



Camera Cabling Analysis of a Remote Sensing Satellite in Terms of Electromagnetic Compatibility

Razieh Narimani^{1*} , Mohammad Karami², Leila Farhoudi³, Elham Hosseini⁴ ,
Mohammad Sayanjali⁵, Vali Talebzadeh⁶

1-6. Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: r.narimani@isrc.ac.ir

Correct operation of electrical equipment together is a serious engineering concern and has caused special attention to the issue of electromagnetic compatibility. In a satellite, electromagnetic compatibility issues should be investigated from the initial phases because methods such as shielding or adding suitable filters are not always operational and optimal. In this article and in the first step of designing a remote sensing satellite, the LVDS bus cabling of the camera, which is on the outer side of the satellite, is simulated with the aim of investigating the necessity of shielding these cables, and the results are also validated with the results of the electromagnetic compatibility test. According to this research, despite the fact that in the RE and RS tests, protecting the LVDS bus cable of the camera, improves the protection ten thousand times in the worst case, but due to the weak interference radiation signal in RE (about E7-8V/m or E4/1-11A/m) and also the small amplitude of the interference signal in RS (about 0.001 V), Shielding is not necessary and only increase the mass cost of the satellite and complexity of the connection. The necessity of simulating CE and CS tests in the next steps is clear.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Remote Sensing Satellite, LVDS Bus, Shielding.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

How to Cite this in Article:

R Narimani, M Karami, L Farhoudi, E Hosseini, M Sayanjali, V Talebzadeh." Camera Cabling Analysis of a Remote Sensing Satellite in terms of Electromagnetic Compatibility," *Journal of Space Science and Technology*, vol. ??, no. ?, pp. 1-9, 2024 (in Persian). <https://doi.org/10.22034.jsst.?????>



تحلیل کابل‌بندی دوربین یک ماهواره سنجشی از منظر سازگاری الکترومغناطیسی

راضیه نریمانی^{*۱}، محمد کرمی^۲، لیلا فرهودی^۳، الهام حسینی^۴، محمد سینجلی^۵، ولی طالب‌زاده^۶

۱-۶- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

ایمیل نویسنده مخاطب: r.narimani@isrc.ac.ir*

کارکرد صحیح تجهیزات الکتریکی در کنار یکدیگر، دغدغه جدی مهندسی به‌شمار رفته و موجب توجه ویژه به مبحث سازگاری الکترومغناطیس شده است. در ماهواره به عنوان یک سیستم پیچیده با وجود محدودیت‌های جرمی و ابعادی، از فازهای ابتدایی می‌بایست مسایل سازگاری الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گیرد؛ زیرا روش‌هایی مانند حفاظ‌سازی یا اضافه کردن فیلترهای مناسب همواره عملیاتی و بهینه نیست. در این مقاله، در گام نخست طراحی یک ماهواره سنجشی، کابل‌بندی باس LVDS دوربین که روی وجه بیرونی ماهواره است، با هدف بررسی ضرورت حفاظ‌کردن این کابل‌ها شبیه‌سازی و با نتایج آزمون سازگاری الکترومغناطیسی صحه‌گذاری شده است. بر اساس پژوهش انجام شده، با وجود این که در آزمون‌های تشعشع انتشاری (RE) و حساسیت‌پذیری تشعشعی (RS) حفاظ نمودن کابل باس LVDS دوربین که خارج از قفس فارادی ماهواره قرار دارد، حفاظت را در بدترین حالت ده هزار برابر بهبود می‌بخشد، اما نظر به ضعف بودن سیگنال مزاحم تشعشعی در RE (حدود V/m 10^{-1} یا 10^{-2}) و همچنین کم بودن دامنه سیگنال مزاحم ترویجی در RS (حدود 10^{-1} یا 10^{-2}) ضرورتی نداشته و تنها هزینه جرمی ماهواره و پیچیدگی اتصال را افزایش خواهد داد. البته ضرورت شبیه‌سازی آزمون‌های CE و CS و مقایسه آن با نتایج عملی در گام‌های بعدی واضح است.

واژه‌های کلیدی: سازگاری الکترومغناطیسی، ماهواره سنجشی، باس LVDS، حفاظ‌سازی، RE، RS

فهرست اختصارات

مقدمه

با گسترش تجهیزات الکترونیکی و فعالیت آن‌ها در کنار یکدیگر، اهمیت وجود سازگاری الکترومغناطیسی و عدم ایجاد تداخل هر یک روی دیگر المان‌ها بیش از پیش خود را نشان می‌دهد. یک ماهواره نیز دارای زیرسیستم‌های الکتریکی بسیاری است که در یک فضای محدود در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و این به معنای بالا بودن تعامل زیرسیستم‌ها با یکدیگر و وجود یک شبکه ارتباطی پیچیده میان آن‌ها است.

CE	Conducted Emission
CS	Conducted Susceptibility
EUT	Equipment Under Test
LVDS	Low-voltage differential signaling
RE	Radiated Emission
RS	Radiated Susceptibility

۴-۵ استادیار

۶ مربی

۱ مربی (نویسنده مخاطب)

۲ کارشناسی ارشد

۳ کارشناسی

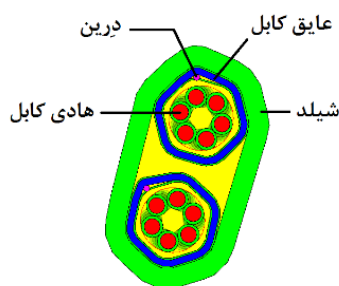
تعریف مدل

محیط‌های نرم‌افزاری گوناگونی جهت شبیه‌سازی امواج الکترومغناطیسی در اختیار طراحان قرار دارد که نرم‌افزار CST یکی از قدرتمندترین آن‌هاست که CST Cable Studio بسته نرم‌افزاری کاملی برای تحلیل خطوط انتقال سیمی، تداخلات الکترومغناطیسی و حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی روی ساختارهای کابلی را در اختیار ما قرار داده و یک رابط کاربری جهت تسهیل تعریف یک ساختار کابلی پیچیده ارائه می‌نماید [۱۴].

جهت شبیه‌سازی رفتارهای الکترومغناطیسی کابل‌های مربوط به دوربین ماهواره، ابتدا خود کابل‌های دیتای متصل به فرستنده محموله ماهواره مدل شده و سپس مسیر این کابل‌کشی شبیه‌سازی می‌گردد.

دو سری کابل دیتای دوربین که دیتا را از طریق پروتکل LVDS به فرستنده مخابرات محموله منتقل می‌نمایند. کابل LVDS مطابق [۱۵] شامل دو رشته سیم دیفرانسیلی برای ارتباط است. در ماهواره ساخته شده مورد مطالعه، سه دوربین اصلی و سه دوربین افزونه وجود دارد که هر کدام جهت ارتباط با مخابرات محموله از یک زوج سیم دیفرانسیلی استفاده می‌کنند. بنابراین در کابل ارتباطی شش زوج سیم LVDS وجود دارد. این کابل به همراه یک کابل درین از دوربین خارج شده و به کانکتوری بیرون از ماهواره متصل می‌شوند که از آن طریق دیتا وارد ماهواره می‌گردد.

شکل (۱) نمایی از سطح مقطع کابل LVDS دوربین ماهواره را در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار CST نشان می‌دهد که در آن هادی، حفاظ و عایق کابل مشخص است. یک تک سیم درین هم در هر غلاف برای زمین کردن کابل وجود دارد.



شکل ۱- نمایی از سطح مقطع کابل LVDS

پس از تعریف نوع کابل، مسیر کابل ارتباطی روی بدنه ماهواره مدل شده است. شکل (۲) مسیر کابل مدل شده را روی بدنه از خروجی یکی از دوربین‌ها تا کانکتور روی بدنه نشان می‌دهد.

کابل‌ها به عنوان اساسی‌ترین بخش ارتباط بین این تجهیزات الکترونیکی برای انتقال سیگنال و اطلاعات، یکی از راه‌های نفوذ امواج مزاحم به سیستم و ایجاد تداخلات الکترومغناطیسی هستند.

علاوه بر کابل‌های داخلی ماژول‌ها، هر زیرسیستم الکترونیکی کابل‌های خارجی مختلفی مانند تغذیه، دیتا و سیگنال دارد که علاوه بر این که به لحاظ حفاظ‌سازی از کابل‌های داخلی ماژول ضعیف‌تر هستند، عموماً دارای طول بلندتری بوده و از این رو آسیب‌پذیری بیشتری در مواجهه با تداخلات الکترومغناطیسی دارند.

در سال‌های اخیر مطالعات و آزمایش‌های بسیاری در زمینه سازگاری الکترومغناطیسی تجهیزات انجام شده است [۳-۱]. از آنجا که ساخت و انجام آزمایش علاوه بر هزینه، مستلزم صرف زمان نسبتاً طولانی جهت حصول نتیجه است، به موازات آزمایشات عملی، مطالعاتی نیز در خصوص انجام شبیه‌سازی صورت گرفته که بررسی‌ها نشان می‌دهد شبیه‌سازی به‌طور قابل‌قبولی مسائل مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی را تحلیل نموده و با ساده‌سازی مدل شبیه‌سازی در زمانی کوتاه می‌توان به تحلیل مناسبی از مساله رسید [۴-۸].

وجود سازگاری الکترومغناطیسی به خصوص در ماهواره به عنوان سیستمی که تجهیزات الکترونیکی در یک فاصله محدود و نزدیک به هم قرار دارند، چالش جدی در طراحی ماهواره به شمار رفته و حفاظ‌سازی در این سامانه به عنوان یک رویکرد اصلی مورد توجه طراحان می‌باشد [۹-۱۳].

یک ماهواره سنجشی علاوه بر دوربین‌های تصویربرداری، شامل آنتن‌های مختلفی به منظور ارسال و دریافت دیتاهای تصویر، تله‌متری/تله‌کماند و غیره است. از آنجا که دوربین ماهواره به جهت تصویربرداری بیرون از بدنه ماهواره قرار دارد، عموماً کابل‌های ارتباطی دوربین در معرض تشعشعات آنتن نیز قرار دارد و عدم توجه به کابل دوربین، می‌تواند اطلاعات دریافتی از دوربین را دچار اختلال نماید.

یکی از راه‌های کاهش تاثیرپذیری کابل‌ها، استفاده از حفاظ‌سازی مناسب است. از سوی دیگر محدودیت‌های جرمی ماهواره، اجازه استفاده آزادانه از حفاظ‌سازی را به طراح نمی‌دهد. بنابراین بررسی ضرورت استفاده از حفاظ و حذف آن در مواردی که تاثیرگذاری چندانی ندارد، بسیار حائز اهمیت است.

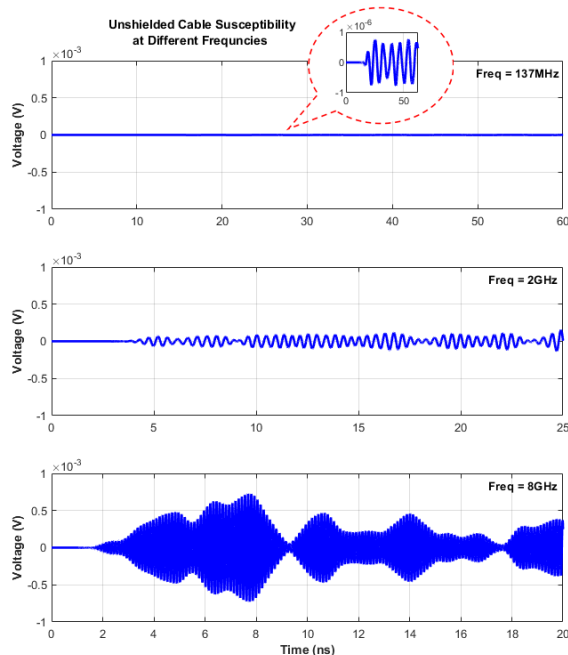
در این مقاله کابل‌بندی باس LVDS دوربین یک ماهواره سنجشی که روی وجه بیرونی ماهواره در معرض تشعشع آنتن‌های آن در فرکانس‌های مختلف بوده، با هدف بررسی ضرورت حفاظ‌سازی کابل‌های مربوطه مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است.

پیرامونی کابل‌ها، شبیه‌سازی ابتدا در شرایطی که کابل‌ها بدون حفاظ هستند، انجام شده و سپس با قراردادن حفاظ بر روی کابل‌ها به مقایسه نتایج حاصله می‌پردازیم.

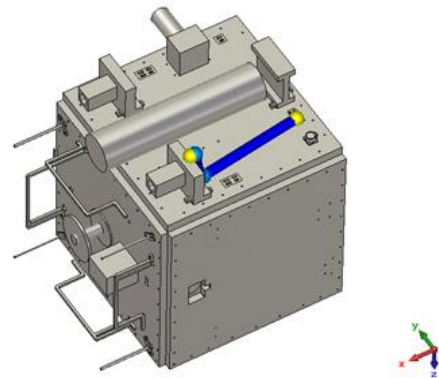
شبیه‌سازی

در این مقاله، به جهت امکان صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی در عمل یک ماهواره سنجشی عملیاتی بررسی و باندهای فرکانسی واقعی آن ماهواره در نظر گرفته شده است. در این ماهواره چند فرستنده مخابراتی مختلف در باندهای فرکانسی VHF، S و X به منظور ارسال و دریافت دیتاهای تله‌متری/تله‌کامند و تصویر وجود دارد و هر کدام از این باندهای فرکانسی آنتن‌های متناظر خود را روی صفحه آنتن ماهواره دارند.

دوربین این ماهواره که وظیفه اخذ تصویر را بر عهده دارد، به کمک شش رشته کابل LVDS مطابق شکل (۲) داده‌ی اخذ شده را به فرستنده مخابرات محموله ارسال می‌کند. با توجه به یکسان بودن شرایط شش رشته‌ی کابل‌های LVDS نسبت به یکدیگر و تسهیل شبیه‌سازی، یکی از این رشته‌ها را به عنوان نمونه در نظر گرفته و سطح سیگنال دریافتی را روی آن، بر اساس فرکانس‌های تابشی متفاوت، بررسی می‌کنیم. مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) نشان دهنده این موضوع است که حفاظ کردن کابل، میزان تاثیرپذیری را کاهش داده و همچنین اثر خود حفاظ نیز با بالا رفتن فرکانس اعمالی بیشتر شده است. افزودن حفاظ در فرکانس ۱۳۷MHz، در حدود ۱۰۴ برابر ولتاژ القا شده را کاهش داده است. این کاهش ولتاژ القا شده در فرکانس ۲GHz در حدود ۱۰۶ برابر و در فرکانس ۸GHz در حدود ۱۰۱۰ برابر است.



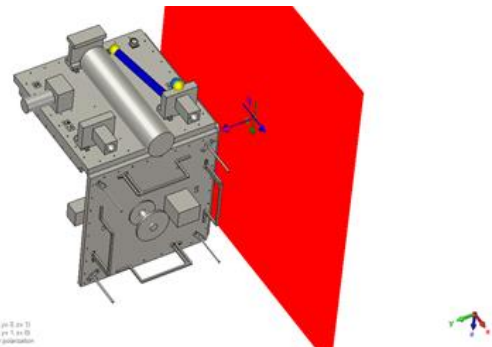
شکل ۲- بررسی ولتاژ القا شده در کابل حفاظ نشده در حوزه زمان در فرکانس‌های ۱۳۷MHz، ۲GHz و ۸GHz



شکل ۳- مسیر کابل دوربین روی بدنه ماهواره

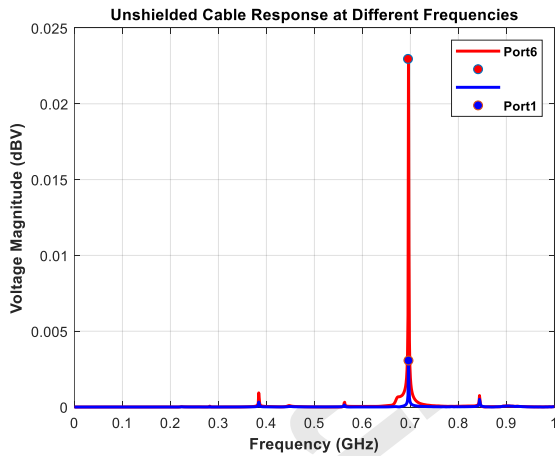
حساسیت‌پذیری تشعشی (RS) کابل یا به طور کلی تجهیزات تحت آزمون، یکی از رفتارهایی است که در مباحث سازگاری الکترومغناطیسی اهمیت دارد و در ادامه به بررسی آن پرداخته‌ایم. دلیل این تاثیرپذیری، بلندی طول کابل‌ها نسبت به فرکانس‌های موجود در محیط است. در چنین محیطی کابل مانند یک آنتن عمل کرده و نویز بیرونی را گرفته و به ادوات حساس متصل به خود منتقل می‌کند. بررسی اثرات تشعشعات انتشاری با کمک آزمون‌های RS انجام می‌شود که در ادامه این آزمون‌ها شبیه‌سازی شده‌اند.

مهمترین منبع تشعشی خارج از ماهواره مربوط به آنتن‌های خود ماهواره است که روی بدنه نصب شده‌اند و سیگنال تشعشی آن‌ها روی تجهیزات خارجی ماهواره از جمله کابل‌های بیرونی تاثیر می‌گذارد. به منظور سهولت شبیه‌سازی و افزایش سرعت تحلیل، شبیه‌سازی سیگنال تشعشی آنتن‌ها به کمک یک سیگنال تک تون در فرکانس‌های مختلف کاری ماهواره انجام شده است. شکل (۳) نحوه تابش موج صفحه‌ای به بدنه ماهواره و کابل‌های خارجی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نحوه تابش موج صفحه‌ای به ماهواره

امواج تشعشی تاییده شده، منجر به ایجاد جریان القایی درون کابل‌ها می‌شود که میزان انرژی دریافتی در کابل‌ها به محیط پیرامونی کابل‌ها و حفاظ‌سازی کابل‌ها ارتباط دارد. با فرض عدم تغییر محیط

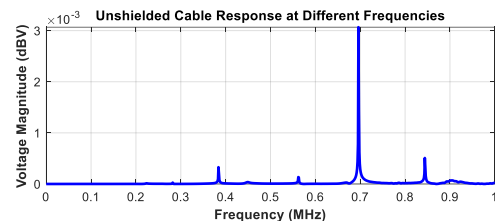


شکل ۷- پاسخ فرکانسی کابل بدون حفاظ با تحریک سیگنال شبه ضربه

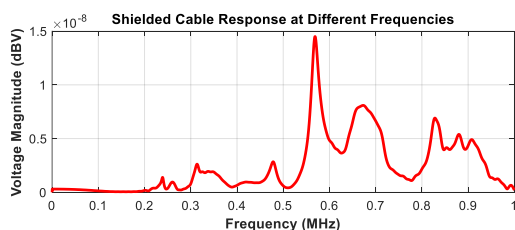
مطالعه رفتار فرکانسی سیگنال القا شده روی کابل‌ها در شکل (۷) نشان‌دهنده‌ی بیشتر بودن میزان جذب انرژی در محدوده‌های فرکانسی خاصی است. این شکل، پاسخ فرکانسی دو سیم شماره یک و شماره شش را در دسته کابل بدون حفاظ نشان می‌دهد که فرکانس رزونانس ۷۰۰MHz داشته‌اند.

اعمال تغییرات در پارامترهای کابل مانند حفاظ، نحوه‌ی قرارگیری کابل و دسته‌بندی می‌تواند در بهینه شدن این رفتار تاثیرگذار باشد.

شکل (۸) تفاوت اثرپذیری کابل را در شرایط وجود و عدم وجود حفاظ نشان می‌دهد، بر این اساس، دامنه ولتاژ القا شده در فرکانس رزونانس ۷۰۰MHz حدود صد هزار برابر کاهش یافته است.



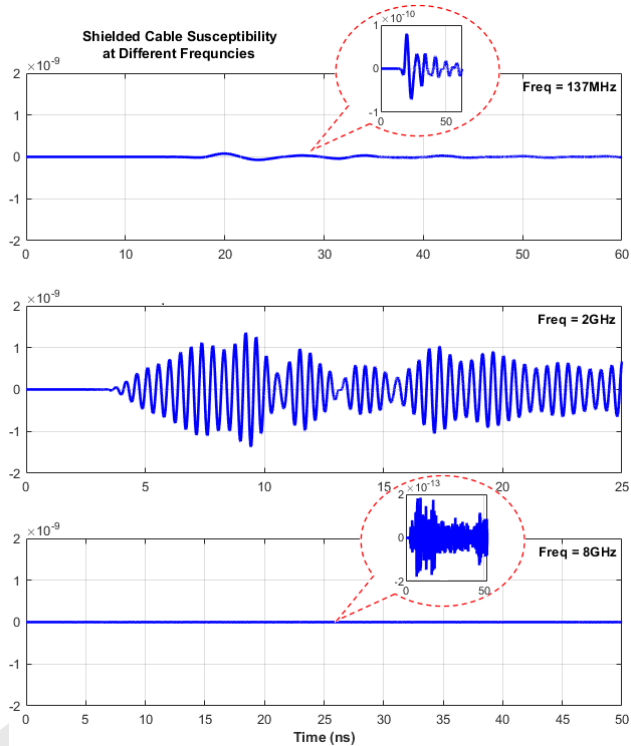
(الف)



(ب)

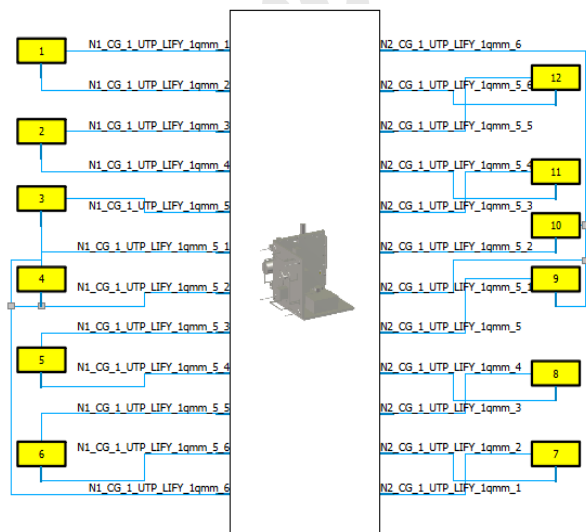
شکل ۸- مقایسه رفتار فرکانسی سیم شماره یک در دسته کابل در دو حالت (الف) بدون حفاظ، (ب) با حفاظ

بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با وجود کاهش تاثیرپذیری کابل‌ها در اثر حفاظ‌سازی، از آن‌جا که سطح تاثیر گرفته شده



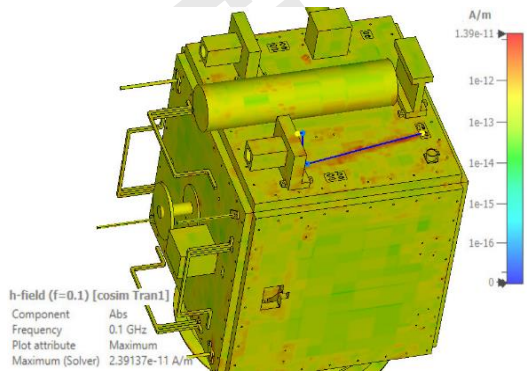
شکل ۵- بررسی ولتاژ القا شده در کابل حفاظ شده در حوزه زمان در فرکانس‌های 8GHz و 2GHz، 137MHz

در شکل (۶) مدل مداری سیم‌های دسته کابل شبیه‌سازی شده در محیط شماتیک نرم‌افزار CST آمده است و در ادامه جهت بررسی کامل‌تر رفتار فرکانسی، یک سیگنال شبه ضربه را که دارای طیف فرکانسی گسترده‌ای است، به عنوان منبع تشعشع در نظر گرفته و رفتار کابل را در این حالت شبیه‌سازی می‌کنیم. در این‌جا هر پورت نمایانگر یکی از ۱۲ رشته سیم شکل (۱) است.

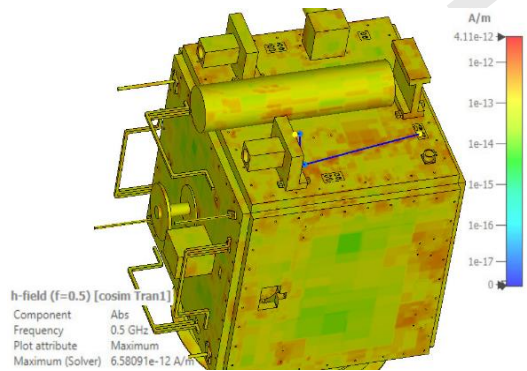


شکل ۶- مدل مداری کابل شبیه‌سازی شده در بخش شماتیک CST

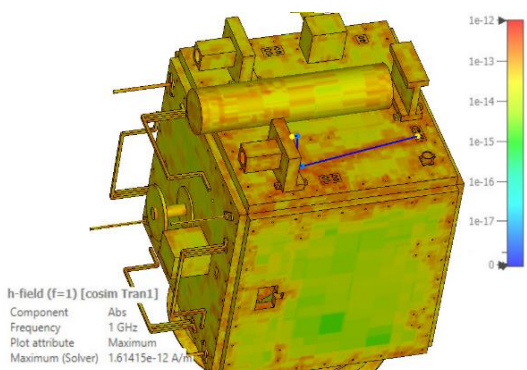
بررسی شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که میزان تشعشع ناشی از کابل‌ها کم بوده و بیشینه تشعشع در فرکانس 100MHz رخ می‌دهد. در این شرایط، شدت میدان مغناطیسی تقریباً 1.39×10^{-11} آمپر بر متر است که جریان سطحی ناچیزی روی بدنه‌ی ماهواره القا می‌نماید. به همین سبب نیازی به اضافه کردن حفاظ روی این کابل از منظر جلوگیری از تشعشعات مزاحم آن، نیست.



(الف)



(ب)



(ج)

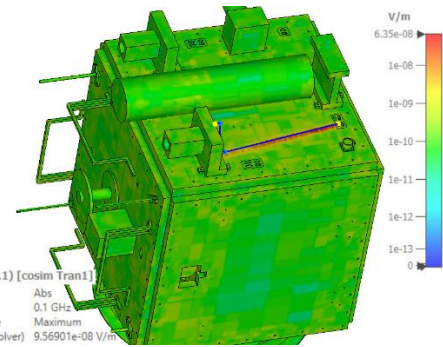
شکل ۱۰- میدان مغناطیسی ناشی از تحریک خط انتقال حاوی قطار پالس در فرکانس (الف) 100MHz، (ب) 500MHz و (ج) 1000MHz

آزمون و پیاده‌سازی

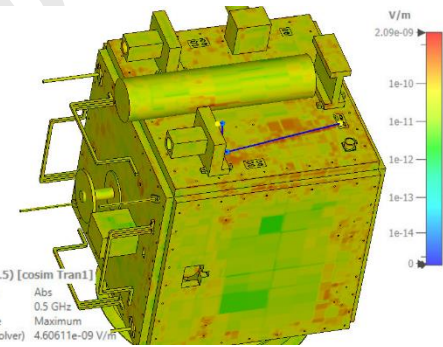
با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده روی کابل‌های ارتباطی دوربین با فرستنده مخابرات محموله که دارای پروتکل LVDS است، هرچند حفاظ‌سازی کابل میزان تاثیرپذیری آن را کاهش می‌دهد ولی

حتی در شرایط بدون حفاظ نیز پایین است، می‌توان به دلیل محدودیت بودجه جرمی از حفاظ نمودن کابل‌های LVDS صرف‌نظر نمود. سطوح انرژی در این شبیه‌سازی‌ها اگرچه تطابق کاملی با سطوح واقعی ندارند، پیش‌بینی بسیار خوبی از شرایط واقعی در اختیار طراح قرار می‌دهد.

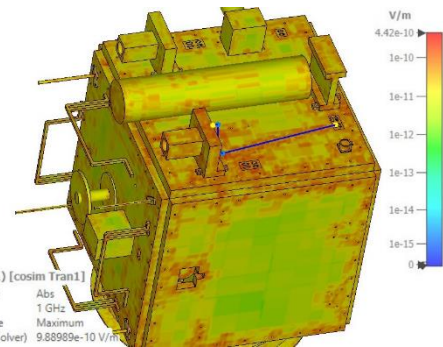
در گام بعدی شبیه‌سازی، به تاثیرگذاری تشعشعات ناشی از کابل روی محیط پیرامون پرداخته‌ایم. مطابق با استاندارد [۱۶]، در آزمون‌های سازگاری الکترومغناطیسی، تشعشعات انتشاری ناشی از دستگاه‌های تحت آزمون با عنوان سری آزمون‌های RE انجام می‌شود. با هدف شبیه‌سازی آزمون‌های RE در شبیه‌سازی یک رشته پالس مشابه با دامنه و فرکانسی که در واقعیت در کابل وجود خواهد داشت به یکی از کابل‌ها اعمال شد. پس از آن میدان الکتریکی، مغناطیسی و جریان سطحی ناشی از جریان کابل روی بدنه ماهواره بررسی شده است. در این حالت کابل‌ها بدون حفاظ فرض شده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- میدان الکتریکی ناشی از تحریک خط انتقال حاوی قطار پالس در فرکانس (الف) 100MHz، (ب) 500MHz و (ج) 1000MHz

جدول ۱- نتایج بررسی اختلال عملکرد محموله ماهواره با کابل بدون حفاظ در شبیه‌سازی و آزمون RS

اختلال در عملکرد		دامنه V/m	فرکانس MHz	مشاهده شد	مشاهده نشده
مشاهده شد	مشاهده نشده				
✓	-	10	137	شبیه‌سازی	✓
✓	-	10	2000		
✓	-	10	8000		
✓	-	10	137	آزمون	✓
✓	-	10	2000		
✓	-	10	8000		

آزمون حساسیت‌پذیری تشعشی (RS)، از فرکانس ۳۰ MHz تا ۱۸ GHz روی کابل LVDS متصل به دوربین و فرستنده مخابراتی محموله انجام شد. در این آزمون سیگنالی با دامنه 10 V/m در تمام بازه‌ی فرکانسی به کمک آنتن‌هایی در باندهای مختلف روی کابل متصل به دوربین و فرستنده مخابراتی القا گشت. در حین القای سیگنال مزاحم، عملکرد دوربین و فرستنده به طور دائم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد که عدم وجود حفاظ در عملکرد این چیدمان خللی ایجاد نمی‌نماید. بدین ترتیب، نتیجه آزمون انجام شده مطابق نتایج شبیه‌سازی بوده و آن را تایید می‌کند (شکل ۱۳).

تاریخ	شماره	پروژه	تاریخ انجام آزمون	محل آزمون	فرکانس	دامنه	نتیجه	تایید
۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۳۰ MHz تا ۱۸ GHz	۱۰ V/m	موفق	✓

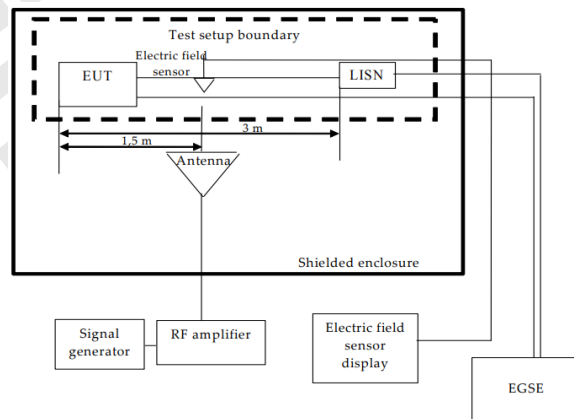
شکل ۱۳- لاگ آزمون سازگاری الکترومغناطیسی انجام شده

آزمون تشعشع انتشاری (RE) نیز روی همان چیدمان دوربین و فرستنده انجام شد. در این آزمون داده واقعی روی باس LVDS وجود داشته و تشعشعات مزاحم ناشی از آن در بازه‌های فرکانسی ۳۰ MHz تا ۱۸ GHz اندازه‌گیری شده است. در نتایج آزمون نیز مطابق نتایج شبیه‌سازی هیچ گونه تشعشی خارج از حدود استاندارد [۱۶] مشاهده نشد.

از آن‌جا که میزان تاثیر امواج روی کابل‌ها پایین است، به لحاظ فنی حفاظ نمودن کابل‌ها ضرورت ندارد.

به منظور صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، ضمن برقراری لینک ارتباطی دوربین و فرستنده، آزمون‌های سازگاری الکترومغناطیسی مطابق استاندارد ECSS-E-ST-20-07C انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بر اساس این استاندارد در آزمون RS، تجهیز تحت آزمون (EUT) و دو متر از کابل متصل به آن روی میزی که ۹۰ سانتی‌متر از سطح زمین آزمایشگاه فاصله دارد، گسترده می‌شود. آنتن ارسال سیگنال‌های آزمون، در فاصله یک متری از چیدمان قرار می‌گیرد. سیگنال‌های آزمون در بازه فرکانسی معین و با دامنه مشخص شده در استاندارد، به EUT تابانده می‌شود. در حین اعمال سیگنال آزمون نباید هیچ گونه اختلالی در عملکرد تجهیزات مشاهده شود [۱۶].

شایان ذکر است که در شبیه‌سازی و آزمون RS فرکانس‌ها مطابق استاندارد [۱۰۱] اعمال شده‌اند، اما در جدول (۱) به صورت نمونه تنها فرکانس‌های فرستندگی خود ماهواره که از ابتدا به آن اشاره شد، آورده شده است.



شکل ۱۱- چیدمان آزمون RS [۱۶]



شکل ۱۲- چیدمان آزمون RS در آزمایشگاه

- Hangzhou, China, 2020, pp. 1-4, doi: [10.1109/NEMO49486.2020.9343478](https://doi.org/10.1109/NEMO49486.2020.9343478)
- [2] Z. Vrankovic, G. L. Skibinski and C. Winterhalter, "Novel double clamp methodology to reduce shielded cable radiated emissions initiated by electronic device switching," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 4351-4360, doi: [10.1109/ECCE.2015.7310275](https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310275)
- [3] Y. Zhou and J. Xie, "Analysis of wiring in the radiated disturbance measurement of electronic equipment," *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1-6, doi: [10.1109/EMC-B.2017.8260477](https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260477)
- [4] S. Mortazavi et al., "Investigation of Possible EMC Interferences between Multi-Gig Communication Link and RF Applications in Vehicle," *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Barcelona, Spain, 2019, pp. 1100-1105, doi: [10.1109/EMCEurope.2019.8872099](https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2019.8872099)
- [5] J. Hein, J. Hippeli and T. F. Eibert, "Efficient EMC Parameter Analysis for the Verification of Complex Automotive Simulation Models by the Utilization of Design of Experiments," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1965-1973, Dec. 2018, doi: [10.1109/TEMC.2017.2784879](https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2784879)
- [6] H. Yafei, Z. Yu and Z. Hui, "A non-terminal points grounding method of shielded cable for electromagnetic pulse protection," *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1-5, doi: [10.1109/EMC-B.2017.8260416](https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260416)
- [7] G. Li et al., "Prediction of Radiated Emissions From Cables Over a Metal Plane Using a SPICE Model," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 1, pp. 61-68, Feb. 2015, doi: [10.1109/TEMC.2014.2364405](https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2364405)
- [8] L. Yongliang et al., "EMC analysis for Multi-point grounding cable of aircraft," in *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, China, 2014, pp. 1423-1426, doi: [10.1109/APCAP.2014.6992795](https://doi.org/10.1109/APCAP.2014.6992795)
- [9] G. Bhooma et al., "Effectiveness of various shield termination methods of cables," *2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, Bengaluru, India, 2016, pp. 1-4, doi: [10.1109/INCEMIC.2016.7921473](https://doi.org/10.1109/INCEMIC.2016.7921473)
- [10] I. Turer and K. Aydin, "Electromagnetic shielding properties of satellites," *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space*

باید یادآوری کرد که دو سری آزمون مهم هدایتی نیز در استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی با عنوان انتشار هدایتی (CE) و حساسیت‌پذیری هدایتی (CS) وجود دارد که در این مقاله به شبیه‌سازی آن‌ها پرداخته نشده است. در مطالعات آتی می‌توان شبیه‌سازی این آزمون‌ها را نیز مدنظر قرار داد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی و آزمون‌های عملی RE و RS، در ماهواره مورد نظر، اتصال دوربین و محموله مخابراتی را می‌توان با کابل بدون حفاظ برقرار کرد. البته نتیجه‌گیری نهایی منوط به نتایج آزمون‌های هدایتی نیز خواهد بود.

اگر بتوان از قبل با شبیه‌سازی به این نتیجه رسید که لزومی به استفاده از حفاظ وجود ندارد علاوه بر صرفه‌جویی جرمی در ماهواره و نیز کاهش پیچیدگی‌های اتصال، در سفارش‌گذاری نوع کانکتورها و کابل‌ها نیز از ابتدای پروژه هوشمندانه‌تر عمل خواهد شد.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که با انجام شبیه‌سازی‌های سازگاری الکترومغناطیسی در فاز طراحی، می‌توان پیش از ورود به آزمون‌های زیرسیستمی و سیستمی در مورد حفاظ‌سازی و مسیر مناسب کابل‌بندی به نتایج مطلوبی رسید.

صرف‌نظر از این‌که شبیه‌سازی در مراحل اولیه باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان می‌گردد، این کار از اعمال راه‌کارهای مهندسی بیش از حد نیز مانند حفاظ‌سازی تمامی کابل‌های بیرونی در سیستم جلوگیری می‌کند. این نوع راه‌کارها که در طراحی سیستمی ماهواره‌ها به اشتباه مرسوم است، غیر از جرم خود حفاظ روی کابل، به دلیل لزوم استفاده از بدنه‌ی حفاظ برای تمام کانکتورهای متصل به کابل حفاظدار، غیر از پیچیدگی اتصال، جرم نهایی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. افزایش جرم در سیستمی مانند ماهواره که می‌بایست مقید به الزامات جرمی سختگیرانه پرتابگرها باشد، به هیچ عنوان قابل قبول نیست.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی را بیان نکرده‌اند.

مراجع

- [1] Y. Guo, et. al., "Simulation and Analysis of the Influence of External Cables on the Electromagnetic Radiation of the Electronic Equipment," in *2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*,

- Microwave Remote Sensing Satellite," 2019 IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC), Nanjing, China, 2019, pp. 1-3, doi: [10.1109/ISEMC48616.2019.8986086](https://doi.org/10.1109/ISEMC48616.2019.8986086).
- [14] CST Studio Suite, Cable Simulation", 3DS.COM/SIMULIA, Version 2020.0 - 8/16/2019.
- [15] H. Ning, G. Zhen and Y. Ren, "An optimal design of LVDS interface," *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*, Harbin, China, pp. 2024-2026, 2011. doi: [10.1109/ICCSNT.2011.6182368](https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2011.6182368)
- [16] ECSS-E-ST-20-07C Rev.1 Standard, 7 February 2012.
- Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2015, pp. 401-404, doi: [10.1109/RAST.2015.7208377](https://doi.org/10.1109/RAST.2015.7208377).
- [11] R. Uzel and A. Özyildirim, "A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment," *2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 295-299, doi: [10.1109/RAST.2017.8003007](https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8003007)
- [12] J. R. Solin, "Shielding effectiveness of satellite faraday cages with EMI taped seams and closeouts," in *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 40-46, Second Quarter 2018, doi: [10.1109/MEMC.2018.8410660](https://doi.org/10.1109/MEMC.2018.8410660)
- [13] Y. -J. Zhang and L. -L. Cheng, "Application of System-Level EMC Design Technology in