

摘要

本应用手册可帮助硬件和射频设计人员实现紧凑的 PCB 天线阵列，从而准确测量传入 Bluetooth® 信号的到达角 (AoA)。另外还讨论了天线设计注意事项以及天线阵列测试结果和计算 AoA 的方法。

内容

1 引言.....	3
2 到达角天线设计注意事项.....	3
2.1 天线间距.....	4
2.2 射频开关注意事项.....	6
3 偶极天线阵列.....	7
3.1 偶极天线的优缺点.....	7
3.2 角度测量平面.....	9
3.3 PCB 实施.....	11
3.4 两个偶极阵列测试结果.....	16
4 根据 IQ 测量计算 AoA.....	29
4.1 偶极天线阵列未补偿时的到达角结果.....	30
4.2 偶极天线阵列补偿后的 AoA 结果.....	37
5 参考文献.....	45
6 修订历史记录.....	45

插图清单

图 1-1. 天线阵列测量的发送器相位.....	3
图 2-1. 具有 $\frac{1}{4} \lambda$ 间距的天线阵列.....	4
图 2-2. 天线间距为 $\frac{1}{4} \lambda$ 时的相量图示例.....	4
图 2-3. 天线间距 $\leq \frac{1}{2} \lambda$ 时的相量图.....	5
图 2-4. 恒定音调扩展结构蓝牙规范 v5.1	6
图 2-5. $2\mu\text{s}$ 采样时隙的 IQ 采样窗口.....	6
图 2-6. $1\mu\text{s}$ 采样时隙的 IQ 采样窗口.....	7
图 3-1. 偶极天线的辐射方向和相位中心.....	8
图 3-2. 具有 GND 平面时的边界电流.....	8
图 3-3. 具有波纹 GND 平面时的边界电流.....	9
图 3-4. 天线阵列方向.....	9
图 3-5. 使用多个偶极天线阵列测量两个平面中的 AoA.....	10
图 3-6. 第 3 层偶极间距和宽度.....	11
图 3-7. 第 4 层 Marchand 平衡-非平衡变压器.....	11
图 3-8. 第 2 层和第 5 层接地平面.....	12
图 3-9. 第 3 层偶极天线尺寸.....	13
图 3-10. 第 4 层 Marchand 平衡-非平衡变压器尺寸.....	13
图 3-11. 第 2 层和第 4 层接地平面尺寸.....	14
图 3-12. 偶极与接地平面尺寸.....	14
图 3-13. 转盘测试设置.....	16
图 3-14. 安装在转盘臂上的 PCB.....	17
图 3-15. 消声室.....	17
图 3-16. TRP 结果对应的 PCB 方向.....	17
图 3-17. 天线 1 TRP.....	18
图 3-18. 天线 2 TRP.....	18

图 3-19. 天线 1 TRP (Theta = 0 , Phi = 0)	18
图 3-20. 天线 2 TRP (Theta = 0 , Phi = 0)	18
图 3-21. 天线 1 TRP (Theta = 180 , Phi = 0)	19
图 3-22. 天线 2 TRP (Theta = 180 , Phi = 0)	19
图 3-23. 天线 1 TRP (Theta = 90 , Phi = 0)	19
图 3-24. 天线 2 TRP (Theta = 90 , Phi = 0)	19
图 3-25. 天线 1 TRP (Theta = 90 , Phi = 180)	20
图 3-26. 天线 2 TRP (Theta = 90 , Phi = 180)	20
图 3-27. 天线 1 TRP (Theta = 90 , Phi = 270)	20
图 3-28. 天线 2 TRP (Theta = 90 , Phi = 270)	20
图 3-29. 天线 1 TRP (Theta = 90 , Phi = 90)	21
图 3-30. 天线 2 TRP (Theta = 90 , Phi = 90)	21
图 3-31. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属支架.....	21
图 3-32. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的天线 1 TRP.....	22
图 3-33. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的天线 2 TRP.....	22
图 3-34. 相位差测量测试设置.....	22
图 3-35. 裸 PCB.....	23
图 3-36. 裸 PCB 相位差与角度结果间的关系.....	24
图 3-37. PCB + 分离的射频吸收材料.....	25
图 3-38. PCB + 附加的射频吸收材料.....	25
图 3-39. PCB + 射频吸收材料的相位差与角度结果间关系.....	25
图 3-40. PCB + 射频吸收材料 + 分离的镀锡铜箔.....	26
图 3-41. PCB + 射频吸收材料 + 附加的镀锡铜箔.....	26
图 3-42. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔的相位差与角度结果间关系.....	26
图 3-43. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属独立部分.....	27
图 3-44. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属.....	27
图 3-45. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的相位差与角度结果间关系.....	28
图 3-46. 相位差与距离间的关系.....	28
图 4-1. AoA 公式.....	29
图 4-2. 线性图补偿.....	29
图 4-3. 理想的 AoA 结果.....	30
图 4-4. 所有硬件在所有低功耗蓝牙通道上的 AoA 结果.....	31
图 4-5. 所有硬件在所有低功耗蓝牙通道上的 AoA 误差结果.....	32
图 4-6. 裸 PCB 在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	33
图 4-7. 裸 PCB 未补偿时的 AoA 误差结果.....	33
图 4-8. PCB + 射频吸收材料在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA.....	34
图 4-9. PCB + 射频吸收材料未补偿时的 AoA 误差.....	34
图 4-10. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	35
图 4-11. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔未补偿时的 AoA 误差.....	35
图 4-12. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔 + 金属在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	36
图 4-13. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属未补偿时的 AoA 误差.....	36
图 4-14. 裸 PCB 未补偿时的 AoA 误差结果.....	39
图 4-15. 裸 PCB 补偿后的 AoA 误差结果.....	39
图 4-16. 裸 PCB 在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	39
图 4-17. 裸 PCB 在所有低功耗蓝牙通道上补偿后的 AoA 结果.....	39
图 4-18. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔未补偿时的 AoA 误差.....	41
图 4-19. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔补偿后的 AoA 误差.....	41
图 4-20. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	41
图 4-21. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔在所有低功耗蓝牙通道上补偿后的 AoA 结果.....	41
图 4-22. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属未补偿时的 AoA 误差.....	43
图 4-23. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属补偿后的 AoA 误差.....	43
图 4-24. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果.....	43
图 4-25. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔 + 金属在所有低功耗蓝牙通道上补偿后的 AoA 结果.....	43
图 4-26. 硬件设置比较：补偿后的 AoA 误差与 Phi 间的关系.....	44
图 4-27. 硬件设置比较：补偿后的 AoA 结果.....	45

表格清单

表 2-1. 适用于低功耗蓝牙 AoA 的可行射频开关.....	7
----------------------------------	---

表 3-1. PCB 堆叠.....	15
表 4-1. 裸 PCB AoA 补偿值.....	38
表 4-2. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔的 AoA 补偿值.....	40
表 4-3. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的补偿值.....	42

商标

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.
 Skyworks® is a registered trademark of Skyworks Solutions, Inc..
 3M® is a registered trademark of 3M.
 所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

Bluetooth® 到达角 (AoA) 测量低功耗蓝牙 (BLE) 发送信号到达蓝牙接收器的角度或方向。要计算 AoA，需要使用两根或更多天线来测量传入信号的相位。

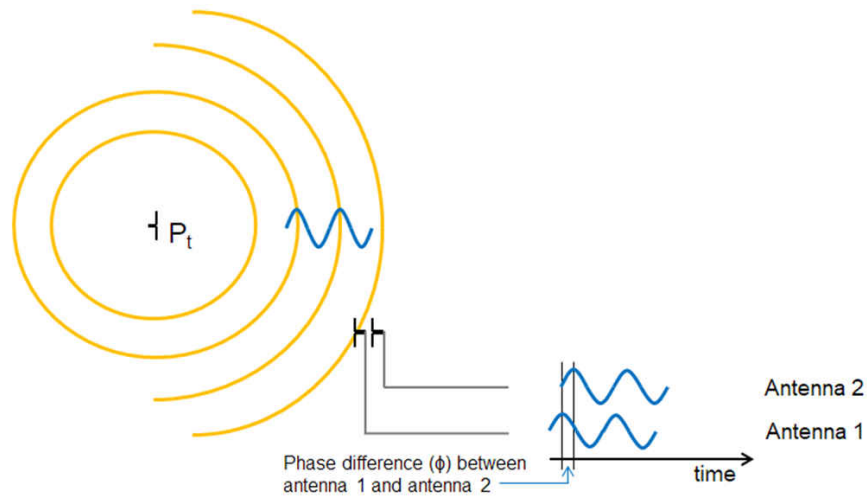


图 1-1. 天线阵列测量的发送器相位

每个天线的相位测量值用于计算 AoA 并确定发送信号的方向。本应用手册介绍了 AoA 天线设计注意事项，显示了一些天线阵列的测试结果，并演示了如何根据天线阵列的相位测量数据计算 AoA 测量值。有关蓝牙 AoA 的更多背景信息，请参阅 [低功耗蓝牙到达角 \(AoA\) SimpleLink Academy](#) 和 [BLE-Stack 用户指南](#)。

2 到达角天线设计注意事项

要计算 AoA，必须使用两个或多个处于同一位置的天线来测量传入射频载波相位，同时尽可能减小对载波本身信号相位的影响。因此，在设计低功耗蓝牙天线阵列时，需要了解几个注意事项。首先，要确定哪根天线最靠近发射信号，天线相位中心必须在彼此的 $\frac{1}{2} \lambda$ 范围内，如 [节 2.1](#) 中所述。因此，天线间距成为一个问题，因为可能会发生不必要的耦合，从而降低天线阵列的效率。此外，为了避免额外的相位测量误差和任何额外的校准要求，天线的相位中心应保持恒定。如果相位中心因传入信号的方向而发生变化，则必须在 AoA 计算中考虑相位中心变化。最后，对于任何天线设计，都应了解接地和效率等其他天线基础知识，以提高接收器的整体效率并确保尽可能减少反射产生的干扰。AoA 硬件设计的另一个方面是在两个或更多天线之间切换所需的射频开关。务必要了解计算 AoA 测量值所需的射频开关时间并满足蓝牙 5.1 规格要求以及了解射频开关规格，以确保在优化成本的同时实现良好的性能。

2.1 天线间距

两个接收天线的相位中心必须相距不超过 $\frac{1}{2} \lambda$ (最大相位差 180°)，以便轻松确定哪个天线更靠近发送器。在双天线系统中，每个天线轮流测量相位。相位测量完成后，天线之间的相位差用于计算 AoA。如果差值大于 180° ，则可能是错误地解释了真正的相位差。图 2-1 展示了低功耗蓝牙发送节点与天线阵列 (天线相位中心相距 $\frac{3}{4} \lambda$) 呈 180° 的示例。

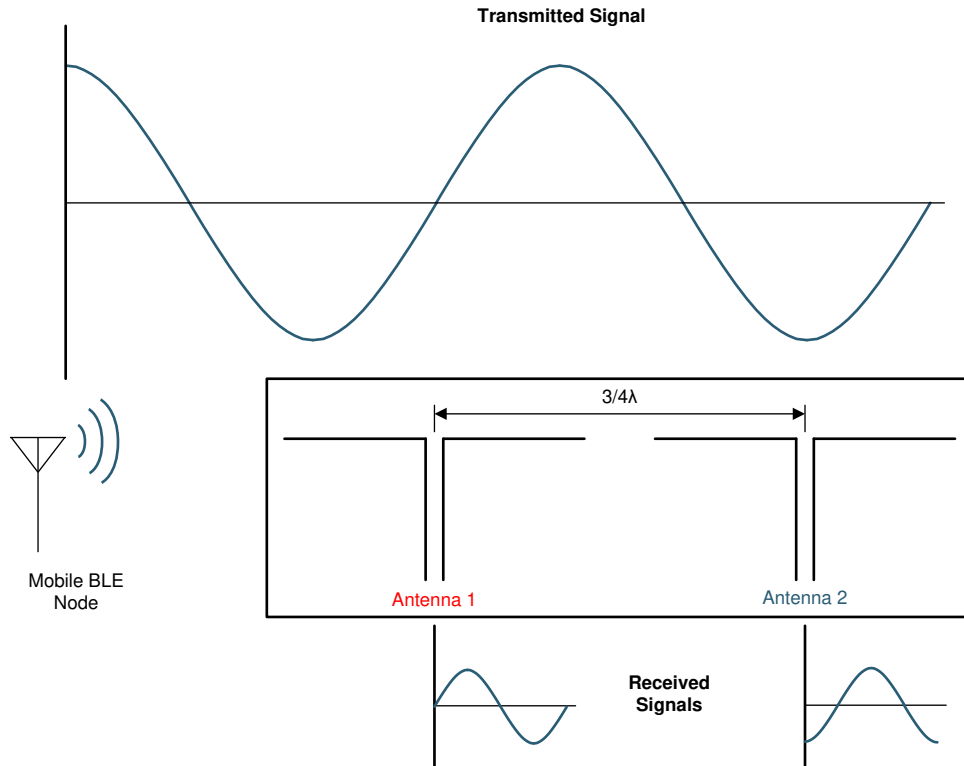


图 2-1. 具有 $\frac{3}{4} \lambda$ 间距的天线阵列

天线 1 的测量值为 0° ，天线 2 的测量值为 270° (-90°)，因此相位差为 270° 。但是，如图 2-2 中的相位图所示，相位差可能会被错误地解释为从 270° 到 0° 相差 90° 。

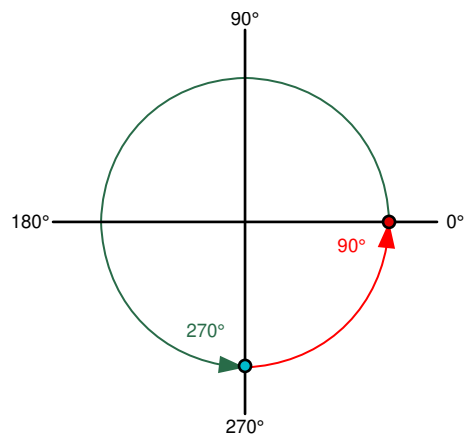


图 2-2. 天线间距为 $\frac{3}{4} \lambda$ 时的相量图示例

通过确保天线间距最大为 $\frac{1}{2} \lambda$ ，相位差范围会始终为 0° 至 180° (或 -180°)，并且在确定哪根天线更靠近发送节点时也不会出现问题，因为不管是正相位差还是负相位差，最小相位差始终正确，如图 2-3 所示。

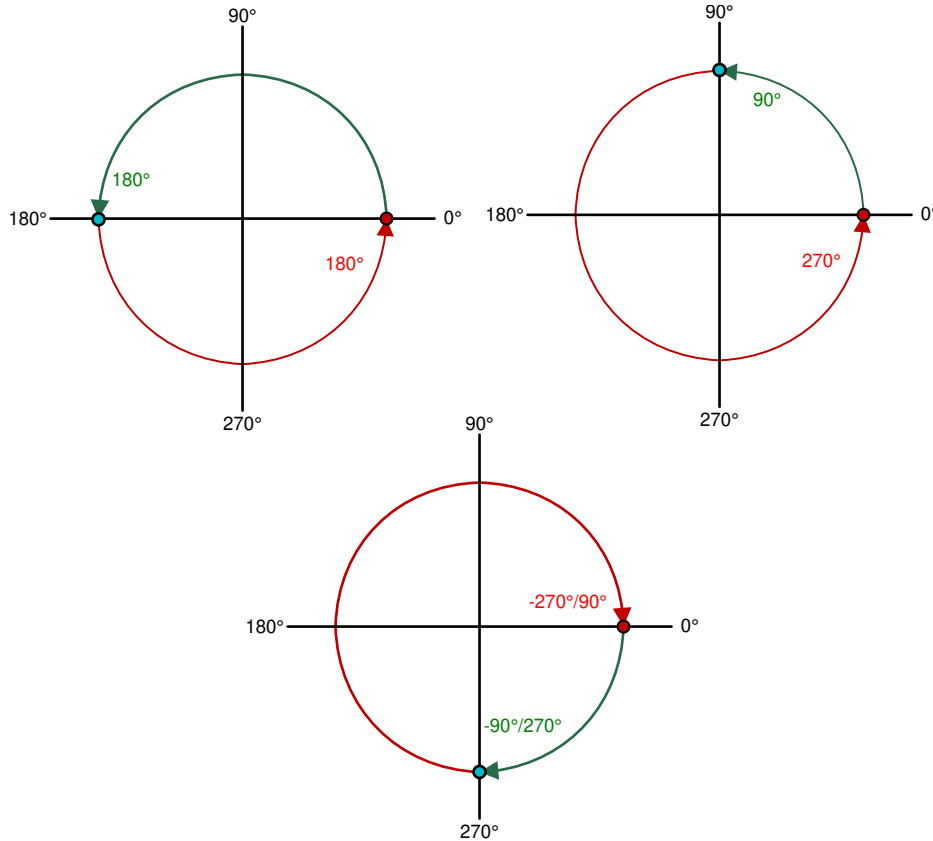


图 2-3. 天线间距 $\leq \frac{1}{2} \lambda$ 时的相量图

如果天线阵列设计在蓝牙频谱 (2.44GHz) 的中心，则天线间距必须小于或等于 61.5mm。因此，天线耦合可能会成为影响天线阵列效率的问题。

2.2 射频开关注事项

在 AoA 应用中，最重要的射频开关特性包括开关时间、通道隔离和通道数量。开关时间很重要，因为蓝牙 5.1 规范要求开关时隙达到 $2\mu\text{s}$ ，并且可选择支持更快的 $1\mu\text{s}$ 开关时隙。

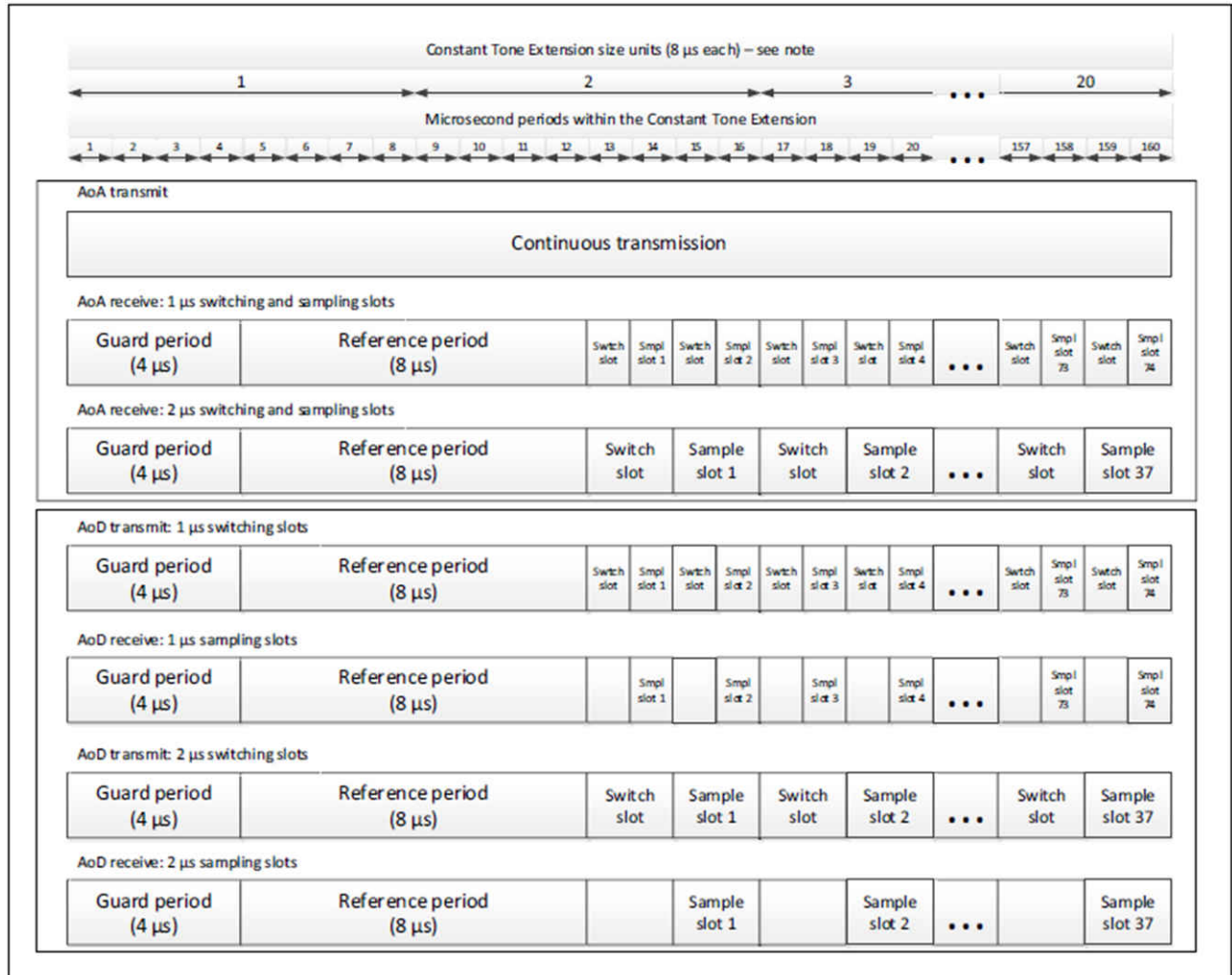


图 2-4. 恒定音调扩展结构蓝牙规范 v5.1

因此，射频开关必须能够在指定的开关时隙时间（无论是 $2\mu\text{s}$ 还是 $1\mu\text{s}$ ）内完成开关和稳定。务必注意，IQ 采样从 $0.125\mu\text{s}$ （ $1\mu\text{s}$ 时隙）和 $1.125\mu\text{s}$ （ $2\mu\text{s}$ 时隙）开始，并在 $0.875\mu\text{s}$ （ $1\mu\text{s}$ 时隙）和 $1.875\mu\text{s}$ （ $2\mu\text{s}$ 时隙）结束。

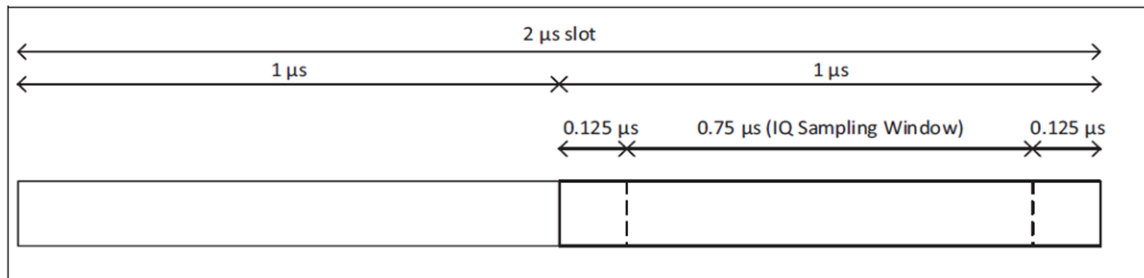


图 2-5. $2\mu\text{s}$ 采样时隙的 IQ 采样窗口

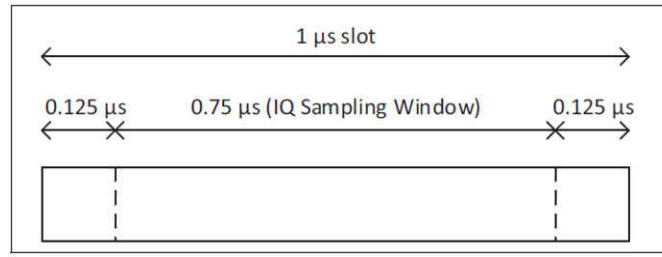


图 2-6. 1 μ s 采样时隙的 IQ 采样窗口

通道隔离也是一项重要规格，因为它直接影响系统的效率。射频通道之间的隔离越好，射频系统的整体效率就越高。最后，通道数量非常重要，因为它会对开关成本有很大影响。表 2-1 展示了几个可行的射频开关，其中大多数已在 TI 到达角印刷电路板 (PCB) 上实现。

表 2-1. 适用于低功耗蓝牙 AoA 的可行射频开关

部件名称	制造商	开关类型	频率范围 (GHz)	最大 50% 控制至 90/10% 射频 (ns)	典型隔离 (dB)	典型插入损耗 (dB)	汽车认证
SKY13408-465LF	Skyworks® Solutions, Inc.	SP3T	1-6	150	28	0.8	不适用
SKY13323-378LF	Skyworks Solutions, Inc.	SPDT	0.1 - 3	100	27	0.35	不适用
SKYA21001	Skyworks Solutions, Inc.	SPDT	0.2 - 3	250	23	0.4	AEC-Q100 标准
RFSW8006QTR7	Qorvo	SP3T	0.1 - 4	500	25 - 31	0.6	AEC-Q100 标准

3 偶极天线阵列

本节讨论了偶极天线阵列，并重点介绍了 AoA 应用中偶极天线的优缺点、TIDA-01632 双偶极天线阵列的 PCB 实现，以及天线阵列的测试结果。TIDA-01632 参考设计天线阵列基于 SimpleLink AoA Boosterpack 偶极天线，后者包含两个三偶极天线阵列。

3.1 偶极天线的优缺点

偶极天线在 AoA 应用中有两大优点和一个缺点。第一个优点是偶极天线具有恒定的相位中心，始终位于馈电点（天线中间）。这一点很重要，因为天线不会因相位中心移动而增加任何相位误差。第二个优点是，偶极天线在自身的轴方向上不接收或发送射频功率。因此，即使天线彼此靠近（相位中心 $< \frac{1}{2} \lambda$ ），天线耦合也很少。图 3-1 展示了偶极天线的辐射方向图和相位中心。

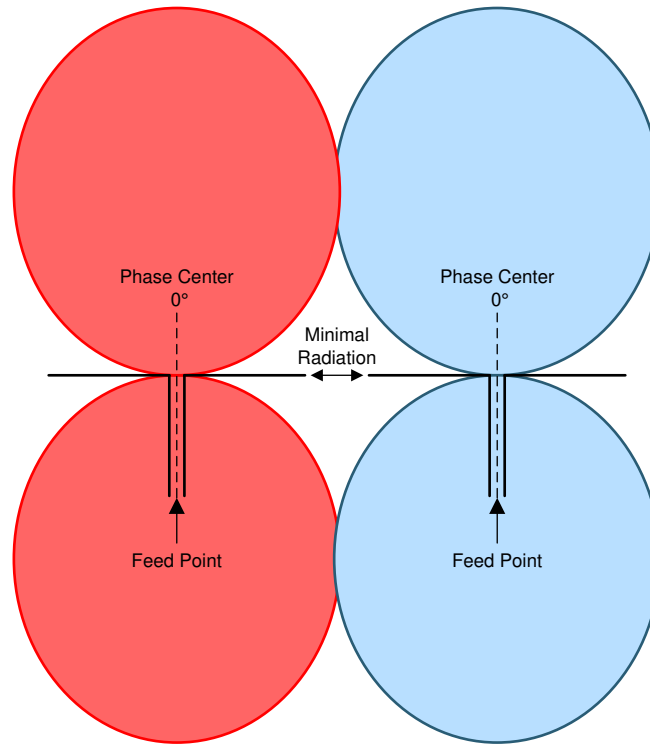


图 3-1. 偶极天线的辐射方向和相位中心

偶极天线的主要缺点是它是差分天线，需要与地隔离。此要求与低功耗蓝牙接收器的接地平面直接冲突。如果接地平面离天线太近，则天线会相当于发生短路，因为接地平面会反射传入波。但是，如果接地平面离得更远，它仍会将射频功率反射回天线并降低其效率。

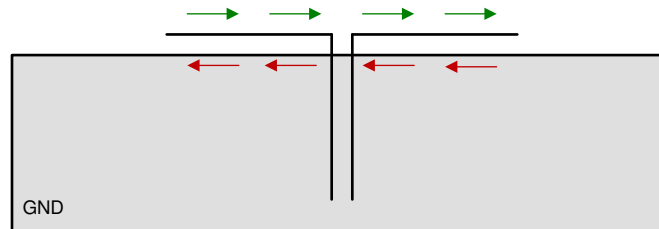


图 3-2. 具有 GND 平面时的边界电流

为了解决接地平面问题，实施了波纹接地平面。波纹接地平面通过使边界电流偏移 $\frac{1}{2} \lambda$ ，将反射相位每个手指移动 180° ，从而消除边界电流。因此，每个分段会消除相邻分段的影响，最终结果是零电流和同相反射，如图 3-3 所示。

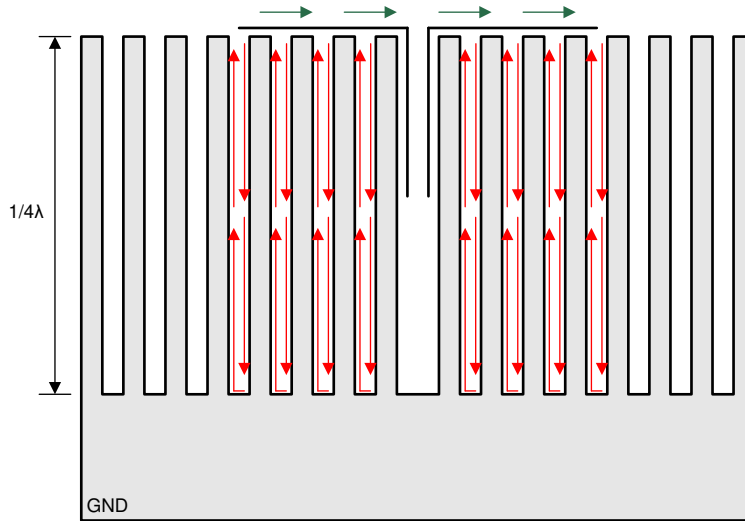


图 3-3. 具有波纹 GND 平面时的边界电流

3.2 角度测量平面

单偶极天线阵列可以在一个平面 (即 x、y 或 z) 测量传入信号的 AoA。如果需要在另一个平面上测量信号的方向，则需要与该平面平行对齐的额外偶极天线阵列。

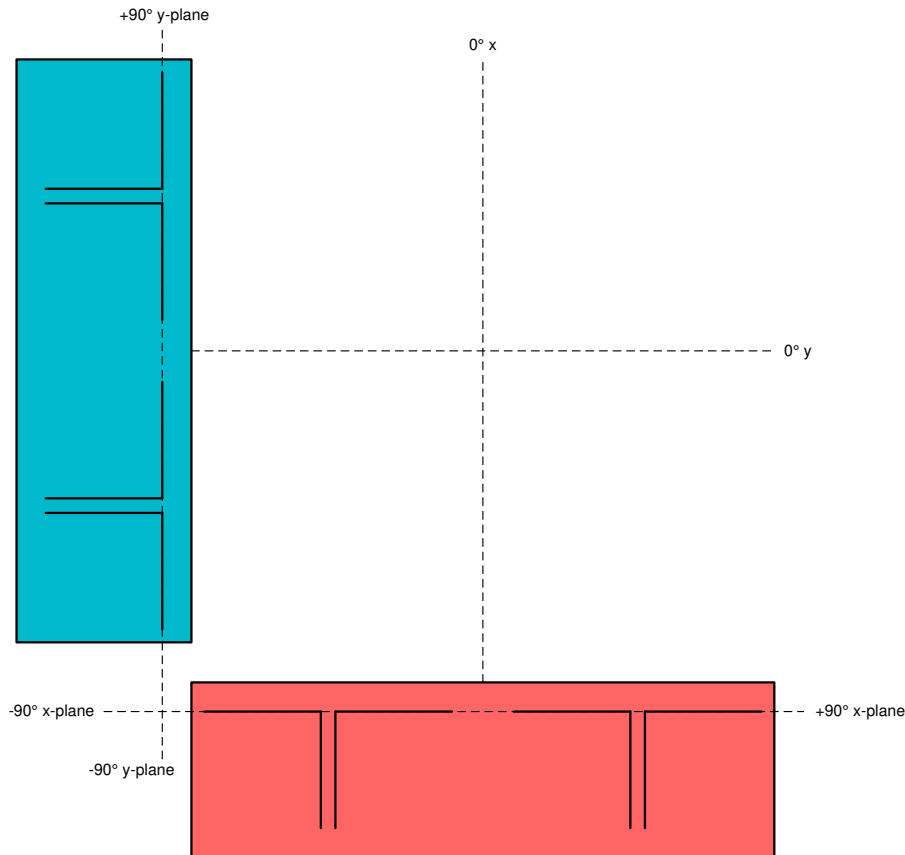


图 3-4. 天线阵列方向

这可以在单个 PCB (例如 [SimpleLink™ 到达角 BoosterPack](#)) 上完成, 也可以在另一个方向上使用另一个天线阵列 PCB (例如 [TIDA-01632](#) 参考设计) 来完成。

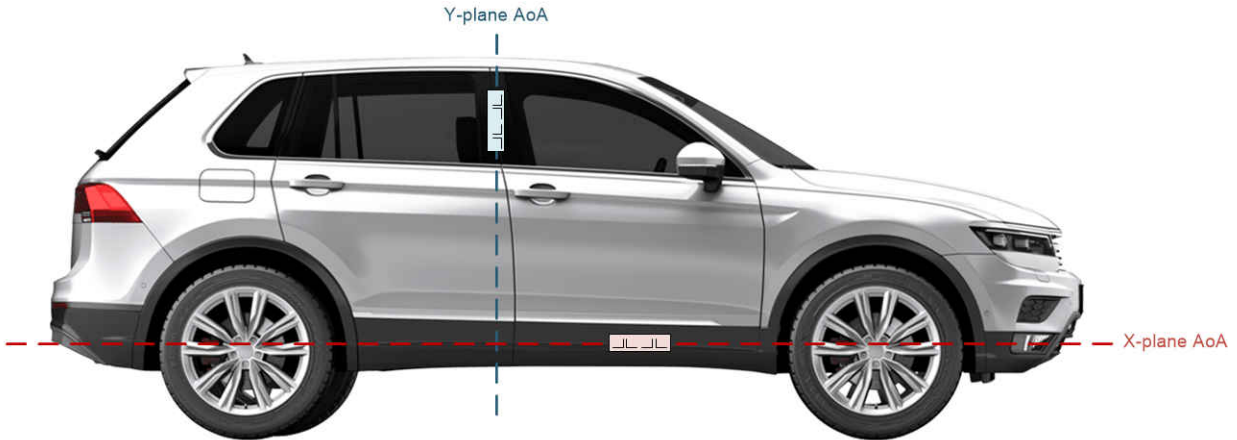


图 3-5. 使用多个偶极天线阵列测量两个平面中的 AoA

在此示例中, 蓝色天线阵列测量 y 平面中的 AoA, 从而确定钥匙相对于天线阵列的位置高或低, 而不管钥匙位于车辆左侧、右侧还是中心。红色天线阵列测量 x 平面中的 AoA, 从而确定钥匙是否位于乘客车门的左侧、右侧或中央, 而不管钥匙相对于车辆的高低。

3.3 PCB 实施

$\frac{1}{4} \lambda$ 偶极天线设计在低功耗蓝牙频谱 (2.44GHz) 的中心，因此长度约为 30.8mm。请注意，相位中心间隔 35mm，可满足所需的 $\frac{1}{2} \lambda$ 间距要求。

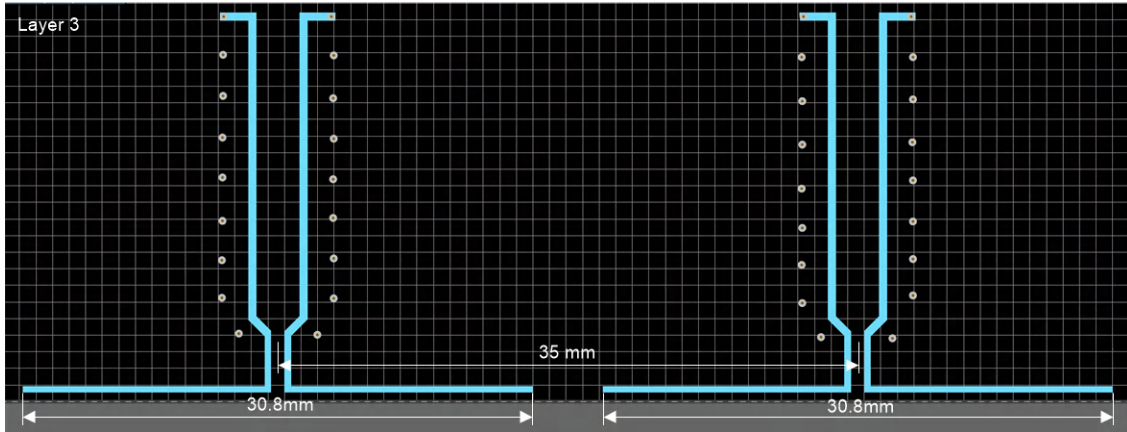


图 3-6. 第 3 层偶极间距和宽度

为了将平衡（差分）信号转换为非平衡（单端）信号，在偶极天线下方的一层（第 4 层）部署了 PCB Marchand 平衡-非平衡变压器。

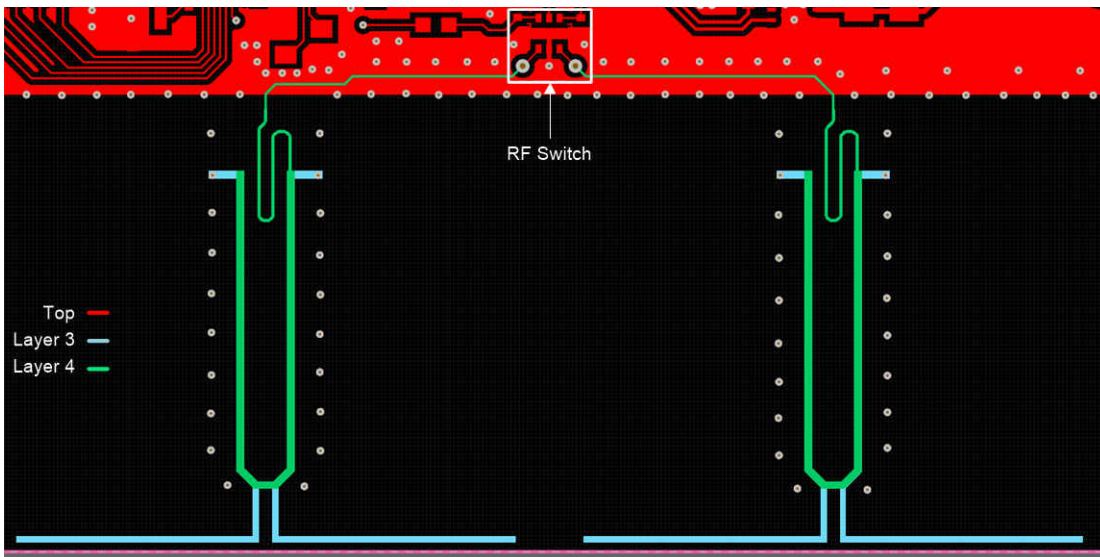


图 3-7. 第 4 层 Marchand 平衡-非平衡变压器

Marchand 平衡-非平衡变压器经过设计、仿真和测试，可确保性能正常。平衡-非平衡变压器的顶部部分路由到射频开关，用于匹配 $50\ \Omega$ 阻抗传输线路。此外，电路板堆叠确保第 3 层（偶极天线）和第 4 层（Marchand 平衡-非平衡变压器）之间保持适当的间距，从而在这两层之间实现正确的电容耦合。由于射频开关的单端布线需要接地，因此 Marchand 平衡-非平衡变压器和偶极天线馈送布线夹在两个相同的接地层之间，一个位于第 2 层，而另一个位于第 5 层，如图 3-8 所示。

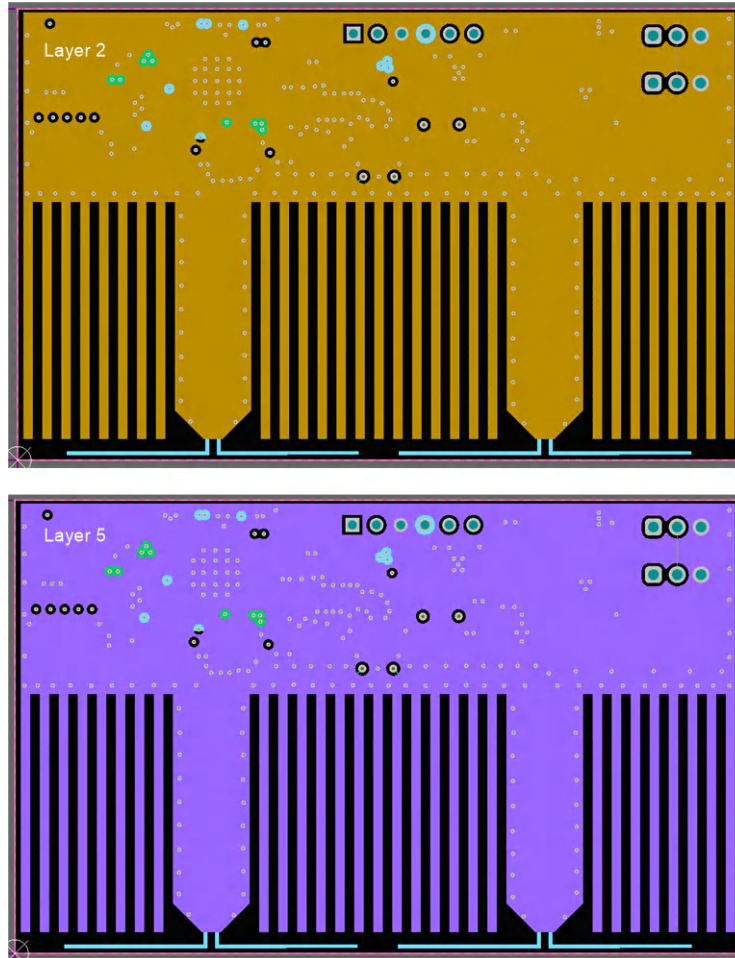


图 3-8. 第 2 层和第 5 层接地平面

图 3-9 至图 3-12 展示了偶极天线、Marchand 平衡-非平衡变压器和 GND 平面的尺寸。

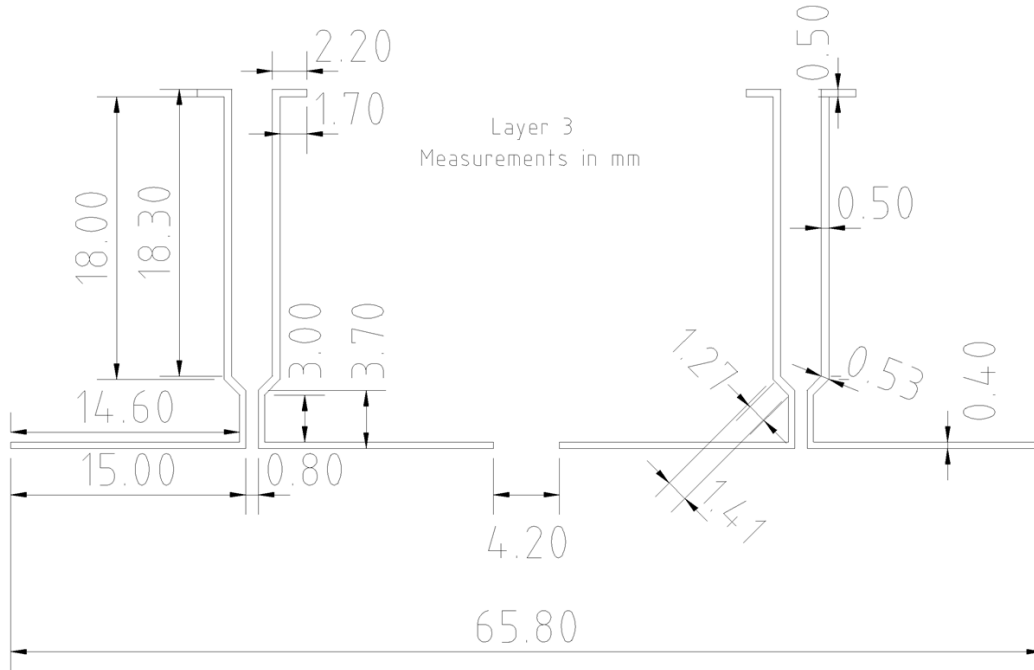


图 3-9. 第 3 层偶极天线尺寸

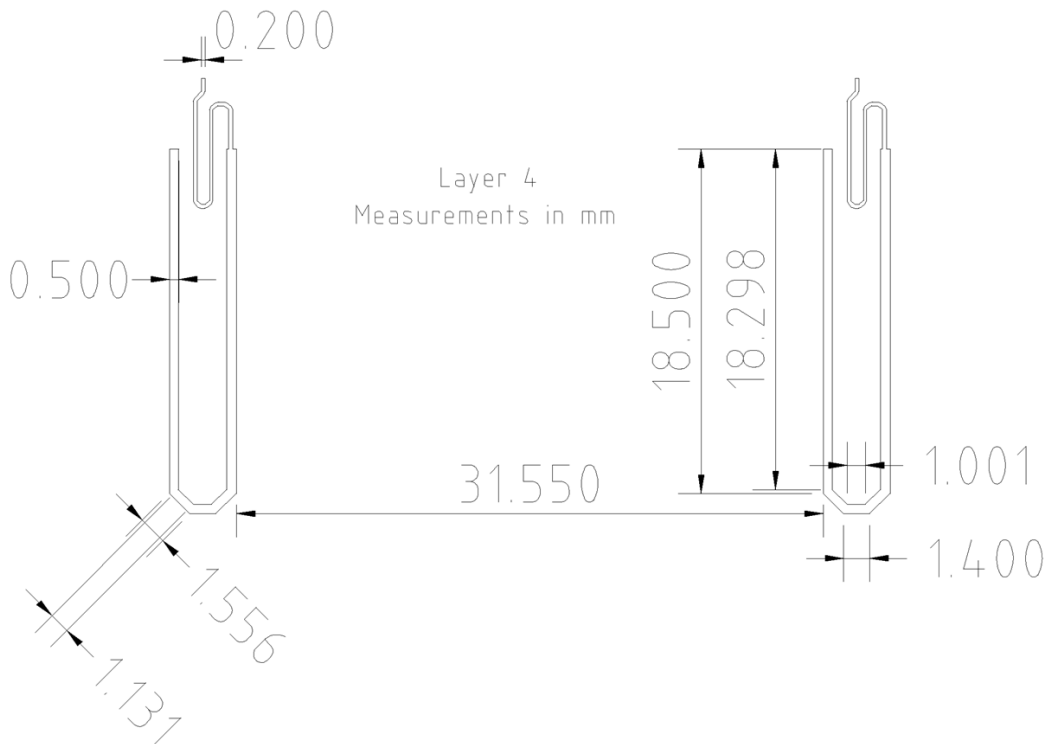


图 3-10. 第 4 层 Marchand 平衡-非平衡变压器尺寸

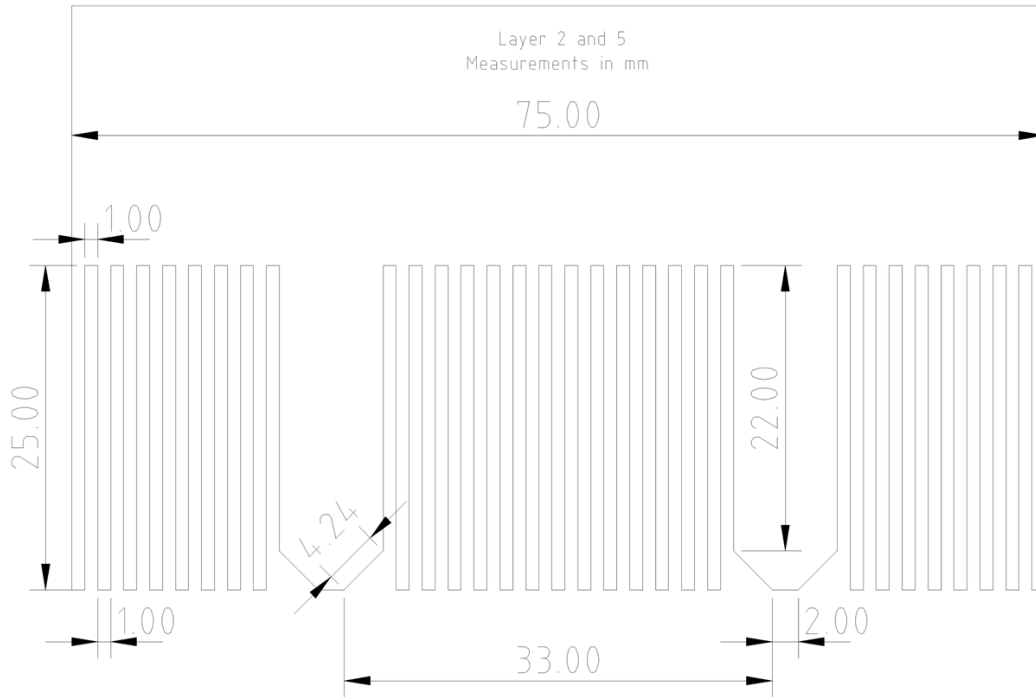


图 3-11. 第 2 层和第 4 层接地平面尺寸

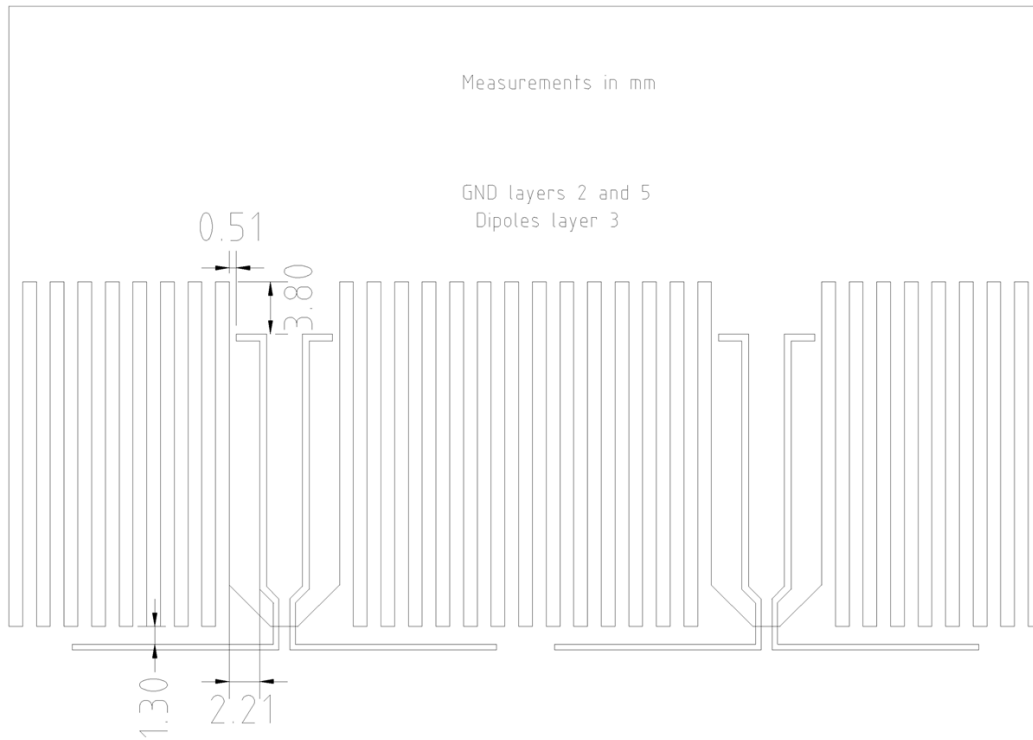


图 3-12. 偶极与接地平面尺寸

表 3-1. PCB 堆叠

层名称	类型	材质	厚度 (mm)	电介质材料	介电常数
顶部阻焊层	焊接掩模/覆盖膜	表面材料	0.01016	阻焊剂	3.5
顶层	信号	铜	0.035		
电介质 1	电介质	内核	0.1	FR-4	4.1
第 2 层	信号	铜	0.01801		
电介质 2	电介质	半固化片	0.2	FR-4	4.1
第 3 层	信号	铜	0.01901		
电介质 3	电介质	内核	0.1	FR-4	4.1
第 4 层	信号	铜	0.01801		
电介质 4	电介质	半固化片	0.2	FR-4	4.1
第 5 层	信号	铜	0.01801		
电介质 5	电介质	内核	0.1	FR-4	4.1
底层	信号	铜	0.035		
底部阻焊层	焊接掩模/覆盖膜	表面材料	0.01016	阻焊剂	3.5

如需了解有关该设计的更多信息，并访问 Gerber 文件、原理图等，请参阅 [TIDA-01632 车用低功耗 Bluetooth® 汽车门禁卫星节点参考设计](#)。

3.4 两个偶极阵列测试结果

以下各节显示了基于 TIDA-01632 天线设计的各种测试结果。所有测试结果都是在消声室内使用图 3-13 所示的转盘获得的，其中转盘能够以 1° 的增量旋转底座和臂。

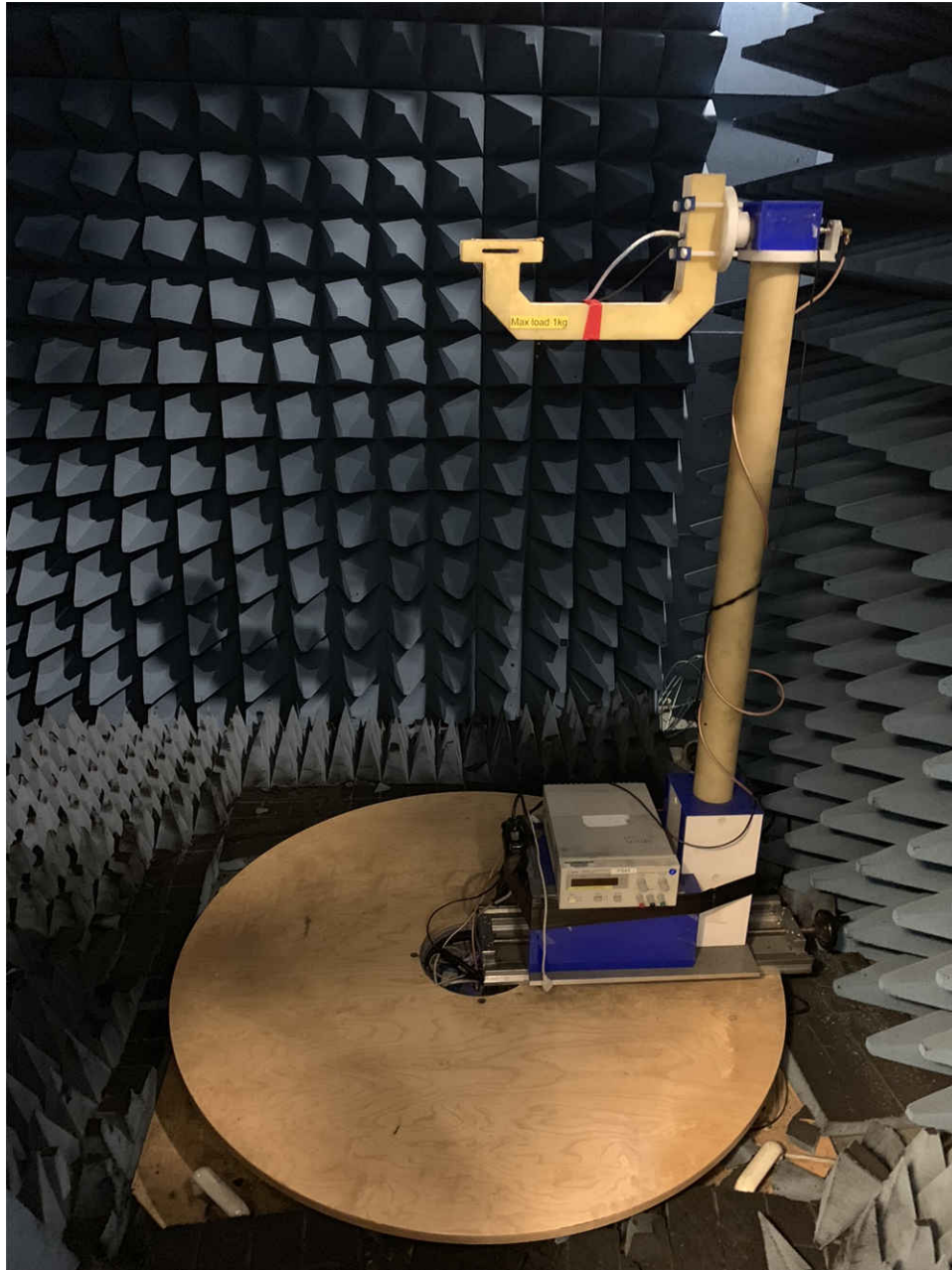


图 3-13. 转盘测试设置

图 3-14 展示了 TIDA-01632 PCB 安装在转盘臂上，而图 3-15 展示了消声室的其余部分。

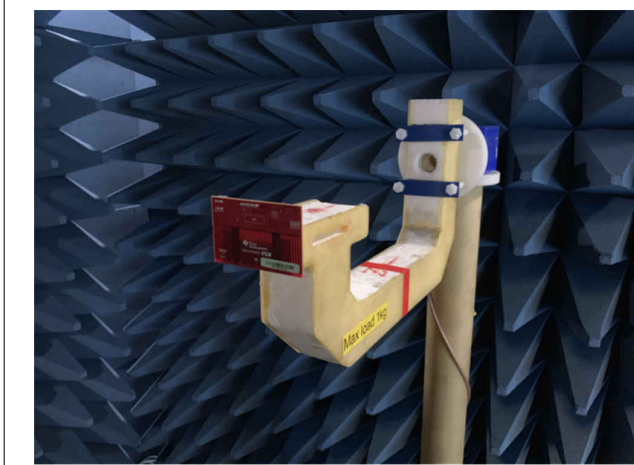


图 3-14. 安装在转盘臂上的 PCB

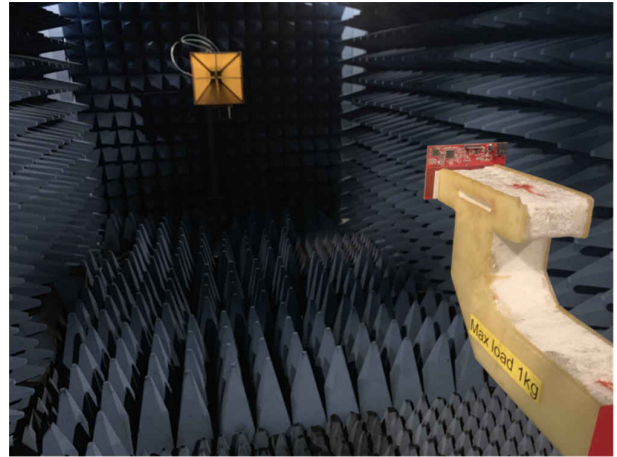


图 3-15. 消声室

3.4.1 总辐射功率 (TRP)

所有辐射测量均在 TIDA-01632 PCB 上完成，无需附加任何吸收材料或铜箔。TIDA-01632 上的 CC2640R2F-Q1 器件配置为在 2440MHz、0dBm 条件下输出恒定波。测得的总辐射功率 (TRP) 为 -8.71dBm 和 -8.97dBm ，对应的天线效率约为 14% (射频开关损耗为 0.3dB - SKYA21001)。在以下测量中，z 轴与 PCB 垂直，x 轴为高度，y 轴为长度，如图 3-16 所示。

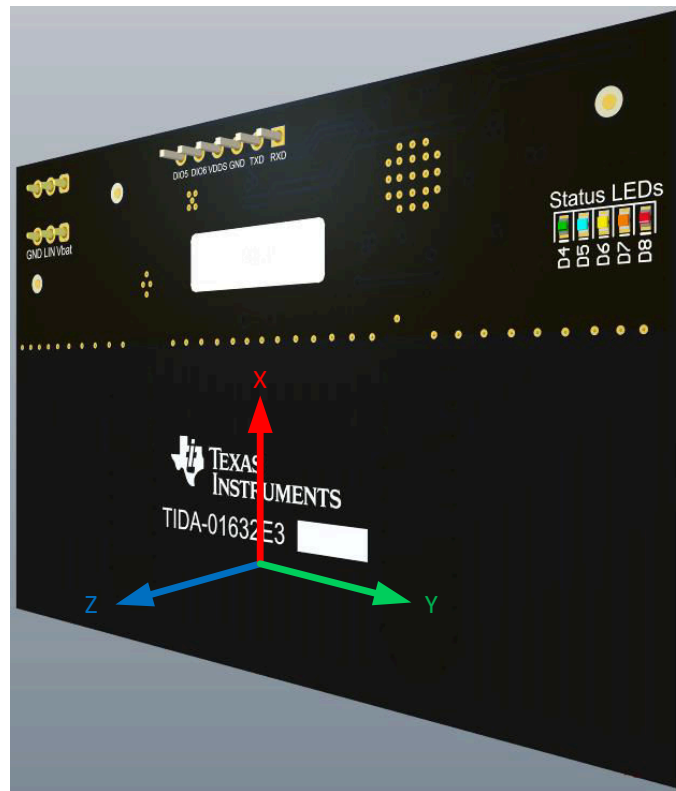
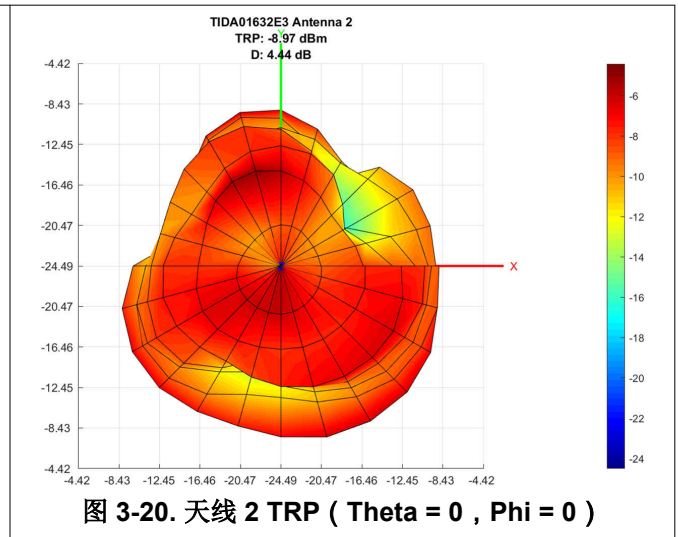
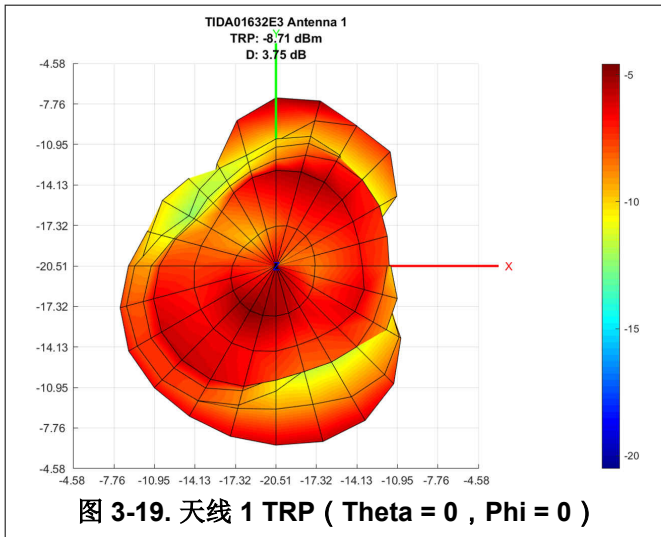
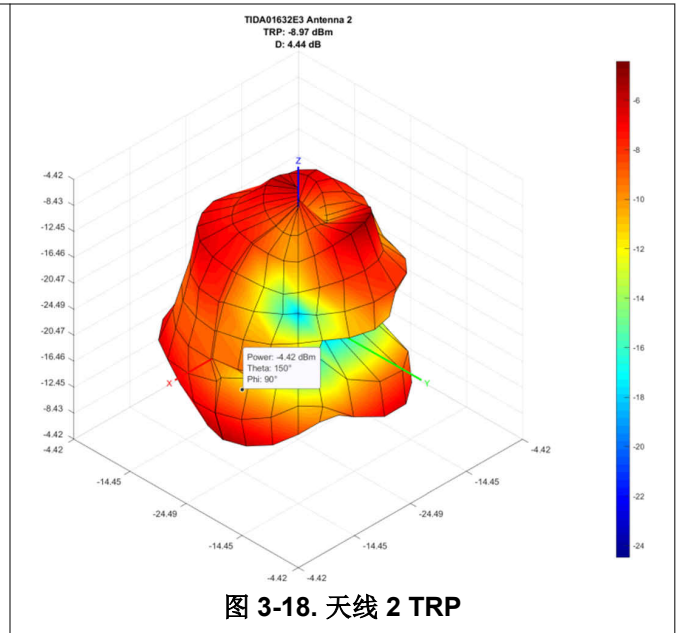
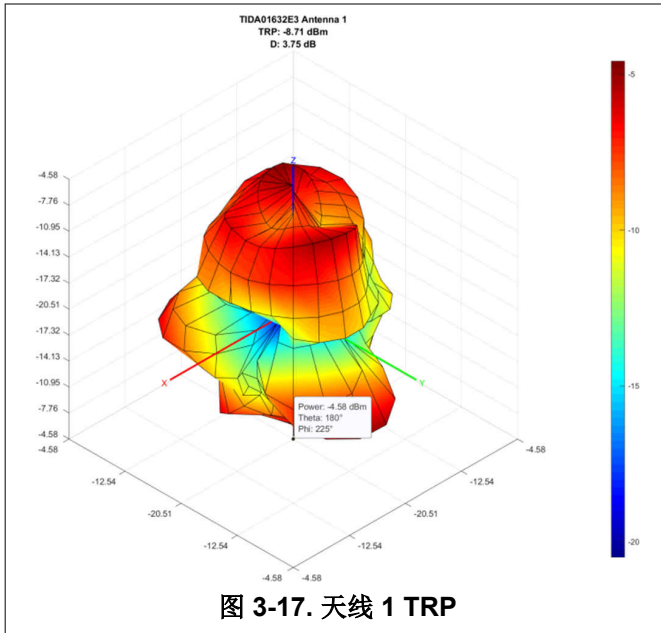
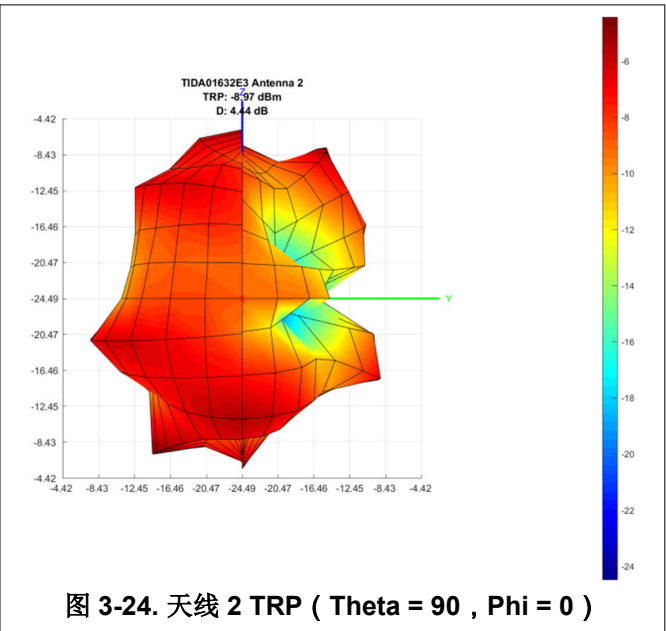
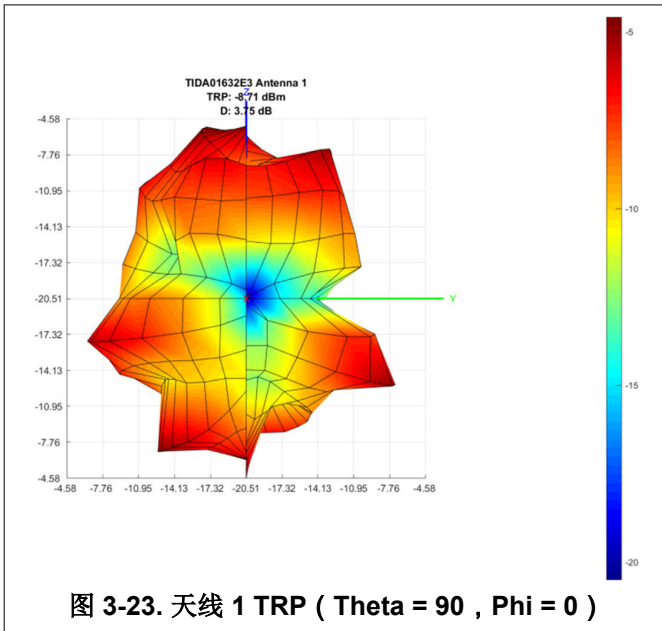
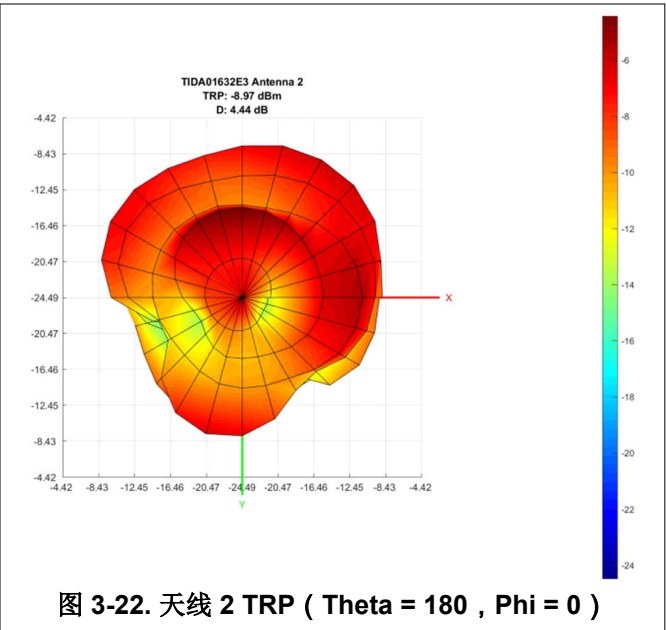
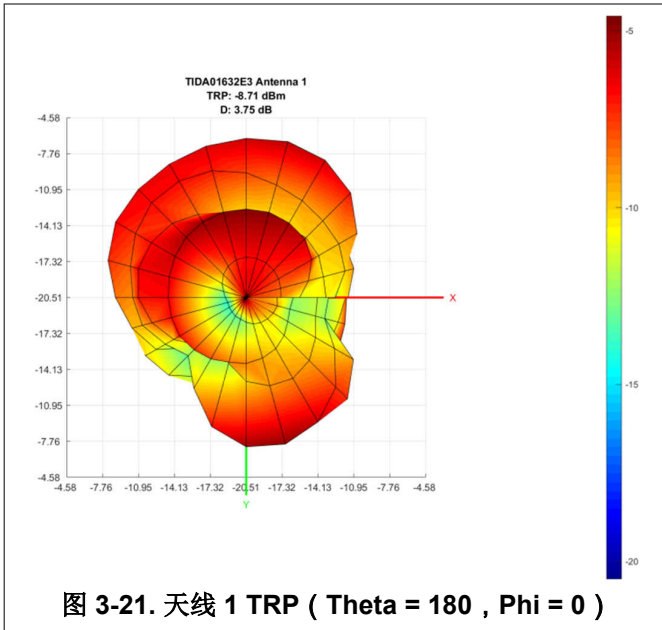
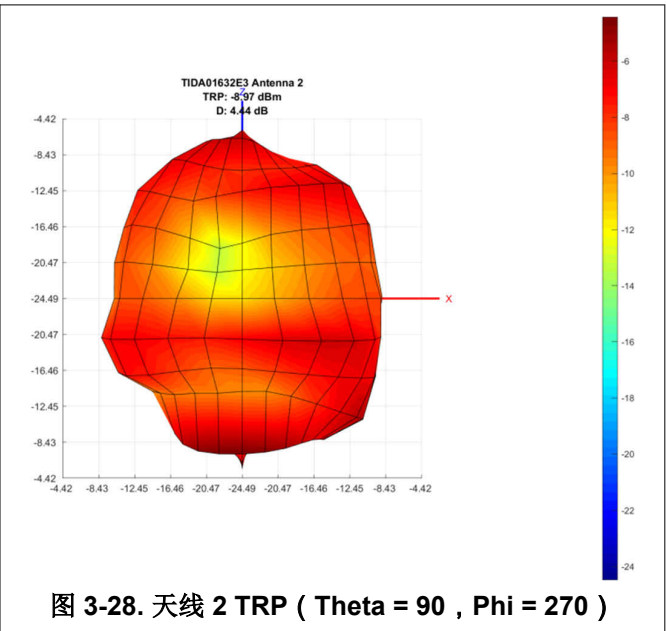
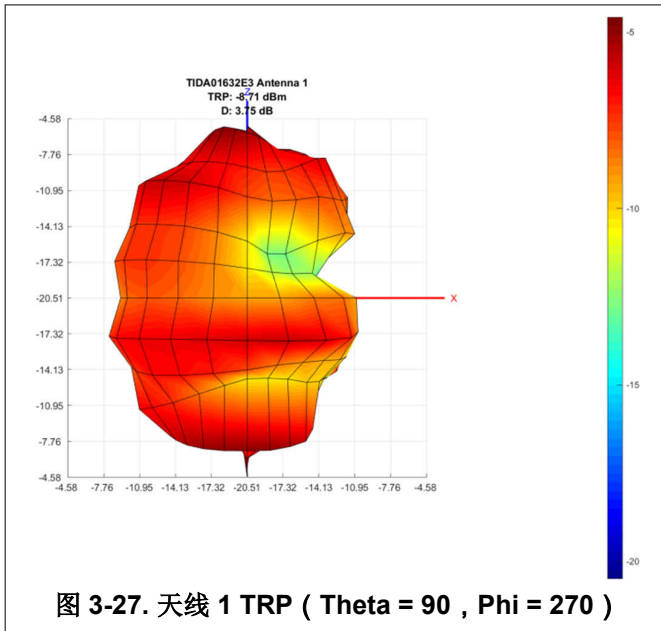
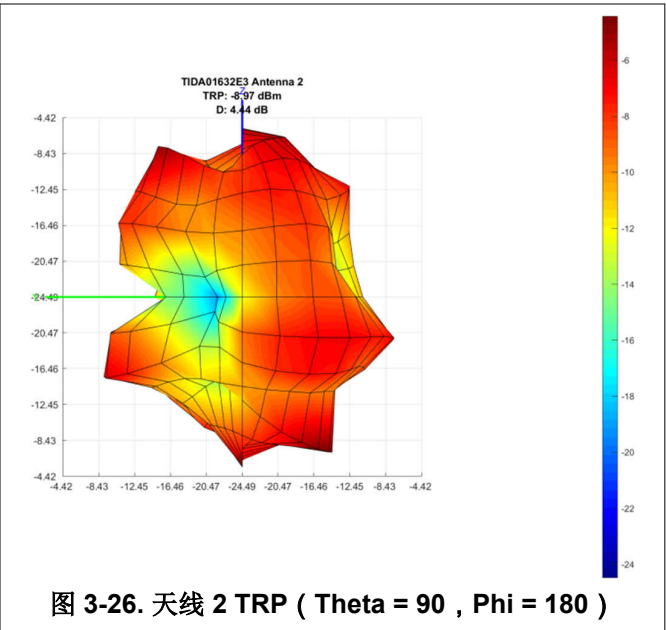
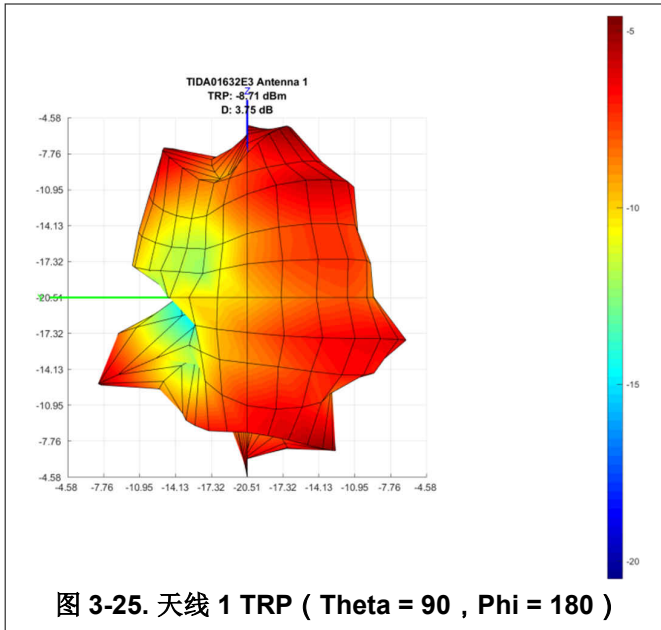


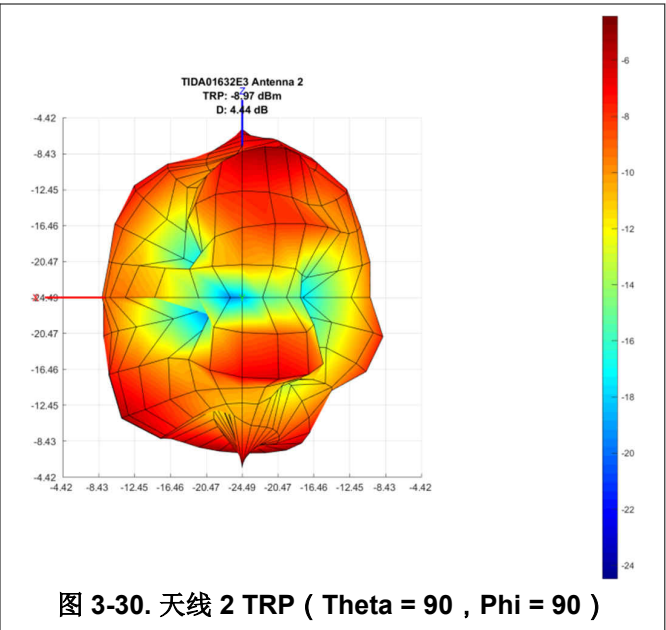
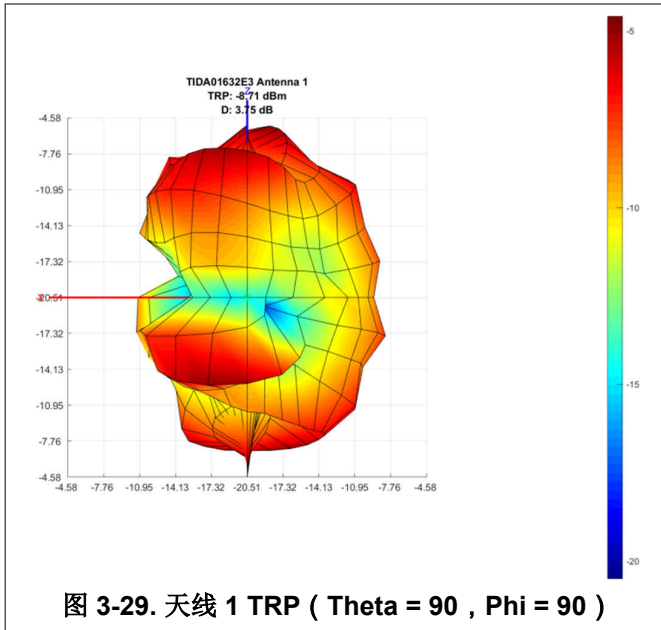
图 3-16. TRP 结果对应的 PCB 方向

在总辐射功率图中，Theta 表示 PCB 从 z 轴旋转到 y 轴 (转盘底座旋转)，Phi 表示从 z 轴旋转到 x 轴 (旋转图 3-14 中的臂)。

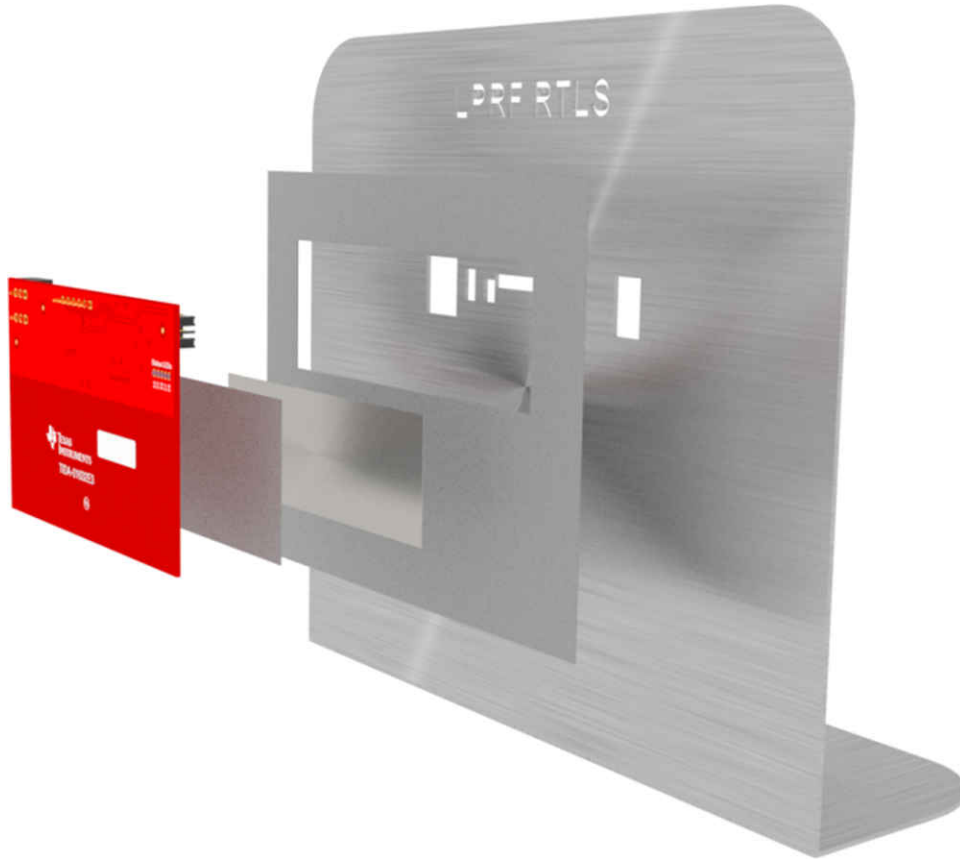


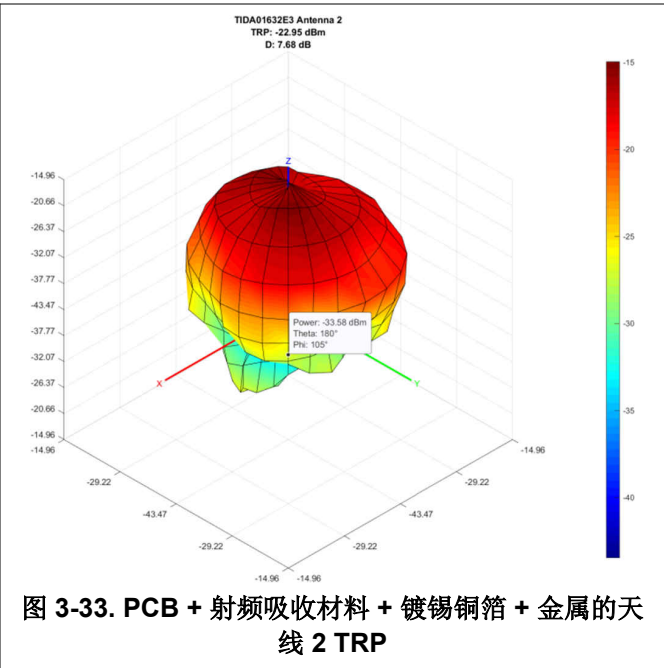
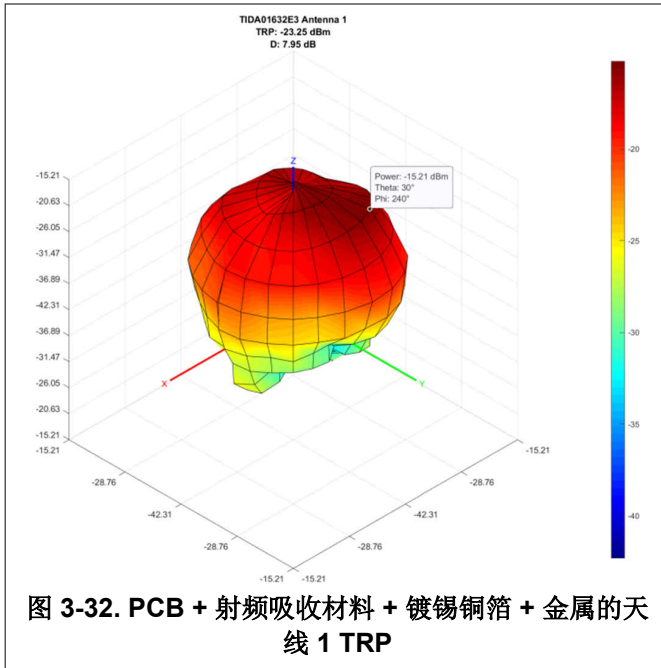






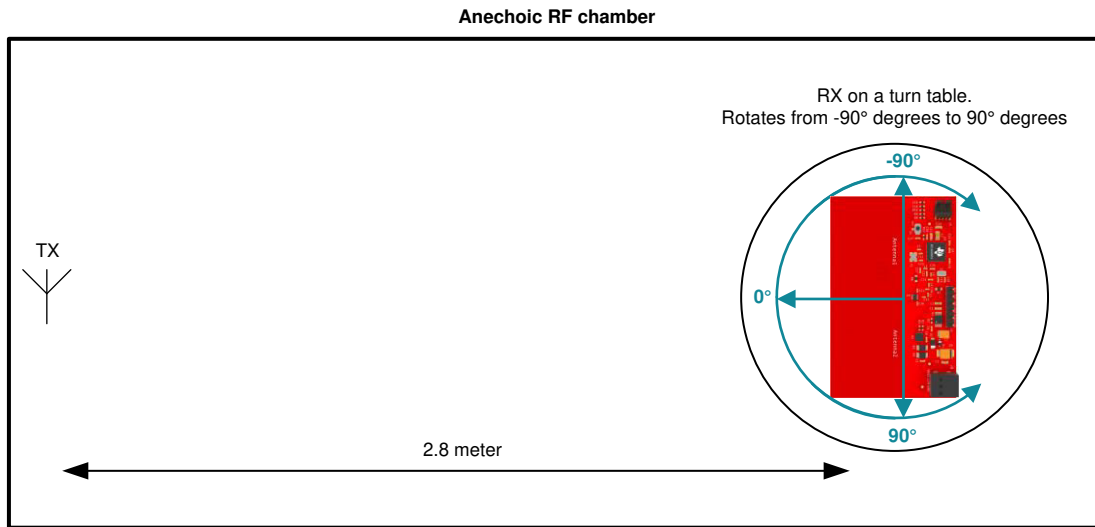
TRP 也在以下条件下测得：TIDA-01632 PCB 安装在金属支架上，并且 PCB 与金属支架之间附加了射频吸收材料 (WaveX WX-A-010-12P) 和镀锡铜箔 (3M 1183)，如图 3-31 所示。在天线周围添加金属会显著降低效率，但可确保不会从 PCB 背面接收到任何射频信号。测得的 TRP 约为 -23dBm，这表明天线效率仅为 0.5%。





3.4.2 测量天线 1 和 2 的相位差

为了测量天线 1 和天线 2 在 -90° 至 90° 范围内的相位差，我们以 1° 为增量在 -90° 到 90° 范围内调整转盘（图 3-13）。每个角度都从每个低功耗蓝牙通道的 4 个 AoA 数据包中收集了 I/Q 数据，称为 Phi。这包括 2402MHz 至 2480MHz 的全部 40 个通道，每个角度总共 160 个 AoA 数据包。图 3-34 展示了对应设置。



TIDA-01632 参考设计设置为在 $4\mu\text{s}$ 时隙内从每个天线收集 IQ 数据。采样率设置为 4MSPS，每个时隙提供 16 个 IQ 样本。

有多种方法和方案可用于 AoA 估算。本应用报告中两根天线之间的相位差来计算 AoA。由于捕获的 AoA 音调的周期等于时隙周期（ 250KHz 音调 = $4\mu\text{s}$ 周期），因此可以比较时隙之间同一样本数的相位，并计算相位差。要计算两个 IQ 样本（每个天线一个 IQ 样本）之间的相位差，应来自第一个天线的样本与来自第二个天线的样本的共轭复数相乘。

$$x_0 = r_0 e^{i\alpha_0} \tag{1}$$

$$x_1 = r_1 e^{i\alpha_1} \tag{2}$$

$$\text{Angle} = r_0 r_1 e^{i(\alpha_0 - \alpha_1)} = (x_0 \times x_1^*) \tag{3}$$

在方程式 1 到方程式 3 这些公式中， α 代表相位， r 代表幅度。请注意，由于天线切换和稳定时间，每个时隙中的前 8 个样本会被丢弃，因此每个时隙中仅使用 8 至 15 个样本。有关相关计算的更多信息，请参阅 [BLE-Stack 用户指南：RTLS Toolbox - AoA](#)。

节 3.4.2.1 至节 3.4.2.4 展示了使用 TIDA-01632 PCB 的 4 种不同硬件设置的测试结果。图中的 y 轴表示天线 1 和 2 之间的平均相位差，而 x 轴表示 PCB 与发射天线之间的角度。迹线越偏向黄色，表示频率越低，迹线越偏向红色，表示频率越高，中间频率显示为橙色迹线。查看每个测试设置的结果时，线性数据越多，结果越好。

3.4.2.1 裸 PCB

第一个测试仅涉及图 3-35 中所示的裸 TIDA-01632 PCB。

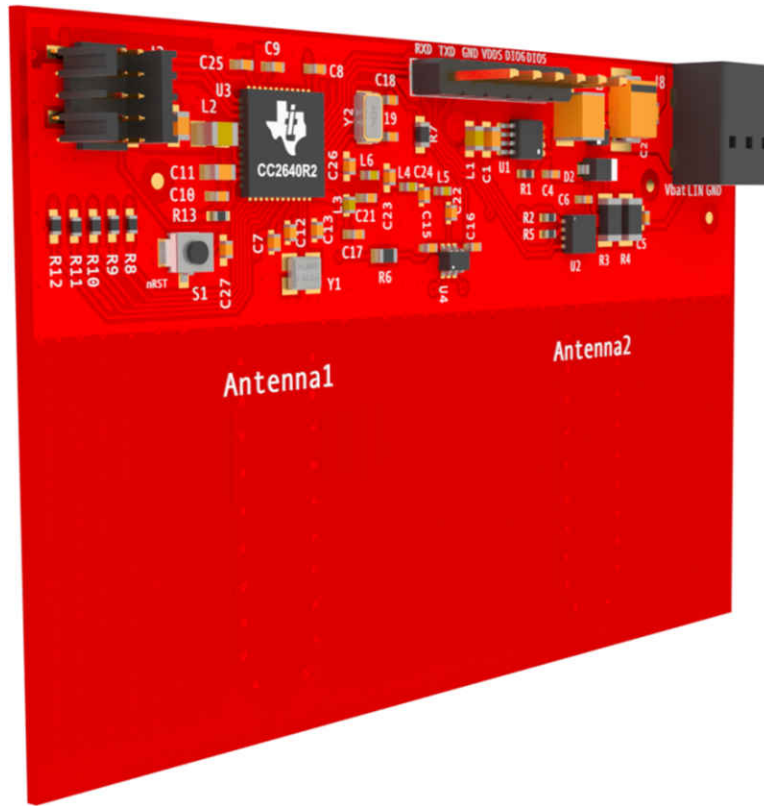


图 3-35. 裸 PCB

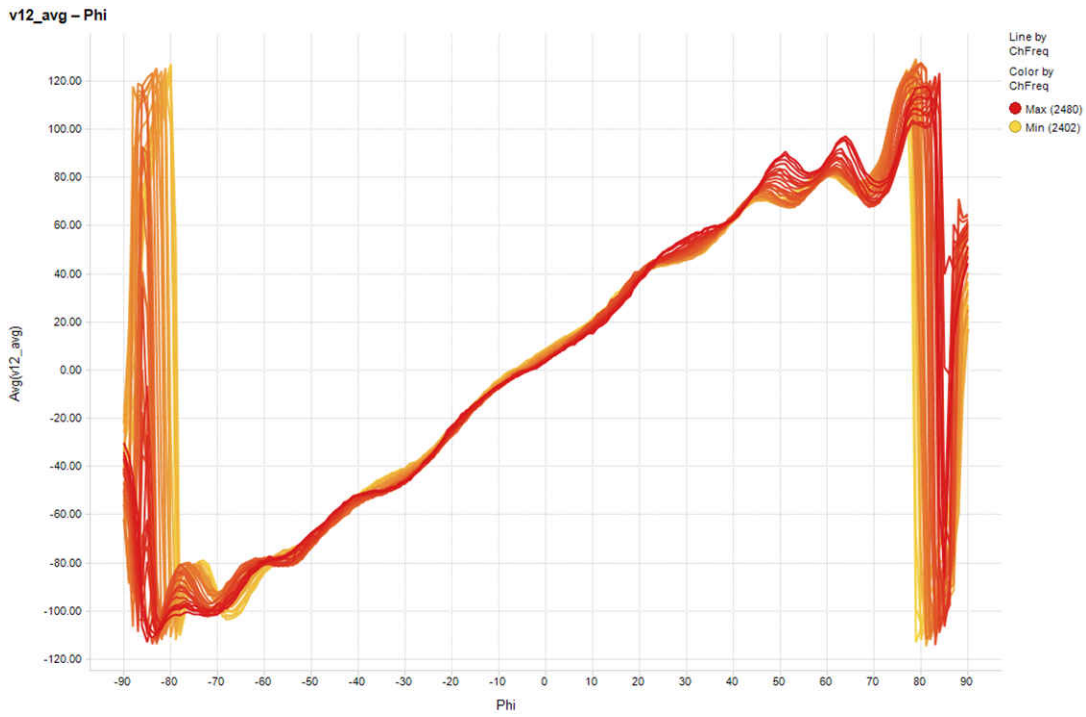


图 3-36. 裸 PCB 相位差与角度结果间的关系

裸 PCB 展示了在 -60 度至 60 度的范围内结果线性度相当高，在该范围之外则具有大得多的误差。这是计算精确 AoA 的良好起点。

3.4.2.2 PCB + 射频吸收材料

在此设置中，TIDA-01632 板（与传入的射频信号相反）上安装了一层来自 ARC Technologies 的 WaveX WX-A-010-12P 射频吸收材料，如图 3-37 和图 3-38 所示。



图 3-37. PCB + 分离的射频吸收材料

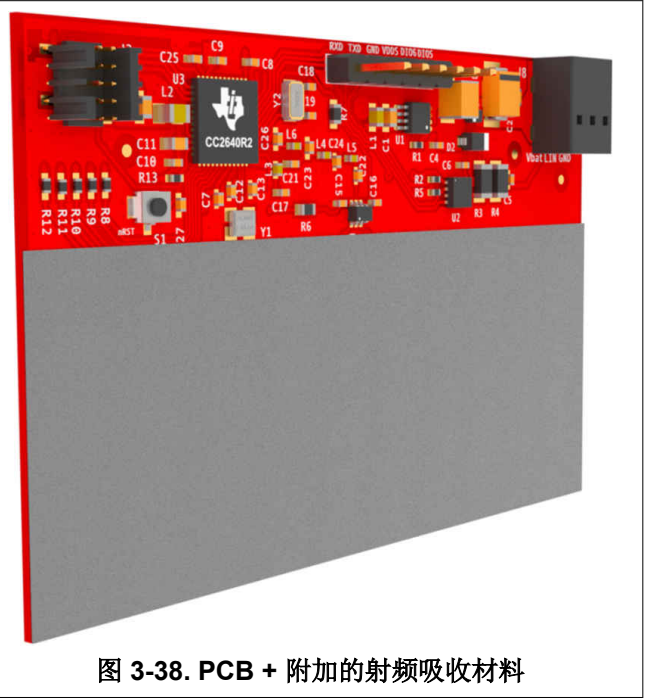


图 3-38. PCB + 附加的射频吸收材料

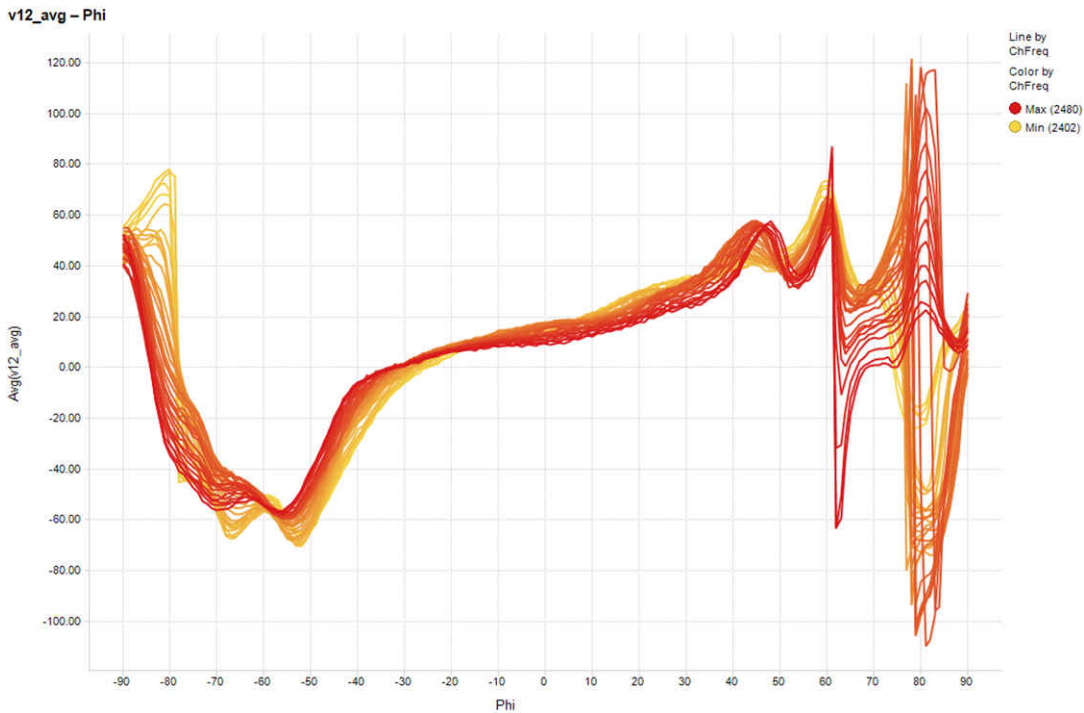


图 3-39. PCB + 射频吸收材料的相位差与角度结果间关系

仅使用射频吸收材料并不能改善测量结果，因此不建议在最终实施中采用。

3.4.2.3 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔

在此设置中，TIDA-01632 板（与传入的射频信号相反）上安装了一层来自 ARC Technologies 的 WaveX WX-A-010-12P 射频吸收材料和一层 3M® 1183 镀锡铜箔，如图 3-40 和图 3-41 所示。

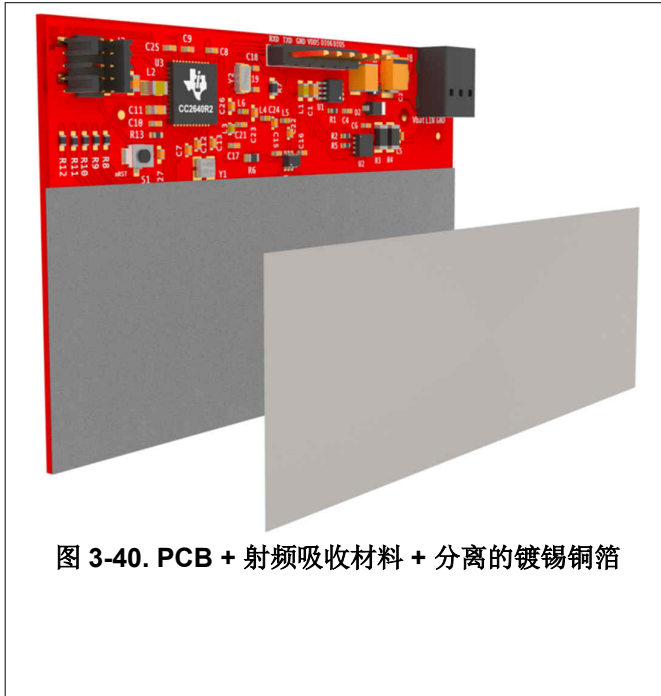


图 3-40. PCB + 射频吸收材料 + 分离的镀锡铜箔

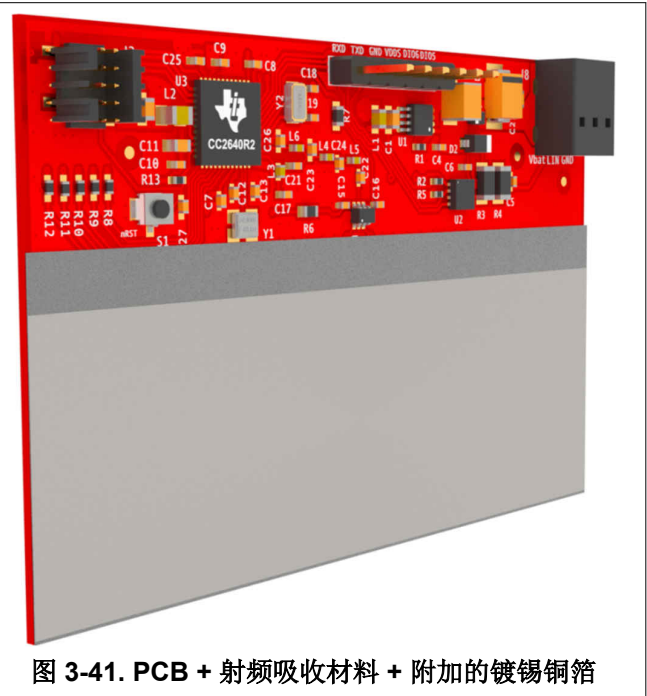


图 3-41. PCB + 射频吸收材料 + 附加的镀锡铜箔

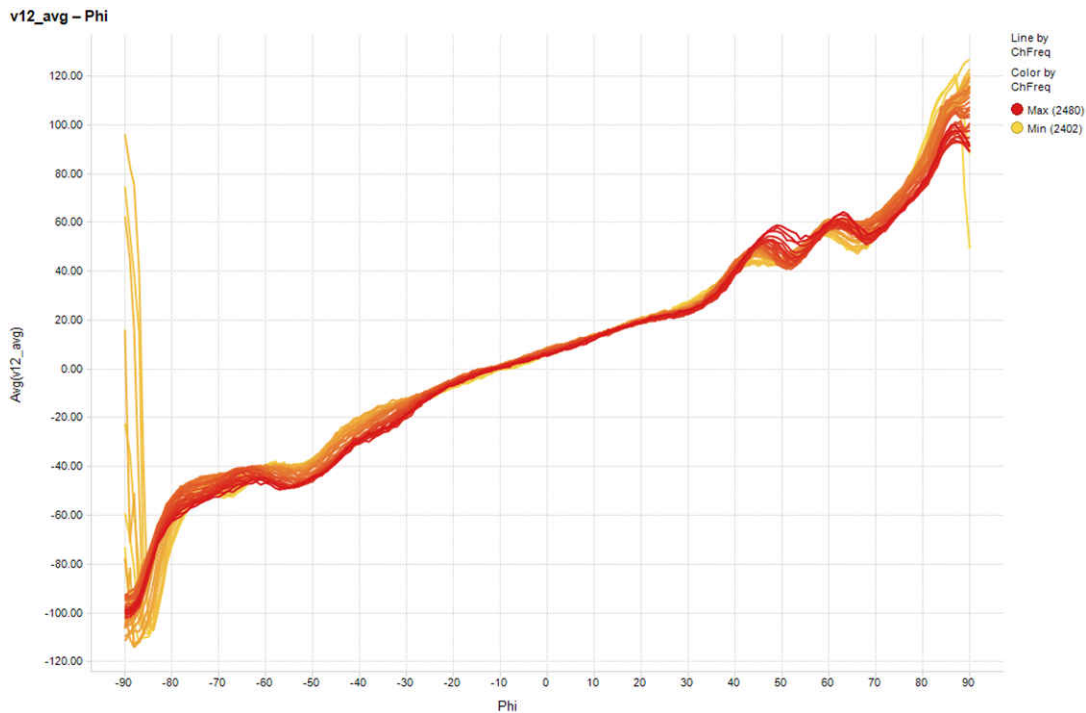
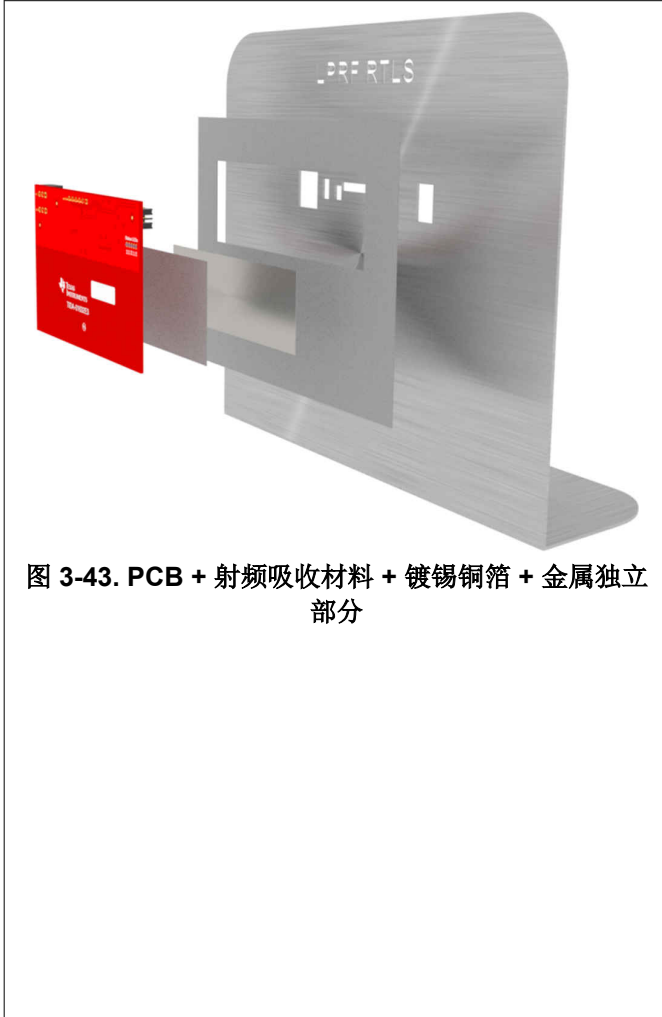


图 3-42. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔的相位差与角度结果间关系

与仅使用射频吸收材料的硬件设置相比，镀锡铜箔极大地改善了结果质量。此外，与裸 PCB 相比，较宽角度下的相位差误差有所减少，并且在 -75° 至 75° 的范围内存在一些误差。

3.4.2.4 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属

在此设置中，TIDA-01632 板（与传入的射频信号相反）上安装了一层来自 ARC Technologies 的 WaveX WX-A-010-12P 射频吸收材料、一层 3M 1183 镀锡铜箔以及金属支架，如图 3-43 和图 3-44 所示。



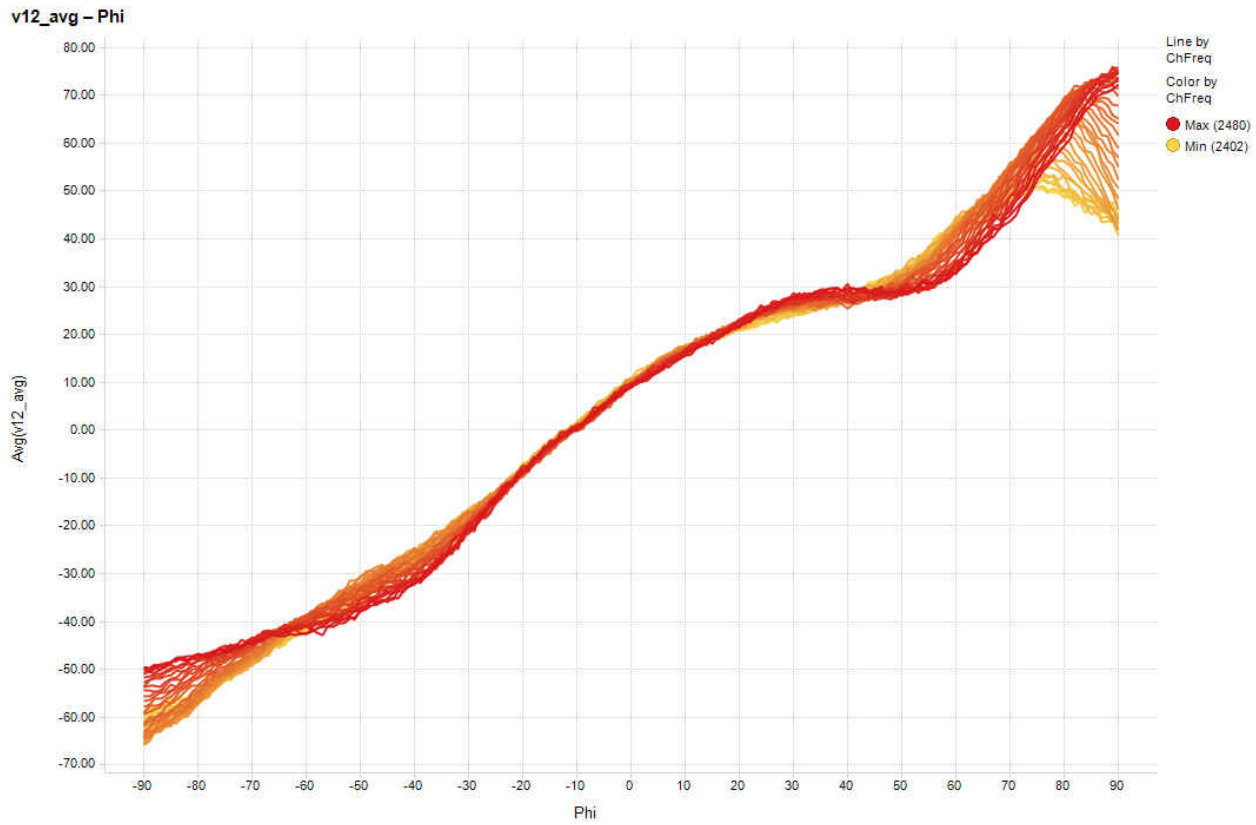


图 3-45. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的相位差与角度结果间关系

最终的硬件设置显示了在所有角度下都具有最佳的结果。但是，结果不像之前的设置那样具有线性，并且在 -25° 至 25° 范围之外具有更大的误差。

3.4.3 相位差与距离间的关系

理想情况下，在所有距离条件下，对于特定角度，相位差都是相同的。为了测试这一点，我们测量了裸 PCB 在距离增加（降低发射天线信号强度）时的相位差变化情况。图 3-46 显示了结果。

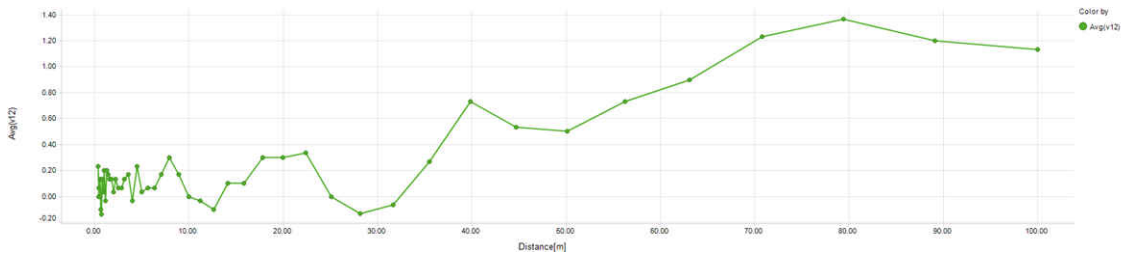


图 3-46. 相位差与距离间的关系

请注意，在距离大于大约 35m 之前，方差不会超过 0.40° 。

4 根据 IQ 测量计算 AoA

节 3 中使用了测量的相位来计算具有不同硬件设置的两根天线之间的相位差。下一步是根据测量的相位差计算 AoA。已知天线间距 (d) 并测得两根天线之间的相位差 (Φ) 后, 可以使用简单的三角函数计算 AoA, 如图 4-1 所示。

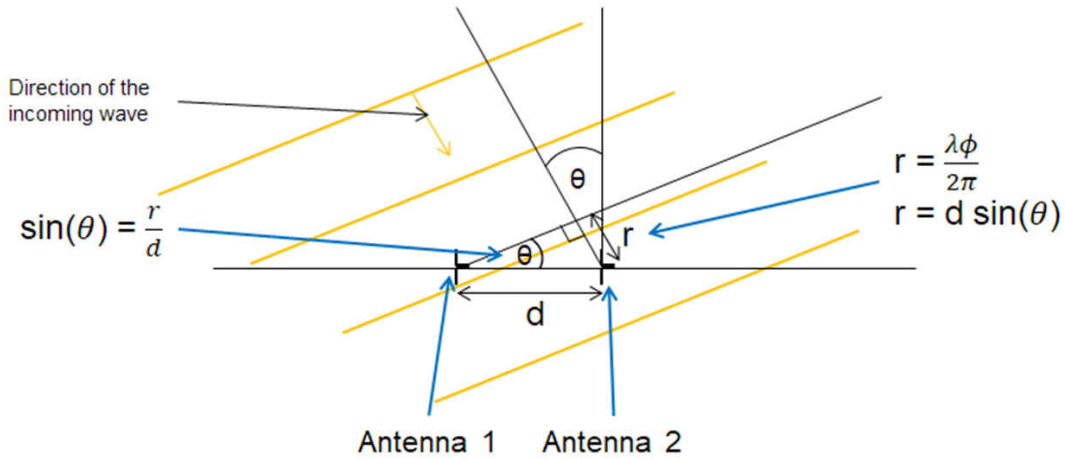


图 4-1. AoA 公式

图 4-1 中的公式可以简化为方程式 4。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda f}{2\pi d} \quad (4)$$

请注意, r 是入射波到达天线 1 后需要传播到天线 2 的距离。由于相位差 (Φ) 已知, 因此额外的距离 r 等于传入信号的波长乘以 $\Phi / (2\pi)$ 。有关 AoA 计算的更多信息, 请参阅 [SimpleLink Academy -> RTLS Toolbox -> Angle of Arrival \(AoA\)](#)。将波长、已知的天线相位中心间距和计算出的两根天线之间的相位差代入 `arcsin()` 函数, 便会计算出 AoA。

计算出 AoA 后, 由于结果会因频率和天线设计而变化, 可能需要对该值进行补偿。因此, 可以使用恒定增益和/或偏移来改善 AoA 结果。

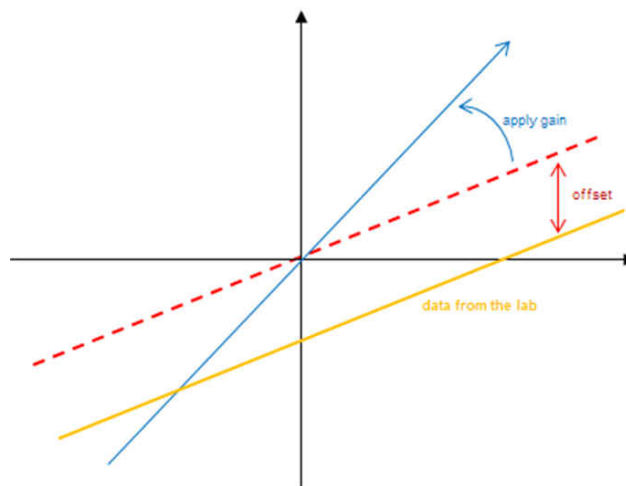


图 4-2. 线性图补偿

有关 AoA 补偿的更多信息, 请参阅 [SimpleLink™ CC2640R2 SDK BLE-Stack 用户指南](#) 的 [角度补偿](#) 部分。

4.1 偶极天线阵列未补偿时的到达角结果

这里使用 [方程式 4](#) 计算并绘制出了到达角。与 [节 3.4.2](#) 中的图形类似，x 轴 (Phi) 是 PCB 面向发送器的实际角度，y 轴是多相测量得出的多个到达角的平均值。此外，频率越低，迹线中黄色越多，而频率越高，迹线中红色越多。理想的结果显示计算出的 AoA 等于 Phi，并且图形显示了一条完美的线，表明所有频率下 Phi 等于 AoA。所有 AoA 与 Phi 间的关系曲线图均以这条线为基准。

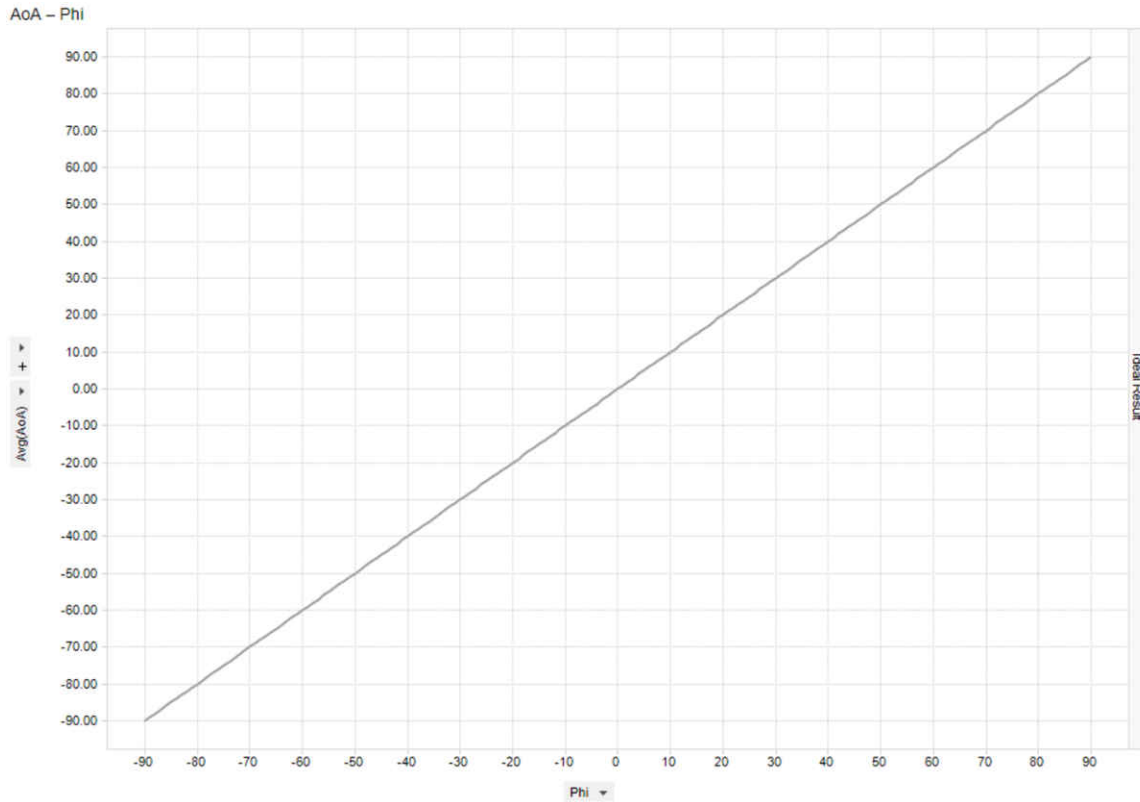


图 4-3. 理想的 AoA 结果

图 4-4 展示了全部四种不同设置的结果：顶部是裸 PCB，第二个是 PCB + 射频吸收材料，第三个是 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔，而底部是 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属。

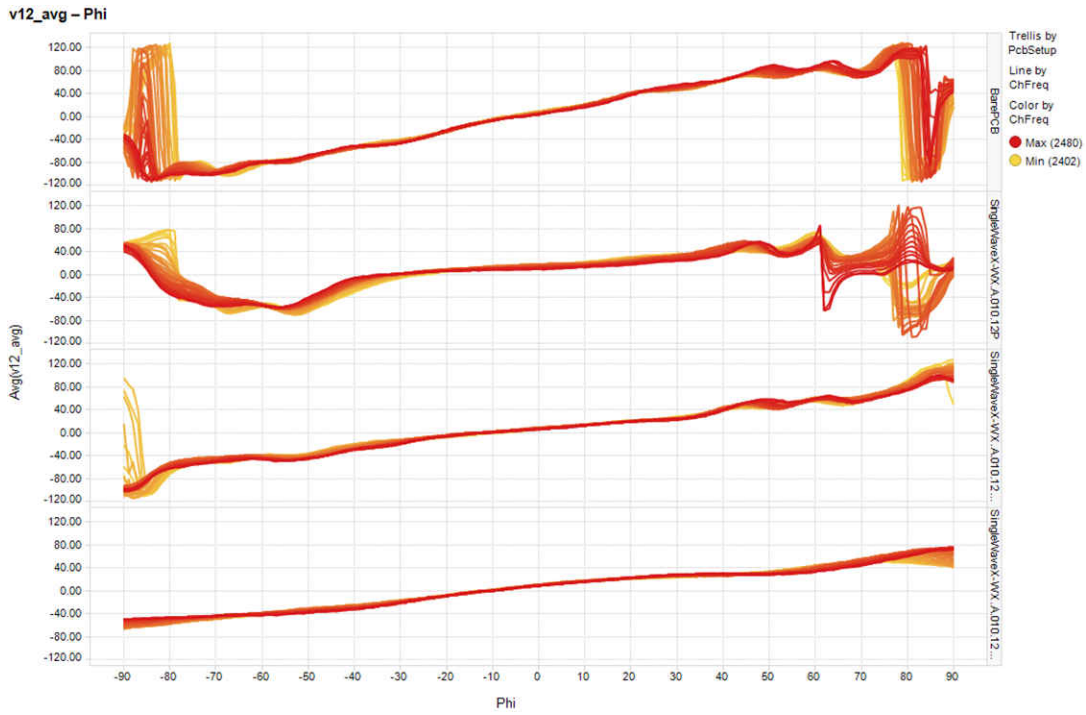


图 4-4. 所有硬件在所有低功耗蓝牙通道上的 AoA 结果

裸 PCB 的测量值最接近真实的 AoA，但随着角度接近 $\pm 90^\circ$ ，误差较大。不过，PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属设置在最宽的角度范围内具有线性度最高的结果。图 4-5 展示了计算出的 AoA 与实际角度 Phi 的误差。

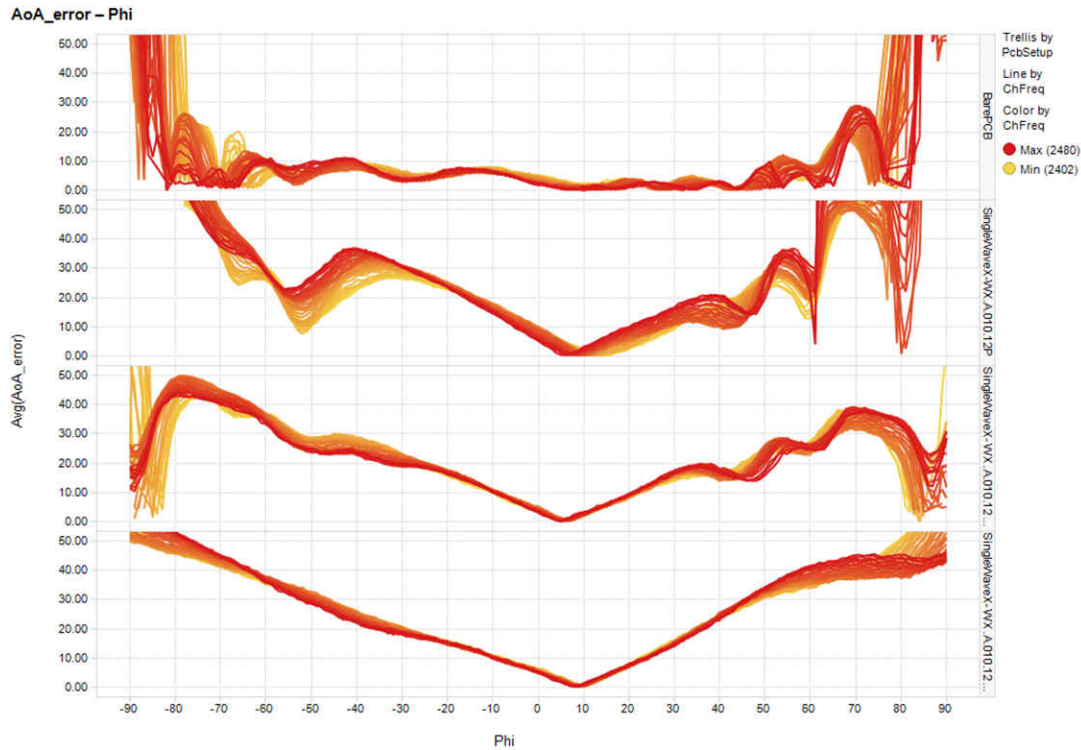


图 4-5. 所有硬件在所有低功耗蓝牙通道上的 AoA 误差结果

在解释数据时，最好是具有一致的误差，因为这可以进行补偿，如节 4.2 所示。请注意，PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属具有最一致的误差，但需要补偿以提高整体性能。在没有补偿的情况下，裸 PCB 对应的误差最小，结果最准确。以下各小节重点介绍了每个测试设置的未补偿 AoA 结果与实际 AoA 之间的关系。

4.1.1 裸 PCB 未补偿时的 AoA

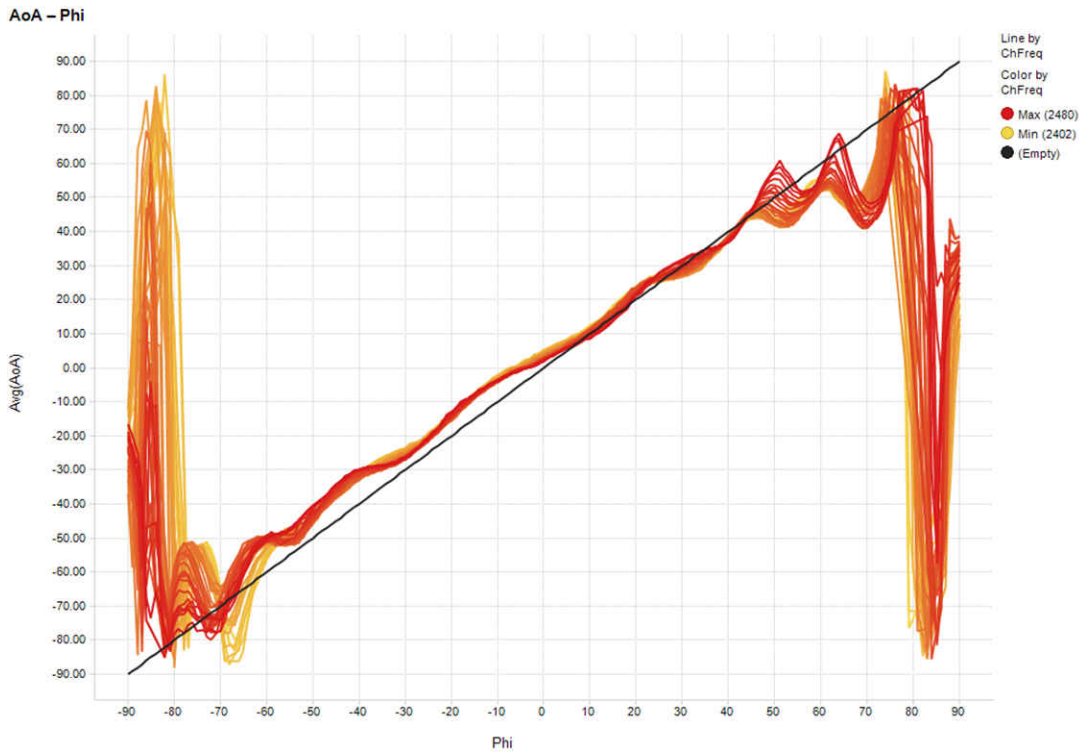


图 4-6. 裸 PCB 在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果

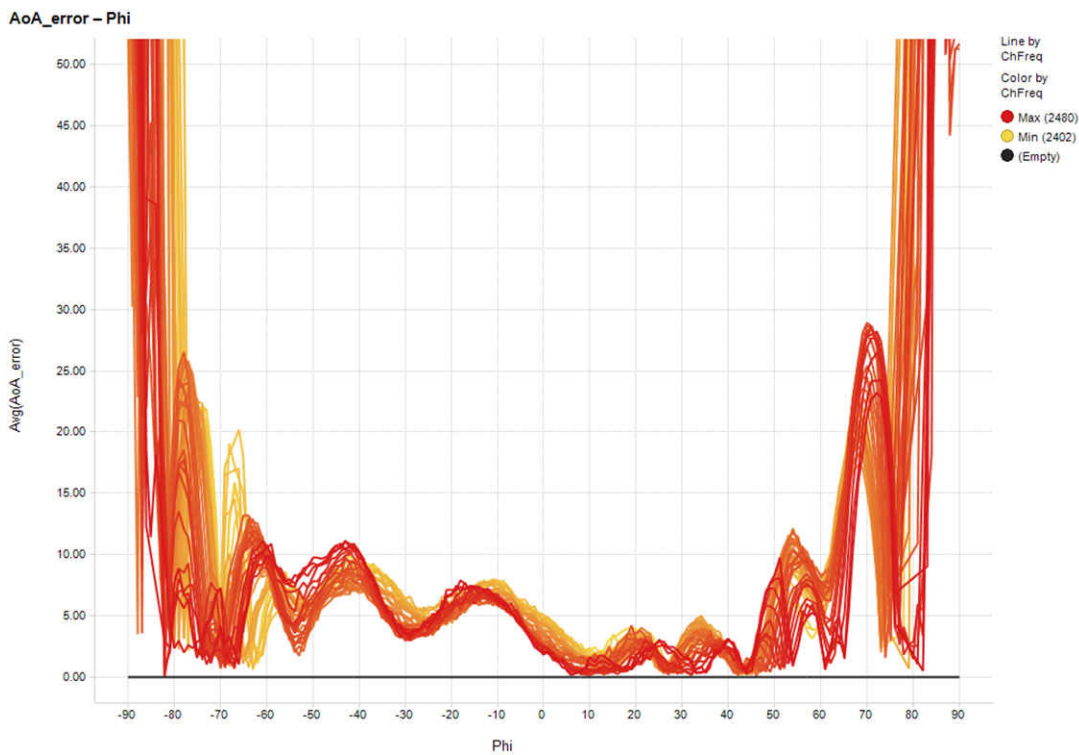


图 4-7. 裸 PCB 未补偿时的 AoA 误差结果

4.1.2 PCB + 射频吸收材料未补偿时的 AoA

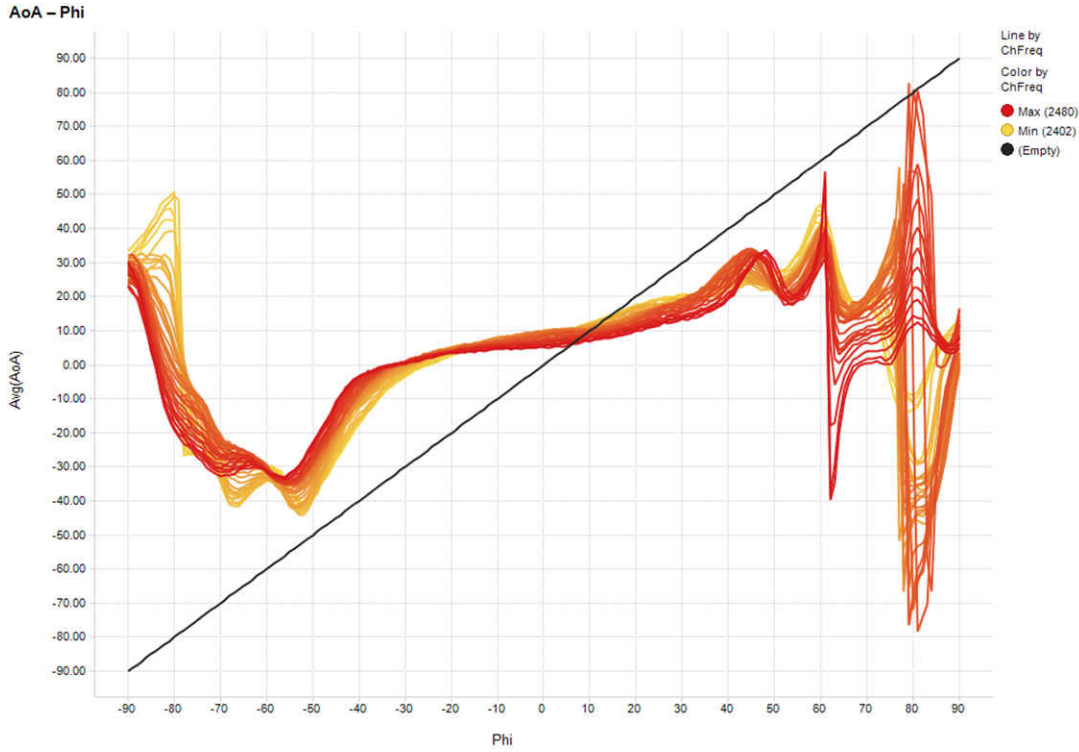


图 4-8. PCB + 射频吸收材料在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA

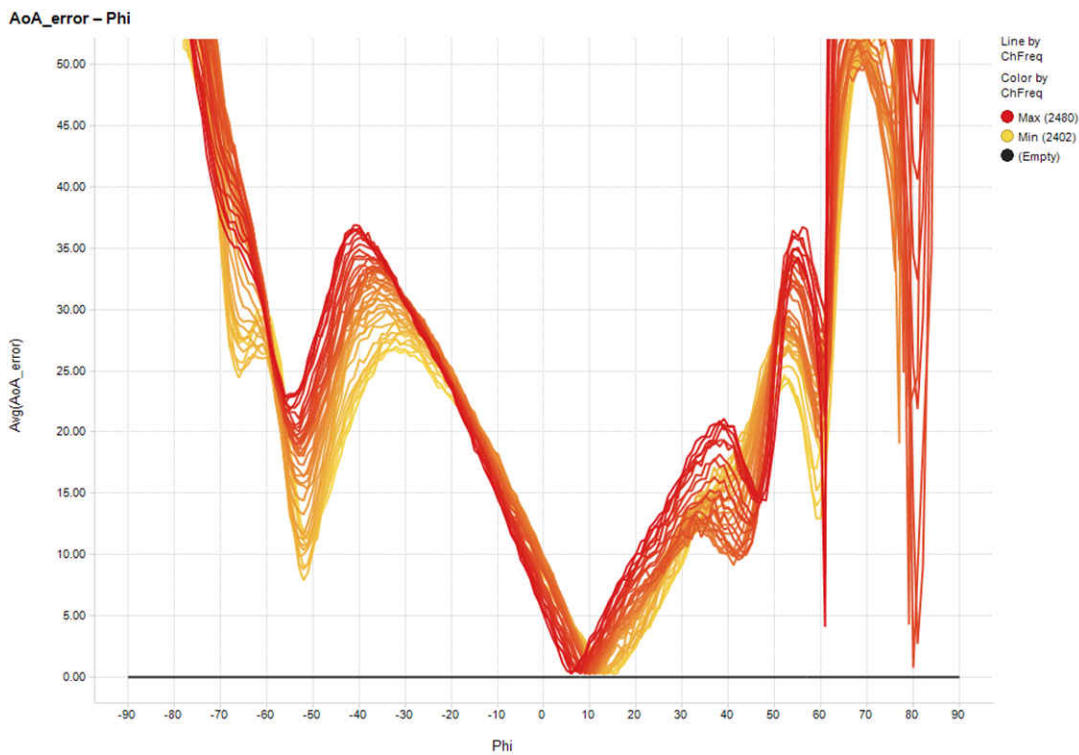


图 4-9. PCB + 射频吸收材料未补偿时的 AoA 误差

4.1.3 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔未补偿时的 AoA

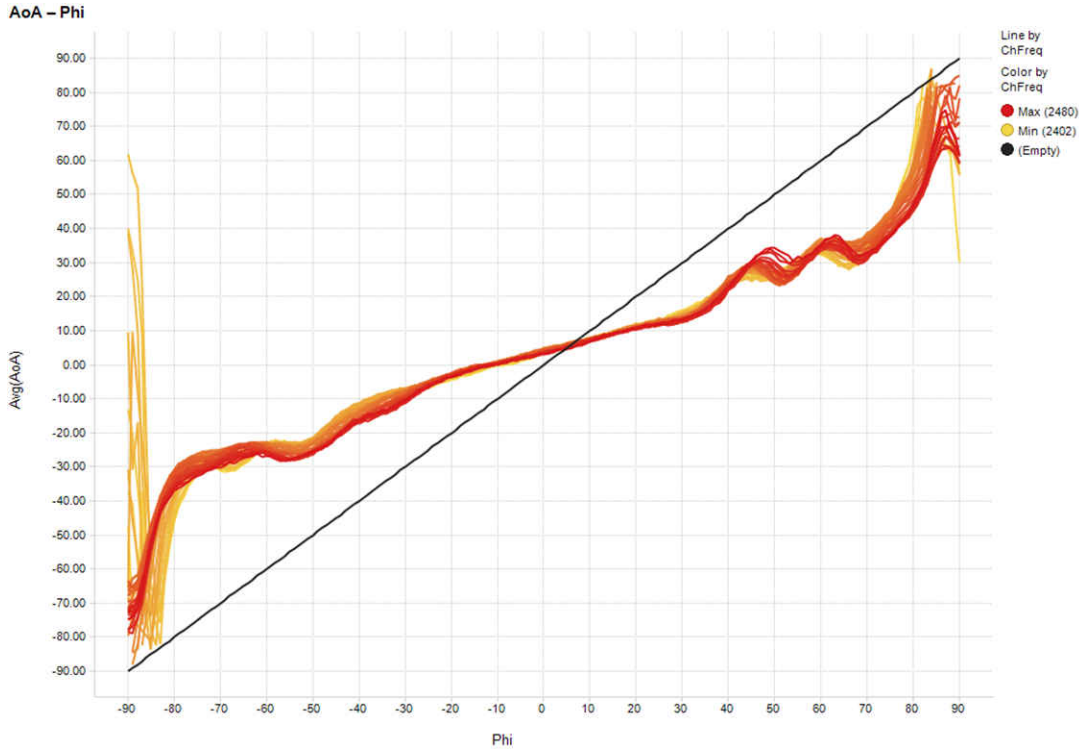


图 4-10. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果

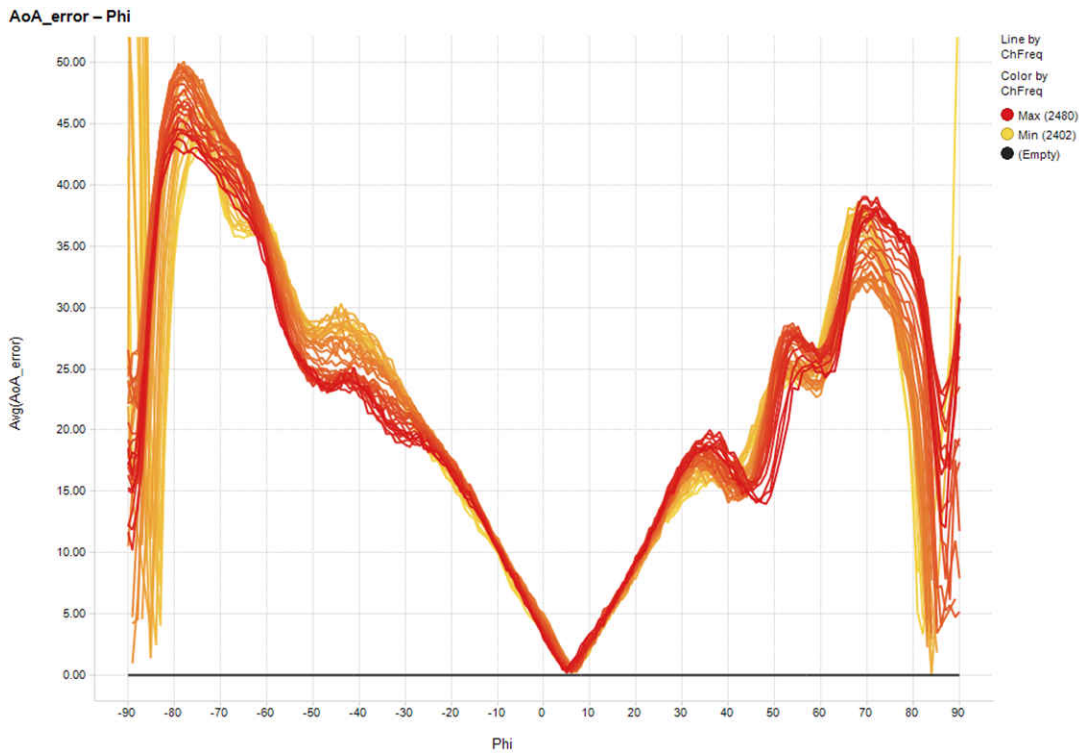


图 4-11. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔未补偿时的 AoA 误差

4.1.4 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属未偿时的 AoA

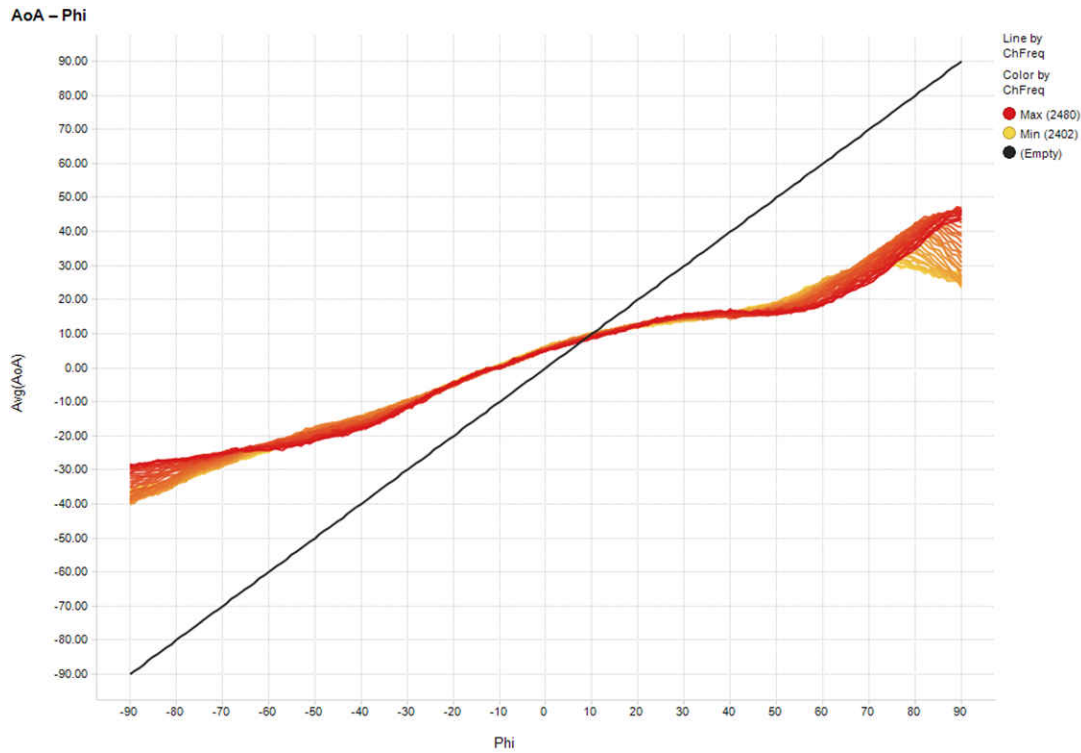


图 4-12. PCB + RF 吸波材料 + 镀锡铜箔 + 金属在所有低功耗蓝牙通道上未补偿时的 AoA 结果

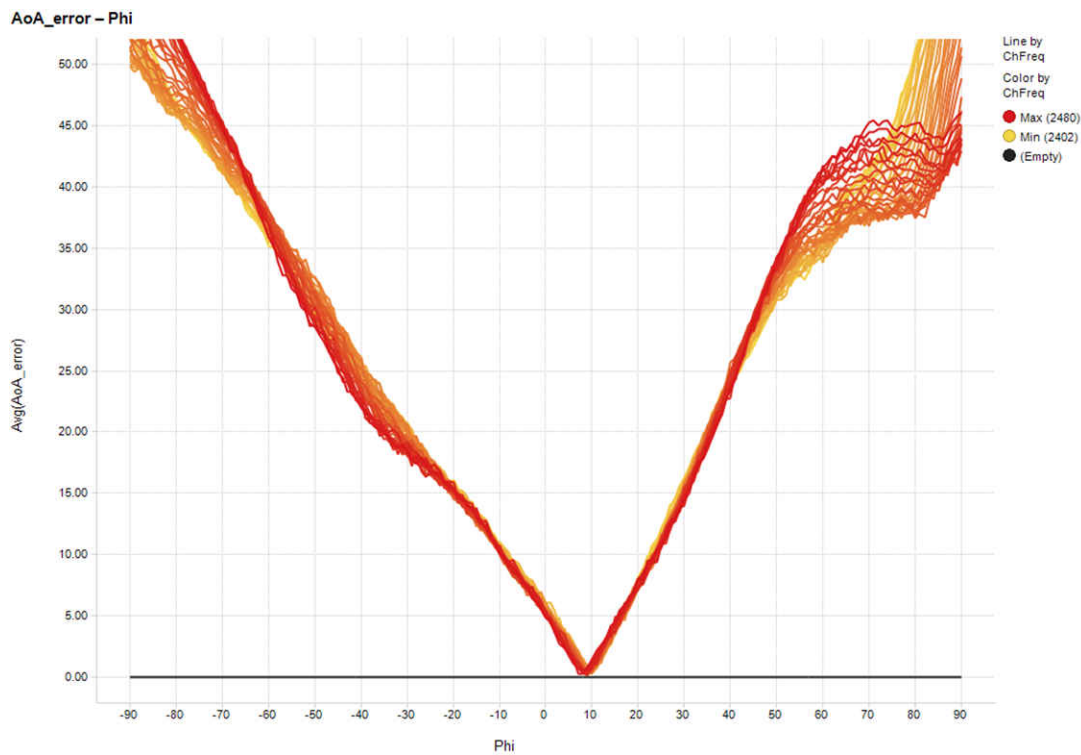


图 4-13. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属未补偿时的 AoA 误差

4.2 偶极天线阵列补偿后的 AoA 结果

本节为计算出的基本 AoA 值 [节 4.1](#) (不考虑 PCB + RF 吸收材料硬件设置) 添加了增益和偏移补偿, 可减少相对于实际角度 Phi 的 AoA 误差。实现的补偿如 [方程式 5](#) 所示。

$$\text{AoA}_{\text{Comp}} = (\theta + b) \times m \quad (5)$$

其中

- θ 等于计算出的 AoA
- b 等于偏移
- m 等于增益

对于除金属支架设置外的所有硬件设置, 所选的偏移值可确保当 Phi 等于零时, 计算出的 AoA 平均值也等于零。由于所有频率都需要稍微不同的偏移值, 因此针对每个单独的频率调整了该偏移。为了计算增益, 在添加所需的偏移后, 针对最具线性范围 (即 -65° 至 65°) 内的每个频率使用了最佳拟合线性方法。但是, 由于大多数频率需要相同的增益值或类似的增益值, 因此增益值随频率的变化要小得多。

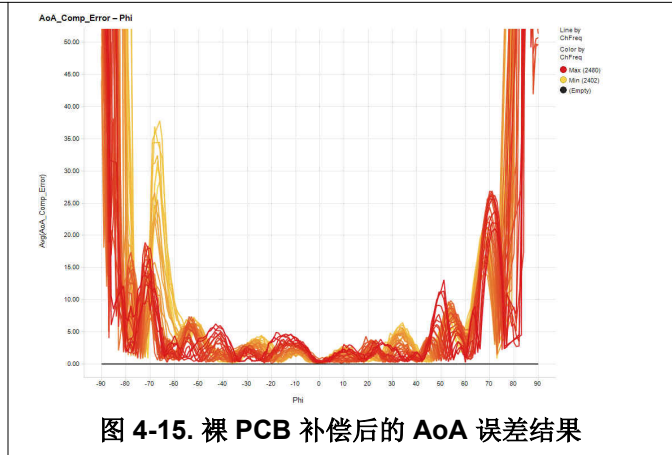
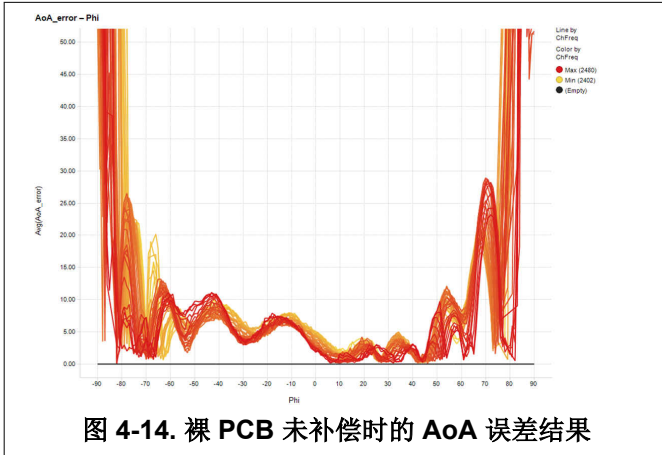
4.2.1 具有补偿功能的裸 PCB AoA

裸 PCB 需要的补偿量最少，因为结果非常接近 Phi。但是，表 4-1 展示了用于每个频率的增益和偏移值。

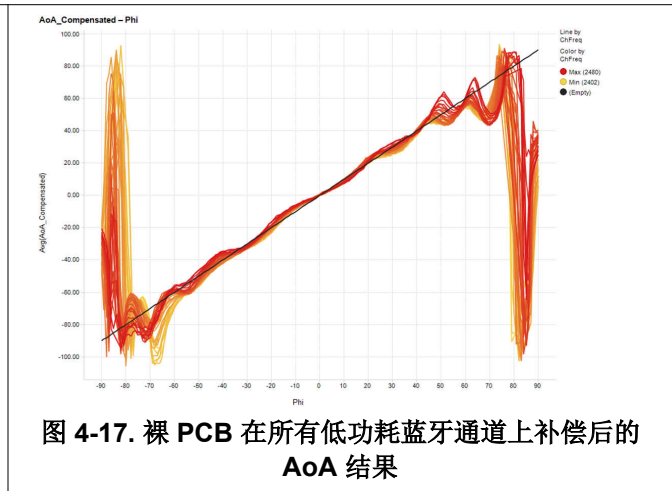
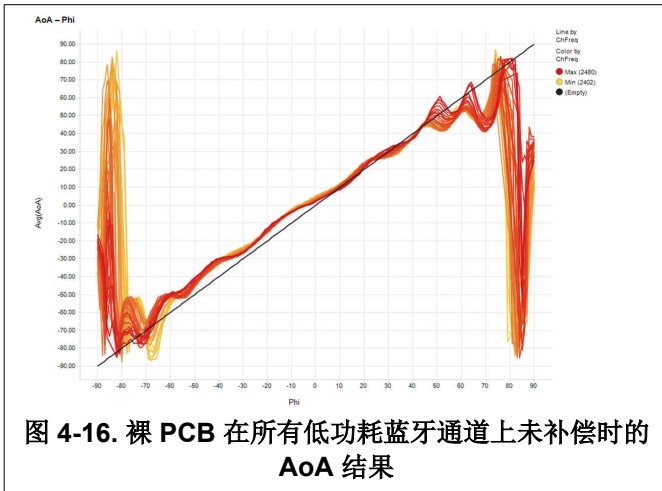
表 4-1. 裸 PCB AoA 补偿值

频率 (MHz)	通道	增益	偏移
2402	37	1.12	-4.69
2404	0	1.12	-4.69
2406	1	1.12	-5.04
2408	2	1.14	-4.82
2410	3	1.14	-4.82
2412	4	1.14	-5.1
2414	5	1.15	-4.81
2416	6	1.15	-4.73
2418	7	1.15	-4.45
2420	8	1.15	-4.73
2422	9	1.15	-4.16
2424	10	1.15	-4.37
2426	38	1.15	-4.22
2428	11	1.15	-4.36
2430	12	1.15	-3.86
2432	13	1.14	-3.65
2434	14	1.14	-3.72
2436	15	1.15	-3.57
2438	16	1.14	-3.43
2440	17	1.14	-3.29
2442	18	1.14	-2.93
2444	19	1.12	-3
2446	20	1.12	-2.09
2448	21	1.12	-2.79
2450	22	1.12	-2.65
2452	23	1.12	-2.57
2454	24	1.12	-2.64
2456	25	1.12	-2.36
2458	26	1.12	-2.64
2460	27	1.12	-2.36
2462	28	1.12	-2.08
2464	29	1.11	-2.49
2466	30	1.11	-2.35
2468	31	1.11	-2.63
2470	32	1.11	-2.14
2472	33	1.11	-2.55
2474	34	1.11	-2.41
2476	35	1.11	-2.07
2478	36	1.11	-1.86
2480	39	1.09	-1.99

图 4-14 展示了未补偿时的 AoA 误差与 Phi (实际角度) 之间的关系, 而图 4-15 展示了补偿后的 AoA 误差与 Phi 之间的关系。



很明显, 在最具线性范围 (-65° 至 65°) 内, 误差显著降低。图 4-16 和图 4-17 展示了如何根据理想的 AoA 与 Phi 关系图来调整结果。在 -70° 至 65° 的大多数频率下, 误差小于 10°。



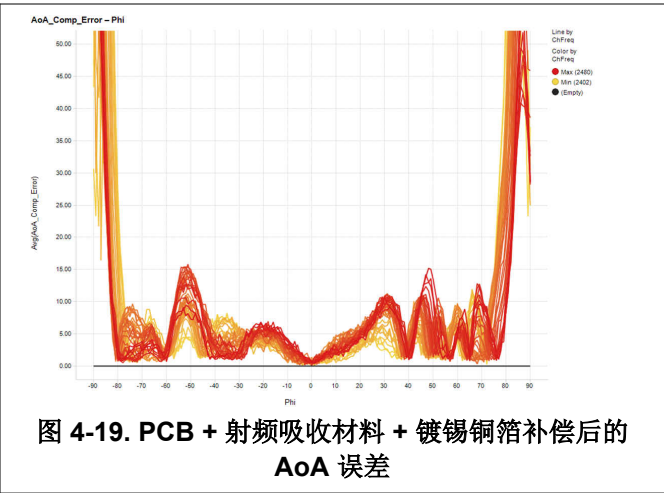
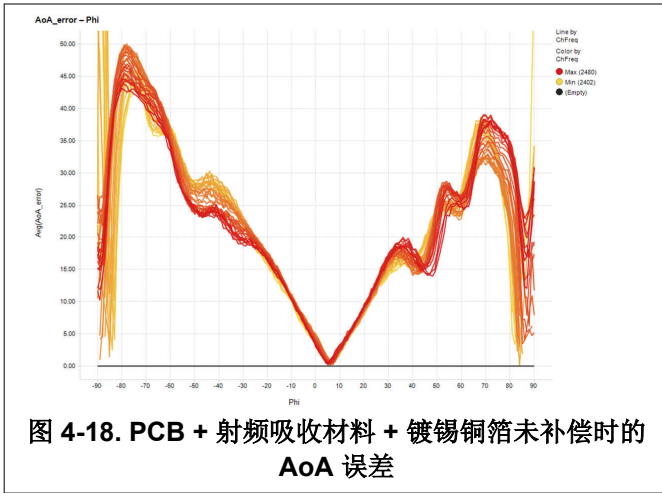
4.2.2 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔补偿后的 AoA

此硬件设置的初始测试显示出线性度相当高的结果。因此，通过补偿，AoA 值在 $\pm 80^\circ$ 范围内相当准确（取决于频率）。表 4-2 展示了每个频率条件下使用的补偿值。

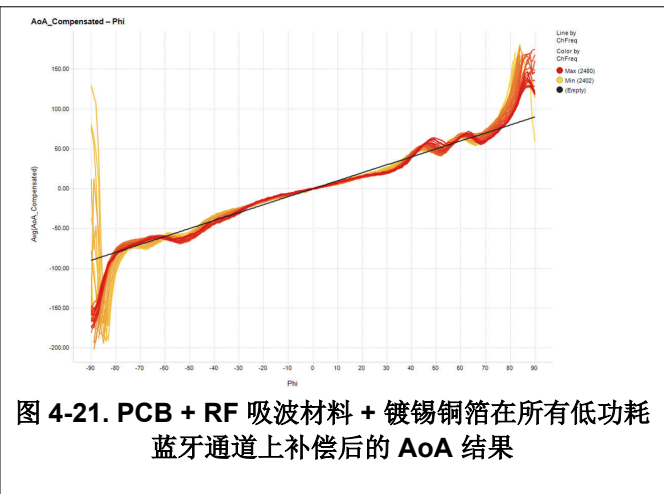
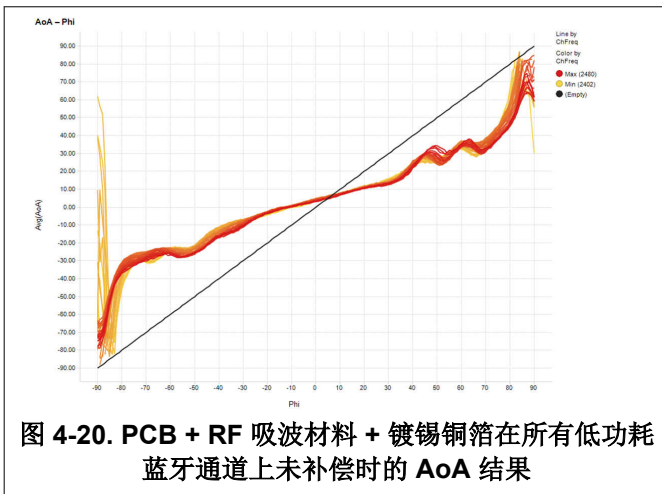
表 4-2. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔的 AoA 补偿值

频率 (MHz)	通道	增益	偏移
2402	37	2.17	-3.27
2404	0	2.17	-3.34
2406	1	2.17	-3.48
2408	2	2.17	-3.54
2410	3	2.22	-3.82
2412	4	2.22	-3.54
2414	5	2.22	-4.1
2416	6	2.22	-4.1
2418	7	2.22	-4.02
2420	8	2.22	-4.16
2422	9	2.17	-4.37
2424	10	2.17	-4.44
2426	38	2.17	-4.5
2428	11	2.17	-4.22
2430	12	2.17	-5.06
2432	13	2.17	-4.56
2434	14	2.17	-4.98
2436	15	2.17	-4.2
2438	16	2.17	-4.27
2440	17	2.13	-4.62
2442	18	2.13	-4.61
2444	19	2.17	-4.12
2446	20	2.17	-4.4
2448	21	2.17	-4.39
2450	22	2.17	-4.04
2452	23	2.17	-4.46
2454	24	2.17	-4.17
2456	25	2.17	-4.03
2458	26	2.17	-3.96
2460	27	2.17	-3.75
2462	28	2.17	-3.74
2464	29	2.17	-3.88
2466	30	2.13	-3.6
2468	31	2.13	-3.73
2470	32	2.13	-3.52
2472	33	2.13	-3.52
2474	34	2.13	-3.52
2476	35	2.08	-3.38
2478	36	2.04	-3.24
2480	39	2.04	-3.03

图 4-18 展示了未补偿时的 AoA 误差与 Phi 之间的关系，而图 4-19 展示了补偿后的 AoA 误差与 Phi 之间的关系。



补偿极大地降低了 AoA 误差，并且在 -80° 到 75° 的范围内，大多数频率对应的误差小于 10° 。图 4-20 和图 4-21 展示了如何调整 AoA 数据以更接近理想结果。



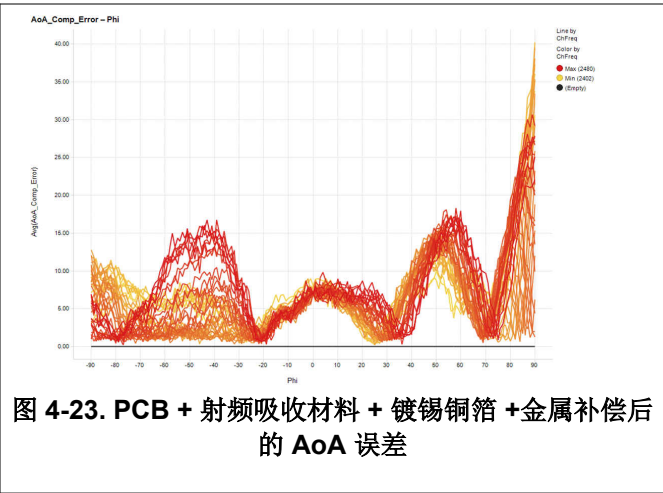
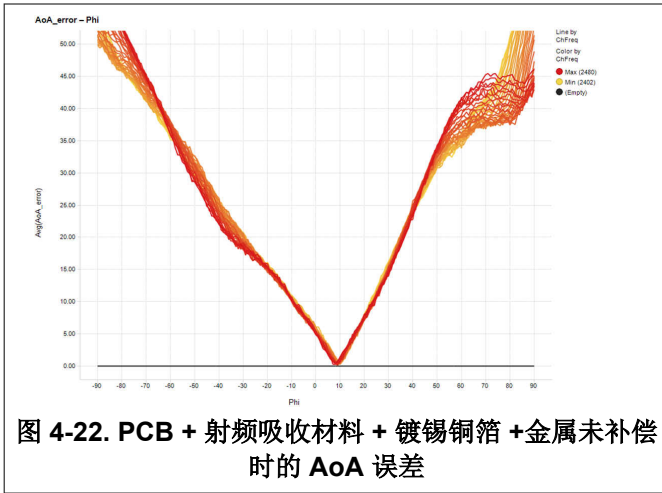
4.2.3 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属补偿后的 AoA

PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属硬件设置是唯一一种 Φ 等于 0 时不用调节偏移即可使 AoA 等于零的硬件设置。在整个 -90° 至 90° 范围内，结果都不是线性的，为了平衡整个角度范围内的误差，当 Φ 等于 0 时，偏移设定为具有 7° 的误差。可以使用更好的补偿方法来改善结果，但本白皮书中仅实现了基本的最佳拟合线性补偿。表 4-3 展示了每个频率条件下使用的增益和偏移。

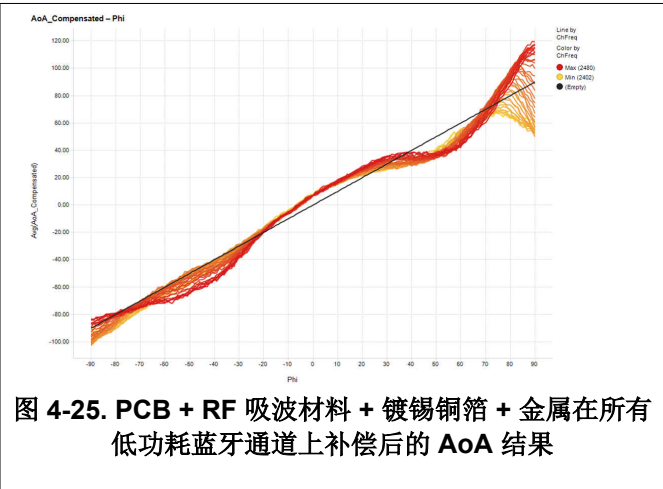
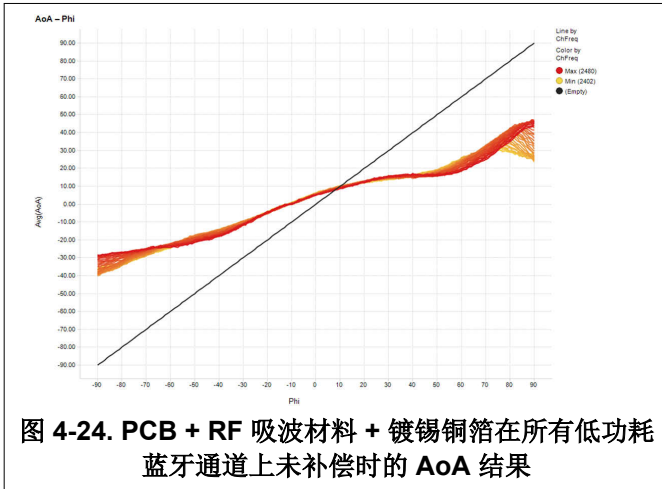
表 4-3. PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属的补偿值

频率 (MHz)	通道	增益	偏移
2402	37	2.44	-2.55
2404	0	2.44	-2.12
2406	1	2.44	-2.87
2408	2	2.44	-3.07
2410	3	2.44	-3.16
2412	4	2.44	-3.28
2414	5	2.44	-3.22
2416	6	2.38	-2.71
2418	7	2.38	-2.92
2420	8	2.38	-2.92
2422	9	2.38	-2.21
2424	10	2.38	-3.15
2426	38	2.38	-2.55
2428	11	2.38	-2.68
2430	12	2.38	-3.11
2432	13	2.38	-2.82
2434	14	2.38	-2.74
2436	15	2.38	-2.74
2438	16	2.38	-2.66
2440	17	2.38	-2.44
2442	18	2.38	-2.37
2444	19	2.44	-2.65
2446	20	2.44	-2.37
2448	21	2.44	-2.62
2450	22	2.44	-2.5
2452	23	2.5	-2.68
2454	24	2.5	-2.35
2456	25	2.5	-2.4
2458	26	2.5	-2.62
2460	27	2.56	-2.4
2462	28	2.56	-2.33
2464	29	2.56	-2.53
2466	30	2.63	-2.66
2468	31	2.63	-2.32
2470	32	2.7	-2.37
2472	33	2.7	-2.93
2474	34	2.7	-2.72
2476	35	2.7	-2.3
2478	36	2.7	-2.3
2480	39	2.7	-2.43

图 4-22 和图 4-23 展示了未补偿误差和补偿后误差的差异。



在补偿后，误差得到了极大的改善。根据频率，此硬件设置在 -90° 至 40° 和 70° 至 90° 范围内显示误差小于 10° 。对于大多数频率，在 40° 到 65° 范围内存在相当大的误差。更好的补偿方法可以极大地改善该误差，同时仍保持 $\pm 90^\circ$ 的完整范围。图 4-24 和图 4-25 展示了未补偿时的 AoA 与补偿后的 AoA。



4.2.4 硬件设置补偿结果比较

在对具有最大线性 IQ 差异和 AoA 结果的三种硬件设置实施一些基本线性补偿之后，可以比较补偿后的 AoA 结果。图 4-26 展示了所有补偿后的 AoA 误差与 Phi (实际角度) 之间的关系，其中顶部是裸 PCB，中间是 PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔，而底部是 PCB + 射频吸收材料 + 底部镀锡铜箔 + 金属。

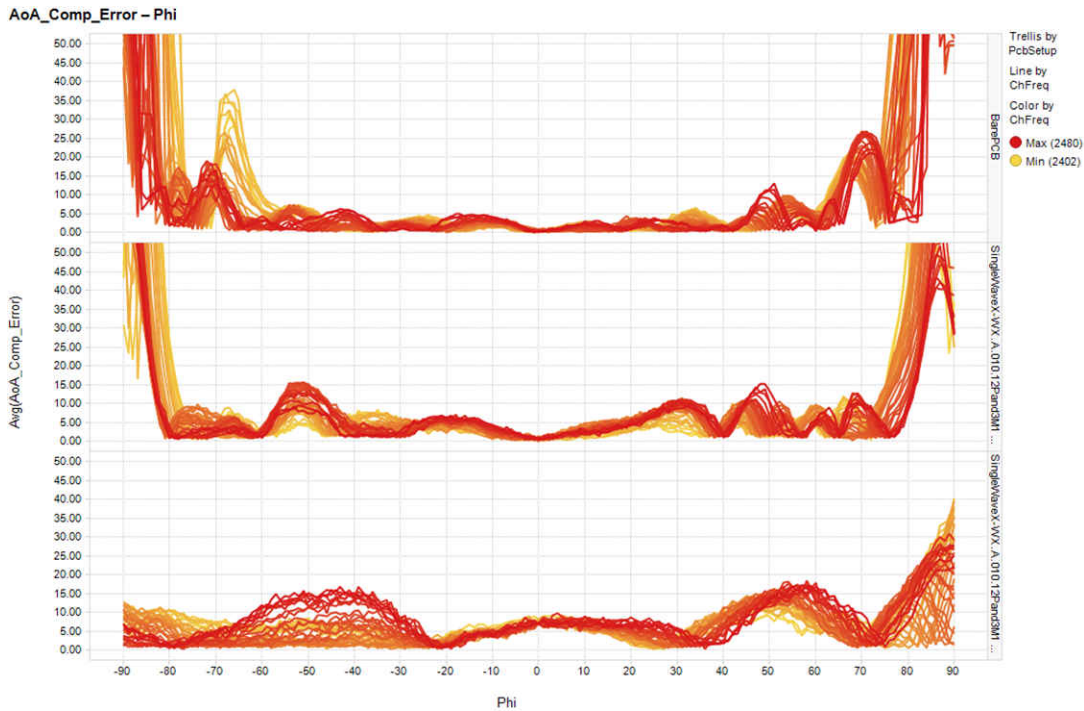


图 4-26. 硬件设置比较：补偿后的 AoA 误差与 Phi 间的关系

比较表明，裸 PCB 在大约 -65° 至 65° 范围内表现出最佳结果，但在该范围之外精度最低。通过添加射频吸收材料和镀锡铜箔，可以在较宽的角度条件下减小误差，但代价是在 -30° 到 35° 范围内，误差会增加。通过添加金属，可以进一步减小最宽角度条件下的误差，但在 -20° 到 20° 和 40° 到 70° 的范围内，误差会进一步增大。同样，更好的补偿可能会改善所有硬件设置对应的结果。图 4-27 以与图 4-26 中相同的顺序，比较了这三种硬件设置补偿后的 AoA 与 Phi 之间的关系。

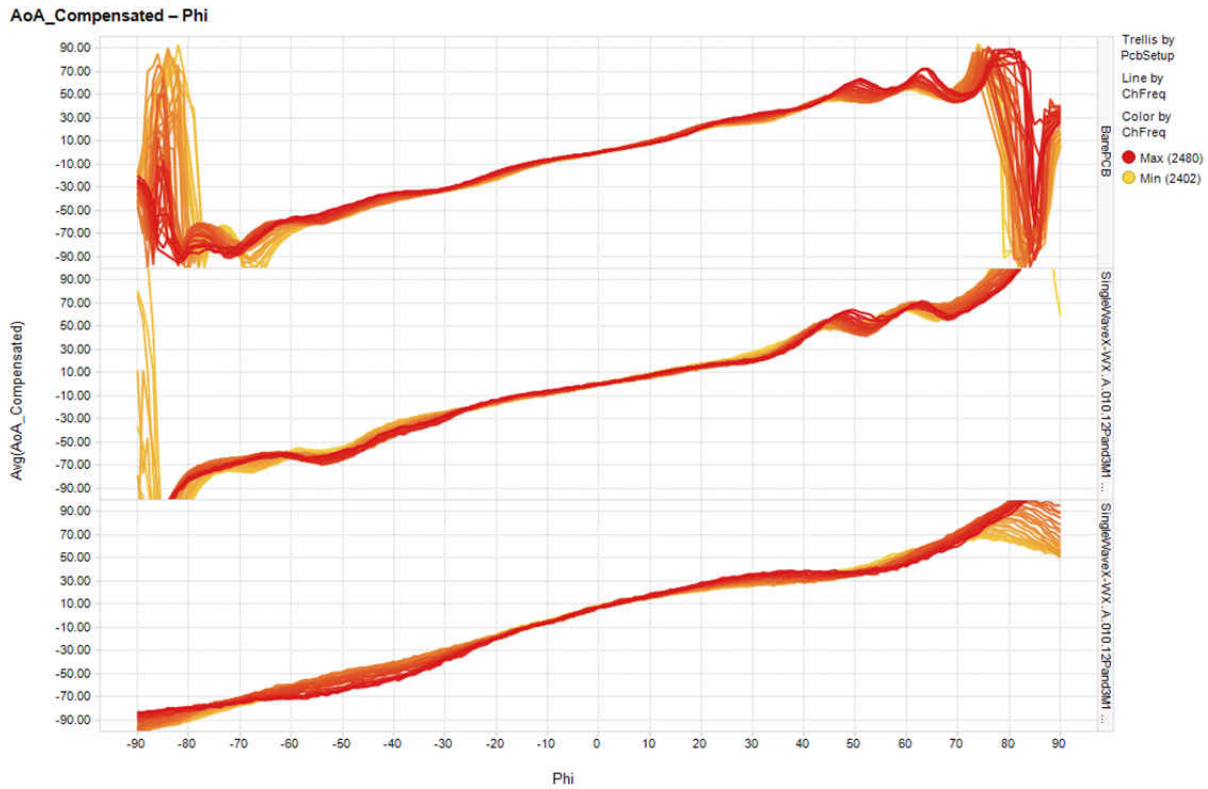


图 4-27. 硬件设置比较：补偿后的 AoA 结果

根据图 4-27，在 $\pm 90^\circ$ 的整个范围内，PCB + 射频吸收材料 + 镀锡铜箔 + 金属可以在所有频率下提供最稳定的结果。在所有硬件设置中，随着角度的增加，无论是正角度还是负角度，线性度都会减小。此外，不同的频率会针对特定的角度范围提供更准确的结果。务必要记住，当金属靠近时，天线效率会降低。但是，数据表明，在添加金属支架和镀锡铜箔后，AoA 范围会增加。

测试结果表明，测试和了解硬件设置性能非常重要。建议了解特定硬件设置的 IQ 差异测量行为，以改善 AoA 计算，从而提高整体解决方案 AoA 精度。

5 参考文献

1. [蓝牙核心规范 v5.1](#)
2. 德州仪器 (TI), [TIDA-01632 蓝牙低功耗卫星模块参考设计](#)
3. 德州仪器 (TI), [SimpleLink™ 到达角 BoosterPack](#)
4. 德州仪器 (TI), [SimpleLink CC2640R2 SDK](#)
5. 德州仪器 (TI), [CC2640R2F-Q1](#)

6 修订历史记录

Changes from Revision * (July 2019) to Revision A (June 2023)

Page

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司