

راهکارهای مقابله با
تداخلات الکترومغناطیسی
و شیوه انجام آزمون آن در طراحی و ساخت
زیرسیستم‌های فضایی

تألیف:

پدرام حاجی پور - عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات
رقیه کریم زاده بائی - عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات
پروین سجودی سردرود - پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات
لیلا محمدی - عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات

عنوان و نام پدیدآور: راهکارهای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی و شیوه انجام آزمون آن در طراحی و ساخت زیرسیستم‌های فضایی/تالیف پدram حاجی‌پور... (و دیگران).

مشخصات نشر: تهران: انتشارات راه دان، ۱۴۰۰.

مشخصات ظاهری: ۲۵۸ ص.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۷۵۷-۶۷-۴

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: تالیف پدram حاجی‌پور، رقیه کریم‌زاده‌بائی، پروین سجودی‌سردرود، لیلا محمدی.

موضوع: فضاپیماها -- تجهیزات الکترونیکی

موضوع: Space vehicles -- Electronic equipment

موضوع: فضاپیماها -- طرح و ساختمان

موضوع: Space vehicles -- Design and construction

شناسه افزوده: حاجی‌پور، پدram، ۱۳۶۲ -

رده بندی کنگره: TL۳۰۰۰

رده بندی دیویی: ۶۲۹/۴۷۲

شماره کتابشناسی ملی: ۸۴۷۶۶۹۵

عنوان کتاب: راهکارهای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی و شیوه انجام آزمون آن در طراحی و ساخت زیرسیستم‌های فضایی

ناشر: راه دان

مؤلف: پدram حاجی‌پور - رقیه کریم‌زاده‌بائی - پروین سجودی‌سردرود - لیلا محمدی

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۷۵۷-۶۷-۴

شمارگان: ۱۵۰ نسخه

قیمت: ۷۵۰۰۰ تومان

نوبت چاپ: اول - ۱۴۰۰

«کلیه حقوق این اثر متعلق به پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

(مرکز تحقیقات مخابرات ایران) می باشد.»

پیش‌گفتار

در سیستم‌های فضایی، به دلیل امکان پذیر نبودن عیب‌یابی پس از پرتاب ماهواره، شرایط سخت عملکردی، محدودیت حجم و وزن و غیره، می‌بایست طراحی با دقت مناسب بر حسب یک سری استانداردها و توصیه‌های مشخص انجام شود و الزاماتی برای انتخاب مواد و قطعات، طراحی، آزمون، تجمع و چیدمان اجزای سیستم‌های مخابراتی اعمال گردد. الزامات مذکور می‌بایست نیاز یک پروژه را به گونه‌ای تامین نماید تا یک چیدمان مناسب با لحاظ نمودن کاهش ابعاد، سهولت کابلینگ و کاهش تداخلات سیم‌بندی، رعایت مازولاریتی و سادگی آزمون‌پذیری، کاهش وزن، مقاوم‌سازی بردها در برابر تشعشعات فضایی از طریق پوشش رسانا، دفع حرارتی مناسب از طریق برقراری مسیر هدایت گرمایی به صفحه مرجع، کاهش اثر تشعشعات فضایی و تداخلات الکترومغناطیسی با استفاده از شیلدینگ، مقابله با اثر دشارژ الکترواستاتیکی و غیره ایجاد گردد. سازگاری الکترومغناطیسی یک سیستم فضایی قابلیت عملکرد صحیح سیستم در محیط اطراف است بطوری که تداخل الکترومغناطیسی غیرقابل تحملی را برای عناصر دیگر در آن محیط به وجود نیاورد. این سازگاری همان عملکرد بدون تداخل در حضور میدان مغناطیسی زمین و میدان مغناطیسی القایی دیگر تجهیزات می‌باشد. در مجموع، مطالب کتاب در شش فصل تنظیم شده است؛ در نگارش این فصل‌ها از منابع متنوع استفاده شده است و اطلاعات کاربردی در اختیار مهندسين قرار می‌گیرد. در پایان هر فصل، مراجع مورد استفاده جهت مطالعه بیشتر علاقه‌مندان معرفی شده است. فصل اول به موضوع سازگاری الکترومغناطیسی و راه‌های مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی پرداخته است. در فصل دوم آزمون‌های موردنیاز به منظور بررسی تداخلات الکترومغناطیسی

ارایه شده است. در فصل سوم به طراحی برد مدار چاپی در کاربردهای فضایی بر اساس سازگاری الکترومغناطیسی پرداخته شده است. فصل چهارم به ترتیب به موضوع کابلینگ و فیلترینگ و تجهیزات مورد استفاده در کاربردهای فضایی به عنوان یکی از راهکارهای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی اشاره نموده است. همچنین فصل پنجم به بررسی مسئله زمین‌سازی یک پروژه فضایی به عنوان یکی از راهکارهای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی پرداخته است. نهایتاً، فصل ششم الزامات مورد نیاز به منظور طراحی شیلد الکترومغناطیسی با توجه به الزامات فضایی را ارائه نموده است. مهندسان شاغل در صنایع فضایی و علاقه‌مندان به مسائل مربوط به چالش‌های مرتبط در زمینه ارتباطات ماهواره‌ای می‌توانند از این کتاب استفاده کنند. این کتاب الزامات فضایی مورد نیاز در یک سیستم مخابراتی در فضا را به نحو مناسبی ارایه می‌کند. این کتاب حاصل انجام پروژه‌های ماهواره‌ای در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران) است. مولفان بر خود لازم می‌دانند که از تلاش‌های همه همکاران گروه ارتباطات ماهواره‌ای، به ویژه سرکار خانم اعظم عیدی‌قردانی کنند. همچنین از زحمات مهندس رضا بحری، مهندس سید هاشم مداح حسینی و دکتر برگس نوری از اعضای هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات که با داوری خود باعث ارتقای سطح علمی کتاب شدند، قدردانی می‌شود.

و من الله التوفیق

تابستان ۱۴۰۰

فهرست مطالب

۱۳	فصل ۱- بررسی سازگاری الکترومغناطیسی
۱۵	۱-۱- مفهوم کلی سازگاری الکترومغناطیسی در زیرسیستم‌های فضایی
۱۸	۲-۱- ملاحظات کلی سازگاری الکترومغناطیسی برای یک سیستم مخابراتی فضایی
۱۹	۱-۲-۱- زمین‌سازی زیرسیستم مخابراتی ماهواره
۲۳	۲-۲-۱- شیلدینگ الکترومغناطیسی زیرسیستم‌های مخابراتی ماهواره
۲۵	۳-۲-۱- حساسیت به میدان‌های الکتریکی در اطراف ماهواره
۲۶	۴-۲-۱- کابل‌های الکتریکی سیستم‌های مخابراتی ماهواره
۲۶	۵-۲-۱- گسیل مغناطیسی DC
۲۷	۶-۲-۱- مدار فرکانس بالا (RF)
۲۸	۷-۲-۱- سازگاری الکترومغناطیسی زیرسیستم‌ها
۲۹	۸-۲-۱- سازگاری با سیستم پرتابگر ماهواره
۳۰	۹-۲-۱- شارژ (باردار شدن) ماهواره و تبعات آن
۳۱	۱۰-۲-۱- اثر دشارژ الکترواستاتیکی در ماهواره
۳۱	۱-۱۰-۲- شارژ سطحی
۳۱	۲-۱۰-۲- شارژ داخلی
۳۵	فصل ۲- فرآیند آزمون تجهیزات فضایی مبتنی بر استانداردهای
	MIL-STD-461-G و ECSS-E-ST-20-07C
۴۱	۱-۲- مقایسه دو استاندارد MIL-STD-461-G و ECSS-E-ST-20-07C از دید ملاحظات تداخلات الکترومغناطیسی

- ۴۴ ۲-۲- ملاحظات عمومی آزمون‌های سازگاری الکترومغناطیسی در دو استاندارد
ECSS-E-ST-20-07C و MIL-STD-461-G
- ۴۸ ۳-۲- آزمون‌های سازگاری الکترومغناطیسی مربوط به کاربردهای فضایی در
استانداردهای ECSS-E-ST-20-07C و MIL-STD-461-G
- ۵۱ ۴-۲- آزمون‌های اصلی سازگاری الکترومغناطیسی
- ۵۱ ۴-۲-۱- آزمون گسیل هدایتی از کابل تغذیه - مد تفاضلی -
30 Hz to 100 kHz
- ۵۳ ۴-۲-۲- گسیل هدایتی - کابل‌های سیگنال و تغذیه - مد مشترک -
100 kHz to 100 MHz
- ۵۵ ۴-۲-۳- گسیل هدایتی - کابل‌های تغذیه - جریان هجومی
- ۵۷ ۴-۲-۴- آزمون گسیل تشعشعی - میدان الکتریکی - 30 MHz to 18 GHz
- ۶۲ ۴-۲-۵- گسیل تشعشعی - میدان الکتریکی فرکانس پایین
- ۶۳ ۴-۲-۶- گسیل تشعشعی - میدان مغناطیسی فرکانس پایین
- ۶۴ ۴-۲-۷- گسیل هدایتی در درگاه آنتن
- ۶۴ ۴-۲-۸- آزمون حساسیت هدایتی کابل تغذیه - 30 Hz to 100 kHz
- ۶۷ ۴-۲-۹- آزمون حساسیت هدایتی - تزریق حجیم - 50 kHz to 100 MHz
- ۷۰ ۴-۲-۱۰- آزمون حساسیت هدایتی - کابل‌های تغذیه - حالت‌های گذرا
- ۷۳ ۴-۲-۱۱- آزمون حساسیت تشعشعی - میدان مغناطیسی -
30 Hz to 100 kHz
- ۷۵ ۴-۲-۱۲- آزمون حساسیت تشعشعی - میدان الکتریکی -
30 MHz to 18 GHz
- ۷۹ ۴-۲-۱۳- آزمون انتشار میدان مغناطیسی DC، ممان مغناطیسی
- ۸۲ ۴-۲-۱۴- آزمون حساسیت نسبت به دشارژهای الکترواستاتیکی
- ۸۳ ۴-۲-۱۴-۱- تخلیه تماسی
- ۸۴ ۴-۲-۱۴-۲- تخلیه مستقیم

۸۴ ۲-۴-۱۴-۳- تخلیه غیرمستقیم

۸۴ ۲-۴-۱۴-۴- تخلیه از راه هوا به سطوح عایق

۹۱ فصل ۳- طراحی برد مدار چاپی بر اساس سازگاری الکترومغناطیسی

۹۲ ۳-۱- قسمت‌بندی برد مدار چاپی

۹۳ ۳-۲- ایزوله کردن نواحی

۹۵ ۳-۳- اتصال زمین برد مدار چاپی به شاسی

۹۶ ۳-۴- ناپیوستگی مسیر برگشت

۱۰۱ ۳-۵- زمین انباشته

۱۰۲ ۳-۶- چیدمان لایه‌های برد مدار چاپی

۱۰۳ ۳-۷- ساختار برد مدار چاپی در سیستم زمین

۱۰۹ ۳-۸- سیستم تغذیه در برد مدار چاپی

۱۱۱ ۳-۸-۱- مدارهای دیجیتال در برد مدار چاپی

۱۱۴ ۳-۸-۲- مدارهای آنالوگ در برد مدار چاپی

۱۱۷ فصل ۴- کابلینگ و فیلترینگ برای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی

۱۱۸ ۴-۱- میدان الکتریکی و مغناطیسی تزویج‌شده به کابل‌ها

۱۲۱ ۴-۲- انواع کابل‌ها

۱۲۱ ۴-۲-۱- کابل زوج به‌هم‌تابیده بدون شیلد

۱۲۲ ۴-۲-۲- کابل سه‌محوری

۱۲۳ ۴-۲-۳- کابل‌های زوج به‌هم‌تابیده شیلد شده

۱۲۵ ۴-۲-۴- کابل‌های ریبون

۱۲۷ ۴-۳- انواع شیلد کابل

۱۲۷ ۴-۳-۱- شیلد بافتی

۱۳۰ ۴-۳-۲- شیلد مارپیچ

- ۱۳۰ ۴-۳-۳- پایان دهی شیلد
- ۱۳۲ ۴-۴- زمین کردن شیلد کابل
- ۱۳۴ ۴-۴-۱- زمین کردن شیلد کابل در فرکانس‌های بالا
- ۱۳۴ ۴-۴-۲- زمین کردن دوگانه شیلد کابل
- ۱۳۵ ۴-۵- فیلترینگ
- ۱۳۷ ۴-۵-۱- انواع فیلترها و مشخصه‌های اصلی آن‌ها
- ۱۳۹ ۴-۶- پارامترهای مهم در انتخاب فیلتر جهت حفاظت
- ۱۴۰ ۴-۶-۱- محدوده ولتاژ و محدوده جریان
- ۱۴۰ ۴-۶-۲- فرکانس کاری و محدوده فرکانسی
- ۱۴۰ ۴-۶-۳- تلفات سیگنال و افت ولتاژ
- ۱۴۱ ۴-۶-۴- محدوده دمایی
- ۱۴۱ ۴-۶-۵- تلفات عبوری و تضعیف
- ۱۴۲ ۴-۶-۶- ولتاژ قابل تحمل
- ۱۴۲ ۴-۶-۶-۱- راهکارهای پیشنهادی به منظور اطمینان از مدارات جهت قبولی
- در مجموعه آزمون‌های MIL-STD-461

- ۱۴۹ فصل ۵- زمین‌سازی
- ۱۵۱ ۵-۱- زمین‌سازی سیستم فضایی
- ۱۵۳ ۵-۱-۱- زمین‌سازی RF
- ۱۵۶ ۵-۱-۲- اهمیت زمین‌سازی RF
- ۱۵۷ ۵-۱-۳- زمین‌سازی ادوات پسیو
- ۱۵۷ ۵-۱-۳-۱- زمین‌سازی پوشش کابل‌ها
- ۱۵۹ ۵-۱-۳-۱-۱- زمین‌سازی پوشش کابل‌ها در فرکانس‌های پایین
- ۱۵۹ ۵-۱-۳-۱-۲- زمین‌سازی پوشش کابل‌ها در فرکانس‌های بالا
- ۱۶۱ ۵-۱-۳-۲- تعریف لایه و زمین‌سازی

- ۱۶۶ ۵-۱-۳-۳- روش های دی کوپلینگ
- ۱۷۵ ۵-۱-۴- زمین سازی مدارات مایکروویو یکپارچه بسته بندی نشده
- ۱۷۹ ۵-۱-۵- زمین سازی مدارات مایکروویو یکپارچه بسته بندی شده
- ۱۸۱ ۵-۱-۶- زمین سازی زیر سیستم های مایکروویو
- ۱۸۱ ۵-۱-۶-۱- زمین سازی مازول های مایکروویو
- ۱۸۴ ۵-۱-۶-۲- زمین سازی قطعات فعال روی بردهای مدار چاپی حاوی سیگنال ترکیبی
- ۱۸۷ ۵-۱-۶-۳- زمین سازی زنجیره تقویت کننده

فصل ۶- طراحی شیلد برای سازگاری الکترومغناطیسی

- ۱۹۷ ۶-۱- کارایی شیلد
- ۲۰۱ ۶-۱-۱- تلفات جذبی در شیلدینگ الکترومغناطیسی
- ۲۰۳ ۶-۱-۲- تلفات انعکاسی در شیلدینگ الکترومغناطیسی
- ۲۰۴ ۶-۱-۳- ترکیب تلفات جذبی و انعکاسی در شیلدینگ الکترومغناطیسی
- ۲۰۶ ۶-۱-۳-۱- موج های صفحه ای
- ۲۰۶ ۶-۱-۳-۲- میدان های الکتریکی
- ۲۰۷ ۶-۱-۳-۳- میدان های مغناطیسی
- ۲۰۸ ۶-۲- شیلد کردن با استفاده از مواد مغناطیسی
- ۲۰۹ ۶-۳- روزه ها و منافذ در شیلد
- ۲۱۲ ۶-۴- اثر چندین شکاف در شیلدینگ الکترومغناطیسی
- ۲۱۴ ۶-۵- درزهای شیلدینگ الکترومغناطیسی
- ۲۱۵ ۶-۶- فرکانس قطع پایین موجبر
- ۲۱۷ ۶-۷- واشر (درزبند) رسانا
- ۲۱۹ ۶-۸- اتصال فلزات غیر هم جنس
- ۲۲۰ ۶-۹- نصب واشر رسانا

۲۲۴	۱۰-۶- شیلد الکترومغناطیسی ایده‌آل
۲۲۵	۱۱-۶- پنجره‌های رسانا
۲۲۵	۱-۱۱-۶- پوشش‌های رسانای شفاف
۲۲۶	۲-۱۱-۶- پوشش‌های رسانای شفاف صفحات شبکه‌ای سیمی
۲۲۷	۳-۱۱-۶- پوشش‌های رسانای شفاف مونتاژ پنجره‌ها
۲۲۷	۴-۱۱-۶- پوشش‌های رسانا از نوع پلاستیکی
۲۲۸	۱۲-۶- شیلدهای داخلی
۲۳۰	۱۳-۶- رزونانس کاواک
۲۳۱	۱۴-۶- زمین‌سازی شیلد