

Weiterentwicklung europäischer Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungssysteme

Integrierte EMI-Filter



Die europäischen Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungsprogramme befinden sich derzeit in einer Phase verstärkter Investitionen und technologischer Transformation. Im Jahr 2024 meldeten die EU-Mitgliedstaaten Verteidigungsausgaben in Höhe von 343 Mrd. €, was einem Anstieg von 19% gegenüber dem Vorjahr entspricht.

Das von der NATO festgelegte Ziel, 5% des BIPs für Verteidigung aufzuwenden, dürfte weitere Investitionen in Forschung und Entwicklung, Cybersicherheit sowie Technologien und Plattformen der nächsten Generation fördern.

Parallel dazu spiegeln Initiativen wie das Programm „Low-Cost Effectors & Autonomous Platforms“ (LEAP) – getragen von Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Italien und Polen – das Bestreben wider, die Entwicklung kosteneffizienter, eigenständiger Alternativen in Europa zu stärken.



Autorin:
Alicia Truax
Product Manager RF und
Microwave Products
Molex
www.molex.com

Dichte haben einen Wendepunkt erreicht, an dem Abschirmung allein nicht mehr genügt. Indem Signalintegrität und physische Robustheit als Einheit betrachten, können Entwickler Strategien zur EMI-Unterdrückung direkt in den Entwicklungsprozess integrieren.

Steckverbinder mit integriertem EMI-Filter

Anstatt das gesamte System in eine leitfähige Hülle zu packen, basieren diese Steckverbinder auf einer speziellen Tiefpassfiltertechnik, die direkt in den Kontakt selbst integriert ist. Diese integrierten Filterelemente (Koaxialkomponenten) unterbrechen und leiten unerwünschte HF-Signale direkt an der Verbindungsstelle um. Störsignale können so nicht in abgeschirmte Gehäuse eindringen oder aus diesen entweichen und die Systeme beeinträchtigen.

Herausforderungen

Auf technischer Ebene bringt die Umsetzung dieser neuen, fortschrittlichen Lösungen eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Moderne Plattformen müssen die Leistungsfähigkeit früherer Generationen übertreffen und dabei immer strengere SWaP-C-Vorgaben (Größe, Gewicht, Energieverbrauch und Kosten) erfüllen. Zudem müssen sie Hochgeschwindigkeitsverbindungen und -datenübertragung, fortschrittliche Sensorik, integrierte KI, autonomen Betrieb sowie Widerstandsfähigkeit im Bereich elektronischer Kriegsführung unterstützen. Diese Systeme sind auch komplexen Umgebungen mit elektromagnetischen Störungen (EMI) ausgesetzt.

Ein intelligentes Design auf Leiterplattebene, umfassende Abschirmung und gezielte Filterung verbleibender Störsignale reichten bislang aus. Doch die elektrische und physische

Das zugrundeliegende Prinzip besteht darin, bestimmte Frequenzen mithilfe von Tiefpassfiltern als „Torwächter“ gezielt auszusortieren. Gewünschte NF-Signale und Gleichstrom (DC) können ungehindert passieren, während HF-Rauschen über einen niederohmigen Pfad gegen Masse abgeleitet und als vernachlässigbare Wärmemenge abgeführt wird. Um dies zu steuern, legen Entwickler eine Grenzfrequenz fest, ab der der Filter beginnt, das Signal zu dämpfen.

Zwei Filterkonfigurationen decken die meisten Anwendungsszenarien ab:

C- und Pi-Filter

C-Filter sind eine gängige Wahl für allgemeine Anforderungen. Diese kostengünstigen, einstufigen Filter weisen eine Dämpfungsfankensteilheit von etwa 20 dB pro Dekade auf. Pi-Filter kommen häufig in anspruchsvolleren Umgebungen zum Einsatz.

Ihr dreistufiger Aufbau mit einem induktiven Element zwischen zwei kapazitiven Stufen kann je nach Anwendung und Betriebsbedingungen eine steilere Dämpfungskurve von etwa 60 dB pro Dekade bieten.

Auch die Impedanz spielt bei der Filterauswahl eine wichtige Rolle. Um die Störunterdrückung zu maximieren, ist eine gezielte Impedanz-Fehlanpassung zwischen Filter und System erforderlich. Kapazitive Elemente sollten an Leitungen mit hoher Impedanz angeschlossen werden, während induktive Elemente an Leitungen mit niedriger Impedanz angeschlossen werden sollten. Da C-Filter als auch Pi-Filter an ihren Ein- und Ausgängen kapazitiv sind, erzielen sie die besten Ergebnisse in Systemen mit hohen Quell- und Lastimpedanzen. Eine falsche Auslegung kann die Wirksamkeit selbst eines gut spezifizierten Filters beeinträchtigen.

Bei hohen Frequenzen ist die Wahl des Kondensators ebenso wichtig wie die Filtertopologie. Mehrschicht-Chipkondensatoren (MLCC) sind auf Leiterplattebene die Standardwahl; oberhalb von ~100 MHz verschlechtert sich jedoch ihre Funktion, da ihre eigene parasitäre Induktivität und Eigenresonanz die Filterleistung beeinträchtigen. Koax-Keramik-kondensatoren sind dagegen so aufgebaut, dass sie die äquivalente Serieninduktivität und den äquivalenten Serienwiderstand (ESL und ESR) minimieren und so die Filterleistung über die Frequenzbereiche hinweg aufrechterhalten, die für moderne HF-Systeme typisch sind.

Vertikal integrierte Kondensatorfertigung ermöglicht es, diese Eigenschaften in das Rastermaß eines Standardsteckverbinders zu integrieren. So entsteht ein direkter Ersatz für ungefilterte Steckverbinder, der keine Änderungen am mechanischen Design des Systems erfordert. Sind strenge SWaP-C-Einschränkungen einzuhalten, stellt ein robuster EMI-Schutz ohne Einbußen bei Größe oder Gewicht einen erheblichen Design-Vorteil dar.



Auswahl von EMI-Filterkomponenten

Die Komponentenauswahl unterliegt im Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungssektor anderen Maßstäben als im kommerziellen Bereich. Die Einhaltung von Normen ist eine Grundvoraussetzung und kein Unterscheidungsmerkmal: MIL-STD-202 und -810 regeln die Beständigkeit, während MIL-STD-461 und DO-160 die Widerstandsfähigkeit gegen Blitztransienten festlegen. Gemeinsam setzen sie hohe Maßstäbe für Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit in anspruchsvollsten Umgebungen. Der Auswahlprozess sollte sich an vier Schritten orientieren, die jeweils einen entscheidenden Auswahlpunkt darstellen.

Schritt 1: Elektrische und physikalische Anforderungen definieren

Elektrische Anforderungen, darunter Spannungs-/Strombelastbarkeit sowie Überspannungsfestigkeit, müssen parallel zu den physikalischen Gegebenheiten der Anwendung definiert werden. Ein Steckverbinder, der zwar die elektrischen Spezifikationen erfüllt, aber der thermischen

Belastung, Feuchtigkeitseinwirkung oder dem Korrosionsrisiko am Einsatzort nicht gewachsen ist, ist nicht ordnungsgemäß spezifiziert. Beide Aspekte müssen von Anfang an gemeinsam berücksichtigt werden.

Schritt 2: Analyse der Leistungsdaten aus dem Datenblatt

Entscheidend für eine fundierte Analyse ist die Untersuchung der gesamten Dämpfungskurve und nicht nur des angegebenen Einfügungsverlustwerts. Die Leistung bei einer Frequenz sagt wenig über die Leistung bei einer anderen aus, und EMI beschränkt sich selten auf ein einziges Frequenzband. Die Spannungs-/Strombelastbarkeit muss zudem mit der Filterleistung abgeglichen werden. Dies trägt zu einem genauen Bild bei, wie sich die Komponente unter realen Bedingungen verhalten wird.

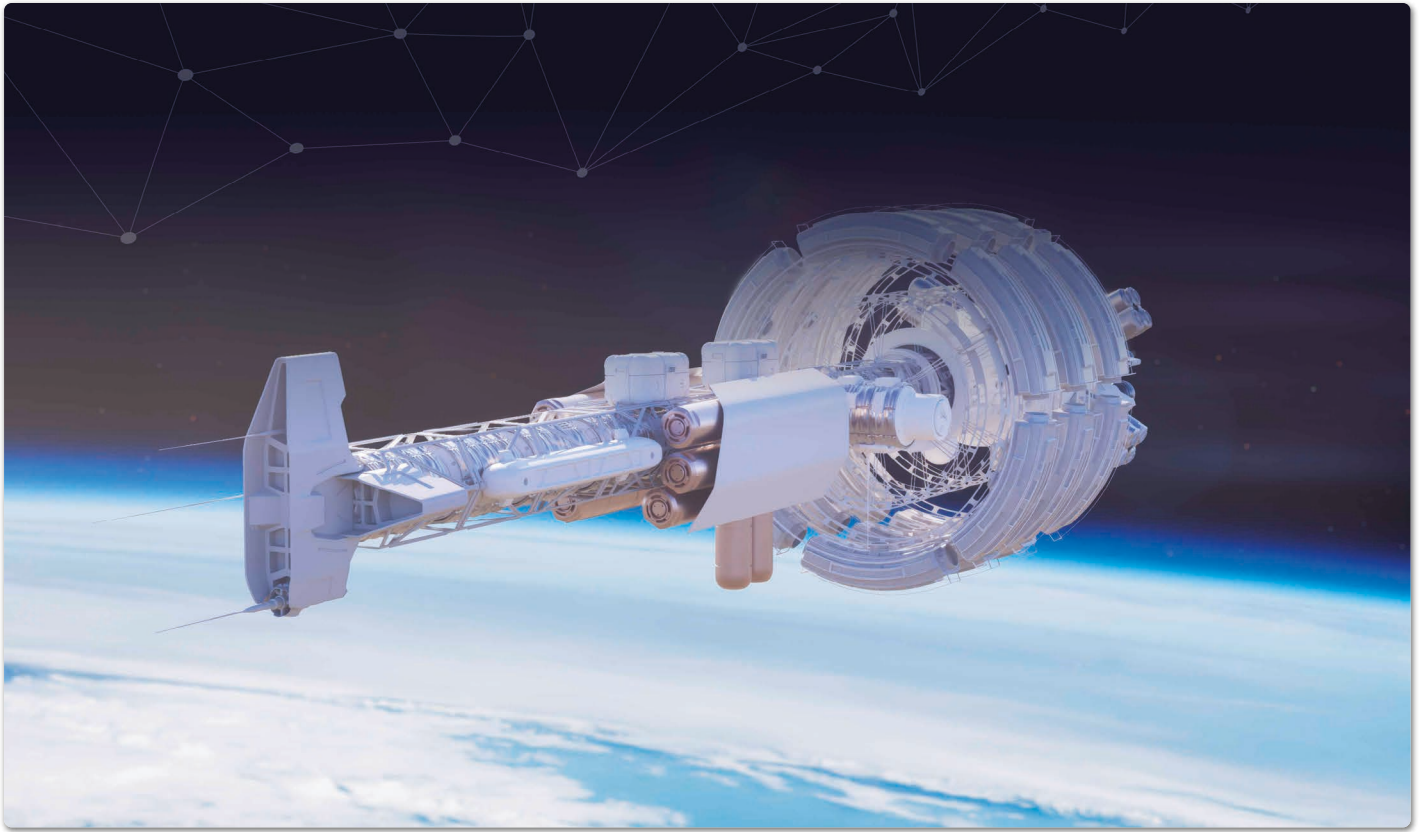
Schritt 3: Anforderungen an den Einsatzort und die Haltbarkeit bewerten

Der Einsatzort bestimmt die Anforderungen an die Haltbarkeit. Ein in einem geschützten

Gehäuse installierter Steckverbinder ist einem anderen Gefahrenprofil ausgesetzt als einer, der an der Außenfläche eines Flugzeugs oder Bodenfahrzeugs angebracht ist. Faktoren wie Stöße, Vibrationen, Temperaturwechsel und Korrosion nehmen an der Grenze zwischen System und Umgebung deutlich zu.

Schritt 4: Passenden Formfaktor auswählen

Der erforderliche Formfaktor hängt von der Einsatzumgebung, dem verfügbaren Platz und dem benötigten Schutzgrad ab. Kompakte Filterplatten eignen sich für die Filterung mit hoher Dichte in unproblematischen Innenräumen, während D-Sub-Steckverbinder verschiedene anspruchsvolle Anwendungen abdecken. In Extremfällen, in denen Stöße, Vibrationen und Korrosionsgefahr die Regel und nicht die Ausnahme sind, bieten hochwertige Rundsteckverbinder mit ihren abgedichteten Schnittstellen und robusten mechanischen Gehäusen den höchsten Schutzgrad.



Bewährte Verfahren für das System-Design

Die Spezifikation eines Steckverbinders allein reicht nicht aus. Erst die Installation entscheidet über die tatsächliche Leistungsfähigkeit. Selbst die fortschrittlichsten Filter können versagen, wenn sie nicht ordnungsgemäß integriert sind. Die beim Einbau getroffenen mechanischen Entscheidungen sind ebenso wichtig wie die elektrischen.

Gefilterte Steckverbinder an der I/O-Grenze platzieren

In vielen Designs ist der bevorzugte Einbauort für einen gefilterten Steckverbinder direkt an der abgeschirmten Gehäusewand an der Eingangs-/Ausgangsgrenze (I/O). Filter auf Leiterplattebene führen dazu, dass das Kabel von der I/O-Wand zur Leiterplatte im Inneren des Gehäuses verläuft, wo es Störsignale abstrahlen kann, bevor das Signal den Filter erreicht. Die Montage des Steckverbinders an der Gehäusegrenze kann dieses

Risiko verringern und die Schirmung insgesamt verbessern.

Niederohmigen Erdungspfad bereitstellen

Der Filter leitet hochfrequente Energie gegen Masse ab. Diese Funktion hängt vollständig von einer direkten, niederohmigen Verbindung zwischen dem Steckverbinder und dem Gehäuse ab. Genau hier scheitern ansonsten gut spezifizierte Installationen. Lackierte oder eloxierte Montageflächen sind nicht leitfähig und bilden einen hochohmigen Pfad, der die Filterfunktion beeinträchtigt. Auch nichtleitende Dichtungen verursachen dasselbe Problem.

Um diese Fehler zu vermeiden, sind bewusste Entscheidungen bereits in der Konstruktions- und Montagephase erforderlich. Leitfähige Oberflächenbeschichtungen oder eine kontrollierte Oberflächenvorbereitung sollten in Betracht gezogen werden, bei denen die Montagebereiche vor dem Lackieren abgedeckt werden. Leitfähige Elastomer-Dichtungen gewährleisten die

Kontinuität der Abschirmung, während spezielle Befestigungselemente auch bei Vibrationen den Metall-auf-Metall-Kontakt sicherstellen.

Vollständig abgedichtetes System garantieren

Ein gefilterter Steckverbinder kann eine unvollständige Abschirmung nicht kompensieren. EMI folgt stets dem Weg des geringsten Widerstands. Jede Lücke – sei es eine undichte Kabeldurchführung oder eine Öffnung im Gehäuse – bietet die Möglichkeit, Filter vollständig zu umgehen.

Frühzeitig integrieren

Moderne Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungssysteme dürfen EMI nicht mehr als isoliertes Problem behandeln. Elektromagnetische Leistung hängt eng mit den mechanischen und thermischen Entscheidungen zusammen, die auch die gesamte Systemarchitektur bestimmen. Wird EMI erst spät im Projekt durch Korrekturmaßnahmen

adressiert, steigen Zeitdruck und Risiko von Neukonstruktionen.

Wirksame EMI-Strategien müssen daher früh integriert werden – idealerweise von Beginn an. Werden Filter- und Abschirmungsanforderungen bereits zu Beginn des Entwicklungszyklus berücksichtigt, können Teams fundiertere Entscheidungen treffen: vom System-Layout über die Komponentenplatzierung bis zur Verbindungsstrategie.

Die frühe Einbindung eines erfahrenen Bauteillieferanten kann zusätzliches technisches Know-how und geeignete Produktoptionen bereitstellen – von speziellen Steckverbindern bis zu vertikal integrierten Lösungen.

Da Systeme zunehmend kleinere Formfaktoren, neue Architekturen und höhere Betriebsfrequenzen erfordern, werden späte EMI-Korrekturen immer schwieriger. Eine frühzeitige EMI-Strategie hilft Teams, Risiken zu verringern und Entwicklungsergebnisse verlässlicher zu machen. ◀