

## 非大气窗口毫米波长槽漏波波导天线的设计

赵伟 李万峰 李晓

(中国空空导弹研究院第八研究所, 河南省洛阳市, 471009)

**摘要:** 本文设计了一种非大气窗口毫米波长槽漏波波导天线, 分析了槽的长度、宽度对天线性能的影响, 并运用插值法缩减了天线的槽长, 优化了天线的性能, 设计的天线具有高增益、低副瓣、波束前向环视等优点。

**关键词:** 毫米波; 非大气窗口; 波导天线

### 1 引言

非大气窗口毫米波段指电磁波传输受氧分子和水蒸气分子吸收而衰减严重的频段, 分别在 60GHz、119GHz、183GHz 附近。此频段在卫星之间的通讯、地面近距离通信或近程雷达中, 除了具有一般毫米波的特点外, 还有优良的保密性, 极强的隐蔽性, 使敌方难以侦察, 也难以干扰<sup>[1]</sup>。

本文设计了一种非大气窗口毫米波长槽漏波波导天线。该天线在波导宽边上开有赋形的长槽, 终端接匹配负载。具有在天线横截面内, 辐射无方向性, 即 E 面方向图近似圆形; 在天线纵截面内, 定向辐射, 具有较窄的主波瓣, 即 H 面方向图中主波束与天线的轴方向成预定夹角, 波瓣宽度窄等优点。该型天线辐射效率高、方向图优良, 克服了半波长缝隙阵列天线频带窄的弱点, 能够满足空空导弹引信对天线的指标要求。

### 2 天线设计

#### 2.1 波束倾角的实现

长槽漏波波导天线的前倾角  $\theta_m$  取决于工作波长和长槽波导的截止波长之比, 即:

$$\theta_m = \arcsin \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad (1)$$

式中  $\lambda_c$  为波导天线的截止波长。根据天线设计实践, 对于矩形长槽天线, 其截止波长一般将减小到矩形波导截止波长的 93~98%, 具体与波导壁厚、槽宽、位置等因素有关。矩形波导的截止波长为波导宽边  $a$  的二倍, 根据经验, 截止波长变化系数  $\eta$  估算时可取 95%, 则对于长槽天线, 其最大指向可表示为:

$$\theta_m = \arcsin \frac{\lambda}{2a\eta} \quad (2)$$

根据前倾角指标, 要实现天线要求的波束前倾角度需要采用 BJ620 标准波导作为辐射波导。

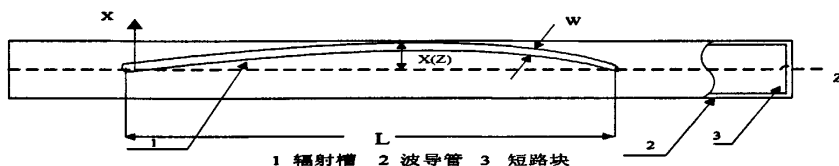


图1 长槽天线示意图

## 2.2 口径分布与功率分布的关系

波导宽边上存在缝隙, 电磁波能量通过缝隙向自由空间辐射, 因此馈电波导中沿  $Z$  轴传输的功率逐渐下降, 假定以指数规律衰减可表示为

$$P(z) = P_m \exp[-2 \int_0^z a(\zeta) d\zeta] \cdots \cdots (3)$$

其中  $a(\zeta)$  是馈电波导中场强的衰减常数。式 (3) 对  $z$  求导可得

$$\frac{dP(z)}{dz} = P(z)[-2a(z)] \cdots \cdots (4)$$

则天线的衰减常数为:

$$a(z) = -\frac{1}{2P(z)} \frac{dP(z)}{dz} \cdots \cdots (5)$$

若口径分布函数为  $A(\zeta)e^{j\beta\zeta}$ , 得到

$$a(z) = \frac{\frac{1}{2}|A(z)|^2}{\frac{1}{1-R} \int_0^L |A(\zeta)|^2 d\zeta - \int_0^z |A(\zeta)|^2 d\zeta} \cdots \cdots (6)$$

其中  $R$  为天线的效率, 式 (6) 把口径分布与漏波天线的衰减常数联系起来, 根据口径分布就可以求出天线衰减常数。

## 2.3 长槽曲线的确定

假定馈电波导中仅传输主模  $H_{10}$  波, 其场分量为:

$$H_z = H_0 \sin \frac{\pi}{a} x e^{j(\alpha x - \beta z) - \alpha z} \cdots \cdots (7)$$

$$H_x = \frac{-j\beta}{\pi/a} H_0 \cos \frac{\pi}{a} x e^{j(\alpha x - \beta z) - \alpha z} \cdots \cdots (8)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{\pi/a} H_0 \cos \frac{\pi}{a} x e^{j(\alpha x - \beta z) - \alpha z} \cdots \cdots (9)$$

传输功率为:

$$P = \frac{1}{2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} E_y H_x dx dy = \frac{k\beta\eta}{4(\pi/a)^2} ab H_0^2 e^{-2\alpha z} \cdots \cdots (10)$$

其中  $\eta = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , 为了简化问题的讨论, 把长槽看成平板传输线, 其中传输 TEM 波, 磁

场为  $H_z$ , 单位宽度辐射功率为:

$$\begin{aligned}
 P_r &= \frac{\eta}{2} \int_{x_0 - \frac{w}{2}}^{x_0 + \frac{w}{2}} |H_z|^2 dx \\
 &= \frac{\eta}{2} H_0^2 \frac{a}{\pi} \cos x_0 \sin \frac{\pi}{a} w e^{-2a}
 \end{aligned} \quad (11)$$

因此长槽辐射引起的衰减常数  $a(z)$  为

$$a(z) = P_r / 2P \dots\dots (12)$$

当槽的宽度相对于波长不宽时, 式 (12) 可简化为

$$a(z) \approx 2CW \sin^2 \frac{\pi}{a} x_0 \dots\dots (13)$$

联立求解式(6)、(13)可得到长槽的偏心位置  $x_0$ , 其不仅同槽的口径分布要求有关, 而且还同馈电波导尺寸、材料、槽宽、槽长以及工作波长和截至波长有关<sup>[2]</sup>。

### 3 设计结果

根据指标要求, 采用 BJ620 标准波导, 波导内径  $3.759 \times 1.880 \text{mm}$ , 槽长  $L$  为 15 倍波长, 天线的口径分布满足泰勒分布。应用 Ansoft HFSS 软件建模仿真得到天线的方向图如图 2 所示, 在天线纵截面内主波束前倾, 天线增益 17.89dB, 主副瓣电平差 21dB, 波瓣宽度  $6.0^\circ$ ; 在天线横截面内方向图近似圆形。

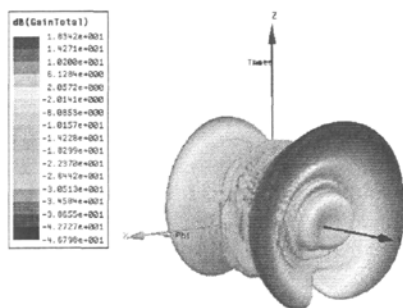


图 2 天线的立体方向图

由图 2 看出, 天线的前向副瓣过大, 容易引起引信的误启动, 因此需要优化设计, 尽量降低天线的前向副瓣电平。

### 4 天线优化

天线的口径分布符合泰勒分布, 根据泰勒分布计算的方向图性能与天线口径长度有关。同时由公式 (13) 知, 天线的衰减常数与槽宽有关, 因此通过调整槽线长度和宽度来分析天线的性能变化。

#### 4.1 槽长的影响

天线的槽长  $L$  调整为 20 倍波长, 槽宽 1.05mm, 天线 H 面方向图如图 3 所示, 增益 18.5dB, 波瓣宽度  $5.2^\circ$ , 主副瓣电平差 30dB。由与槽长 15 倍波长天线的比较得知, 增加槽的长度可增大天线增益, 降低副瓣电平, 减小波瓣宽度。

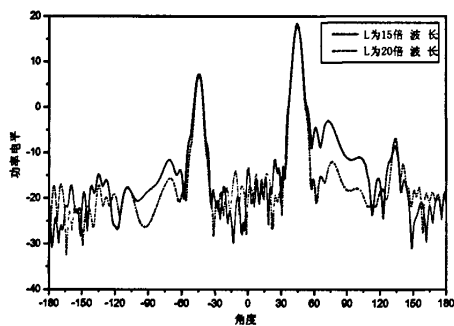


图3 两种槽长天线方向图的比较

4.2 槽宽的影响

将槽长 20 倍波长天线的槽宽增大到 1.1mm，其它参数不变。与槽宽 1.05mm 天线相比较，其前向副瓣电平降低，副瓣起伏相对平缓，波瓣宽度为 5.4°，略微增大。

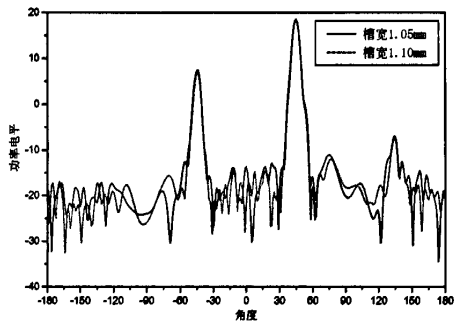


图4 两种槽宽天线方向图的比较

4.3 优化槽长

为了保证天线主副瓣电平差尽量大，同时考虑到波瓣宽度不应过窄以及结构尺寸、重量的限制，对于槽长 20 倍波长的天线进行优化。

由长槽天线的特点知，该天线应视为一种行波天线，其能量沿着槽不断向外辐射，能量传输到槽线转折点后端时已被大幅度减弱，因此运用插值法把槽线后端 10 个波长范围内的数据通过插值缩减为 5 个波长，使槽的长度减小到 15 倍波长，其它参数不变。由图 5 所示的方向图看出，天线增益 17.88dB，波瓣宽度 6.28°，主副瓣电平差 28dB。与槽长 15 倍波长的天线比较，槽长缩减后天线的增益没有变化，但主副瓣电平差增大，前向副瓣电平减小，天线性能得到优化。

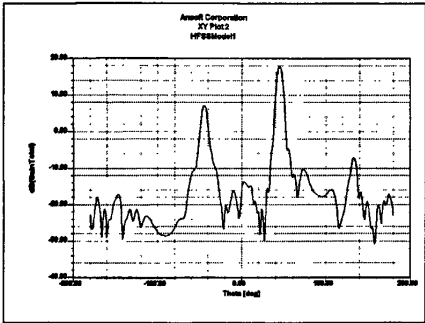


图5 缩减槽长的天线 H 面方向图

比较图 3、图 5 看出,槽的后端长度对天线前向副瓣电平的抑制作用不大,它增加了天线的辐射能量,对提高天线的增益,减小波瓣宽度有贡献,而影响前向副瓣电平因素主要取决于槽的前端长度。通过插值缩减槽长,即保证了天线的性能指标没有下降,又满足了结构、重量的要求。

## 5 工程实现

非大气窗口频段的同轴电缆馈电损耗大,功率利用率低,所以天线采用 UG385 波导接口连接收发部件,以提高馈电与天线的匹配性。同时为了更方便的进行驻波调节,馈电口开在距离波导端 20mm 处,通过调节波导左端短路块的长度来调节驻波。

由于波长较短,加工精度对天线性能的影响更加显著,为保证设计和实测的结果一致性,可对天线内表面进行了镀金处理,提高天线表面的光洁度。

## 6 结论

设计长槽漏波波导天线时为提高天线的增益,降低副瓣电平,槽线长度应大于 12 倍波长,同时为了避免波瓣宽度过窄和降低天线的重量,可对长度过长的槽线后端进行插值缩减和槽宽的辅助调节。

## 参考文献

- [1] 朱莉,娄国伟,时翔.非大气窗口毫米波引信设计研究[J].弹箭与制导学,2007,27(1):119-122.
- [2] R.S.Elliott. Design of line source antennas for narrow beamwidth and asymmetric low sidelobes. IEEE Transactions on antennas and propagations.1975,(1):100-107.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>