

数字可调谐滤波器 如何支持宽带接收器应用

Brad Hall, 系统应用工程经理;
David Mailloux, 产品应用工程师

摘要

如今的多通道宽带多倍频程调谐RF接收器, 通常需要消除不必要的阻塞信号, 从而保持相关信号的保真度。滤波器在减少这些不必要的信号上起到了重要作用, 特别是在这些系统的接收器RF前端和本振(LO)部分。本文将探讨RF信号链中的滤波器, 讨论阻塞信号的概念, 回顾传统的滤波技术, 然后介绍用于优化信号链性能的新产品解决方案。

引言

为了不断减小尺寸、重量、功率和成本, 同时提高或保持性能, RF系统设计人员有必要评估信号链中的每个组件, 并寻找创新机会。由于通常滤波器会占用大量的电路板空间, 因此这是考虑减小尺寸时寻求突破的重点领域。

同时, 接收器的架构也在不断发展, 模数转换器(ADC)能够以更高的输入频率采样。随着ADC输入频率的提高, 信号链中对滤波器的限制也发生了变化。一般来说, 这种趋势意味着对滤波器的抑制要求有所放宽, 这为进一步优化尺寸和调谐性能提供了机会。

在开始探索之前, 首先将概述射频信号链和各项定义, 以便说明需要使用滤波器的位置及其原因。此外, 回顾传统技术也有助于洞察现状。然后, 通过比较这些传统技术和最新的产品解决方案, 可以清楚地看到系统设计人员如何轻松实现他们的目标。

RF信号链概述

图1显示了覆盖2 GHz至18 GHz的典型宽带信号链。该信号链的基本工作原理如下。天线接收的频率范围很广。将频率转换为ADC能够进行数字化处理的中频信号之前, 需要进行一系列放大、滤波和衰减控制(射频前端)。此框图中的滤波功能可分为四大类:

- ▶ 预选器亚倍频程滤波
- ▶ 镜像/中频信号抑制
- ▶ LO谐波
- ▶ 抗混叠

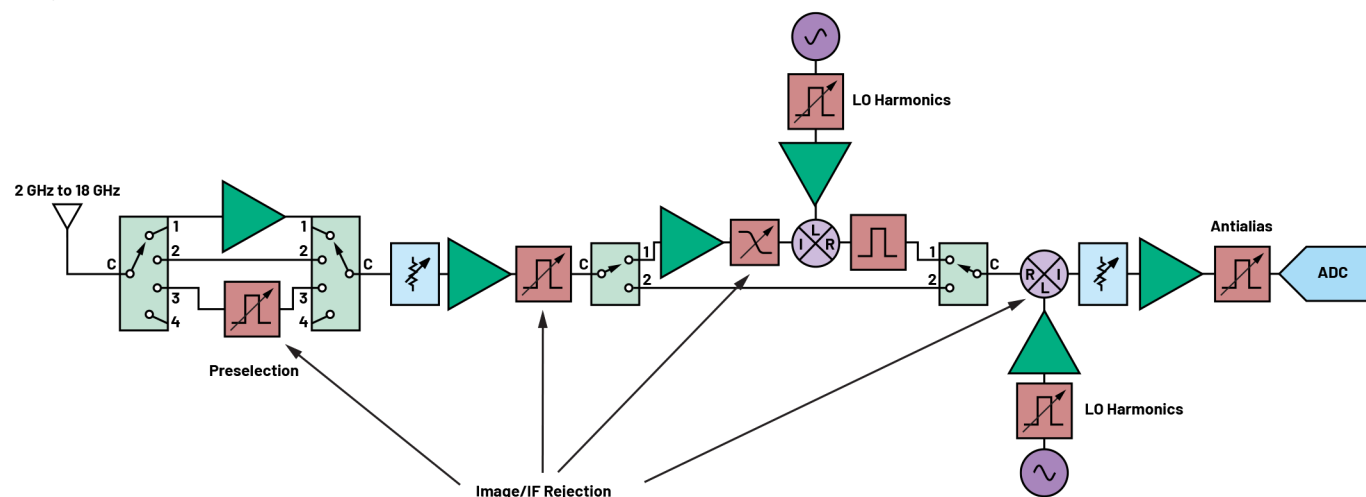


图 1. 2 GHz 至 18 GHz 接收器框图。

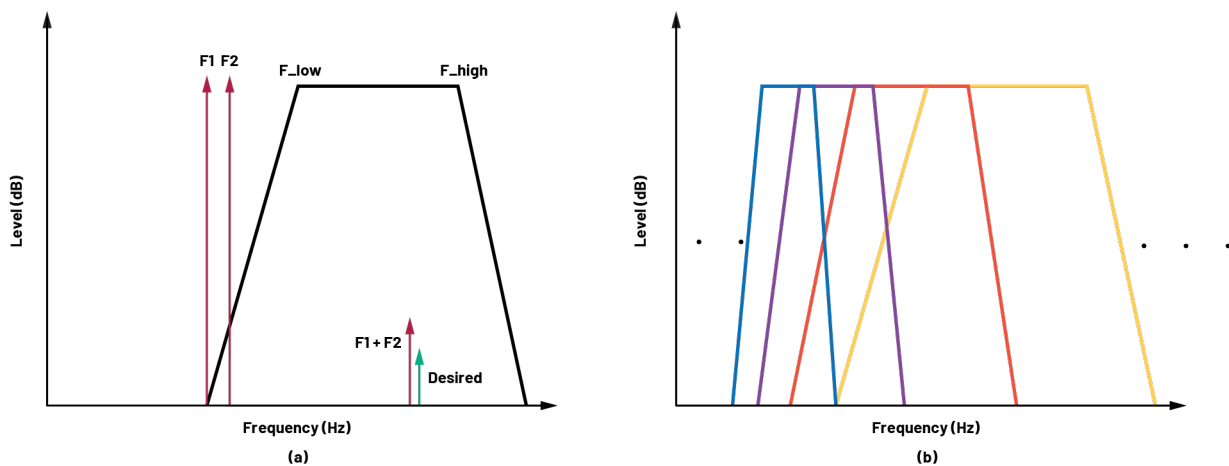


图 2. (a) 亚倍频程预选可减轻 IMD2 问题；(b) 滤波器频带随着频率的增加而变宽。

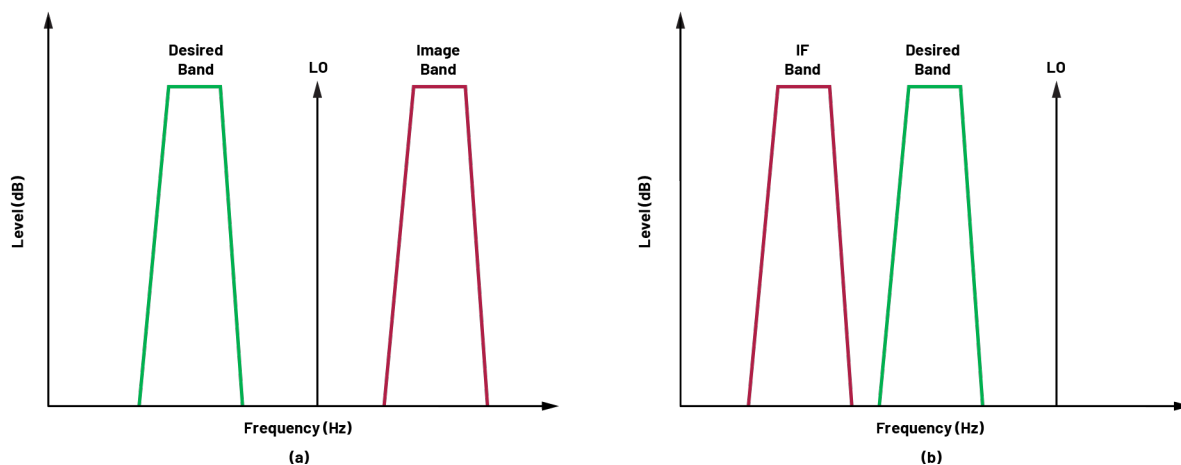


图 3. (a) 必须在混频器之前抑制的镜像频段和 (b) 中频频段。

预选器亚倍频程滤波需要靠近信号链的起点，用于解决二阶交调失真(IMD2)杂散问题，这类问题在有干扰信号（也称为阻断信号）的情况下会出现。当两个带外(OOB)杂散相加或相减并形成一个带内杂散时，就会发生这种情况，这可能会掩盖目标信号。亚倍频程滤波器可以在这些干扰信号到达信号链的非线性元件（如放大器或混频器）之前将其去除。通常，亚倍频程滤波器的绝对带宽要求会随着中心频率的降低而变得更窄。例如，2 GHz至18 GHz信号链的第一频带可能仅覆盖2 GHz至3 GHz，并且需要在1.5 GHz的低压侧($F_{high}/2$)和4 GHz的高压侧($F_{low} \times 2$)具有良好的抑制，而信号链的最高频带可能覆盖12 GHz至18 GHz，在9 GHz的低压侧和24 GHz的高压侧具有良好的抑制。这些差异意味着需要更多的滤波器来覆盖低频段，而不是高频段。预选器滤波的频谱示例如图2所示。

镜像/中频抑制滤波通常是在信号链的下游，在LNA和混频器之间。它用于抑制镜像频率和不需要的中频频率。镜像是一个频段，当它出现在混频器输入端时，将生成与混频器输出端目标信号振幅相同的信号。镜像抑制可以通过信号链中的几个组件来实现，如预选滤波器、专用镜像抑制滤波器和来自于单边带(SSB)混频器的镜像抑制能力。中频信号抑制需要在混频器之前降低中频频率的频谱，避免它们直接泄漏到混频器上并显示为不需要的杂散。图3显示了一个不需要的镜像和中频频段的频谱示例。

根据LO生成电路的不同，信号链中的这一点对滤波的要求可能会有所不同。输入混频器LO端口的目标信号是干净的正弦波或方波。通常，LO电路会产生所需LO信号的次谐波和谐波。这些不需要的信号（见图4）需要在到达混频器之前进行抑制，避免产生不需要的 $M \times N$ 杂散产物。如果LO信号处于单一频率，那么一个固定带通滤波器就足够了，并且可以优化为仅通过目标信号。在宽带信号链中，通常要实现可调谐的LO信号，因此需要一组开关滤波器或一个可调谐滤波器。

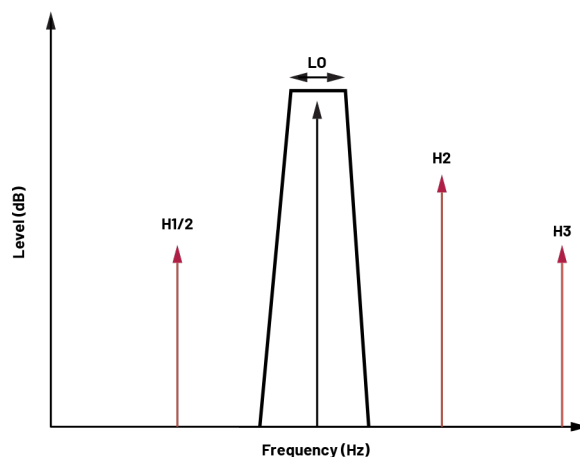


图 4. LO 谐波滤波。

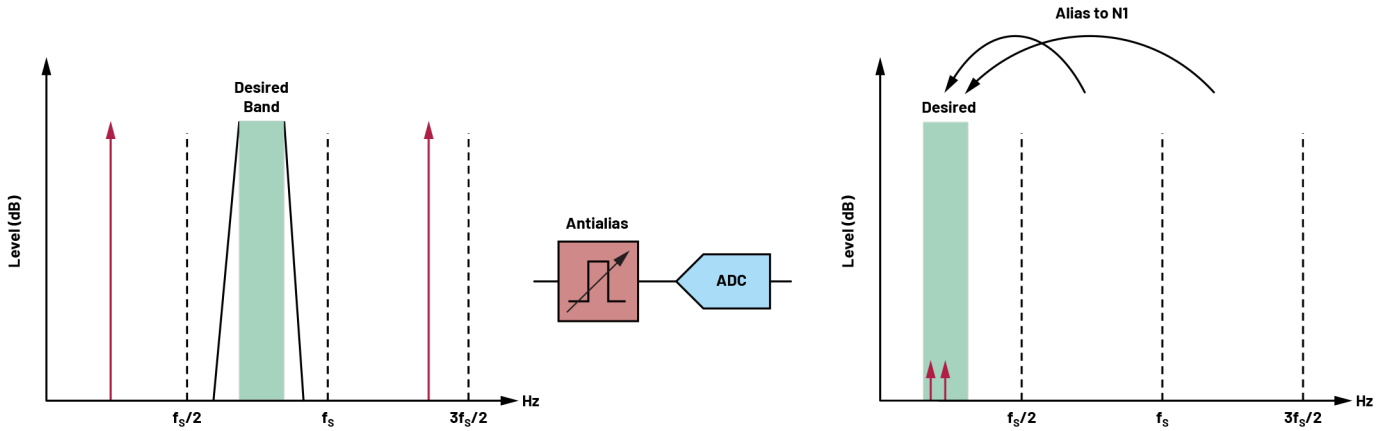


图 5. 如果没有足够的抑制，ADC 中的混叠会导致干扰信号出现在某个频段。

使用ADC采样时，系统设计人员需选择要进行数字化处理的奈奎斯特区。第一个奈奎斯特区的范围从DC到 $f_s/2$ （其中 f_s 是ADC的采样率）。第二个奈奎斯特区是从 $f_s/2$ 到 f_s ，以此类推。抗混叠滤波器用于抑制与目标奈奎斯特区相邻的奈奎斯特区中的干扰信号。信号链中这个位置的干扰信号可能来自不同的来源，比如混频器中产生的MxN杂散、与目标信号相邻的下变频信号，或是来自中频信号链中产生的谐波。在进行数字化处理时，输入ADC的任何干扰信号都将混叠到第一奈奎斯特区。不需要的混叠信号的频谱示例如图5所示。

阻塞信号

在射频通信系统中，阻塞信号是一种接收到的干扰输入信号，它会降低目标信号的增益和信纳比(SINAD)。阻塞信号可能会直接掩盖目标信号，也可能产生掩盖目标信号的杂散产物。这些不需要的信号可能是无意或有意干扰的结果。前一种情况中，它来自相邻频谱中运行的另一个射频通信系统。后一种情况中，它来自恶意电子战系统，目的是故意干扰射频通信或雷达系统。图6显示了阻塞信号和目标信号的频谱示例。

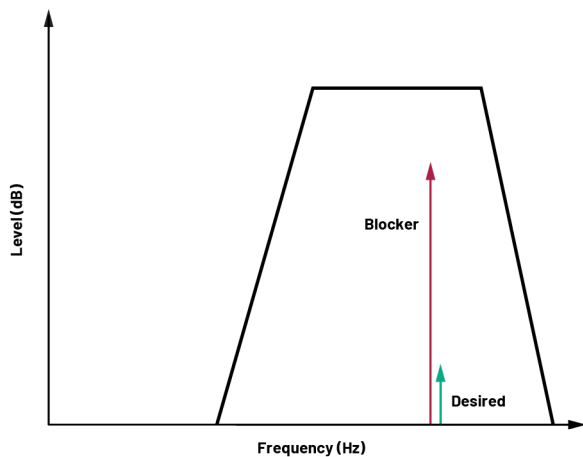


图 6. 目标信号和阻塞信号。

很多射频元件会表现出弱非线性无记忆行为。这意味着它们可以用低阶多项式来近似表示。例如，宽带频率放大器可由仅包括一阶项和三阶项的奇数阶多项式建模：

$$y(t) \approx a_1 x(t) + a_3 x^3(t) \quad (1)$$

当在工作频率范围内，放大器的输入端存在两个入射信号时，就像目标信号 ω_1 和阻塞信号 ω_2 的情况，输入信号可描述为：

$$x(t) = A \cos(\omega_1 t) + B \cos(\omega_2 t) \quad (2)$$

将输入等式代入奇数阶多项式可得到以下输出结果：

$$y(t) \approx \left(a_1 + \frac{3}{4} a_3 A^2 + \frac{3}{2} a_3 B^2 \right) A \cos(\omega_1 t) + \dots \quad (3)$$

当目标信号的振幅远小于阻塞器信号时， $A \ll B$ ，则等式3中的多项式进一步简化为：

$$y(t) \approx \left(a_1 + \frac{3}{2} a_3 B^2 \right) A \cos(\omega_1 t) + \dots \quad (4)$$

根据简化得到的等式4，现在目标信号振幅与阻塞信号振幅B密切相关。由于大多数目标射频分量是压缩的， α 系数必须是相反的符号¹，使得 $\alpha_1 \alpha_3 < 0$ 。上述两种说法的结果是必然的，因为对于较大的阻塞信号振幅来说，目标信号的增益趋于零。

滤波器定义

为了解决RF通信系统中干扰信号的问题，工程师们依靠滤波器来减少这些信号并保留目标信号。简单地说，滤波器是一种允许在通带内传输频率和在阻带内抑制频率的组件。²

通常，滤波器的插入损耗(dB)可描述为低通、高通、带通或带阻（陷波）。这个术语指的是所绘制的容许通带频率响应与增加的频率之间的关系。滤波器可以根据其频率响应波形进一步分类，例如通带纹波、阻带纹波，以及它们相对于频率的滚降速度。为了便于说明，图7显示了四种主要的滤波器类型。

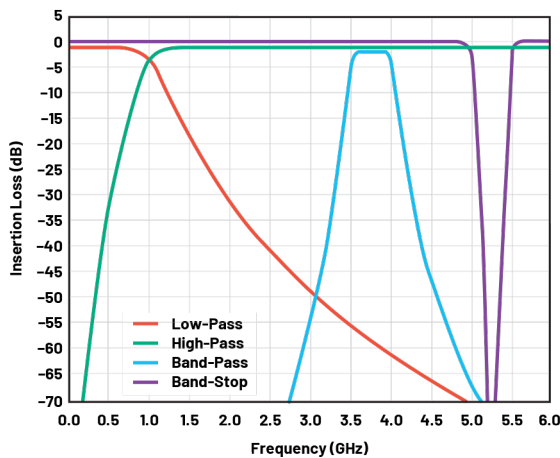
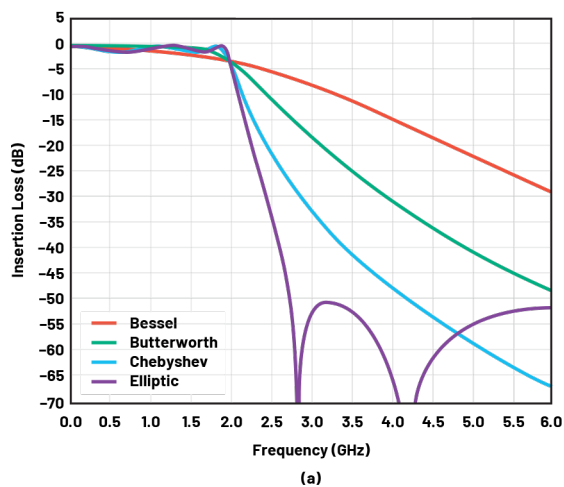


图 7. 按类型划分的滤波器波形。

除了插入损耗外，滤波器的另一个重要特性是群延迟。群延迟是指传输相位相对于频率的变化率。群延迟的单位是时间（秒），因此这个指标可视为特定信号通过滤波器的传输时间。单一频率的传输时间本身通常影响不大，但当宽带调制信号通过滤波器时，群延迟的平坦性就变得很重要，因为它可以在接收信号中引入不同的时间延迟，使信号失真。等式5给出了群延迟的方程，其中 θ 是相位， f 是频率：

$$\text{Group Delay (s)} = gd = -\frac{d\theta}{df} \times \frac{1}{360} \quad (5)$$

具有明显插入损耗和群延迟特性的典型滤波器类型有 Butterworth、Chebyshev、椭圆和Bessel。每个类型通常由一个阶数来定义，它描述了滤波器中有多少个无功元件。阶数越高，频率滚降就越快。



在考虑类似阶数的滤波器时，Butterworth滤波器可提供尽量平坦的通带响应，但会牺牲频率滚降，而Chebyshev滤波器则具有很好的频率滚降，但存在一些通带纹波。椭圆滤波器（有时称为Cauer-Chebyshev）比Chebyshev滤波器有更多的频率滚降，但也因此会在通带和阻带中产生纹波。Bessel滤波器的频率和群延迟响应最为平坦，但其频率滚降性能最差。为了便于说明，图8显示了一个五阶低通滤波器的理想插入损耗和群延迟，其3 dB频率($f_{3\text{ dB}}$)为2 GHz，允许的通带纹波为1 dB，阻带纹波为50 dB。

对于在整个频率范围内保持恒定相位很重要的系统，如雷达系统，相关频带的群延迟平坦度对于避免接收到的脉冲出现意外相位偏差来说至关重要。假设接收信号范围可以覆盖1 GHz或更多，则应尽量减少宽频带的群延迟平坦度。根据经验法则，应将群延迟平坦度保持在<1 ns，但这要取决于系统对相位偏差的容限。图9显示了群延迟平坦度分别为2.24 ns和0.8 ns的滤波器示例。观察这些波形可以发现，对于更平坦的群延迟来说，整个频率范围的相位变化更加一致。

最后，用于设计滤波器的无功元件的品质因数(Q因数)是影响性能的一个重要属性。品质因数定义为特定电路元件的无功阻抗与串联损耗电阻之比。它与技术工艺和用于实现的物理区域密切相关。品质系数越高，频率响应越快，插入损耗越小。

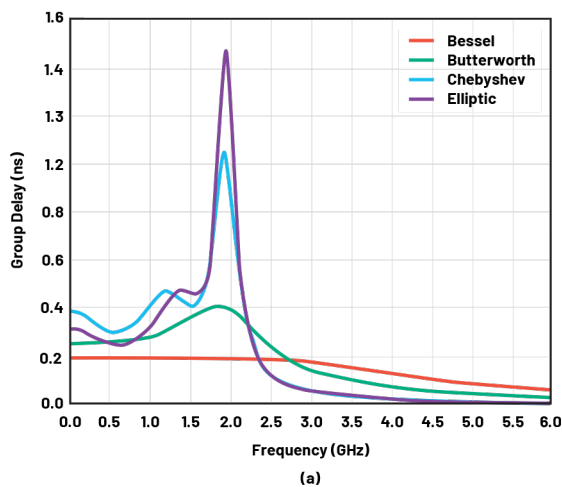


图 8. 五阶低通滤波器的插入损耗和群延迟。

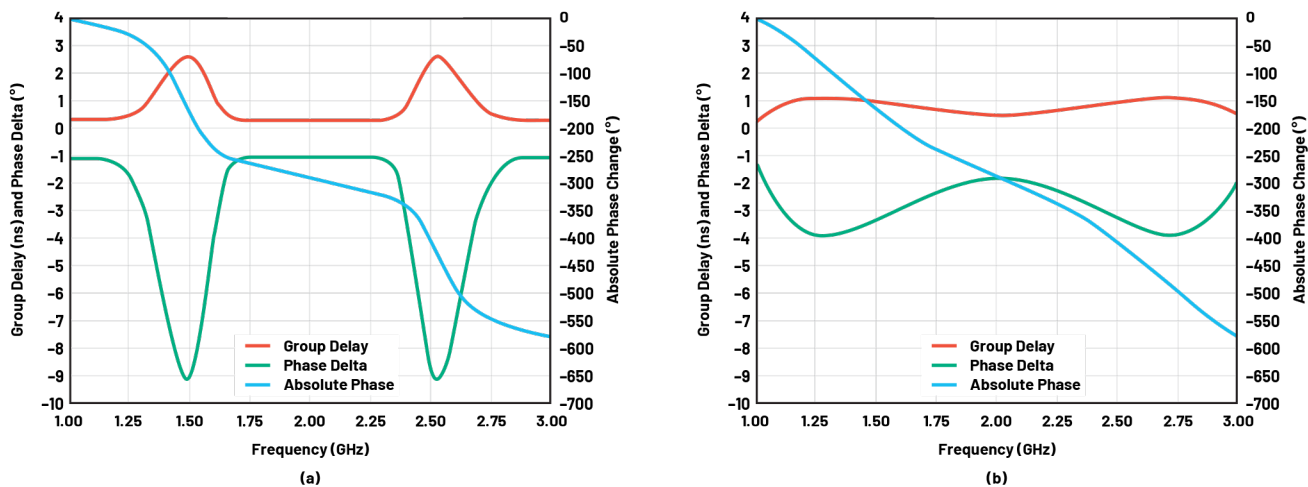


图9. 群延迟平坦度影响与线性相位的偏差: (a)显示2.24 ns的群延迟平坦度(b)显示0.8 ns的平坦度, 两者对比可看出, 相位变化与频率的关系更一致。

RF通信的传统滤波技术

为射频通信系统设计滤波器时, 有多种技术可用于实现经典滤波器。传统上, 射频工程师依靠的是带有表面贴装元件的分立式集总元件实现, 或者是包含印在PCB材料上的传输线的分布式元件滤波器。然而, 近年来, 滤波器基于半导体工艺设计, 允许使用精确的温度稳定无功元件, 品质系数得到了改善。此外, 半导体工艺支持使用开关和可调谐无功元件, 这在分立式集总元件实现中可能更具挑战性。还有体声波(BAW)、表面声波(SAW)、低温共烧陶瓷(LTCC)、腔体滤波器或陶瓷谐振器等其它技术。

每种方法和技术都存在权衡取舍:

集总LC滤波器由PCB上的表面贴装电感器和电容器来实现。这样做的好处是便于组装, 然后通过调整数值来改变滤波器的性能。

分布式滤波器设计为在电介质上实现的传输线的谐振片(可以集成到PCB中, 也可以独立在一个单独的电介质上), 并定向为在某些频率范围内充当准电感器或准电容器。它们表现出周期性特征。在某些情况下, 会添加集总元件来改进/小型化分布式滤波器。

陶瓷谐振器滤波器使用多个陶瓷谐振器(这是一个分布式元件), 通过集总元件进行耦合。耦合元件通常是一个电容, 但有时也会使用电感。这种类型的滤波器是分布式和集总元件的混合体。

腔体滤波器由封装在导电盒内的分布式元件(棒)来实现。它们以能够处理高功率而几乎没有损耗而闻名, 但要以尺寸和成本为代价。

BAW和SAW技术可以提供出色的性能, 但它们往往在频率选择方面有要求, 不适合宽带应用。

LTCC滤波器通过将多层分布式传输线组合在一个陶瓷封装中来实现, 该陶瓷封装类似于分布式滤波器, 可用于多种应用, 但它是固定的。由于它们是3D堆叠式的, 所以最终在PCB上占用的空间很小。

最后, 随着最近半导体性能的提升, 集成到半导体中的滤波器支持的频率范围也更加宽泛。如果能够将数字控制元件轻松集成到这些元件中, 有助于软件定义收发器的采用。总的来说, 性能和集成度之间的权衡取舍为宽带系统的设计人员提供了有用的价值。

表1. 滤波器类型比较

	频率范围	可调谐性	尺寸	成本	Q因数
集总LC	<6 GHz	难以实现	中	\$	中
分布式	<50 GHz	固定	中	\$\$	中/高
陶瓷谐振器	<6 GHz	固定	大	\$\$	高
腔体	<40 GHz	固定	大	\$\$\$	高
SAW/BAW	<6 GHz	固定	小	\$	高
LTCC	<40 GHz	固定	小	\$	中
半导体	<50 GHz	集成数字调谐	小	\$\$	中

最新的滤波器解决方案

ADI公司开发了一个新的数字调谐滤波器产品系列, 利用增强型半导体工艺和工业友好型封装技术。这项技术成就了小型、高抑制滤波器, 可以缓解接收机中出现的阻塞问题。这些滤波器通过标准串行至并行接口(SPI)通信进行高度配置, 具有快速的RF开关速度。此外, ADI公司在每个芯片内加入了一个128种状态的查询表, 以便快速改变滤波器状态, 实现快速跳频应用。高抑制快速调谐与宽频率覆盖的结合, 使下一代接收器应用能够在不利的频谱环境中运行。

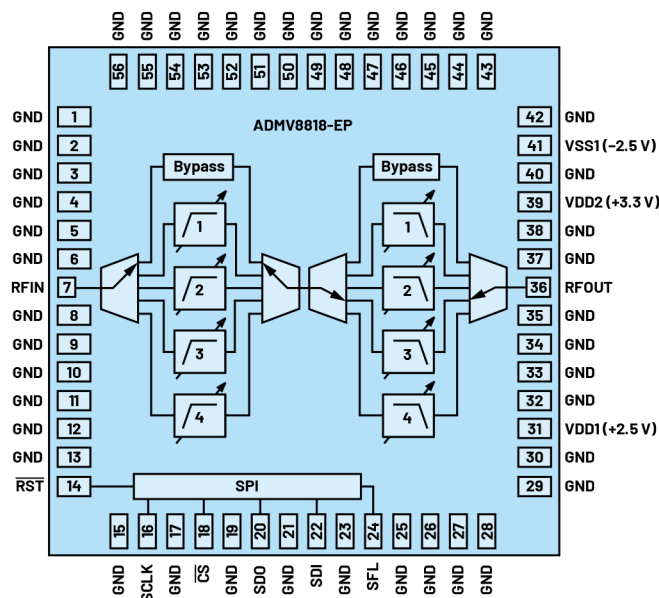


图 10. ADMV8818 功能框图。

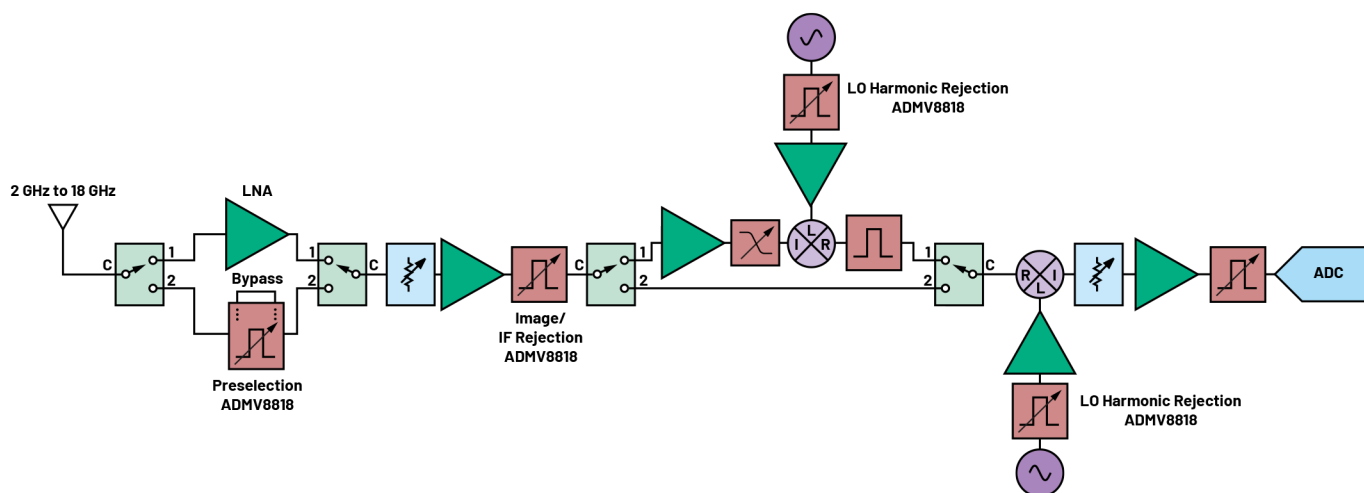


图 11. 使用 ADMV8818 作为预选器和镜像滤波器的 2 GHz 至 18 GHz 接收器的方框图。

使用这项技术推出的最新产品为ADMV8818和ADMV8913。前者有四个高通滤波器和四个低通滤波器，工作频率为2 GHz至18 GHz；后者有一个高通滤波器和低通滤波器，工作频率为8 GHz至12 GHz。

ADMV8818是一款高度灵活的滤波器，采用9 mm × 9 mm封装，可在2 GHz和18 GHz之间实现可调谐的带通、高通、低通或旁路响应。该芯片由两部分组成：输入部分和输出部分。输入部分有四个高通滤波器和一个可选旁路，旁路可通过两个 RF_{IN} 开关进行选择。同样，输出部分有四个低通滤波器和一个可选旁路，旁路可通过两个 RF_{OUT} 开关进行选择。每个高通和低通滤波器都可以用16种状态（4个控制位）进行调谐，以调整3 dB频率(f_{3dB})。图10所示为ADMV8818的功能框图。

凭借可快速重新配置的灵活结构和较小的外形尺寸，ADMV8818可在2 GHz至18 GHz频段上提供全覆盖，没有任何死区。ADMV8818可配置为亚倍频程预选滤波器、镜像或中频滤波器。当在图11所示的信号链中进行配置时，接收器可以保持高灵敏度，并且可以在存在较大的OOB信号时，改用ADMV8818作为预选器。

例如，如果在9 GHz频段附近接收到目标信号，但在4.5 GHz频段存在一个强大的OOB阻塞信号，那么该阻塞信号会导致谐波出现在9 GHz目标信号附近，从而妨碍操作。将ADMV8818配置为一个6 GHz至9 GHz的带通滤波器，可允许宽带信号通过，同时在信号链的非线性元件中引起谐波问题之前，适当降低阻塞信号的电平。为这种情况配置的ADMV8818的S参数扫描可覆盖阻塞信号，如图12所示。

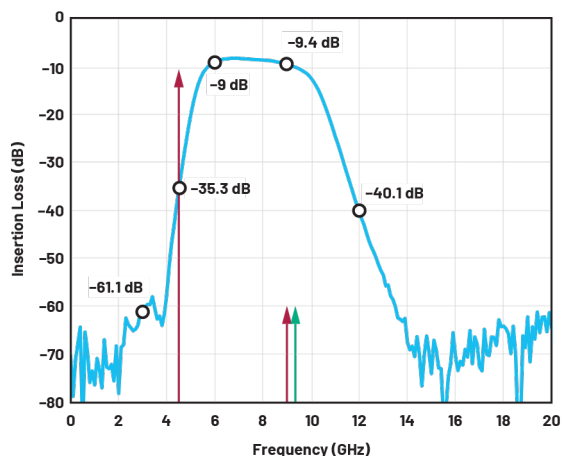


图 12. ADMV8818 配置为 6 GHz 至 9 GHz 带通滤波器。该滤波器抑制 $F_2 - F_1$ 、 $F_1 + F_2$ 、 $F/2$ 和 $F \times 2$ 杂散产物。

典型的 2 GHz 到 18 GHz 预选滤波器模块的尺寸比较如图 13 所示。其中开关固定滤波器预选器组是在陶瓷基板上采用分布式滤波技术实现的。尺寸根据市面上的滤波器产品估算。估算时包含了八掷开关，用来比较等效功能。图中所示的可调谐 BPF 是 ADMV8818，它覆盖的频率范围相同，并且调谐灵活性也比开关式滤波器组更全面。与开关式滤波器组相比，ADMV8818 的占用

面积节省超过 75%。接收器信号链中的预选器功能通常在系统的整体尺寸中占有相当大的比例，因此在尺寸有限的电子战系统中，这种占用面积节省至关重要，这些系统可以灵活地在尺寸与性能之间进行权衡取舍。

ADMV8913 是高通和低通滤波器的组合，采用 6mm×3mm 封装，它专门设计用于在 8 GHz 至 12 GHz 的频率范围（X 波段）内工作，插入损耗低至 5 dB。高通和低通滤波器都可以用 16 种状态（4 个控制位）进行调谐，以调整 3 dB 频率 ($f_{3\text{dB}}$)。此外，ADMV8913 集成了一个并行逻辑接口，可以在不需要 SPI 通信的情况下设置滤波器状态。这种并行逻辑接口对于需要快速滤波器响应时间的系统来说相当有用，因为它消除了 SPI 处理所需的时间。图 14 所示为 ADMV8913 的功能框图。

现代 X 频段雷达系统，无论是采用机械转向天线还是高通数相控阵波束，通常都依赖于尺寸紧凑、插入损耗低且易于配置的滤波解决方案。由于插入损耗低、尺寸小、数字接口选项（SPI 或并行控制）灵活，ADMV8913 非常适合这种应用。这些功能特点使它能够靠近这些系统的前端，确保出色的性能，同时降低集成的复杂性。

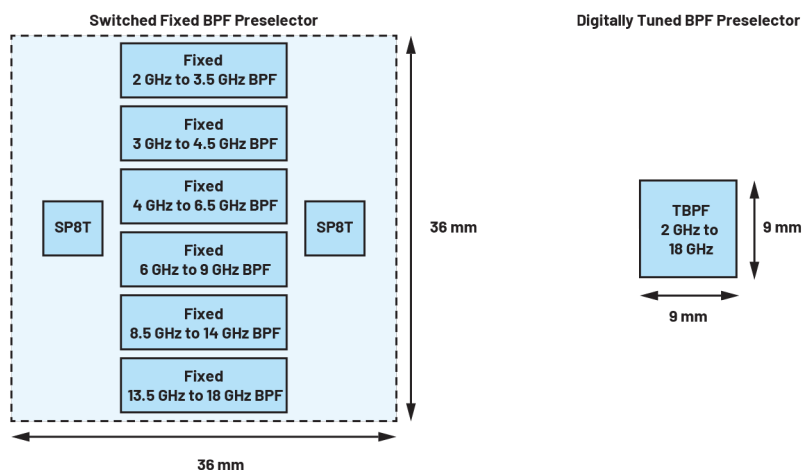


图 13. 固定开关的 2 GHz 至 18 GHz BPF（左）与数字可调谐 2 GHz 至 18 GHz BPF（右）。占用面积节省超过 75%。

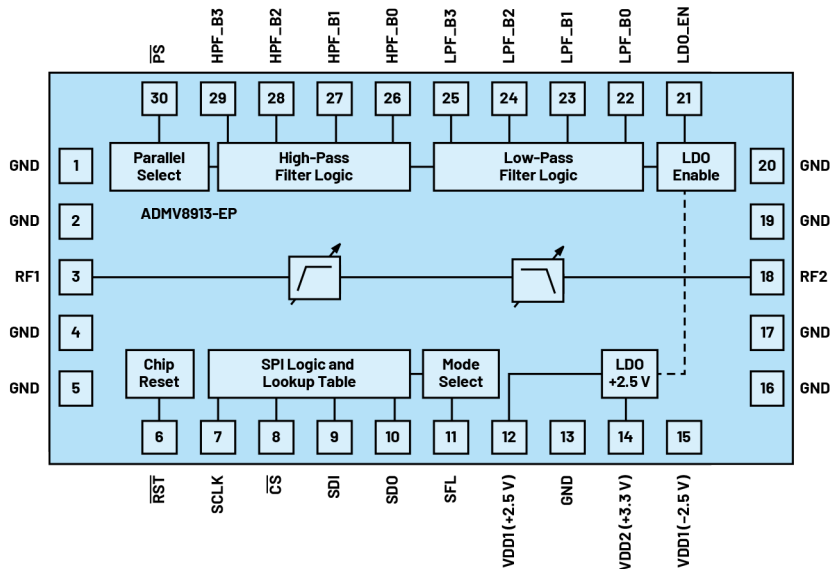


图 14. ADMV8913 功能框图。

结论

设计宽带接收器的射频前端时，要考虑的因素有很多。前端的设计必须能够处理难以预测的阻塞情况，同时还能检测低电平信号。能够动态调整前端滤波性能，以处理这些阻塞信号，这是射频前端的一个关键特性。ADI公司新推出的数字控制可调谐滤波器IC产品具备出色的性能，并且数字功能也进行了强化，可满足众多前端应用的需要。这两款新产品只是数字可调谐滤波器产品组合中众多新开发产品中最先推出的两款。有兴趣了解这些产品的客户，请访问“[数字可调谐滤波器](#)”产品页面，查看最新的数据表，或与当地代表联系，讨论具体的终端应用。



作者简介

Brad Hall是ADI公司航空航天和防务部（位于美国北卡罗来纳州格林斯博罗）的RF系统应用工程经理。他于2015年加入ADI公司。他主要负责为航空航天和国防应用提供全信号链设计支持和新产品定义。在此之前，他是马里兰州Digital Receiver Technology, Inc.的RF工程师。他于2006年获得马里兰大学的电气工程学士学位，并于2018年获得约翰霍普金斯大学的电气工程硕士学位。



作者简介

David Mailloux是ADI公司RF和微波事业部的产品应用工程师。他于2010年和2012年分别获得马萨诸塞大学洛厄尔分校电气工程学士学位和硕士学位。

在2010年至2015年期间，他在Hittite Microwave and Symmetricom（现已更名为Microchip Technology）就职。他从事半导体和模块级振荡器设计工作，拥有理论知识与实验工作经验。

2015年，他加入ADI公司，担任产品应用工程师，为高度集成的上/下变频器和可调谐滤波器产品提供支持。此外，他还提供压控振荡器、锁相环、分频器和倍频器等领域的技术支持。

参考资料

¹ Bezhad Razavi. *RF Microelectronics*. Pearson Education, Inc., 2012.

² David Pozar. 《微波工程》，第3版，John Wiley & Sons, 2005.

Annino, Benjamin. “[多倍频程宽带数字接收器的SFDR考量](#)。”《模拟对话》，第55卷第1期，2021年1月。

Bowick, Chris. 《RF电路设计》，第2版。Elsevier, Inc., 2008.

Delos, Peter, “[宽带RF接收器架构选项综述](#)。”ADI公司，2017年2月。

Egan, William F. 《实用射频系统设计》。John Wiley & Sons, 2003.

Tsui, James. 《微波接收器和相关器件》。Peninsula, 1985.

Tsui, James和Chi-Hao Cheng. 《宽带接收器的数字技术》。SciTech, 2015年。

