

Original Research Paper

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

Razieh Narimani<sup>1\*</sup>, Mohammad Karami<sup>2</sup>, Leila Farhoudi<sup>3</sup>, Elham Hosseini<sup>4</sup>, Mohammad Sayanjali<sup>5</sup>, and Vali Talebzadeh<sup>6</sup>

1, 3-6. Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

2. Pooyeshgaran Sanat Hagh, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 04 March 2024

Revised 08 May 2024

Accepted 26 May 2024

Available Online 27 May 2024

#### Keywords:

Electromagnetic compatibility

Remote sensing satellite

LVDS bus

Shielding

RS, RE

### ABSTRACT

Ensuring the correct operation of electrical equipment in tandem is a critical engineering concern, particularly when addressing the issue of electromagnetic compatibility (EMC). In satellite systems, EMC considerations must be addressed from the initial design phases, as methods such as shielding or the addition of suitable filters are not always feasible or optimal. This article examines the necessity of shielding the LVDS (low-voltage differential signaling) bus cabling of the satellite's camera, which is located on the satellite's exterior. The study begins with the simulation of the LVDS bus cabling to assess the need for shielding, and the results are subsequently validated through electromagnetic compatibility testing. The research findings indicate that, while shielding the LVDS bus cable of the camera can improve protection by a factor of ten thousand in the worst-case scenario during radiated emission (RE) and radiated susceptibility (RS) tests, the low level of interference radiation in RE (approximately E7–8 V/m or E4/1–11 A/m) and the small amplitude of the interference signal in RS (approximately 0.001 V) suggest that shielding is not necessary. Shielding would only increase the satellite's mass and complicate the connection without significant benefits. It is evident from this study that simulating conducted emission (CE) and conducted susceptibility (CS) tests in subsequent design phases is essential to ensure comprehensive EMC assessment.

\*Corresponding Author's E-mail: [r.narimani@isrc.ac.ir](mailto:r.narimani@isrc.ac.ir)

### How to Cite this Article:

R. Narimani, M. Karami, L. Farhoudi, E. Hosseini, M. Sayanjali, and V. Talebzadeh, "Camera cabling analysis of a remote sensing satellite in terms of electromagnetic compatibility," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 61-70, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1480>.



### 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/).



## تحلیل کابل بندی دوربین یک ماهواره سنجشی از منظر سازگاری الکترومغناطیسی

راضیه نریمانی<sup>۱\*</sup>، محمد کرمی<sup>۲</sup>، لیلا فرهودی<sup>۳</sup>، الهام حسینی<sup>۴</sup>، محمد سینجلی<sup>۵</sup>، و ولی طالبزاده<sup>۶</sup>

۱ و ۶- مربی، پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، شرکت پویسگران صنعت حق، تهران، ایران

۳- کارشناسی، پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۴ و ۵- استادیار، پژوهشکده سامانه های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

کارکرد صحیح تجهیزات الکترونیکی در کنار یکدیگر، دغدغه جدی مهندسی به شمار رفته و موجب توجه ویژه به مبحث سازگاری الکترومغناطیس شده است. در ماهواره به عنوان یک سیستم پیچیده با وجود محدودیت های جرمی و ابعادی، از فازهای ابتدایی می بایست مسایل سازگاری الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گیرد؛ زیرا روش هایی مانند حفاظ سازی یا اضافه کردن فیلترهای مناسب همواره عملیاتی و بهینه نیست. در این مقاله، در گام نخست طراحی یک ماهواره سنجشی، کابل بندی باس LVDS دوربین که روی وجه بیرونی ماهواره است، با هدف بررسی ضرورت حفاظت کردن این کابل ها شبیه سازی و با نتایج آزمون سازگاری الکترومغناطیسی صحت گذاری شده است. بر اساس پژوهش انجام شده، با وجود این که در آزمون های تشعشع انتشاری (RE) و حساسیت پذیری 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 می بخشد، اما نظر به ضعف بودن سیگنال مزاحم تشعشعی در RE (حدود  $7 E-8 V/m$  یا  $11 A/m$ ) و همچنین کم بودن دامنه سیگنال مزاحم تزویجی در RS (حدود  $0/01 V$ ) ضرورتی نداشته و تنها هزینه جرمی ماهواره و پیچیدگی اتصال را افزایش خواهد داد. البته ضرورت شبیه سازی آزمون های CE و CS و مقایسه آن با نتایج عملی در گام های بعدی واضح است.

### تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴ اسفند ۱۴۰۲

بازنگری ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش ۶ خرداد ۱۴۰۳

اولین انتشار ۷ خرداد ۱۴۰۳

### واژه های کلیدی:

سازگاری الکترومغناطیسی

ماهواره سنجشی

باس LVDS

حفاظ سازی

RS•RE

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [r.narimani@isrc.ac.ir](mailto:r.narimani@isrc.ac.ir)

### How to Cite this Article:

R. Narimani, M. Karami, L. Farhoudi, E. Hosseini, M. Sayanjali, and V. Talebzadeh, "Camera cabling analysis of a remote sensing satellite in terms of electromagnetic compatibility," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 61-70, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1480>.



### 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/).



## علائم و اختصارات

CE	Conducted Emission
CS	Conducted Susceptibility
EUT	Equipment Under Test
LVDS	Low-Voltage Differential Signaling
RE	Radiated Emission
RS	Radiated Susceptibility

## 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 الکترونیکی بسیاری است که در یک فضای محدود در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و این به معنای بالابودن تعامل زیرسیستم‌ها با یکدیگر و وجود یک شبکه ارتباطی پیچیده میان آن‌ها است.

کابل‌ها به‌عنوان 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 حفاظت‌سازی 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 [۱-۳]. 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 به‌عنوان سیستمی که تجهیزات الکترونیکی در یک فاصله محدود و نزدیک به هم قرار دارند، چالش جدی در طراحی ماهواره به‌شمار رفته و حفاظت‌سازی در این سامانه به‌عنوان یک رویکرد اصلی مورد توجه طراحان می‌باشد [۹-۱۳].

یک ماهواره سنجشی علاوه بر دوربین‌های تصویربرداری، شامل

آنتن‌های مختلفی به‌منظور ارسال و دریافت دیتاهای تصویر، تله‌متری/تله‌کامند 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 تأثیرپذیری 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 تأثیرگذاری 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.

## تعریف مدل

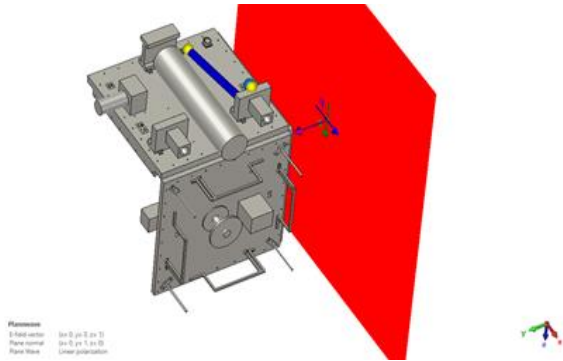
محیط‌های نرم‌افزاری گوناگونی جهت شبیه‌سازی امواج الکترومغناطیسی در اختیار طراحان قرار دارد که نرم‌افزار CST یکی از قدرتمندترین آن‌هاست که CST Cable Studio بسته نرم‌افزاری کاملی برای تحلیل خطوط انتقال سیمی، تداخلات الکترومغناطیسی و حساسیت‌پذیری الکترومغناطیسی روی ساختارهای کابلی را در اختیار ما قرار داده 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 دیتا متصل به فرستنده محموله ماهواره مدل شده و سپس مسیر این کابل کشی شبیه‌سازی می‌گردد.

دو سری کابل دیتا 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 به‌همراه 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.

مختلف کاری ماهواره انجام شده است. شکل (۳) نحوه تابش موج صفحه‌ای به بدنه ماهواره و کابل‌های خارجی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه تابش موج صفحه‌ای به ماهواره.

Fig. 3. Plane wave radiation to the satellite.

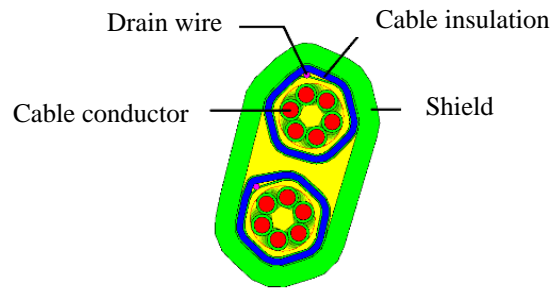
امواج تشعشی تابیده شده، منجر به ایجاد جریان القایی درون کابل‌ها می‌شود که میزان انرژی دریافتی در کابل‌ها به محیط پیرامونی کابل‌ها و حفاظ‌سازی کابل‌ها ارتباط دارد. با فرض عدم تغییر محیط پیرامونی کابل‌ها، شبیه‌سازی ابتدا در شرایطی که کابل‌ها بدون حفاظ هستند، انجام شده و سپس با قراردادن حفاظ بر روی کابل‌ها به مقایسه نتایج حاصله می‌پردازیم.

### شبیه‌سازی

در این مقاله، به جهت امکان صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی در عمل یک ماهواره سنجنشی 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 هرکدام 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.

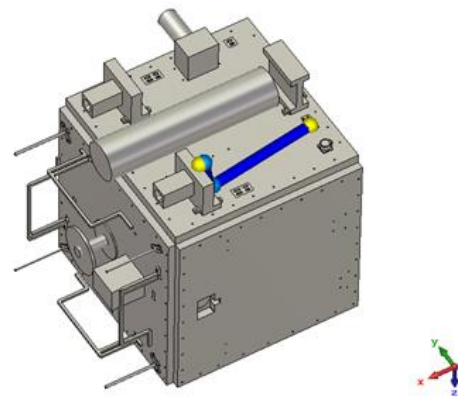
مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) نشان دهنده این موضوع است که حفاظ کردن کابل، میزان تاثیرپذیری را کاهش داده و همچنین اثر خود حفاظ نیز با بالا رفتن فرکانس اعمالی بیشتر شده است. افزودن حفاظ در فرکانس ۱۳۷MHz، در حدود ۱۰۴ برابر ولتاژ القا شده را کاهش داده است. این کاهش ولتاژ القا شده در فرکانس ۲GHz در حدود ۱۰۶ برابر و در فرکانس ۸GHz در حدود ۱۰۱۰ برابر است.



شکل ۱- نمایی از سطح مقطع کابل LVDS.

Fig. 1. Cross-section of the LVDS cable.

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.



شکل ۲- مسیر کابل دوربین روی بدنه ماهواره.

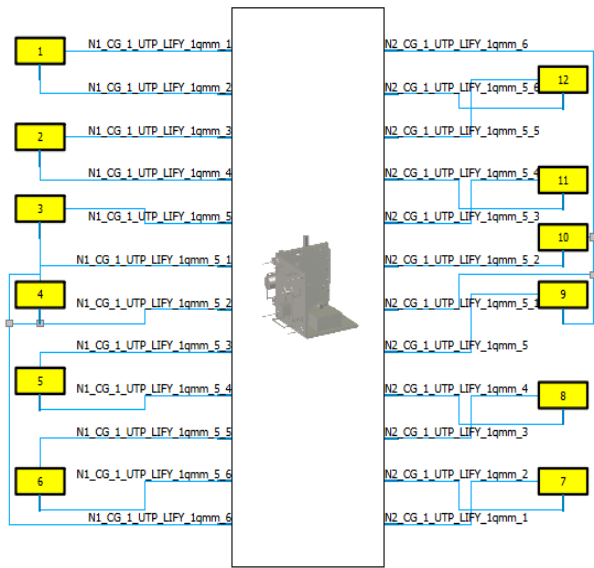
Fig. 2. The route of the camera cable on the satellite body.

حساسیت‌پذیری تشعشی (RS) کابل یا به‌طور 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.

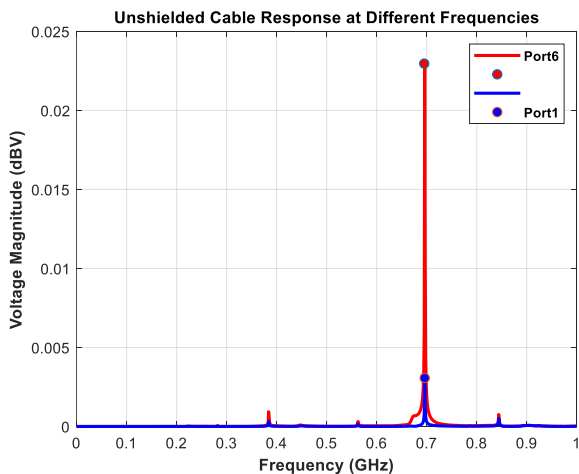
به‌منظور سهولت شبیه‌سازی و افزایش سرعت تحلیل، شبیه‌سازی سیگنال تشعشی آنتن‌ها به کمک یک سیگنال تک تون در فرکانس‌های

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.

Fig. 6. Simulated cable circuit model in CST schematic section.

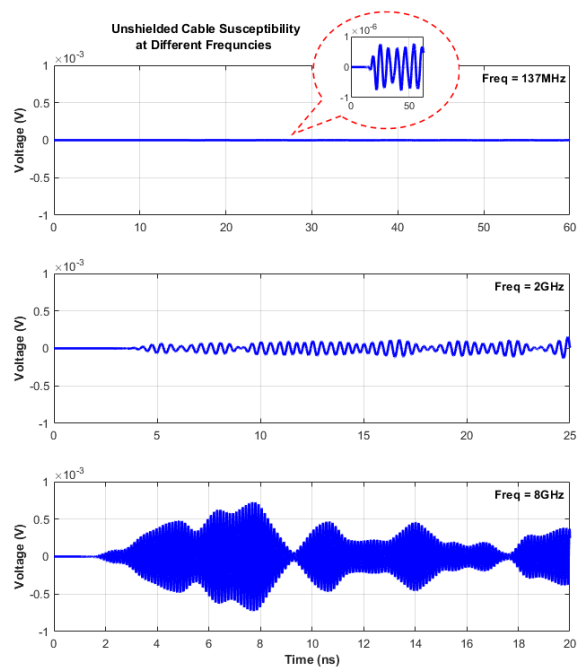


شکل ۷- پاسخ فرکانسی کابل بدون حفاظ با تحریک سیگنال شبه ضربه.

Fig.7. Frequency response of unshielded cable with excitation of the pseudo pulse signal.

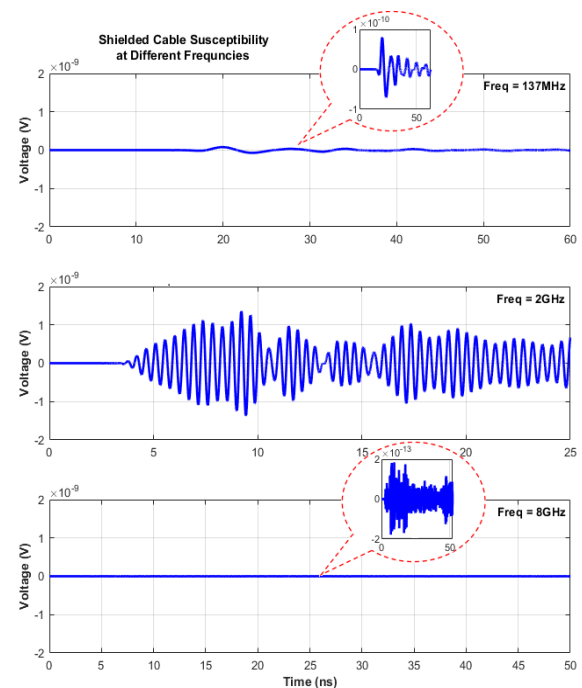
مطالعه رفتار فرکانسی سیگنال القا شده روی کابل‌ها در شکل (۷) نشان‌دهندهٔ بیشتر بودن میزان جذب انرژی در محدوده‌های

تحلیل کابل‌بندی دوربین یک ماهواره سنجشی از منظر سازگاری الکترومغناطیسی



شکل ۴- ولتاژ القا شده در کابل حفاظ نشده در حوزه زمان در فرکانس‌های 137MHz، 2GHz و 8GHz.

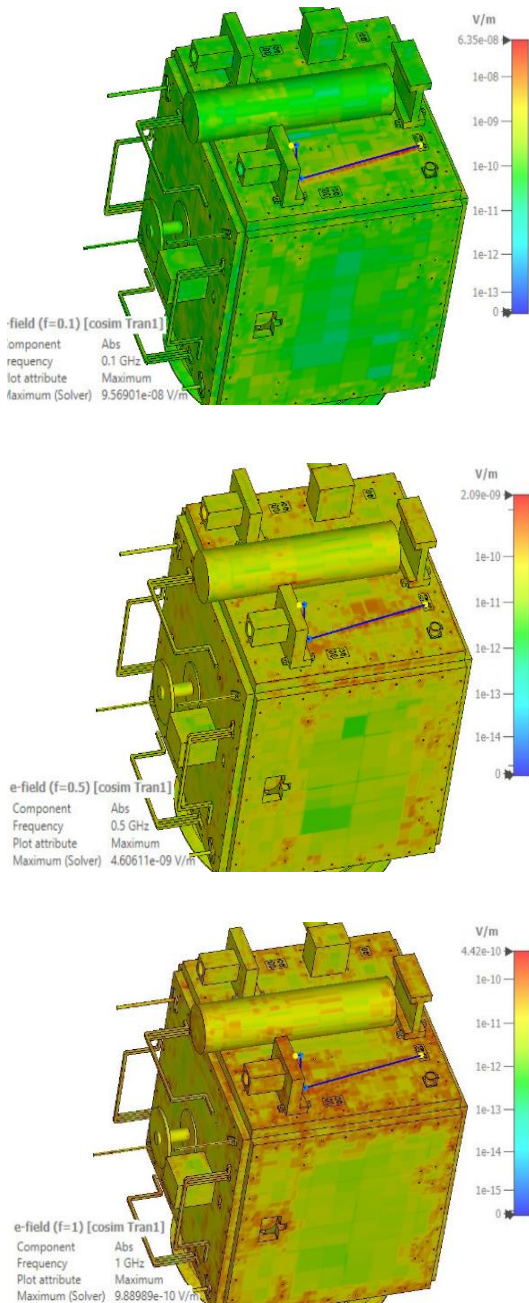
Fig. 4. Induced voltage in the unshielded cable in the time domain at the frequencies of 137 MHz, 2 GHz and 8 GHz.



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

Fig. 5. Induced voltage in the shielded cable in the time domain at frequencies of 137 MHz, 2 GHz and 8 GHz.

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.



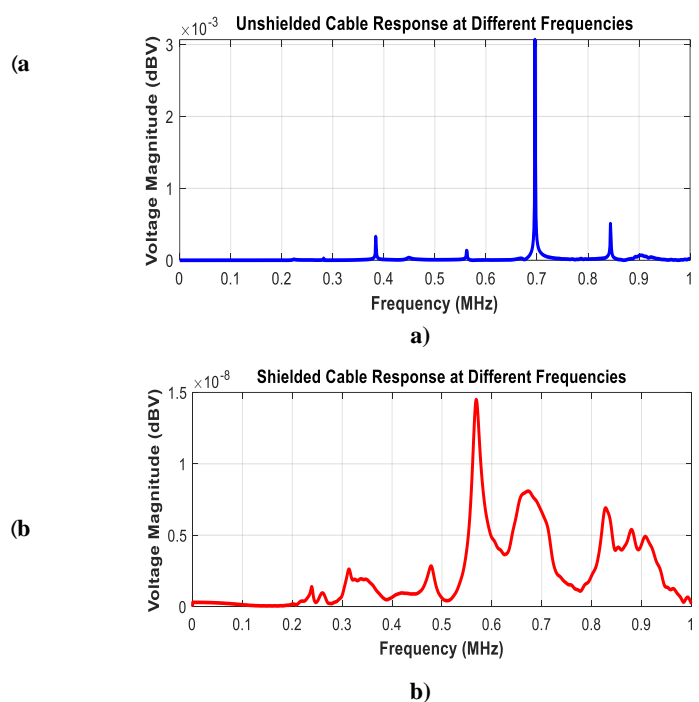
**شکل ۹-** میدان الکتریکی ناشی از تحریک خط انتقال حاوی قطار پالس در فرکانس (الف) 100MHz، (ب) 500MHz و (ج) 1000MHz.

**Fig. 9.** Electric field radiated from cable while transferring pulses at frequency a) 100MHz, b) 500MHz and c) 1000MHz.

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  $700\text{MHz}$  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  $700\text{MHz}$  حدود صد هزار برابر کاهش یافته است.



**شکل ۸-** رفتار فرکانسی سیم شماره یک در دسته کابل (الف) بدون حفاظ، (ب) با حفاظ.

**Fig. 8.** Frequency response of wire number one a) without shield, b) with shield.

بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با وجود کاهش تاثیرپذیری کابل‌ها در اثر حفاظ‌سازی، از آن‌جا که سطح تاثیر گرفته شده حتی در شرایط بدون حفاظ نیز پایین است، می‌توان به دلیل محدودیت بودجه جرمی از حفاظ نمودن کابل‌های LVDS صرف نظر نمود. سطوح انرژی در این شبیه‌سازی‌ها اگرچه تطابق کاملی با سطوح واقعی ندارند، پیش‌بینی بسیار خوبی از شرایط واقعی در اختیار طراح قرار می‌دهد.

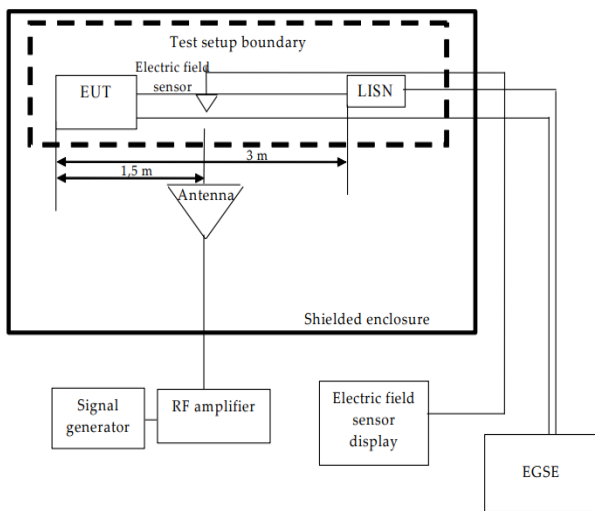
در گام بعدی شبیه‌سازی، به تاثیرگذاری تشعشعات ناشی از کابل روی محیط پیرامون پرداخته‌ایم. مطابق با استاندارد [۱۶]، در آزمون‌های سازگاری الکترومغناطیسی، تشعشعات انتشاری ناشی از دستگاه‌های تحت آزمون با عنوان سری آزمون‌های RE انجام می‌شود. با هدف

## آزمون و پیاده‌سازی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده روی کابل‌های ارتباطی دوربین با فرستنده مخابراتی محموله که دارای پروتکل LVDS است، هرچند حفاظت‌سازی کابل میزان تاثیرپذیری آن را کاهش می‌دهد ولی از آن‌جا که میزان تاثیر امواج روی کابل‌ها پایین است، به لحاظ فنی حفاظ نمودن کابل‌ها ضرورت ندارد.

به‌منظور 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 هیچ‌گونه اختلالی در عملکرد تجهیزات مشاهده شود [۱۶].

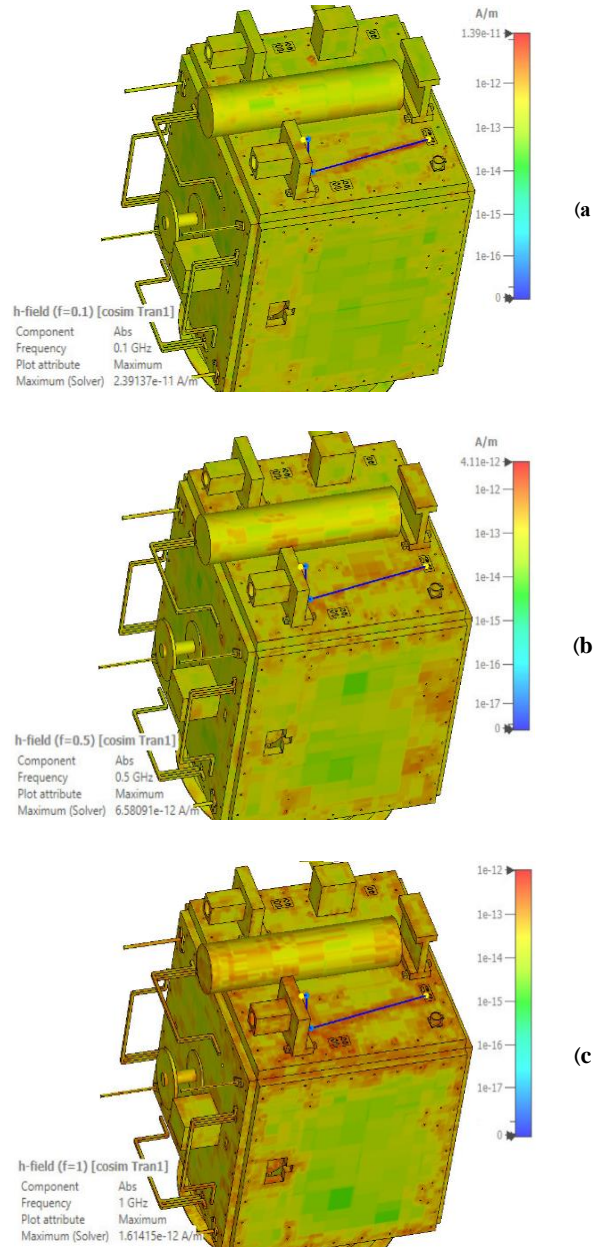
شایان ذکر است که در شبیه‌سازی و آزمون RS فرکانس‌ها مطابق استاندارد ۱۰۱ اعمال شده‌اند، اما در جدول (۱) به‌صورت نمونه تنها فرکانس‌های فرستندگی خود ماهواره که از ابتدا به آن اشاره شد، آورده شده است.



شکل ۱۱- چیدمان آزمون RS [۱۶].

Fig. 11. Test setup of the RS test [16].

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  $1.39e-11$  آمپر بر متر است که جریان سطحی ناچیزی روی بدنه‌ی ماهواره القا می‌نماید. به همین سبب نیازی به اضافه‌کردن حفاظ روی این کابل از منظر جلوگیری از تشعشعات مزاحم آن، نیست.



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

Fig. 10. Magnetic field radiated from cable while transferring pulses at frequency a) 100MHz, b) 500MHz and c) 1000MHz.

نتیجه آزمون انجام شده مطابق نتایج شبیه سازی بوده و آن را تایید می کند (شکل ۱۳).

تاریخ: شماره پرونده		لاگ آزمون سازگاری الکترومغناطیسی فرستنده مخابرات		محموله		پرونده فاس ایران		
کد وسیله	محمول-تاریخ	کد سند شناسنامه آزمون مرتبط:				عنوان آزمون مرتبط: آزمون سازگاری الکترومغناطیسی فرستنده مخابرات محموله		
تاریخ انجام آزمون	۰۷۱۶-۲۰۱۶	معتبر: آزمون: آزمایشگاه EMC پژوهشگاه				طراح آزمون: بخش محموله مخابراتی		
ردیف	پارامتر کنترلی	زمان کنترل			نتیجه مورد انتظار	حد پایانی مجاز	حد پائین مشاهده شده	وضعیت پذیرش
		شروع	ختم انجام آزمون	پایان آزمون				
۱۲	RS, magnetic field, 30 Hz to 100 KHz	✓			ECSS-E-ST-20-07C براساس استاندارد ویندهای ۱۶-۲۹ جدول ۶-۸	۰	۰	✓
۱۴	RS, electric field, 30 MHz to 18 GHz	✓			ECSS-E-ST-20-07C براساس استاندارد ویندهای ۱۶-۲۹ جدول ۶-۸	۰	۰	✓
۱۵	Susceptibility to electrostatic discharge	✓			ECSS-E-ST-20-07C براساس استاندارد ویندهای ۱۶-۲۹ جدول ۶-۸	۰	۰	✓

شکل ۱۳- لاگ آزمون سازگاری الکترومغناطیسی انجام شده.

Fig. 13. Log of electromagnetic compatibility test.

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 بازه های فرکانسی ۳۰MHz تا ۱۸GHz اندازه گیری شده است. در نتایج آزمون نیز مطابق نتایج شبیه سازی هیچ گونه تشعشعی خارج از حدود استاندارد [۱۶] مشاهده نشد.

باید یادآوری کرد که دو سری آزمون مهم هدایتی نیز در استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی با عناوین انتشار هدایتی (CE) و حساسیت پذیری هدایتی (CS) وجود دارد که در این مقاله به شبیه سازی آن ها پرداخته نشده است. در مطالعات آتی می توان شبیه سازی این آزمون ها را نیز مدنظر قرار داد.

بر اساس نتایج به دست آمده در شبیه سازی و آزمون های عملی RE و RS، در ماهواره مورد نظر، اتصال دوربین و محموله مخابراتی را می توان با کابل بدون حفاظ برقرار کرد. البته نتیجه گیری نهایی منوط به نتایج آزمون های هدایتی نیز خواهد بود.

اگر بتوان از قبل با شبیه سازی به این نتیجه رسید که لزومی به استفاده از حفاظ وجود ندارد علاوه بر صرفه جویی جرمی در ماهواره و نیز کاهش پیچیدگی های اتصال، در سفارش گذاری نوع کانکتورها و کابل ها نیز از ابتدای پروژه هوشمندانه تر عمل خواهد شد.



شکل ۱۲- چیدمان آزمون RS در آزمایشگاه.

Fig. 12. Setup of RS test in the laboratory.

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

Table 1. Monitoring of satellite payload malfunctions, unshielded cable in simulation and RS test.

	Frequency MHz	Domain V/m	Malfunctions	
			Seen	Unseen
Simulation	137	10	-	✓
	2000	10	-	✓
	8000	10	-	✓
Test	137	10	-	✓
	2000	10	-	✓
	8000	10	-	✓

آزمون حساسیت پذیری تشعشعی (RS)، از فرکانس ۳۰MHz تا ۱۸GHz روی کابل LVDS متصل به دوربین و فرستنده مخابراتی محموله انجام شد. در این آزمون سیگنالی با دامنه ۱۰V/m در تمام بازه های فرکانسی به کمک آنتن هایی 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 نمی نماید. بدین ترتیب،

## 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 حفاظت‌سازی 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 حفاظت‌سازی 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 هیچ‌عنوان قابل قبول نیست.

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

- EUROPE, Barcelona, Spain, 2018, pp. 1100-1105, <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," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1965-1973, 2018, <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," in *5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1-5, <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," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 1, pp. 61-68, 2015, <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2364405>.
- [8] L. Yongliang *et al.*, "EMC analysis for multi-point grounding cable of aircraft," in *3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, China, 2014, pp. 1423-1426, <https://doi.org/10.1109/APCAP.2014.6992795>.
- [9] G. Bhooma *et al.*, "Effectiveness of various shield termination methods of cables," in *International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, Bengaluru, India, 2016, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/INCEMIC.2016.7921473>.
- [10] I. Turer and K. Aydin, "Electromagnetic shielding properties of satellites," in *7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2015, pp. 401-404, <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," in *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 295-299, <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8003007>.
- [12] J. R. Solin, "Shielding effectiveness of satellite faraday cages with EMI taped seams and closeouts," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 40-46, 2018, <https://doi.org/10.1109/MEMC.2018.8410660>.
- [13] Y. -J. Zhang and L. -L. Cheng, "Application of system-level EMC design technology in microwave remote sensing satellite," in *6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC)*, Nanjing, China, 2019, pp. 1-3, <https://doi.org/10.1109/ISEMC48616.2019.8986086>.
- [14] "CST studio suite, cable simulation," (Version 2020), [Workflow & Solver Overview]. DASSAULT
- [1] Y. Guo *et al.*, "Simulation and analysis of the influence of external cables on the electromagnetic radiation of the electronic equipment," in *MIT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Hangzhou, China, 2020, pp. 1-4, <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," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 4351-4360, <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," in *5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1-6, <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," in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC*

- Technology*, Harbin, China, 2011, pp. 2024-2026,  
<https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2011.6182368>.
- [16] *ECSS-E-ST-20-07C Rev.1- Electromagnetic Compatibility*, European Cooperation for Space Standardization, The Netherlands, 2012. [Online]. Available: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-07c-rev-1-electromagnetic-compatibility/>
- SYSTEMES, The 3DExperience Company, Paris, France, 2019. [Online]. Available: <https://space.mit.edu/RADIO/Documentation/CST%20Studio%20Suite%20-%20Cable%20Simulation.pdf>
- [15] H. Ning, G. Zhen, and Y. Ren, "An optimal design of LVDS interface," in *International Conference on Computer Science and Network*