

# 基于IPD工艺的无反射带阻滤波器

张俊杰 林立涵 杨亮

中国电科13所

**摘要:** 随着社会经济的快速发展与科学技术的日益进步,对射频系统也提出了越来越高的要求。而滤波器作为射频前端的重要组成部分,其性能、尺寸以及功能性等,将成为评判其好坏的重要参考依据。传统滤波器的工作方式,主要是无损耗或是低损耗,通过带内传输信号,并将带外信号反射至信号源。但是,由于反射回信号源的信号可能会导致出现增益波动等情况,对系统性能产生不良影响,而通过使用无反射带阻滤波器,这些反射信号将会被内部有耗元件所吸收,从而有效提升系统的线性度。采用IPD工艺制作的器件,既能有着更小的寄生参数,以及更高的可靠性,还能利用高频应用,以此来符合无反射带阻滤波器对工艺精度的要求。

**关键词:** IPD工艺; 无反射带阻滤波器; 无源器件

**【DOI】** 10.12252/j.issn.2096-6261.2022.02.195

许多可用的微波滤波器拓扑结构,主要是借助输入端口的射频信号能量的频率,以此来获取其传递函数。但是,由于受到阻带范围内信号功率反射的影响,所以将会造成滤波器在其频率处,容易产生无阻输入阻抗,这将会直接影响到整个RF链的有源级的良好性能。在收发信机的内部结构中,其中变频混频器与放大器等就常常会出现这种情况,由于无功负载的存在,将会严重损害其工作性能,并且还会出现频率的功率反射。在该系统中,还会导致整体线性与效率的逐步下降,不仅会出现整个手机完全故障的情况,还可能使雷达应用程序中接收机致盲。除此之外,对于频率可重构滤波器来说,这个问题将会更加重要,这主要是因为它们的带内输入功率匹配特性,往往会受到耦合元件的色散特征的影响,并且与中心频率调谐息息相关。

## 一、IPD工艺

在一个较为完整的无线通信系统中,无源器件的数量以及占据面积,将会远远超出有源器件。比如,在移动电话产品中,其背板上的元器件数量,已经达到400个左右,其中,有源器件不足20个,其余都是无源器件。再者,在苹果手机的G4产品中,有源芯片为42个,无源元件电容为230个,其中电阻是218个,电感是9个。由此可见,无源器件尺寸的缩减,不仅会影响到整个系统的重量与尺寸,还会在一定程度上关系到在当前产品体积内逐渐增加相应功能。而IPD技术的应用,则利于无源器件的高性能集成,并且在近些年来,已经逐渐成为高性能射频模块设计的重要发展方向。IPD技术主要是按照薄膜工艺或是厚膜工艺,在利用不同的介质材料上,通过逐步形成不同的金属图形,以此来达成具有不同性能无源器件。通过使用IPD技术所制成的器件,通常会具有相对较好的电性能,比如,以MIM电容为例,通过使用IPD技术,就能制作出更加精准的电阻阻值。另外,将无源器件电感、电阻以及电容等进行有

效融合,就能生产出不同功能的无源器件,其中就包括双工器、滤波器以及功分器等等。与此同时,也能借助IPD技术,集成多个器件,以此来对集成模块化产品进行设计与制造,促使其能够具备不同的电子功能,从而充分实现高集成度的系统级封装<sup>[1]</sup>。

关于IPD技术的应用,通过借助薄膜工艺或是厚膜工艺便可实现。较为典型的厚膜工艺,比如低温共烧陶瓷技术等,在民用通信以及军用电子等诸多领域中,都已经获得非常广泛的应用。由低温共烧陶瓷技术所生产出来的器件,具有成本低、体积小以及可靠性高等优势,但是,其本身也存在着一定的缺陷与不足,比如,在器件生产过程中,通常需要进行低温烧结,而烧结温度一般是在800-900℃左右,所以会对埋置器件有着较高的要求,要求其应具备相对较好的温度耐受力。由于一些有源器件,比如IC芯片,将难以达到这一要求,所以从某种程度上来说,针对有源器件与无源器件的集成,LTCC技术将会起到一定的制约作用。另外,在低温烧结时,陶瓷基板往往会出现严重收缩的情况,这将会对埋置器件的精度产生不良影响。将薄膜工艺与厚膜工艺相比较来说,前者有着更好的精准制程控制能力,不仅能够制成微小线宽的器件,还能进一步提升器件的精准度,再加上还能达到有源器件与无源器件集成的效果,所以将获得广泛推广与应用。

## 二、无反射带阻滤波器的理论推导与电路设计

### (一) 理论推导

为获得无反射带阻滤波器,本文将从一个结构对称的二端口网络作为切入点。所谓对称平面,是指将其分为完全相同的两部分。如果向其不断施加偶模信号,由于两个端口的信号不仅相等,且信号相同,所以,在对称平面上,并不是显示有电流通过,这对于对称平面的线来说,等同于短路,并且在这一过程中,半电路也相当于偶模等效电路,反射系数是 $\Gamma_{\text{even}}$ 。如果不断对其

施加奇模信号，那么由于两端口的信号相同，且恰好相反，所以此时通过对称平面，其对地电压为零，而通过对称平面的节点，等同于对地虚短。在这一过程中，半电路属于奇模等效电路，且反射系数是  $\Gamma_{\text{odd}}$ 。依据线性网络的叠加性，能够得到：

$$\Gamma_{\text{even}} = S_{11} + S_{12} + S_{22} + S_{21} \quad (1)$$

$$\Gamma_{\text{odd}} = S_{11} - S_{12} - S_{22} - S_{21} \quad (2)$$

由此可以得到：

$$S_{11} = S_{22} + 1/2(\Gamma_{\text{even}} + \Gamma_{\text{odd}}) \quad (3)$$

$$S_{21} = S_{12} + 1/2(\Gamma_{\text{even}} - \Gamma_{\text{odd}}) \quad (4)$$

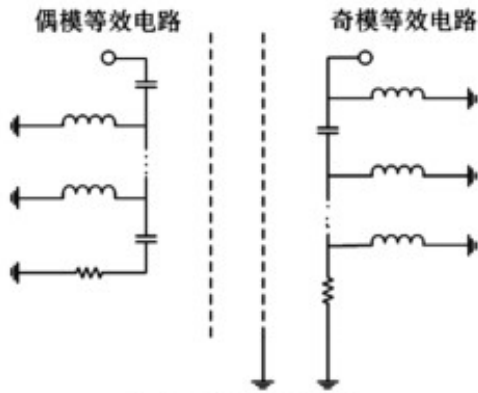
此外，要想得到无反射带阻滤波器， $S_{11}$ 和 $S_{22}$ 应为0，继而得到：

$$S_{21} = S_{12} = \Gamma_{\text{even}} = \Gamma_{\text{odd}} \quad (5)$$

由(5)可知，在偶模等效电路中，反射频率相当于最终两端口网络传输的频率，由此也足以说明，偶模等效电路与最终全两端口网络相比较来说，其阻带与通带都是相反的。如果将低通滤波器作为主要设计对象，那么就需要将高通滤波器视为偶模等效电路<sup>[2]</sup>。

(二) 电路设计

本文主要是将三阶高通滤波器作为设计目标，如图(a)所示，将对偶作为奇模等效电路，并始终为高通。在这一阶段，无法得出奇偶模等效电路，关于对称平面对称。因此，要想获得对称网络，就需要在不更改原有网络输入阻抗与频率响应的基础之上，针对电路做出以下变化，通过这种方式来恢复对称结构。在最后电容位置，以及串联的终端电阻位置，对偶模一侧进行交换，并在奇模一侧，改变首要的电感，以及终端电阻的接地连接，从绝对接地逐步过渡到虚拟接地。在偶模一侧，即输入节点与对称平面之间，加入一个新的电感；与此同时，在也要在电阻与对称平面之间，增加一个开路连接线；在奇模一侧与对称平面到地之间，增加一个电容。经过上述改变后，就能获得无反射带阻滤波器，接着，再按照这一目标指数，以获取元件值。



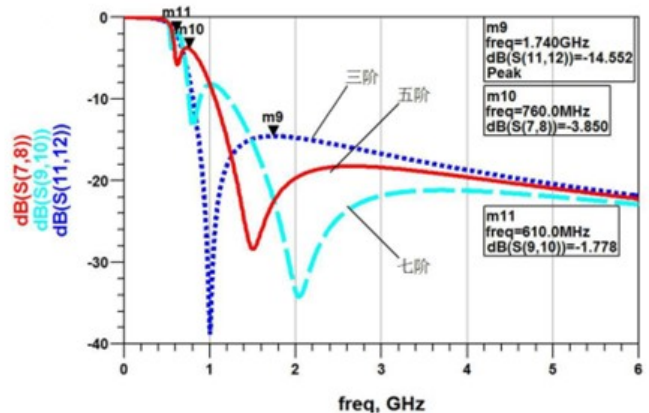
(a) 三阶高通滤波器

三、基于IPD工艺的无反射带阻滤波器的相关研究

在自然界中，频谱资源是非常有限的，再加上近些年来，随着无线通信技术的快速发展，在也一定程度上导致使频谱资源逐步呈下降趋势递减。基于此，只有注重开发出更高频段的频谱资源，才能最大限度的满足科技快速发展的需求，同时也能利于滤波器的研究与开发。滤波器的种类是多种多样的，通常会结合实际应用环境与要求，在此基础上选用更加适合的滤波器类型<sup>[3]</sup>。

(一) 增加无反射带阻滤波器的阶数

针对阻带抑制14.47dB，首先需要考虑到的一点就是通过添加无反射滤波器的阶数，以此来提升其阻带抑制。要想进一步增加奇模与偶模等效电路的阶数，还需要通过使用更高阶的无反射滤波器。比如，对于低通滤波器来说，在增加到五阶和七阶无反射低通滤波器的拓扑结构，这种情况下取值频率主要是零点位置，为 $g_k=1$ ，通过计算能够得出，不同元件值的数值大小。



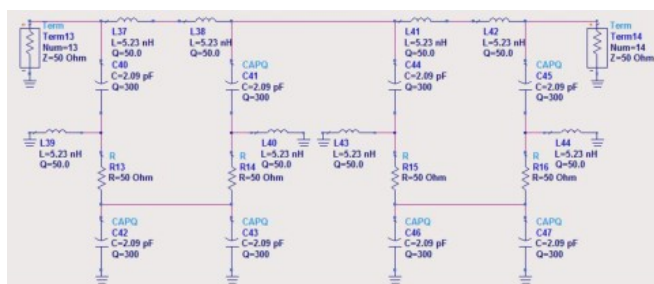
如上图所示，这是三阶、五阶以及七阶无反射低通滤波器仿真，在插入损耗仿真结果曲线图，由此可知，随着阶数的不断升高，过渡带也会随之变得越来越陡峭，且滤波器的矩形度也会变得越来越好。然而，阻带抑制则为14.55dB，3.85dB，1.778dB，带外峰值也逐步呈上升趋势增长。总的来说，通过增加无反射滤波器的阶数，就是牺牲带外抑制，以此来进一步提升滤波器过渡带的陡峭度。

(二) 无反射滤波器的级联

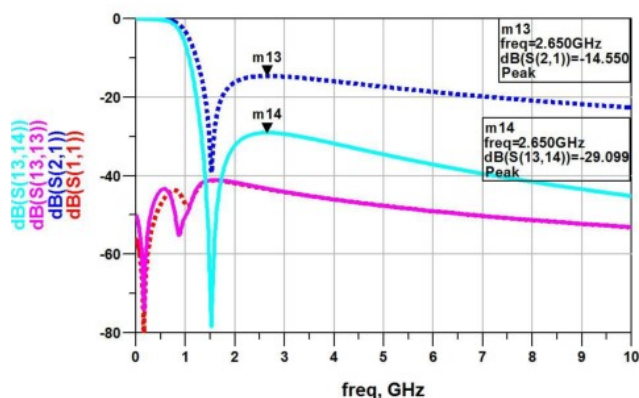
增加阶数，虽然能在一定程度上提升无反射滤波器的矩形度，但是也会随之造成更高的带外峰值，这种情况对于高阶无反射滤波器来说，往往会不可取的。基于此，通过运用级联三阶无反射滤波器，以此来提升该滤波器的性能，便能有效解决这一问题。在理论层面上，无反射滤波器是完全能够匹配的，并且整个网络也都是属于线性的，所以，就能直接将其与级联进行有效融

合，在每一级级联中，都能在阻带中，提供14.47dB的抑制。除此之外，关于级联的应用优势，主要体现在这些级联的滤波器，并不一定非得是相邻的，甚至可以分散至整个信号路径中，从而更好的符合动态范围与隔离需求<sup>[4]</sup>。

1. 无反射低通滤波器的级联。在级联后，电路始终是无反射状态，并且级联后的传输系数，将会达到单个无反射滤波器的两倍左右。如下图所示，是由电路拓扑两级级联共同组合而成的，其中，实线部分属于在仿真软件中的仿真结果。

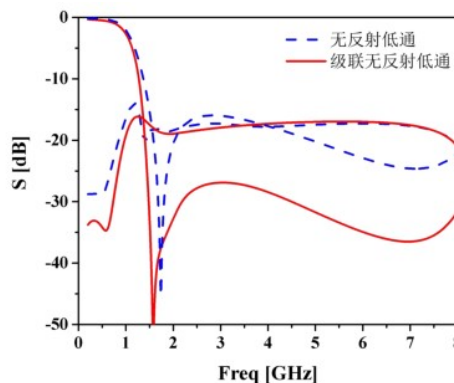


级联无反射低通滤波器



级联无反射低通滤波器仿真结果对比图

通过对仿真结果进行分析，不难发现，级联无反射低通滤波器，其阻带抑制为 29.09dB，与单级无反射低通滤波器相比较来说，恰好是它14.55dB的两倍。将实线与虚线进行对比，还能发现，在插入损耗级联后，带外抑制将会持续增加，但与此同时，回波损耗却始终保持不变，从电路拓扑上，验证出高抑制无反射低通滤波器具备良好的可行性。接着，将图中三阶无反射低通滤波器的三维模型，进行级联验证，高频电磁场的仿真曲线，通过图中的实线来表示，而单级三阶无反射低通滤波器的仿真曲线，则用虚线来表示，经过对比后发现，在级联后，带外抑制峰值连续翻倍，与回波损耗曲线基本相似，从而有助于达成高抑制无反射低通滤波器<sup>[5]</sup>。



仿真结果对比图

结论：当滤波器级联的阶数相同，类型相同时，带外抑制将会翻倍，且回波损耗始终保持不变状态。

无反射低高通滤波器的级联。在无反射低通滤波器的级联中，能够发现，回波损耗始终处于不变状态，插入损耗主要是受到级联滤波器不同类型的影响。因此，将级联无反射低通滤波器与高通滤波器结合在一起，使其共同构成无反射带通滤波器，从而有助于形成超宽带无反射滤波器，但是，带外抑制却始终无法增加。

### 结束语

综上所述，结合无反射理论及其变换，在此基础上设计出一款基于IPD工艺技术的无反射带阻滤波器。其中，在无反射带阻滤波器中，其中心频率是4.11GHz，3dB阻带带宽控制在1.52–6.70GHz之间，带内回波损耗保持在0.7dB以内，带外抑制大于等于14.47dB，带内外均有着相对较好的吸收性，且模型尺寸仅有0.9mm×1mm×0.1mm。这种滤波器具有体积小以及阻带信号吸收较好等优势，不仅能有效避免不同信号路径之间的干扰，同时也能在许多反射信号敏感的电子系统中，最大限度的发挥出其本身的应用优势。

### 参考文献

- [1] 史毅, 沈奥龙, 张正江, 胡文, 章纯, 洪智慧, 闫正兵. 孤岛微电网中二阶滤波器与PID控制器一体化参数整定方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (03): 180-186+200.
- [2] 吴翔, 李超, 刘志恒, 韩耀飞, 何凤有. 带有LC正弦波滤波器的内置式永磁同步电机电流控制器谐振抑制参数设计[J]. 电工技术学报: 1-12.
- [3] 吴孙勇, 吕晓燕, 薛秋条, 周于松. 基于STGP-ETCBMeBer滤波器的扩展目标跟踪算法[J]. 信号处理: 1-17.
- [4] 赖明彬, 耿敏明, 谭伊璇, 冯瑶, 何万才, 蒋佳, 刘婧, 张振荣. 基于级联微环辅助Mach-Zehnder干涉仪的带宽可调谐光滤波器的设计[J]. 光学学报: 1-18.
- [5] 李瑞权, 朱路, 刘媛媛. 滤波器弹性的深度神经网络通道剪枝压缩方法[J]. 计算机工程与应用: 1-11.