

运用阻抗调谐以最大限度地提高5G 手机的天线性能

摘要

随着 5G 的到来，手机中的 RF 设计也日益愈加复杂，使得手机制造商更难满足严格的性能要求。由于手机包括更多天线，支持更多频段，在所有使用条件和频率下保持天线性能变得越来越具有挑战性。阻抗调谐器可在不同的条件下，在多个频段之间，最大限度地提高 RF 功率传输，能够帮助解决此问题。因此，阻抗调谐器越来越多地用于优化性能，降低设计成本并满足 5G 要求。本白皮书介绍如何使用阻抗调谐器，并讨论不同阻抗调谐器设计的相对优势。此外还通过多个示例，演示在典型的实际应用场景中如何使用阻抗调谐来显著改善性能。

引言

过去几年，手机中的 RF 复杂性一直呈指数级增长，而 5G 进一步加剧了移动设备设计的复杂性。这些使得满足性能要求变得更困难，特别是移动设备中分配给 RF 技术的空间有限的情况下。

最大限度地提高天线性能是关键挑战之一。手机制造商正在添加更多天线来处理不断扩增的频段和无线标准。随着更多天线置入手机，其性能更易受外部条件的影响，如手机接近不同材料以及用户握持手机的方式等。在这些条件下，天线阻抗可能发生变化，导致天线与 RF 前端 (RFFE) 之间的阻抗失配。当天线在不同频段通信时，天线阻抗也会发生变化。阻抗失配减少了 RFFE 和天线之间的 RF 功率传输，需增加传输功率来补偿损耗，因此会影响手机的整体 RF 性能并缩短电池使用寿命。

阻抗调谐器通过在不同使用条件下和广泛频率范围内，将天线的阻抗与 RFFE 的阻抗相匹配来解决此问题。这能够最大限度地增加 RFFE 和天线之间传输的 RF 功率，从而帮助智能手机制造商满足不同应用和广泛频率范围的性能要求。

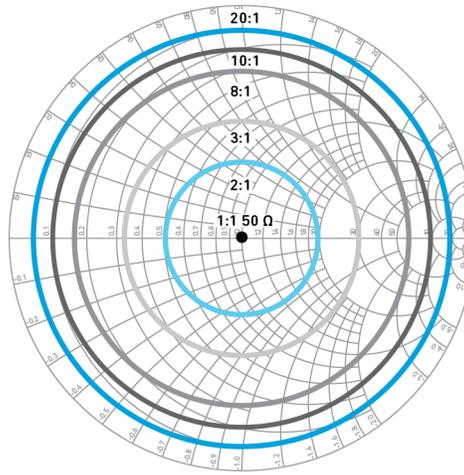
问题：RFFE 和天线之间的阻抗失配

RFFE 阻抗通常是恒定的 50Ω ，但天线阻抗会根据频段和使用条件而变化。当存在阻抗失配时，在 RFFE 和天线之间传输的 RF 功率会减少。例如，当手机传输信号时，并非来自信号源 (RFFE) 的所有可用功率都能传输到负载 (天线)，这可能会导致高达几 dB 的信号损耗。

损耗量取决于 RFFE 和天线阻抗之间的失配大小。图 1 显示系统在不同 VSWR (电压常驻波形无线电) 情况下的损耗。

图 1：VSWR 和阻抗损耗比较。

VSWR	Loss
1:1	0 dB
2:1	0.51 dB
3:1	1.25 dB
6:1	3.1 dB
10:1	4.81 dB
20:1	7.41 dB



QORVO

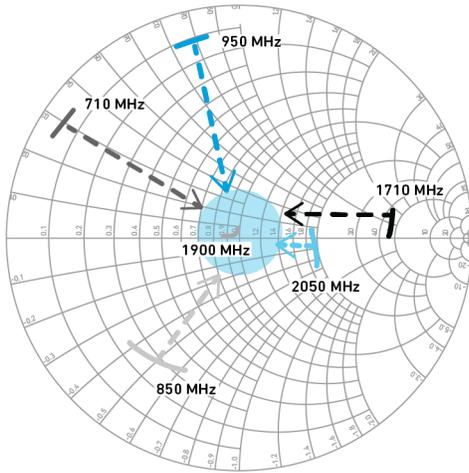
© Qorvo, Inc.

天线阻抗会发生两种变化：静态和动态。

天线阻抗随频率的静态变化

变化的大小将取决于天线设计。当天线在不同频段通信时，阻抗会发生变化，同一频段内不同区域的阻抗也可能不同。图 2 显示在 1900 MHz 频率下匹配的天线；阻抗在其他频率下发生变化，由于阻抗失配而导致损耗。

图 2：阻抗随频率变化而变化。

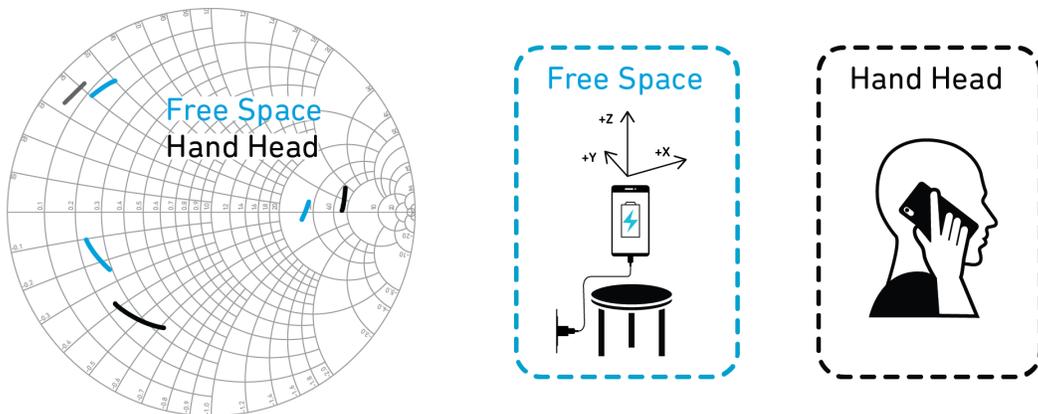


© Qorvo, Inc.

天线阻抗在不同使用条件下的动态变化

天线阻抗也可能动态变化，具体取决于握持手机的方式以及手机是否靠近其他物体。手机上的天线通常主要位于手机的底部和顶部。在具有金属外壳的手机中，天线的主要部分位于手机的外部，以最大限度地提高性能。在一般使用条件下，比如当手机放在桌子上、垂直拿着或用于传统音频对话时，这些天线不会受阻，因此能够最大限度实现其性能。但是，在某些情况下，接近不同的材料也可能导致天线阻抗变化，从而降低天线效率，增加手机中的损耗。在严重的情况下，比如手机横握，双手都挡住天线时，天线阻抗会发生很大的变化。

图 3：手机位置改变天线阻抗。



© Qorvo, Inc.

解决阻抗失配问题

阻抗失配问题的解决方案是在 RFFE 和天线之间插入阻抗匹配网络，以最大化天线和 RFFE 之间的功率传输。

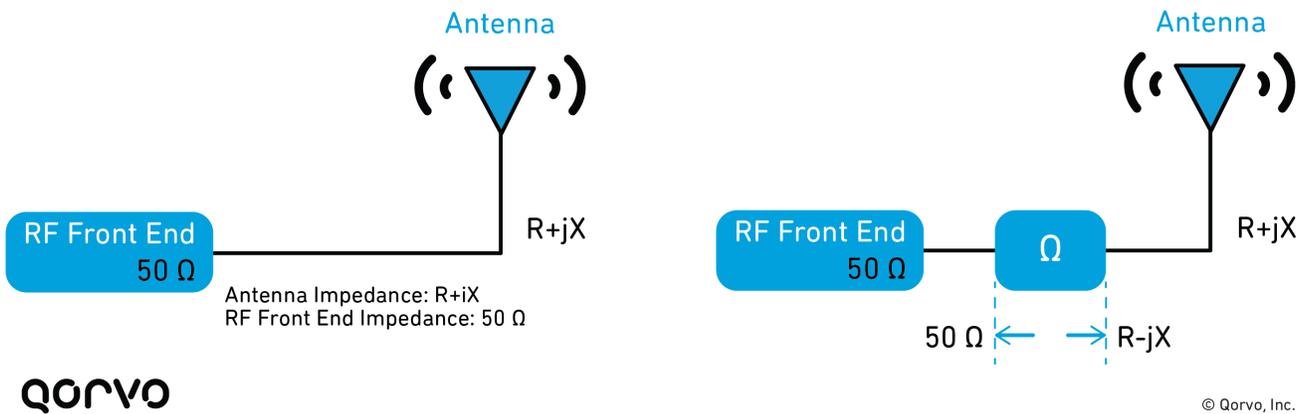
根据最大功率传输定理，当负载阻抗是源阻抗的复共轭时，源阻抗向负载提供最大功率（换句话说，当负载电阻等于供电网络的 Thevenin/Norton 电阻时，将向负载传递最大功率）。

因此，要实现从 RFFE 到天线的最大功率传输，具有 50Ω 源阻抗的 RFFE 的天线阻抗必须为 50Ω 。然而，尽管 RFFE 阻抗在所有频段通常都恒定在 50Ω ，天线阻抗仍随频率和使用条件而变化。要使这两个阻抗一致，RFFE 和天线之间需要使用阻抗匹配网络。

什么是阻抗匹配网络？

阻抗匹配网络是一种通常由电感和电容组成的电路，用于在所需频率范围内使天线阻抗与 RFFE 匹配。

图 4：有/没有阻抗匹配时的阻抗比较。



上述阻抗匹配网络为 RFFE 提供 50Ω 阻抗，从而为天线提供 RFFE 的复共轭阻抗。手机的阻抗匹配网络通常采用电感和电容，形成的网络具有相对较低的损耗，并可实现最大功率传输。传输线和变压器也可用于匹配，但不是匹配手机天线的最佳选择。

固定匹配网络的限制

如果匹配网络仅由固定电感和固定电容组成，则网络的匹配能力仅限于固定阻抗。由于天线阻抗随频率和使用条件而变化，因此固定阻抗覆盖范围有限，仅几个频段或只有一个使用条件能够获得最佳匹配。

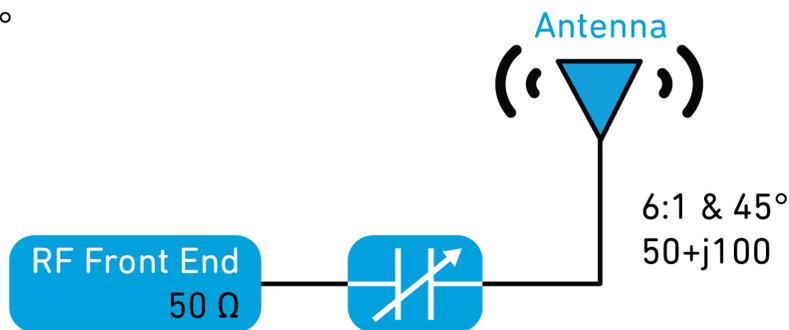
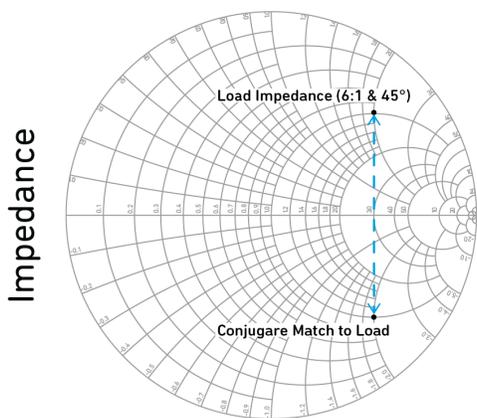
可调谐匹配网络的优势

而另一方面，可调谐匹配网络支持匹配更宽的阻抗范围。可调谐匹配网络由可调谐为不同值的电感和电容组成。

图 5 说明了可调谐电容相对于固定电容的优点。目标是增加 6:1 源 VSWR 和 45°相位的阻抗匹配。在源和负载之间串联添加一个 1.9 pF 固定串联电容可在 830 MHz 下实现最大功率传输，因为在该频率下，它在源和负载之间提供了共轭匹配。但如图 6 所示，1.9 pF 固定串联电容在其他频率下并不提供共轭匹配。

图 5：固定和可调谐电容匹配比较。

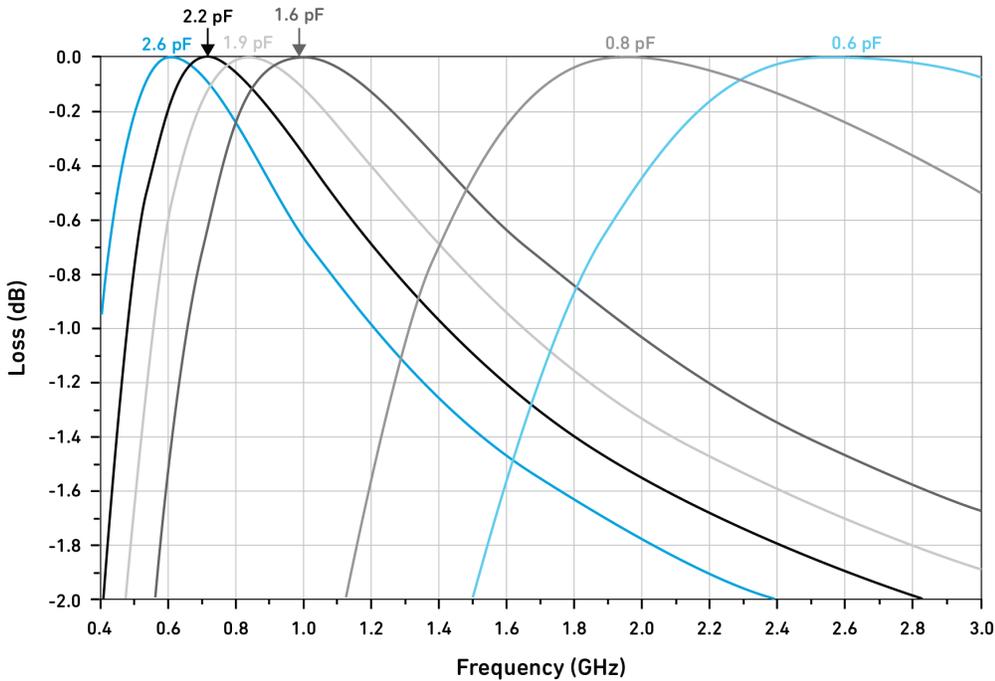
Impedance Matching to 6:1 & 45°



QORVO

© Qorvo, Inc.

图 6 : 6:1 VSWR 和 45 相位频率所需的电容。



QORVO

© Qorvo, Inc.

相比之下，0.6 pF 至 2.6 pF 的可调谐电容能够在非常宽的频率范围内为负载提供复共轭匹配，从而可在多个频段范围内实现最大功率传输。

选择适当的指标来量化可调谐匹配网络的优势

使用正确的指标来量化可调谐匹配网络的优势至关重要，因为一些常用的指标（如回波损耗）无法衡量匹配网络给负载增加了多少传输功率。

回波损耗是入射功率与负载反射功率之比。如果源和负载之间没有匹配网络，则可以假定，负载反射功率减少意味着有更多的功率传输给负载。例如，10 dB 回波损耗意味着 90% 的功率将从源传输至负载。但是，如果使用匹配网络帮助实现源阻抗和负载阻抗匹配，则回波损耗并非是判断传输给负载的功率大小的最佳指标。当使用可调谐匹配网络时，这尤其重要。例如，可调谐匹配网络可配置为有损状态，因此来自源的部分功率会消耗在匹配网络中。这会减少反射功率，由此减少回波损耗，但并不意味着有更多功率传输至负载。

在这种情况下，传感器功率增益是更好的指标。这定义为：

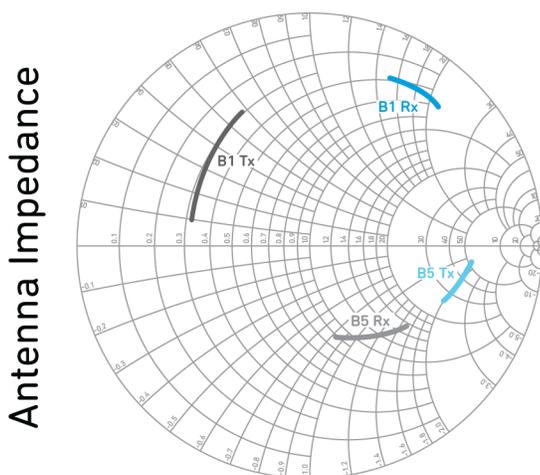
$$\text{Transducer Gain (dB)} = 10 \log \left(\frac{\text{Power delivered}}{\text{Power available}} \right)$$

完美匹配无损系统的传感器增益为 0dB。但是，由于很难在宽频率范围内实现完美匹配，并且任何系统中都会有一些损耗，因此实现 0 dB 传感器增益的目标实际上并不现实。

在频率范围内实现完美匹配的难度

天线阻抗会随频率而变化，因而很难在宽频率范围内将天线与其复共轭匹配。例如，在典型的 FDD 系统中，天线在两个不同的频率下同时发射和接收，而这两个频率由于隔离要求是分开的。下面的图 7 显示天线阻抗在频段 5 和 1 的发射和接收频率之间有何差异。

图 7：频段 5 和频段 1 的发射和接收阻抗。



QORVO

© Qorvo, Inc.

固有损耗

由于组成匹配网络的电容和电感是有损耗的，因此匹配网络在总体上也是有损耗的。在匹配网络中添加更多的元件会增加插入损耗，不仅是元件损耗，PC 板寄生效应也随之增加。

可以使用品质 (Q) 因数更高的电容和电感将损耗降至最低，但是品质因数更高的元件通常更大也更贵。

在大多数情况下，源和负载无需完美匹配。2:1 甚至 3:1 的 VSWR 都是可以接受的。2:1 的 VSWR 将实现 89% 的功率传输，3:1 的 VSWR 将实现 75% 的功率传输。

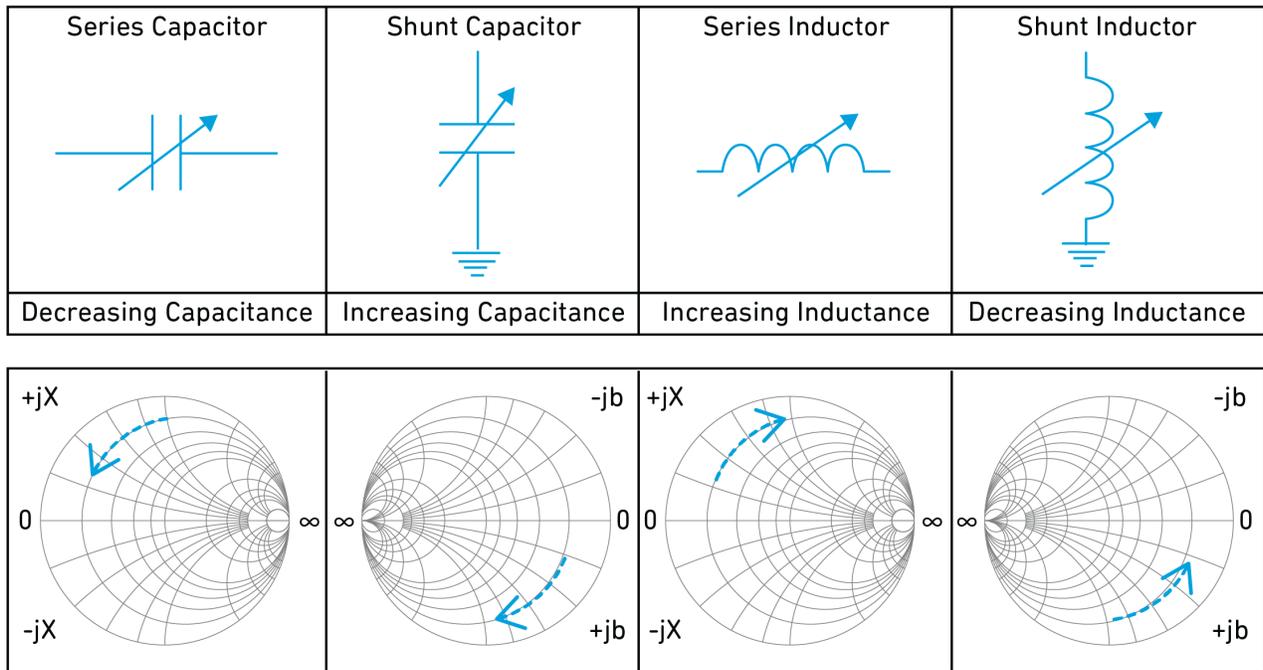
调谐器增益作为阻抗匹配网络的指标

不要仅关注插入损耗，衡量阻抗匹配网络有效性的一个更好的指标是调谐器增益。调谐器增益是有和没有阻抗调谐网络情况下的传感器增益之比。它正成为量化和比较阻抗匹配网络优势的最常用指标。完美匹配 3:1 VSWR 网络的调谐器增益为 1.25 dB。有和没有匹配网络的情况下，调谐器增益指标都会同时考虑天线的增益和损耗。简单网络可提供损耗很低的有限匹配，而复杂网络可提供出色匹配，但损耗较高。使用调谐器增益衡量指标有助于在阻抗调谐器损耗和网络输出之间找到适当的平衡点。调谐器增益与提高天线总体效率直接相关。

使用可调谐电容和电感构建阻抗匹配网络

可调谐电容和电感是创建具有宽阻抗覆盖范围的匹配网络的最佳方式。能够同时调谐电容和电感的网络可在多个方向调整阻抗，如图 8 的史密斯圆图所示。

图 8：可调谐电容和电感史密斯圆图阻抗覆盖范围。



QORVO

© Qorvo, Inc.

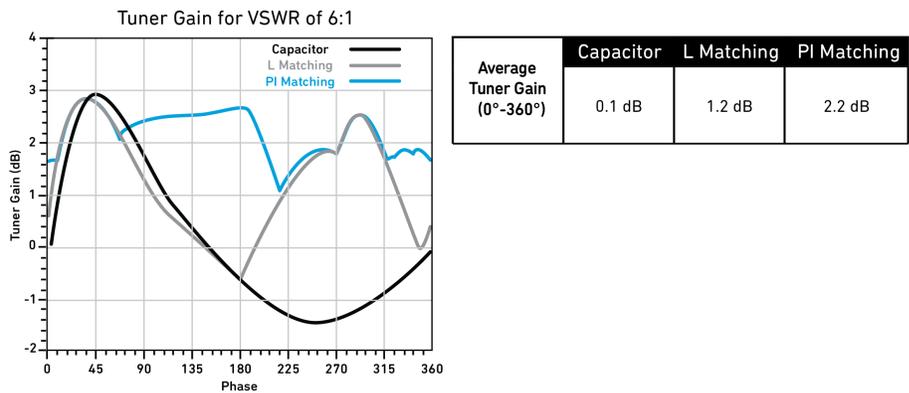
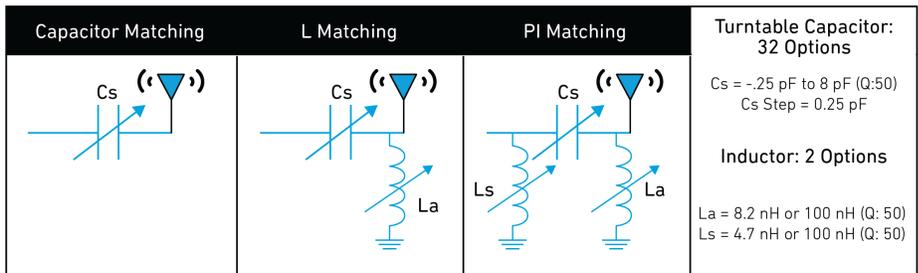
不同类型的匹配网络比较

增加匹配元件的数量可提供更大的史密斯圆图覆盖范围。图 9 比较了同一可调谐电容在三种类型的匹配网络中的使用情况：单独使用、在 L 型匹配设计中使用一个电感以及在 Pi 型匹配设计中使用两个电感。

- 简单的串联可调谐电容 (C_s) 具有有限调谐能力，在电感区域具有最大优势，而在电容区域则有负面影响。
- 添加一个并联电感 (L_a) 可极大地改进电容区域的调谐能力。
- 在 Pi 型匹配网络的输入端再添加一个电感 (L_s)，可使调谐器增益在电感和电容区域都保持在一个相对平稳的水平。

但是，请注意，虽然通过增加调谐元件数提高了平均调谐器增益，但由于这些元件带来的附加损耗，会使最大调谐器增益降低。

图 9：不同类型匹配网络的调谐器增益比较。
(图中所示为 915 MHz 频率下 6:1 VSWR 的测量值)



© Qorvo, Inc.

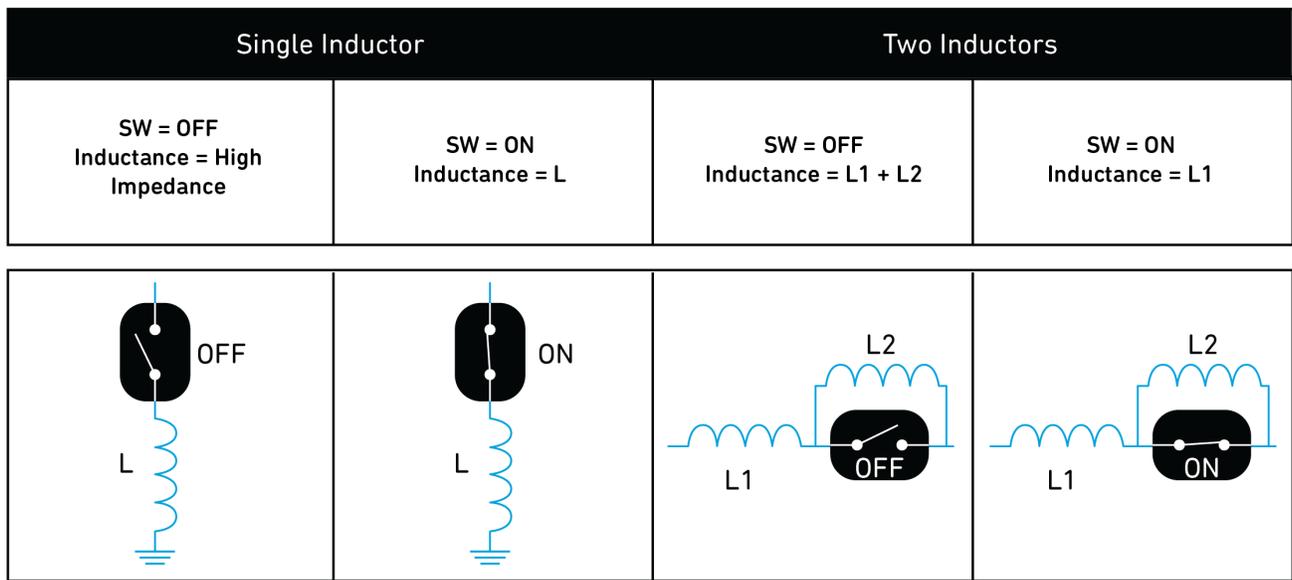
使用开关旁路匹配网络并实现电感调谐

关键在于，当不需要匹配网络时，如何将损耗降至最低？一种方法是添加一个开关来旁路匹配网络。以下几节介绍开关的使用以及展示优势的测量。

可调谐电感

集成调谐电感的损耗较高，尺寸通常也较大。另一种方法是将高品质因数电感和低损耗开关组合在一起，构建一个高性能可调谐电感，如图 10 所示。

图 10：用于可调谐电感和旁路模式的开关。



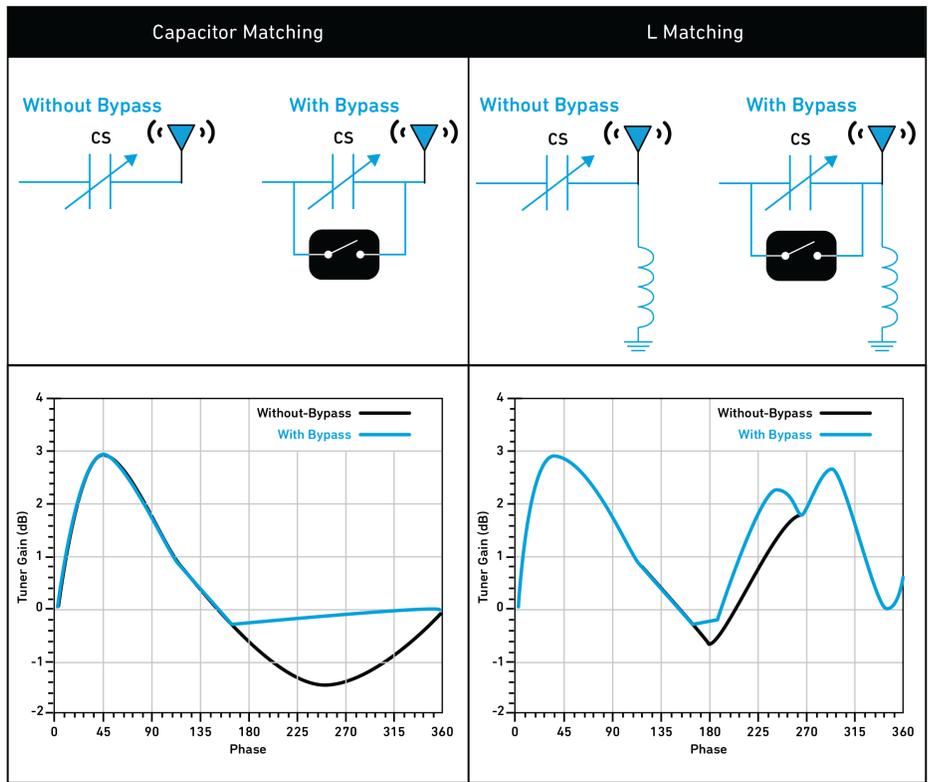
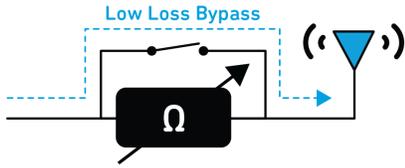
QORVO

© Qorvo, Inc.

旁路模式

如图 11 所示，也可使用开关来旁路串联元件。以天线为例，其阻抗随频率而变化，但在特定频率范围内与 RFFE 匹配。在此频率范围内，不需要阻抗匹配网络，因为这只会增加额外损耗。当天线在此频率范围内工作时，可使用开关来旁路串联元件，帮助将损耗降至最低。图 11 显示使用和不使用旁路开关时调谐器增益的差异。该示例使用插入损耗为 0.2 dB 的开关。

图 11：旁路模式开关网络测量。



QORVO

© Qorvo, Inc.

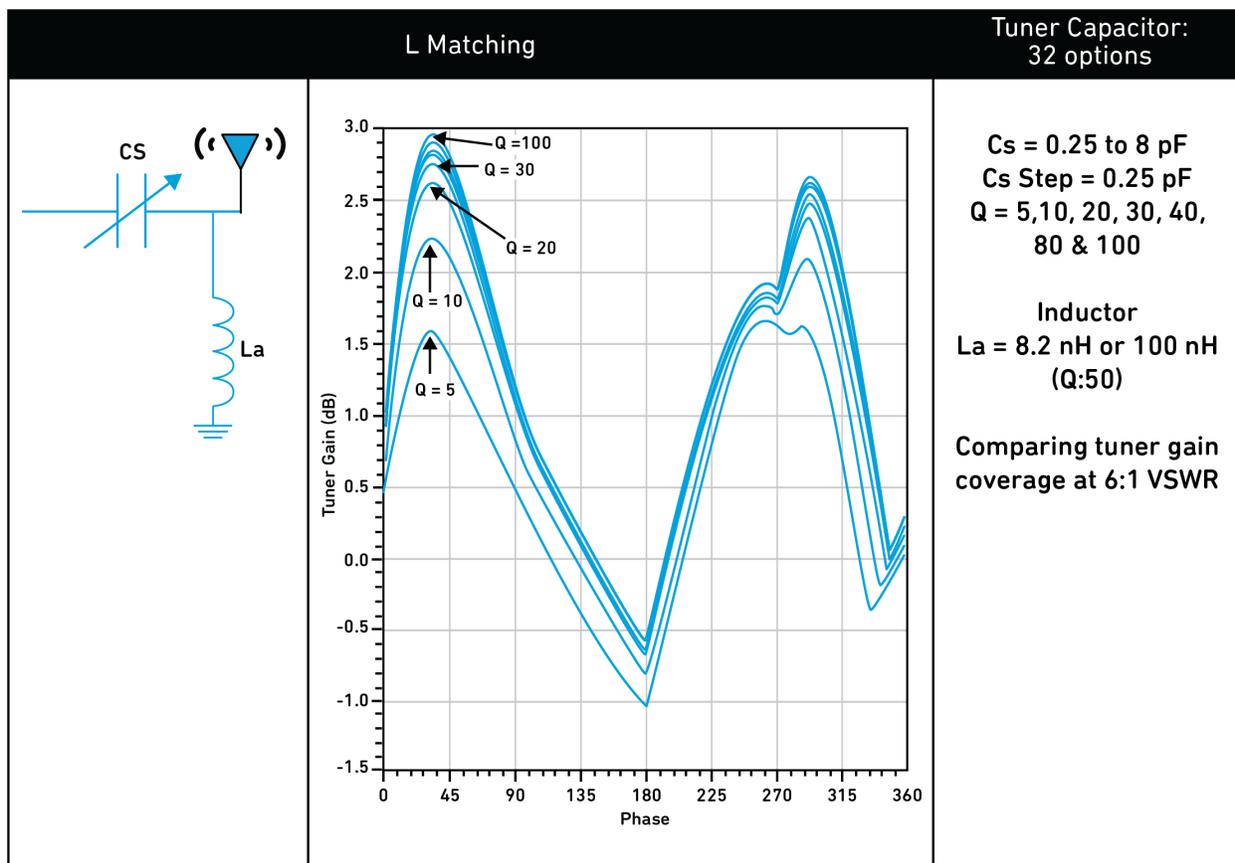
采用旁路开关可减少史密斯圆图中一些区域的损耗。如果是电容匹配，则串联电容对于史密斯圆图的电容区域（ 180° 至 360° ）匹配无效。在此区域中，可打开旁路开关，将网络中的整体损耗降至最低。

品质因数对调谐器增益的影响

阻抗匹配网络中所用元件的品质因数有多重要？如下例所示，提高品质因数可改进调谐器增益——但这种改进达到某一点就开始饱和。高品质因数部件的缺点是尺寸较大，这可能导致整体解决方案尺寸增大。

电容或电感的品质因数是该部件的损耗指标。对于电容（或电感），品质因数是电抗与电阻之比。在理想的电容或电感中，电阻为零，因此使得品质因数无限大。

图 12：在各种调谐条件下的品质因数调谐器增益测量。



QORVO

© Qorvo, Inc.

表 1 : 电容品质因数在 5 至 100 之间变化时，不同网络的平均调谐器增益。

Q Value	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Capacitor	-0.4 dB	-0.14 dB	0 dB	0.06 dB	0.09 dB	0.1 dB	0.11 dB	0.12 dB	0.13 dB	0.13 dB	0.14 dB
L Matching	0.51 dB	0.86 dB	1.06 dB	1.13 dB	1.17 dB	1.2 dB	1.21 dB	1.23 dB	1.23 dB	1.24 dB	1.25 dB
PI Matching	0.81 dB	1.4 dB	1.86	2.05 dB	2.14 dB	2.2 dB	2.24 dB	2.27 dB	2.29 dB	2.31 dB	2.32 dB

QORVO

© Qorvo, Inc.

图 12 和表 1 比较了使用与上例相同的三个匹配电路时对品质因数的影响。对于所有三个网络，电感的品质因数均保持不变，以便在改变可调谐电容的品质因数情况下比较性能。当品质因数从 5 增加到 10，再从 10 增加到 20 时，调谐器增益显著增加。但一旦品质因数达到 30-40 的范围，进一步增加品质因数时，性能改进的幅度就相对较小。

在实际天线问题场景中使用阻抗调谐器的示例

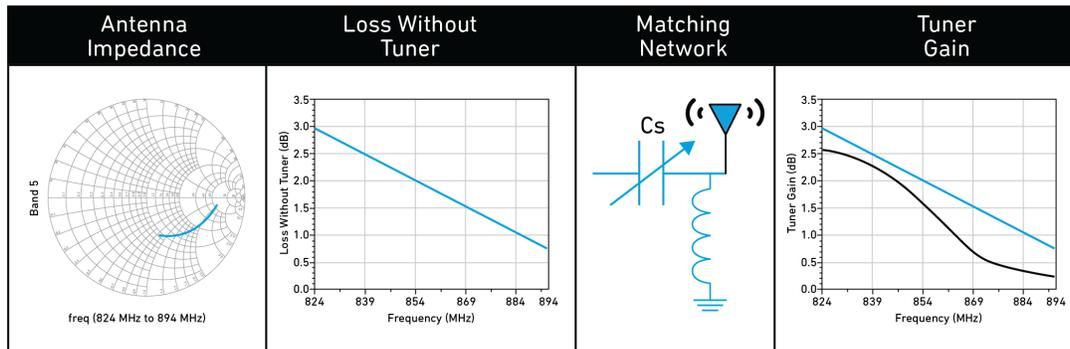
在本部分，我们讨论几个能够使用可调谐阻抗匹配网络提高天线总体效率的实际应用场景。

示例 A：减少频段 5 的损耗

如果没有调谐网络，由于频段 5 的阻抗失配而导致的损耗范围为频段低端的近 -2.9 dB 到频段高端的 -0.8 dB。

通过添加具有固定电感的 L 型匹配调谐网络，可弥补大部分损耗，特别是频段低端 (Tx)，如图 13 所示。

图 13：使用带开关的 L 型匹配调谐网络减少频段 5 的损耗。

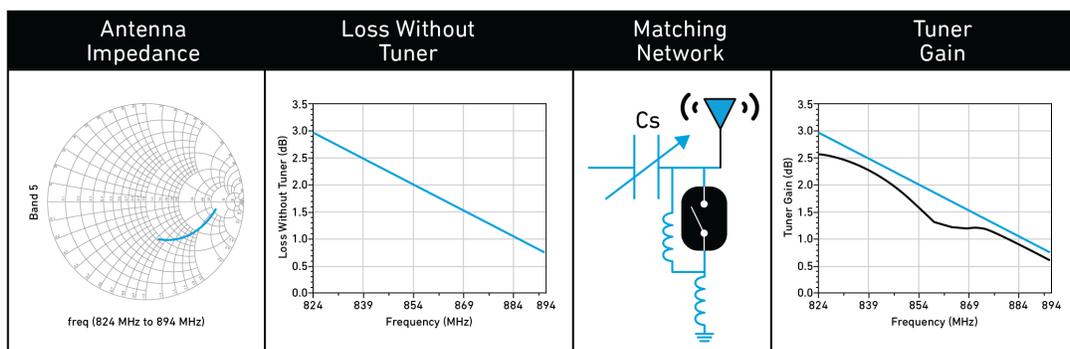


QORVO

© Qorvo, Inc.

通过靠近天线添加电感和开关，可进一步改善频段较高端 (Rx) 的性能，如图 14 所示。

图 14：使用 Pi 型匹配开关调谐网络进一步改善频段 5 的性能。



QORVO

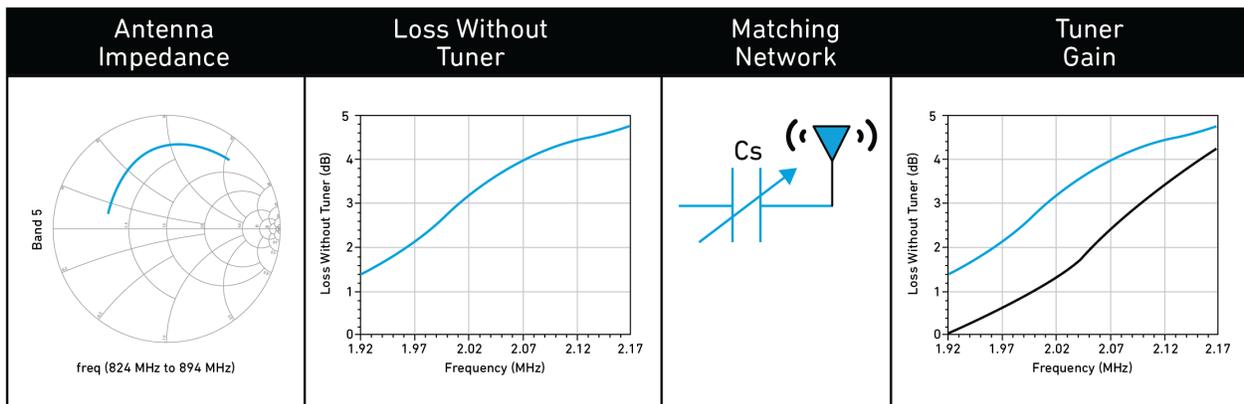
© Qorvo, Inc.

示例 B：减少频段 1 的损耗

由于频段 1 的阻抗失配而导致的损耗范围为频段高端的近 -4.7 dB 到频段低端的 -0.7 dB。

由于阻抗主要位于史密斯圆图的电感区域，因此一个可调谐串联电容就足以弥补大部分失配损耗。

图 15：使用可调谐电容调谐网络提高频段 1 的调谐器增益。

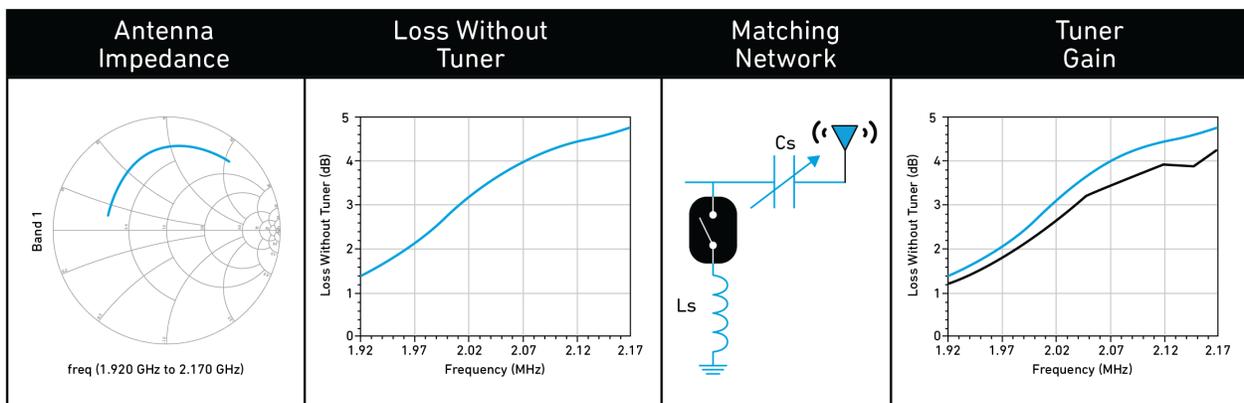


QORVO

© Qorvo, Inc.

在输入端添加并联电感，可在频段低端实现近 1 dB 的性能改善。

图 16：使用 L 型匹配开关网络进一步改善频段 1 的性能。



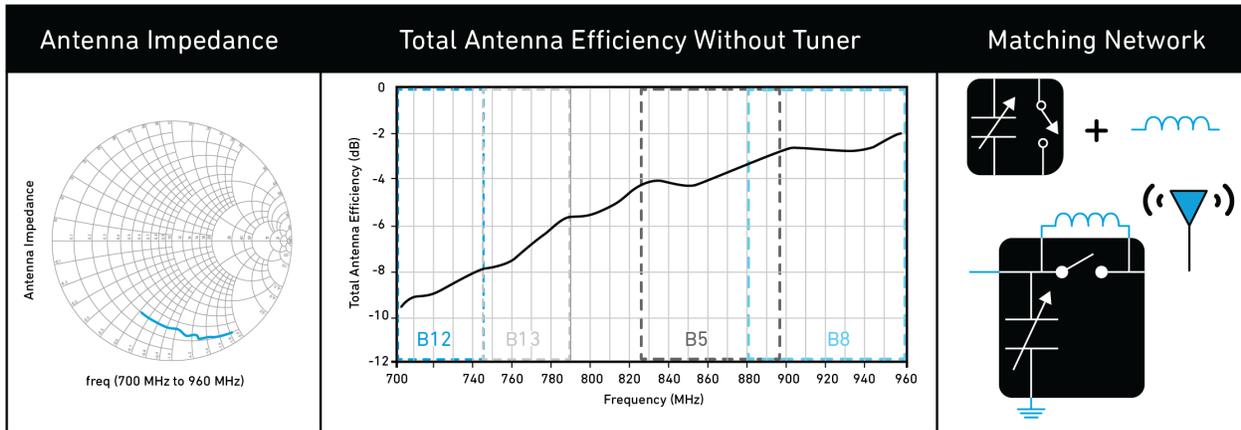
QORVO

© Qorvo, Inc.

示例 C：使用集成调谐器模块来改善多个频段的性能

在此例中，使用集成式阻抗调谐器模块提高多个频段的天线总体效率。由于匹配不佳，频段 12 和 13 的天线性能很低，如图 17 所示。我们选择可调谐 L 型匹配网络来提高性能。该网络由一个集成了可调谐电容和单刀单掷开关以及外部电感的模块组成。

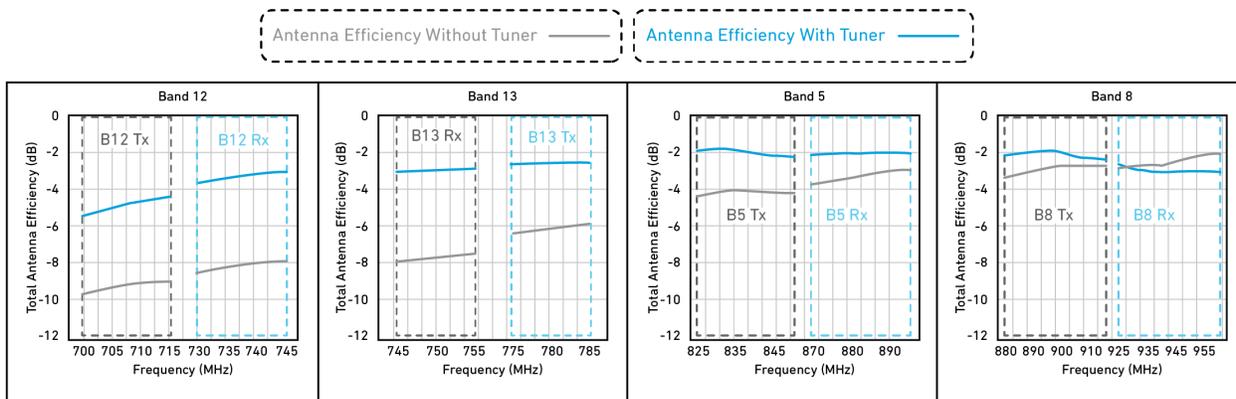
图 17：L 型匹配开关网络的频段效率测量。



© Qorvo, Inc.

借助阻抗匹配网络，频段 12 和 13 的天线总体效率得到大幅提升，如图 18 所示。频段 5 和频段 8 Tx 也有显著改善。由于 L 型匹配网络无法在该阻抗下提供最佳匹配，并且匹配网络存在损耗，频段 8 Rx 的天线总体效率略有下降。

图 18：有和没有调谐网络时的调谐器效率比较。



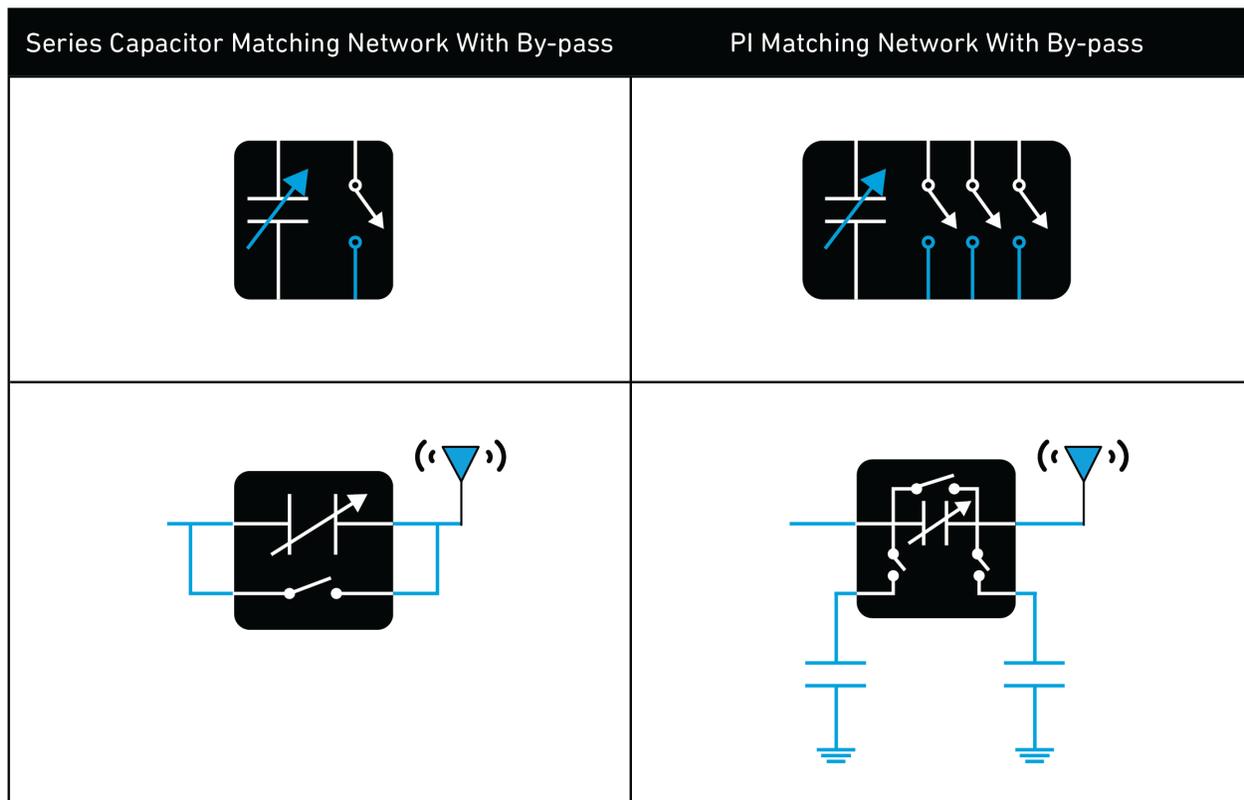
© Qorvo, Inc.

示例 D：比较更复杂匹配网络的优势和劣势

此示例说明使用包括多个调谐元件的更复杂匹配网络的优势和劣势。

图 19 显示两个不同的匹配网络：具有开关旁路的相对简单的串联电容匹配网络和更复杂的 Pi 型匹配网络。

图 19：调谐匹配复杂性比较。



QORVO

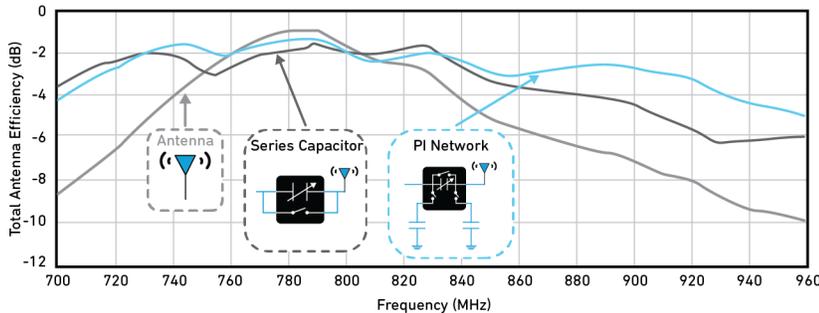
© Qorvo, Inc.

这两个匹配解决方案都提高了 700-750 MHz 和 >820 MHz 频率下的天线总体效率，如图 20 所示。边缘的改进效果显著。

但是，天线在 750 MHz 和 820 MHz 之间匹配良好，如果没有匹配网络，此区域的损耗主要归因于天线的辐射效率。当天线在此区域工作时，使用匹配网络只会增加损耗。因此，为了最大限度地减少损耗，两个网络都要使用旁路开关。

总体而言，与简单的串联电容匹配相比，使用 Pi 型匹配网络的天线效率更高。通过在串联电容任一侧添加两个并联开关和并联电容，可显著改进 880 MHz 至 960 MHz 之间（频段 8）的天线匹配。但是，配置这两个开关和电容后，如果不使用，则会产生更大的损耗，如下例中的两个区域（700-720 MHz 和 800-820 MHz）所示。

图 20：使用不同匹配网络的天线效率比较。



© Qorvo, Inc.

智能调谐

使用传感器反馈、接收信号强度、正向/反射功率和天线阻抗进行智能调谐，可将阻抗调谐网络设置为最佳状态，以便在不同的使用条件下最大限度地提高性能。

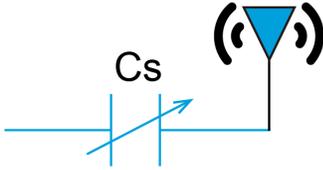
例如，在手机中，主要低频段传输天线位于手机底部靠近充电插口的地方。低频段（700-960 MHz）的天线总体效率通常低于 50%，而当充电电缆连接到手机，或者在游戏模式下用双手握持手机（横屏）时，由于天线阻抗发生变化，天线总体效率会下降到 25% 以下。

在这些使用条件下，可以使用智能可调谐阻抗匹配网络来校正天线响应的偏移。

有些情况下可使用手机内的传感器进行检测。例如，手机中的加速计可识别屏幕的方向。当充电电缆连接到手机时，很容易检测到。也可通过接收的信号强度来估计使用条件。

在手机中，通常根据目前正在使用的工作频段或频率范围来确定调谐器状态。但是，也可使用传感器反馈将调谐状态设置为其他值以提高性能。例如，可根据使用条件将串联可调谐电容的电容值设置为其他值，如图 21 所示。

图 21：手机在每种工作模式下所需的电容。



Free space	Landscape mode	Charging cable	Talking on phone
0.75 pF	1 pF	0.5 pF	1.25 pF

QORVO

© Qorvo, Inc.

并非所有使用条件都能使用传感器来识别，并且始终存在传感器无法准确感测特定条件的可能性。因此，可使用反馈机制来检测天线阻抗以及正向和反射信号功率。然后使用该信息将调谐器设置为最佳状态，从而涵盖广泛的使用条件，并极大地降低出错的可能性。

结论

阻抗调谐器是能够解决移动设备中日益复杂的 RF 所引起的天线效率问题的关键解决方案。通过增加 RFFE 和天线之间传输的 RF 功率，阻抗调谐器可帮助智能手机制造商最大限度地提高不同应用和频段范围的性能。因此，制造商在越来越多的移动设备中集成阻抗调谐器，尤其是向 5G 过渡的情况下。