

设计指南

Apollo Bluetooth Low Energy SoC 射频滤波器设计指南

超低功耗 Apollo SoC 系列
A-SOCAPG-DGGA02CN A4 v1.0



Legal Information and Disclaimers

AMBIQ MICRO INTENDS FOR THE CONTENT CONTAINED IN THE DOCUMENT TO BE ACCURATE AND RELIABLE. THIS CONTENT MAY, HOWEVER, CONTAIN TECHNICAL INACCURACIES, TYPOGRAPHICAL ERRORS OR OTHER MISTAKES. AMBIQ MICRO MAY MAKE CORRECTIONS OR OTHER CHANGES TO THIS CONTENT AT ANY TIME. AMBIQ MICRO AND ITS SUPPLIERS RESERVE THE RIGHT TO MAKE CORRECTIONS, MODIFICATIONS, ENHANCEMENTS, IMPROVEMENTS AND OTHER CHANGES TO ITS PRODUCTS, PROGRAMS AND SERVICES AT ANY TIME OR TO DISCONTINUE ANY PRODUCTS, PROGRAMS, OR SERVICES WITHOUT NOTICE.

THE CONTENT IN THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS". AMBIQ MICRO AND ITS RESPECTIVE SUPPLIERS MAKE NO REPRESENTATIONS ABOUT THE SUITABILITY OF THIS CONTENT FOR ANY PURPOSE AND DISCLAIM ALL WARRANTIES AND CONDITIONS WITH REGARD TO THIS CONTENT, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ALL IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, TITLE AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT.

AMBIQ MICRO DOES NOT WARRANT OR REPRESENT THAT ANY LICENSE, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, IS GRANTED UNDER ANY PATENT RIGHT, COPYRIGHT, MASK WORK RIGHT, OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF AMBIQ MICRO COVERING OR RELATING TO THIS CONTENT OR ANY COMBINATION, MACHINE, OR PROCESS TO WHICH THIS CONTENT RELATE OR WITH WHICH THIS CONTENT MAY BE USED.

USE OF THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT MAY REQUIRE A LICENSE FROM A THIRD PARTY UNDER THE PATENTS OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY OF THAT THIRD PARTY, OR A LICENSE FROM AMBIQ MICRO UNDER THE PATENTS OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY OF AMBIQ MICRO.

INFORMATION IN THIS DOCUMENT IS PROVIDED SOLELY TO ENABLE SYSTEM AND SOFTWARE IMPLEMENTERS TO USE AMBIQ MICRO PRODUCTS. THERE ARE NO EXPRESS OR IMPLIED COPYRIGHT LICENSES GRANTED HEREUNDER TO DESIGN OR FABRICATE ANY INTEGRATED CIRCUITS OR INTEGRATED CIRCUITS BASED ON THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT. AMBIQ MICRO RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN. AMBIQ MICRO MAKES NO WARRANTY, REPRESENTATION OR GUARANTEE REGARDING THE SUITABILITY OF ITS PRODUCTS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, NOR DOES AMBIQ MICRO ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT, AND SPECIFICALLY DISCLAIMS ANY AND ALL LIABILITY, INCLUDING WITHOUT LIMITATION CONSEQUENTIAL OR INCIDENTAL DAMAGES. "TYPICAL" PARAMETERS WHICH MAY BE PROVIDED IN AMBIQ MICRO DATA SHEETS AND/OR SPECIFICATIONS CAN AND DO VARY IN DIFFERENT APPLICATIONS AND ACTUAL PERFORMANCE MAY VARY OVER TIME. ALL OPERATING PARAMETERS, INCLUDING "TYPICALS" MUST BE VALIDATED FOR EACH CUSTOMER APPLICATION BY CUSTOMER'S TECHNICAL EXPERTS. AMBIQ MICRO DOES NOT CONVEY ANY LICENSE UNDER NEITHER ITS PATENT RIGHTS NOR THE RIGHTS OF OTHERS. AMBIQ MICRO PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, INTENDED, OR AUTHORIZED FOR USE AS COMPONENTS IN SYSTEMS INTENDED FOR SURGICAL IMPLANT INTO THE BODY, OR OTHER APPLICATIONS INTENDED TO SUPPORT OR SUSTAIN LIFE, OR FOR ANY OTHER APPLICATION IN WHICH THE FAILURE OF THE AMBIQ MICRO PRODUCT COULD CREATE A SITUATION WHERE PERSONAL INJURY OR DEATH MAY OCCUR. SHOULD BUYER PURCHASE OR USE AMBIQ MICRO PRODUCTS FOR ANY SUCH UNINTENDED OR UNAUTHORIZED APPLICATION, BUYER SHALL INDEMNIFY AND HOLD AMBIQ MICRO AND ITS OFFICERS, EMPLOYEES, SUBSIDIARIES, AFFILIATES, AND DISTRIBUTORS HARMLESS AGAINST ALL CLAIMS, COSTS, DAMAGES, AND EXPENSES, AND REASONABLE ATTORNEY FEES ARISING OUT OF, DIRECTLY OR INDIRECTLY, ANY CLAIM OF PERSONAL INJURY OR DEATH ASSOCIATED WITH SUCH UNINTENDED OR UNAUTHORIZED USE, EVEN IF SUCH CLAIM ALLEGES THAT AMBIQ MICRO WAS NEGLIGENT REGARDING THE DESIGN OR MANUFACTURE OF THE PART.

修订记录

校订	日期	描述
1.0	April 8, 2024	Initial release

参考文件

这些参考文件可以在 Ambiq 网站和 / 或内容门户上访问。

文档 ID	描述
A-SOCAPG-ANGA01EN	Apollo BLE SoC Impedance Matching Application Notes

* 指示使用文档的最新版本。

目录

1. 概述	6
2. 滤波器基础知识	7
2.1 滤波器基本类型	7
2.2 滤波器拓扑结构	10
2.3 网络合成滤波器	12
2.4 滤波器主要指标	14
3. LC 滤波器设计示例	17
3.1 基本设计步骤	17
3.2 设计工具介绍	18
3.3 低通滤波器设计实例	20
3.4 带通滤波器设计实例	26
4. 结语	29

图表一览表

图 2-1 典型的低通滤波器频率响应特性	8
图 2-2 典型的高通滤波器频率响应特性	8
图 2-3 典型的带通滤波器频率响应特性	9
图 2-4 典型的带阻滤波器频率响应特性	9
图 2-5 两端口 S 参数网络定义的 RF 滤波器	11
图 2-6 L 型拓扑结构	11
图 2-7 T 形拓扑结构	12
图 2-8 Π 型拓扑结构	12
图 2-9 级联 L 型拓扑组成的阶梯型网络	12
图 2-10 不同滤波器类别的频响特性对比 Classes	14
图 3-1 LC 滤波器设计工具设计参数输入窗口	19
图 3-2 标准元件值选项输入框	20
图 3-3 低通 Π 型和 T 型滤波器拓扑结构	21
图 3-4 三阶巴特沃斯低通滤波器设计参数设置	22
图 3-5 生成的 Π 型和 T 型巴特沃斯低通滤波器原理图	22
图 3-6 三阶巴特沃斯低通滤波器 S11 和 S21 仿真结果	23
图 3-7 三阶切比雪夫低通滤波器设计参数设置	24
图 3-8 生成的 Π 型和 T 型切比雪夫低通滤波器电路原理图	24
图 3-9 三阶切比雪夫低通滤波器 S11 和 S21 仿真结果	25
图 3-10 LC 滤波器设计工具导出对话框	26
图 3-11 两种类型三阶带通滤波器的设计参数设置	27
图 3-12 自动生成的两种类型三阶带通滤波器电路原理图	27
图 3-13 两种类型三阶带通滤波器的 S11 和 S21 仿真结果	28

部分

1

概述

射频滤波器在无线电系统中发挥着重要作用，主要用于从 RF 信号中滤除不需要的频率分量，同时保留所需的频率分量，以确保有效的信号发射和接收。射频滤波器设计需要工程人员深入了解射频概念、交流电路分析和信号处理等知识，并在实际工程中诸多限制因素之间进行权衡，以选择合适的滤波器类型及其规格。

对于工作在 2.4 GHz ISM 频段的无线电设备，例如支持 Bluetooth Low Energy 的终端产品，射频滤波器主要用于发射时抑制谐波和接收时减小带外干扰。特别是当特定应用需要更高的发射输出功率水平时，比如超过 +10 dBm 的发射功率，射频滤波器的重要性便凸显出来。这是因为谐波功率会随着基波功率的增加非线性增大，这可能会导致无线电监管合规方面的潜在风险。众所周知，对于在 2.4 GHz ISM 频段内运行的设备，ETSI EN 300 328 标准要求带外杂散的限制为 -30 dBm EIRP，而美国 FCC 标准要求则更为严格，将带外杂散限制为 -41.2 dBm EIRP。因此，射频滤波器始终是无线类产品通过各种无线电认证测试所必需的组件。

滤波器基础知识

一般来说，电子设备中使用的滤波器通常可分为两大类：无源型和有源型。无源滤波器仅由电阻器 (R)、电感器 (L) 和电容器 (C) 等无源元件组成。而有源滤波器则使用晶体管等有源元件和无源元件的组合来实现，并且滤波器需要额外的电源供电。运算放大器经常用于有源滤波器设计。有源滤波器可以具有很高的品质因数，并且可以在不使用电感器的情况下实现谐振。然而，它们的频率上限往往受到运算放大器带宽的限制¹。

RF 滤波器是一种无源滤波器，设计用于处理数十 MHz 至 GHz 频率范围 (HF 频段及以上) 的信号。RF 滤波器一般仅使用电抗元件构建，即电感器 (L) 和电容器 (C)，并且所用电抗元件的数量决定滤波器的阶数。RF 滤波器允许让信号通过的频带称为通带，它抑制的频带称为阻带。

2.1 滤波器基本类型

根据所实现的功能定义了四种基本的滤波器类型，每种类型以不同的方式接受或阻止信号。通过应用中使用正确类型的射频滤波器，可以无损耗或低损耗地传递所需的频率分量而阻止或抑制那些不需要的频率分量²。

1. 低通滤波器 (LPF)

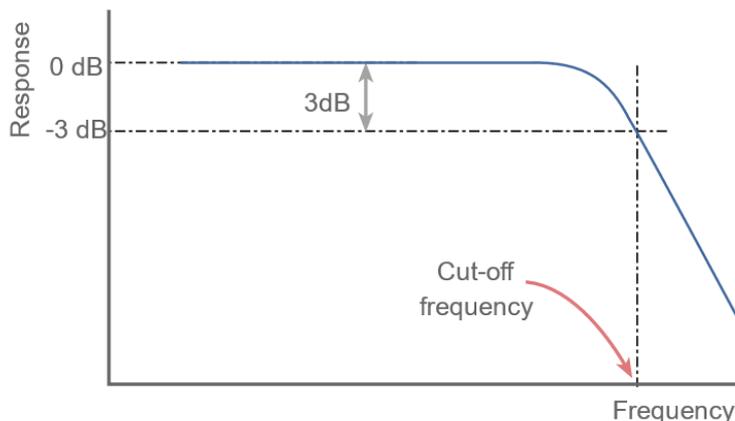
如图 2-1 所示，LPF 只允许低于某一频率（通常称其为截止频率或转折频率，对应于幅度频率响应下降 3 dB 的点）的所有信号分量通过，同时滤

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter

² <https://www.murata.com/en-global/products/filter/lcfilter/overview/basic>

除截止频率之上的其他信号分量。从通带过渡到阻带的变化斜率我们通常称为滚降率，其主要由滤波器的阶数决定。

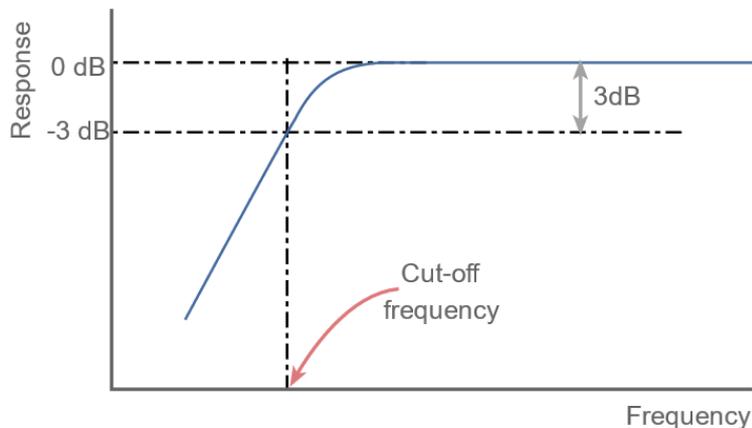
图 2-1: 典型的低通滤波器频率响应特性



2. 高通滤波器 (HPF)

如图 2-2 所示，HPF 只允许截止频率以上的所有信号通过，同时阻止截止频率以下的所有其他信号，由频响特性曲线可以看出 HPF 的特性正好与 LPF 相反。理想的 LPF 和 HPF 都要求滤波器具备平坦的通带特性和陡峭的滚降特性。

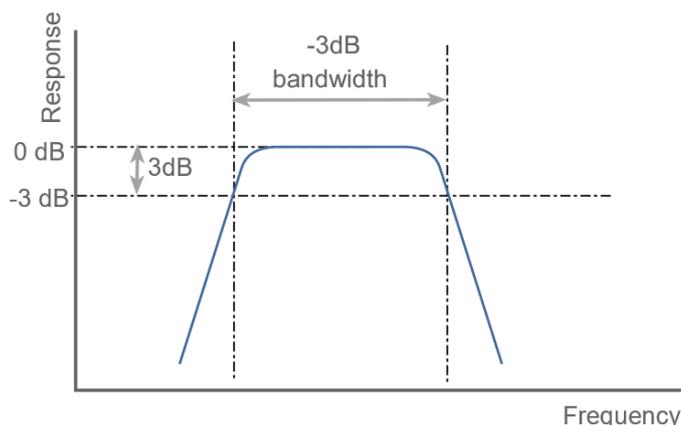
图 2-2: 典型的高通滤波器频率响应特性



3. 带通滤波器 (BPF)

如图 2-3 所示，BPF 只允许特定频率范围内的信号通过。因此，它拥有两个截止频率：下限截止频率和上限截止频率。低于下限截止频率和高于上限截止频率的信号分量将被抑制或衰减，而它们之间的频率分量将被允许通过。

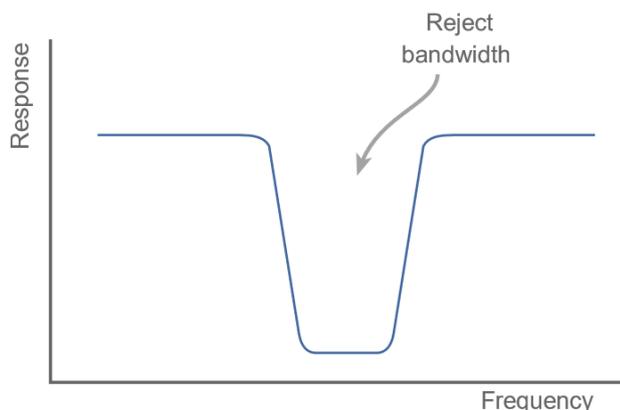
图 2-3: 典型的带通滤波器频率响应特性



4. 带阻滤波器

如图 2-4 所示，带阻滤波器用于抑制特定频带内的信号，其特性与带通滤波器相反。这种形式的射频滤波器通常用于消除系统中已知存在且不需要的信号。如果阻带足够窄或只是针对某个特定的频点进行抑制，则带阻滤波器也可称为陷波滤波器。

图 2-4: 典型的带阻滤波器频率响应特性



此外，射频滤波器还可以根据其构造类型和制作工艺进行分类。一般来讲，大多数射频和微波滤波器通常由一个或多个耦合谐振器组成，因此任何可用于制作谐振器的技术也可用于制作滤波器。通常用谐振器的空载品质因数来反映滤波器可以实现的频率选择性¹。选择适合的射频滤波器构造方式因应用而异，尺寸、成本和性能是主要考虑因素。以下是用于射频和微波应用的一些典型滤波器设计技术和工艺结构：

集总参数 LC 滤波器或称为分立式 LC 滤波器是最简单的谐振器结构，由并联或串联的电感器和电容器组成。它们的优点是非常紧凑且易于实现，但品质因数较低会导致滤波性能相对较差。LC 滤波器通常用于消费类无线电子产品，

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/RF_and_microwave_filter

因为我们可以设计 RF 前端电路时将它们与阻抗匹配网络结合起来从而节省 PCB 空间。

平面滤波器也称为分布参数滤波器，由微带线、带状线和共面波导等平面传输线制成，它们在许多与集总参数滤波器相同应用的场景中使用。分布式元件模型适用于更高的工作频率，但也比集总式元件模型需要更多的空间。平面滤波器经常出现在专业 RF 测量仪器和设备以及一些专用的射频 / 微波组件中。

腔体滤波器适用于通信基站和雷达系统等基础设施应用，因为它们可以提供很高的功率容量，但尺寸也相对较大。通过增加腔体的内部体积，它们可以实现极高的品质因数以及在紧密的频率间隔（可低至 75 kHz）下提供良好的滤波性能。

介质滤波器由各种高介电常数材料制成，通过电磁波在介质内部反复的全反射而形成滤波效果，高介电常数材料可用于减小滤波器的总体尺寸。一种常见的介质滤波器类型是由多层陶瓷制成的低温共烧陶瓷滤波器（LTCC）。通过使用低损耗的介质材料，介质滤波器可以提供相比 LC 滤波器更好的性能。

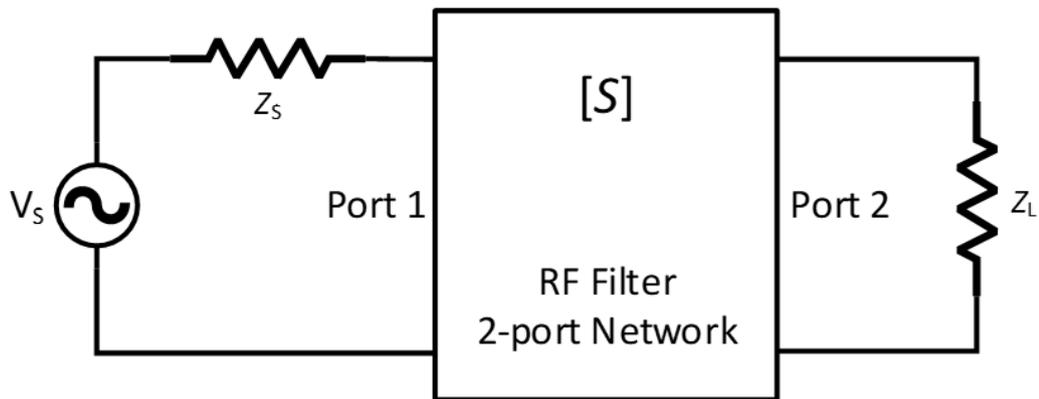
电声滤波器利用压电效应由压电材料制成，由于给定频率下的声波波长比电波波长短几个数量级，因此电声滤波器的尺寸和重量通常比腔体滤波器和介质滤波器小。电声滤波器是移动应用中最常采用的滤波器技术，因为它们可以解决现代移动终端产品中复杂的多频多模共存所带来的滤波问题。大多数电声滤波器都采用薄膜技术制作，常用的结构类型有声表面波滤波器（SAW）、体声波滤波器（BAW）和薄膜体声波谐振滤波器（FBAR）等。

总之，在现有技术条件下存在多种不同类型的射频滤波器，在实际应用时必须考虑满足设计要求的特定滤波器类型和拓扑。工作频率范围、可用分立元件值以及尺寸 / 成本限制等因素会影响分布式参数滤波器和集总式参数滤波器之间的选择。而现成的陶瓷过滤器也可以为某些特定应用提供紧凑、快速的解决方案。如果需要定制设计滤波器，选项通常包括微带分布式结构或集总式无源 LC 结构。在尺寸受限且工作频率低于 3 GHz，以及产品 PCB 使用消费级 FR-4 板材的情况下，通常建议选择 LC 集总式滤波器而不是分布式结构。

2.2 滤波器拓扑结构

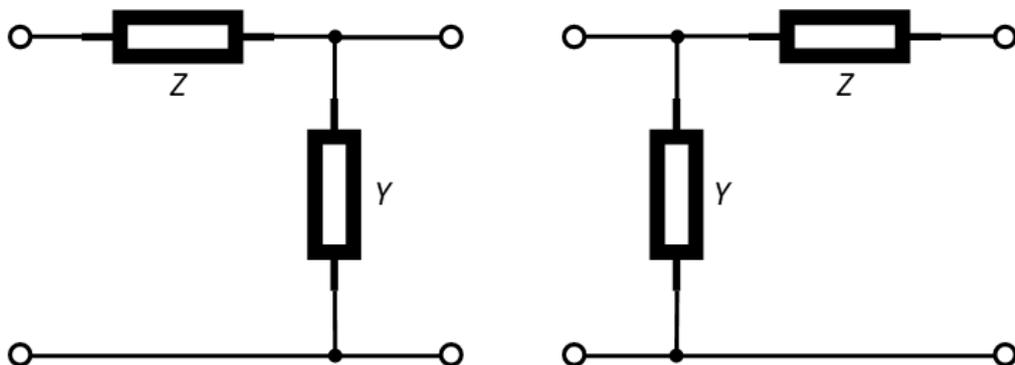
如图 2-5 所示，RF 滤波器可以看作是一个称为“截面”的无源二端口网络，我们可以使用 S 参数来定量分析它们。RF 滤波器的拓扑结构定义了 LC 无源组件的连接方式。

图 2-5: 两端口 S 参数网络定义的 RF 滤波器



“截面”没有正式的定义，只是它必须具有至少一个串联元件（用阻抗 Z 表示）和一个并联元件（用导纳 Y 表示）。各“截面”总是以“级联”或“菊花链”方式连接，由同一“截面”或完全不同“截面”的附加副本组成。根据串联阻抗和并联导纳的规则，我们可以将仅由单个串联元件或单个并联元件组成的两个“截面”组合成单个“截面”¹。如图 2-6、图 2-7 和图 2-8 分别所示，无源射频滤波器有 L 型截面、T 型截面和 Π 型截面三种基本拓扑形式。

图 2-6: L 型拓扑结构



如上图 2-6 所示，L 单元是最简单的拓扑形式，只由串联和并联两个电抗元件组成。使用网络合成方法设计的射频滤波器通常重复对称或者不对称的 L 单元，对称意味着每个级联 L 单元中的元件类型和值完全一样，非对称则意味着每个 L 单元的元件类型或值会发生变化。对称的 T 型网络和 Π 型网络是由两个背靠背的 L 单元组合而成。可以看出，T 型网络有两个串联元件，只有一个并联元件；而 Π 型网络有两个并联元件，只有一个串联元件。根据所需的频率响应特性，滤波器设计时可以选择对称或不对称的组件。

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter_topology

图 2-7: T 形拓扑结构

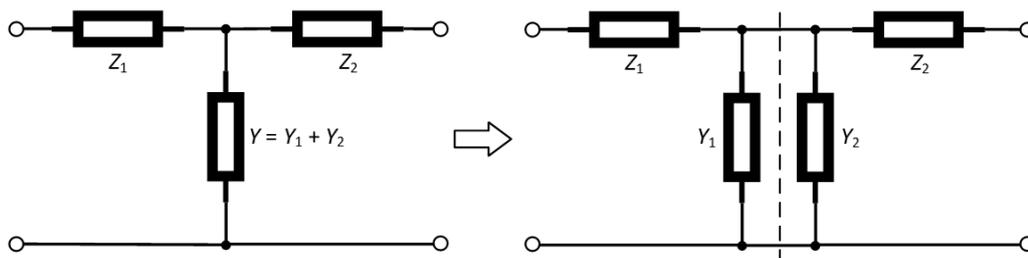
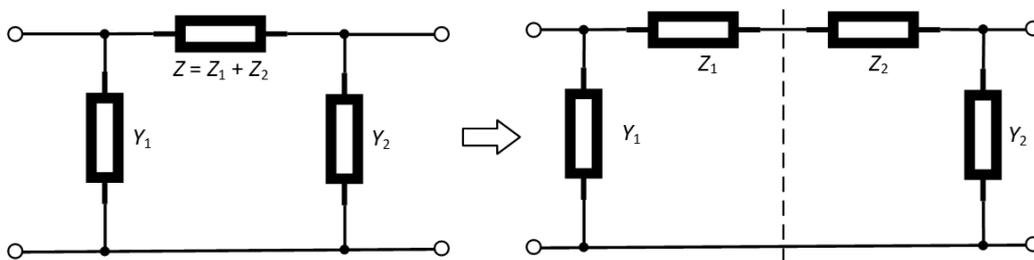
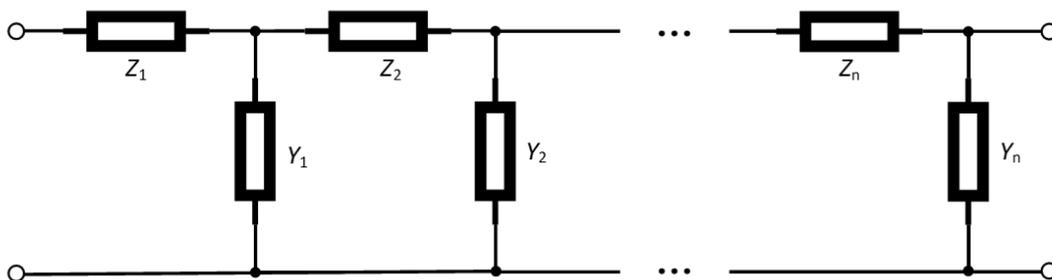


图 2-8: Π 型拓扑结构



当需要改进滤波器的某些参数时，例如提高阻带抑制或从通带到阻带的滚降率，则需要加入更多的元件也就是提高滤波器的阶数。如图 2-9 所示，多元件滤波器通常构建为梯形网络，可以视为 L 型网络、T 型网络或 Π 型网络滤波器设计的延续。

图 2-9: 级联 L 型拓扑组成的阶梯型网络



2.3 网络合成滤波器

在信号处理中，网络合成滤波器指采用网络综合方法设计的多项式滤波器。网络综合法从所需的传递函数开始，然后将其表示为滤波器输入 / 输出阻抗的多项式方程。网络综合法产生了几种重要的滤波器类别，其中包括巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器、椭圆函数滤波器等。它最初旨在应用于无源滤波器网络的设计，但其结果也可以应用于有源滤波器和数字滤波器。该方法的本质是从表示传递函数的多项式展开中计算实际的元件值¹。

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Network_synthesis_filters

网络综合滤波器的类别是指从数学上导出滤波器的多项式的类别。滤波器的阶数是阶梯型滤波器网络所用组件的数量。一般来说，滤波器的阶数越高，通带和阻带之间的过渡特性便越陡峭。

巴特沃斯滤波器是一种在通带内具有尽可能平坦频率响应的滤波器，它也被称为最大平坦响应滤波器，这意味着其频率响应曲线在具有相同阶数的滤波器类别中最为平滑。

理想巴特沃斯滤波器的频率响应可以认为在通带内没有纹波，并且在阻带中滚降到零。当在对数波特图上观察时，频响曲线线性地趋于负无穷大。一阶巴特沃斯滤波器的响应以 -6 dB 每倍频程（-20 dB 每十倍频程）的斜率滚降；二阶滤波器以 -12 dB 每倍频程（-40 dB 每十倍频程）的斜率滚降；三阶滤波器以 -18 dB 每倍频程（-60 dB 每十倍频程）的斜率滚降，依此类推。巴特沃斯滤波器生成多项式具有随角频率 ω 单调变化的幅度函数，这与在通带和 / 或阻带中具有非单调纹波的其他滤波器类型不同¹。

与其他滤波器类型相比，巴特沃斯滤波器在截止频率附近的滚降速度比它们慢，但通带中没有纹波而且具有比其他类型滤波器更线性的相位响应。对于需要从通带到阻带更快过渡或转变的应用，通常需要更高的滤波器阶数来实现特定的阻带规范。

切比雪夫滤波器比巴特沃斯滤波器具有更陡峭的截止频率转变，但付出的代价是通带频率响应中存在纹波，设计时通常需要在通带中允许的最大纹波和通带到阻带的滚降率之间进行权衡。这种典型的通带中存在纹波的滤波器有时也称为 I 型切比雪夫，另外一种给 II 型切比雪夫是通带中没有纹波但阻带中出现纹波的滤波器²。

切比雪夫滤波器具有这样的特性，即在滤波器的工作频率范围内最小化实际滤波器特性与理想滤波器特性之间的差异，但它们往往通过调节通带中的纹波大小来实现这一点。由于切比雪夫滤波器固有的通带纹波，对于某些应用来说，在通带中具有更平滑的响应但在阻带中具有更不规则的响应的滤波器（即 II 型切比雪夫滤波器）更为适用。

使用 LC 无源组件构造的切比雪夫滤波器提供从通带到阻带的最快过渡，但如上所述这是以通带内纹波作为代价的，这种特点可能无法为所有应用所接受。然而，切比雪夫滤波器仍然在许多射频应用中得到了广泛使用。在这些应用中，纹波可能不是一个无法接受的问题，因为陡峭的滚降显然更有助于减少不需要的带外杂散发射，例如谐波或互调产物。因此，切比雪夫滤波器通带和阻带之间的快速过渡可以实现无用信号的最大程度衰减。

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter

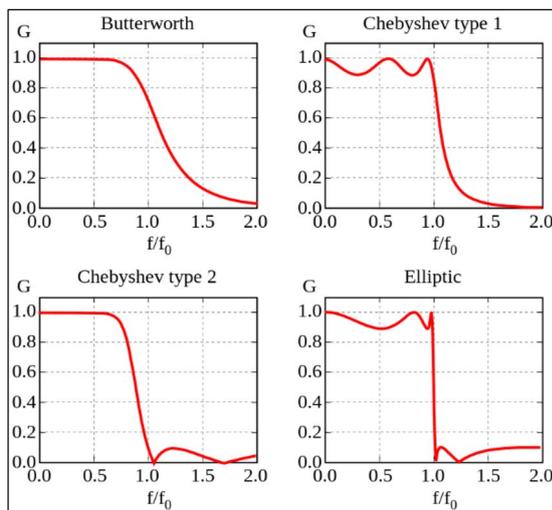
² https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_filter

椭圆函数滤波器（也称为 Cauer 滤波器）是一种在通带和阻带中具有相似纹波行为的信号处理滤波器。通带和阻带中的纹波分量都是独立可调的，并且对于给定的纹波值，椭圆函数滤波器能实现比其他同阶数的滤波器类别更快的通带到阻带过渡特性。另外，我们在设计时也可以考虑放弃独立调整通带和阻带纹波的能力，而是设计一种对 LC 元件值变化最不敏感的椭圆函数滤波器¹。

与任何其他类别的网络合成滤波器相比，椭圆函数滤波器从通带到阻带的过渡速度最快。而且根据其通带和阻带中呈现的纹波可调特性，椭圆函数滤波器可以转化为其他的滤波器类别。比如，当阻带中的纹波接近于零时，椭圆函数滤波器将变成 I 型切比雪夫滤波器；而当通带中的纹波接近于零时，椭圆函数滤波器将变成 II 型切比雪夫滤波器；最后，如果当通带和阻带中的纹波值都接近于零时，椭圆函数滤波器将变为巴特沃斯滤波器。

图 2-10 给出了理想的巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器（I 型和 II 型）和椭圆函数滤波器之间的幅度响应（增益）对比，本图中所使用的滤波器示例均为五阶低通滤波器。从下图中可以直观地看出，椭圆函数滤波器比其他滤波器类别具有更陡峭的通阻带过渡特性，但在全频段内都有纹波出现²。

图 2-10: 不同滤波器类别的频响特性对比 Classes



2.4 滤波器主要指标

设计射频滤波器需要仔细考虑多种因素和参数，以实现所需的性能，下面列出了一些通常用于表征射频滤波器特性的性能指标³。

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_filter

² https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter

³ <https://www.wiley.com/en-sg>

- **阶数**：对于高通或低通滤波器，阶数等于滤波器中使用的电抗元件（例如电容和电感）的总数；而对于带通或带阻滤波器，阶数是由电抗元件组成的串联或并联谐振器的数量之和，一般为电抗元件数量总和的一半。
- **截止频率 / 带宽**：如前所述，滤波器的截止频率定义为幅度响应降至通带内幅度的 50%（用对数表即为下降 -3 dB）的点，因此截止频率有时称为半功率点或 -3 dB 频率。对于带通滤波器，有两个截止频率：分别是下限截止频率和上限截止频率。带宽定义为通带的频率范围，对应于低通滤波器的截止频率以及带通滤波器的上限截止频率和下限截止频率之差。而对于高通和带阻滤波器一般没有带宽的概念，它们的带宽可认为无限大。
- **回波损耗 (S₁₁)**：回波损耗 (Return Loss, 缩写为 RL) 用于衡量当信号输入滤波器时，被滤波器反射的信号功率与入射功率的比值，单位以 dB 表示，有时也用驻波比 (VSWR) 来表示滤波器的输入反射特性。VSWR 和 RL 都可以用输入反射系数 Γ_{in} 的幅值来定义。如果使用二端口网络模型进行分析，则可以用 S₁₁ 参量的大小来定义。

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma_{in}|}{1 - |\Gamma_{in}|} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

$$RL(dB) = -20 \log|\Gamma_{in}| = -20 \log|S_{11}|$$

- **插入损耗 (S₂₁)**：插入损耗 (Insertion Loss, 缩写为 IL) 用于衡量信号通过滤波器时通带内信号功率的衰减量，以 dB 为单位。另一方面，插入损耗的变化通常也反映通带内的纹波或通带的平坦度大小。如果采用二端口网络模型进行分析，插入损耗可以用 S₂₁ 参量表示。

$$IL(dB) = -20 \log|S_{21}|$$

回波损耗和插入损耗是正相关的特性，具有良好插入损耗特性的射频滤波器往往也具有良好的回波损耗特性。

- **带外衰减**：带外衰减通常用于表示阻带内信号功率的减少量，特别是在某些感兴趣的频率（例如谐波）处，单位以 dB 表示。它显示了滤波器对不需要的频率信号的抑制能力。当滤波器设计关注插入损耗时，带外衰减特性往往会受到影响，如果要求低通滤波器具有很高的谐波抑制水平则其工作频段内的插损也会变大。因此，在设计实际应用的射频滤波器时，我们需要在带内插入损耗和带外衰减之间进行取舍。
- **品质因数**：品质因数描述了滤波器的频率选择性，其与带宽相关，通常被定义为滤波器在谐振频率下，每个周期内平均存储的能量与消耗的能量之比。功率损耗通常被认为是外接负载上的功率损耗和滤波器本身的功率

损耗之和，由此定义的品质因数被称为有载品质因数。品质因数 (Q) 可以表示为¹：

$$Q = \omega \frac{\text{average stored energy}}{\text{energy loss per cycle}} \Big|_{\omega=\omega_c} = \frac{f_c}{BW_{3dB}}$$

其中 f_c 是滤波器的中心频率或谐振频率，而 BW_{3dB} 是滤波器的 3 dB 带宽。通过上式可以看出，品质因数与滤波器的带宽成反比。

- **形状因子**：该系数通过 60 dB 带宽和 3 dB 带宽之比来描述滤波器在截止频率附近响应曲线变化的陡峭程度。形状系数越高，滤波器就越接近理想性能。理想带通滤波器的形状因子等于 1，这意味着其通带形状接近于为矩形¹。

$$SF = \frac{BW_{60dB}}{BW_{3dB}}$$

- **群时延**：群时延是衡量信号的不同频率分量（信号透过傅里叶变换后可分解为不同频率的正弦波）在通过滤波器时传播时间延迟程度的指标。群时延表征了滤波器的色散特性，其定义是相位相对于角频率的变化率，以时间（秒）为单位表示¹。

$$t_g = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}$$

- **功率容量**：功率容量定义了滤波器可以处理的通带信号的最大功率，确保滤波器能够处理输入信号的功率至关重要。评估滤波器的功率处理能力可以保证其在不同大小功率输入下的可靠性和可持续性

¹ <https://drive.google.com/file/d/1KytKpX0f7uzMQYm7cPSILfMTxwpmwpw7/view?pli=1iew?usp=sharing&pli=1>

LC 滤波器设计示例

如前所述，射频滤波器通常用于抑制较高频率的谐波，以满足各种无线电认证要求。具体来说，对于基于 Apollo Blue 系列 SoC 的 2.4 GHz 频段 BLE 应用，我们需要考虑如何降低二次谐波（频率范围：4.8 至 5 GHz）和三次谐波（频率范围：7.2 至 7.5 GHz）的杂散发射值。显然，从各类滤波器的特性看来，只有低通和带通滤波器适合高次谐波抑制。

另一方面，我们还需要考虑滤波功能是否可以与 LC 阻抗匹配网络相结合，从而减少分立元件的使用数量并节省消费类电子产品中宝贵的 PCB 空间。因此，设计射频滤波器的一个基本原则是使用尽可能少的 LC 元件来达到预期的性能。

本章节将介绍如何设计适用于 2.4 GHz BLE 应用的分立式 LC 滤波器，网络上有许多开源的在线设计工具来设计和分析各种类型的分立式 LC 滤波器。下面我们将以一种基于网页端的 LC 滤波器设计工具¹为例来说明如何根据具体应用需求设计适用的分立式 LC 滤波器电路。

3.1 基本设计步骤

本节内容介绍了射频滤波器设计的一些基本步骤，包括确定滤波器响应类型、选择合适的传递函数、拓扑结构和评估其性能等²。

- 明确所需的滤波器响应类型

开始滤波器设计过程前，必须针对应用要求确定所需的滤波器响应类型：低通、高通、带通或带阻。每种响应类型都基于不同的实现目的和需求，并为后续的设计决策奠定基础。如上所述，低通和带通响应类型适合抑制高次谐波的需求。

¹ <https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/lc-filter-design-tool/>

² <https://www.ee-diary.com/2023/05/basic-steps-in-designing-rf-filters.html>

- 选择合适的滤波器传递函数

RF 应用中最常见的两种滤波器类别是巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器。如前所述，巴特沃斯滤波器提供平坦的通带响应，没有任何纹波；而切比雪夫滤波器在从通带到阻带的过渡期间提供出色的幅度滚降特性。深入了解这些滤波器类别的特性有助于为特定设计选择适当的传递函数。

切比雪夫滤波器在其通带内表现出幅度和回波损耗纹波，但它们提供大约 10 dB / 倍频程 / 阶的显着幅度滚降，具体取决于设计所需达到的纹波幅度。而巴特沃斯滤波器具有平坦的通带响应，没有任何幅度纹波和提供 6 dB / 倍频程 / 阶的幅度滚降。椭圆函数滤波器则表现出极为陡峭的通阻带过渡频率响应特性，但由于其对电抗元件值变化的敏感性，可能会降低其射频性能，因此它通常仅限应用于 1 GHz 以下的频率。

- 确定滤波器类型和拓扑结构

射频滤波器往往可以采用多种技术实现，在应用时必须考虑适合设计要求的特定滤波器类型和拓扑结构。比如，频率范围、元件值变化敏感度和尺寸限制等因素会影响微带分布式滤波器和集总无源 LC 滤波器之间的选择。而介质滤波器可以为特定应用提供紧凑、快速的解决方案，但成本会高很多。

如果定制设计一款射频滤波器，选项包括分布式微带线结构或集总式 LC 滤波器两种结构。如果系统工作频率低于 3 GHz 且尺寸是主要限制条件，并且终端产品硬件使用经济高效的 FR-4 PCB 时，通常建议选择集总式 LC 滤波器类型而不是分布式微带线结构。

- 评估滤波器的实际性能

最后，为了确保射频滤波器满足所需的规格和符合设计预期，我们需要通过实际测试评估其各项性能参数。这包括使用网络分析仪测量代表回波损耗、插入损耗和带外衰减的 S 参数，然后再将其贴片到 PCBA 后使用频谱分析仪或无线综测仪验证产品最终的射频性能。

3.2 设计工具介绍

LC 滤波器设计工具¹是一款用于集总式 LC 滤波器设计和分析的免费在线应用程序，可以通过其计算具有低通、高通、带通或带阻响应的 LC 滤波器电路值，并选择不同的传递函数，例如巴特沃斯、切比雪夫、椭圆函数滤波器等类型。

¹ <https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/lc-filter-design-tool/>

图 3-1: LC 滤波器设计工具设计参数输入窗口

如图 3-1 所示，滤波器属性 ("Filter Properties") 窗口中各设置选项的含义分别如下：

- **Response:** 可以选择四种基本滤波器响应类型：低通、高通、带通和带阻。
- **Type:** 可以选择各种网络合成方法（即不同的幅度响应特性）来实现不同的传递函数，例如前面提到的巴特沃斯、切比雪夫 I 型或 II 型、椭圆函数等。
- **Topology:** 表示无源元件在滤波器中的连接方式，不同的滤波器响应类型会有不同的选项。对于低通和高通滤波器，仅有两个选项来表明第一个组件是串联还是并联连接。而对于带通滤波器则有更多选项供用户选择，因为带通滤波器具有更多的拓扑方式。
- **Order:** 滤波器设计中使用的电抗元件（用于低通和高通滤波器）或 LC 谐振器分支（用于带通和带阻滤波器）的总数，供用户选择的滤波器阶数最高可达 20。
- **Cutoff Frequency:** 其定义为滤波器的幅度响应从通带幅度下降 3dB 时对应的频率。低通和高通滤波器只有一个截止频率选项，但带通和带阻滤波器类型则会出现下限截止频率和上限截止频率两个选项，设计滤波器时输入对应的值即可。
- **Input Impedance & Output Impedance:** 默认输入输出阻抗值为 50 Ω ，但用户也可以设置任意输入和输出阻抗。
- **Component Values:** 提供了两个选项：精确元件值或标准元件值。默认情况下，LC 滤波器将使用精确的元件值进行合成，并显示理想的频率响应。

然而，实际工程应用中的 LC 元件仅限于一系列标准元件值，并受到可供实现最小元件值的限制。此外，它们还受到制造公差和温度变化的影响。因此，在实施最终设计时，实际元件值通常与仿真值不同，并且可能对滤波器性能产生负面影响。因此，为了对滤波器对这些变化的敏感度进行建模，用户可以将电容和电感限制为标准 E 系列的首选值¹，并设置其最小值，如下图 3-2 所示。

图 3-2: 标准元件值选项输入框

The image shows a web-based configuration interface for an LC filter design tool. It includes fields for 'Input Impedance (Ω)' and 'Output Impedance (Ω)', both set to 50. Under 'Additional Settings', the 'Component Values' dropdown is set to 'Standard'. For capacitors, the 'Capacitor Values' dropdown is set to 'E24 (5% toleranc)' and the 'Min. Capacitor Value' is set to '1.00 pF'. For inductors, the 'Inductor Values' dropdown is set to 'E24 (5% toleranc)' and the 'Min. Inductor Value' is set to '1.00 nH'. There are 'Compute' and 'Reset' buttons at the bottom.

最后，我们可以将这款简单的在线 LC 滤波器设计工具自动生成的滤波器网络模型导出为详细的 S 参数文件或时域瞬态响应文件以进行进一步的分析，这使得我们能够执行更多贴近实际的操作，比如修改电路原理图并编辑元件值为工程中实际可得的元件值，并模拟工程中电感、电容所具有的有限品质因数和寄生参数，然后基于实际的 LC 元件模型进行 S 参数分析和瞬态响应分析等。

该在线 LC 滤波器设计工具可以导出为两种开源仿真工具 LTSpice² 和 Qucs³ 支持的格式。它们均可免费在线下载，如需了解更多信息，请访问其官网。

3.3 低通滤波器设计实例

正如另一篇应用笔记《Apollo Bluetooth Low Energy SoC 射频阻抗匹配指南 V1.0》中所述，射频前端匹配网络建议使用低通结构的 L 型、Π 型或 T 型拓扑结构。因此，对于射频前端滤波网络的最佳选择是设计一种低通滤波器与现成的匹配网络相结合。如前所述，滤波器阶数等于低通滤波器中使用的电抗

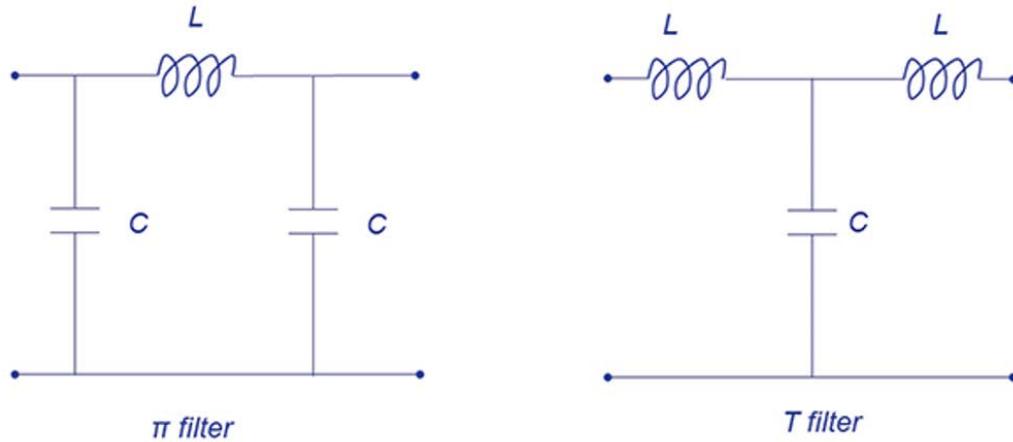
¹ https://en.wikipedia.org/wiki/E_series_of_preferred_numbers

² <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

³ <https://qucs.sourceforge.net/>

元件的总数。图 3-3 分别给出了三阶 π 型和 T 型低通滤波器的配置方式。接下来，我们将分别使用巴特沃斯和切比雪夫网络合成方法来设计三阶低通滤波器并检查其是否满足设计预期。

图 3-3: 低通 π 型和 T 型滤波器拓扑结构



射频滤波器的设计目标是在初始阶段根据实际应用需求确定的，并在大多数情况下，设计目标需要根据最初的射频测试结果进行动态调整或修改。第一个设计原则是保证工作频率范围内的插入损耗尽可能低，而在谐波频率下的衰减和抑制尽可能大。对于 2.4 GHz 频段 Bluetooth Low Energy 应用，我们首先可以采用以下几个滤波器特性参数作为设计目标。

- 工作频段内的回损 (2.4 ~ 2.5 GHz) : 至少低于 -20 dB
- 工作频段内的插损 (2.4 ~ 2.5 GHz) : 尽量小于 0.5 dB
- 二次谐波的抑制 (4.8~5.0 GHz) : 至少大于 10 dB
- 三次谐波的抑制 (7.2~7.5 GHz) : 至少大于 20 dB

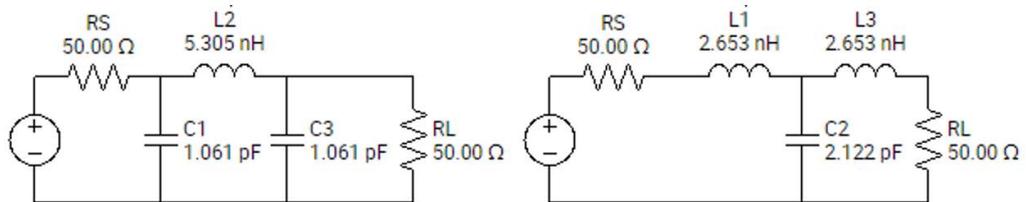
如上所述，回波损耗对应于二端口网络中的 S_{11} 参数，通带插入损耗和带外衰减对应于 S_{21} 参数。这样，我们就可以方便地利用 S 参数模型进行分析。

1. 巴特沃斯滤波器设计示例

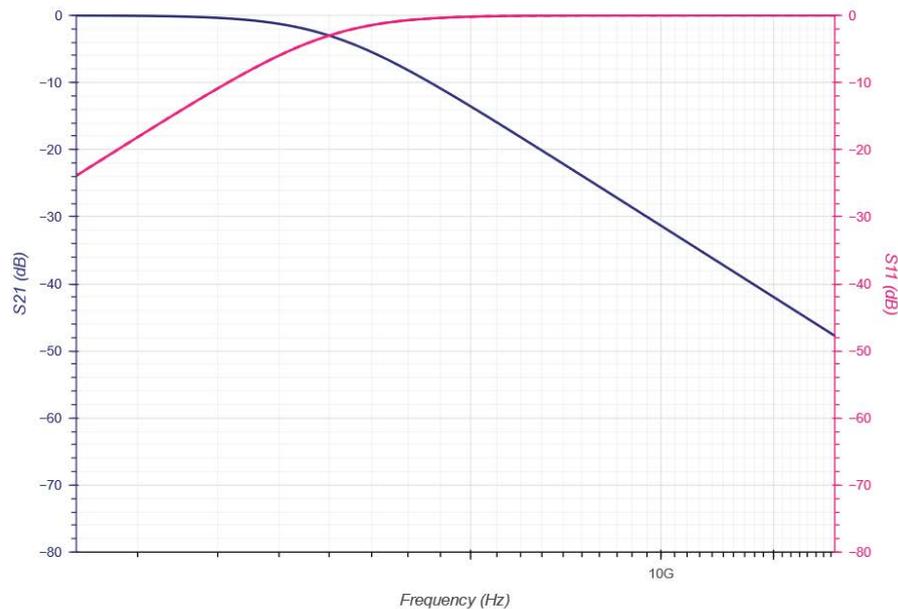
该例子中分别使用 π 型截面和 T 型截面对三阶巴特沃斯低通滤波器进行建模。考虑到巴特沃斯滤波器从通带到阻带的滚降速率较慢，因此必须将截止频率设置为一个较高的值以尽量减小插损，否则，工作频段的插损将会变大，对于有用信号来说变得不可接受。另一方面，如果截止频率设置得远高于工作频率，可能导致带外衰减又将难以满足要求。因此，需要在各种设计参数之间进行权衡。在此示例中，“Filter Properties” 窗口中的各种参数设置如下图 3-4 所示。“Topology” 选项框中的 “Shunt First” 表示 π 型拓扑结构，如下图左半部分所示；而 “Series First” 表示 T 型拓扑结构，如下图右半部分所示。

图 3-4: 三阶巴特沃斯低通滤波器设计参数设置

然后点击 **Compute** 按钮，将会立刻生成分立式 LC 滤波器电路原理图，分别如下图 3-5 所示。需要注意的是，这些 LC 元件值是按照精确且理想的值计算的，因此我们在实际建模时需要将其替换为实际中最接近的电容和电感标准值。

图 3-5: 生成的 Π 型和 T 型巴特沃斯低通滤波器原理图

如下图 3-6 所示， S_{11} 和 S_{21} 频率响应曲线也是通过相应的设计参数设置自动生成的， Π 型拓扑和 T 型拓扑的仿真结果基本一致。从 S 参数频率响应曲线观察，截止频率位于 S_{11} 和 S_{21} 响应曲线的交点处。 S_{21} 响应曲线表明二次和三次谐波频率的抑制刚刚满足设计要求，但工作频率范围内的插入损耗超过 1 dB，高于预期。同时，工作频段内的 S_{11} 大于 -10 dB，这意味着回波损耗过高。

图 3-6: 三阶巴特沃斯低通滤波器 S_{11} 和 S_{21} 仿真结果

因此，三阶巴特沃斯低通滤波器由于其固有的慢滚降特性，无法很好地实现上述的设计目标。有两种方法可以改善这种情况：一是增加低通滤波器的阶数，但这意味着需要添加更多的 LC 无源元件，这在日益紧凑的 PCB 电路设计中可能无法满足。第二种方法是利用另一种低通滤波器网络合成设计方式尝试是否能够改善。

2. 切比雪夫滤波器设计示例

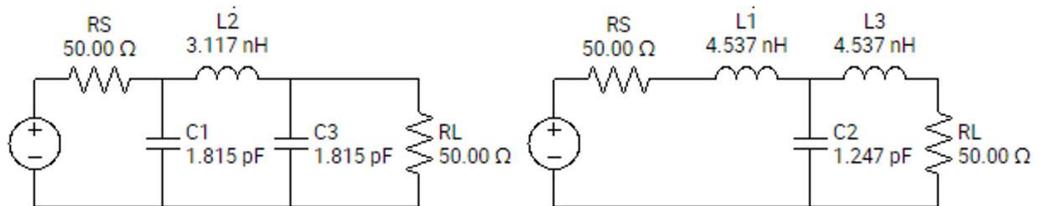
同样，下面我们也利用切比雪夫网络综合法分别创建 Π 型和 T 型两种拓扑结构来设计三阶低通滤波器。“Filter Properties” 窗口中各种选项设置如下图 3-7 所示，切比雪夫滤波器设计类型中会多出一项名为 “Passband Ripple” 的选项，表示设置通带纹波的大小。请注意，此处的截止频率需要设置为比巴特沃斯滤波器更低的值，因为它从通带到阻带的过渡更快。这两项设置是切比雪夫滤波器和巴特沃斯滤波器之间的主要区别。

图 3-7: 三阶切比雪夫低通滤波器设计参数设置

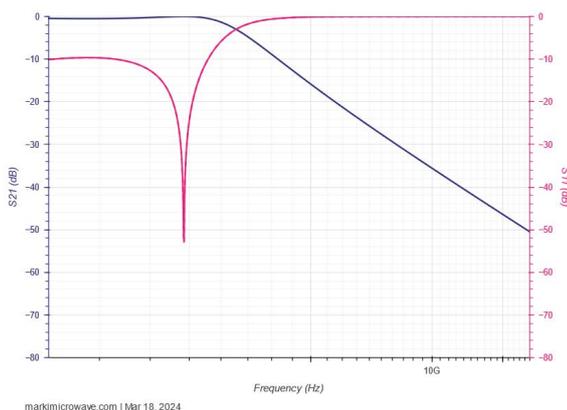
The figure shows two side-by-side screenshots of a filter design software interface. Both panels are titled 'Filter Properties' and contain the following settings:

- Response:** Lowpass (dropdown)
- Type:** Chebyshev (dropdown)
- Topology:** Shunt First (left) / Series First (right) (dropdown)
- Order:** 3 (dropdown)
- Cutoff Frequency:** 2.8 GHz (input field)
- Passband Ripple (dB):** 0.50 (input field)
- Input Impedance (Ω):** 50 (input field)
- Output Impedance (Ω):** 50 (input field)
- Additional Settings:** Component Values: Exact (dropdown)
- Buttons:** Compute (pink), Reset (grey)

分立式 LC 切比雪夫低通滤波器电路原理图将通过上述仿真参数设置自动生成，分别如下图 3-8 所示。

图 3-8: 生成的 Π 型和 T 型切比雪夫低通滤波器电路原理图

S_{11} 和 S_{21} 频率响应曲线也会根据所用精确且理想的 LC 元件值自动生成，如下图 3-9 所示。根据仿真结果，工作频段内的 S_{11} (回波损耗) 低于 -30 dB, S_{21} (插入损耗) 在通带内会有变化但总体低于 0.5 dB。同时，二次谐波的抑制低于 -15 dB, 三次谐波的抑制低于 -25 dB。

图 3-9: 三阶切比雪夫低通滤波器 S_{11} 和 S_{21} 仿真结果

从两个例子的对比可以看出，不考虑 LC 元件值的差异，切比雪夫低通滤波器类型似乎比巴特沃斯滤波器更适合 2.4 GHz 频段 Bluetooth Low Energy 应用，因为它可以在回波损耗和插入损耗之间达到一个更好的平衡。

下一步是导出基于理想 LC 元件模型自动生成的滤波器设计网络，以进行进一步的建模和仿真分析。“Export” 导出对话框如下图 3-10 所示，如上所述支持两种开源的电路仿真工具：LTSpice¹ 和 Qucs²。导出操作的目的是使用最接近仿真元件值的工程中可得的电容和电感对之前的滤波器设计重新进行建模，并充分考虑它们在应用于射频电路时带来的寄生效应，以得到更精确的结果。

对于这两个电路仿真器，“Export” 导出对话框将创建它们分别支持的文件格式，其中包括滤波器电路原理图以及自动生成的仿真设置参数。然后，我们便可以使用工程中可用的标准元件值修改上述仿真生成的准确元件值，并选择要执行的仿真类型，比如 S 参数分析或时域瞬态响应分析。

¹ <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

² <https://qucs.sourceforge.net/>

图 3-10: LC 滤波器设计工具导出对话框

Export to LTSpice
LTSpice is a free circuit simulator available for download on analog.com.
For more info on how to export and use LTSpice for filter simulation click [here](#).

Simulation Type: S-Parameters
Finite Inductor Q Factor:
Monte Carlo:

Export LTSpice

Export to Qucs
Qucs is an open-source circuit simulator available for download on qucs.sourceforge.net.
For more info on how to export and use Qucs for filter simulation click [here](#).

Simulation Type: S-Parameters

Export Qucs

3.4 带通滤波器设计实例

与低通或高通滤波器类型相比，相同滤波器阶数的带通滤波器需要双倍数量的元件。因此，在正常情况下，对于电路板尺寸紧凑的设计，不建议使用由集总 LC 元件构建的带通滤波器。当然还有其他一些限制因素，例如实际可用的元件值，限制了分立式 LC 带通滤波器的应用。下面给出带通滤波器的设计示例来说明这些限制。

我们这里分别采用巴特沃斯法和切比雪夫法设计一个 2.4GHz ISM 频段适用的三阶带通滤波器。如下图 3-11 所示，巴特沃斯滤波器设计参数设置如左半部分所示，切比雪夫滤波器设计参数设置如右半部分所示。

图 3-11: 两种类型三阶带通滤波器的设计参数设置

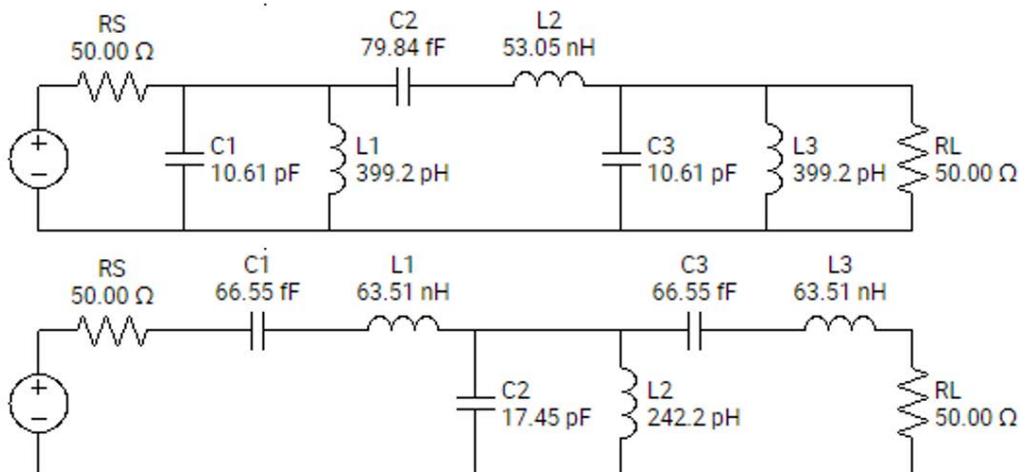
The image shows two side-by-side screenshots of a filter design software interface. Both screenshots show the 'Filter Properties' section with the following settings:

- Response:** Bandpass
- Type:** Butterworth (left) / Chebyshev (right)
- Topology:** Conventional, Shunt First (left) / Conventional, Series First (right)
- Order:** 3
- Lower Cutoff Frequency:** 2.3 GHz (left) / 2.35 GHz (right)
- Upper Cutoff Frequency:** 2.6 GHz (left) / 2.55 GHz (right)
- Passband Ripple (dB):** 0.50
- Input Impedance (Ω):** 50
- Output Impedance (Ω):** 50
- Additional Settings:** Component Values set to Exact

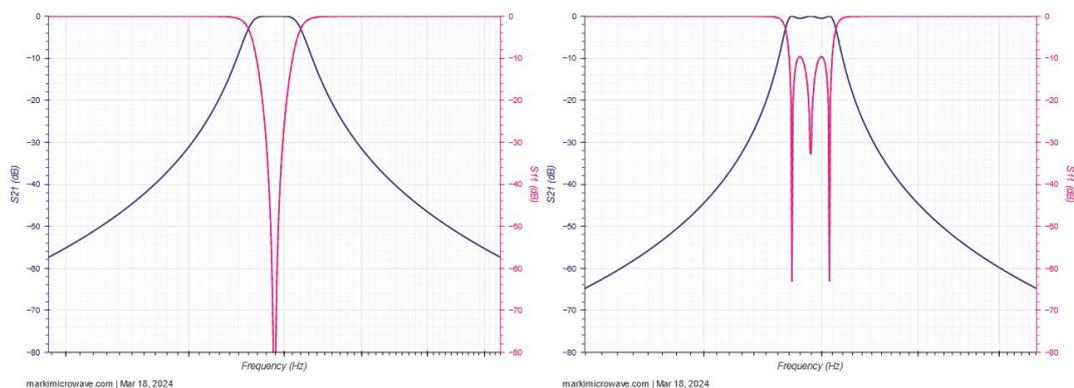
Buttons for 'Compute' and 'Reset' are visible at the bottom of each panel.

通过上述仿真参数设置自动生成的两种方法设计的带通滤波器原理图分别如下图 3-12 所示。可以看出，不仅 LC 元件数量增多了一倍，串联使用的电容、并联使用的电感等仿真元件值太小，在工程中不可用。

图 3-12: 自动生成的两种类型三阶带通滤波器电路原理图



仿真生成的 S_{11} 和 S_{21} 频率响应曲线如下图 3-13 所示。从两者的对比可以看出，对于带通滤波器应用，巴特沃斯滤波器类型似乎比切比雪夫滤波器类型在通带内具有更好的回波损耗和平坦度特性。

图 3-13: 两种类型三阶带通滤波器的 S_{11} 和 S_{21} 仿真结果

因此，除了增加所使用的 LC 元件数量外，带通滤波器很难找到与仿真元件值相匹配或接近的实际电感和电容。事实上，在高频、紧凑型应用中，我们更倾向于直接使用现成的带通滤波器产品，例如之前所述的小型化集成封装的分布式微带线 LC 滤波器、LTCC 陶瓷滤波器、SAW 声表面波滤波器等。

结语

开始射频滤波器设计之前需要仔细考虑各种因素，例如所需滤波器的响应类型、传递函数选择、滤波器拓扑结构、产品结构尺寸限制等，并需要重点评估滤波器的实际性能（例如带内插损和带外衰减等特性）。总之，适用的射频滤波器设计总是需要在各种限制因素之间进行权衡折衷。

本应用笔记首先介绍了一些滤波器基础知识，并说明了如何为基于 2.4 GHz ISM 频段 BLE 的应用设计适用的集总式 LC 滤波器。事实证明，低通 LC 滤波器是最适合小型化产品设计的理想滤波器类型，因为我们可以结合阻抗匹配网络使用最少数量的 LC 分立式元件来实现所需的高次谐波抑制性能。

然而，从本文中给出的设计实例可以看出，即使是针对 2.4GHz ISM 频段精心设计的 LC 低通滤波器也不能提供非常好的滚降特性和带外抑制能力。从通带到阻带的更快滚降通常意味着设计的滤波器必须具有更高的阶数，对应需要采用更多的电抗元件。对于消费电子产品日益小型化的今天来说这显然是无法接受的。在这种情况下，可能更优的解决方案是直接使用那些性能更好但价格相对也更高昂的现成射频滤波器产品。

本应用笔记中给出的设计示例仅供参考，在实际设计应用于射频系统的实用 LC 滤波器时必须根据具体的要求设置不同的设计参数。记住一点，集总式 LC 滤波器设计的基本原则是，在滤波器的性能和规格满足设计和测试要求时，尽量使用更少数量的电抗元件，而没有必要追求更高的性能去增加设计的复杂性。



© 2024 Ambiq Micro, Inc. 版权所有。

6500 River Place Boulevard, Building 7, Suite 200, Austin, TX 78730

www.ambiq.com

sales_china@ambiq.com

+1 (512) 879-2850

A-SOCAPG-DGGA02CN A4 v1.0

2024年4月