

基于金属透镜天线的 wifi 中继器设计

李兆诚 易继军 张家宁 邓婉琪

(湖南省长沙市长沙理工大学汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 透镜天线是一种微波天线, 它使用相互平行的介电材料片或金属板, 构成平行板波导结构, 来弯曲和聚焦无线电波, 就像光学透镜对光的作用一样。初级馈源天线(贴片天线或喇叭天线)辐射的球面波通过透镜天线后变换为平面波, 微波信号得到了定向和增强。在透镜天线仿真分析的基础上, 验证了透镜结构的合理性。采用锡纸和硬纸板制作了透镜天线实物模型, 测试了 WIFI 信号的辐射强度, 研究表明透镜天线对 WIFI 信号有一定的定向和增强的作用。

关键词: 透镜天线, 无源中继器, 电磁仿真, WIFI 信号

透镜可以由塑料等介电材料制成, 也可以由金属板或波导的复合结构制成。金属板透镜天线相比抛物面反射天线, 对制作的要求更低, 允许一些细小的制造偏差, 因此更容易实现物理模型的制造和测试。无线电爱好者经常使用金属板透镜天线扩大雷达枪的射程。这里研究其在 WIFI 信号定向增强中的应用。类似于光学透镜的汇聚作用, 金属透镜天线将球面波前或者柱面波前调节为平面波前, 这样可以有效地提高馈源天线的增益。基于透镜天线的原理, 将其用于 WIFI 信号定向增强。

金属板透镜天线工作原理与光学透镜相同: 微波在透镜材料内部的速度(相速度)与空气中的速度不同, 因此, 不同的透镜厚度会延迟通过它的微波量, 从而改变其形状。透镜天线可分为两种类型: 延迟透镜天线, 其中微波在透镜材料中的传播比在空中传播的慢; 以及快速透镜天线, 其中微波在透镜材料中的传播快。与光学透镜一样, 几何光学用于设计透镜天线, 普通光学中使用的不同形状的透镜在微波透镜中具有类似物。小型馈电天线发射的微波都会被较大的光学表面整形为所需的最终波束形状。

一、电磁波透镜透射原理

一个简单的平行板波导阵列如图 1 所示。如果导电板之间的间距 a 略大于入射波长的一半, 窄带 TEM 入射到该结构的波将以 TE1 模式传播。箭头表示电场矢量 (E) 的方向和传播 (k) 的方向。为了确保高阶模式被切断, 板间距 “ a ” 应该在 0.6–0.8 倍波长的数量级。为确保 TE1 模式的传播, 图 1 中用 “ w ” 表示的板的宽度必须至少为 $1.5\lambda_g$, 其中 λ_g 是波导波长。

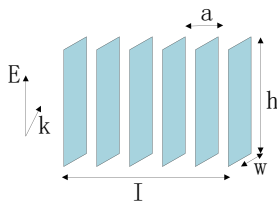


图 1 平行板波导阵列

在平行板波导阵列的基础上, 通过将半径为 R_1 的球体移动到阵列的正前方, 与板轴向对齐, 并从阵列体积中减去球体体积, 用半径为 R_2 的球体在背面重复相同的操作。通过上面的方法修形, 得到双凹金属板透镜。由于金属板透镜的折射率小于 1, 因此双凹金属板透镜其聚焦特性在术语上与折射率大于 1 的双凸介电透镜是等效的。双凹金属板透镜在中心板的中间最薄。在设计这些透镜时, 必须确保在最薄处至少为 $1.5\lambda_g$, 以确保波在 TE1 模式下通过透镜的这一部分传播。金属透镜天线其相速度大于光速, 电磁场在天线结构中被加速, 金属透镜越靠近边缘越厚, 受到的加速路径就更长, 使得球面波前被调节为平面波前。金属透镜天线一般是由等间隔金属栅网或者金属片组成, 并且只有当电场平行于金属栅网或者金属片时, 透镜结构才起作用。

金属透镜天线的基本结构如图 2 所示, 由初级馈源天线和金

属透镜组成。

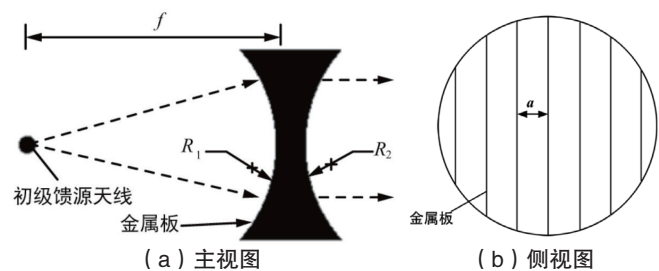


图 2 金属透镜天线基本结构

采用几何光学原理将一组平行间隔的金属板设计为金属凹透镜, 实现对电磁波的汇聚, 获得高增益辐射特性。金属透镜由多个等间隔的平行金属板组成, 其间距为 a 。当平行金属板间距 $a \geq \lambda_0/2$ (λ_0 是自由空间中的波长) 时, 电磁波在金属板之间的传输可以视为在间距为 a 的平行金属板波导中传播。其中, 电磁波在平行金属板波导中单模传输的相速度可以表示为:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/(2a))^2}} \quad (1)$$

式中, v_0 为自由空间中的波速。通过式 (1) 可以发现, 此时电磁波的相速度比在自由空间快, 所以可以将多个等间隔平行金属板等效为折射率小于 1 的均匀材料, 其折射率为:

$$n = \frac{v_0}{v} = \sqrt{1 - (\lambda_0/(2a))^2} \quad (2)$$

由于平行金属板对电磁波的加速效应, 初级馈源天线辐射的球面波通过金属凹透镜后变换为平面波, 因聚焦汇聚作用使电磁能量更为集中, 从而使天线获得高增益特性。

透镜天线的初级馈源天线一般为喇叭天线, 文献根据喇叭天线的尺寸和远场辐射特性设计金属透镜的结构, 但喇叭天线改变时, 金属透镜的结构也需要重新设计。根据文献, 可以利用几何光学中透镜的焦距公式设计金属透镜的结构, 对喇叭天线的依赖性较小。金属透镜的折射率、曲率半径和透镜焦距等参数满足:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right) \quad (3)$$

式中, f 为透镜的焦距, R_1 和 R_2 为透镜前后两侧的曲率半径, d 为透镜的厚度。在实验和仿真试验中, 透镜的厚度很小, 可以忽略不计。因此公式可以近似表示为

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

由透镜控制方程可知, 如果透镜设计为焦距为 f 并使其轴沿喇叭天线的视轴放置, 距离喇叭相位中心一个焦距, 则从透镜射出的波束将被准直。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \quad (5)$$

式中 S_1 是喇叭天线相位中心到透镜中心的距离, S_2 是另一侧交汇点到透镜中心的距离。当 $S_1=f$ 时, $S_2=\infty$

由于波束从喇叭天线辐射时会发散, 因此透镜直径必须随焦距增加, 以拦截大部分辐射波束。因此, 即使透镜足够大, 可以拦截整个波束, 准直波束中的峰值电场也会随着焦距的增加和准直波束的直径增加而减小。

如果将透镜放置在距离 S_1 超过一个焦距的位置, 波束将聚焦到位于 S_2 处, 在焦平面处形成艾里斑。艾里斑圆盘的直径 X 被衍射限制为

$$X = 1.2 \frac{\lambda f}{d} \quad (6)$$

其中 f 是焦距, d 是透镜直径。波束沿视轴远离艾里斑传播时的发散角与波束从透镜向焦平面传播时的会聚角相同。现在, 放置第二个镜头, 焦距为 f_2 , 距离第一个镜头的焦平面为 f_2 , 保持其他一切固定。射频能量在向第二个透镜传播时将从第一个透镜的焦平面发散, 并由第二个透镜准直, 如图 3 所示。当波束从第二个透镜传播时, 波束直径与在该位置被第二透镜截获的波束的直径相同。

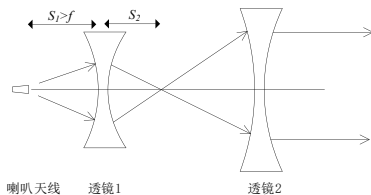


图3 放置第二个镜头来准直波束

如果将第一个透镜放置在离辐射喇叭天线稍远的位置, 则公式中的 S_1 会增加。入射到第一个透镜上的波束直径将比以前大。根据公式的焦平面位置将比以前更靠近镜头 1, 波束在向第一透镜的焦平面传播时的会聚角比以前大, 波束从焦平面向第二透镜传播时的发散角也是如此。第二个透镜将始终放置在距透镜 1 焦平面一个焦距的位置, 以便准直出射的波束。在这种情况下, 准直波束的直径更大。

这就是变焦透镜天线的概念, 即, 使用辐射喇叭天线和两个透镜, 可以准直从喇叭天线辐射的能量, 通过改变透镜 1 与喇叭天线的距离并调整第二个透镜使其距透镜 1 创建的焦平面始终是一个焦距的长度, 来改变准直波束的直径。

对于实际应用, 最小化镜头尺寸可以减轻重量。最小化透镜 1 的平移范围使天线系统的实施更容易。此外, 透镜 1 的直径必须足够大, 以拦截馈源喇叭的全半功率波束宽度。因此, 为了最小化镜头 1 的尺寸, 镜头 1 的焦距应该保持相对较小。根据镜头制造商的公式, 使用双凹透镜更容易实现更短的焦距; 但是镜头 1 的直径受焦距的限制; 即, 对于给定的焦距, 透镜的半径被限制为达到该焦距所需的透镜球面的曲率半径。对于指向性更高的喇叭天线, 必须将第一个透镜平移更长的距离以实现给定的放大范围。如果它的指向性较低, 则该透镜的直径必须非常大, 才能在给定位置拦截至少全半功率波束宽度。

二、设计仿真与分析

本文设计了工作在 5GHz 的金属透镜天线, 其结构示意图如图 4 所示。金属透镜由 13 个等间隔平行金属板组成, 板厚为 2mm, 当金属板间距 a 为 $0.7\lambda_2$ 时, 电磁波可以获得最大传输功率, 所以本文将金属板间距 a 设为 21mm, 由式 (2) 得金属透镜的折射率 n 为 0.7。将金属透镜置于喇叭天线的远场分界处, 则喇叭天线与金属透镜中心的距离 f 为 370mm。本文设计中, 金属透镜前后两侧的曲率半径 R_1 和 R_2 相等, 通过式 (3) 得 R_1 和 R_2 的值约为 220mm。

波导喇叭天线 (通常在真空中运行于非常高的功率) 是一个合适的高功率微波辐射源。如果要沿该系统的视轴测量电场, 则会在

波导中看到高次模场。这些会随着电磁能量通过喇叭传播而减少, 然后随着它远离天线传播而快速下降。辐射波束从喇叭天线的口部以半功率波束宽度向外张开, 该宽度与天线的增益成反比。从喇叭辐射的波的相位前在其半功率波束宽度上接近于球形, 并且在给定频率下以喇叭的相位中心为中心。虽然金字塔式喇叭天线的 E 平面和 H 平面中的相位中心不同, 但对于中等增益的金字塔式喇叭天线, 这种差异非常小, 并且它在变焦天线系统的容差范围内。

利用电磁仿真软件 Comsol 对设计模型进行仿真分析。图 3 (a) 和图 3 (b) 分别给出了工作频段 10GHz 下, 有无金属透镜时喇叭天线的电场分布, 观察范围为喇叭天线前方 28 个波长的区域。对比图 5 左和图 5 右可以发现, 当无金属透镜结构时, 喇叭天线辐射电磁波的波阵面为弧形, 即球面波, 辐射的电磁能量比较发散。有金属透镜结构时, 辐射电磁波的波阵面近似为平面, 传输方向垂直于天线口径面, 天线正前方区域的电场强度明显大于无金属透镜时。因此, 金属透镜对喇叭天线辐射电磁波起到了汇聚作用。

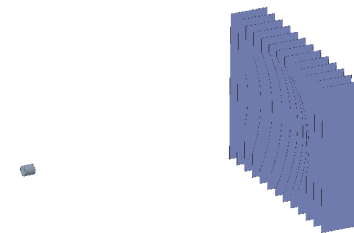


图4 透镜天线结构示意图

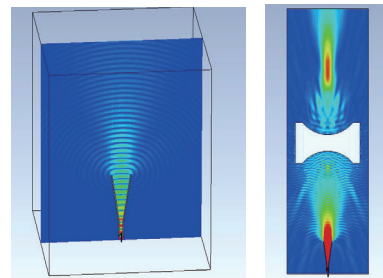


图5 透镜仿真分析结果

三、透镜天线测试结果

基于平行金属板对电磁波的加速效应, 采用几何光学原理, 设计、加工并测试金属透镜天线。加工制作时, 采用纸板作为单层板骨架, 将锡纸裁剪成设计的形状后贴在硬纸板上, 然后将多个硬纸板按照设计要求叠放, 组装成为金属透镜。在手机中装上 WIFI 信号强度检测软件, 再距离信号源 100 米处检测信号强度。当不使用中继器时, 信号强度 -72dB, 而当使用了中继器后, 信号强度增强为 -67dB。



图6 金属透镜板

四、结语

基于平行金属板对电磁波的加速效应, 采用几何光学原理, 本文设计、加工并测试了一款金属透镜天线 WIFI 中继器。仿真和测试结果表明, 本文设计的金属透镜结构可以有效地对电磁波起到汇聚作用, 从而使天线具有良好的高增益辐射性能。

参考文献:

[1] 韩轶丹. 关于 AFSS 天线罩及平面透镜天线的设计 [D]. 西安电子科技大学, 2020.