

# 用于遥感卫星数传的新型波导阵列组合天线

叶云裳

(空间技术研究院总体专业技术部, 北京 100086)

**摘要:** 从新的设计理念出发, 提出一种新型的波导十字阵列组合辐射天线替代了赋形反射面天线, 用于低轨遥感卫星的数传系统。文中论述了该天线的设计思路、设计过程, 并列出了天线的主要性能。最后还简述了该天线在国内卫星上的应用及我国未来低轨遥感卫星数传天线的发展趋势。

该天线已在我国多个卫星上成功应用。这种波导阵列组合天线结构紧凑、尺寸小, 具有与国外通用的赋形反射面天线基本类似的性能, 可达到星载数传天线的预定要求, 而且为星载遥感器及其他载荷留出了更大的对地安装空间。

**关键词:** 遥感卫星; 地球匹配波束; 矩形波导; 漏波辐射; 波导十字缝隙; 圆极化; 端辐射; 组合天线

中图分类号: V443.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2003)06-0555-08

## 0 引言

‘资源一号’(‘ZY-1’)卫星是一个可见光和红外并用的遥感卫星, 在上面有 CCD 相机, IR-MSS 相机和宽视场小相机。由于中国研制的对地遥感卫星为数不多, 为提高整星应用价值, 尽可能多的遥感器都安装在同一卫星对地面, 因此卫星对地面拥挤是我国对地遥感卫星的共同特点。然而国际上通用的遥感数传天线都是安装于卫星对地面的赋形反射面, 其口径不低于 600mm。‘ZY-1’卫星对地面的拥挤已无法留出空间满足赋形反射面的安装要求。再加上当时(80 年代)我国在控制复合材料形面的加工成型工艺和精度、高可靠低损耗微波元器件及开关矩阵等方面还存在一些问题和困难。基于此, 我国遥感卫星数传天线只能从发展小尺度的天线做起, 根据中国的现实条件走出适合我国特点的一条技术之路。

“ZY-1”卫星的红外多光谱(IR-MSS)数传天线采用了背射双线螺旋天线<sup>[1]</sup>。这个天线体小质轻结构紧凑便于星体安装, 缓解了卫星对地安装面拥挤的局面, 并获得了与赋形反射面类同的性能和功能。这是我国在小尺度数传天线技术上的第一个成功尝试。然而这种天线用于 X 波段受尺寸限制, 进一步提高其功率耐受能力潜力不大。由于任务需要, 随着码速率的提高、误码率的降低, 需研制一种能承受更

大功率, 覆盖范围和覆盖增益更高的新型数传天线。为保持我国数传天线体小质轻高度集成化的优点, 并考虑到国内当时的技术支持条件提出了波导十字缝隙阵组合天线方案。经过多年的研制形成的波导阵列组合天线已在后续的遥感卫星上都获得了应用。这在我国自行设计、自主研制的星载数传天线技术上又迈出了新的一步。

迄今对矩形波导缝阵的研究虽已不少, 但多局限于形成扇形波束(线阵)和铅笔波束(面阵)的单面线极化缝阵。然而利用波导缝阵实现低轨卫星地球匹配波束天线, 国内、外均未见过报导。本天线采用了新的设计理念通过设计实现下列结果:

1) 用波导宽边十字缝替代一般应用的纵缝和斜缝实现了圆极化辐射;

2) 改矩形波导单面缝阵为双面阵列, 在满足波导行波辐射、入端匹配和预定口径分布的约束条件下实现聚焦于最大覆盖角指向的近圆对称圆锥波束;

3) 改波导行波阵终端匹配负载为端辐射单元, 既填补了漏波辐射在阵近轴角域内的辐射盲区满足赋形波束成形的需要, 同时还提高了天线辐射效率;

4) 波导阵列漏波辐射与端辐射间的能量分配和相位关系是赋形波束设计的一个关键。恰当设计使二者的组合辐射达到地球匹配波束要求。

上面提到的双面缝阵、端射与漏波辐射的组合

万方数据

以及圆极化十字缝漏波阵列参数的选择都未见有相关报道,没有直接可被引用的设计公式和关系。目前有一些商用电磁计算软件,它为天线分析和优化提供了十分有效的手段。然而本天线的设计是在仅有技术要求和约束条件(即设计输入),在原本不知道天线形式的情况下要构建一个天线,这过程是一个综合过程。对于这样一个有较多设计参数的组合天线来说,还很难直接应用这些分析软件完成天线构建的综合。

## 1 理想覆盖曲线及覆盖增益的工程模型

600~1000km 轨道高度(低轨),太阳同步,近极圆轨道,对地三轴稳定是多种遥感卫星通用的轨道和姿态,本文是针对上述情况进行的。星上数传系统担负了将获取的各种遥感信息传至地面的任务。星载数传天线是该系统的重要设备。为了使地面在覆盖区内接收到的信号电平不随卫星位置而变动,星上数传天线辐射方向图必须能弥补星地间传输途径的空衰变化。我们称这种波束为地球匹配赋形波束。其数学表达式有:在覆盖区内: $0^\circ \leq \theta \leq \theta_m$

$$G(\theta) (\text{dB}) = 20 \log(S(\theta)/H)$$

$$S(\theta) = \sqrt{R^2 - 2R(R+H)\cos\gamma + (H+R)^2}$$

$$\frac{\sin\gamma}{S(\theta)} = \frac{\cos\delta}{(R+H)}; \quad (1)$$

式中,  $\delta$  是地面站天线的接收仰角,一般地面站起始工作仰角  $\delta_0=5^\circ$ ,  $R=6378\text{Km}$ ,  $H$  是卫星轨高,式中其他符号的意义见图 1 所示。图 2 以卫星轨高  $H=778\text{Km}$  为例给出了理想覆盖曲线及覆盖增益的工

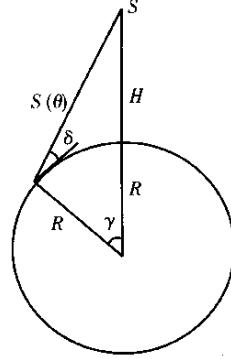


图 1 卫星与地面覆盖几何示图

Fig. 1 Coverage geometry of low earth orbital satellite

程模型。图中的下折线代表最低电平线,上折线从 EMC 等考虑给出的最高电平线。数传天线的覆盖增益在此二折线间为满足规范。

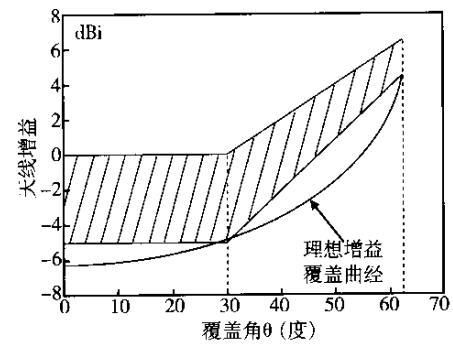
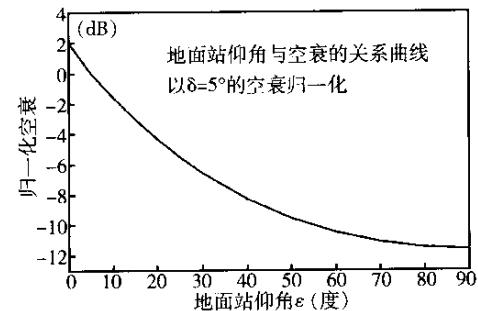


图 2 “ZY-1”卫星数传天线理想覆盖曲线及其工程模型

Fig. 2 The ideal coverage and its engineering model of ‘ZY-1’ data transmission antenna

根据图中下折线可得到覆盖增益工程模型最低电平的数学表达式。对于  $H=497\text{km}$ , 某遥感卫星数传天线的最低电平线有下式:

$$G(\theta) (\text{dB}) \geq \begin{cases} 5.5, & \theta = \theta_m \\ \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \times 12.4 - 6.9, & \theta_0 \leq \theta \leq \theta_m \\ -6.9, & 0^\circ \leq \theta \leq \theta_0 \\ \theta_0 = 30^\circ, \theta_m = 67.6^\circ \end{cases} \quad (2)$$

只要数传天线实际覆盖增益大于(2)式规定值,该数传天线覆盖增益达规范。这就是该卫星数传天线赋形波束优化设计的目标函数。

## 2 组合天线的设计

要达到理想覆盖曲线的辐射特性,本天线采用矩形波导缝阵的漏波辐射和终端喇叭的端辐射之组合。漏波辐射形成指向于最大覆盖角方向的环状圆锥波束,再加上阵终端的喇叭辐射形成在  $0^\circ \sim 30^\circ$  角域的低电平宽角辐射。这两种辐射按适当的功率分

配比和适当的相位关系迭加形成预定的马鞍形圆锥赋形波束。该天线设计应解决的问题有:

- 1) 漏波阵应基本满足波导行波阵的条件, 不因开缝辐射而影响波导行波场特性;
- 2) 单波导双面缝阵的漏波辐射应指向于最大覆盖角方向; 且具有近圆对称的圆锥波束;
- 3) 漏波阵恰当的口径分布, 且辐射同旋圆极化;
- 4) 端喇叭替代行波阵的端负载, 在波导阵列与端辐射元间维持恰当的功率和相位关系使之满足波束赋形的要求, 且不改变波导行波场分布, 并有高的辐射效率;
- 5) 保证天线入端与发射机有良好的匹配。

## 2.1 矩形波导宽边尺寸的确定

矩形波导传输波的相速大于光速。当用矩形波导主模激励, 在波导壁上开缝, 行波缝阵主波束方向有下关系:

$$\theta_m = \arccos(\beta/k) \quad (3)$$

式中,  $\beta$  是矩形波导主模波数;  $k$  是自由空间波数。经推算,

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right), \quad a \approx \sin\theta_m/2\lambda \quad (4)$$

式中  $\lambda$  是工作波长,  $a$  是矩形波导宽边尺寸。当给定最大覆盖角由上式可确定波导宽边尺寸。这里的波导缝槽阵列主波束方向满足(4)式是有条件的。只有波导缝与波导内场的耦合不大, 使波导内场特性和行波传输状态基本维持不变的条件下, (4)式关系才能满足。实际上, 在波导壁上开缝即使上述条件基本满足时, 其传输相速也会有少许的变化。因此在阵列设计时, 该关系仅作为迭代计算的初值应用。

## 2.2 圆对称圆锥波束的逼近

矩形波导宽边单面缝阵, 在波导轴平面形成聚焦窄波束, 与其正交平面内形成宽的近半球波束, 一般通称为扇形波束。如果在矩形波导二宽边同时形成这样的缝阵, 二阵列的空间辐射迭加可逼近成一周向圆锥波束, 利用这一概念本天线采用双面开槽结构以实现近圆对称的圆锥波束。在单一波导上对开缝阵辐射的数学模型建立是复杂的, 特别是当阵元数较大时计算的困难就更大。如何处理好阵元间和二阵列间的互耦影响是该天线实现的一个关键问题。在此采用了数值仿真与实验测试相结合的方式。

## 2.3 圆极化辐射的实现

常用的波导宽边偏置缝, 宽边倾斜缝和窄边倾斜缝的主极化辐射为线极化。显然这三种缝都不能

达到圆极化辐射要求。从矩形波导主模的场及表面电流分布的研究中, 如图 3 所示, 矩形波导内的  $H_{10}$  模场分布可写成:

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (5-1)$$

$$H_x = -j \frac{\beta}{k_c} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (5-2)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (5-3)$$

式中,

$$K_c = \pi/a, \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \sqrt{k^2 - (\pi/a)^2}, k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5-4)$$

由(5)式可见, 主模( $H_{10}$ )在矩形波导宽边上的磁场有  $H_x$  和  $H_z$  两个分量, 这两个场分量空间正交、相位差  $90^\circ$ 。这两个场分别按  $\sin$  和  $\cos$  分布, 如果在适当位置( $X_{01}$ )使  $|H_x| = |H_z|$ , 以此为中心分别开一纵向和横向缝组成十字缝, 如图 3 所示, 原则上可辐射圆极化。此时对应的十字缝中心位置<sup>[2]</sup>

$$X_{01} = \frac{a}{\pi} \operatorname{arccot}(\pm \sqrt{(\frac{\lambda}{\lambda_c})^2 - 1}) \quad (6)$$

式中  $X_{01}$  代表缝槽中心距波导宽边中心线的距离, “+”和“-”代表于中心线两侧。 $\lambda_c$  为  $H_{10}$  模截止波长,  $\lambda$  为工作波长,  $a$  为波导宽边尺寸。

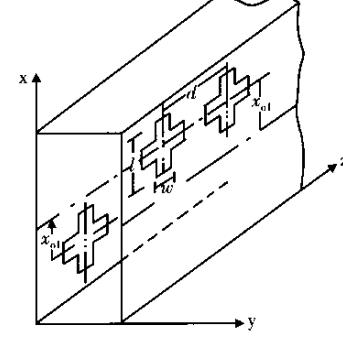


图 3 矩形波导十字缝阵列示意图

Fig. 3 The cross-slot array  
of rectangular waveguide

仅确定十字缝槽中心位置  $x_0$  对圆极化辐射来说还是不够的。还要求二正交场辐射能量相等, 这将涉及缝槽与波导内场耦合的强弱, 除开缝位置外还与缝槽的几何形状与尺寸(槽长和槽宽)有关。经推导<sup>[3]</sup>, 如图 3 所示十字槽圆极化与二正交缝的磁极

化率有下列关系：

$$\frac{M_x}{M_z} = \frac{\lambda_g}{4a^2} \cot \frac{\pi x_0}{a} \quad (7)$$

式中  $M_x, M_z$  分别为与  $x$  向和  $z$  向磁场相关的磁极化率, 它仅与缝槽几何形状及尺寸有关。 $x_0$  是缝槽中心位置。对应的缝槽圆极化轴比

$$AR(dB) = 20 \log \left[ \frac{M_z}{M_x} \frac{\lambda_g}{4a^2} \cot \frac{\pi x_0}{a} \right] \quad (8)$$

当二正交槽缝  $M_x = M_z$  时, (8)式的圆极化条件(即  $AR = 0(dB)$ )就变成(6)式。通过对  $M_x, M_z$  选择使十字槽中心位置可在一定范围内调整, 增加设计的灵活性。

## 2.4 极化旋向的确定

矩形波导二宽边上各有一缝阵。缝阵开在什么位置, 也就是说在中心线的哪一边, 这完全由极化旋向确定。要求这二缝阵辐射为同旋极化。假设矩形波导能量沿  $+Z$  方向传输。对主模  $H_{10}$  的内场, 根据  $\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}_s$  可确定波导壁上电流。槽辐射的圆极化旋向如图 4 所示。要产生 RHCP 辐射, 对  $+Z$  向传输的波而言, 上壁( $y=b$ )应开在中心线以左, 而下壁( $y=0$ )应开在中心线之右, 这二缝阵相对于宽边中心线是呈左右对称的。反之为 LHCP。

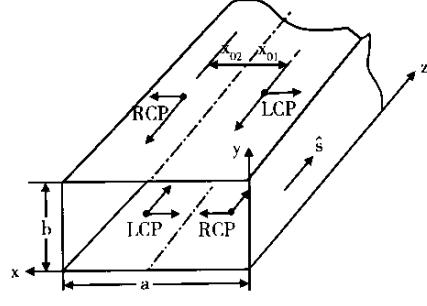


图 4 矩形波导双面十字缝阵列极化旋向确定

Fig. 4 The sense of circular polarization for the cross-slot array of rectangular waveguide

当十字缝旋转  $45^\circ$  变成斜正交槽时, 辐射场关系不变。这种排布对组阵设计会带来更多的灵活和方便。本天线采用此种排布的。

## 2.5 端喇叭替代终端负载

一般行波阵的终端接入一匹配负载以吸收残余能量避免影响行波性能。考虑到本天线要产生中间下凹、最大指向于六十余度的马鞍形赋形波束。如果将终端负载换为端射宽波束辐射再与阵列漏波辐射的聚焦波束相加就可实现要求的赋形波束。这既填

补近轴角域的辐射, 又提高了天线的辐射效率。只是端喇叭的设计应满足:

1) 适当设计喇叭尺寸使其波束宽度和辐射相位满足与漏波辐射迭加形成赋形波束的要求;

2) 喇叭端口与阵列间有良好匹配, 不附加反射。

## 2.6 漏波辐射与端射能量的分配

根据理想覆盖曲线和覆盖增益的工程模型, 近轴  $0^\circ \sim 30^\circ$  角域认定为定值的端喇叭主辐射区,  $30^\circ \sim 90^\circ$  角域用恰当的分段指数分布函数拟合, 并认定为波导阵列的主辐射区。通过对空间能量积分确定漏波辐射与端射辐射的能量分配初值, 其能量分配初值为  $1 : 3$ 。优化设计的迭代运算中最终确定能量分配比, 它对初值有少许的调整。

## 2.7 波导漏波十字缝阵的设计

### 3.7.1 阵列参数选择

根据覆盖增益、带宽及指向偏差等因素阵列聚焦波束的初值经设计取:

1) 按最大指向处聚焦波束  $3dB$  瓣宽约为  $10^\circ \sim 12^\circ$ ;

2) 边瓣电平至少不高于  $-20dB$ , 以免与端辐射电平干扰;

3) 阵列终端功率暂定为输入功率的  $0.25$ , 阵列辐射为  $75\%$  的输入功率;

4) 口径分布采用 Tayloy 线阵设计。因为这种阵列的各阵元激励幅度变化较缓和, 而且方向图近主瓣角域内边瓣电平接近相等, 随后便单调递减。这种辐射分布有利于与端射迭加。

由此可得到阵列参数包括阵元数  $N$ 、阵元间距  $d$ 、阵列口径分布  $I_n, n=1, 2, \dots, N$ 、阵列辐射效率等。

### 2.7.2 阵单元归一化电导和缝槽参数的确定

对于漏波行波阵, 阵列辐射效率

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ri}}{P_{in}} \quad (9)$$

式中  $P_r = \sum_{i=1}^N P_{ri}$ , 为阵列总辐射功率, 它等于各阵元辐射功率的总合。 $P_{in}$  为输入功率, 当口径分布已知后可得到各阵元的归一化电导, 有

$$g_i \approx \frac{|I_n|^2}{\frac{1}{\eta_A} \sum_{i=1}^N |I_n|^2 - \sum_{j=1}^i |I_j|^2} \quad (10)$$

在此推导中假使波导每一截面都匹配, 其归一化电

导等于一。实际波导并不严格行波情况,为了较准确地确定口径幅值分布,需校正由于波导截面等效归一化电导不等于一所产生的歧变。利用传输线理论可逐步逼近求出最终的阵元归一化电导值,它与缝的辐射强度直接联系起来了。

对宽边线极化缝槽无论是偏置纵缝还是倾斜缝都可通过改变缝槽的位置或取向控制其辐射强度,然而本天线的阵元在宽边的位置已由圆极化条件所决定,因此十字缝槽的辐射强度只能通过缝槽本身的几何参数来控制。资料<sup>[2]</sup>介绍了矩形宽边单面单十字缝的几何参数与槽辐射功率等的实验测试结果,然而本阵列阵元间、二阵列间的相互耦合都存在,不可直接引录该数据。要建立矩形波导宽边双开缝阵辐射场的严格的数学模型是十分复杂的。除了主模还有高阶模的互耦,由于理论与数学模型的近似性和不完备性,在阵元参数设计时,实践证明仅进行单纯的数值分析会产生较大的误差。为了较准确地确定阵元辐射强度与其几何参数间的关系,采取了比较直接的增量电导法实验测定。在此基础上可得到缝槽几何参数(槽长、槽宽)与辐射电导(即辐射强度)间关系曲线。当口径分布、辐射效率确定后,利用该曲线可得各缝槽的几何尺寸。

### 2.7.3 行波相位的限定

阵列设计中除各阵元辐射强度外,其相移量也是一个十分重要的参数。研究表明阵列中缝槽间相移量由两部分组成。一部分是与传输系数相关的相移量  $\psi_{12}$ ,另一部分是由导波场转换成空间辐射波时产生的相移量  $\psi_R$ ,该相移量  $\psi_R$  随槽几何参数而变化。由于  $\psi_R$ 、 $\psi_{12}$  的存在,即便是等间距阵列,阵元间也会产生非线性的相位波前。这对预定的漏波聚焦波束的形成是不利的。从数值分析与实验结果已看出,只要槽长  $L < 0.4\lambda$ ,  $\psi_{12}$  和  $\psi_R$  基本都不随槽长改变。为维持波导内场基本不变和行波传输条件、简化缝阵设计,本阵列各阵元槽长一般控制在此范围内。

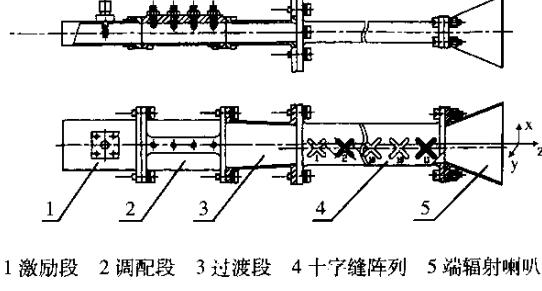
按上述过程可以得到该天线初步的设计参数。这样,天线的结构尺寸就可以基本构成。再通过近场测量及近-远场变换来修正设计参数,得到最后的设计参数。也可以利用有限元法编制的商用软件进行优化设计以确定最后的天线参数。实践表明这两种方法获得的结果是一致的。

## 3 天线性能

万方数据

### 3.1 天线结构外形

该天线由波导激励段(1)、波导调配段(2)、波导转换段(3)、波导开槽段(4)和端喇叭段(5)组成,如图 5 所示。考虑到天线的机械和轨道热特性,天线本体由同一种金属(铝合金)整体铣出,表面镀金。由于数控机床加工,产品一致性好。本天线结构紧凑、刚度强度好。一次通过了规定的各项环境鉴定试验。



1 激励段 2 调配段 3 过渡段 4 十字缝阵列 5 端辐射喇叭

图 5 单波导双面十字缝阵组合天线结构示图

Fig. 5 Outline drawing of waveguide array composite antenna

### 3.2 天线电性测试结果

#### 3.2.1 覆盖方向图和增益

如图 5 所示的坐标系下,天线 YZ 平面的实测方向图和增益如图 6 所示。在最大指向角圆锥面内的实测方向图和增益如图 7 所示。图中有规定的最低覆盖电平线由(2)式确定。

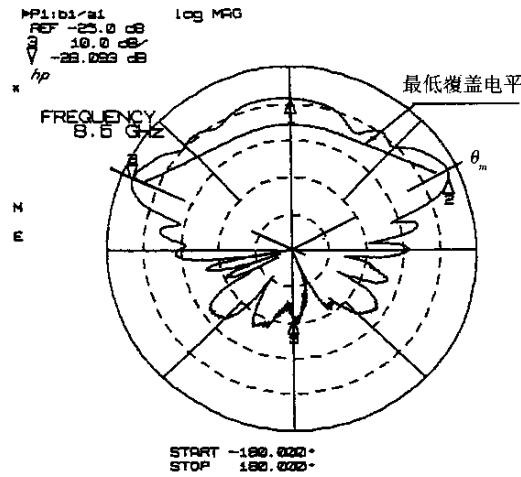


图 6 YZ 面实测方向图及增益

Fig. 6 The tested results of radiation pattern and gain on the YZ plan

#### 3.2.2 端口匹配及驻波比

本天线集成化高勿需外加调配,端口处在 8.4 ~ 8.9GHz 带内的驻波比测试结果,  $VSWR \leqslant$

1.3 : 1。

#### 4 天线的应用分析

波导阵列组合天线作为星载 X 波段数传天线已在我国的多个传输型遥感卫星上得到应用，并经过在轨飞行获得了满意的结果。本天线是利用新的设计理念构建出与赋形反射面有类同的功能和性能的新型小尺度天线。天线结构简单、体小质轻、集成度高是它突出优点。该天线节省了遥感卫星宝贵的对地观察空间，这对卫星总体布局和载荷的安装会带来更大的自由度。本天线除在大尺度卫星上应用还特别适用于各种小卫星的应用。由于单波导双面开槽辐射固有的特性，此天线在最大指向圆锥面上辐射不够均匀呈哑铃形，如图 7 所示。在  $\varphi \approx 0^\circ$  和  $180^\circ$  的临近小角域内为辐射凹区，辐射电平低于要求值。要提高凹区电平势必需降低波导高度，这对功率耐受、行波场条件都是不利的。下面将研究凹区影响与对策。

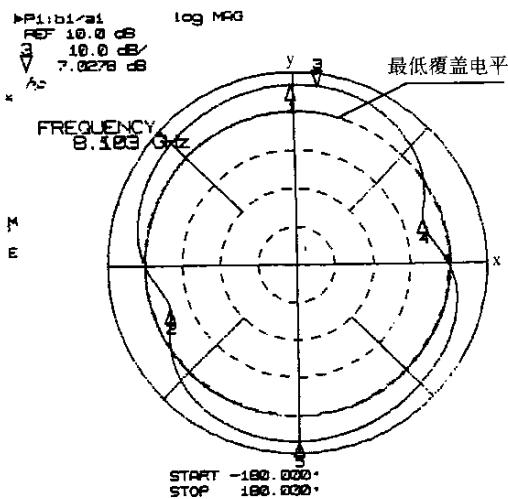


图 7 最大指向圆锥面辐射方向图及增益

Fig. 7 The tested results of radiation pattern and gain on the  $\theta_m = 67.6^\circ$  conical surface

#### 4.1 辐射盲区估计

‘ZY-2’卫星数传天线的覆盖区定义为以对地轴为轴的  $67.6^\circ \times 2$  的圆锥角范围。因此理论覆盖区定义为  $S_0$ ，它有下式，

$$S_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_m} \sin \theta d\theta d\varphi \quad (11)$$

式中， $\theta_m = 67.6^\circ$ ，最大覆盖角。而盲区定义为在规定覆盖角域内，电平低于规定值的角域，在此用  $S$  表示。

$$S = \int_{\theta_{1L}}^{\theta_{2L}} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi + \int_{\theta_{1R}}^{\theta_{2R}} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \quad (12-1)$$

式中， $\theta_{1L}, \theta_{2L}$  是方向图左边盲区的界值， $\theta_{1R}, \theta_{2R}$  是方向图右边盲区的界值。

当左右两盲区对称，或取平均近似时，

$$S = 2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \quad (12-2)$$

$\theta_1, \theta_2$  为平均的盲区角域的界值。根据图 7 的实测数据，按(12)式可计算得出盲区。实际覆盖率有

$$\eta = \frac{S_0 - S}{S_0} \geqslant 91\% \quad (13)$$

计算时对盲区的最小电平是以最大覆盖角的最大斜距估计的，实际上电平凹区对着地面站时并不都是在最大斜距上，因此覆盖率定会好于这个结果。

#### 4.2 辐射凹区的影响分析与对策

这种星载数传天线波束为覆盖地球的一固定波束，当卫星在轨运行时，波束也随卫星相对地面移动。当地面站与卫星的仰角小于起始仰角（比如， $\delta_0 = 5^\circ$ ）时，地面站将不能稳定接收。由此确定了一个地面站的作用范围。首先研究地面仅单站接受的情况。如果星上数传天线有圆对称分布的覆盖特性，无论卫星从什么方向进入地面站作用范围都一样，只要地面站在起始仰角以上就能保证接收。然而如果星载数传天线有盲区的话，当盲区正对地面站时就无法保证从起始仰角开始就有可靠接收。在盲区地面站可接收弧段会变短。考虑到遥感卫星轨道大多选为近极圆形回归轨道，为使凹区对地面接收应用影响降至最小，当天线在星体安装时尽量将盲区放在与飞行垂直方向。首先保证在卫星飞经地面站长弧段的可靠接收；而把天线的弱电平区压到地面站作用区的边缘，卫星辐射弱电平处在与地面站擦边而过的低仰角范围，在这段飞行中地面站本身的仰角就低，而且可视弧段又比较短，接收数据的利用价值相对小些，在此范围内因凹区丢失数据的相对影响会小一些。这种安装方式已在多个卫星上应用。再加上，星地链路信道一般总存在一定的裕量，信道裕量还会弥补天线凹区电平，因此在轨飞行中基本没有发现其不良影响。由于航天器天线设计受多种因素的制约，再加上恶劣环境因素。要 100% 的完全理想的性能是难实现的。对一般应用来说，91% 的覆盖性能是可接受的，因为一般还有一定的系统裕量来弥补。

对于低轨卫星来说,一个地面站的可视弧段是有限的,为了尽量多的接收星上下传信息采用多站接收。目前我国遥感地面接收站不止一个,地面站的作用区都相互重叠的。一个地面站的弱电平接收区可以被另一个地面站的作用区覆盖而被补偿。图 8 是以我国现有的北京、乌鲁木齐和广州三个地面接

收站为例,比较对地面接收的影响。图 8(a)是星上天线为理想圆对称波束覆盖对应的地面站作用区;图 8(b)是某星上数传天线(ZY-2, CCD-DTA)辐射呈哑铃形分布的地面站实际覆盖区。可以看出,地面接收站作用区除东边和西边有一小角域无法补偿外,其他地域都可得到同样良好的接收效果。



图 8(a) 本天线覆盖

Fig. 8(a)



图 8(b) 理想覆盖

Fig. 8(b)

图 8 采用多站接收的覆盖性能的比较

Fig. 8 Comparison of coverage performance

## 5 结论

为了消除辐射凹区、而又保持其结构紧凑、小尺度的优点可采用四波导阵列,其外形如图 9 所示。

它由波导功分器、四波导阵和端口波导辐射器组成。波导功分器形成四个  $90^\circ$  镜相的等功率分配对四波导阵列馈电。四波导阵是四个彼此正交排布的单面十字缝波导行波阵。波导阵终端为两两正交、 $90^\circ$  镜相的开口波导。四波导阵形成最大指向圆锥面的聚焦波束辐射,四开口波导为一等效海更斯源产生对地指向的宽波束圆极化辐射。这两种辐射产生相同旋向的圆极化波。这两种辐射以适当的幅度和相位分配组合形成所要求的赋形波束。该天线可形成为近旋转对称的地球匹配波束。随着阵间距变化周向均匀度也随之改变。为了使最大指向圆锥面上有更加均匀的周向辐射(比如,电平起伏  $\leq \pm 0.25\text{dB}$ )还可在单面缝阵的波导内填充介质进一步减少阵列间的距离,使四波导最大指向的圆锥面辐射方向图更加均匀。这一点已为数值仿真结果和

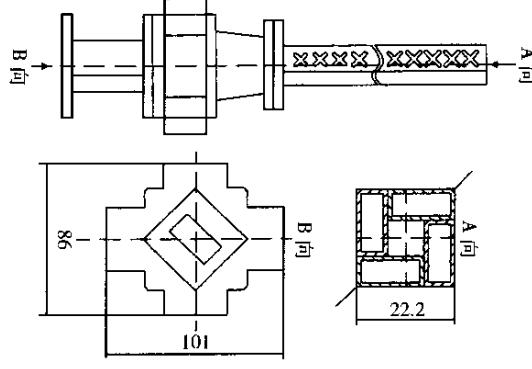


图 9 四波导阵列天线结构示图

Fig. 9 Outline drawing of four waveguide array antenna

电性样机测试证实。这种天线保持了结构紧凑、小尺寸的特点,而且克服了单波导双面阵列最大指向圆锥面上辐射不均匀的缺点,实现了周向均匀辐射。只是这种天线结构复杂,应用于 X 波段时,结构尺寸很小其加工精度要求很高。再加之填充介质后波导

内的损耗有所增加,会降低天线的辐射效率。如果星体对地面有足够的安装空间,考虑到目前我国在复合材料加工成形、微波功率合成技术和低损宽带优质微波元器件等方面都有明显的进步,采用赋形反射面方案倒是一个比较简单和直接的办法。目前赋形反射面天线已在我国后续的遥感卫星上应用。总之经过了多年的研制,随着我国多颗传输型对地观察卫星的成功,星载数传天线也形成了以背射双线螺旋天线、波导阵列组合天线为代表的小尺度数传天线和与国外相同形式的赋形反射面天线。星载数传天线系列产品的初步形成,可以为各种对地观察传输卫星(包括大卫星和小卫星)提供更多的选择。

迄今我国的对地观测遥感卫星数传天线还都应用的固定波束,由于覆盖面积大天线增益都较低。随着传输速率及误码率要求的进一步提高,采用覆盖地球的固定波束已没有多少潜力可挖,必须发展高增益的可控波束天线。瞄准世界最新发展趋势,正在研制具有自主控制功能的、可跟踪多个地面接收站的高增益、多波束全固态共形相控阵的数传天线。另外,低轨卫星的低覆盖率问题一直限制了单个地面站可接收时间,目前采用多站接收虽有改进但仍难作到全天时。从信息获取的时效性和无间断信息传输考虑,我国正加强同步轨道跟踪与数据中继卫星

(TDRSS)的研制。加上对地观测卫星星座的建立及组网应用可保证全天时的大数据量的传输。为此,与TDRS 的无线传输通道和星间无线链路相关的星载天线新技术研制也已启动。相信不远的将来我国遥感卫星的数据传输会出现一个崭新局面,相关的天线新技术和新成果也将对该类卫星上得到应用。

### 参考文献:

- [1] 叶云裳,李全明.一种新型的星载 IR-MSS 数传天线[J].宇航学报,2001,22(6)
- [2] A. J. Simmons, IRE Transactions on antennas and propagation, pp. 31-36 'Circularly Polarized Slot Radiators', Jan., 1957
- [3] AD 258960, 'Elliptically Polarized Leaky-wave Array'



作者简介:叶云裳(1942-),研究员/博士生导师,研究方向:航天器天线及其相关领域的研究。

通信地址:北京 9628 信箱(100086)

电话:010-68745104

## A new type of waveguide array composite antenna used for data transmission of remote sensing satellites

YE Yun-shang

(Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

**Abstract:** Proceed from A new design-ideal a type of composite antenna of waveguide cross-slot array is proposed and used as data transmission antenna on remote sensing satellites at low earth orbit, instead of the shaped reflector. The design of the composite antenna and its performance have been described in this paper. The antenna possesses similar performance to the shaped reflector, and it has been used successfully in data transmission subsystem on quite a few of Chinese satellites. The outstanding advantage is to leaves more space on the plane toward the earth for other remote sensing devices due to its compact structure and small size. Lastly, the application of the antenna and development trend of data transmission antennas on low earth orbital satellites (LEO)in China have been briefly presented.

**Key words:** Remote sensing satellite; Matching beam with the earth; Rectangular waveguide; Leaking wave radiation; Cross-slot array of waveguide; Circular polarization; End-fire radiation, composite antenna

## 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，一直致力于专注于微波、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>