

白皮书： 聚焦天线组件 提升无线物联网设备的功率效率



目录

- 引言
- 弗里斯传输公式的基本原理
- 天线设计与选择的指导方针
- TE 专业技术如何助力天线性能的优化，以追求无线物联网设备的更高功率效率

引言

放眼世界，数以十亿计的无线物联网设备依赖电池供电，维持它们在各种应用中的运转，包括资产跟踪、物流、农业环境传感和智能公共设施监测等。在许多诸如此类的应用中，这些设备要长期值守在田间，且没有人为干预。这些由单块电池驱动的设备需要保持无线连接，以提供持续服务，同时在不更换电池的情况下使用寿命需要达到5至10年。因此，要保证预期的使用寿命和不间断服务，物联网设备的功耗至关重要。

无线设备的功耗取决于多种因素：

- 需要传输和接收的数据量
- 设备通信时间与睡眠时间的比例
- 设备无线网络的地理覆盖面和范围
- 支持低功率、低数据率传输的无线协议
- 最重要的是，设备天线的射频性能

本白皮书将深入讨论天线的射频性能如何影响无线设备的功率效率，阐释我们在设备开发阶段对如何设计和选择天线的见解。

本文将首先讨论天线理论中最基本的公式——弗里斯传输公式，及其如何将天线的射频性能与接收信号强度和无线链路的范围联系起来。然后将介绍天线设计和选择的指导方针，接着阐释TE作为射频技术合作伙伴和天线产品供应商所提供的精简解决方案，用以协助客户的工作。

弗里斯传输公式的基本原理——天线性能如何影响设备功耗和电池寿命

弗里斯传输公式 [1] 是解释自由空间中两个天线之间的发射功率 (P_T)、接收功率 (P_R) 和距离 (D) 之间关系的基本方程式。它揭示了设备功耗和电池寿命如何受到天线性能的影响。



图 1：发射和接收天线之间的无线通信链路

$$\begin{aligned}
 P_R &= P_T G_T(\theta_T, \phi_T) G_R(\theta_R, \phi_R) (c/4\pi Df)^2 \eta_{pol} \\
 &= P_T D_T(\theta_T, \phi_T) \eta_{matchT} \eta_{radT} D_R(\theta_R, \phi_R) \eta_{matchR} \eta_{radR} (c/4\pi Df)^2 \eta_{pol} \quad (1)
 \end{aligned}$$

where,

$$G_T(\theta_T, \phi_T) = D_T(\theta_T, \phi_T) \eta_{totalT} = D_T(\theta_T, \phi_T) \eta_{matchT} \eta_{radT} \quad (2)$$

$$G_R(\theta_R, \phi_R) = D_R(\theta_R, \phi_R) \eta_{totalR} = D_R(\theta_R, \phi_R) \eta_{matchR} \eta_{radR} \quad (3)$$

c 代表自由空间中的光

f 代表频率

D 代表两个天线之间的距离

η_{pol} 代表两个天线之间的偏振匹配效率

$G_T(\theta_T, \phi_T)$ 代表朝向接收天线方向的发射天线增益

$D_T(\theta_T, \phi_T)$ 代表朝向接收天线方向的发射天线方向性

η_{matchT} 代表发射天线的阻抗匹配效率

η_{radT} 代表发射天线的辐射效率

$G_R(\theta_R, \phi_R)$ 代表朝向发射天线方向的接收天线增益

$D_R(\theta_R, \phi_R)$ 代表朝向发射天线方向的接收天线方向性

η_{matchR} 代表接收天线的阻抗匹配效率

η_{radR} 代表接收天线的辐射效率

方程（1）中的弗里斯传输公式描述了，在功率被接收器接收之前，发射器的发射功率（ P_T 被发射天线朝向接收天线方向的增益 $G_T(\theta_{TT})$ ，接收天线朝向发射天线方向的增益 $G_R(\theta_{RR})$ ，路径损耗 $(c/4\pi D)^2$ 和两个天线之间的偏振匹配效率 η_{pol} ，的加权。

在方程（2）中，朝向接收天线方向的发射天线增益 $G_T(\theta_{TT})$ ，是发射天线在该方向的方向性 $D(\theta_{TT})$ ，与发射天线的效率 η_{totalT} ，的乘积，而发射天线效率是阻抗匹配效率 η_{matchT} ，和发射天线辐射效率 η_{radT} ，的组合。同样，在方程（3）中，接收天线朝向发射天线方向的增益也具有同样的定义。

根据弗里斯公式，在所需范围为D的无线链路中，从给定发射功率接收到的功率水平由发射和接收天线的射频性能（增益、方向性、阻抗匹配效率、辐射效率）以及两个天线之间的偏振匹配效率决定。也就是说，无线链路为了达到一定的接收功率，所需要的发射功率是由天线性能决定的。

在本讨论中，我们使用弗里斯公式来解释天线性能如何影响无线设备的功耗。在下一节中，我们阐述了为满足功耗和通信链路性能要求而设计和选择天线的指导方针。

[1] Harald Friis, “A Note on a Simple Transmission Formula,” Proc. IRE, 34, 1946, pp. 254–256

天线设计与选择的指导方针

弗里斯传输公式解释了天线的射频性能如何影响在一定距离内，从给定的发射功率接收的功率水平，即如何确定所需的发射功率，以确保接收功率达到所要求的水平。在本节中，我们将进一步阐明天线的射频性能，以解释如何根据这些性能指标来设计或选择天线。

指导方针 1：根据传播场景选择天线辐射方向图

天线辐射方向图是一种图形化描述，展示了天线在特定方向上的发射/接收功率强度。天线辐射方向图通常采用三维球面坐标给出完整的空间描述。图2中的三维辐射方向图描述的是一个位于PCB接地板边缘的蓝牙插槽天线。辐射方向图以分贝（dBi）为单位来绘制天线在不同方向上的增益，使用从红色到蓝色的颜色渐变方案来表示天线增益从高到低的变化。Theta（ θ ）是偏离z轴的仰角，Phi（ ϕ ）是偏离x轴并朝向y轴的方位角。

二维辐射方向切割图是三维图形的“切片”，针对目标平面提供更详细的信息。图3显示了图2中天线的辐射方向图的三个主要平面Phi=0°（x-z平面）、Phi=90°（y-z平面）和Theta=90°（x-y平面）的2D切割图。

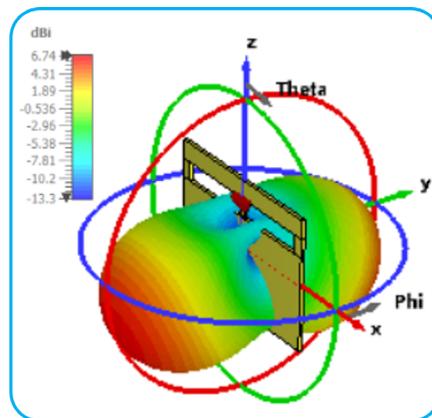


图 2：2.45GHZ下的三维增益辐射方向图

在本蓝牙插槽天线的示例中，x-z平面的增益很低，所以沿该平面方向发射/接收的功率很小。天线的最高增益朝着+y轴和-y轴方向。因此，当该蓝牙天线用于发射时，需要将该天线的+y轴和-y轴指向接收天线，以最大程度地提升输送到接收天线的功率。由于沿该蓝牙天线的x-z平面方向的发射功率水平很低，因此要避免按照该方向部署接收天线。反之亦然，当蓝牙天线用于接收时，需要将最大增益辐射方向指向入射波的方向。

在不同的传播场景中，入射波来自不同方向，所以我们需要选择对入射波方向产生的辐射最大的天线。例如，GPS信号来自天空方向，所以GPS天线对天空的辐射应当最大，对地面的辐射最小。车辆之间的通信也是一个传播场景，其中信号主要来自水平方向，围绕车辆进行360° 旋转。为了以机会均等原则与其他车辆进行通信，天线需要在水平面上采用全向辐射模式。

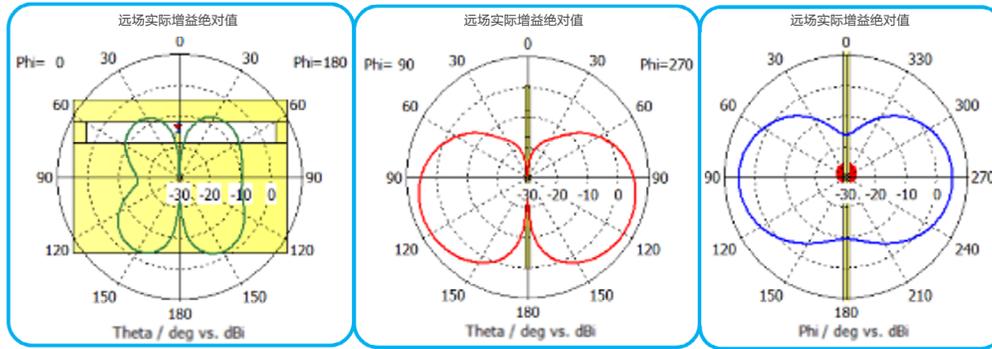


图 3：2.45GHZ下，三个主要平面的二维增益辐射方向切割图

指导方针 2：天线总效率是关键

天线总效率 (η_{total}) 用于量化辐射的功率与输送到天线的功率之间对比。在无法辐射的功率中，有些由于阻抗不匹配而在天线的端口进行反射，有些则耗散在构成天线的金属材料 and 天线周围的电介质材料中。阻抗匹配效率 (η_{match}) 用于衡量反射功率的影响。辐射效率 (η_{rad}) 用于反映耗散的功率。 η_{total} 是 η_{match} 和 η_{rad} 的乘积，如方程 (3) 所示。

$$\eta_{total} = \eta_{match} \eta_{rad} \quad (3)$$

$$\eta_{match} = 1 - |\Gamma|^2 = 1 - RL \quad (4)$$

η_{match} 可由 $|\Gamma|^2$ 计算得出。 $|\Gamma|^2$ 代表天线端口处反射系数 (Γ) 的功率。 $|\Gamma|^2$ 也称为天线的回波损耗 (RL)。 η_{rad} 由材料的损耗决定。值得关注的一点是，应尽可能选择低损耗的材料。在材料属性数据表中，电导率和损耗正切是测量材料损耗属性的参数。

图4显示了先前示例中的蓝牙插槽天线的效率。该插槽天线制作于一个低损耗的金属平板上，周围没有任何介电材料，因而其辐射效率 (图4中的红色曲线) 很高——在目标频段上辐射效率超过99%。在这一频段上，该天线的总效率 (绿色曲线) 在96%和97%之间。总效率和辐射效率之间的差异是阻抗匹配效率。根据图5所示，阻抗匹配良好 (低RL)，因此阻抗匹配效率也很高。

指导方针 3：确保天线的带宽比目标频段更宽

天线带宽通常是指回波损耗低于某一阈值的频率范围，如 $RL < -10\text{dB}$ ，表明最大 10% 的功率被反射，最小 90% 的功率被传送到天线进行发射。因此，在 $RL < -10\text{dB}$ 的带宽内， η_{match} 至少为 90%。

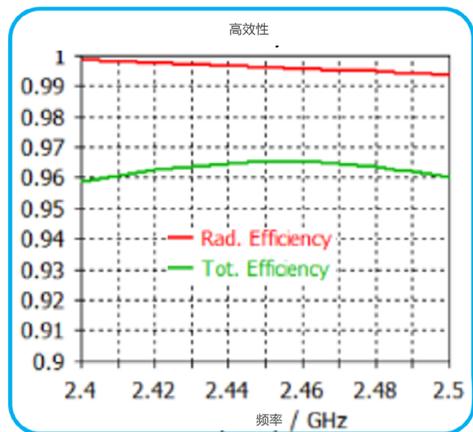


图 4：蓝牙插槽天线的效率

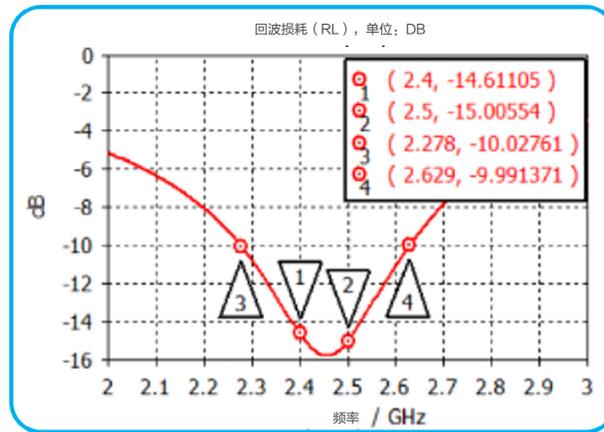


图 5：蓝牙插槽天线的回波损耗

由于天线的带宽由其回波损耗性能定义，图 5 显示了蓝牙插槽天线的 $RL < -10\text{dB}$ 带宽为 351MHz，频段范围为 2.278GHz 至 2.629GHz，比蓝牙频段 2.4GHz 至 2.4835GHz 更宽。

在为一个设备选择天线时，重要的是验证天线的带宽是否比目标频段更宽。通常情况下，当天线被集成到设备中时，天线周围的结构（如塑料罩、接地板尺寸、邻近的大型 SMT 元件等）有助于改变天线的阻抗，并使天线的中心频率发生偏移，不同于集成之前的天线频率。如果天线的带宽宽于目标频段，则天线对这种偏移的容忍度会更高，且回波损耗可能仍然满足目标频段的性能要求。

然而，如果天线的带宽太宽，则天线可能会接收到带外发射和干扰，特别是当不同收发器的多个天线被集成在同一设备中时。因此，每个天线所需的带宽取决于设备的设置和应用。

指导方针 4：减少天线之间的相互耦合所造成的功率损失

当不同收发器的多个天线集成在同一个设备中时，除了要注意天线之间会互相拾取带外干扰，我们还需要关注由于天线间的相互耦合，从一个天线到另一个天线负载的功率损耗。相互耦合所造成的功率损耗会大大降低天线的功率效率。

当邻近的两个天线在同一频段工作时，就会发生相互耦合，即一个天线发射的部分功率被另一个天线接收，导致这部分功率没有被辐射出去。因此，相互耦合是以两个天线之间的传输系数来衡量的。相互耦合所造成的功率损失会降低天线的总效率。

图6中的示例展示了相互耦合如何改变天线总效率。在第一行中，两个插槽天线以正交方式部署在接地板的相邻边缘上。在这些天线的目标蓝牙频段内，两个天线之间的传输系数保持在-20dB以下。在这一频段内，天线总效率在94%以上，接近于图4中单槽天线的效率。这表明，这两个正交天线之间的相互耦合很低，在这种情况下因相互耦合而损失的功率很小。（注意：这两个正交插槽天线是相同的，因此其效率也相同。所以，图6中只绘制了一个天线的效率）。

而在第二行，当相同的插槽天线平行放置在接地板的另一侧时，传输系数增加到-10dB以上，总效率下降到82%——这是由于平行的插槽天线之间产生了较强的相互耦合，损失了超过10%的功率。

必须注意的是，应尽可能减少天线之间的相互耦合。这可以通过一些常用的方法来实现，包括增加天线之间的距离，以正交方式部署天线，以及使用不同极化的天线。减少相互耦合的方法众多，在此不再赘述。

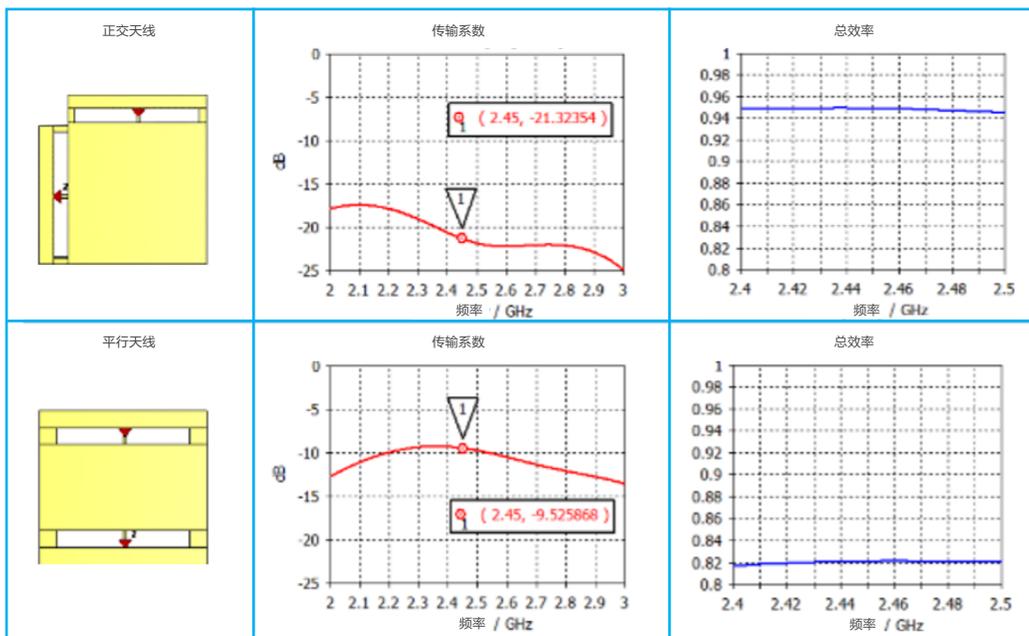


图 6：相互耦合造成功率损失，降低了天线效率

指导方针 5：天线类型和天线部署位置的选择

我们可以依据天线的部署位置（即安装在设备的外壳内，还是外壳外）将天线粗略地分为内部天线和外部天线。

外部天线：外部天线包含两种类型。第一种是终端安装天线：通过一个连接器直接连接到设备的外壳上，如图7所示的两个示例。第二种是远程天线：部署在一个远端地点，然后采用射频电缆连接到设备上，如图8所示。

有些终端安装天线是单极天线（图7（a）），仅作为辐射结构的一部分。辐射结构的另一部分是单极天线所贴附的PCB接地板或设备的金属外壳。因此，单极天线的射频性能会受到PCB接地板或金属外壳的尺寸和形状的影响。

还有一些终端安装天线是偶极天线（图7（b））。它们具有完整的天线辐射结构，所以射频性能不依赖设备的金属外壳或PCB接地板。

远程天线（图8）可以灵活地安装在无线信号更强（相比设备所在地）的地方，如车顶或建筑物外。然而，射频电缆的功率损失总是难以避免。因此，很重要的一点是，应谨慎选择电缆的类型和长度，以尽量减少电缆的功率损失。



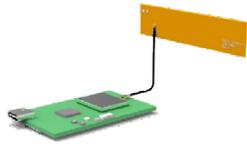
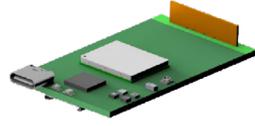
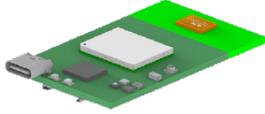
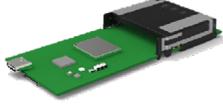
图 7：终端安装天线



图 8：远程天线

内部天线：工业设计的趋势是关注用户体验，这通常要求实现天线的隐形化，并将其集成在设备的外壳内。与外部天线相比，内部天线可能存在某些性能缺陷：

1. 在设备内部，可供部署天线的空间往往有限，这常常会对天线的效率和带宽造成不利影响。
2. 相比外部天线，由于内部天线更靠近设备中的射频损耗部件，如 LCD 显示屏、电池、SMT 元件、损耗塑料等，因此内部天线的辐射效率往往较低。
3. 天线和设备内部的其他金属结构之间可以激发非辐射的有源近场。这也会大大降低天线的辐射效率。
4. 内部天线离放大器、微控制器、混频器等元件更近，而这些元件可能在电路板上产生噪声。因此，内部天线比外部天线更容易接收到射频噪声。
5. 鉴于内部天线存在这些缺陷，必须确保工业设计人员与天线设计人员在早期阶段的沟通，以确保满足天线规程，实现高性能产品。
6. 本表列出了几种类型的内部天线及其利弊对比。

天线类型	配置	利弊	
		优势	挑战
1 FPC抽头天线		<ul style="list-style-type: none"> • 天线被安装在设备的塑料外壳中 • 接地板独立 • 设备的无线电板尺寸可以根据需要调小 	<ul style="list-style-type: none"> • 天线性能受到天线安装和电缆走线的影响
2 PCB插片安装天线		<ul style="list-style-type: none"> • 与SMT天线相比，可以节省一部分电路板空间 • 与SMT天线相比，辐射性能更好 	<ul style="list-style-type: none"> • 天线性能取决于接地板尺寸 • 通常使用手工焊接
3 SMT天线		<ul style="list-style-type: none"> • 可以采用回流焊接 	<ul style="list-style-type: none"> • 天线性能取决于接地板尺寸 • 与插片安装天线相比，占用的电路板空间更多
4 定制天线		<ul style="list-style-type: none"> • 定制设计，以优化射频性能 • 有可能利用三维空间，例如LDS天线 	<ul style="list-style-type: none"> • 天线性能取决于接地板尺寸

指导方针 6：接地板的尺寸至关重要

本质上，PCB 接地板通常是天线的一部分，尤其是当使用单极天线或单极天线的变体时，如倒F型天线（IFA）和平面 IFA (PIFA)。这是因为单极天线作为辐射元件的一半，PCB 接地板是另一半。当需要高天线效率（如>50%）时，接地板的长度需要至少达到目标频率的四分之一波长。无论对于外部天线还是内部的单极、IFA 和 PIFA 天线，情况都是如此。

然而，由于设备研发的趋势要求 PCB 接地板越来越小，因此我们不得不牺牲一部分天线效率。根据图 10 所示，在 1GHz 以下的频段，当接地板长度从 120mm 减少到 80mm 时，天线效率下降了 20% 以上。

指导方针 7：注意同轴电缆的损耗、电缆辐射和电缆布设

射频同轴电缆具备灵活性，允许将天线部署在电路板外或偏远的地点，已获得更强的信号，并降低电路板的射频噪声水平。然而，所有电缆都存在损耗。因此，重要的是，如果条件允许，特别是在高频应用中，应尽量减少电缆长度并使用低损耗电缆。图11中的两个图分别比较了一些常用的同轴电缆在相应频率上的电缆损耗。

当天线不平衡，且未使用平衡器或射频扼流圈时，会有电流在电缆屏蔽层的外表面流动。这种电流就成为了辐射源。这种辐射是一种无用发射，会导致EMC问题。它还会导致天线射频性能的变化，包括天线频带中的阻抗、带宽、辐射方向图、总效率和增益。

如果未在天线端口使用平衡器结构，那么可以采取两种常见方法来减少电缆上的无用电流，并尽量降低其对天线性能的影响。

第一种方法是在天线端口附近的电缆上放置铁氧体磁珠。铁氧体磁珠可以大大抑制电缆上的无用电流。

第二种方法是将电缆的屏蔽层接地到PCB或附近的金属结构上。图9显示了一个用于将电缆固定在PCB上的SMT金属夹，它通过提供直接接触来对屏蔽层进行接地。

电缆的布设也会影响天线性能。因此要注意如何安排从天线端口引出的电缆，如何在设备内部布线，以及在将电缆连接到PCB之前，如何布设PCB上的电缆。最后，对于同系列设备，电缆必须重复布设。



图9：电缆在PCB上的接地

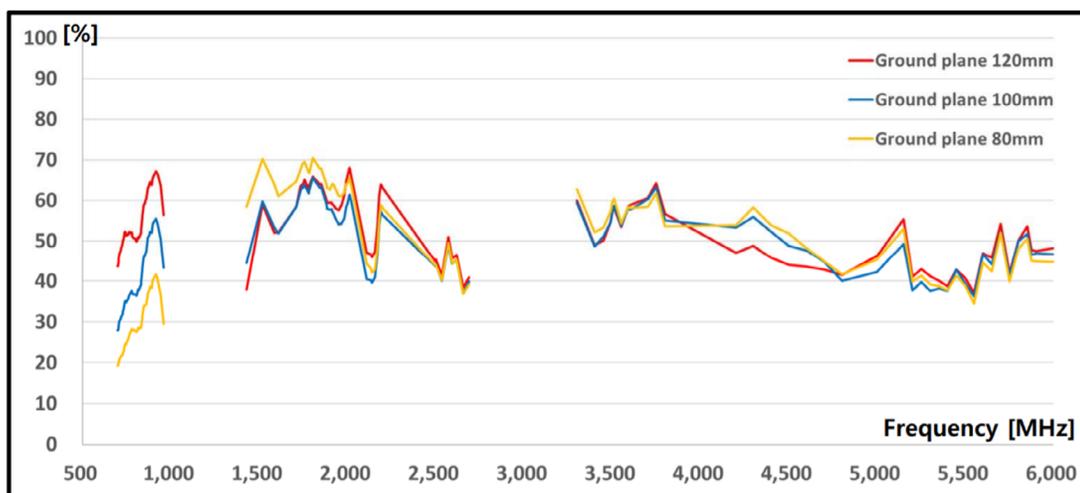


图 10：接地板尺寸对天线效率的影响

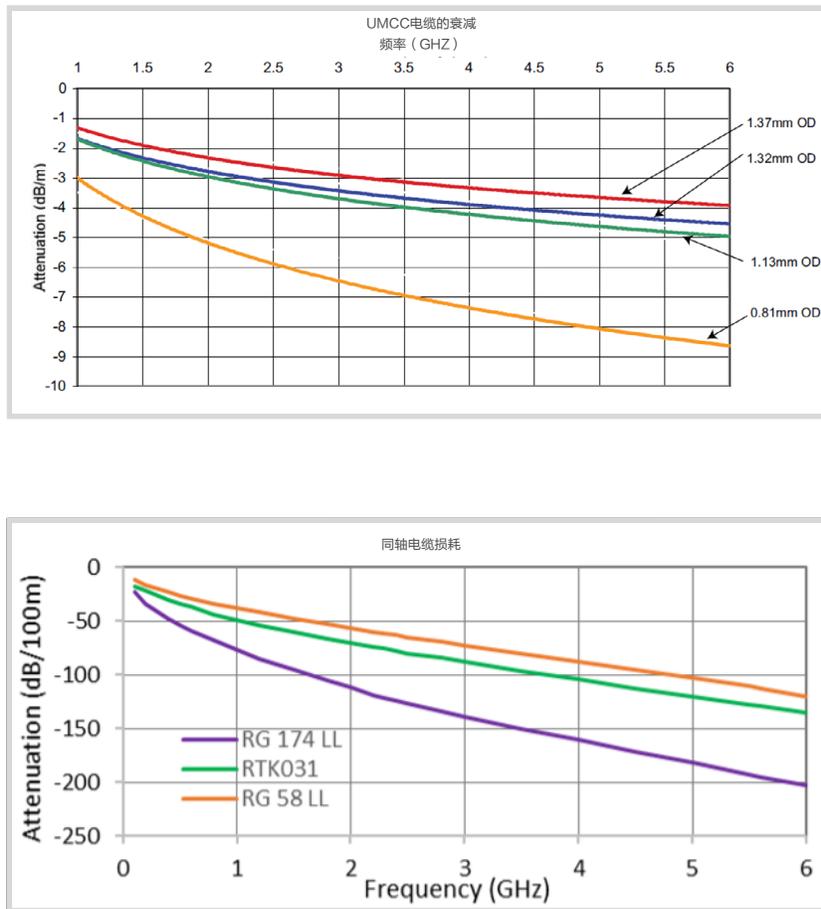
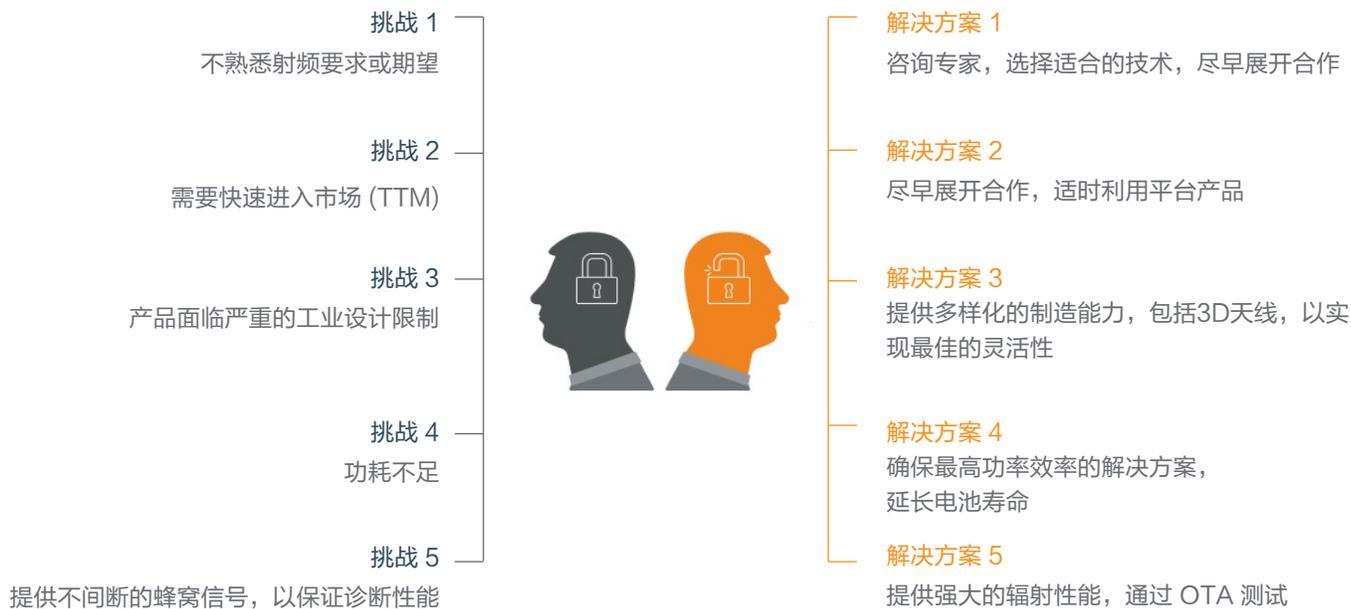


图 11：不同频率的电缆损耗

TE 专业技术如何助力天线性能的优化，以追求无线物联网设备的更高功率效率

TE 具备数十年的天线产品开发与制造经验，提供了丰富的天线产品，加速了客户在产品制造上的成功。在寻找合适的天线时，客户通常面临着共同的挑战——他们要求天线既能实现最佳的无线通信链路，又能最大限度地降低设备功耗。作为一家射频技术合作伙伴，TE 针对每项挑战提供简化的解决方案，以满足客户的需求。

天线挑战与解决方案



将天线解决方案的设计提前到产品规划的早期阶段
利用天线供应商的丰富经验提供优化的天线性能

te.com

TE Connectivity、TE Connectivity (标识) 以及 Every Connection Counts 均为商标。本文件中的所有其它标识、产品和/或公司名称可能是其各自所有者的商标。

本白皮书中的信息，包括仅为说明产品目的而使用的图纸、插图和图表，据信为可靠信息。但是，TE Connectivity 不对这些信息的准确性或完整性做出任何保证，并且不对这些信息的使用承担任何责任。TE Connectivity 的义务仅在该产品的 TE Connectivity 的标准销售条款和条件中进行规定，并且在任何情况下，TE Connectivity 均不对产品销售、转售、使用或误用造成的偶然的、间接性的或结果性的损失承担赔偿责任。TE Connectivity 产品的使用者应自行评估确定每种产品是否适用于特定用途。

©2022 TE Connectivity. 版权所有

03/22 初版