毫米波天线的优势

Antennas, the mmWave Advantage

作者：Christer Stoij, Sivers IMA AB 公司

回程网络（backhaul networks）的运营商在天线的安装问题上遇到了越来越多的问题。在比较拥挤的地区，获得一个固定的安装位置越来越不容易，房屋的拥有着往往犹豫不决是否同意在其屋顶或者其他什么地方安装天线。同时，基于美观的原因，天线往往被伪装成和环境匹配的形状，例如伪装成烟囱、墙或者其他什么东西。进一步来讲，从实用的角度讲，减少天线的风阻和重量是有益的，尤其是在安装过程中。图 1 对比了标准的抛物面天线和毫米波天线。

大小

天线的大小经常是和波长或者是频率相关的。工作在较高频率上的天线可以做成较小的尺寸，但这不能不加限制小下去，因为还要保证天线的性能。天线的大小主要取决于两个方面。一个是辐射电阻和天线馈电阻抗和另一个是辐射模式。第一个问题，关于辐射电阻和小型天线馈电阻抗问题已经由电路和天线工程师解决，并已经在小型的手持设备中使用，效果良好。

第二个限制是天线的辐射模式，这个问题不好通过补偿方式解决，因为这涉及到了一个基本的物理规律问题。为了通过天线把电信号的能量辐射出去，天线要有一定的形状和大小。为了对这个问题有一个直接的认识，我们考虑一个各向同性辐射天线。一个点辐射源可以作为理论分析用，它会向空间各个方向进行辐射，这就是各向同性辐射天线。

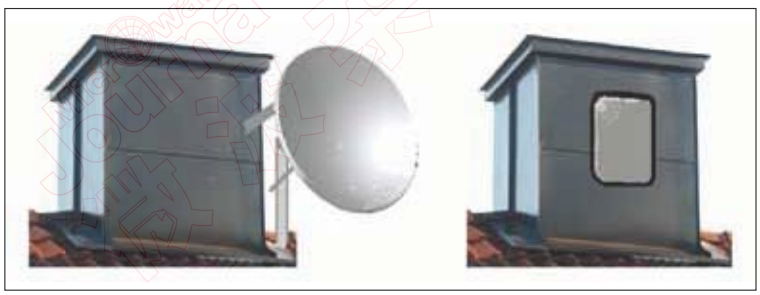


图 1. 点到点无线链路中抛物面天线和毫米波平面阵列天线。

当然，即使在离天线较远的地方存在一个零电位面或者导体，这种辐射模式就会受到干扰，它的辐射不会在各个方向相同。然而，作为分析工具各向同性辐射源是非常有用的，大多数天线结构可以看做是各向同性源的一个结合体。

方向性

对于一个天线来讲，有几个参数需要考虑。本文中考虑这样一种天线，它有和波长相匹配的大小，对于辐射效率和阻抗的匹配不是太关心。发射器通过天线发射的能量被朝向一个方向辐射。

现在我们考虑天线的增益，它指的是天线把能量朝向一个方向集中辐射的能力。图 2 所示给出了各向同性天线和笔形波束定向天线的方向图。

各向同性天线把能量向各个方向辐射，但是其他的天线则把能量向特定的方向辐射。对于点对点的链路来讲，我们首选的是那种能够把能量朝向一个较小的锥形方向辐射的天线。其他的天线也是有用的，比如在广播中，环形的辐射天线会把能量向周围辐射。另一个例子是雷达的天线，水平方向较波束窄，而方位向波束较宽。

对于一个有着空间能量密度的给定天线

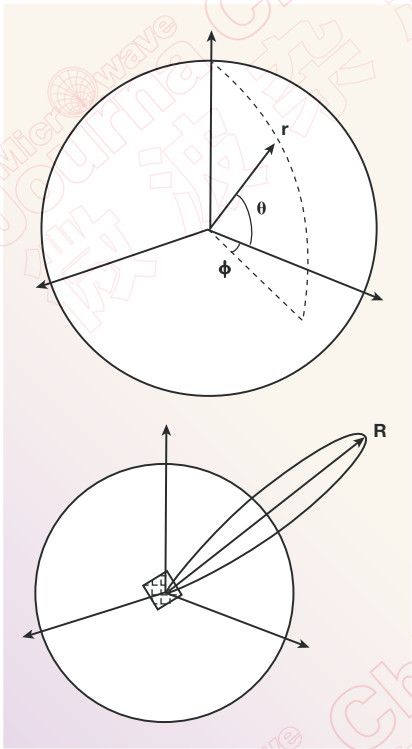


图 2. 球面坐标中各向同性天线和笔形波束天线。

来说，坡印廷向量 S_r 只在远场有径向分量。如图 3 所示 S_r [W/m^2] 是 θ, ϕ 和 r 的函数。

从源头辐射的能量总和为

$$P_{rad} = \iint \mathbf{S}_r(\theta,\phi) r^2 \sin(\theta) \partial\theta \partial\phi \quad (1)$$

对于各向同性的天线来讲，能量密度 S_i 等同于将整个能量等分在一个球面上，因此有

$$S_i = \frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \quad (2)$$

一般对于一个独立的空间来讲，S_r 是一个 S_m 的最大值，是球面坐标下的 F（θ, ϕ）函数。

F（θ, ϕ）是一个二元函数，表征了天线的模式，可以从几个方面进行理解。最常见的是天线模式是 θ 和 ϕ 平面的函数，或者是 E 或者 H 平面的函数，如图 4 所示。需要注意的是，对于各向同性的天线来讲，F(θ, ϕ)=1，其最大值 $S_m=S_i$，在整个球面上都是一样的，如图 4 在极坐标中所示。

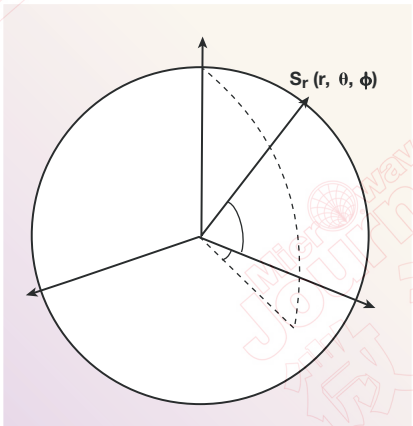


图 3. 坡印廷向量的说明。

方向性的定义是指辐射最大值 S_r 与平均功率值的比，或者

$$D = \frac{S_m}{S_i} = \frac{4\pi}{\iint F(\theta,\phi)\sin\theta\,\partial\theta\,\partial\phi} \quad (3)$$

通俗地讲，方向增益（D）就是天线的最大辐射功率密度与平均功率密度的比值。平均的功率密度计算可以通过在以半径为 R 的球上进行积分得到，或者简单的来讲通过计算各向同性天线的等效功率密度 $S_i=P_{rad}/4\pi R^2$。

这里使用 P_{rad} 表示天线实际辐射出去的能量，用了一个后缀 rad 来表示。这与输入天线的功率一般来讲是不同的(会更高一些)。就这一点而言，我们可以方便的定义天线的增益 G_a。任何电子系统都会有损耗，在多数的情况下，即使很小也会有欧姆损耗和反射损耗（不匹配）。如果 P_{rad} 是所有通过天线在各个方向上辐射出去的能量，则天线的效率可以表示如下 $\eta=P_{rad}/P_{in}$。天线增益定义为 $G_a=\eta D$.。在多数情况下，天线的增益和方向增益是相同的。从系统的角度看，天线增益是一个比较关心的量，因为它可以直接用于计算链路的增益。

另一个有用的概念是波束宽度。这里暂时的，把我们讨论限定在笔形波束天线上，它的波束沿着主轴对称的，如图 2 所示。

如果我们把天线的方向角 Ω_A 定义为一个虚拟的角度，通过这个角度所有的能量都通过它辐射出去。我们会发现 $\Omega_A=4\pi/D$,，对于角度很小的情况下 $\Omega_A \cong \varphi 1 \bullet \theta 1$，见图 5。这里有一个近似又方便使用的求波束宽度的公式，适用于 E 或者 H 平面

$$\text{Beamwidth} \cong \sqrt{\frac{4\pi}{D}} \text{ radians}$$

这个近似公式对于小角度的点对点传输天线是很有效的。比如，对于一个 36DB 增益的天线，它的波束宽度可以近似的计算如下

$$\sqrt{\frac{4\pi}{10^{36/10}}} \cong 0.056 \text{ radians or } 3.2°$$

与信号的时频分布类似，天线辐射的能量可以看做是信号的空间分布。天线的方向图对应于信号能量的空间物理分布，相当于时频分析中信号在频率平面分布。和短脉冲会在频域上形成很宽的频谱一样，尺寸小的天线会造成天线辐射能量的扩散（大的波束），内在的数学关系以及主瓣和旁瓣的计算也和信号频率分布很类似。

接收信号

到目前为止，我们讨论的都是天线最为辐射源发射信号。如果我们不能把发射出去的信号接收回来将是相当的遗憾。要接收信号，有两个概念需要引入：有效天线面积和互易。

天线的有效面积是指天线可用于有效接收辐射能量的面积。数学表示如下：

$$P_r = A_e S_r \quad (4)$$

这里 P_r 表示是在天线终端接收到的信号能量，A_e 表示天线的有效面积。

有前面可知，发射天线发出的能量密度是

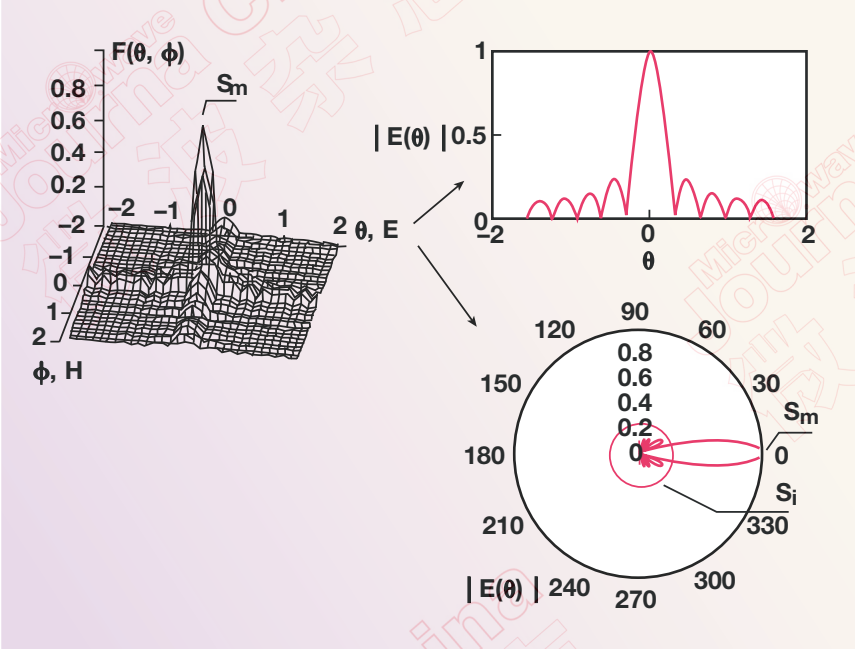


图 4. 采用二维等高线图，表示天线图 E 和 H 场分量及 E- 场在直角坐标于极坐标的投影。幅度上都对最大值做了归一化。

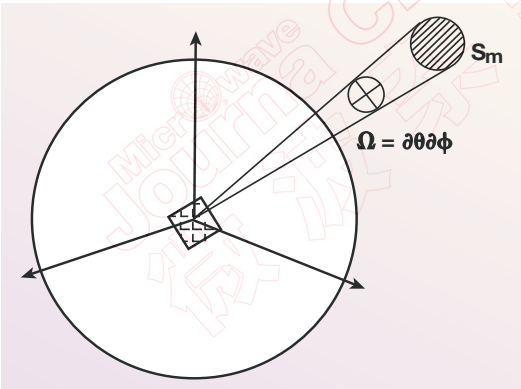


图 5. 等效锥形天线图，用以表示笔形波束天线。

$$S_r = \frac{P_{tr}G_{tr}}{4\pi R^2}[W/m2]\text{or,}$$

$$S_r = \frac{P_{tr}\eta D}{4\pi R^2} = \frac{P_{tr}G_{tr}}{4\pi R^2} \quad (5)$$

这里 P_{tr} 是发射天线的能量，G_{tr} 是发射天线的增益。

天线接收到的能量可以如下计算

$$P_r = A_e\frac{P_{tr}G_{tr}}{4\pi R^2} \quad (6)$$

很明显，接收到的总能量正比于接收天线的有效面积。这个公式与天线的频率或者波长的无关。

这就能够使我们可以更好的理解天线的有效面积。无论何种系统，天线接收到的能量将影响我们整个系统。天线的边缘在接收能量时效果是不一样的，这就是为什么天线的有效面积和其物理面积有所不同。

这种限制会产生不确定的效果。一个金属丝天线、一个偶极子或者八木天线它们的有效面积要比实际面积大。而抛物面天线相反，它的有效面积要小于实际天线的物理面积。

下面说一下互易的概念。发射天线在发射信号时采用某种模式，在接收的时候也会是这种模式。如果我们有一个增益是 G=10dBi 的天线，那么采用这个天线发射信号时我们会在发射的主瓣方向获得一个 10dB 的增益（比较各向同性天线而言），同样采用该天线接收时，接收到的信号较采用各向同性天线而言也会有一个相同的增益。

现在考虑怎样计算天线的增益？我们从麦克斯韦方程出发，就会理解为什么会在一个金属线、一块特性定形状金属板和印制电路板天线上投入不同的花费。当然计算机和软件会帮做我们，但是理解理论是很有必要的。关于完整的天线设计理论已经和我们这篇文章的主题不太相关，但是一些基本的方程能够帮助我们理解天线，尤其是天线的有效面积 A_e 和增益的关系。

$$G_a = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (7)$$

如果你知道了天线的增益或者有效面积，你就可以计算另一个量。对于有些结构的天线，它的有效面积和其物理结构尺寸是很近似的。上面的方程中的 G_e 和 A_e，我们假设是在理想的状态下，也就是天线位于自由空间，并且处在远场中。如果天线的这种假设条件改变的话，结果就会改变。

一些常用天线的方向增益在表 1 中，通过表中的数据我们可以计算天线的有效面积。注意，我们这里忽略了损耗，因此 D 用 G_a 替代。面积 A_p 表示的是天线的物理面积。

Friis理论

对于无线电工程师来讲，有一个非常有用的方程，它结合了发射和接收两个部分，把信号的能量密度、有效接收面积等参数统一考虑，计算整个链路的损耗 P_r/P_{tr}。

$$P_r = A_eS_r$$

$$S_r = \frac{P_{tr}G_{tr}}{(4\pi R)^2} \quad (8)$$

$$A_e = \frac{G_r\lambda^2}{4\pi} \quad (9)$$

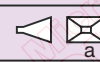
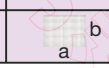
G_r 是接收天线的增益。

综合上面三个方程，我们得到下面的 Friis 方程。

$$\frac{P_r}{P_{tr}} = \frac{G_rG_{tr}\lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (10)$$

表 1. 一些天线的结构尺寸与有效面积和方向增益的关系

TABLE I
SOME ANTENNA STRUCTURES, DIRECTIVE GAIN AND EFFECTIVE AREA

Antenna	Dimensions	Directive Gain	Effective Area (A_e) Compared to Physical Area (A_p)
Half Wave Dipole		$D \approx 1.6$	$A_e \approx 0.13/\lambda^2$
Horn Antenna		$D \approx \frac{10ab}{\lambda^2}$	$D \approx 0.8\ A_p$
Parabolic Reflector		$D = \frac{7\pi r^2}{\lambda^2}$	$A_e \approx 0.6A_p$
Rectangular Array		$D = \frac{4\pi ab}{\lambda^2}$	$A_e = A_p$

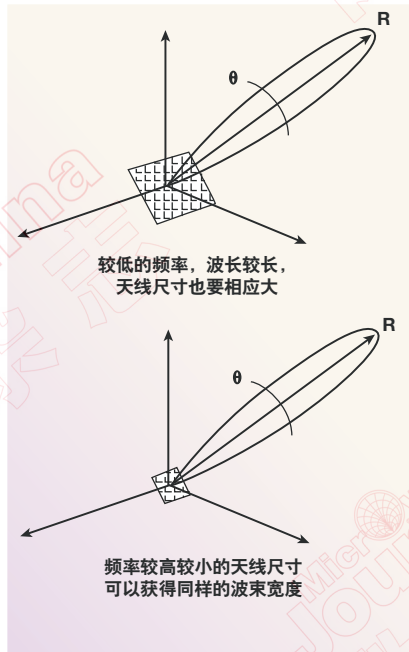


图 6. 天线大小与不同波长之间的关系。

Friis 方程在计算链路的预算方面很有用。上述方程有时候会被理解为空间衰减随着波长的变小而变大。这种理解是不对的，究其原因有可能是因为方程中包含了天线的有效面积。Friis 方程认为，发射天线的发出的信号能量密度是不变的 $P_r=A_e \cdot S_m$，，接收到的能量有变化，因为天线的有效面积 A_e 正比于 λ^2。

由于某原因，在天线增益是固定的情况下，天线的尺寸将依赖于波长。如果要求天线的增益是固定的，则其有效面积要和工作波长相关。

$$A_e = \frac{G_a \lambda^2}{4\pi} \tag{11}$$

随着工作频率的增加，要保证恒定的天线增益，天线的有效面积 A_e 要减少，见图 6。要保证天线尽量小，提高其工作频率是有效的。

Friis 方程中，天线增益是固定的，要保证发射信号的能量和接收到的能量是一致的，这就要调整天线的大小。为了方便，我们以相同的发射和接收天线为例，考虑一个对称的链路。结合天线有效面积和增益以及 Friis 方程，可以得到

$$\frac{P_r}{P_{tr}} = \frac{A_e 4\pi A_e 4\pi\lambda^2}{\lambda^2\lambda^2(4\pi R)^2} \Rightarrow$$

$$A_e = \sqrt{\frac{P_r}{P_{tr}}}\lambda \tag{12}$$

我们希望在不同的工作频率下 $\frac{P_r}{P_{tr}}$ 是一个常数，A_e 和工作波长成正比例。这样，天线的面积可以根据工作波长的提高而变小，但是其在链路中的增益却不变。当然还要考虑电磁波在植物和大气中的吸收。在有些频段例如 24~60GHz，大气的吸收必须考虑进去。

抛物面天线

抛物面天线在无线电中是最常用的。对于一个直径为 d 的抛物面天线，其孔径效率可以达到 60%，有效面积可以这样计算。

$$A_e = kd^2 \tag{13}$$

K 是一个和物理尺寸及波长相关

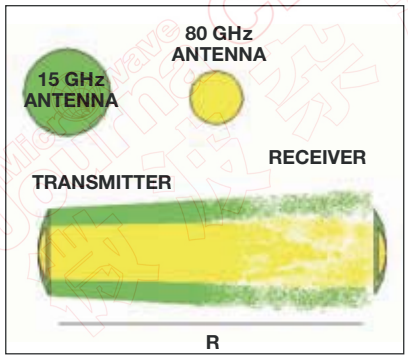


图 7. 相同的链路预算下 15GHz 和 80GHz 天线的大小对比。

的因子，取 0.4 是一个较好的近似。

现在我们考虑一个工作在不同频率的系统，让它们的天线大小（直径 d）和波长的平方根成正比 $d \propto \sqrt{\lambda}$，则天线的有效面积会和波长成正比。这样接收到的信号能量和发射的信号能量的比例始终是一个定值，和采用的工作频率无关。

例如，考虑在 15GHz 和 80GHz 工作的两个无线链路，它们的距离衰减是一样的。要获得整个发射端到接收端的衰减，还要考虑大气的衰减和其他衰减，或者对其进行补偿。

假设 15GHz 的天线链路的增益是 36DB，收发端天线一样。根据方程

$$d = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{k4\pi}} \qquad (14)$$

计算出天线的直径

$d_{15} = 0.56$ m

如果是工作在 80GHz 的系统，天线的尺寸和波长的平方根成正比，天线直径是

$$d_{80} = d_{15}\sqrt{\frac{\lambda_{80}}{\lambda_{15}}}$$

d80 = 0.24 m

天线尺寸还不到 15GHz 的一半，并且有着相同的链路增益。同样要注意天线的增益和波长的倒数成正比。

$$G_{60} = \frac{80\ \text{GHz}}{15\ \text{GHz}} G_{15}$$

因而天线在 80GHz 的的增益是 43.3dBi。

然而大气衰减需要考虑，80GHz 的频率比 15GHz 的大概要多衰减 2dB/km。如果发射天线和接收天线相距 3km，则要达到 46.3dBi 的增益，发射天线和接收天线要各增加 3dB 的增益。

天线直径将会变为

$d_{80} = 0.34$ m

采用近似的公式，比较一下 80GHz 和 15GHz 系统天线的波束宽度（见图 7），

$bw_{15GHz} = 3.2°$

$bw_{80GHz} = 1°$

结论

本文简要介绍了一些关于天线的一些基本理论，同时这些也是值得进一步分析的。Friis 方程中，一个经常的误区是认为辐射损耗随着频率的增加而增加。而真正的原因是空间的衰减，$\lambda^2/(4\pi R^2)$。

借助于几个简单的公式，我们可以知道，毫米波天线可以在不牺牲链路性能的情况下，显著的缩小天线的体积。如果再考虑到毫米波段具有的大带宽和频率许可上的低成本等因素，它将在定点无线通信上展现出很强的吸引力。■