

433MHz 至 930MHz 和 2.4GHz BOM 可调 PCB 天线



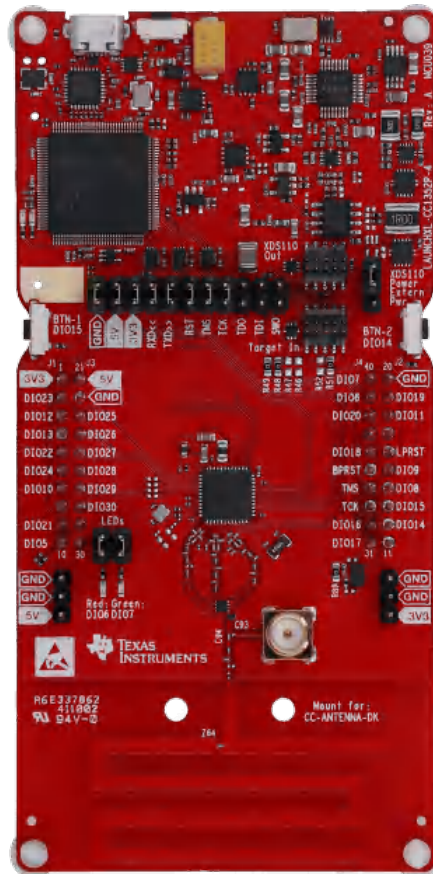
Richard Wallace
Sondre Olimb

摘要

本文档介绍了一种固定 PCB 天线引线结构，用户可以通过更改 BOM 将其配置为在两种不同的运行模式下运行。用户可以将天线调谐到单一频率，以在 433MHz、470 - 510MHz 和 868 - 930MHz ISM 频带中运行；或者可以将天线配置为双频天线，除 2.4GHz 之外，该天线还可以在上述给定的频率之一下运行。

该天线可用于德州仪器 (TI) 在这些频带内工作的所有收发器和发送器。

该天线的总体尺寸要求为 43 x 25mm。该解决方案中天线为中等尺寸、成本低。下图展示了具有表面贴装外部元件 Z64 的 PCB 单极天线的布局。



内容

首字母缩写词.....	2
1 PCB 天线介绍.....	3
1.1 PCB 弯折线单极天线的实现.....	3
1.2 匹配网络.....	5
2 测试设置.....	6
2.1 辐射方向图.....	6
3 不匹配的结果.....	7
3.1 史密斯圆图 - 无天线匹配元件的自然阻抗.....	7
3.2 史密斯圆图 - 采用外部元件 Z64 时的阻抗.....	8
4 单频匹配和结果.....	14
4.1 433MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	15
4.2 470MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	18
4.3 490MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	21
4.4 510MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	24
4.5 868/915MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	26
5 双频匹配和结果.....	31
5.1 433MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	32
5.2 470MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	36
5.3 490MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	40
5.4 510MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	44
5.5 868/915MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率.....	48
6 汇总 - 物料清单和结果.....	53
7 结论.....	54
8 参考文献.....	55

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

首字母缩写词

首字母缩写词	定义
AUT	受测天线
BOM	物料清单
BW	带宽
CF	校正因子
CITA	美国无线通信与互联网协会
DK	开发套件
DNM	不安装
EB	评估板
EIRP	有效全向辐射功率
EM	评估模块
ISM	工业、科学和医疗
NC	未连接
NHPRP	接近水平面辐射功率
NHPRP45	45 度角以内的接近水平面辐射功率
OTA	无线
PCB	印刷电路板
RF	射频
SWR	驻波比
TRP	总辐射功率
VNA	矢量网络分析仪

1 PCB 天线介绍

本文档中介绍的天线为 PCB 弯折线单极天线，用户可通过更改 BOM 将其配置为单频天线或双频天线。可以通过天线 PCB 引线元件和天线匹配元件来设置谐振。这样天线就可以通过一个天线方向图设计来覆盖宽带范围。该天线的阻抗取决于所使用的模式。通过参阅图 1-1 可知，如果 L4 具有如图所示的长度，则有利于在 433 - 510MHz 左右运行。如果 L4 缩短一半 (19.0mm)，则有利于在 868 - 930MHz 下运行。

天线布局在电路板的顶层和底层，如图 1-1 所示；与单面布局解决方案相比，这可以降低电阻损耗并提供稍宽的带宽。如果采用单面布局，则天线下方的区域不能用于任何其他布线，因此利用该区域优化天线性能会更有利。

1.1 PCB 弯折线单极天线的实现

为了获得理想性能，应严格遵循天线尺寸，这一点非常重要。天线在 1.6mm 厚的 FR4 基板上实现。由于天线下方没有接地层，因此 PCB 厚度并不重要。如果使用不同的厚度，则可能需要更改匹配网络以获得理想性能。

在 PCB CAD 工具中实现天线的一种方法是从光绘文件中导入天线布局。请参阅 LAUNCHXL-CC1352P-4 参考设计中包含的文件。

如果天线在比天线宽的 PCB 上实现，重要的是要避免在天线的每一侧附近放置元件或避免接地层靠近天线的每一侧。如果正在使用的 CAD 工具不支持导入光绘文件，则可以使用图 1-1 和表 1-1。

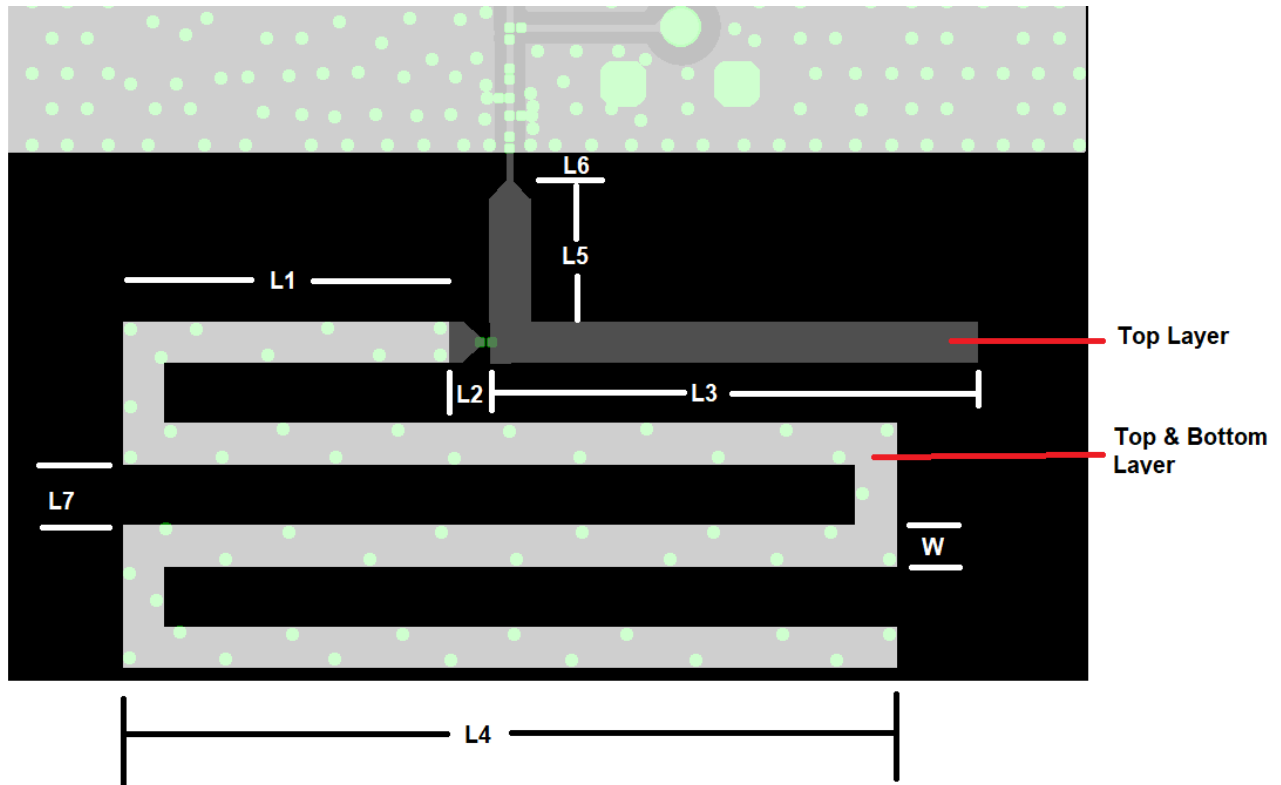


图 1-1. LAUNCHXL-CC1352P-4

表 1-1. 天线尺寸

L1	16.0 mm	L5	7.0 mm
L2	2.0 mm	L6	1.4 mm
L3	24.0 mm	L7	3.0 mm
L4	38.0 mm	W	2.0 mm

最后一个天线段的理想长度始终取决于接地层的几何形状。对于小于 LAUNCHXL-CC1352P-4 (小于四分之一波长) 的接地层尺寸, 可以增加最后一段的理想长度, 或者根据新的接地层尺寸重新计算天线匹配。

1.2 匹配网络

TI 建议用户加入一个天线匹配网络，以对天线进行调谐并减少天线的失配损耗。接地层的几何形状会影响天线的阻抗。天线匹配网络可用于补偿由于封装和天线附近的其他物体引起的失谐。天线匹配网络的类型取决于天线的模式。

建议在天线的馈电点针对单频模式使用 π 型匹配网络。有关阻抗匹配和阻抗测量的更多信息，请参阅 [AN058](#)。不过，本应用手册中所述的天线是双频天线，可同时支持 433、470 - 510 或 868/915/920MHz (低频带) 和 2.4GHz (高频带) 频带。因此，不建议使用 π 型匹配解决方案，而建议使用 LC、CL 匹配网络，如 [图 1-2](#) 所示。这也是在本应用手册中用于测试的 LAUNCHXL-CC1352P-4 上实现的匹配网络。

LC (Z60 和 Z61) 部分匹配高频带，CL (Z62 和 Z63) 部分匹配低频带。

对于单频运行，无 2.4GHz 谐振，Z60 可以替换为 0 欧姆，Z61 保留为 DNM。Z62 和 Z63 既可以是电感器也可以是电容器，以便将阻抗匹配到 50 欧姆。

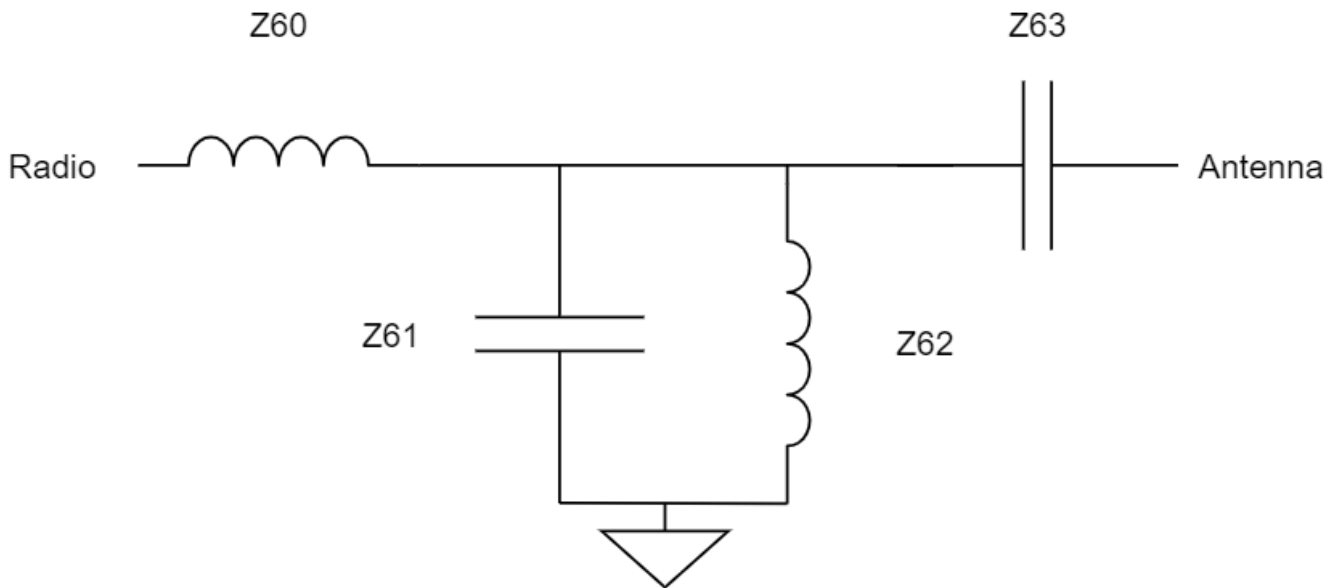


图 1-2. 双频运行的 LC、CL 匹配网络

2 测试设置

本应用手册中用于实现和测试的硬件是图 1-1 所示的 LAUNCHXL-CC1352P-4 (请参阅图 2-1) 。

2.1 辐射方向图

图 2-1 展示了如何将本应用手册中的辐射方向图与天线的方向相关联。

请注意，接地层的尺寸会影响辐射方向图。因此，在具有不同尺寸和形状的接地层的电路板上实现该天线很可能会影响辐射方向图。

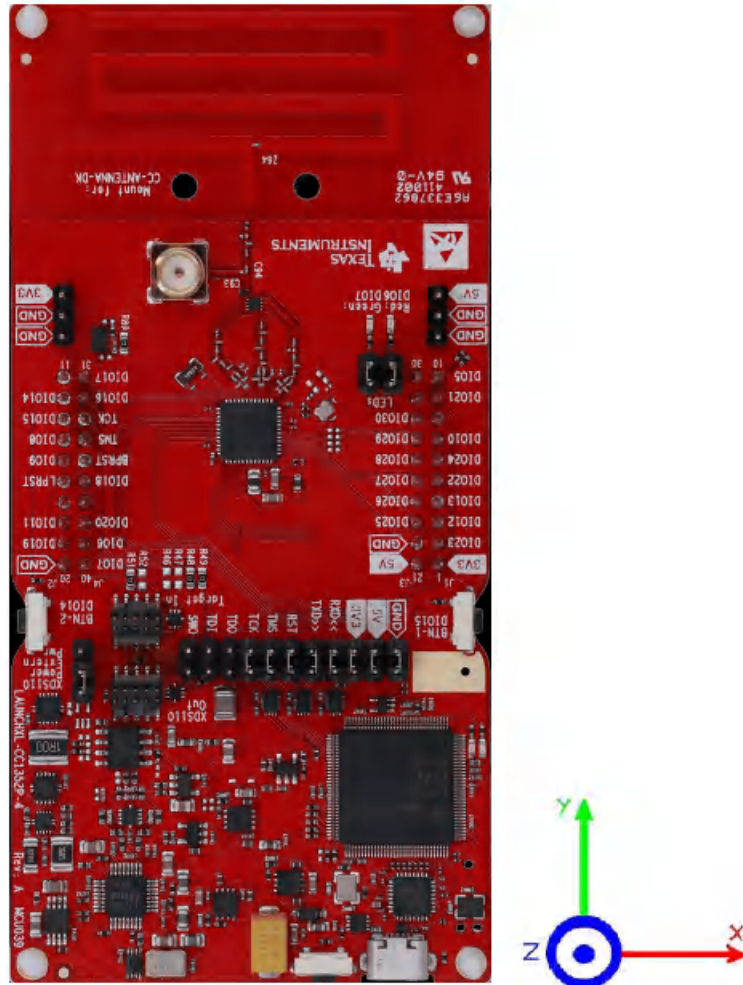


图 2-1. 天线辐射图的 XYZ 坐标

3 不匹配的结果

3.1 史密斯圆图 - 无天线匹配元件的自然阻抗

图 3-1 展示了未采用天线匹配元件时的天线史密斯圆图 (Z60 : 0 欧姆 , Z63 : 0 欧姆 , Z61 : DNM , Z62 : DNM , Z64 : 0 欧姆) 。

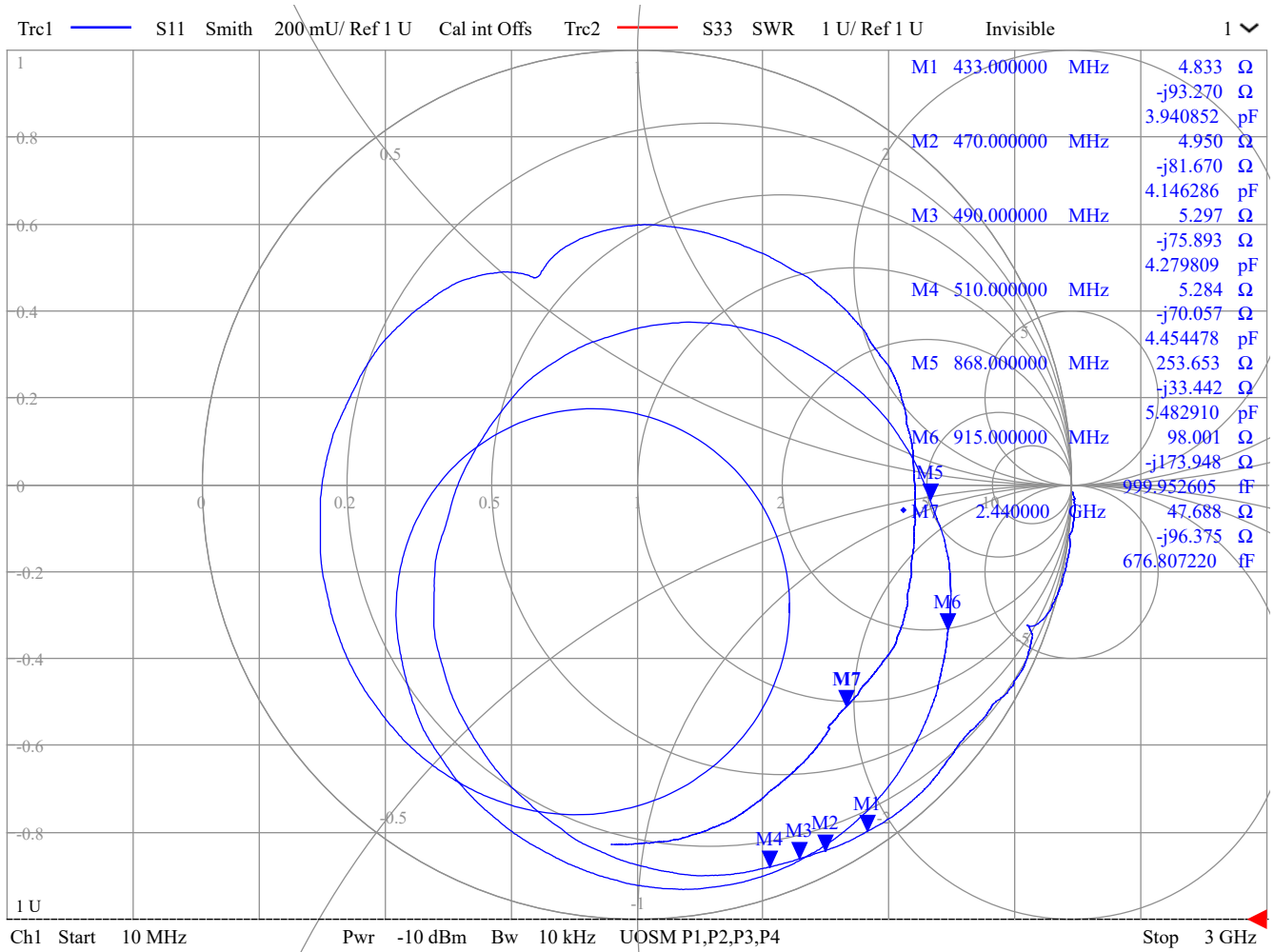


图 3-1. 未采用天线匹配时的天线自然阻抗

3.2 史密斯圆图 - 采用外部元件 Z64 时的阻抗

为了将天线频率范围从 868-930MHz 和 2.4GHz 扩展到支持 433MHz 和 470-510MHz 频带，需要在 Z64 位置增加一个电感器。通过加入额外的电感 Z64，在相同的天线结构下，频率范围可以扩展至 433 - 930MHz 和 2.4GHz；请参阅图 3-2。当运行频率高于 868MHz 时，不需要采用 Z64，但可以在 Z64 封装结构中使用一个 0 欧姆的电阻器或电容器。通过更改 Z64 的值，可以使天线在相同的天线结构下以不同的频率谐振。频率低于 868MHz 时需要采用电感，频率高于 868MHz 时需要采用电容。例如，运行频率为 433MHz 时，建议设置为 51nH；请参阅表 3-1。

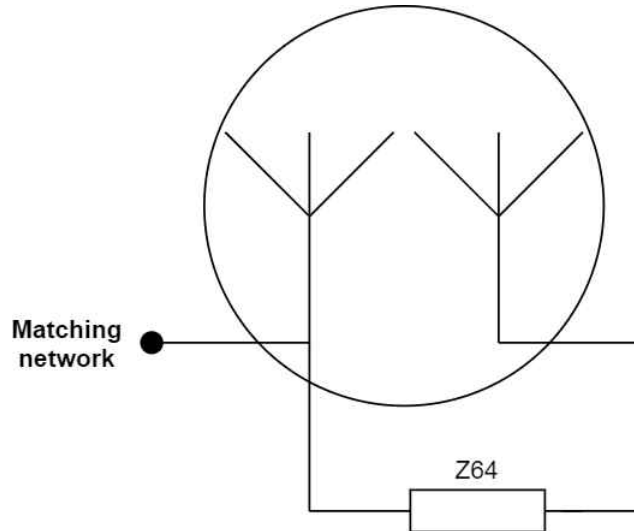


图 3-2. 显示 Z64 的天线原理图符号

表 3-1. Sub-1GHz ISM 频带的建议 Z64 元件值

频率 [MHz]	值
433MHz	51nH
470MHz	39nH
490MHz	33nH
510MHz	27nH
892MHz ⁽¹⁾	2pF

(1) 与 868MHz 和 915MHz 下的双频运行实现折中

3.2.1 433MHz 不匹配

图 3-3 和图 3-4 展示了在 Z64 中放置 51nH 电感器以支持 433MHz 频率 (使 Z60-Z63 保持不变) 后的史密斯圆图和 SWR。433MHz 下的 SWR 为 1.77, 这是良好的匹配 (SWR < 2.0), 但仍然建议插入匹配元件以便能够进一步调谐天线, 因为周围环境可能会影响谐振。

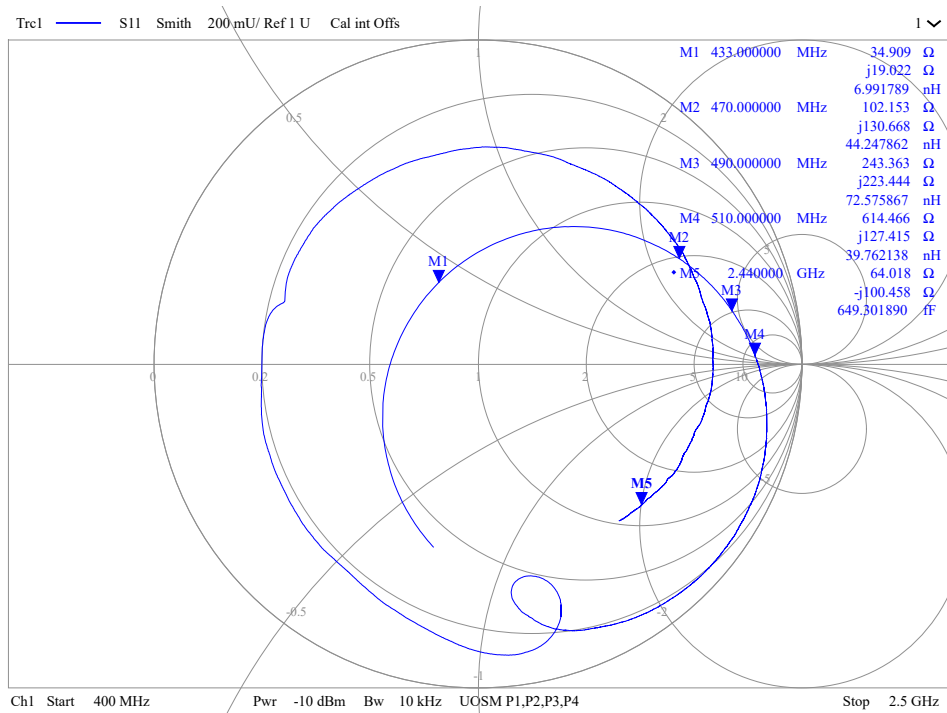


图 3-3. 在 Z64 中放置 51nH 电感器后的史密斯圆图

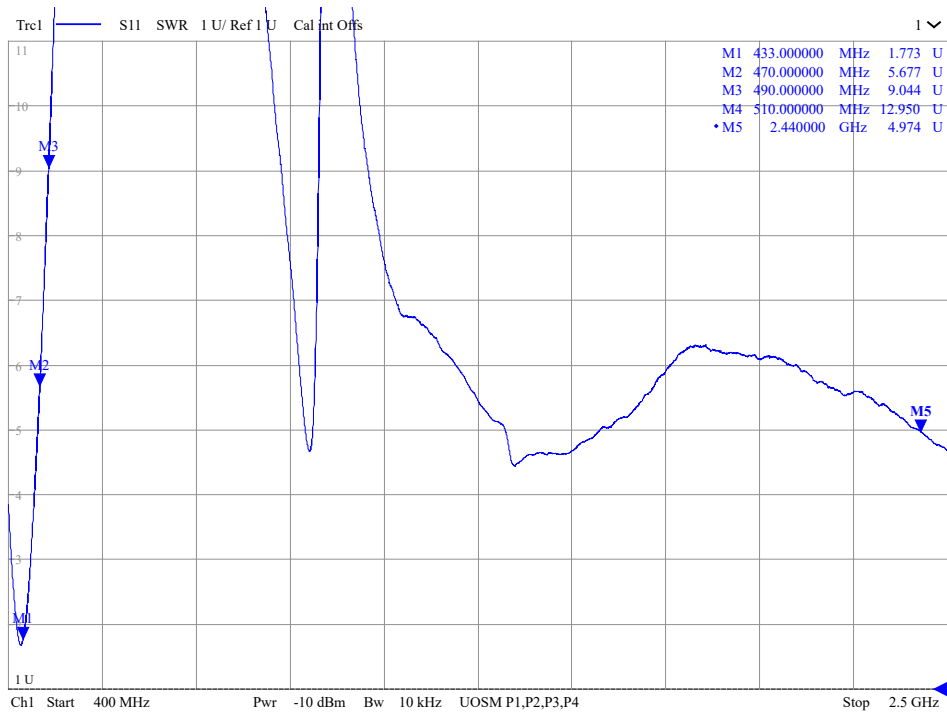


图 3-4. 在 Z64 中放置 51nH 电感器后的 SWR

3.2.2 470MHz 不匹配

图 3-5 和图 3-6 展示了在 Z64 中放置 39nH 电感器以支持 470MHz 频率 (使 Z60-Z63 保持不变) 后的史密斯圆图和 SWR。从图中可以看出 SWR 为 2.05，没有实现良好的匹配，因此需要使用匹配网络。

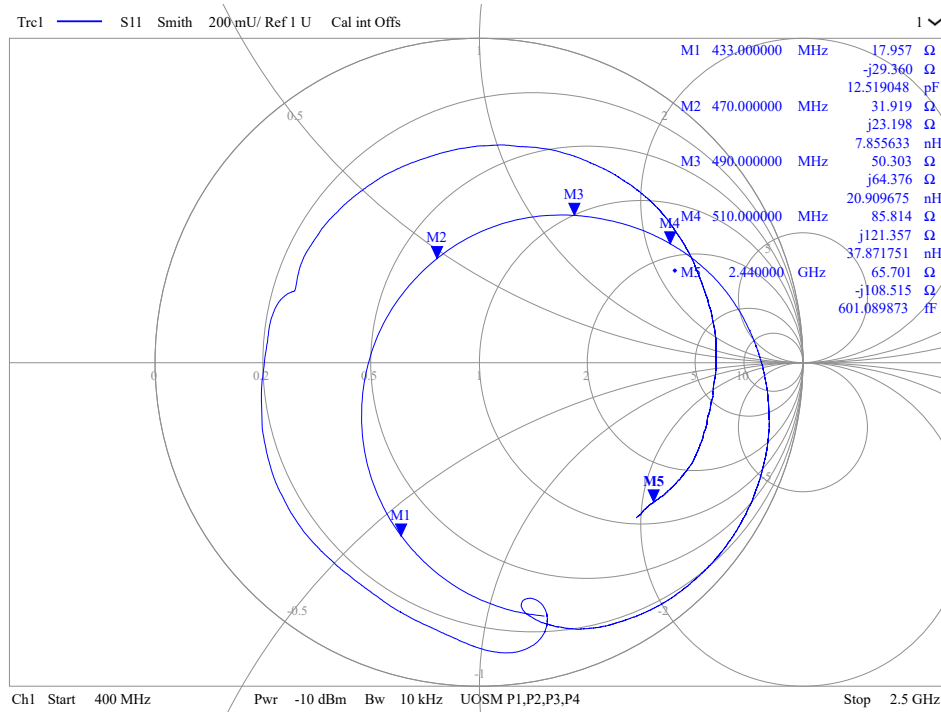


图 3-5. 在 Z64 中放置 39nH 电感器后的史密斯圆图

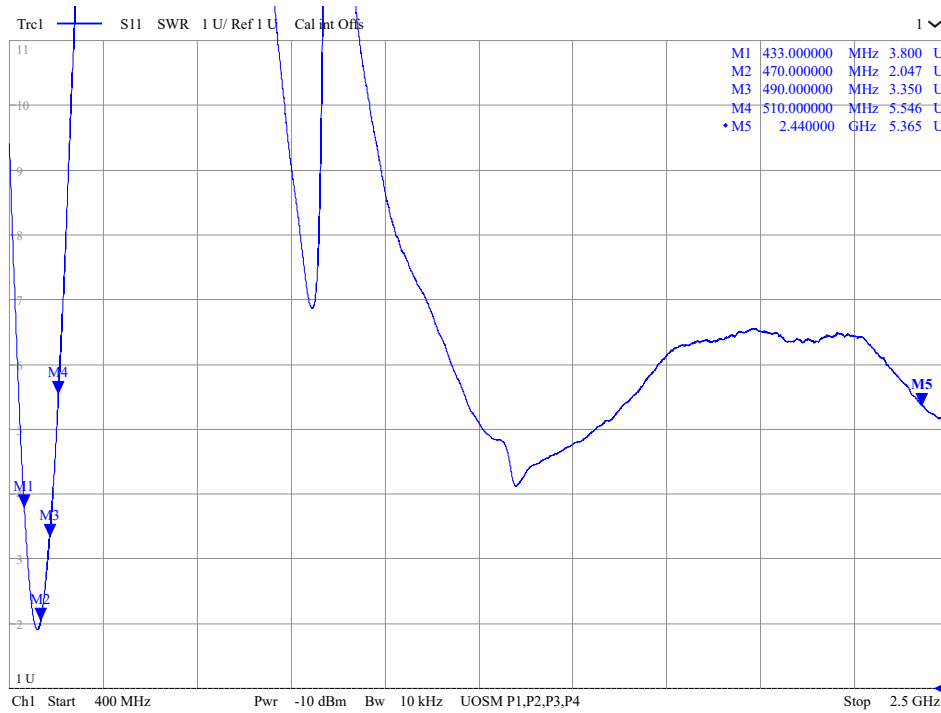


图 3-6. 在 Z64 中放置 39nH 电感器后的 SWR

3.2.3 490MHz 不匹配

图 3-7 和图 3-8 展示了在 Z64 中放置 33nH 电感器以支持 490MHz 频率 (使 Z60-Z63 保持不变) 后的史密斯圆图和 SWR。从图中可以看出 SWR 为 2.20，没有实现良好的匹配，因此需要使用匹配网络。

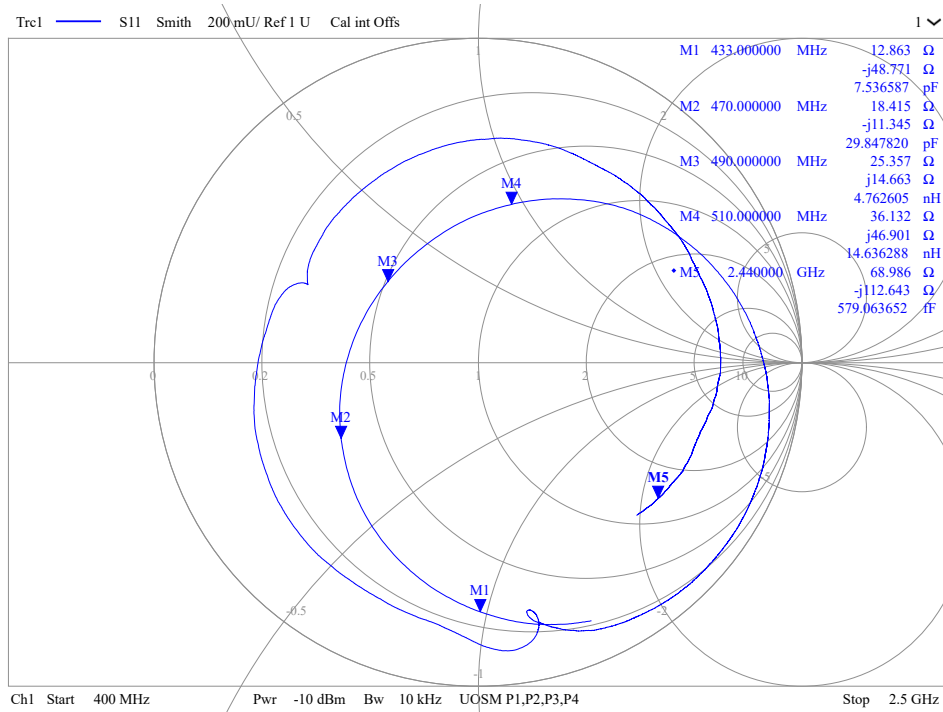


图 3-7. 在 Z64 中放置 33nH 电感器后的史密斯圆图

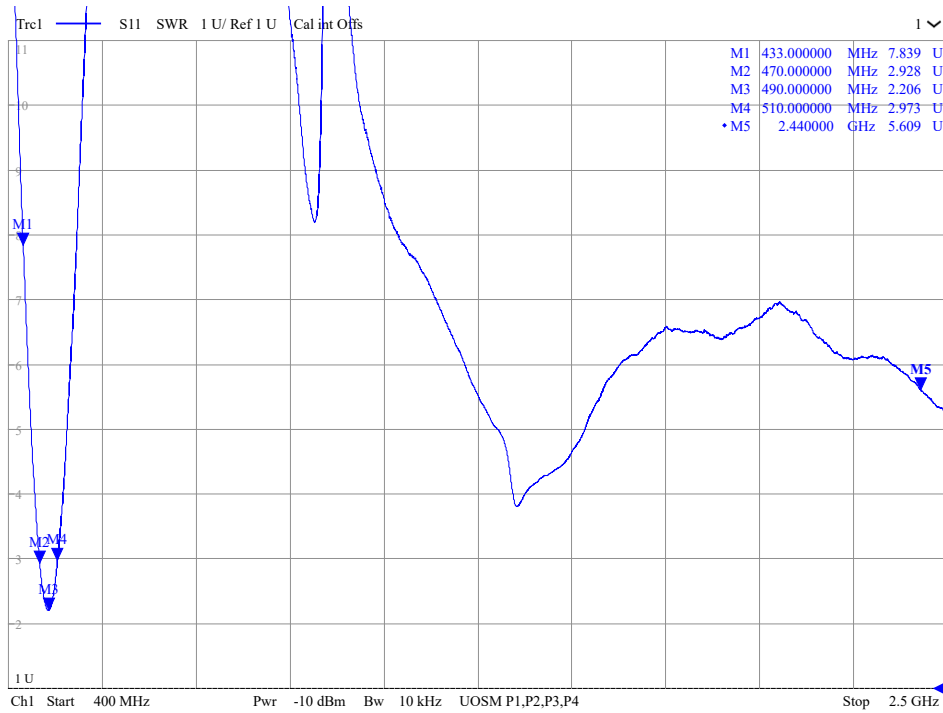


图 3-8. 在 Z64 中放置 33nH 电感器后的 SWR

3.2.4 510MHz 不匹配

图 3-9 和图 3-10 展示了在 Z64 中放置 27nH 电感器以支持 510MHz 频率 (使 Z60 - Z63 保持不变) 后的史密斯圆图和 SWR。从图中可以看出 SWR 为 2.26，没有实现良好的匹配，因此需要使用匹配网络。

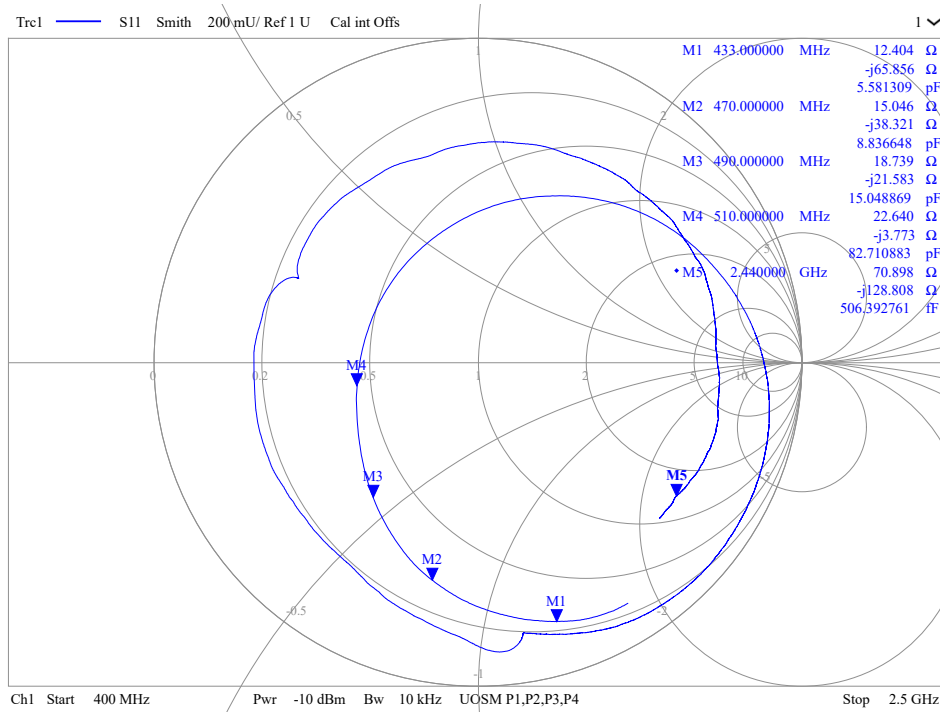


图 3-9. 在 Z64 中放置 27nH 电感器后的史密斯圆图

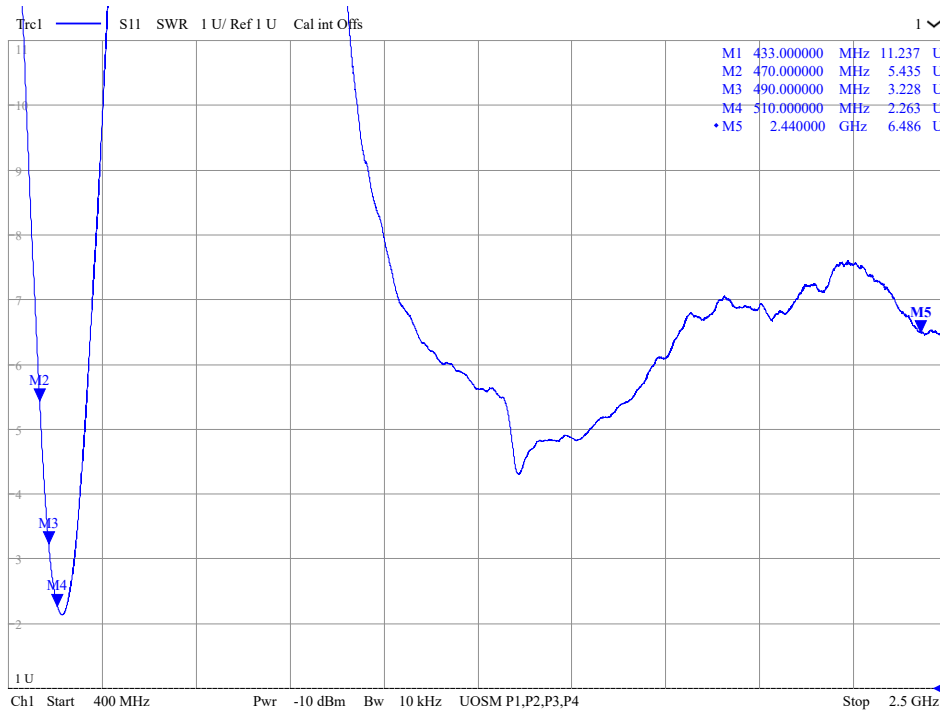


图 3-10. 在 Z64 中放置 27nH 电感器后的 SWR

3.2.5 868/915MHz 不匹配

图 3-11 和图 3-12 展示了在 Z64 中放置 2pF 电容器以支持 868/915MHz 频率 (使 Z60 - Z63 保持不变) 后的史密斯圆图和 SWR。由于天线的带宽足以支持 868MHz 和 915MHz，因此将天线的谐振频率调整为 $((915 + 896)/2 \approx) 892\text{MHz}$ 。

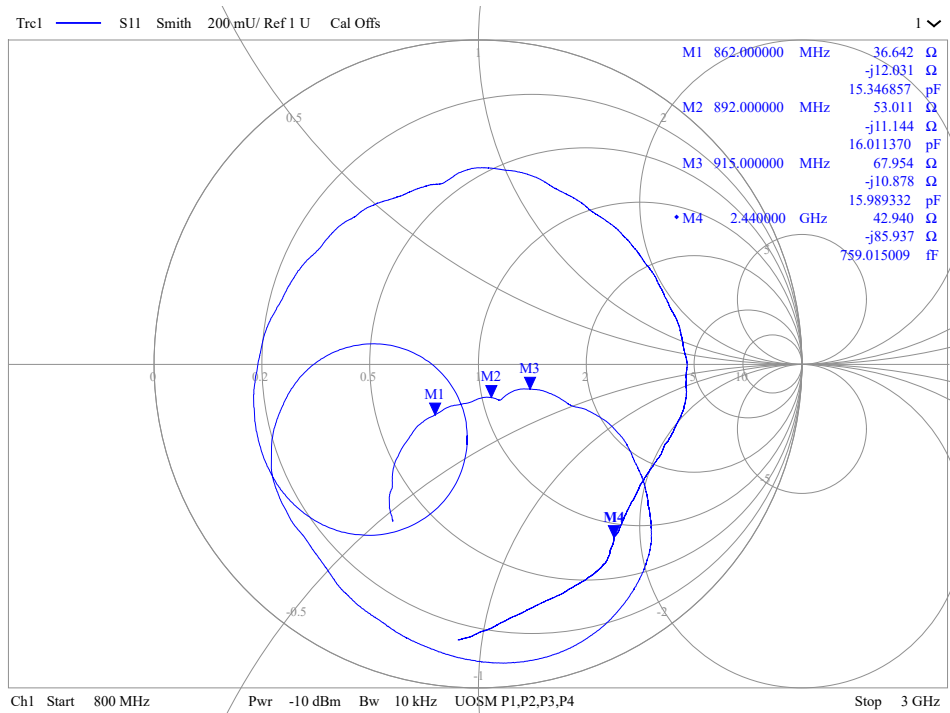


图 3-11. 在 Z64 中放置 2pF 电容器后的史密斯圆图

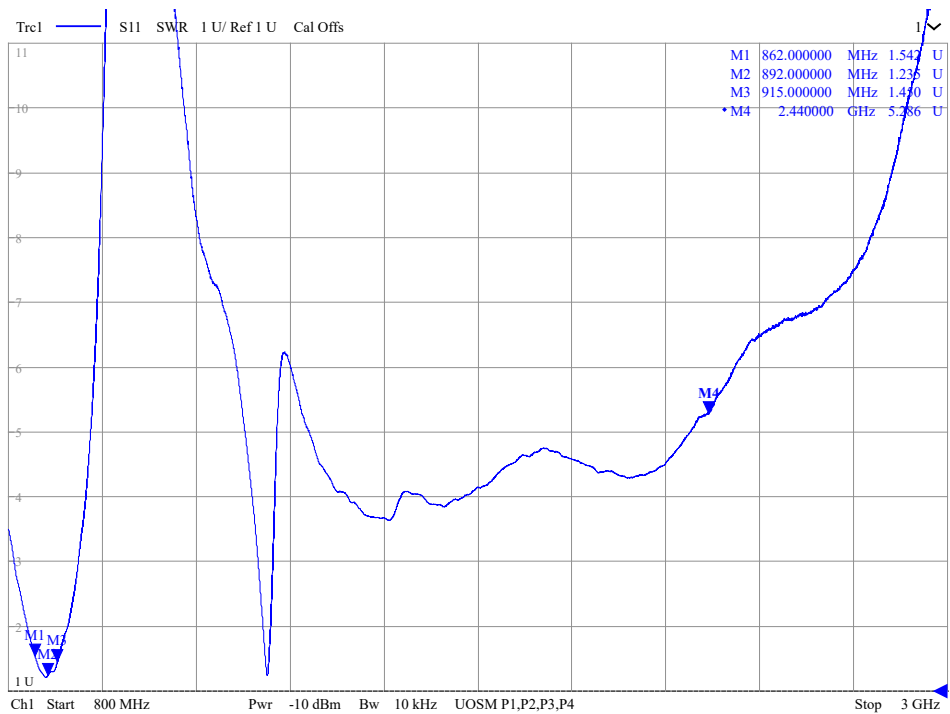


图 3-12. 在 Z64 中放置 2pF 电容器后的 SWR

4 单频匹配和结果

本节介绍 CTIA 测量汇总结果。请注意，性能会受到接地平面尺寸和形状的影响。

在将天线匹配到 50 欧姆时，史密斯圆图工具可以很好地指示匹配天线所需的元件值。不过，史密斯圆图给出的理论阻抗与实际值之间会存在偏差。因此，可能需要进一步调节以实现良好的匹配。

4.1 433MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 4-1 展示了用于匹配单频 433MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.026。

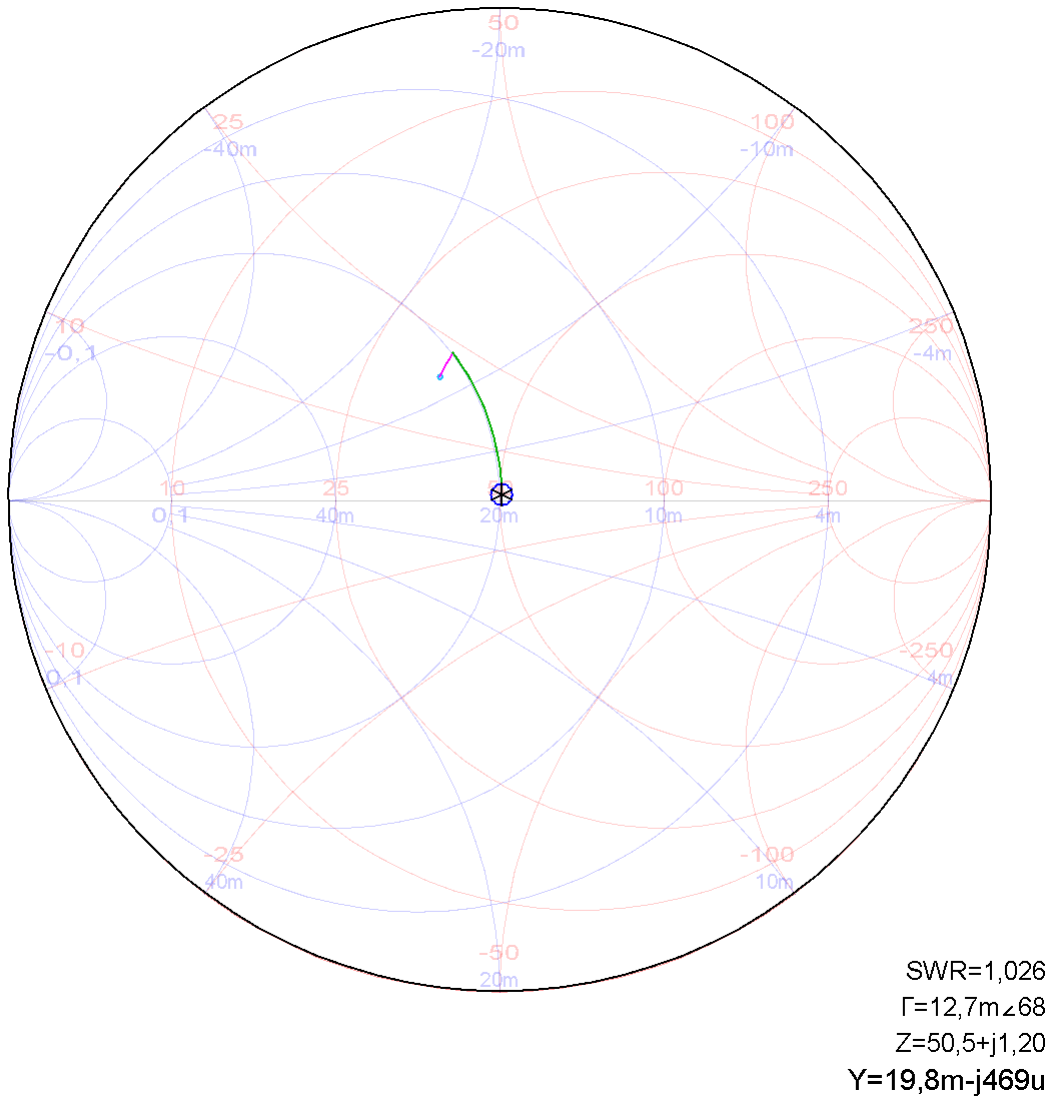


图 4-1. 单频 433MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 4-2 和图 4-3 展示了得到的阻抗和 SWR (为 1.05) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 4-1 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 4-3 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽为 $444.78 - 422 = 22.78\text{MHz}$ 。

表 4-1. 433MHz 单频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60		$0\ \Omega$
Z61		DNM
Z62	GRM0335C1H4R3CA01	4.7pF
Z63	LQP03TN2N0B02	2nH
Z64	LQP03TN51NH02	51nH

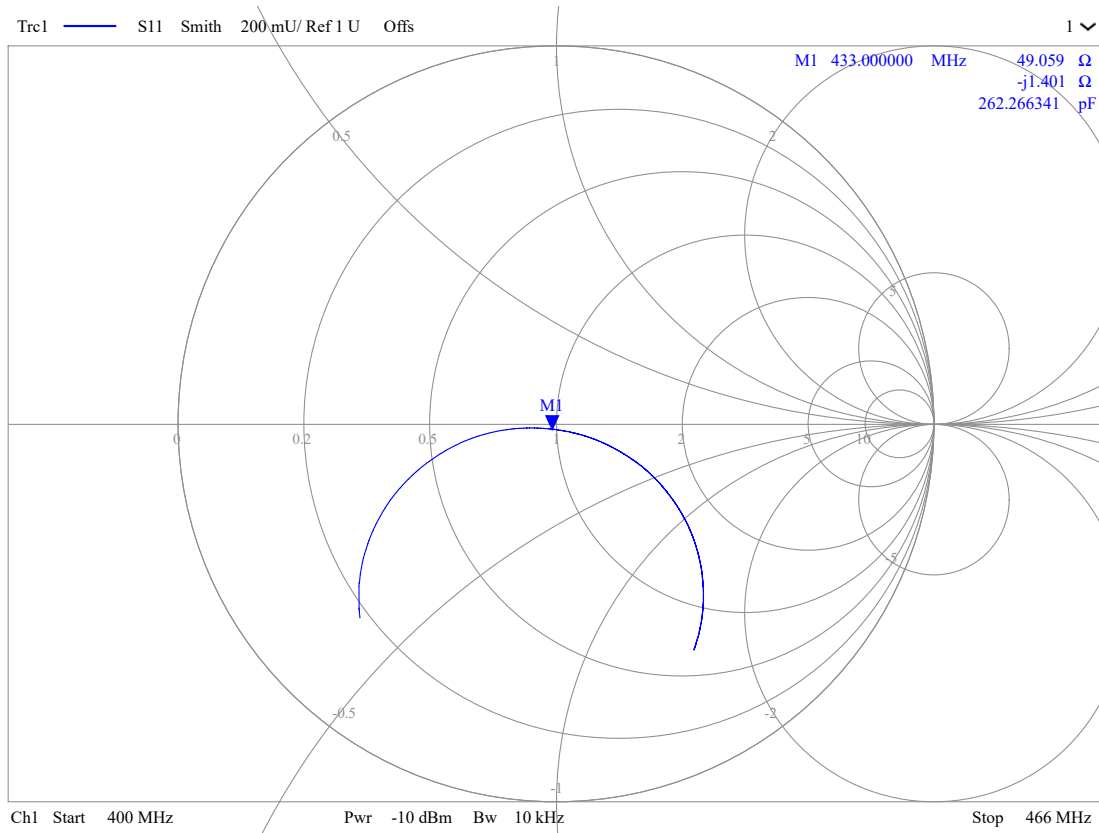


图 4-2. 433MHz 单频匹配的天线史密斯圆图

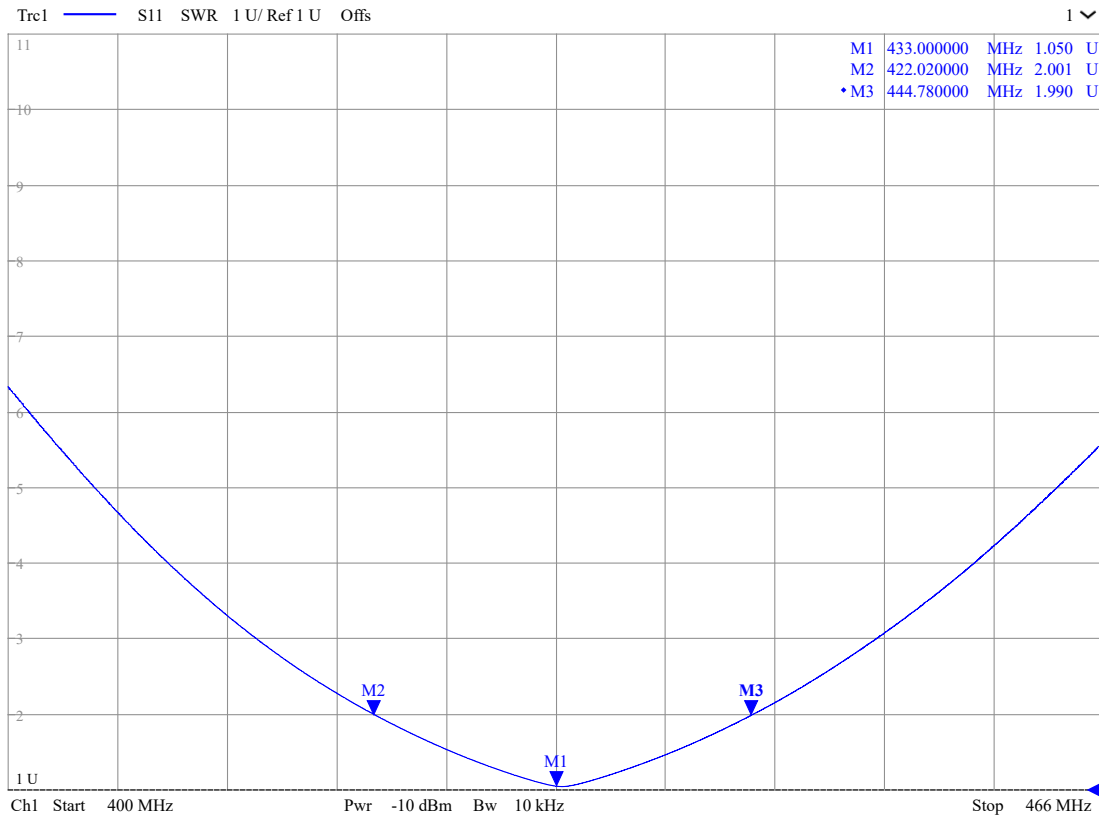


图 4-3. 433MHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 4-4 展示了 13dBm 433MHz 设置下匹配 433MHz 的天线辐射方向图。图中显示 TRP 为 5.25dBm，在测量的传导输出功率为 12.42dBm 的情况下，可得效率为 19.19%。

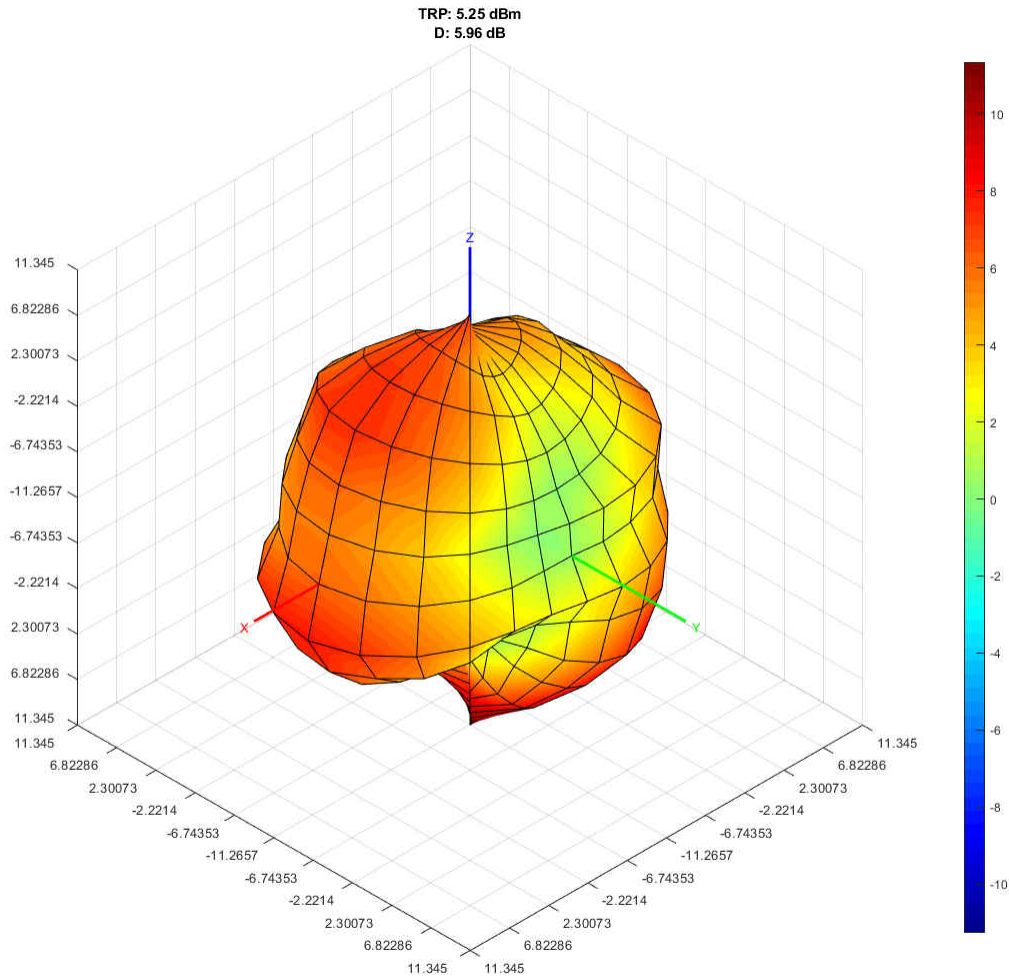


图 4-4. 在 13dBm 433MHz 设置下匹配 433MHz 辐射的天线辐射方向图

4.2 470MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 4-5 展示了用于匹配单频 470MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.025。

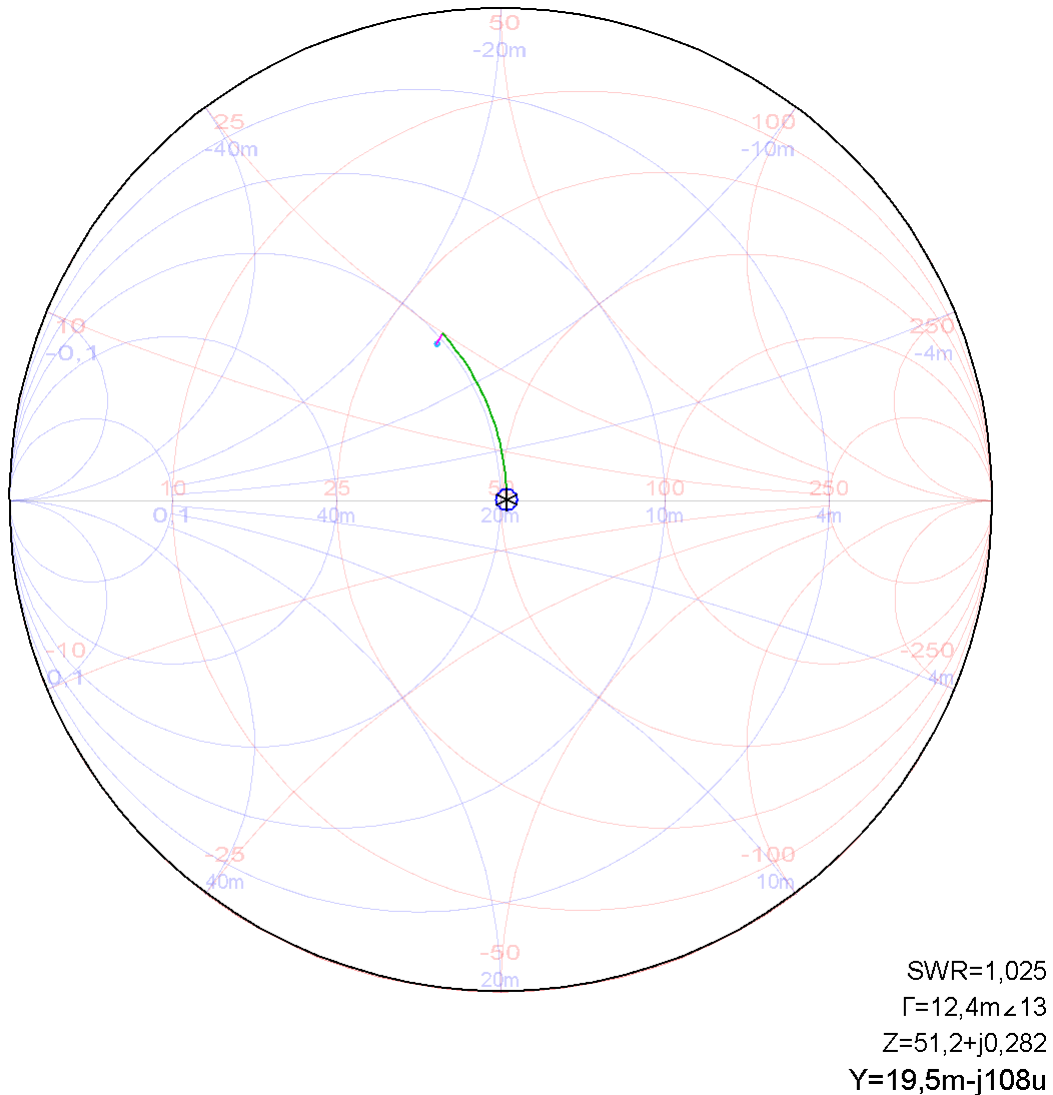


图 4-5. 单频 470MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 4-6 和图 4-7 展示了得到的阻抗和 SWR (为 1.074) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 4-2 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 4-7 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽为 $490 - 465 = 25\text{MHz}$ 。

表 4-2. 470MHz 单频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60		0Ω
Z61		DNM
Z62	GRM0335C1H5R1CA01	5.1pF
Z63	LQP03TN6N2B02	6.2nH
Z64	LQP03TN39NH02	39nH

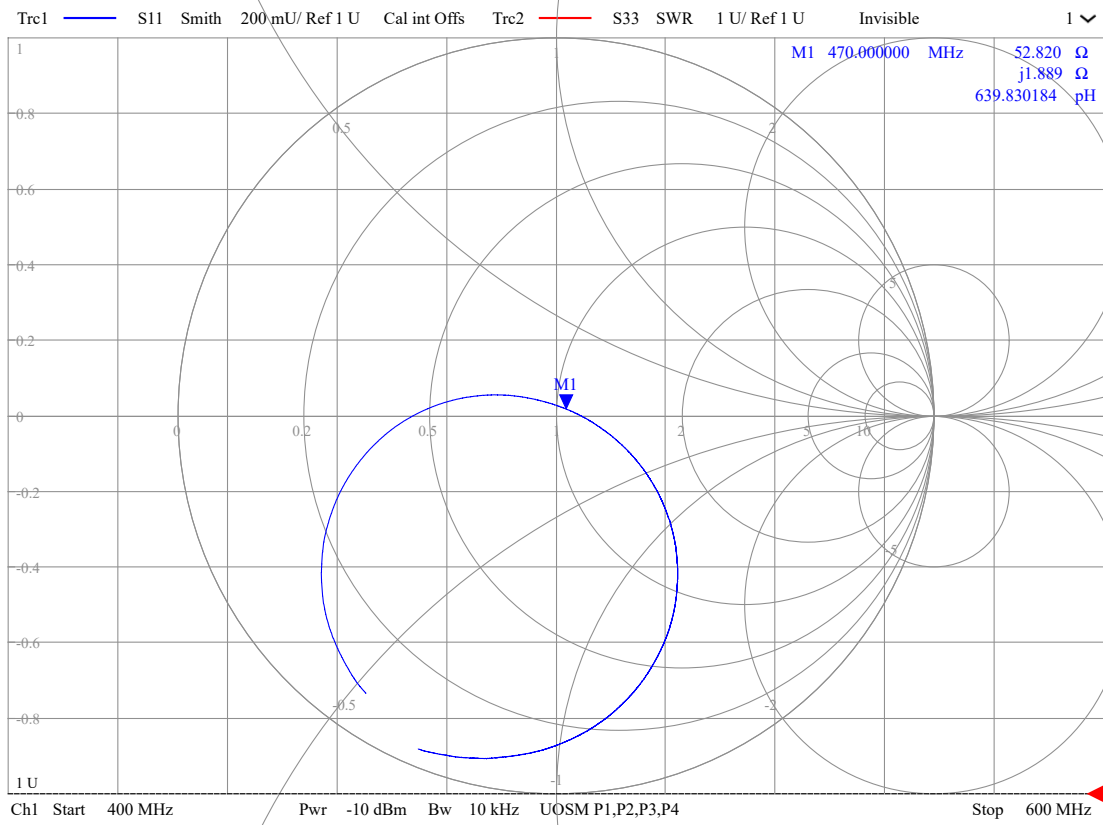


图 4-6. 470MHz 单频匹配的天线史密斯圆图

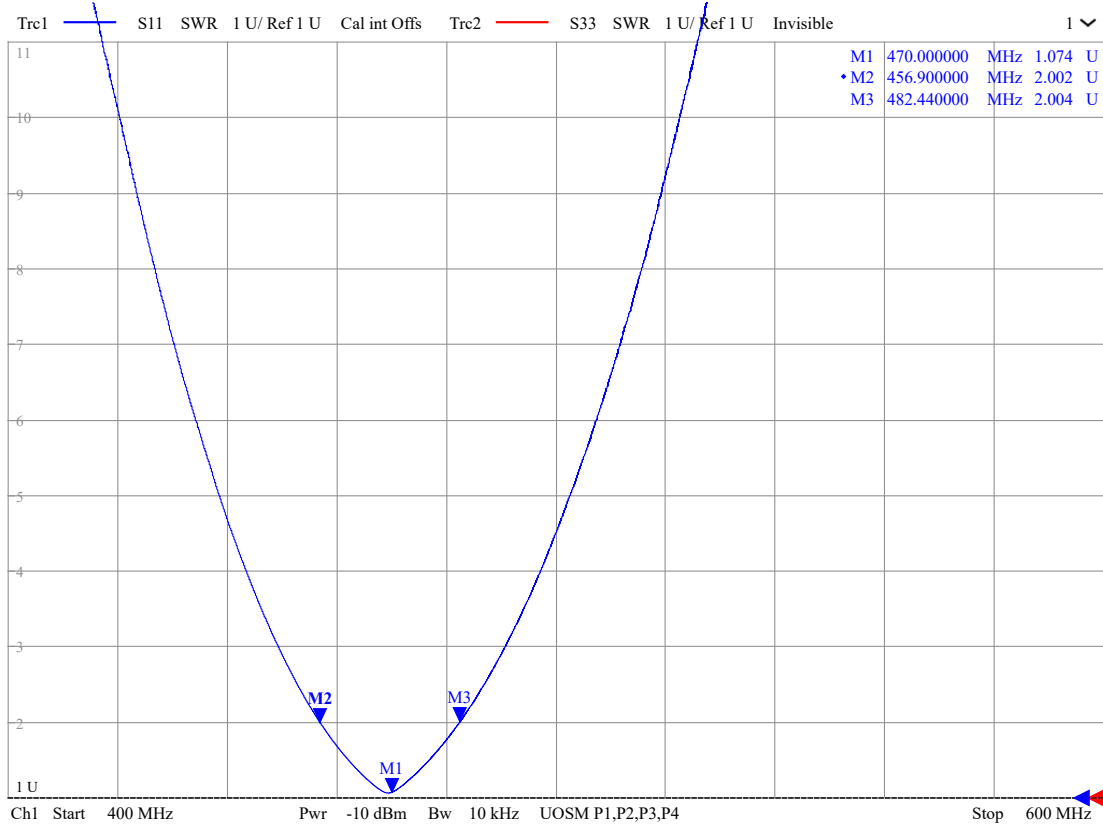


图 4-7. 470MHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 4-8 展示了 13dBm 470MHz 设置下匹配 470MHz 辐射的天线辐射方向图。图中显示 TRP 为 8.06dBm，在测量的传导输出功率为 12.65dBm 的情况下，可得效率为 34.8%。

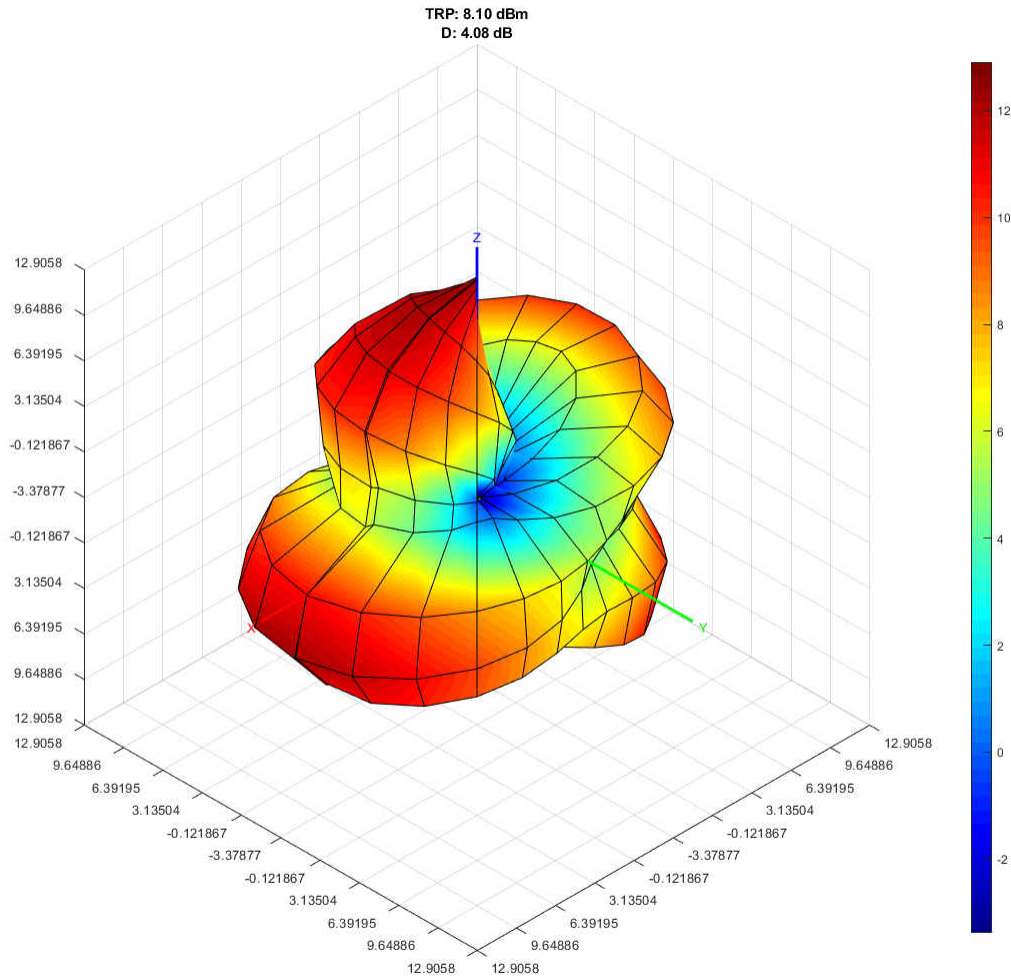


图 4-8. 在 13dBm 470MHz 设置下匹配 470MHz 辐射的天线辐射方向图

4.3 490MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 4-9 展示了用于匹配单频 470MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.017。

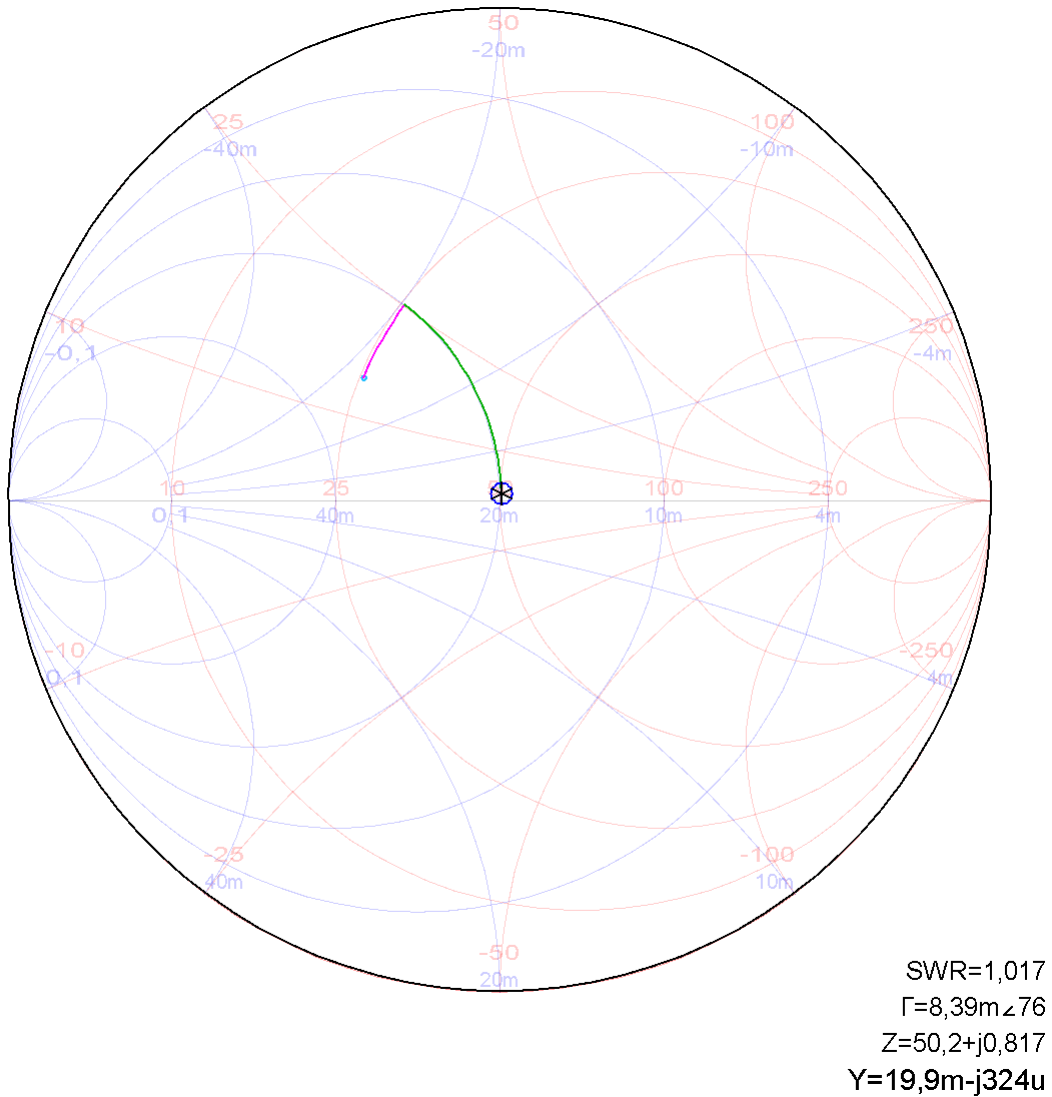


图 4-9. 单频 490MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 4-10 和图 4-11 展示了得到的阻抗和 SWR (为 1.05) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 4-3 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 4-11 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽为 $503.3 - 478.5 = 24.8\text{MHz}$ 。

表 4-3. 490MHz 单频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60		0Ω
Z61		DNM
Z62	GRM0335C1H6R2CA01	6.2pF
Z63	LQP03TN6N2H02	6.2nH
Z64	LQP03TN33NH02	33nH

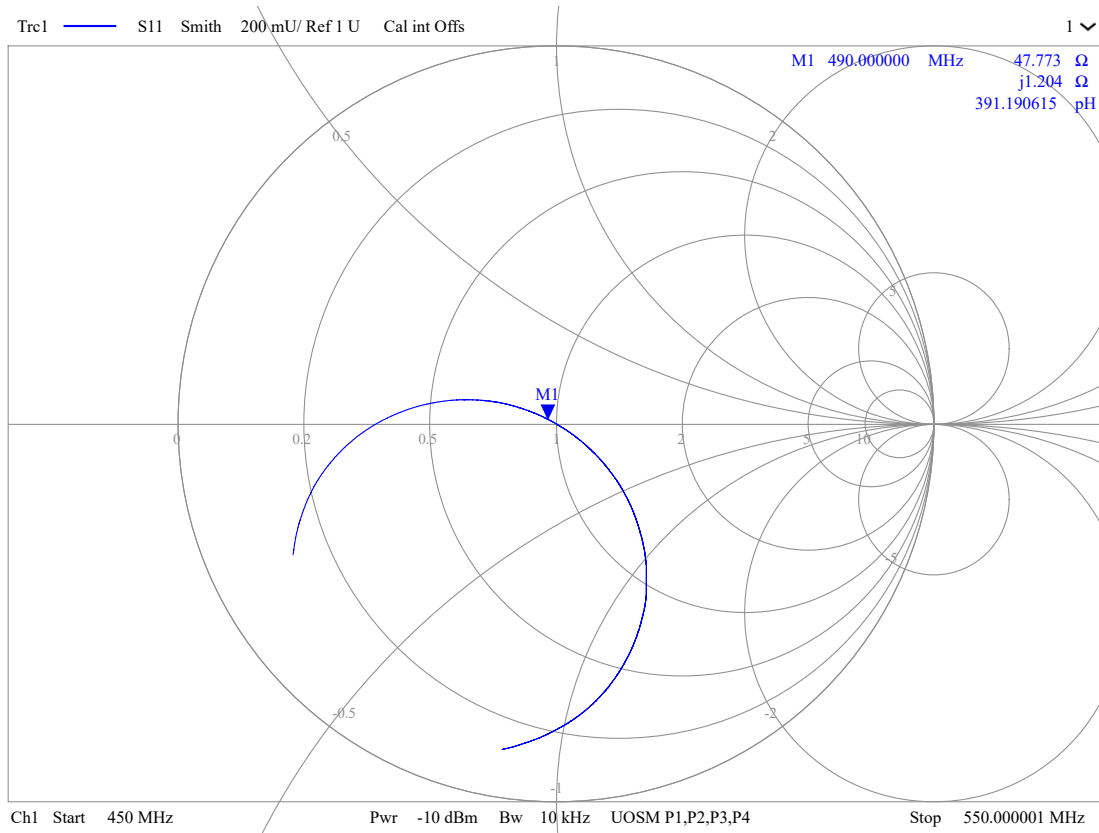


图 4-10. 490MHz 单频匹配的天线史密斯圆图

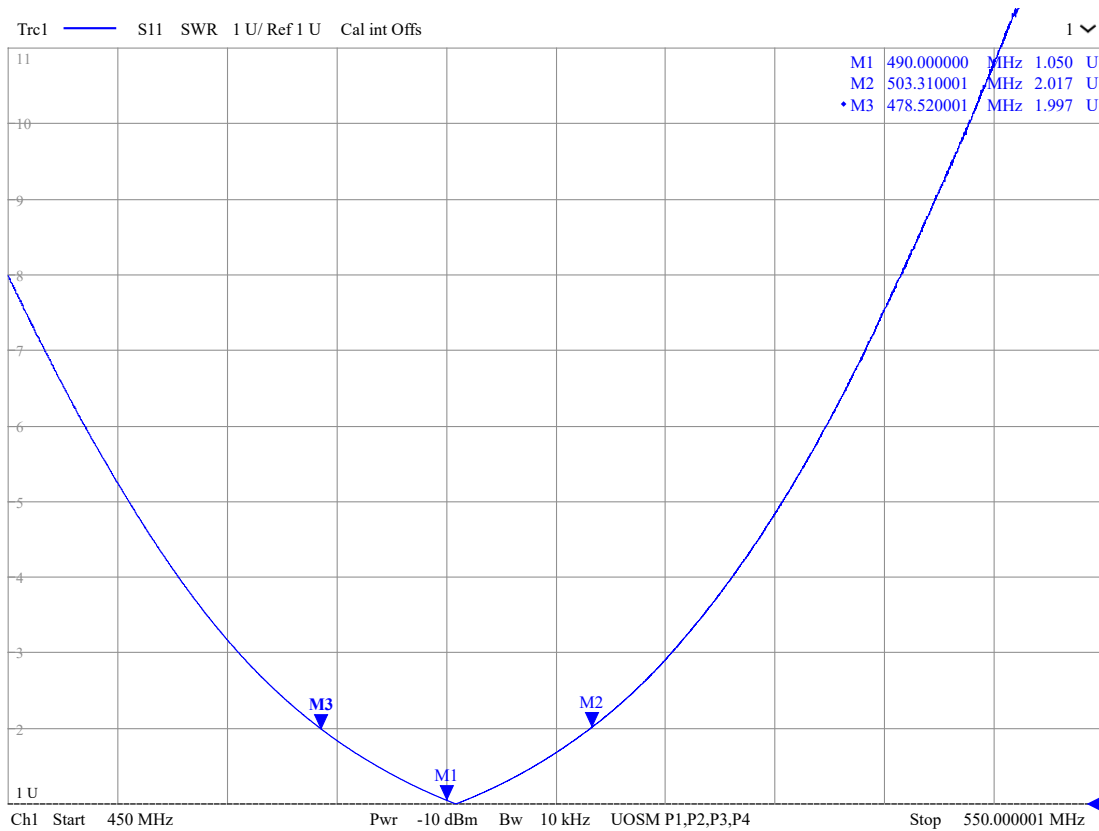


图 4-11. 490MHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 4-12 展示了 13dBm 490MHz 设置下匹配 490MHz 辐射的天线辐射方向图。图中显示 TRP 为 7.72dBm，在测量的传导输出功率为 12.17dBm 的情况下，可得效率为 35.89%。

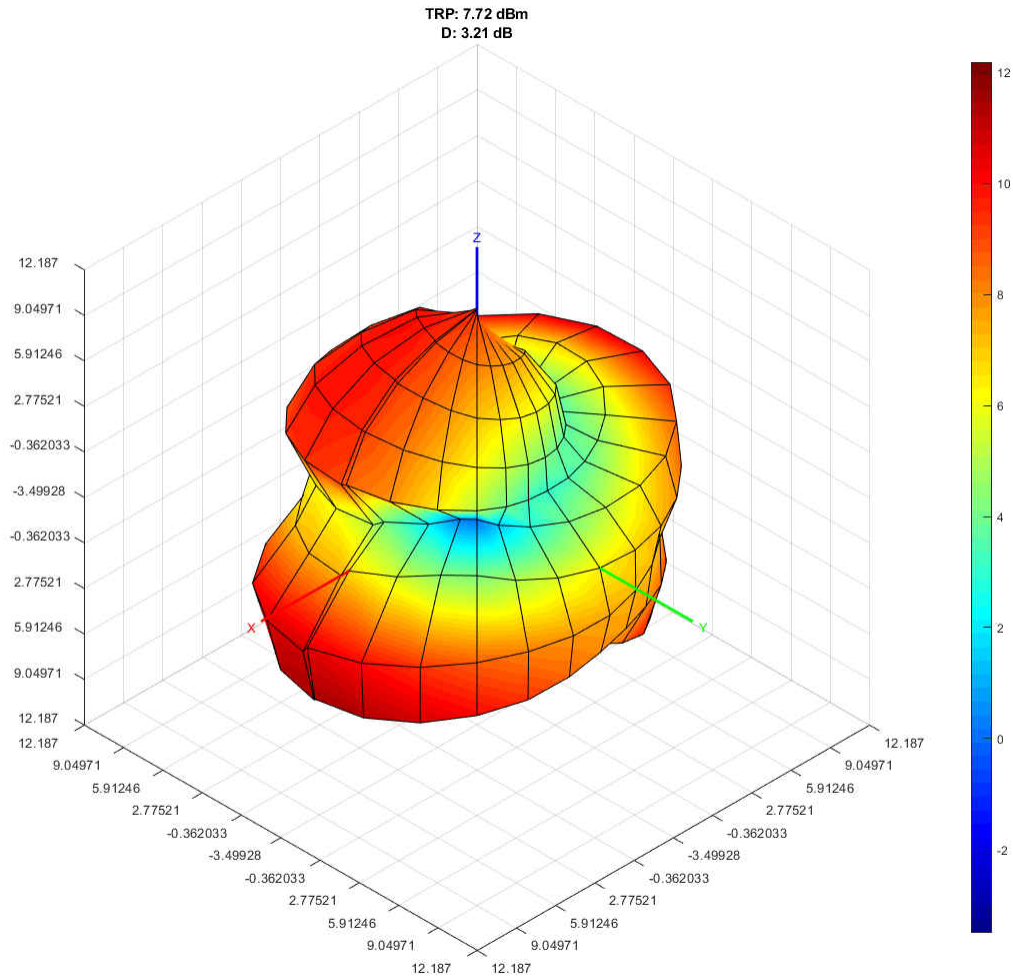


图 4-12. 在 13dBm 490MHz 设置下匹配 490MHz 辐射的天线辐射方向图

4.4 510MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 4-13 展示了用于匹配单频 470MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.017。

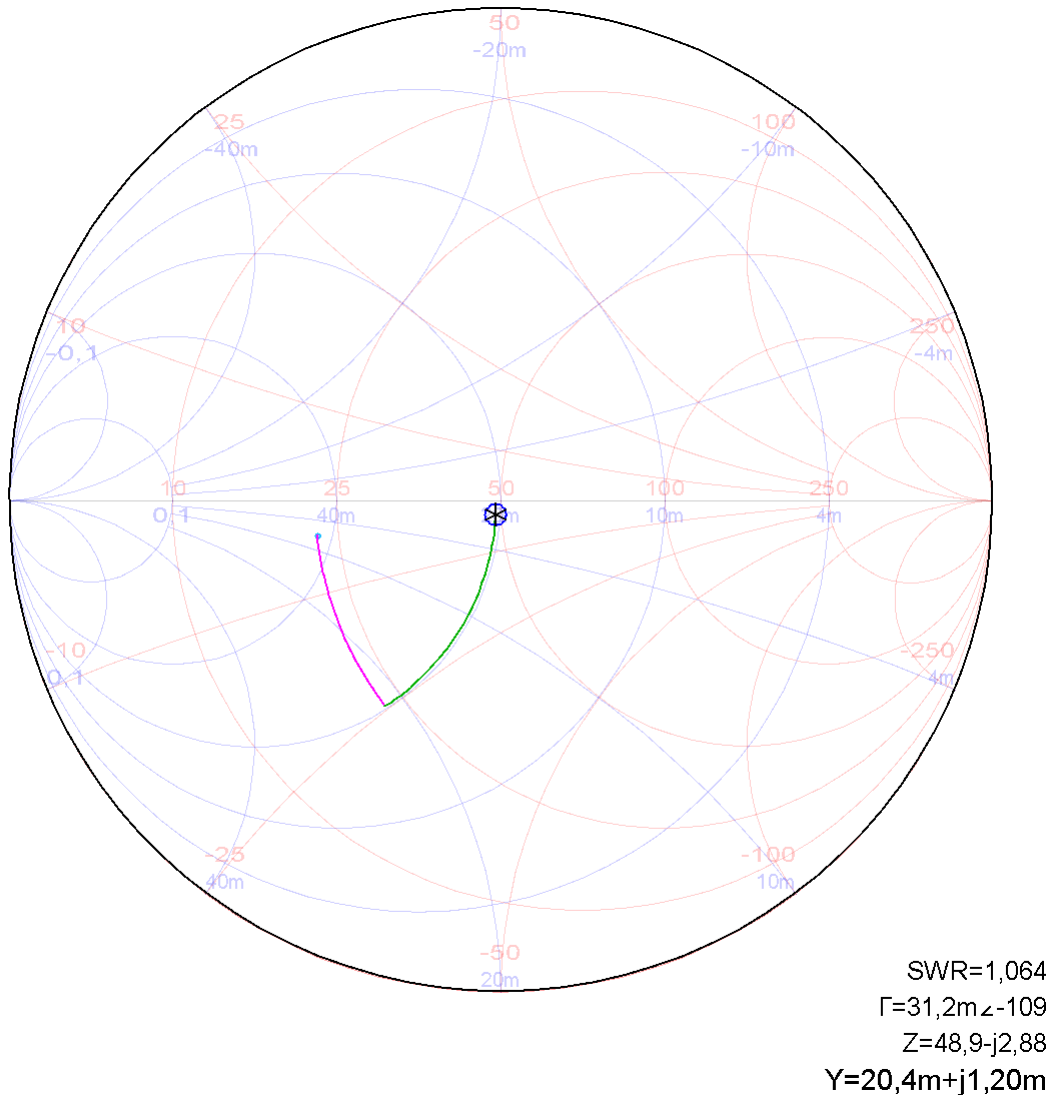


图 4-13. 单频 510MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 4-14 和图 4-15 展示了得到的阻抗和 SWR (为 1.302) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 4-4 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 4-15 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽为 $529 - 500 = 29\text{MHz}$ 。

表 4-4. 510MHz 单频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60		0 Ω
Z61		DNM
Z62	GRM0335C1H8R2CA01	8.3pF
Z63	LQP03TN11NH02	11nH
Z64	LQP03TN27NH02	27nH

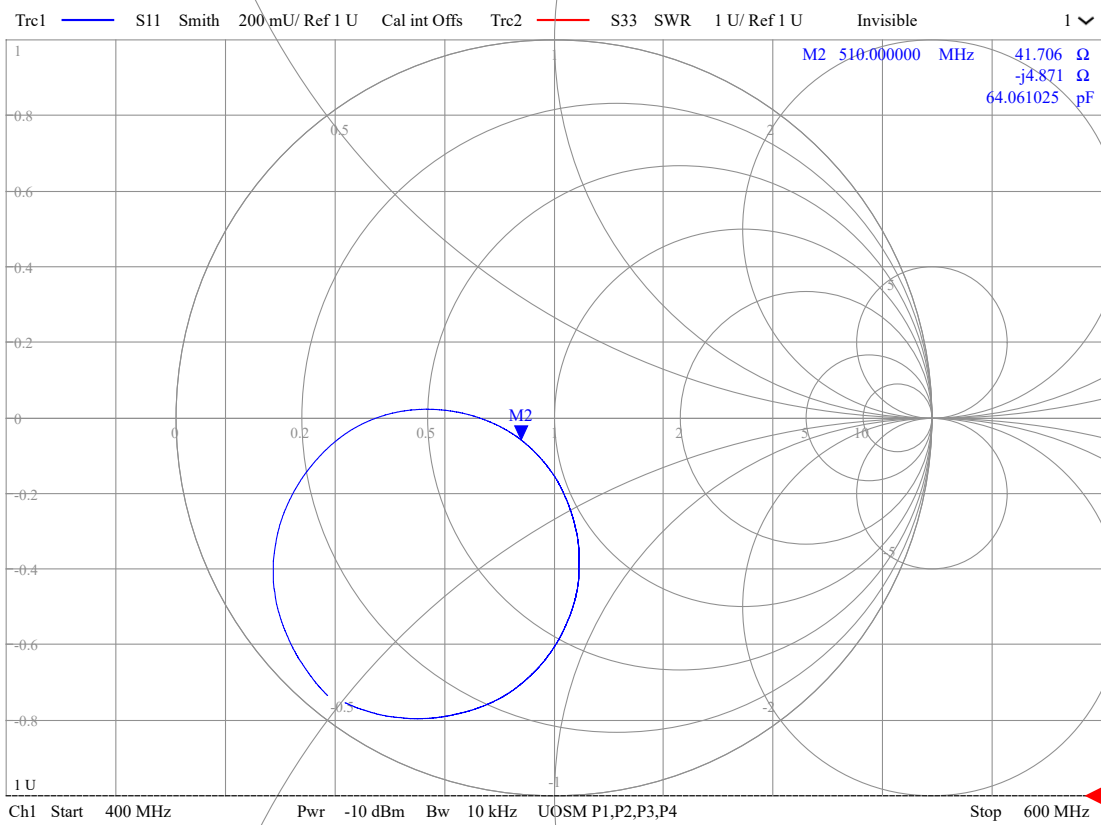


图 4-14. 510MHz 单频匹配的天线史密斯圆图

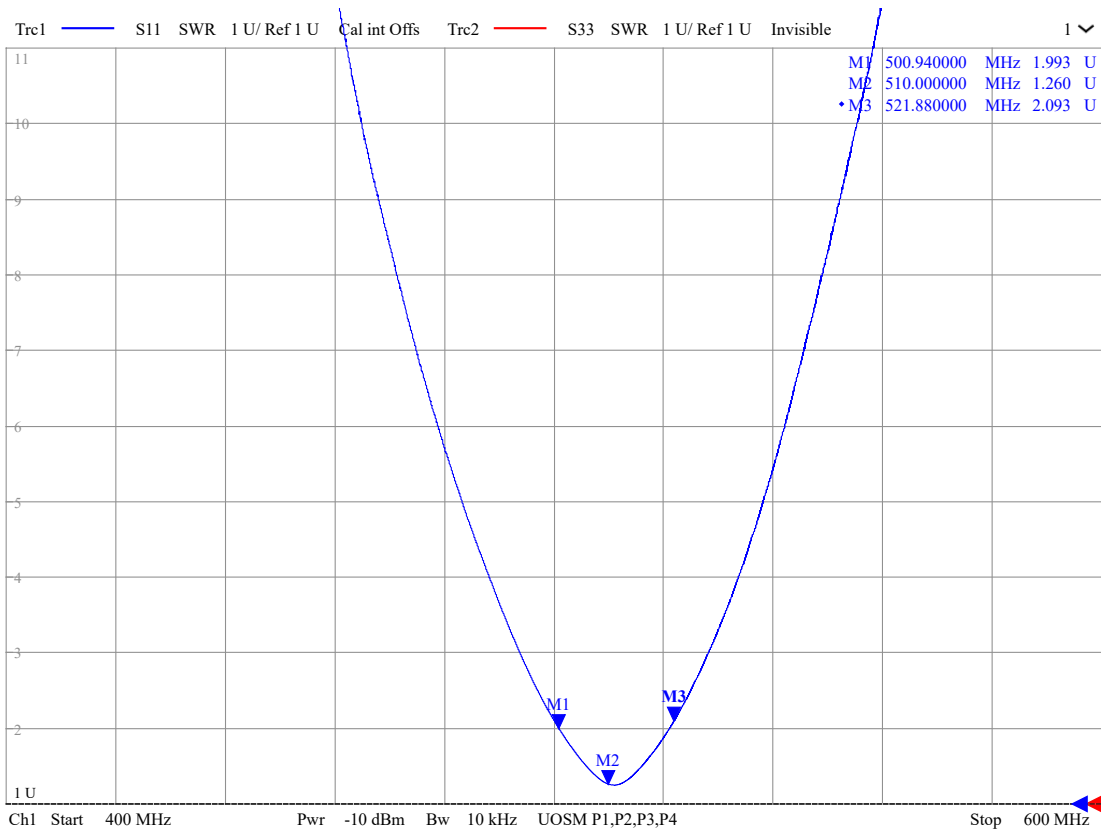


图 4-15. 510MHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 4-16 展示了 13dBm 510MHz 设置下匹配 510MHz 辐射的天线辐射方向图。图中显示 TRP 为 6.94dBm，在测量的传导输出功率为 11.77dBm 的情况下，可得效率为 32.9%。

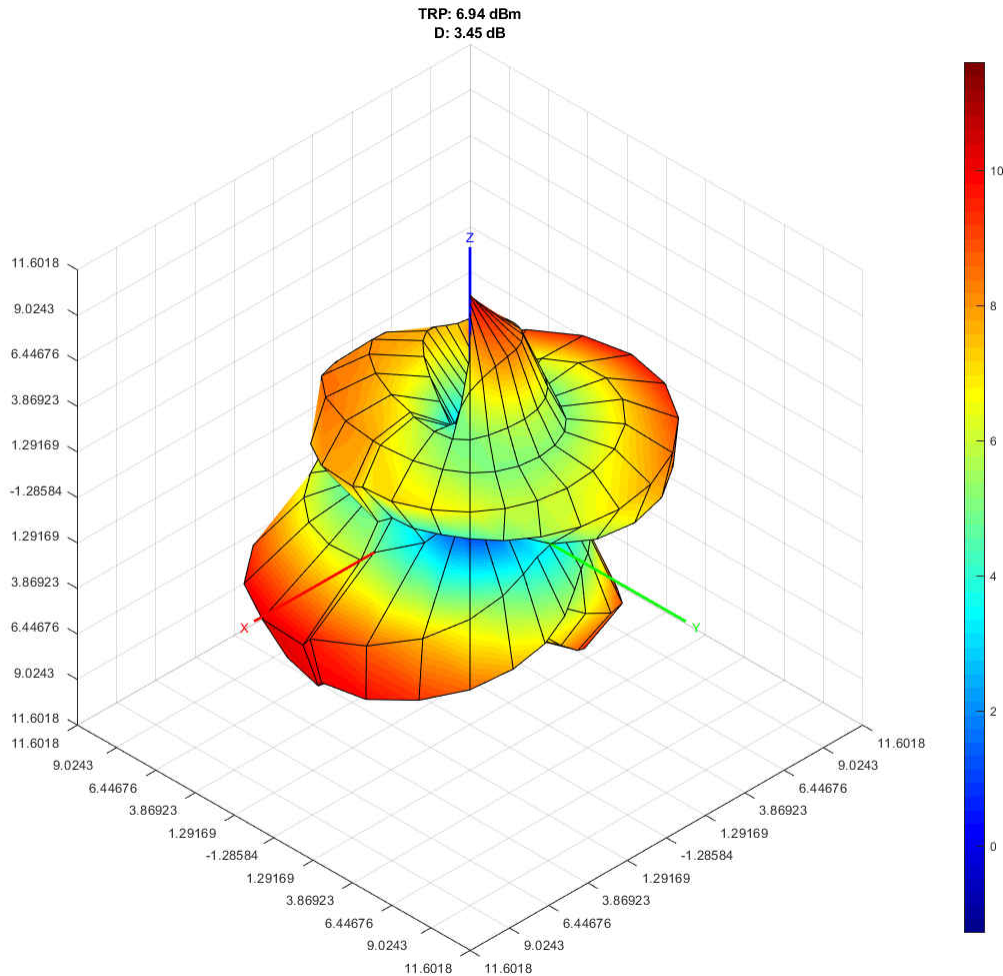
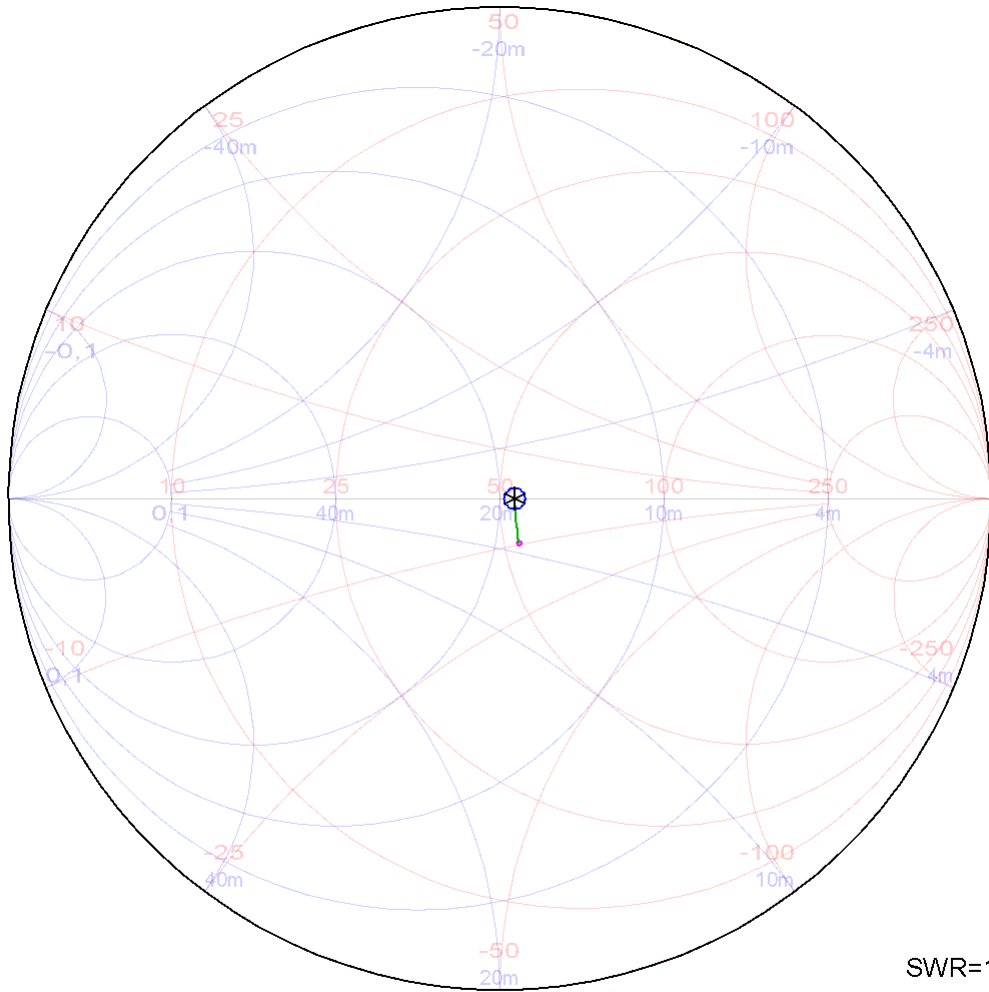


图 4-16. 在 13dBm 510MHz 设置下匹配 510MHz 辐射的天线辐射方向图

4.5 868/915MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

如前面的节 3.2.5 所述，天线的带宽足以同时实现 868MHz 和 915MHz 的良好匹配。因此，我们只需要为两个频率提供一个匹配网络，因此将天线调谐至 $((915 + 896)/2 \approx) 892\text{MHz}$ 。

图 4-17 展示了用于匹配单频 892MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.065。



SWR=1,065
 $\Gamma=31,3m \pm 0,93$
 $Z=53,2+j54,3m$
 $Y=18,8m-j19,2u$

图 4-17. 单频 892MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 4-18 和图 4-19 展示了得到的阻抗和 SWR (为 1.225) 小于 SWR < 2.0 的良好匹配阈值。表 4-5 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 4-19 中可以看到，SWR < 2.0 定义的天线带宽为 941.16 - 845.8 = 95.81MHz。

表 4-5. 892MHz 单频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60		0 Ω
Z61		DNM
Z62		DNM
Z63		0 Ω
Z64	GRM0335C1H2R0CA01	2pF

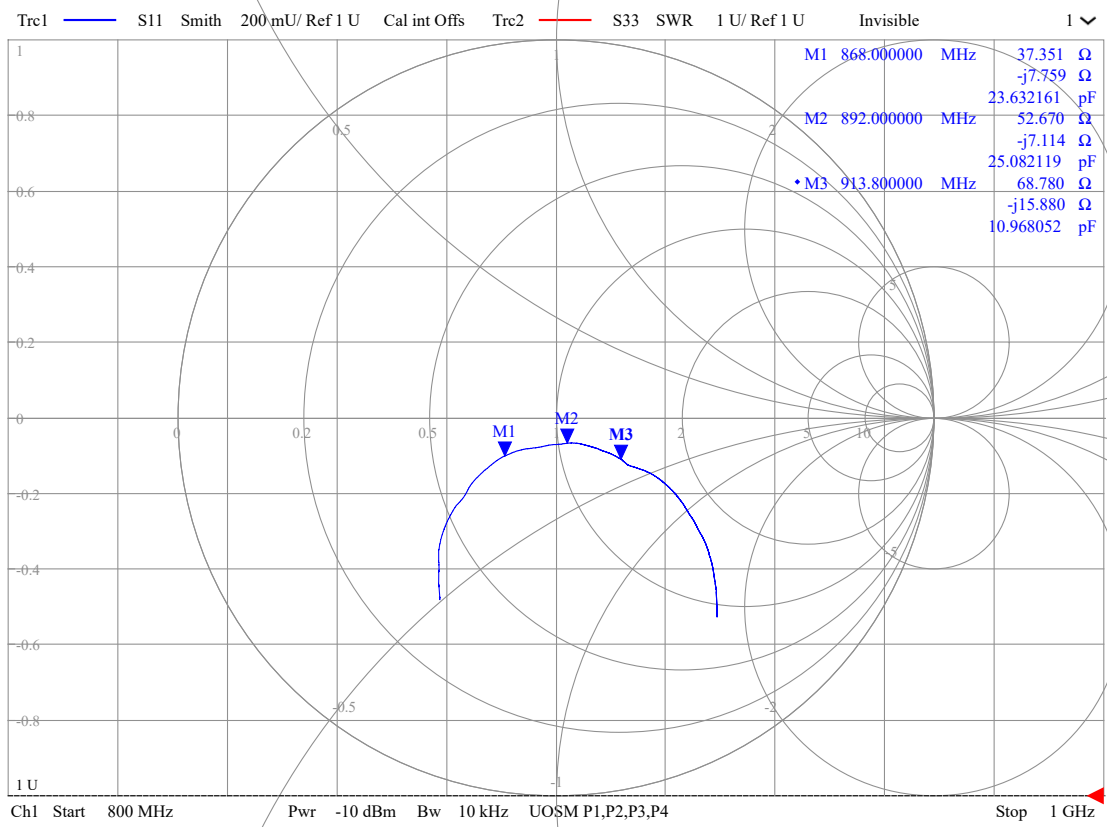


图 4-18. 868、892 和 915MHz 的史密斯圆图测量

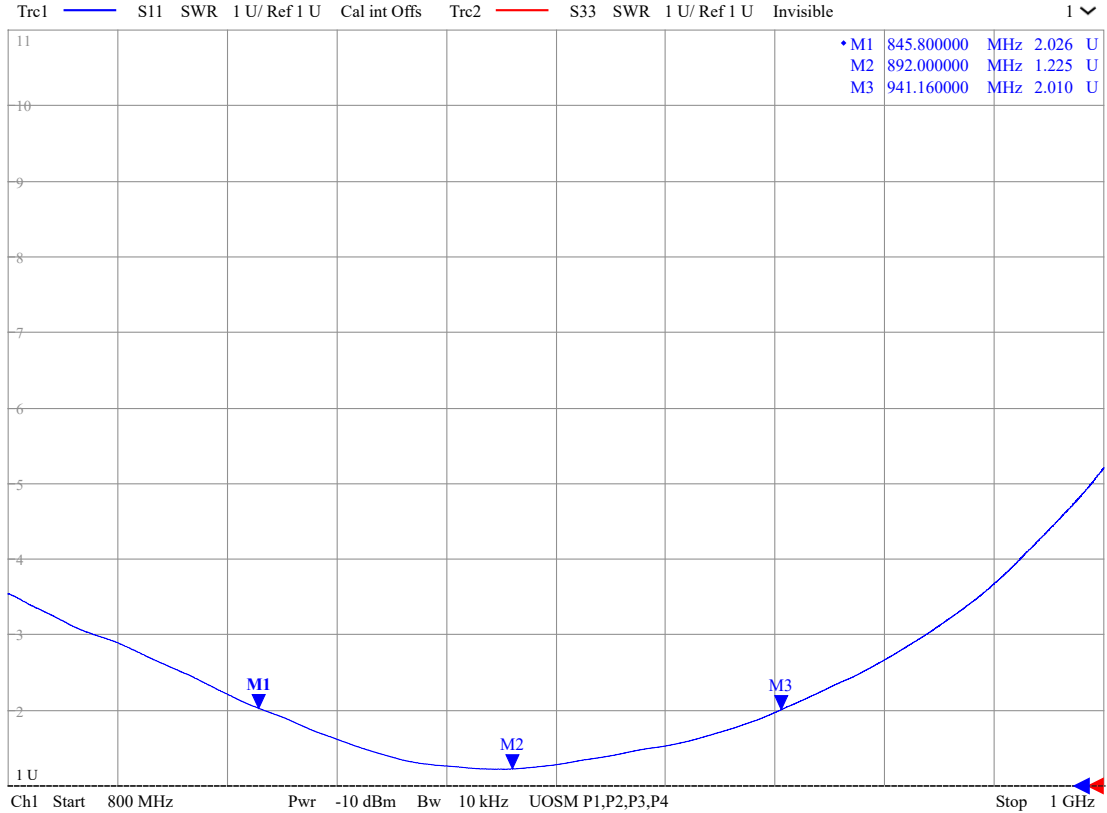


图 4-19. 892MHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 4-20 和图 4-21 展示了 13dBm 868/915MHz 设置下匹配 892MHz 辐射的天线辐射方向图。表 4-6 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 4-6. 868/915MHz 的 TRP 和效率

	图 38	图 39
频率	868MHz	915MHz
功率设置	13dBm	13dBm
传导输出功率	11.89dBm	12.83dBm
TRP	10.51dBm	12.71dBm
效率	72.78%	97.27%

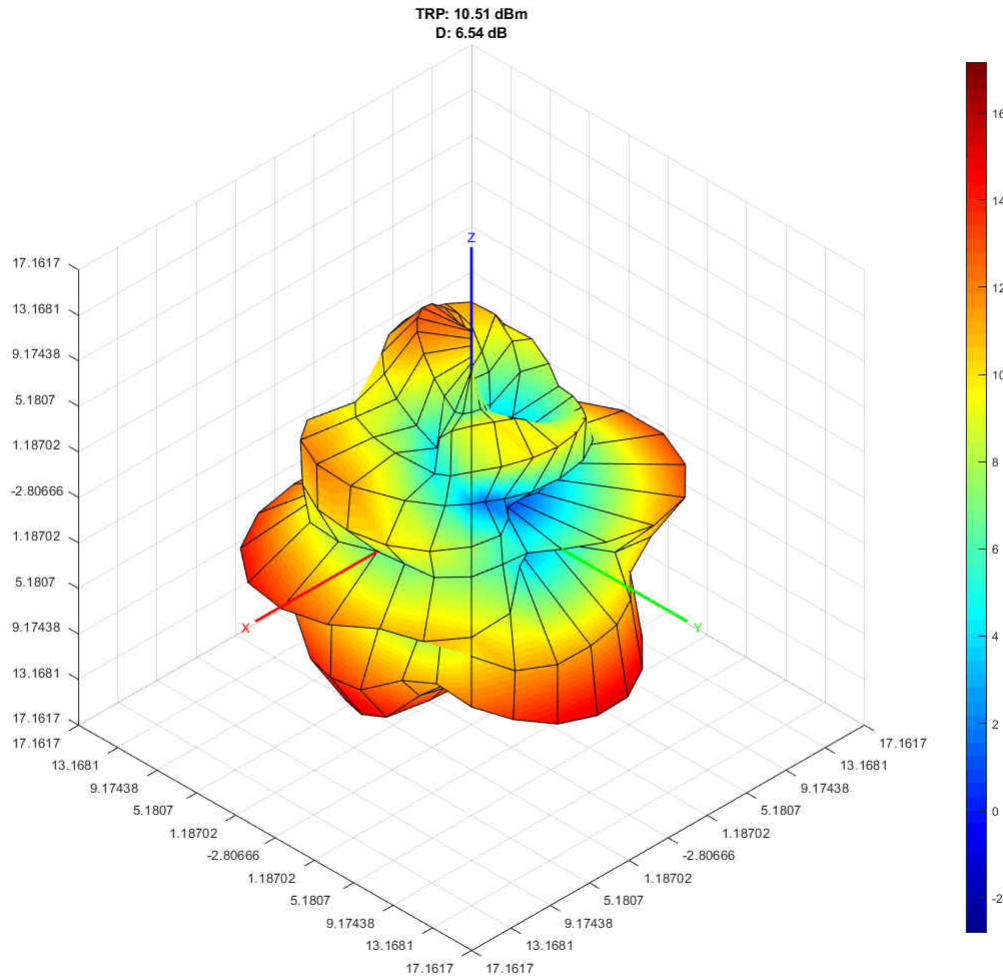


图 4-20. 在 13dBm 868MHz 设置下匹配 892MHz 辐射的天线辐射方向图

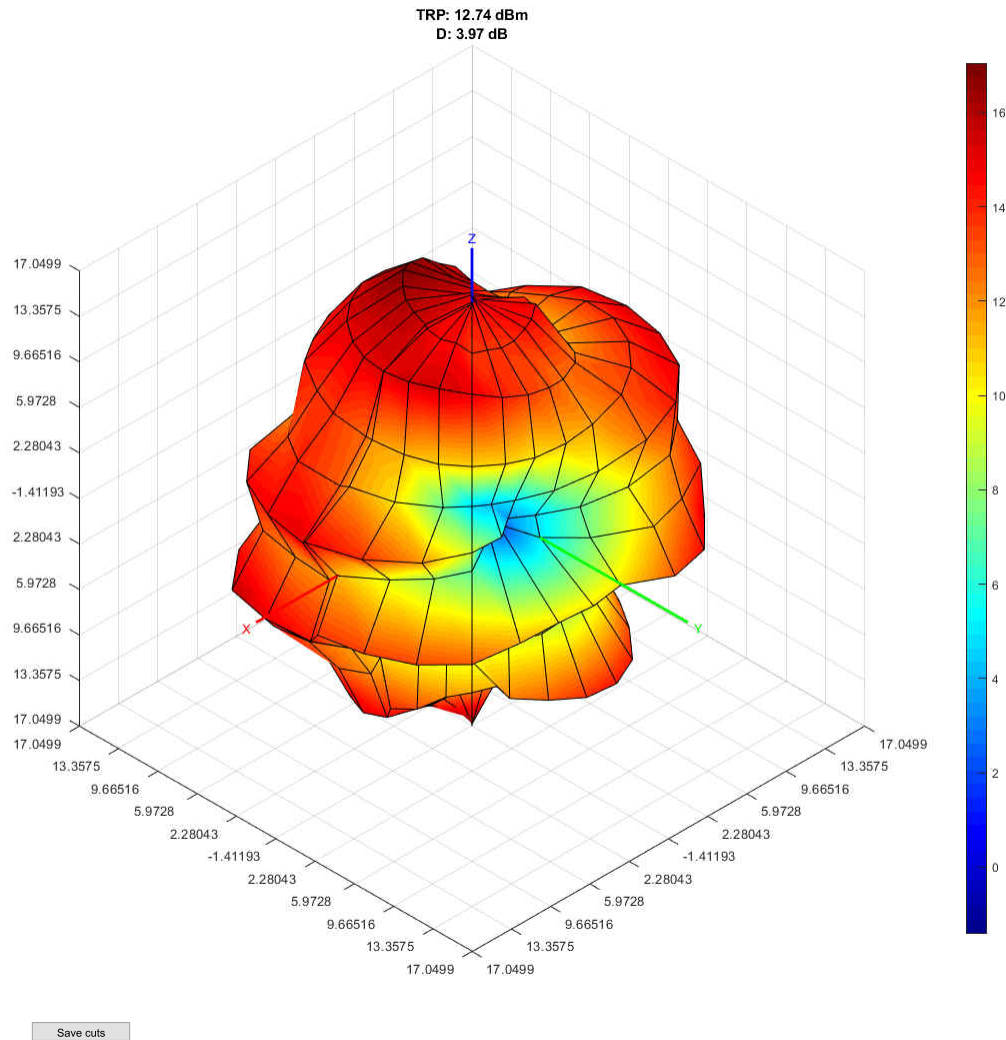


图 4-21. 在 13dBm 868MHz 设置下匹配 892MHz 辐射的天线辐射方向图

备注

如果 868 或 915MHz 中的任何一个频率优先于另一个频率，则可以将天线调谐到任一频率。这将提高频率的效率和带宽。

5 双频匹配和结果

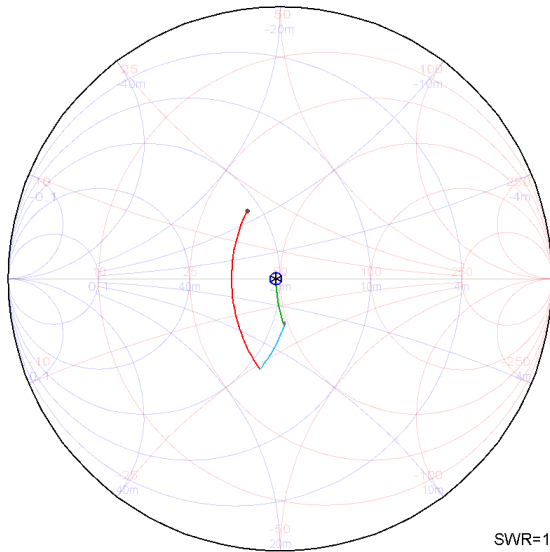
本节介绍 CTIA 测量汇总结果。请注意，性能会受到接地层的尺寸和形状的影响。

除了前面提到的 433、490-510 或 868/915MHz 之外，天线还支持 2440MHz 下的双频运行。双频匹配的棘手之处在于两个频带都需要具有良好的匹配 ($SWR < 2$)。本应用手册中使用的步骤如下：

1. 通过史密斯圆图工具，仅使用 Z62 和 Z63 来匹配低频带
2. 使用史密斯圆图工具，通过添加 Z60 和 Z61 来匹配高频带
3. 调整元件的值，直到达到可接受的 SWR/阻抗
4. 在 VNA 上使用 S11 来测试是否匹配
5. 矫正高频带和低频带中相对于理论史密斯圆图的偏差

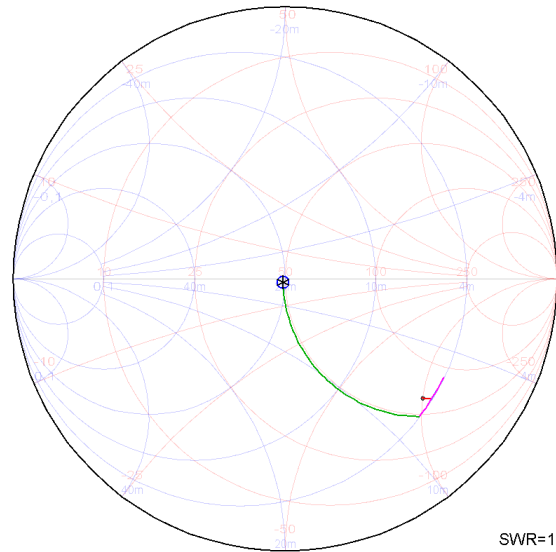
5.1 433MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 5-1 和图 5-2 展示了用于匹配双频 433MHz 和 2440MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.033 和 1.028。



SWR=1,033
 $\Gamma=16,3m\angle 162$
 $Z=48,5+j0,500$
 $Y=20,6m-j213u$

图 5-1. 双频 433MHz 匹配的理论史密斯圆图



SWR=1,028
 $\Gamma=13,6m\angle -121$
 $Z=49,3-j1,15$
 $Y=20,3m+j474u$

图 5-2. 双频 2440MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 5-3 和图 5-4 展示了得到的阻抗和 SWR (433MHz 下为 1.113, 2440MHz 下为 1.201) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 5-1 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 5-4 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽在 433MHz 下为 $445.6 - 421.6 = 24\text{MHz}$ ，在 2440MHz 下为 $2570 - 2320 = 250\text{MHz}$ 。

表 5-1. 433MHz 和 2440MHz 双频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60	LQP03TN6N8H02	6.8nH
Z61		DNM
Z62	LQP03TN47NH02	47nH
Z63	GRM0335C1H8R2CA01	8.2pF
Z64	LQP03TN51NH02	51nH

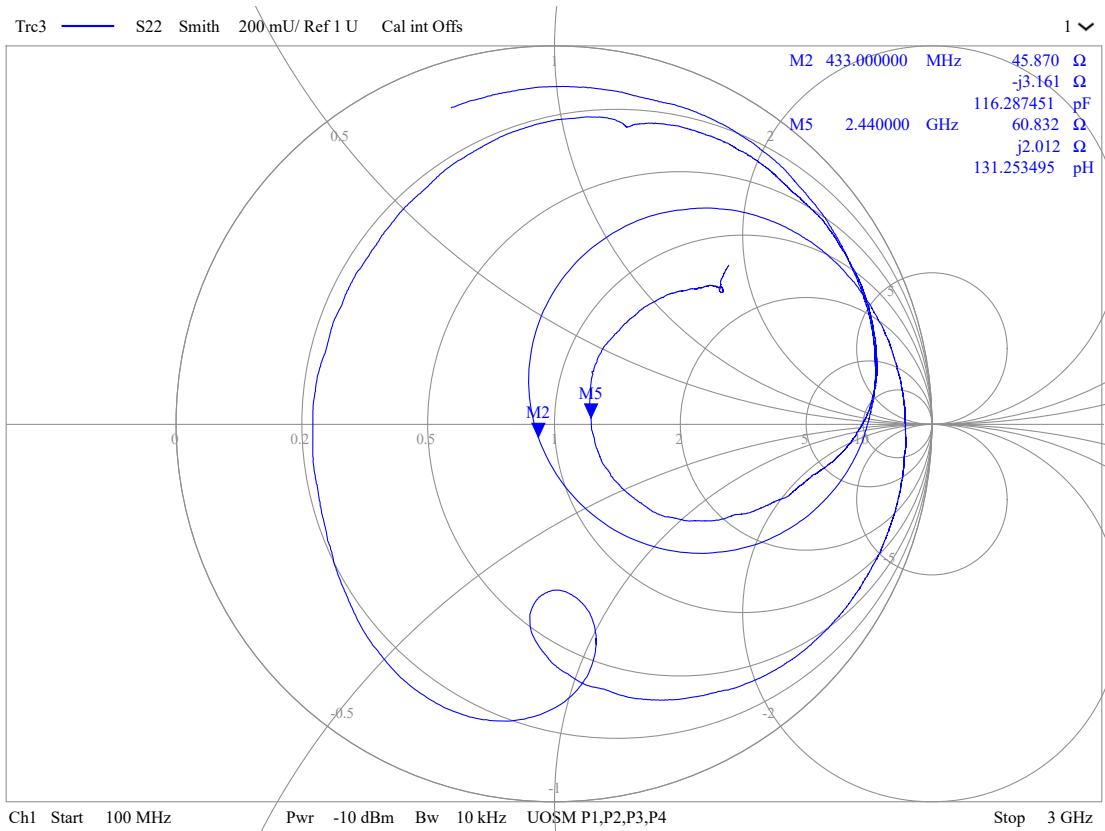


图 5-3. 双频 433MHz 和 2.4GHz 的史密斯圆图测量

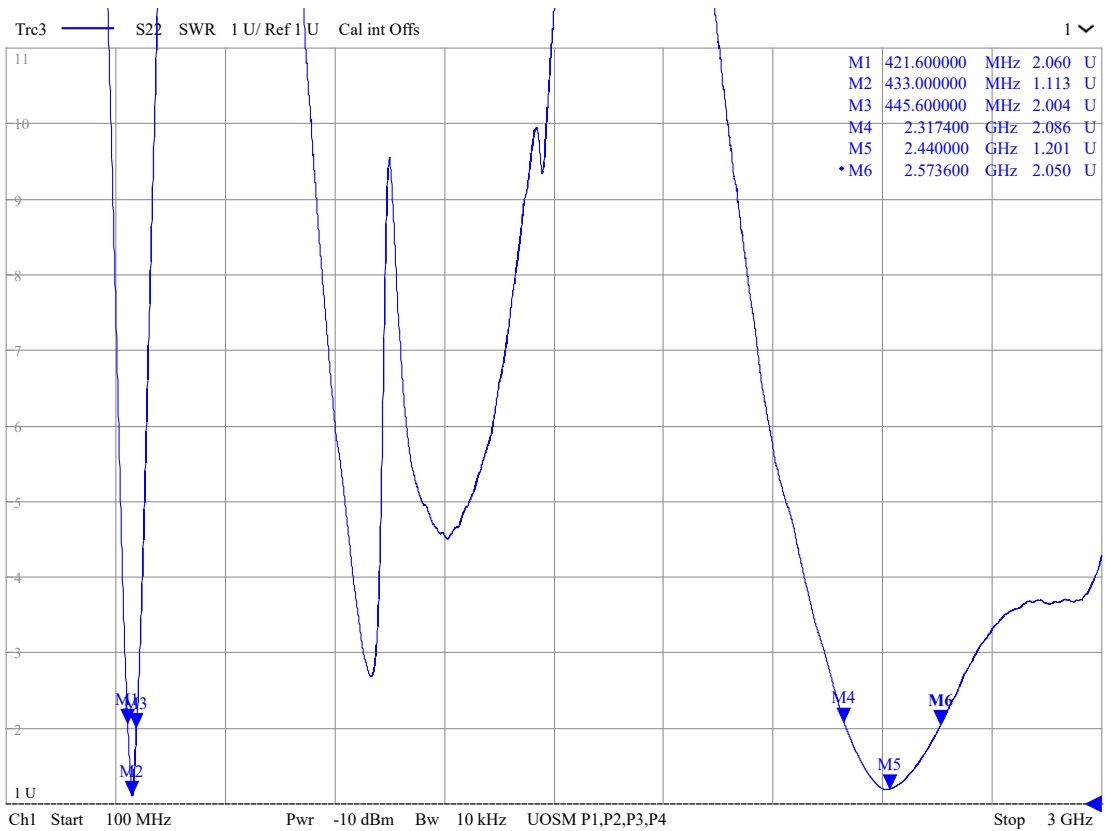


图 5-4. 双频 433MHz 和 2.4GHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 5-5 和图 5-6 展示了天线在 433 和 2440MHz 下的辐射方向图。表 5-2 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 5-2. 433MHz 和 2440MHz 双频天线匹配的 TRP 和效率

	图 43	图 44
频率	433MHz	2440MHz
功率设置	13dBm	10dBm
传导输出功率	12.42dBm	9.15dBm
TRP	6dBm	8.56dBm
效率	22.8%	87.3%

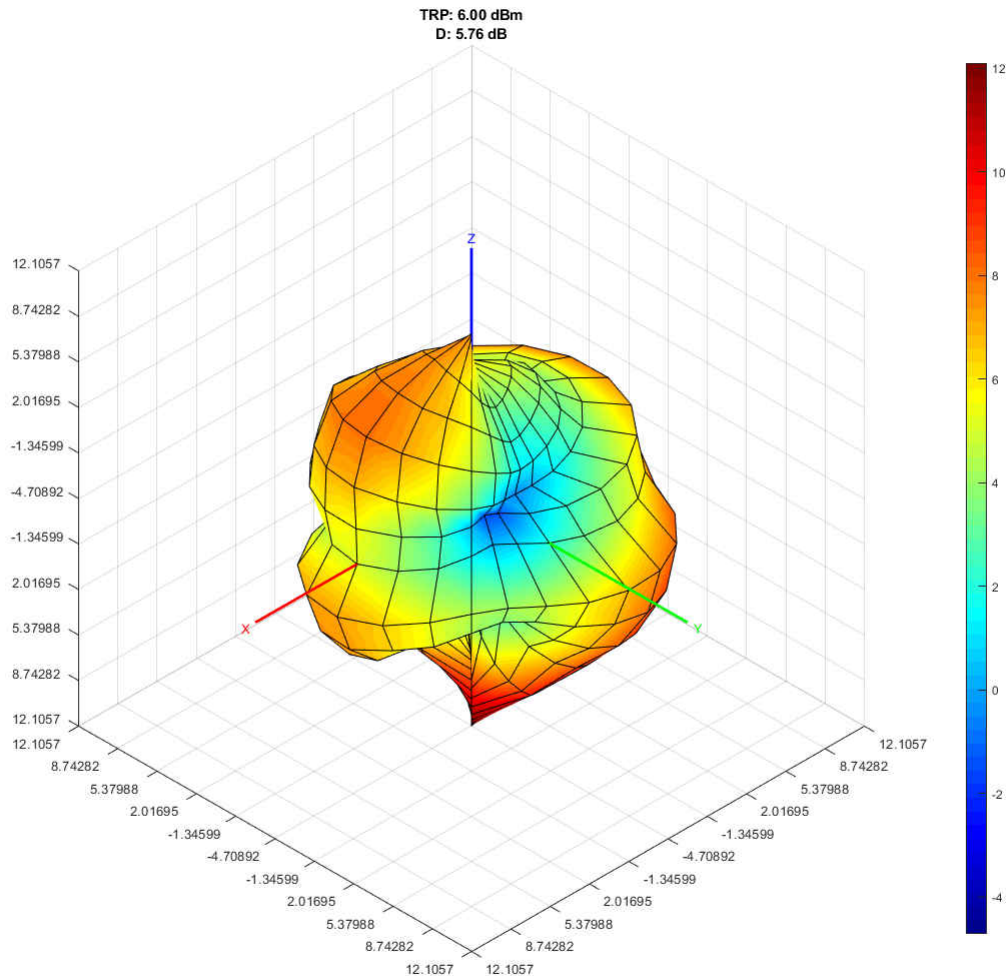


图 5-5. 13dBm 433MHz 设置下双频 433MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

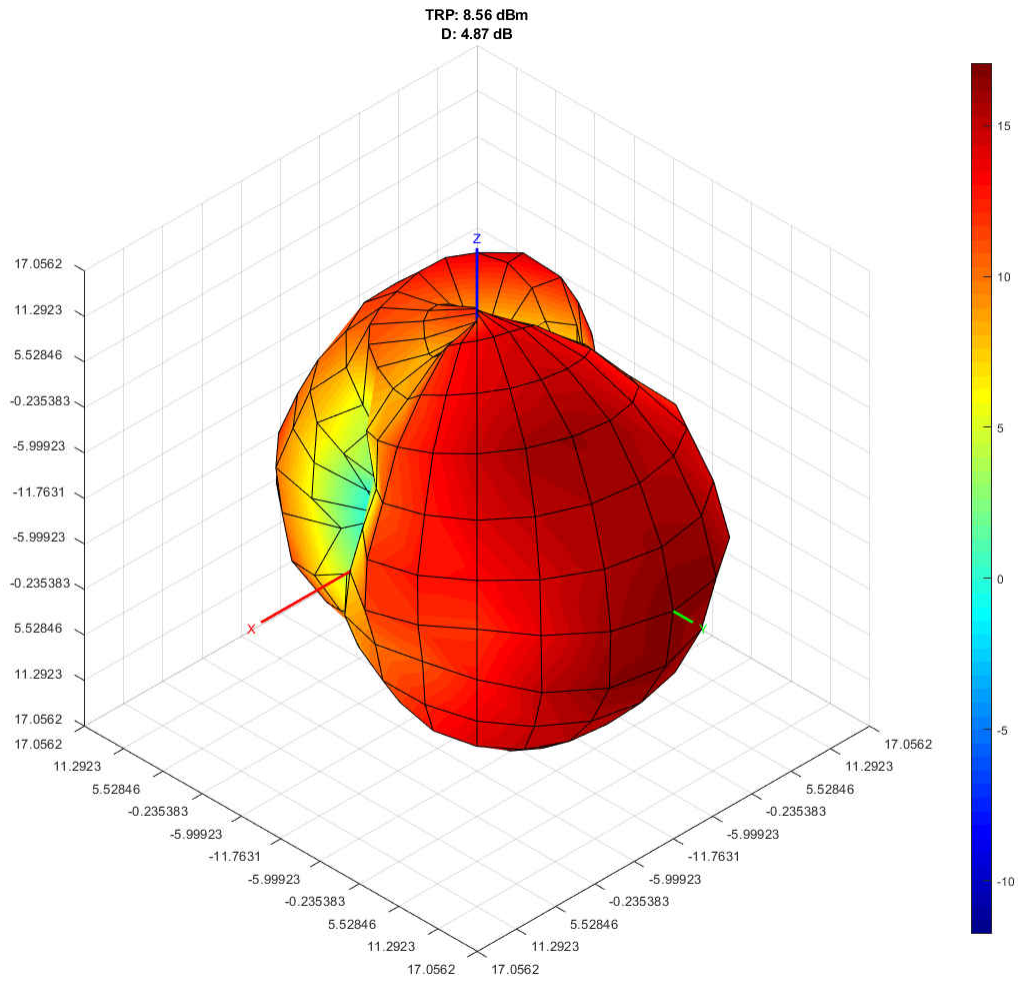
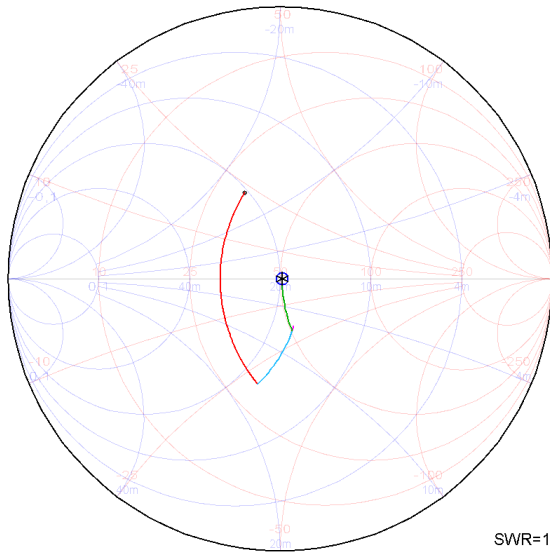


图 5-6. 10dBm 2440MHz 设置下双频 433MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

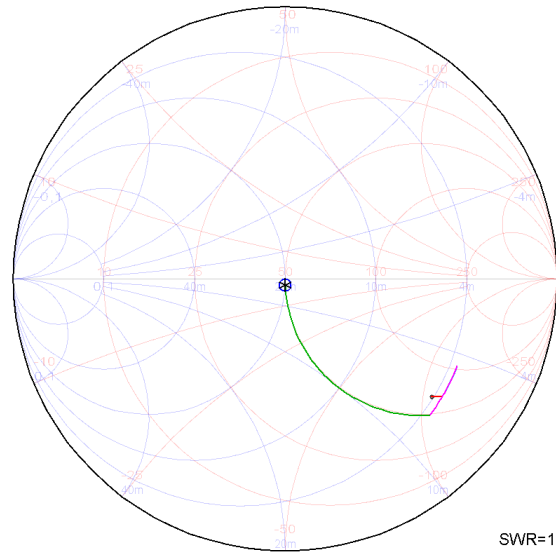
5.2 470MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 5-7 和图 5-8 展示了用于匹配双频 470MHz 和 2440MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.023 和 1.047。



SWR=1.023
 $\Gamma=11.5m\angle 27$
 $Z=51.0+j0.526$
 $Y=19.6m-j202u$

图 5-7. 双频 470MHz 匹配的理论史密斯圆图



SWR=1.047
 $\Gamma=23.0m\angle -88$
 $Z=50.0-j2.30$
 $Y=19.9m+j917u$

图 5-8. 双频 2440MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 5-9 和图 5-10 展示了得到的阻抗和 SWR (470MHz 下为 1.201，2440MHz 下为 1.278) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 5-3 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 5-10 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽在 470MHz 下为 $484 - 459 = 25\text{MHz}$ ，在 2440MHz 下为 $2556 - 2290 = 266\text{MHz}$ 。

表 5-3. 470MHz 和 2440MHz 双频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60	LQP03TN6N2H02	6.2nH
Z61	GRM0335C1HR10WA01	0.1pF
Z62	LQP03TN36NH02	36nH
Z63	GGRM0335C1H7R5CA01	7.5pF
Z64	LQP03TN39NH02	39nH

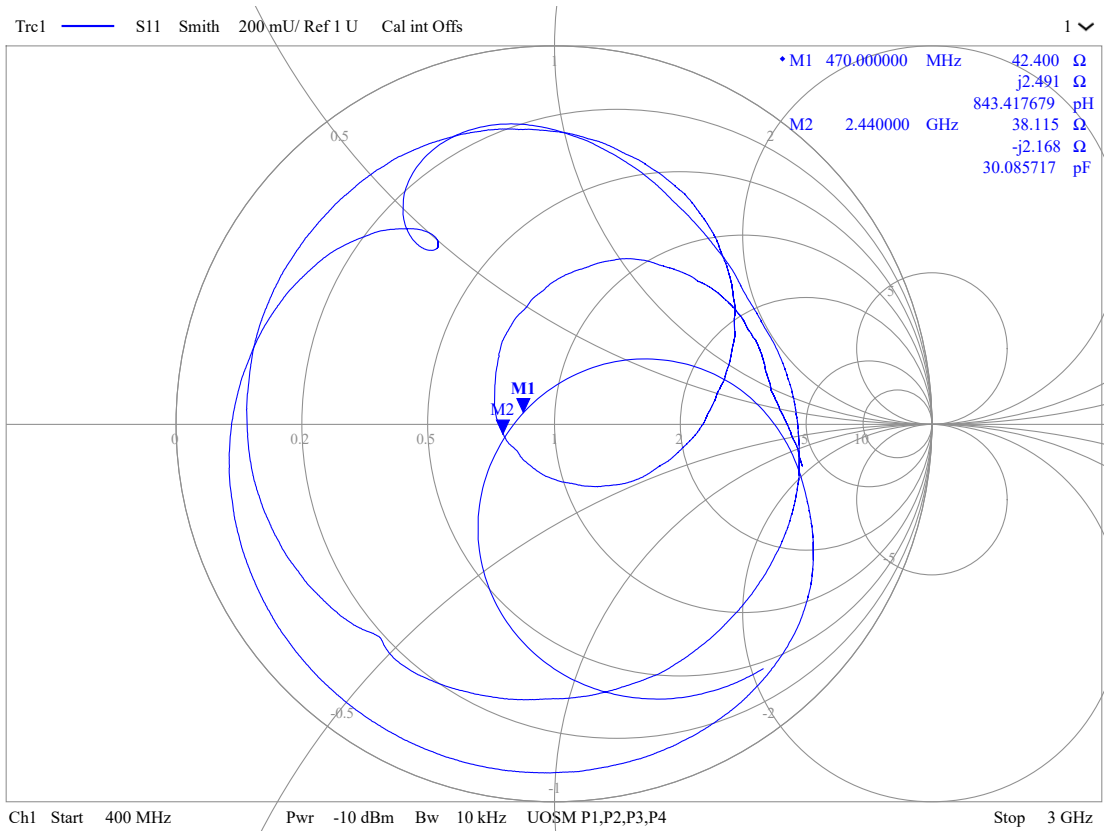


图 5-9. 双频 470MHz 和 2.4GHz 的史密斯圆图测量

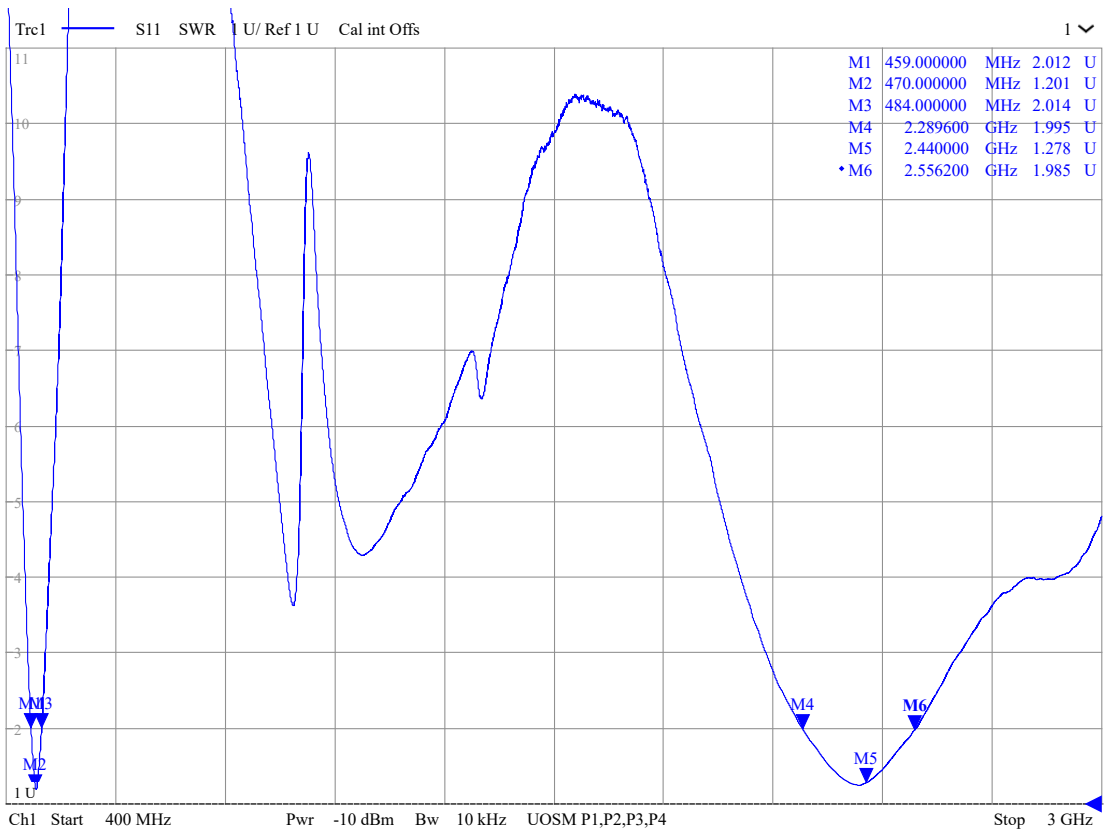


图 5-10. 双频 470MHz 和 2.4GHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 5-11 和图 5-12 展示了天线在 470MHz 和 2440MHz 下的辐射方向图。表 5-4 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 5-4. 470MHz 和 2440MHz 双频天线匹配的 TRP 和效率

	图 43	图 44
频率	470MHz	2440MHz
功率设置	13dBm	10dBm
传导输出功率	12.65dBm	9.15dBm
TRP	7.26dBm	8.19dBm
效率	28.9%	80.2%

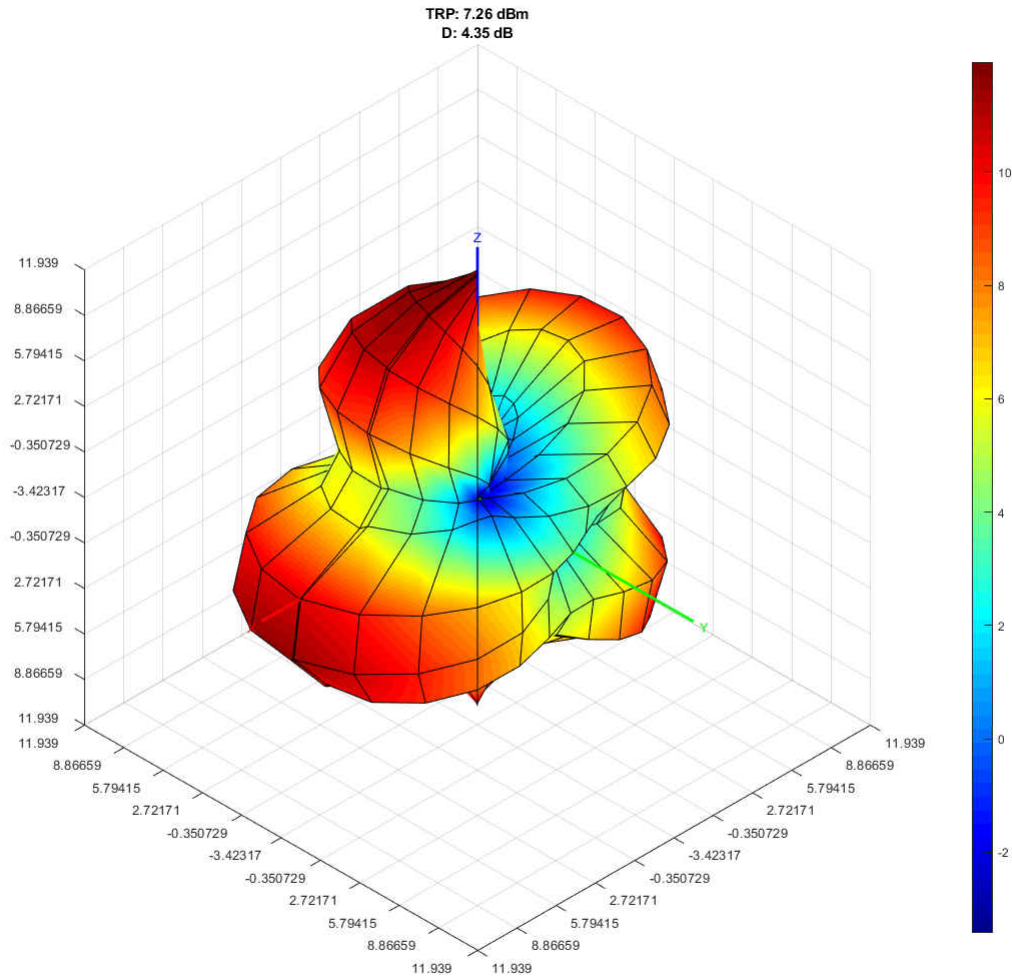


图 5-11. 13dBm 470MHz 设置下双频 470MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

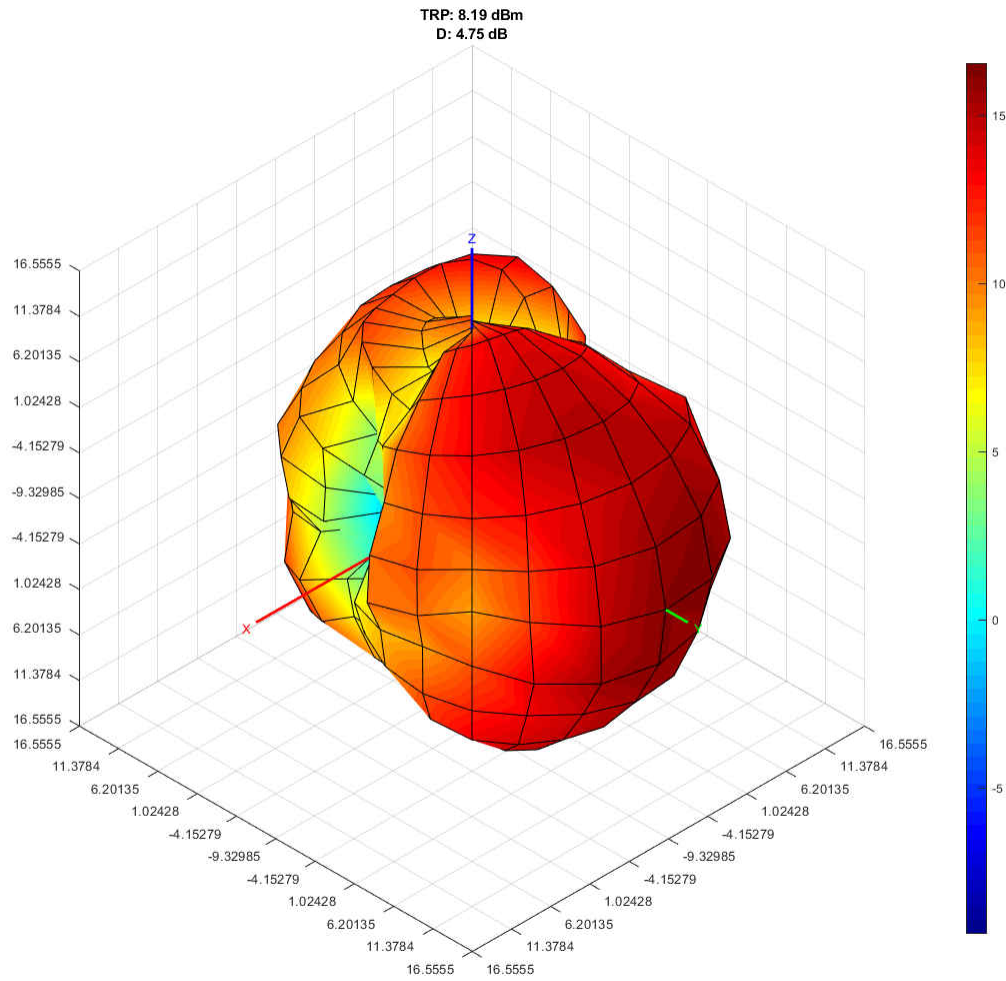


图 5-12. 10dBm 2440MHz 设置下双频 470MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

5.3 490MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 5-13 和图 5-14 展示了用于匹配双频 490MHz 和 2440MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.008 和 1.005。

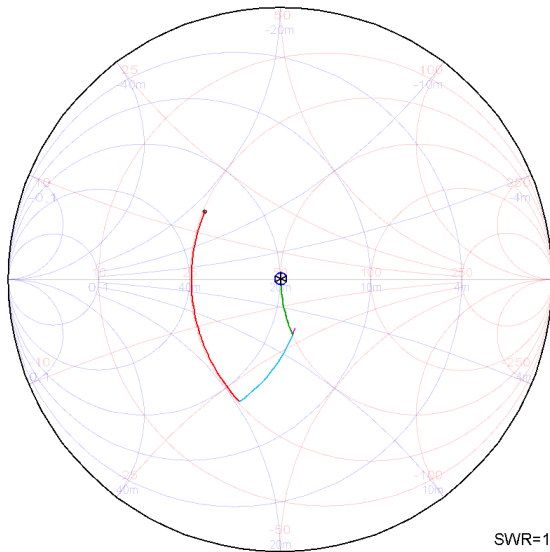


图 5-13. 双频 490MHz 匹配的理论史密斯圆图

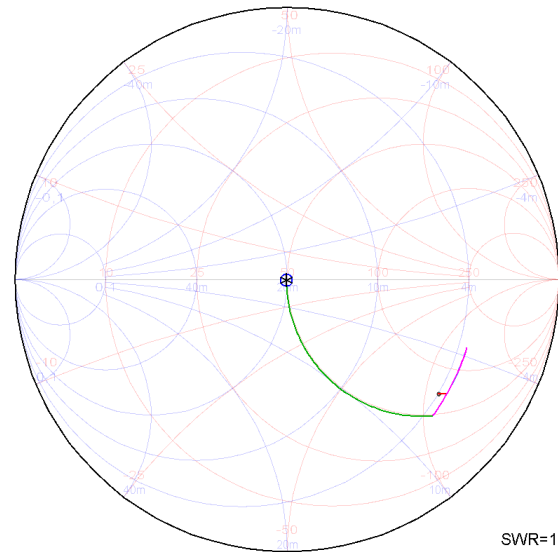


图 5-14. 双频 2440MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线谐振。图 5-15 和图 5-16 展示了得到的阻抗和 SWR (490MHz 下为 1.078，2440MHz 下为 1.277) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 5-5 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 5-16 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽在 490MHz 下为 $506 - 478.2 = 27.8\text{MHz}$ ，在 2440MHz 下为 $2567 - 2333 = 234\text{MHz}$ 。

表 5-5. 490MHz 和 2440MHz 双频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60	LQP03TN6N8H02	6.8nH
Z61	GRM0335C1HR10WA01	0.1pF
Z62	LQP03TN24NH02	24nH
Z63	GRM0335C1H100JA01	10pF
Z64	LQP03TN33NH02	33nH

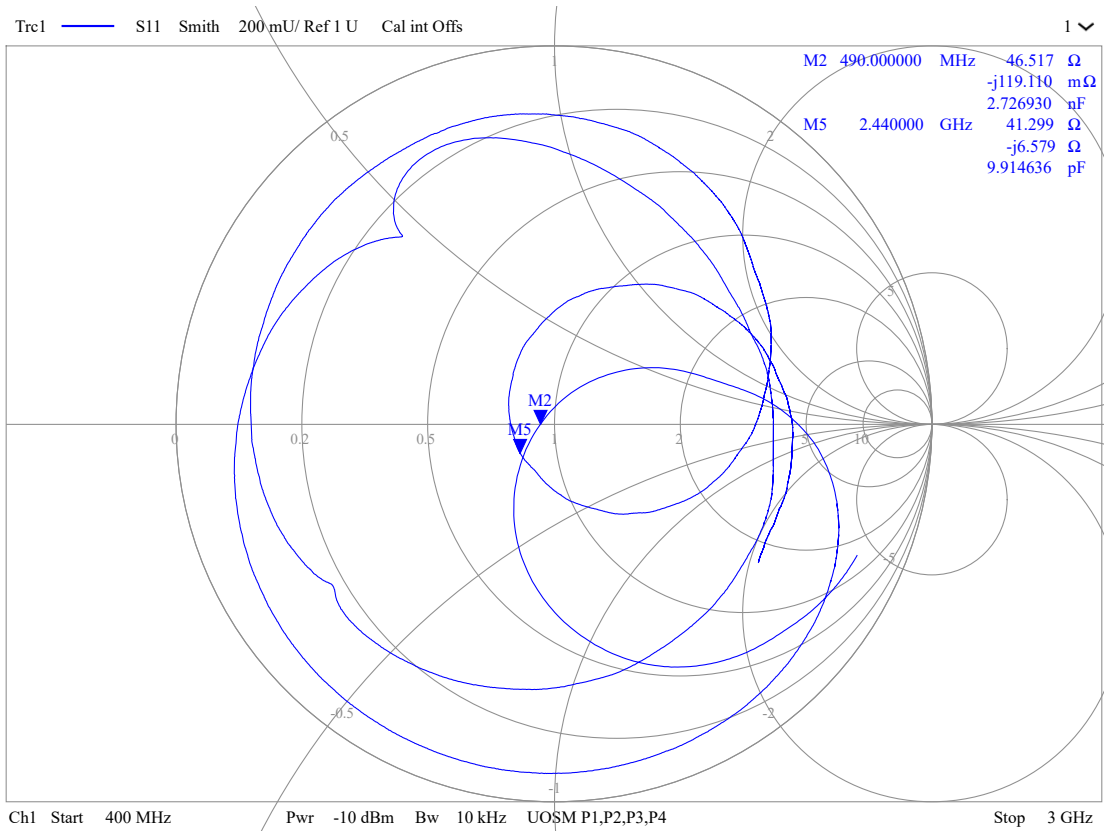


图 5-15. 双频 490MHz 和 2.4GHz 的史密斯圆图测量

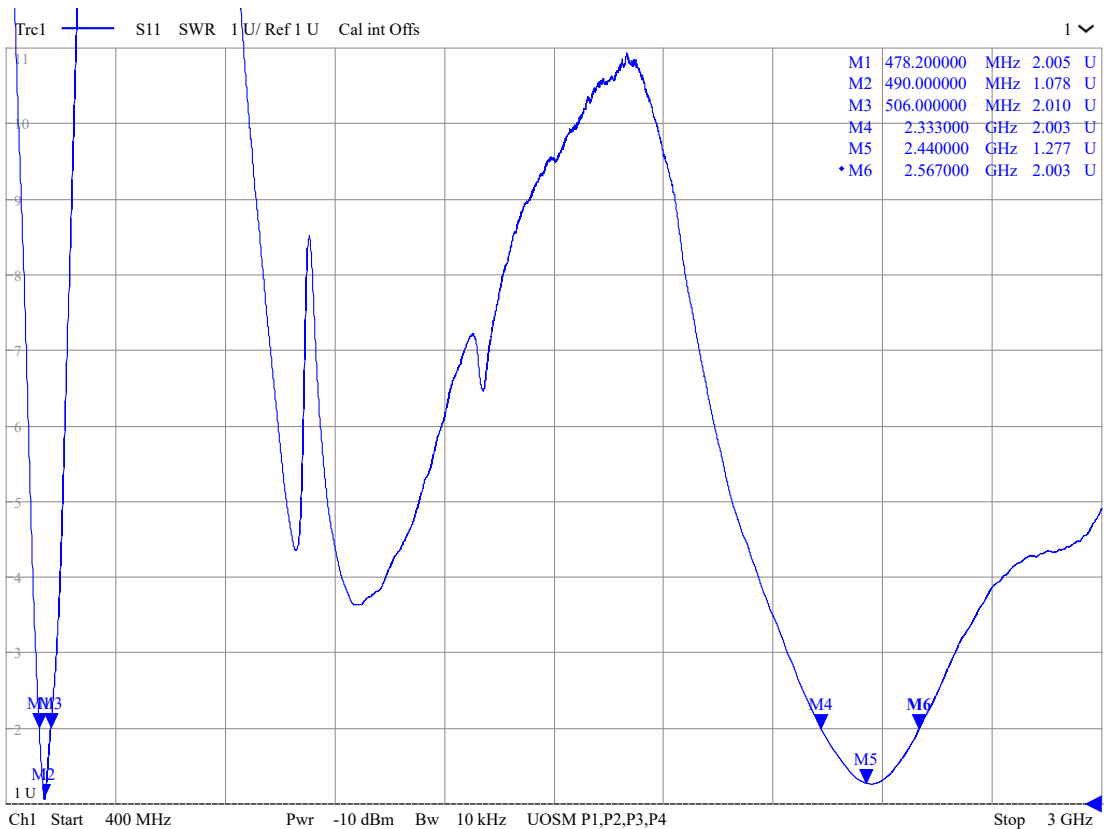


图 5-16. 双频 490MHz 和 2.4GHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 5-17 和图 5-18 展示了天线在 490 和 2440MHz 下的辐射方向图。表 5-6 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 5-6. 490MHz 和 2440MHz 双频天线匹配的 TRP 和效率

	图 43	图 44
频率	490MHz	2440MHz
功率设置	13dBm	10dBm
传导输出功率	12.17dBm	9.15dBm
TRP	7.12dBm	8.58dBm
效率	31.6%	76.38%

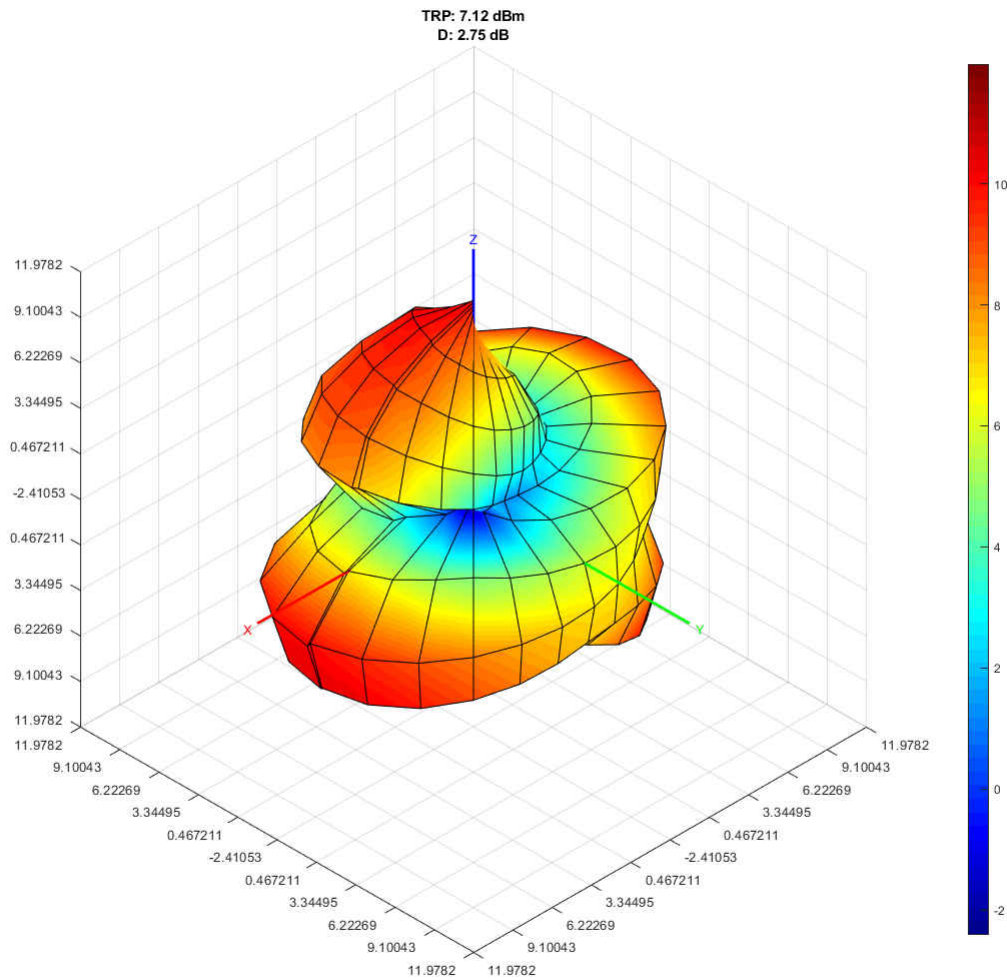


图 5-17. 13dBm 490MHz 设置下双频 490MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

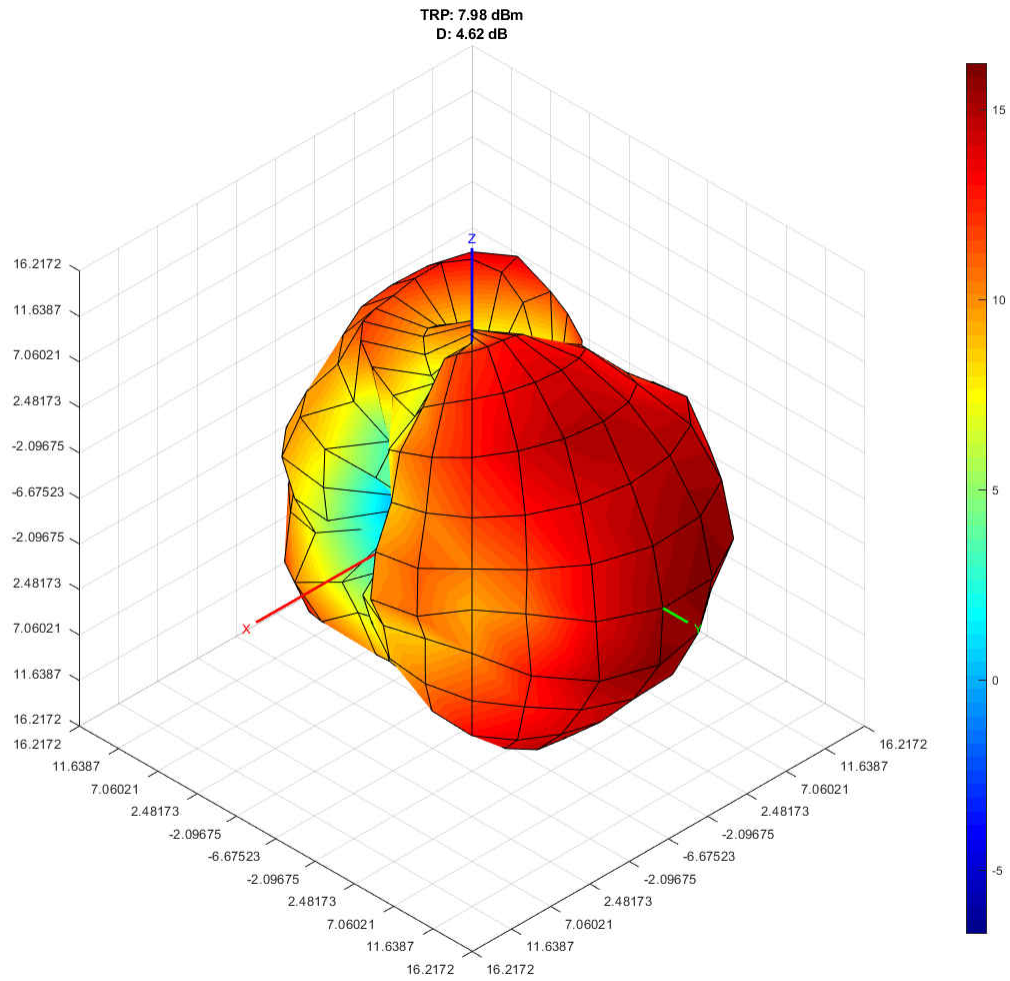
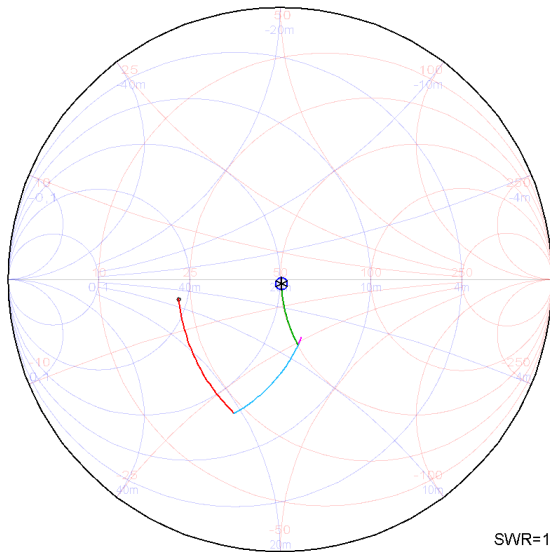


图 5-18. 10dBm 2440MHz 设置下双频 490MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

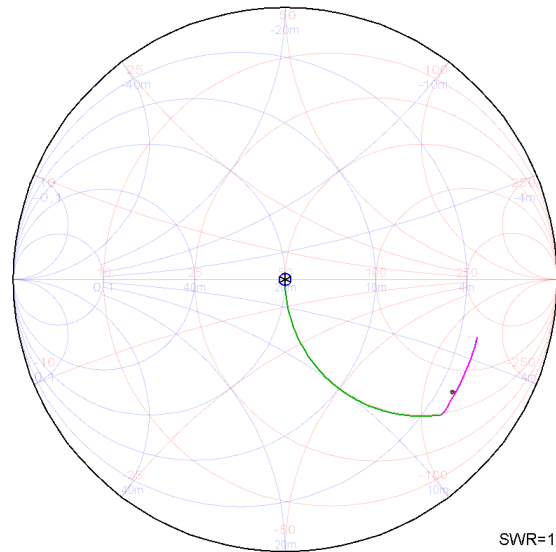
5.4 510MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 5-19 和图 5-20 展示了用于匹配双频 510MHz 和 2440MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.031 和 1.000。



SWR=1.031
 $\Gamma=15.3m\angle-70$
 $Z=50.5-j1.45$
 $Y=19.8m+j569\mu$

图 5-19. 双频 510MHz 匹配的理论史密斯圆图



SWR=1.000
 $\Gamma=171\mu\angle-67$
 $Z=50.0-j15.8m$
 $Y=20.0m+j6.31\mu$

图 5-20. 双频 2440MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 5-21 和图 5-22 展示了得到的阻抗和 SWR (510MHz 下为 1.110，2440MHz 下为 1.098) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 5-7 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 5-22 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽在 510MHz 下为 $522.4 - 497.8 = 24.6\text{MHz}$ ，在 2440MHz 下为 $2531 - 2325 = 206\text{MHz}$ 。

表 5-7. 510MHz 和 2440MHz 双频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60	LQP03TN7N5H02	7.5nH
Z61	GRM0335C1HR20BA01	0.2pF
Z62	LQP03TN18NH02	18nH
Z63	GRM0335C1H180JA01	18pF
Z64	LQP03TN27NH02	27nH

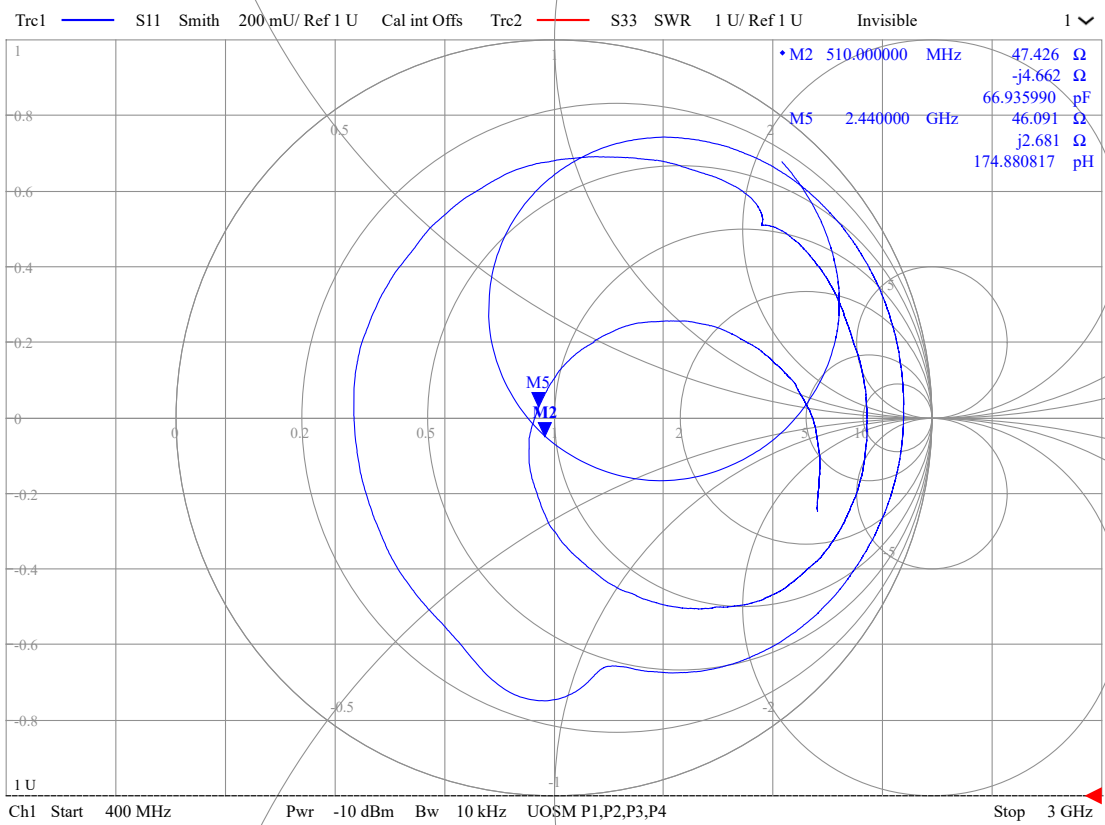


图 5-21. 双频 510MHz 和 2.4GHz 的史密斯圆图测量

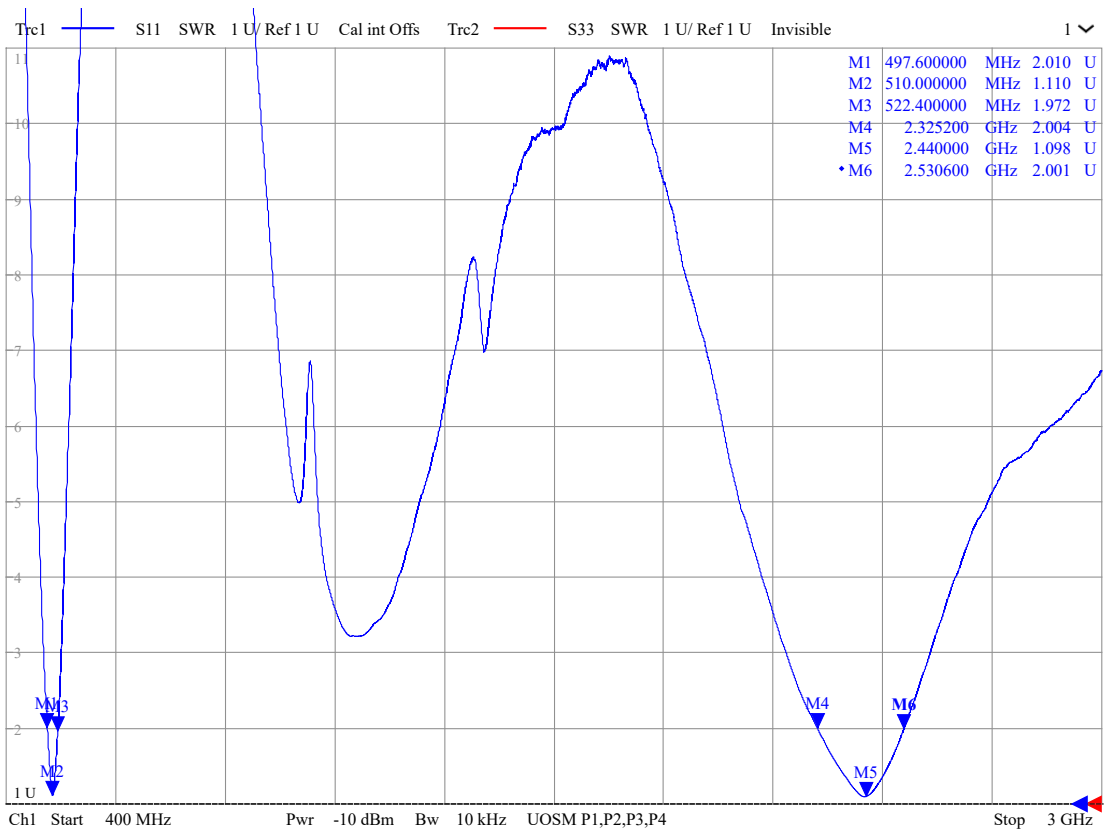


图 5-22. 双频 510MHz 和 2.4GHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 5-23 和图 5-24 展示了天线在 510 和 2440MHz 下的辐射方向图。表 5-8 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 5-8. 510MHz 和 2440MHz 双频天线匹配的 TRP 和效率

	图 43	图 44
频率	510MHz	2440 MHz
功率设置	13dBm	10dBm
传导输出功率	11.77dBm	9.15dBm
TRP	5.8dBm	12dBm
效率	25.3%	84.1%

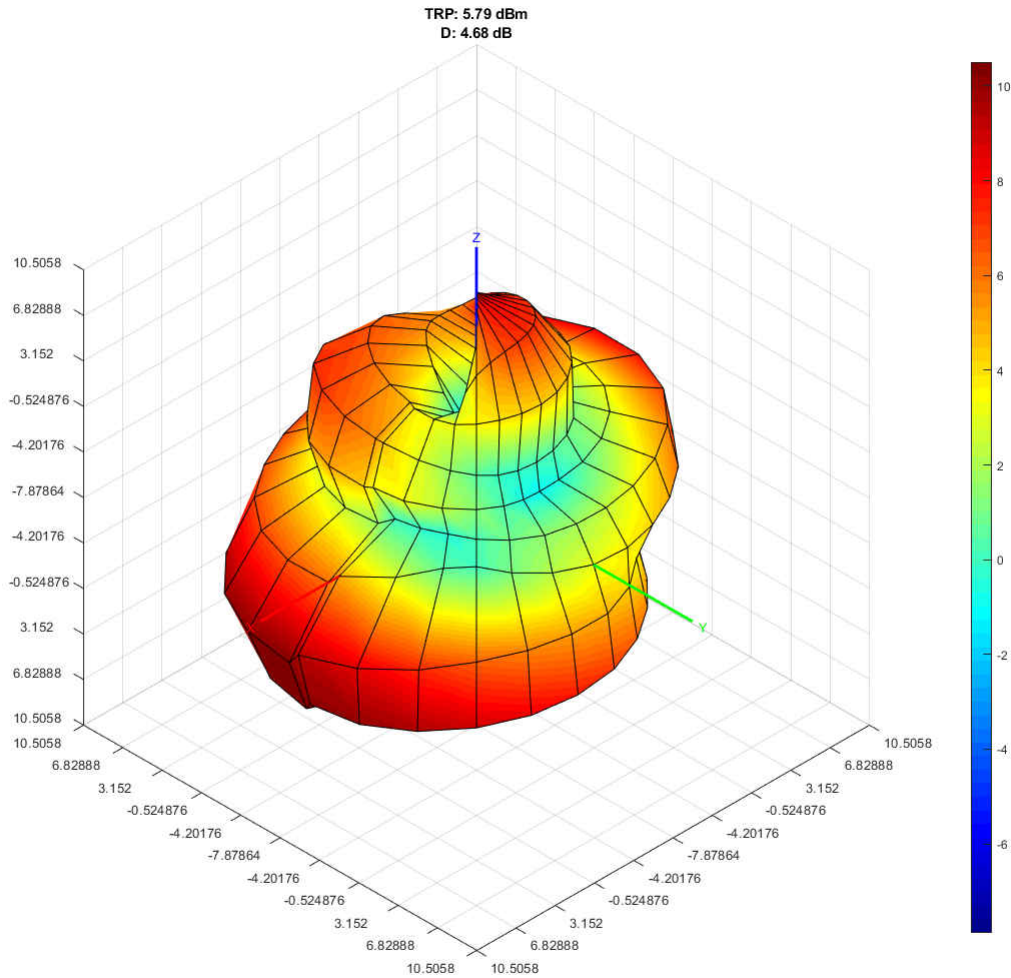


图 5-23. 13dBm 510MHz 设置下双频 510MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

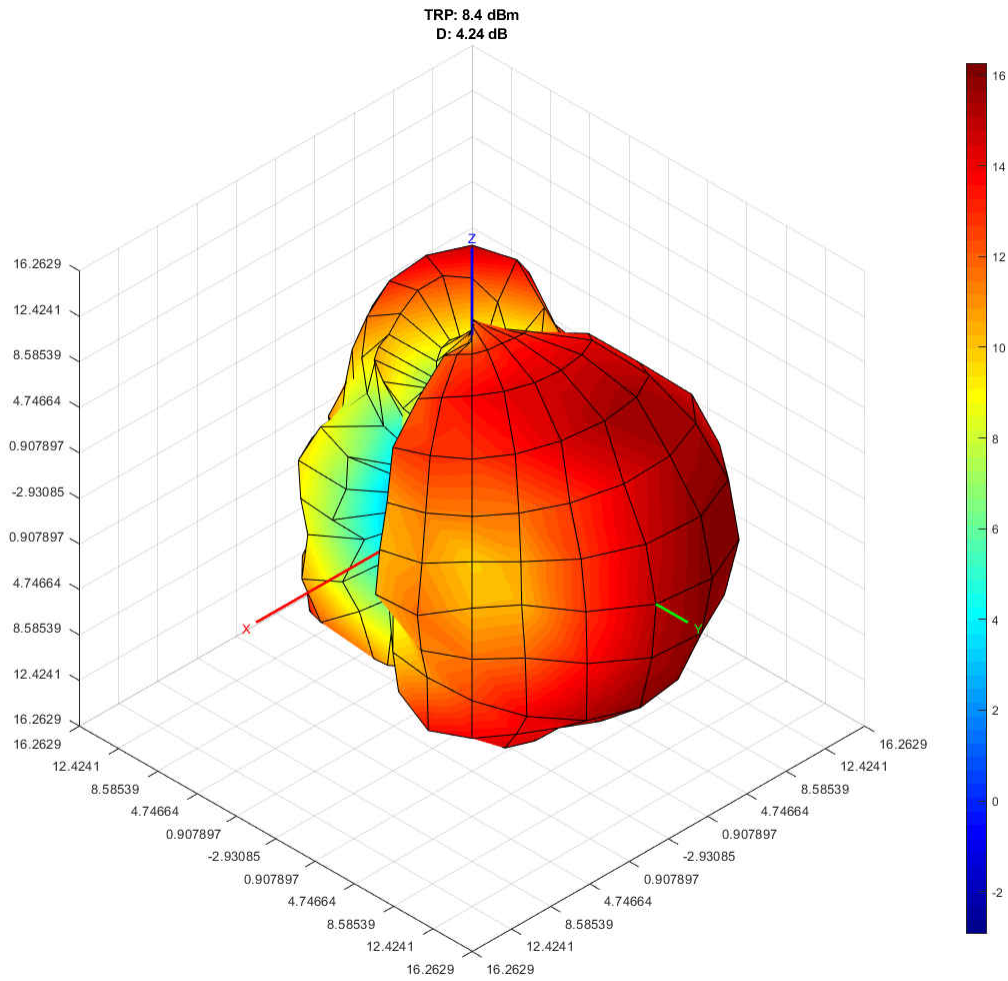


图 5-24. 10dBm 2440MHz 设置下双频 510MHz 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

5.5 868/915MHz 和 2440MHz 史密斯圆图、SWR、带宽和效率

图 5-25 和图 5-26 展示了用于匹配双频 892MHz 和 2440MHz 天线的理论史密斯圆图，理论 SWR 为 1.136 和 1.052。

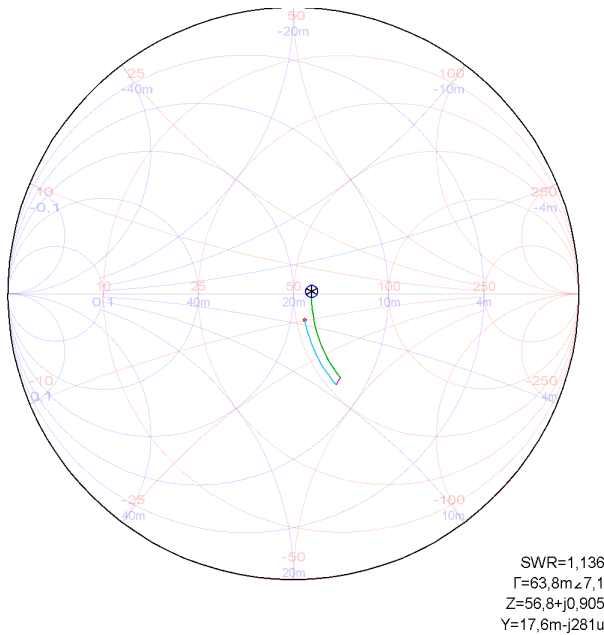


图 5-25. 双频 892MHz 匹配的理论史密斯圆图

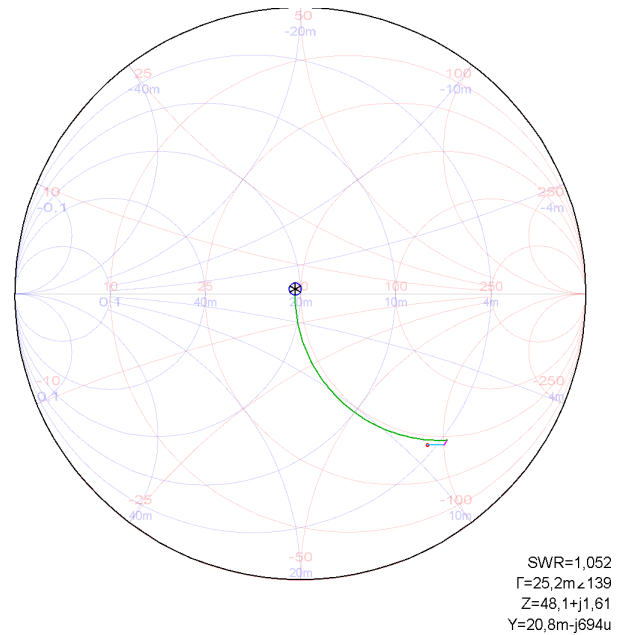


图 5-26. 双频 2440MHz 匹配的理论史密斯圆图

在实现理论匹配后，需要进一步调节天线的谐振。图 5-27 和图 5-28 展示了得到的阻抗和 SWR (892MHz 下为 1.083，2440MHz 下为 1.239) 小于 $SWR < 2.0$ 的良好匹配阈值。表 5-9 展示了用于实现图 1-2 所示匹配网络的元件的 BOM。

在图 5-28 中可以看到， $SWR < 2.0$ 定义的天线带宽在 892MHz 下为 $956.8 - 847.2 = 109.6\text{MHz}$ ，在 2440MHz 下为 $2611 - 2296 = 315\text{MHz}$ 。

表 5-9. 868/915MHz 和 2440MHz 双频运行的匹配网络 BOM

参考标识符	Murata 器件型号	值
Z60	LQP03TN6N8H02	6.8nH
Z61		DNM
Z62	LQP03TNR22H02	220nH
Z63	GRM0335C1H6R2BA01	6.2pF
Z64	GRM0335C1H2R0BA01	2nH

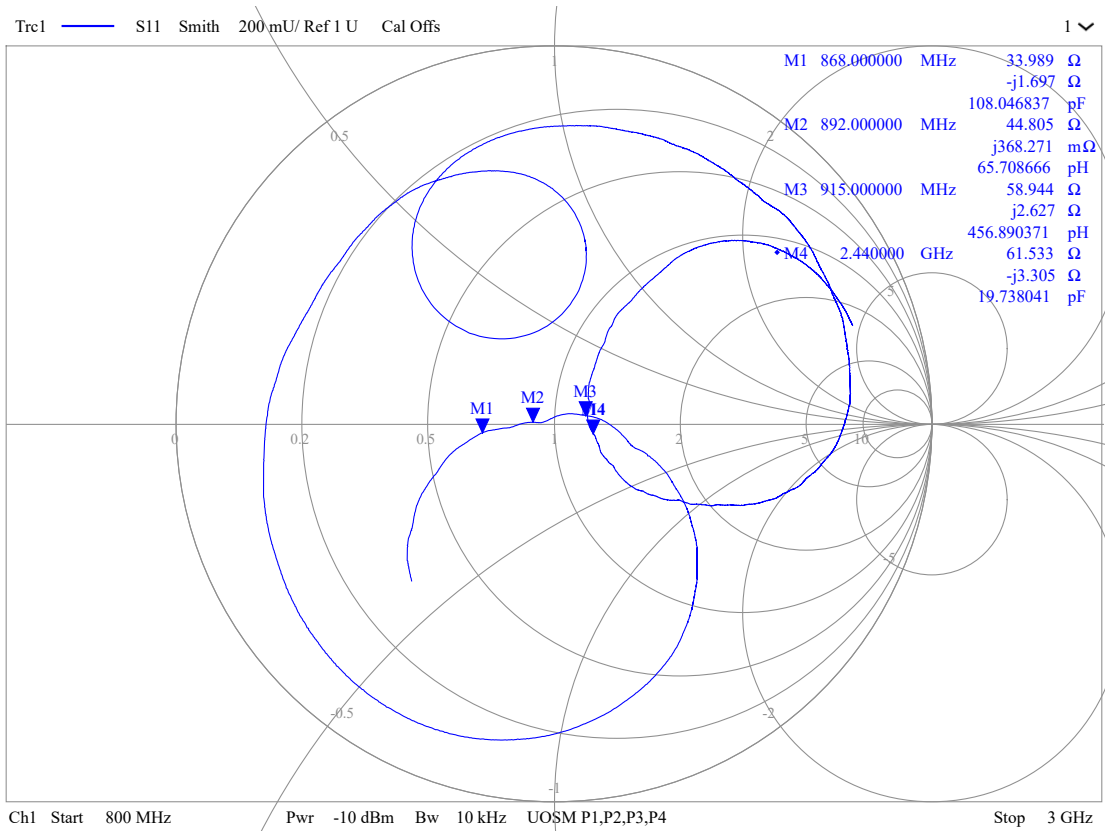


图 5-27. 双频 868/915MHz 和 2.4GHz 的史密斯圆图测量

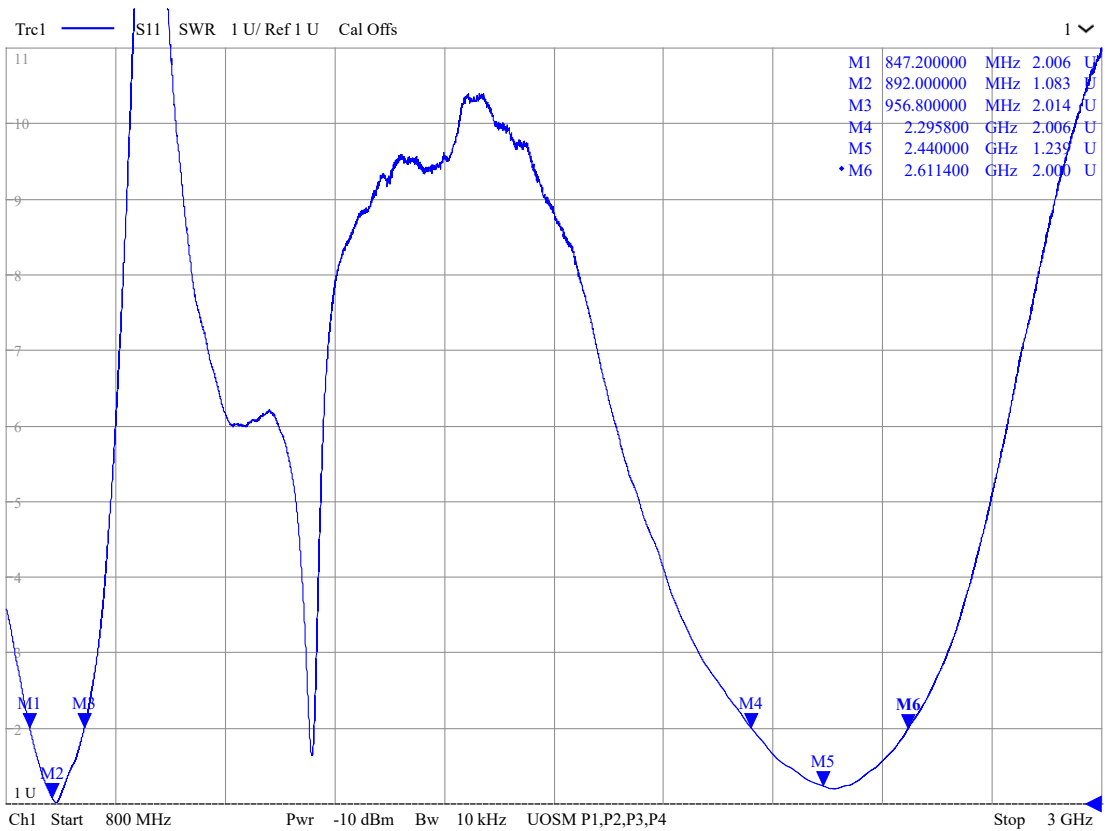


图 5-28. 双频 868/915MHz 和 2.4GHz 的 SWR 测量以及 SWR < 2 时的带宽

图 5-29、图 5-30 和图 5-31 展示了天线在 868、915 和 2440MHz 下的辐射方向图。表 5-10 展示了具有给定匹配网络的天线的 TRP 和效率。

表 5-10. 868/915MHz 和 2440MHz 双频天线匹配的 TRP 和效率

	图 43	图 65	图 44
频率	868MHz	915MHz	2440 MHz
功率设置	13dBm	13dBm	10dBm
传导输出功率	12.17dBm	13.23dBm	9.15dBm
TRP	9.84dBm	13.1dBm	11.98dBm
效率	62.4%	97.05%	83.75%

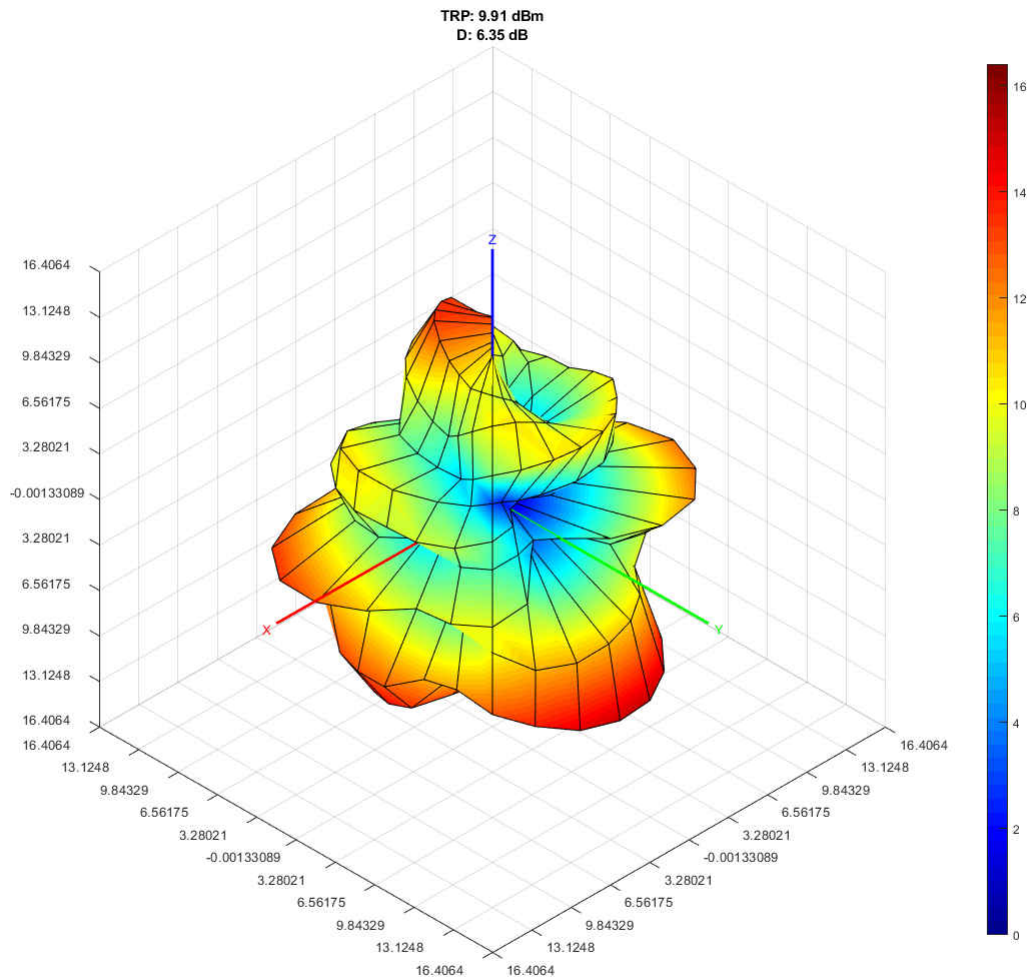


图 5-29. 13dBm 868MHz 设置下双频 868/915 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

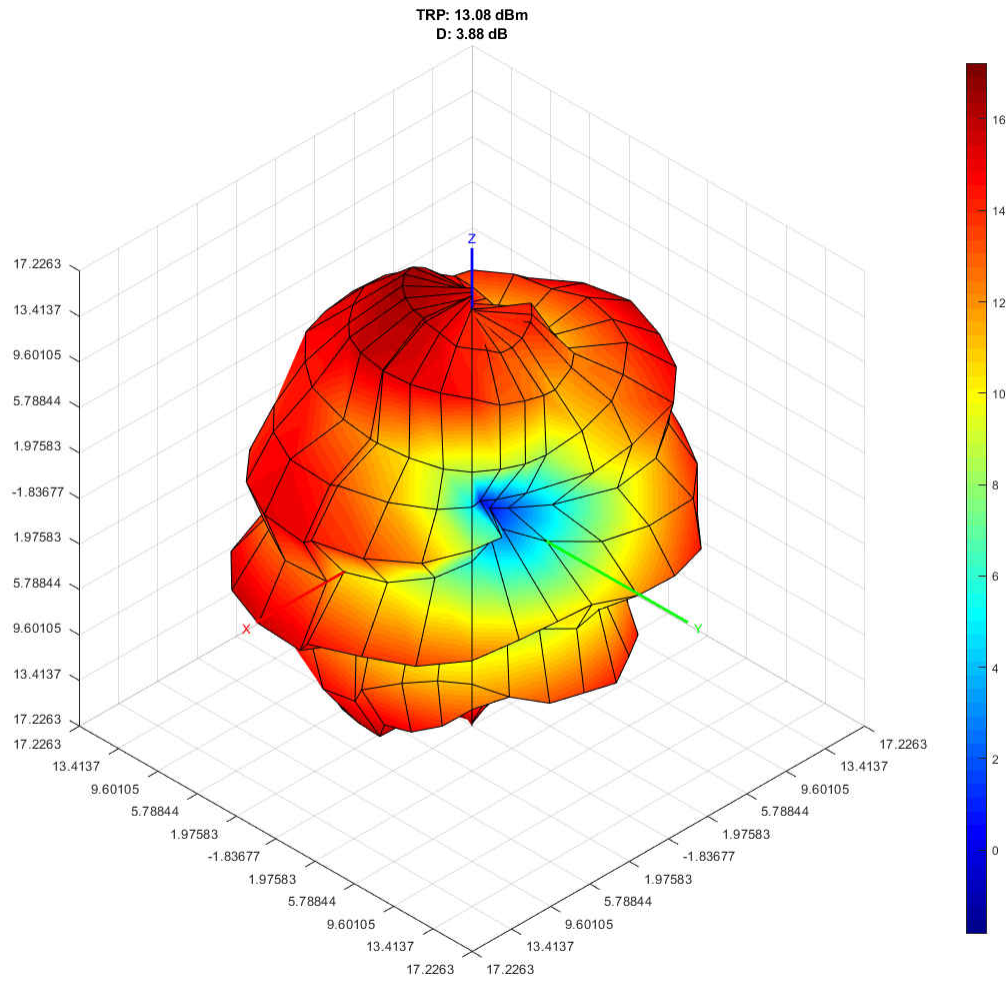


图 5-30. 13dBm 915MHz 设置下双频 868/915 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

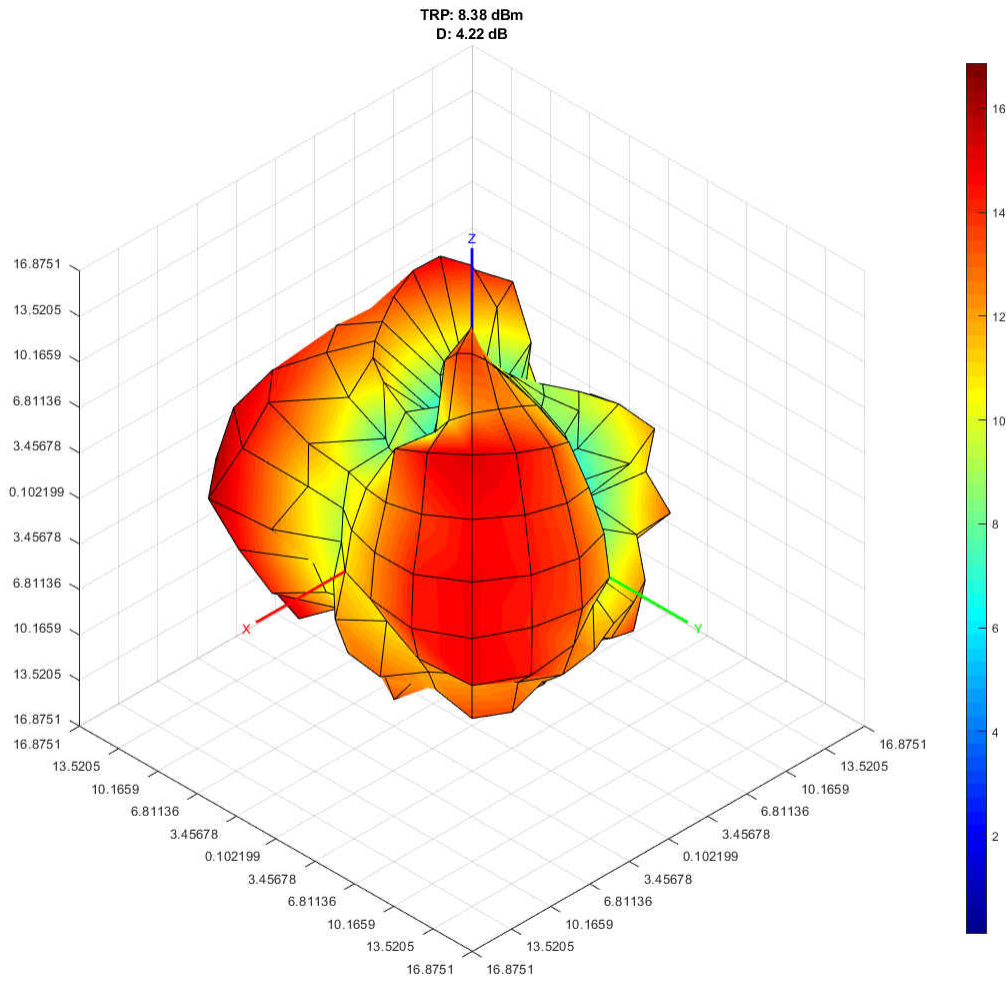


图 5-31. 10dBm 2440MHz 设置下双频 868/915 和 2440MHz 辐射匹配的天线辐射方向图

6 汇总 - 物料清单和结果

表 6-1. 所有模式和频率的 BOM 汇总

频率	模式	Z60	Z61	Z62	Z63	Z64
433MHz	单通道	0 Ω	DNM	4.7pF	2nH	51nH
	双通道	6.8nH	DNM	47nH	8.2pF	51nH
470MHz	单通道	0 Ω	DNM	5.1pF	6.2nH	39nH
	双通道	6.2nH	0.1 pF	36nH	7.5pF	39nH
490MHz	单通道	0 Ω	DNM	6.2pF	6.2nH	33nH
	双通道	6.8nH	0.1nH	24nH	10pF	33nH
510MHz	单通道	0 Ω	DNM	8.2pF	11nH	27nH
	双通道	7.5nH	0.2pF	18nH	18pF	27nH
862/915MHz	单通道	0 欧姆	DNM	0 Ω	DNM	2pF
	双通道	6.8nH	DNM	220nH	6.2pF	2pF

表 6-2. 所有模式和频率的效率和带宽汇总

频率	模式	效率 [%]		带宽 [MHz]	
		低频带	高频带	低频带	高频带
433MHz	单通道	19.2%		22.8 MHz	
	双通道	22.8%	87.3%	24MHz	250 MHz
470MHz	单通道	34.8%		25MHz	
	双通道	28.9%	80.2%	25MHz	266 MHz
490MHz	单通道	35.9%		24.8 MHz	
	双通道	31.6%	76.4%	27.8 MHz	234 MHz
510 MHz	单通道	32.9%		29 MHz	
	双通道	25.3%	84.1%	24.6 MHz	206 MHz
862/915MHz	单通道	72.8%/97.3%		95.8 MHz	
	双通道	62.4%/97.1%	83.8%	109.6 MHz	315MHz

7 结论

本应用手册中的天线可以在两种不同的模式下使用：单频运行或双频运行。当配置为单频模式时，用户可以通过匹配网络和 Z64 将天线配置为在介于 433MHz 和 930MHz 之间的单个 ISM 频率下运行。用户也可以将天线配置为双频模式，则 ISM 运行频率可以为 433-930MHz 和 2.4GHz。所有运行模式都表现出高发射辐射效率，同时保持宽带宽。

包含天线匹配网络的天线设计可以很容易地适应特定的 ISM 频率，可选择单频运行或双频运行。对于仅需要一个 PCB 天线结构即可通过更改 BOM 来覆盖多个频带的设计而言，这是一项优势。如果进一步增加 Z64 元件，也可以支持低于 433MHz 的频率。

当无线电解决方案在 Sub-1GHz ISM 频率和 2.4GHz 下工作时，最适合采用双频模式。使用双频模式时，务必确保 868MHz (2.604GHz) 天线的三次谐波低于法规限值，因为 2.4GHz 天线 (2.74GHz 至 2.38GHz) 也会辐射三次谐波。

TI 建议遵循图 1-1 所示的天线尺寸；该天线尺寸为 43 x 25mm。最大增益约为 3 至 5dBi，这是单极天线的典型值。

S11 测量表明，中心频率取决于接地层的尺寸，但这很容易通过调节天线长度或天线匹配网络来进行补偿。

8 参考文献

- [LAUNCHXL-CC1352P-4](#)
- [LAUNCHXL-CC1352P1](#)
- [LAUNCHXL-CC1312R1](#)

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司