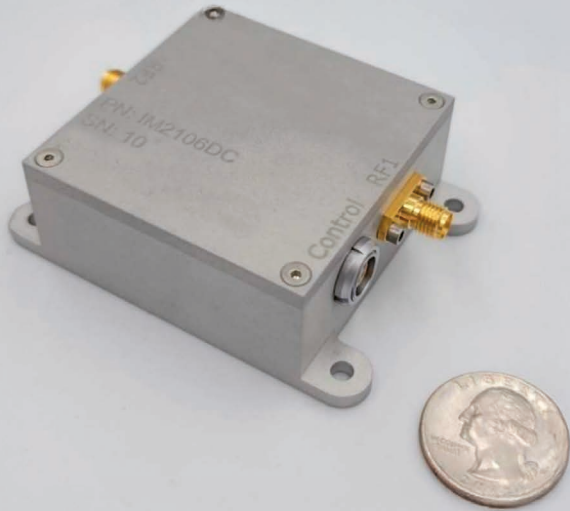


Abstimmbare HF-Filter: Vorteile, Nachteile und Anwendungen



Typisches abstimmbares Notch-HF-Filter

Abstimmbare Hochfrequenzfilter sind wesentliche Komponenten in modernen Kommunikations- und elektronischen Kriegsführungssystemen, in Radarsystemen und Signalverarbeitungsanwendungen. Diese Filter ermöglichen eine effiziente Frequenzverwaltung und Interferenzminderung. Dieser Artikel untersucht die Vor- und Nachteile abstimmbarer HF-Filter, ihre Hauptmärkte und wichtigsten Endanwendungen sowie die technologischen Fortschritte, die ihre Entwicklung vorantreiben.

Traditionell werden Filter mit fester Frequenz verwendet, um diese Funktion zu erfüllen, aber da drahtlose Systeme immer komplexer geworden sind, ist der Bedarf an anpassungsfähigen Filtern im Gegensatz zu Filtern mit fester Frequenz gewachsen, denn abstimmbare HF-Filter bieten Flexibilität, um die Leistung in unterschiedlichen Betriebsumgebungen zu optimieren. Diese Anpassungsfähigkeit ist besonders vorteilhaft in zunehmend überlasteten und umkämpften Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Abstimmbare HF-Filter können in folgenden Bereichen Anwendung finden:

- Störungsunterdrückung
- Kommunikationsempfänger
- elektronische Unterstützungsmaßnahmen (ESM)
- Empfängerschutz
- TR-Module
- elektronische Kriegsführung
- LTE Co-Channel-Interferenz
- 5G SatCom C-Band-Interferenz
- 5G Aircraft Radio Alimeter Interferenz

Diese Anwendungen erstrecken sich über zahlreiche Branchen, von der kommerziellen Telekommunikation bis hin zu militärischen und luftfahrttechnischen Systemen. Sie ermöglichen eine dynamische Frequenzzuweisung, verbessern die Störungsunter-

drückung und reduzieren den Hardware-Platzbedarf, indem mehrere Filter mit fester Frequenz durch eine einzige rekonfigurierbare Komponente ersetzt werden. Diese Vorteile gehen jedoch mit Kompromissen einher, darunter Komplexität, Kosten und potenzielle Leistungsbeschränkungen.

Vorteile abstimmbarer HF-Filter

Frequenzagilität und Anpassungsfähigkeit

Einer der wichtigsten Vorteile abstimmbarer HF-Filter ist ihre Fähigkeit, ihren Frequenzbereich dynamisch anzupassen. Die Bilder 1 bis 3 zeigen typische Einfügedämpfung, Rückflussdämpfung und Phasenleistung eines Notch-Filters (Kerbfilters) über einen Abstimmbereich von 625 bis 950 MHz.

Die Flexibilität, die Mittenfrequenz eines Filters dynamisch anzupassen, bietet folgende Möglichkeiten:

• Echtzeit-Spektrumoptimierung

Durch abstimmbare Filter können sich Systeme an veränderte elektromagnetische Umgebungen anpassen, indem sie in Echtzeit die geeigneten Frequenzbänder auswählen.

• Multiband-Betrieb

Im Gegensatz zu festen Filtern, die für bestimmte Frequenzen ausgelegt sind, ermöglichen abstimmbare HF-Filter den Betrieb eines einzelnen Geräts über mehrere Bänder hinweg. Typische abstimmbare Filter arbeiten im Bereich von 100 MHz bis etwa 10 GHz.

• Co-located Devices

In Umgebungen mit zahlreichen drahtlosen Geräten helfen abstimmbare Filter bei der Verwaltung der Frequenzzuweisungen und reduzieren Interferenzen.

Spektrumseffizienz und Interferenzminderung

Die Spektrumskonzentration ist sowohl in kommerziellen als auch in Verteidigungsanwendungen eine zunehmende Herausforderung. Abstimmbare HF-Filter tragen durch folgende Maßnahmen zur Optimierung der Frequenznutzung bei:

• Adaptive Filtering

Durch selektive Dämpfung unerwünschter Signale verbessern abstimmbare Filter die Signalintegrität und reduzieren die Auswirkungen von Nachbarkanalstörungen.

Quelle:
„Tunable RF Filters:
Advantages, Disadvantages,
and Market Applications“
Mtron
www.mtron.com

Autor/Technischer Kontakt:
Bill Drafts
bdrafts@mtron.com
Eric Hoppenjans
eric@indianamicro.com

übersetzt von FS

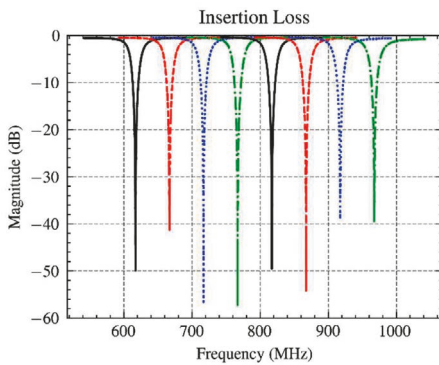


Bild 1: Typischer Einfügungsverlust von weniger als 1 dB für einen Notch-Abstimmbereich von 625 bis 950 MHz

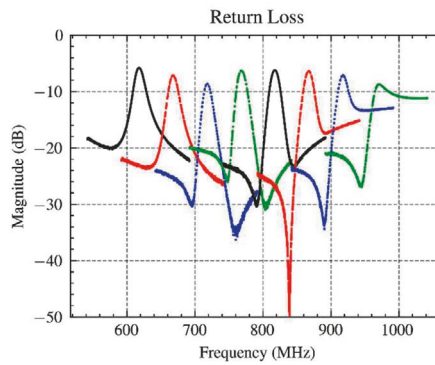


Bild 2: Typische Rückflussdämpfung für einen Notch-Abstimmbereich von 625 bis 950 MHz

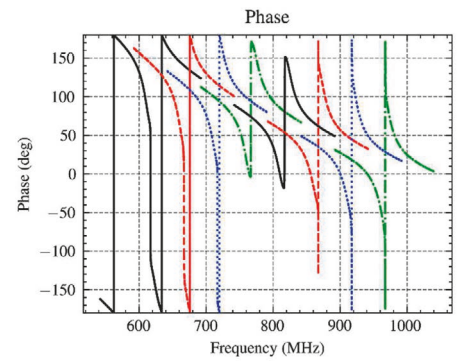


Bild 3: Typische Phasenantwort für einen Notch-Abstimmbereich von 625 bis 950 MHz

• Störfestigkeit

In militärischen und elektronischen Kriegsführungsanwendungen ermöglichen abstimmbare Filter ein agiles Frequenzspringen, wodurch die Widerstandsfähigkeit gegen Störungen und elektronische Angriffe verbessert wird.

• kognitive Funkanwendungen

Kognitive Funksysteme profitieren von abstimmbaren Filtern, um dynamisch auf ungenutzte Frequenzbänder zuzugreifen, ohne Störungen zu verursachen.

Optimierung von Größe, Gewicht und Leistung (SWaP)

• Reduzierung der Komponentenzahl

Ein einziger abstimmbarer Filter kann mehrere Festfrequenzfilter ersetzen und vereinfacht so das System-Design.

• geringer Stromverbrauch

Optimierte Abstimmmechanismen können den Strombedarf minimieren, was bei batteriebetriebenen oder platzbeschränkten Anwendungen von entscheidender Bedeutung ist.

• kompaktes Design

Fortschritte bei abstimmbaren Filtermaterialien und -technologien, darunter MEMS (mikroelektromechanische Systeme) und Si-, GaAs- oder BST-Varactor-basierte Lösungen, haben zu miniaturisierten Designs geführt, die für moderne Kommunikationssysteme geeignet sind.

Kosteneffizienz

• geringere Hardware-Anforderungen

Anstatt mehrere Filter mit fester Frequenz zu entwickeln und herzustellen, können Hersteller ein einziges abstimmbares Filter verwenden, wodurch die Gesamtkosten des Systems gesenkt werden.

• langfristige Betriebskosteneinsparungen

Die Möglichkeit, Frequenzen ohne Hardware-Änderungen neu zu konfigurieren, reduziert den Bedarf an häufigen Austausch oder Upgrades.

• Vorteile für die Lieferkette

Da weniger einzigartige Komponenten benötigt werden, werden Beschaffung und Logistik optimiert.

Nachteile abstimmbarer HF-Filter

Komplexität und Herausforderungen beim Design

• etwas komplizierte Abstimm-schaltungen

Die elektronische Abstimmung mit Varaktoren, MEMS oder ferroelektrischen Materialien erfordert hochentwickelte Steuerungsschaltungen. Bild 4 zeigt das typische Blockdiagramm für ein abstimmbares Filter.

• Nichtlinearitäten in der Abstimmungsreaktion

Einige Abstimmungselemente weisen ein nichtlineares Verhalten auf, was die Leistungsstabilität beeinträchtigt.

• Temperaturempfindlichkeit

Die Abstimmgenauigkeit kann durch Umgebungsbedingungen beeinträchtigt werden, was zusätzliche Kompensations-schaltungen erforderlich macht.

Linearität und Kompromisse bei der Leistung

• Einfügungsverlust

Abstimmbare Filter verursachen in der Regel einen höheren Einfügungsverlust als feste Filter, was sich auf die Gesamteffizienz des Systems auswirkt.

• Filterselektivität

Diese Filter sind zwar abstimmbar, können jedoch breitere Durchlassbereiche als

feste Filter haben, was sich auf die Leistung der Nachbarkanalunterdrückung auswirkt.

• Verzerrung und Oberwellen

Bei einigen Designs kann die Abstimmbarkeit zu unerwünschten Nichtlinearitäten führen, die eine zusätzliche Signalaufbereitung erfordern.

Reaktionszeit und Abstimmungsgeschwindigkeit

• Latenz bei der Abstimmung

Elektronische und mechanische Abstimmmechanismen ermöglichen nicht immer eine sofortige Frequenzänderung, was Anwendungen mit extrem schnellen Umschaltvorgängen einschränkt. Es wurden jedoch Abstimmzeiten im Submikrosekundenbereich ($<1 \mu s$) nachgewiesen.

• Stabilisierungszeit

Einige Technologien erfordern nach der Abstimmung kurze Stabilisierungszeiten, was sich auf die Echtzeit-Anpassungsfähigkeit auswirken kann.

Einschränkungen bei Herstellung und Zuverlässigkeit

• höhere Anschaffungskosten

Aufgrund der Komplexität abstimmbarer Filterkonstruktionen sind die Herstellungskosten höher als bei herkömmlichen festen Filtern.

• Zuverlässigkeit beweglicher Teile

Bei MEMS-basierten oder mechanisch abgestimmten Filtern kann die Langlebigkeit aufgrund von Verschleiß im Laufe der Zeit ein Problem darstellen.

• Kalibrierung und Wartung

Eine regelmäßige Neukalibrierung kann erforderlich sein, um eine optimale Leistung aufrechtzuerhalten, insbesondere bei Präzisionsanwendungen.

Marktsegmente und Anwendungen

Telekommunikation und 5G-Netze

- **Dynamische Frequenzzuweisung**

Mit der Ausweitung der 5G-Netze tragen abstimmbare Filter dazu bei, die Frequenznutzung auf der Grundlage der Netzauslastung zu optimieren.

- **Adaptive Basisstationen**

Basisstationen, die mit abstimbaren HF-Filtern ausgestattet sind, können die Frequenzbänder anpassen, um sich ändernden Nutzeranforderungen gerecht zu werden.

- **Interferenzminderung in dichten Umgebungen**

Städtische und dicht besiedelte Gebiete profitieren von abstimbaren Filtern, die Interferenzen dynamisch unterdrücken.

Luft- und Raumfahrt sowie Verteidigung

- **Elektronische Kriegsführung (EW)**

Abstimbare Filter ermöglichen Frequenzagilität und verbessern Gegenmaßnahmen.

- **Militärische Radarsysteme**

Adaptive Filterung ermöglicht den effizienten Betrieb von Radarsystemen in gestörten elektromagnetischen Umgebungen.

- **Sichere Kommunikation**

Abstimbare Filter verbessern die Verschlüsselungs- und Entstörungsfähigkeiten für sichere militärische Netzwerke.

Satellitenkommunikation

- **Frequenzagilität im Weltraum**

Satelliten profitieren von abstimbaren Filtern, um die Signalweiterleitung dynamisch zu verwalten und Störungen zu vermeiden.

- **Multimissionssatelliten**

Ein einzelner Satellit kann mehrere Kommunikationsstandards unter Verwendung abstimbarer HF-Filter unterstützen.

Test- und Messgeräte

- **Flexible HF-Tests**

Hersteller von Testgeräten integrieren abstimbare Filter für vielseitige Multi-band-Testlösungen.

- **Spektrumanalysatoren und Signalgeneratoren**

Diese Geräte sind auf abstimbare Filter angewiesen, um eine präzise Frequenzsteuerung in Labor- und Feldumgebungen zu gewährleisten.

IoT und drahtlose Sensornetzwerke

- **Adaptives Frequenz-Management**

Abstimbare HF-Filter tragen dazu bei, dass IoT-Geräte in Umgebungen mit gemeinsam genutzten Frequenzen effizient arbeiten.

- **Geringerer Stromverbrauch**

Eine effiziente Frequenzwahl minimiert unnötige Signalverarbeitung und verlängert so die Batterielebensdauer.

Softwaredefinierte Funkgeräte

- **Rekonfigurierbare Frequenzantwort**

Abstimbare Filter in softwaredefinierten Funkgeräten (SDRs) spielen eine entscheidende Rolle bei der selektiven Frequenzfilterung. Sie ermöglichen es dem SDR, sich verschiedene Frequenzen und Funkfunktionen anzupassen, was in der flexiblen Umgebung des SDR unerlässlich ist.

- **Verbesserte Systemleistung in Ultrabreitband-RFSoc-Anwendungen**

Neue Ultrabreitband-Radiofrequenz-System-on-Chip-Produkte (RFSoc) bieten mehrere ADC- und DAC-Kanäle für SDR-Anwendungen, wobei einige RFSoc-Produkte Abstraten von bis zu 64 GSPS bieten. Die große momentane Bandbreite dieser RFSoc-Geräte macht sie besonders anfällig für Störungen. Abstimbare und rekonfigurierbare Filter spielen eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung der Signalintegrität und des Dynamikbereichs von RFSoc-Geräten.

Neue Trends und zukünftige Entwicklungen

- **KI-gesteuerte Spektrumoptimierung**

Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz werden integriert, um die Filterleistung in Echtzeit zu optimieren.

- **Fortschrittliche Gehäuse**

Die Forschung arbeitet weiterhin daran, die Größe der Filter zu reduzieren, was zu integrierten Modulen von Chip-Scale-Filtern für Ku-Band-Frequenzen und darüber führt.

- **Ultrabreitbandige abstimbare Filter**

Die Forschung konzentriert sich auf die Erweiterung des Abstimmbarkeitsbereichs, um drahtlose Systeme der nächsten Generation zu unterstützen.

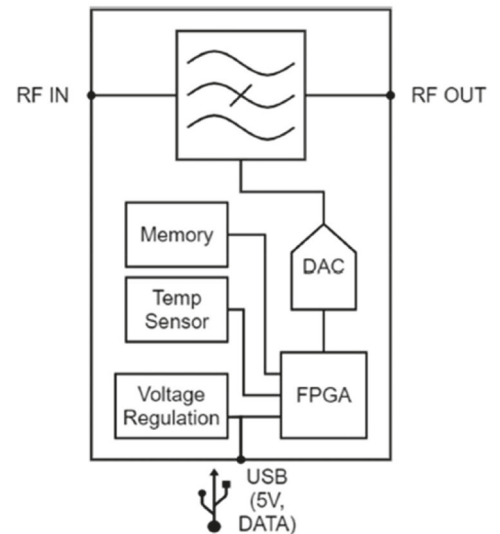


Bild 4: Typisches Blockdiagramm eines abstimbaren Notch-Filters

- **Fortschrittliche Materialien für verbesserte Leistung**

Innovationen bei abstimbaren Dielektrika, magnetostatischen Wellenresonatoren, ferromagnetischen Materialien (YIG) und MEMS-Technologie verbessern die Effizienz, Rekonfigurierbarkeit und Haltbarkeit von Filtern. Die Materialentwicklung und neuartige Fertigungstechniken erweitern die Leistung abstimbarer Filter über den Mikrowellenfrequenzbereich hinaus auf mmWellen-Anwendungen.

- **Fortschrittliche Filterarchitekturen**

Die Forschung an einzigartigen Filterdesignmethoden und -architekturen ermöglicht mehrere simultane abstimbare Filterantworten, bietet intrinsische Filterschaltung, reduziert die Filterfläche, bietet mehrere Konfigurationsstufen und ermöglicht Echtzeitschaltung zwischen Bandpass- und Bandstopppantworten in einem einzigen Filter-Design.

Fazit

Abstimbare HF-Filter bieten erhebliche Vorteile in Bezug auf Frequenzagilität, Spektrumeffizienz und SWaP-Optimierung. Ihre Einführung ist jedoch mit Herausforderungen hinsichtlich Komplexität, Kompromissen bei der Leistung und Kosten verbunden.

Mit der Weiterentwicklung der Technologie werden kontinuierliche Innovationen bei Materialien und Abstimmungsmechanismen die Fähigkeiten und Anwendungsmöglichkeiten von abstimbaren HF-Filtern in kritischen Branchen weiter verbessern. ◀