلوک‌های سخت افزاری بخش تله‌کامند در کنار یکدیگر بلوک دیاگرام خرابی کل بخش تله‌کامند را تشکیل می‌دهند. روش part count در استاندارد MIL بر اساس نوع المان‌های استفاده‌شده و تعداد این المان‌ها، سطوح کیفی المان‌ها و محیط تجهیز، امکان محاسبه نرخ رخداد خطا را ایجاد کرده که این پارامتر برای ارزیابی کمی درخت خطا و همچنین آنالیز FMECA مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، محاسبه نرخ رخداد خطا بر اساس رابطه ذیل صورت می‌گیرد.

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^{i=n} N_i (\lambda_g \lambda_Q \lambda_E) \quad (1)$$

که پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۱) در جدول (۱) تعریف شده‌اند [۲۴].

بنابراین مطابق رابطه (۱) دو فاکتور λ_g و π_Q می‌بایست برای هر یک از المان‌ها استخراج گردند. این دو فاکتور بر اساس جداول A-2 تا A-11 از پیوست A استاندارد MIL-HDBK-217f استخراج می‌گردند [۲۴]. در این جداول، دو فاکتور فوق به تفکیک المان‌های مختلف ارائه شده‌اند. مطابق با مرجع معرفی شده نرخ خطا برای المان‌های استفاده شده در برد TC به شکل ارائه‌شده در جدول (۳) محاسبه می‌شود که نتیجه محاسبات آن در شکل (۴) نیز آورده شده است.

به‌نحوی طراحی و ساخته شده‌است که علاوه بر تامین نیازمندی‌های تشعشعی، ملزومات و استحکام مکانیکی مورد نیاز برای به‌کارگیری در ماهواره را برآورده سازد.

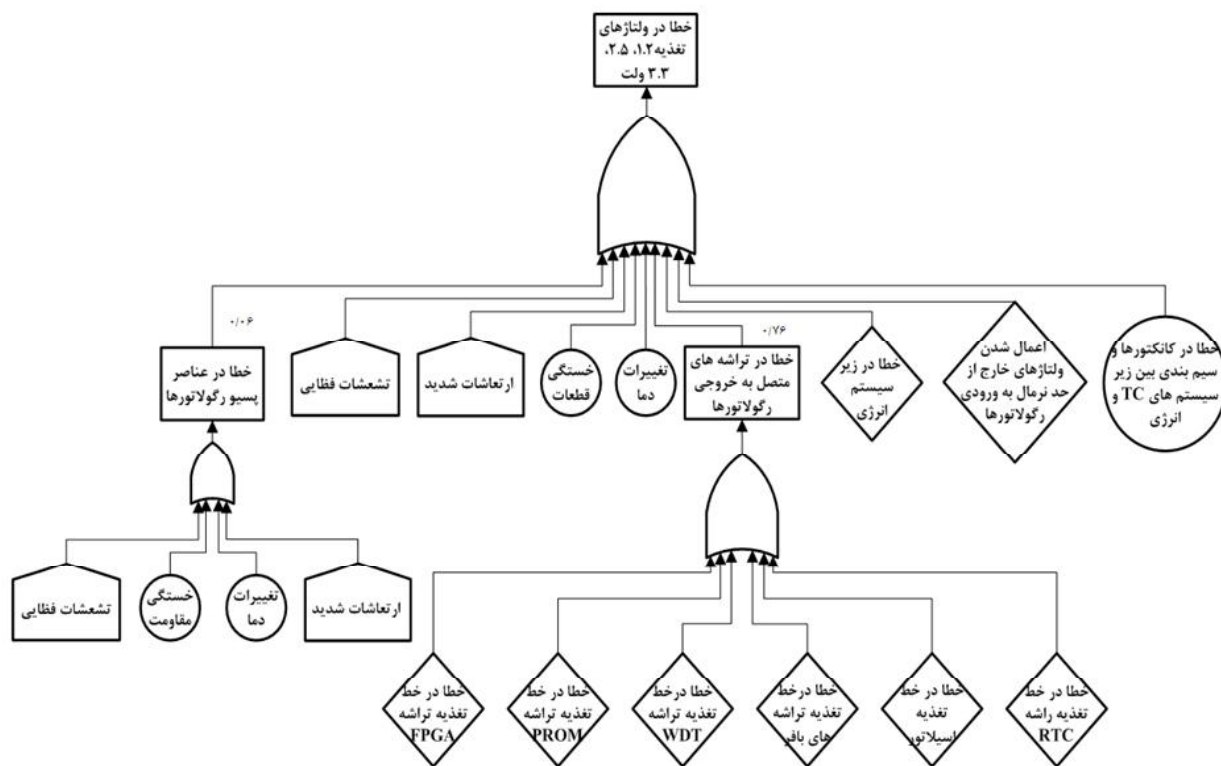
۲-۴- بخش شبکه تغذیه آنتن

شبکه تغذیه آنتن دربردارنده یک جمع‌کننده توان ۴ به یک می‌باشد که توان دریافت شده در چهار آنتن تک قطبی را با فازهای متناسب با یکدیگر جمع می‌کند. همچنین شیفت فاز مورد نیاز در هر یک از درگاه‌های ورودی شبکه تغذیه را می‌توان با استفاده از کابل، المان‌های سلف و خازن و یا سایر روش‌ها پیاده‌سازی نمود. در شبکه تغذیه ساخته شده، بخش جمع‌کننده توان با استفاده از سه جمع‌کننده توان ۱ به ۲ به صورت مایکروستریپی پیاده‌سازی شده است. همچنین شیفت فاز مورد نیاز با استفاده از خطوط کابل کوکسیال ایجاد شده است.

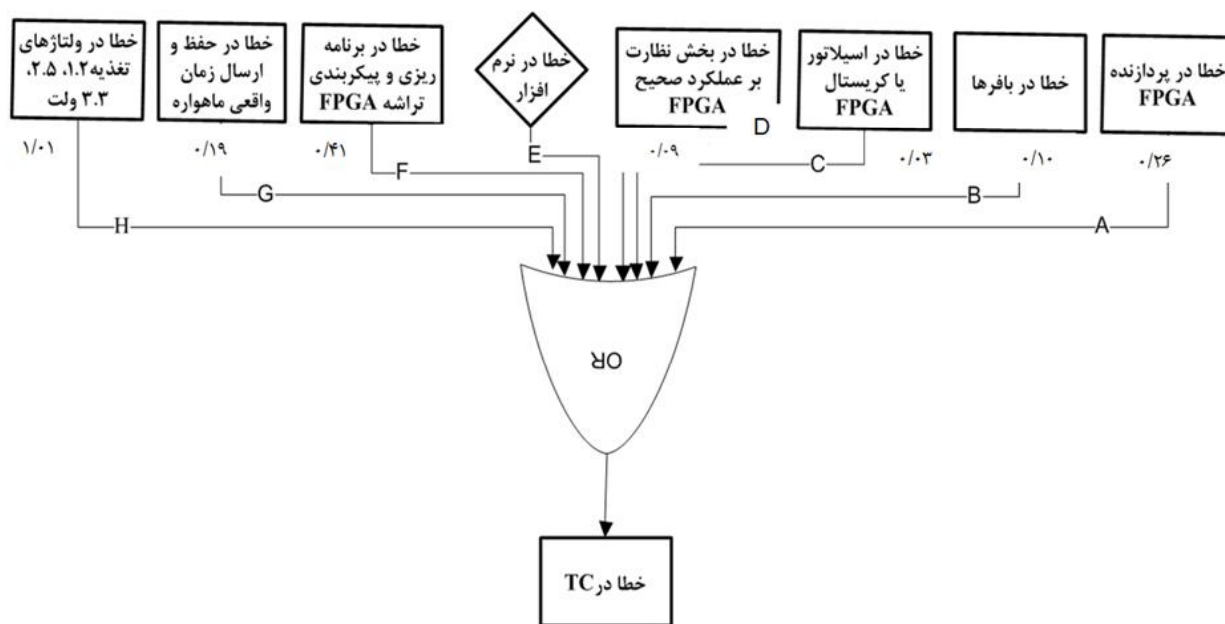
۳- افزونگی (Redundancy)

افزونگی، استفاده از امکانات و منابعی مازاد بر نیازهای حداقلی یک سیستم برای افزایش قابلیت اطمینان آن می‌باشد. در برخی مانند مقدار فضای اضافی در نظر گرفته‌شده در یک دیسکت یا یک FPGA یا زمان اضافی در نظر شده برای یک امتحان، افزونگی‌ها ارزان قیمت می‌باشند، درحالی‌که در بسیاری از کاربردها، افزونگی‌ها هزینه و محدودیت‌هایی را به‌دنبال دارند که ممکن است افزایش قابلیت اطمینان به‌دست آمده را تحت الشعاع قرار دهد. به‌منظور مدیریت افزونگی، آشکارسازی خطا، تعیین محل انجام خطا و بازیافت خطا بسیار حائز اهمیت خواهد بود تا بتوان در صورت ایجاد خرابی بخش معیوب را حذف و نمونه یدکی را جایگزین نمود و در نهایت قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش داد.

آنالیز درخت خطا به‌عنوان یک ابزار تحلیلی محسوب می‌گردد که براساس آن یک حالت نامطلوب از سیستم (یا محصول) مشخص شده و محیط سیستم و یا عملیات آن برای استخراج تمامی راه‌های موثق برای وقوع آن حالت نامطلوب مورد آنالیز قرار می‌گیرد. بنابراین در این حالت یک آنالیز از بالا به پایین را خواهیم داشت که از در نظر گرفتن یک حادثه یا حالت نامطلوب از سیستم یا محصول به مودهای



الف

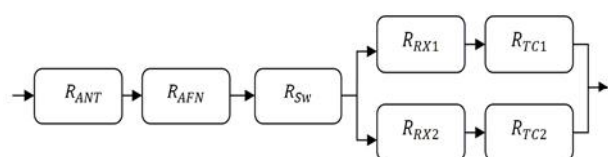


۲/۱۱

ب

شکل ۴: الف- بلوک دیاگرام درخت خرابی واحد تغذیه بخش کامند، ب- بلوک دیاگرام درخت خرابی بخش تله کامند

برای پیاده‌سازی افزونگی دوگانه سرد در زیرسیستم تله‌کامند ماهواره، باید برای بخش‌هایی از این زیرسیستم که بحرانی هستند و قابلیت اطمینان آن‌ها مطلوب نیست، یک افزونگی در نظر گرفت. به این منظور تنها برای بخش‌های فعال یعنی بخش تله‌کامند و گیرنده تله‌کامند افزونگی دوگانه در نظر گرفته شده است و برای بخش‌های غیرفعال یعنی شبکه تغذیه و آنتن افزونگی در نظر گرفته نشده است. نمایی از این ساختار سیستمی براساس محصولات ساخته‌شده فضایی در شکل (۵) قابل رویت است. برای محاسبه قابلیت اطمینان چنین سیستمی ابتدا مدل قابلیت اطمینان آن مطابق شکل (۶) و براساس استاندارد MIL استخراج می‌شود [۲۴].



شکل ۶: مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم گیرنده تله‌کامند با در نظر گرفتن افزونگی

رابطه قابلیت اطمینان چنین سیستمی به صورت زیر است:

$$R = R_{ANT} \times R_{AFN} \times R_{SW} \times (1 - (1 - R_{RX} \times R_{TC})^2) \quad (3)$$

که R_{ANT} قابلیت اطمینان آنتن، R_{AFN} قابلیت اطمینان شبکه تغذیه، R_{SW} قابلیت اطمینان کلید، R_{RX} قابلیت اطمینان گیرنده تله‌کامند و R_{TC} قابلیت اطمینان بخش تله‌کامند می‌باشد. همان‌طور که از این رابطه استنتاج می‌شود، قابلیت اطمینان کلی چنین سیستمی بسیار

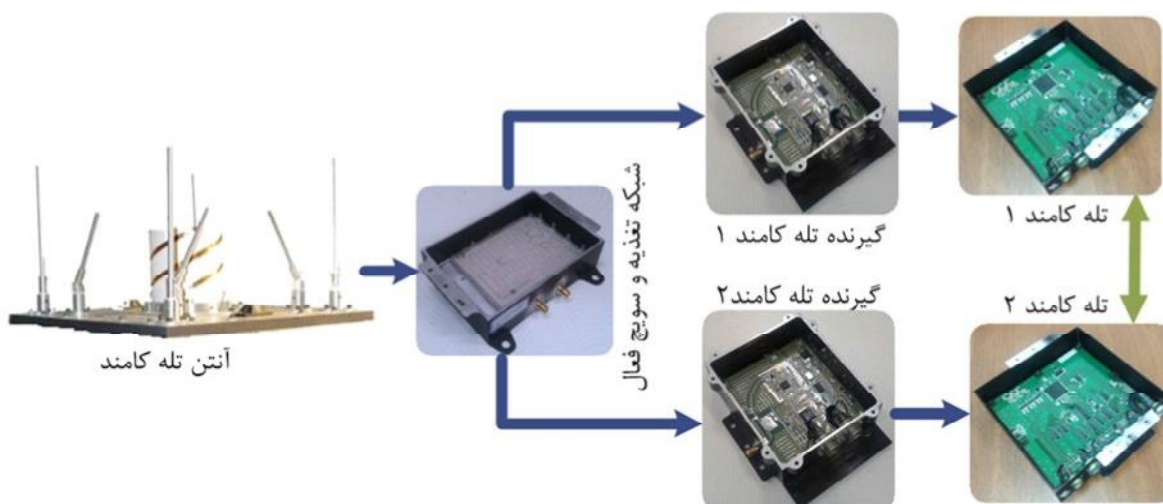
جدول ۳: پارامترهای مرتبط با روش Part Count برای محاسبه نرخ رخداد خطا

پارامتر	توضیح
λ_p	نرخ رخداد خطا کلی تجهیز بر حسب (Failures/10 ⁶ Hours)
λ_g	نرخ رخداد خطا برای المان i ام بر حسب (Failures/10 ⁶ Hours)
π_Q	فاکتور کیفی برای المان i ام
π_E	فاکتور محیطی برای لحاظ کردن اثر استرس‌های ناشی از محیط
N_i	تعداد المان i ام
n	تعداد کلی المان‌های مختلف موجود در تجهیز

۴- افزایش قابلیت اطمینان با افزونگی

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شد، در شرایط عادی و به صورت پیش فرض تمامی قطعات و زیرسیستم‌ها به صورت یکتا در نظر گرفته می‌شوند. برای محاسبه نرخ خرابی بخش تله‌کامند نشان‌داده‌شده در شکل (۱)، ابتدا مدل قابلیت اطمینان آن استخراج و سپس براساس مدل بلوک‌های سری و موازی و روابط مربوطه قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. با استفاده از تجزیه و تحلیل خطرپذیری قابلیت اطمینان، مطابق با استاندارد MIL-217F، می‌توان نرخ خطا و قابلیت اطمینان هر یک از اجزای سیستم را مطابق رابطه (۲) براساس نرخ خرابی به‌دست‌آمده و زمان مورد نظر محاسبه نمود.

$$R_{EQUIP} = e^{-\lambda_{EQUIP} t} \quad (2)$$



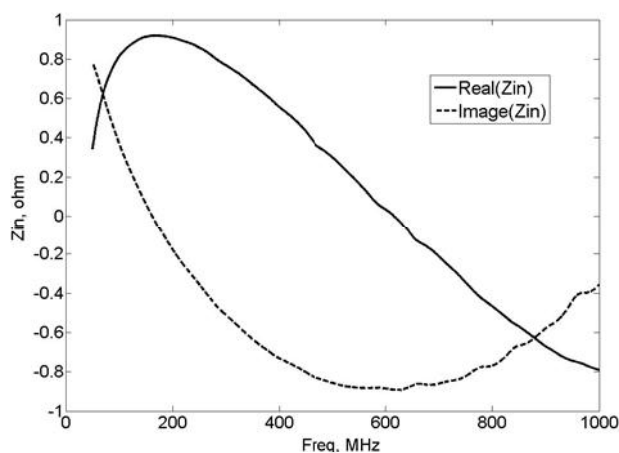
شکل ۵: بلوک دیاگرام زیرسیستم گیرنده تله‌کامند با افزونگی دوگانه

کمتر از ۷۳ درصد افزونگی‌های در نظر گرفته شده در سیستم تله‌کامند را تحت الشعاع قرار خواهد داد و قابلیت اطمینان کلی سیستم را نسبت به حالت بدون افزونگی کمتر خواهد کرد. اما مشکل اساسی آن است که کلیدهای مخابراتی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار نیستند.

۵- طراحی کلید مخابراتی غیرفعال

همان‌طور که در بخش قبلی نشان داده شد، قابلیت اطمینان کلید مخابراتی سری در قابلیت اطمینان کلی سیستم بسیار موثر است. عموماً کلیدهای مخابراتی به صورت فعال طراحی می‌شوند که با یک فرمان کنترلی بین بخش‌های مختلف مخابراتی کلیدزنی می‌کنند. اما با توجه به فعال بودن این کلیدها، قابلیت اطمینان آن‌ها زیاد نبوده و در نتیجه باعث کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شوند.

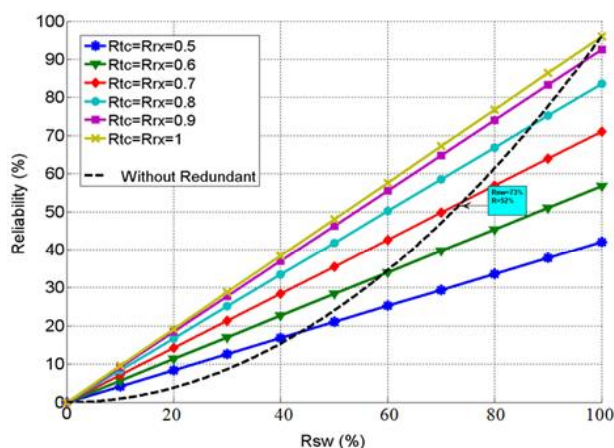
چنانچه بتوان به جای یک کلید مخابراتی فعال، طرحی غیرفعال به منظور ارتباط دادن سیگنال دریافتی به دو گیرنده ارائه نمود، قابلیت اطمینان بسیار بهتر خواهد شد. به این منظور ابتدا امپدانس ورودی گیرنده مخابراتی تله‌کامند در دو حالت خاموش و روشن اندازه‌گیری شده است تا بتوان در طراحی کلید تطبیق امپدانس‌ها را مدنظر قرار داد. مقدار امپدانس ورودی در حالت روشن همان‌طور که انتظار می‌رفت، 50Ω است. امپدانس حالت خاموش اندازه‌گیری شده گیرنده نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: امپدانس اندازه‌گیری شده حالت خاموش گیرنده ماهواره

وابسته به نرخ خرابی بلوک‌های سری در مدل قابلیت اطمینان می‌باشد.

در سیستم مذکور تاثیر پیاده‌سازی افزونگی دوگانه تحت تاثیر قابلیت اطمینان بلوک کلید مخابراتی قرار می‌گیرد، چرا که بخش‌های سری دیگر یعنی آنتن و شبکه تغذیه غیرفعال بوده و از قابلیت اطمینان بسیار بالایی برخوردارند. در نتیجه اگر بخش کلید به درستی طراحی نشود، می‌تواند حتی قابلیت اطمینان را از سیستم شکل (۱) نیز کمتر کند. در شکل (۴) آنالیز قابلیت اطمینان سیستم شکل (۷) به ازای مقادیر مختلف نرخ خرابی در مورد بلوک سوئیچ مخابراتی و به ازای مقادیر نرخ خرابی مختلف برای بخش تله‌کامند و گیرنده مخابراتی تله‌کامند نشان داده شده است.

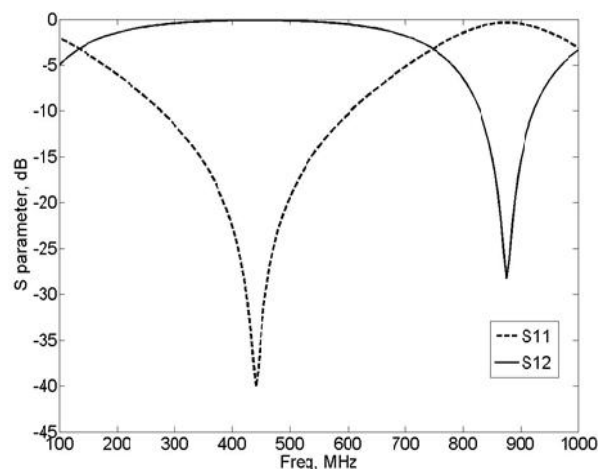


شکل ۷: قابلیت اطمینان زیرسیستم گیرنده تله‌کامند به ازای مقادیر قابلیت اطمینان مختلف سوئیچ مخابراتی

نمودار خط چین مبین قابلیت اطمینان زیرسیستم گیرنده تله‌کامند بدون در نظر گرفتن افزونگی سخت افزاری است. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، در برخی شرایط که قابلیت اطمینان کلید مخابراتی کم باشد، قابلیت اطمینان کل سیستم از حالت بدون افزونگی نیز کمتر می‌شود. به همین دلیل طراحی یک کلید مخابراتی مطمئن می‌تواند در طرح‌های افزونگی سخت افزاری موثر باشد. به‌عنوان مثال در شرایطی که قابلیت اطمینان گیرنده مخابراتی تله‌کامند و تله‌کامند برابر ۷۰ درصد است، اگر قابلیت اطمینان کلید مخابراتی بیش از ۷۳ درصد باشد می‌توان با پیاده‌سازی افزونگی دوگانه قابلیت اطمینان را افزایش داد و در غیر این صورت قابلیت اطمینان کل حتی کمتر از حالت بدون افزونگی می‌شود. این موضوع نشان‌گر آن است که در این حالت، انتخاب کلید با قابلیت اطمینان



شکل ۹: طرح پیشنهادی برای کلید غیرفعال



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی کلید پیشنهادی با نرم افزار Microwave Office

که با توجه به مقارن بودن ساختار پیشنهادی، چنانچه گیرنده الف خاموش و گیرنده ب روشن باشد، همین اتفاق خواهد افتاد.

به منظور پیاده‌سازی کلید پیشنهادی در عمل، راه‌های مختلفی را می‌توان پیشنهاد داد. در واقع طرح مشتمل بر دو خط انتقال ۹۰ درجه ۵۰ اهم است که می‌توان با خطوط مایکرواستریپ به سادگی در شبکه تغذیه آنتن پیاده‌سازی نمود. هم‌چنین می‌توان با تنظیم دقیق طول کابل‌های کوکسیال ارتباطی بین گیرنده‌ها و شبکه تغذیه آنتن به میزان ربع طول موج (۹۰ درجه) این طرح را عملی نمود.

در این صورت هیچ المان اضافه‌ای به ساختار ماهواره اضافه نشده است که با توجه به محدودیت‌های بودجه جرمی و حجمی در ماهواره‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این ساختار شبه کلید با استفاده از خطوط مایکرواستریپی و به صورت مجتمع با شبکه تغذیه آنتن بر روی یک برد پیاده‌سازی شده است. با توجه به آن‌که در ساختار این کلید تنها از خطوط مایکرواستریپی استفاده شده است، قابلیت اطمینان آن بسیار بالا خواهد بود.

لازم به ذکر است که این مقادیر با استفاده از تحلیل‌گر شبکه E5071C اندازه‌گیری شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، بخش حقیقی و موهومی امپدانس گیرنده طراحی شده در حالت خاموش بسیار نزدیک به صفر است. براساس این اندازه‌گیری، طرح کلید پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است. در روش افزونگی رزرو سرد، در هر زمان تنها یک گیرنده روشن خواهد بود. براساس تئوری خطوط انتقال، خط انتقال ربع طول موج یک مبدل امپدانس با رابطه زیر است:

$$Z_{transformed} = \frac{Z_C^2}{Z_{load}} \quad (4)$$

که Z_C امپدانس مشخصه خط انتقال، Z_{load} امپدانس بارگذاری شده در انتهای خط انتقال و $Z_{transformed}$ امپدانس انتقال یافته توسط خط ربع طول موج می‌باشد.

در نقطه تقسیم شدن سیگنال ورودی (A)، امپدانس گیرنده خاموش با انتقال انجام شده توسط خط انتقال ربع طول موج در نقطه A به صورت مدار باز دیده شده و امپدانس گیرنده روشن نیز در اثر انتقال ربع طول موج بدون تغییر مانده و با همان مقدار ۵۰ اهم در نقطه A دیده می‌شود. در نتیجه سیگنال ورودی از آنتن و شبکه تغذیه آن، به سمت گیرنده روشن رفته و عملاً گیرنده خاموش از مدار حذف شده است و تاثیری بر روی عملکرد گیرنده روشن ندارد. با این شبه کلید غیرفعال، در واقع سیگنال دریافتی از آنتن و شبکه تغذیه بدون مواجهه با عدم تطبیق ناشی از اتصال دو گیرنده به نقطه A، به سمت گیرنده روشن هدایت می‌شود.

در شکل (۱۰)، نتایج شبیه‌سازی پارامترهای S طرح کلید پیشنهادی با نرم‌افزار Microwave Office نشان داده شده است. به منظور پیاده‌سازی طرح از خطوط انتقال کوکسیالی با شیفت فاز ۹۰ درجه در فرکانس ۴۳۵ MHz استفاده شده است. لازم به ذکر است که این فرکانس به منظور ارتباطات داده‌ای ماهواره‌ای استفاده می‌شود. نمودارهای شکل با فرض خاموش بودن گیرنده ب و روشن بودن گیرنده الف ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در فرکانس کار طراحی، تطبیق بسیار خوبی در نقطه A برقرار بوده (S11 = -40 dB) و همه توان دریافتی از شبکه تغذیه آنتن به سمت گیرنده روشن منتقل شده است (S12 = 0 dB). بدیهی است

۶- نتیجه گیری

در ماهواره‌ها زیرسیستم تله‌کامند، از جمله حیاتی‌ترین و بحرانی‌ترین سامانه‌های ماهواره است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم گیرنده ماهواره، می‌توان از افزونگی دوگانه استفاده کرد. در افزونگی دوگانه، طراحی یک کلید مخابراتی مطمئن نقش بسیار حائز اهمیتی برعهده دارد. با طراحی غیرفعال این کلید، قابلیت اطمینان سیستم بسیار بالاتر رفته است.

با توجه به سادگی زیاد طرح، قابلیت اطمینان آن بسیار بالا خواهد بود و پیاده‌سازی آن نیز بسیار ساده و آسان و کم هزینه می‌باشد. بنابراین با طراحی مناسب و مطمئن این کلید غیر فعال که به صورت سری در مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم تله‌کامند ماهواره ظاهر می‌شود، می‌توان با استفاده از تکنیک افزونگی سرد، قابلیت اطمینان مجموعه زیرسیستم تله‌کامند را افزایش داد.

۷- مراجع

- [10] C. Goldsmith, J. Randall, S. Eshelman, and T. H. Lin, "Characteristics of Micromachined Switches at Microwave Frequencies, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., San Francisco, CA, June 18–20, pp. 1141–1144, 1996.
- [11] S. Pacheco, C. T. Nguyen, and L. P. B. Katehi, "Micromechanical Electrostatic K-band Switches," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Baltimore, MD, pp. 1569–1572, June 9–11, 1998.
- [12] C. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman, and D. Denniston, "Performance of Low-loss RF MEMS Capacitive Switches," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, pp. 269–271, Aug. 1998.
- [13] D. Hyman, A. Schmitz, B. Warneke, T. Y. Hsu, J. Lam, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, G. L. Tangonan, M. Mehregany, and J. Lee, "GaAs-compatible Surface-Micromachined RF MEMS Switches," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 224–226, Feb. 1999.
- [14] J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, "30 GHz Tuned MEMS Switches," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Anaheim, CA, June 14–17, pp. 1511–1514, 1999.
- [15] K. Suzuki, S. Chen, T. Marumoto, Y. Ara, and R. Iwata, "A Micromachined RF Microswitch Applicable to Phased-array Antennas," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Anaheim, CA, June 14–17, pp. 1923–1926, 1999.
- [16] J. Park, G. Kim, K. Chung, and J. Bu, "Electroplated RF MEMS Capacitive Switches," in *13th Int. IEEE MEMS Conf. Tech. Dig.*, Miyazaki, Japan, Jan. 23–27, pp. 639–644, 2000.
- [17] V. Milanovic, M. Maharbiz, A. Singh, B. Warneke, N. Zhou, H. K. Chan, and K. S. J. Pister, "Microrelays for Batch Transfer Integration in RF Systems," *13th Int. IEEE MEMS Conf. Tech. Dig.*, Miyazaki, Japan, pp. 787–792, Jan. 23–27, 2000.
- [18] J. S. Eterno, J. L. Weiss, D. P. Looze, and Willsky, "Design Issues for Fault Tolerant-Restructurable Aircraft Control," *IEEE Proceedings of the 24th Conference on Decision & Control*, vol. 2, pp. 900–905, 1985.
- [19] I. Koren and M. Krishna, "Fault Tolerant Systems," *Elsevier*, 2007.
- [20] D. Saias, P. Robert, S. Boret, C. Billard, G. Bouche, D. Belot, and P. Ancey, "An Above IC MEMS RF Switch," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 12, Dec., 2003.
- [21] Y. Zhu and H. D. Espinosa, "Reliability of Capacitive RF MEMS Switches at High and Low Temperatures," *Wiley Periodicals*, 2004.
- [22] H. R. Shea, "Reliability of MEMS for Space Applications," *Proc. of SPIE*, vol. 6111, 2006.
- [23] A. Hartzell, David J. Woodilla, "MEMS Reliability Characterization and Test," *Proc. SPIE, Reliability Testing and Characterization of MEMS/MOEMS*, vol. 4558, pp. 1–5, 2001.
- [24] Military Handbook, "Reliability Prediction of Electronic Equipment," *DOD*, USA, 1991, MIL-HDBK-217, 1991.
- [1] R. J. Patton, "Fault Detection and Diagnosis in Aerospace Systems using Analytical Redundancy," *IEEE Computing & Control Eng. Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 127–136, 1991.
- [2] W. J. Larson and J. R. Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, 3rd edition, Space Technology Library, 2003.
- [3] M. Soleimani, S. H. Sedighy, S. M. Esmailzadeh, and D. Abbasi Moghadam, "Spacecraft Mission Analysis Design and Evaluation," *Paryab Press*, 2013. (in persian)
- [4] M. Soleimani, "Introduction to the Communication Subsystem in Small Spacecrafts," 2000. (in persian)
- [5] M. Soleimani, "Introduction to the Satellite Design Principles," 1999. (in persian)
- [6] H. Bolandi, M. Khayyeri Dastejerdi, B. Ghorbani, and S. M. Esmailzadeh, "Reliability Analysis of a LEO Satellite Telecommand Subsystems," *In Proc. of AERO*, 2011. (in persian)
- [7] F. Santoni, "Risk Management for Micro-satellite Design," *48th International Astronautical Congress*, October 6–10, Turin, Italy, 1997.
- [8] J. Castet and J. H. Saleh, *Satellite and Satellite Subsystems Reliability: Statistical Data Analysis and Modeling*, Reliability Engineering and System Safety 94, 2009.
- [9] J. J. Yao and M. F. Chang, "A Surface Micromachined Miniature Switch for Telecommunications Applications with Signal Frequencies from DC up to 4 GHz," *8th Int. Solid-State Sens. Actuators Eurosens. Conf.*, Stockholm, Sweden, pp. 384–387, June 25–29, 1995.

Design of Semi Non-Active RF Switch for Increasing the Satellite Telecommand Subsystem Reliability

H. Bolandi, S. H. Sedighy*, M. Khayyeri Dastjerdi, R. Rezvani Nasab,

B. Ghorbani Vaghei, S. M. Esmailzadeh

*Iran University of Science and Technology

(Received: 16/12/2015 , Accepted: 05/05/2015)

Abstract

In this paper, a simple new non-active RF switch is introduced to increase the reliability of the telecommand subsystem in a satellite. The telecommand subsystem manages the satellite mission by receiving the sent management commands and data from the ground station. These commands are received by the telecommand receiver and delivered to the onboard telecommand processor. The on board telecommand processor interprets and implements these commands, properly. The telecommand subsystem is designed and fabricated. Then the reliability analysis of this subsystem is studied by redundancy and improved by using the introduced non-active RF switch. The series switch reliability is very important due to using it as a series element. Therefore, a non-active switch with high reliability is designed and implemented. Low weight, low cost and simplicity are the main features of the proposed switch.

Keywords: Reliability, RF Switch, Telecommand

* Corresponding Author Email: sedighy@iust.ac.ir