

# 低剖面圆极化六角形相控阵天线的设计

于晓乐 倪大宁 刘少东 王五兔

西安空间无线电技术研究所，710000

**摘要：**在当今卫星和深空探测飞行器的对地数传通信中，由于信息量日益增多，要求系统的码速率高且误码率低。为了降低误码率，必须提高系统的信噪比，进而需要提高天线的增益。地球匹配波束天线增益只有 6~7dBi，因此增益更高的机械扫描反射面天线和相控阵天线成为提升系统性能的最优途径。本文首先设计了一种介质加载开口波导形式的低剖面圆极化相控阵天线单元。天线单元采用了双探针馈电的方式激励两个正交的TE11 模，下方附加了一个 3dB 支线电桥以提供两路幅度相等、相位相差 90 度的激励。与采用波导圆极化器的单元相比，其剖面低，重量轻，介质损耗小且可以通过发射组件实现左旋/右旋圆极化的切换。进而将该单元组成六角形阵列，并研究了该阵列扫描到 ±45 度时的性能。

**关键字：**卫星通信，相控阵天线，圆极化天线，六角形阵列

## A Low-profile Circularly Polarized Hexagonal Phased Array Antenna

Yu Xiaole , Ni Daning , Liu Shaodong , Wang Wutu

Xi'an Institute of Space Radio Technology , 710000

**Abstract:** In the downlink data transmission subsystem of satellites and deep space explorers, high data rate and low bit error rate (BER) are expected. To lower the BER, the signal to noise ratio (SNR) must be raised. Then the gain of the antenna must be enhanced. As the gain of the earth coverage antenna is normally around 6~7dBi, the mechanically scanned reflector antenna and electronically scanned phased array antenna prove a solution for the optimization of the overall system performance. In this paper, firstly a novel low-profile dielectric loaded circularly polarized antenna element is presented. By exciting two orthogonal TE11 modes through the probes with a quadrature hybrid under beneath, the RHCP or LHCP can be generated and the height, weight and dielectric loss of the antenna element can be reduced considerably compared with the conventional method of waveguide polarizer. Then, a hexagonal phased array is formed with these novel antenna elements, and the wide scan characteristics of the array are studied.

**Key Words:** Satellite communication, phased array antenna, circularly polarized antenna, hexagonal array.

### 1 引言

在卫星和深空探测等飞行器中，通常采用地球匹配波束天线<sup>[1~2]</sup>、机械扫描反射面天线或相控阵天线进行对地数传。地球匹配波束天线应用广泛，但由于其不具备波束扫描能力且增益较低，在进行高码速率数传时要求TWTA具有较高的输出功率，这会造成天线功耗较大。机械扫描反射面天线由于造价低廉等优点已经得到了广泛的研究和应用，但假如转动机构失效，天线就无法工作，容易造成单点失效。而相控阵天线以其固有的优势吸引了众多学者的研究<sup>[3]</sup>。

相控阵天线多采用印刷振子、渐变锥削开槽天

线、波导缝隙天线等作为阵列单元<sup>[3~4]</sup>。但这类天线通常工作于线极化，不能满足卫星对地数传的要求。这是因为一方面采用圆极化电磁波不需要收发天线对准就可以接收，避免了极化跟踪；另一方面是由于圆极化电磁波具有较好的抗雨衰能力。微带天线阵具有重量轻、剖面低等优点，但由于带宽较窄而限制了这种天线的应用。国外在六十年代末期已经研制出了工作于圆极化的圆形和方形口径的开口波导辐射单元，其结构如图1所示。这种天线由波同转换、极化器、开口波导和宽角阻抗匹配层等部分组成，这使得天线纵向尺寸大且质量较重，不利于空间应用。

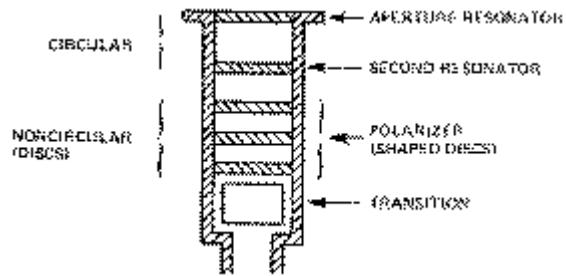


图1 波导辐射单元原理图

在这种天线的基础上，本文设计了一种新型X波段介质加载开口波导相控阵天线单元。这种单元采用了双探针馈电的方式以激励两个正交的TE<sub>11</sub>模。通过对两个底馈探针连接的印刷探头的优化赋形设计，使该天线增益、轴比和驻波等参数满足了要求，且两路输入间具有较好的隔离。在辐射单元的下端，设计了一个3dB支线电桥。这一网络在给两个馈电探针提供幅度相等、相位相差90度激励的同时，也可以通过发射组件实现左旋圆极化和右旋圆极化的切换，满足不同地面站的要求。在此基础上，将这种单元构成19元的六角形阵列，并分析了该阵列的宽角扫描特性。

## 2 天线单元设计

为了产生圆极化电磁波，在天线单元的设计中采用了双点馈电的方式。这样，需要产生幅度相等、相位相差90度的两路激励。基于此，在天线下方设计了一个3dB支线电桥<sup>[5]</sup>，其结构如图2所示。在介电常数为3.38，厚度为0.5mm的陶瓷基片上设计了该电路。在9.25GHz, 50Ω和30.4Ω对应的线宽分别为1.16mm和2.38mm，四分之一波长对应的线长分别为4.9mm和4.76mm。在设计中，考虑到接头处不连续性的影响，将并联臂做了适当的加长。

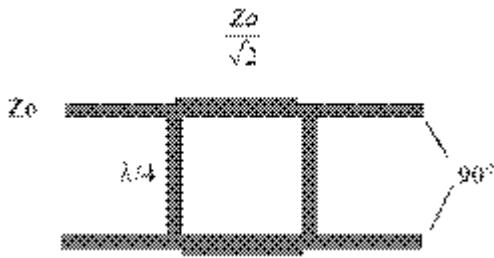


图2 3dB支线电桥示意图

圆形开口波导天线的结构如图3所示。为了减小体积，该波导内填充了介电常数为4的低损耗介质材料。从图中可以看到，两个底馈探针通过3dB支线电桥的两个输出端口获得相位差为90度的两路等幅激励。两个探针又分别连接了一个印刷探针。通过对印刷探针的优化赋形，可以激励起两个正交的TE<sub>11</sub>模，从而产生圆极化波。此外，还在天线单元的口面上附加了厚度为1mm的介质材料层用以改善天线单元的阻抗特性<sup>[6]</sup>。

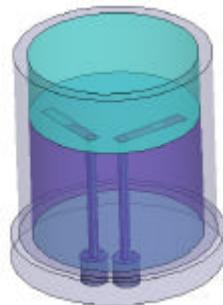


图3 天线单元结构示意图

经过仿真分析和优化，最终确定了天线的尺寸，并得到了天线的性能参数。图4为天线的驻波特性，可以看到，在工作频带内其驻波小于1.6。图5为天线单元在中心频率的方向图，可以看到天线的E面和H面方向图对称性良好，且具有较低的交叉极化。图6为天线的轴比方向图，正前方的轴比仅为1.35dB，且在±46度的波束范围内轴比小于3dB。由图7可见，在工作频带内单元的增益大于5.4dB。以上指标均满足了设计要求。

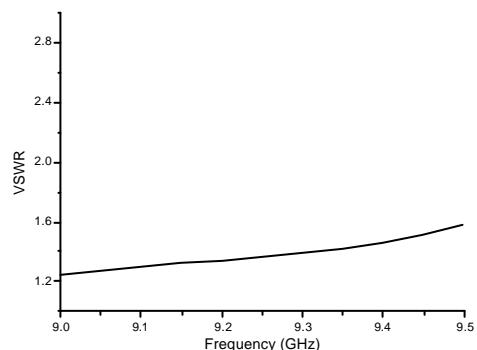


图4 天线单元的驻波

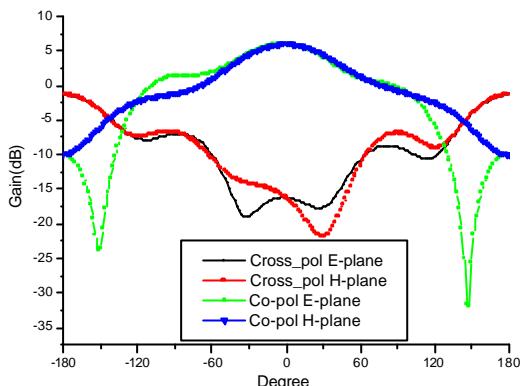


图5 天线单元中心频率的增益方向图

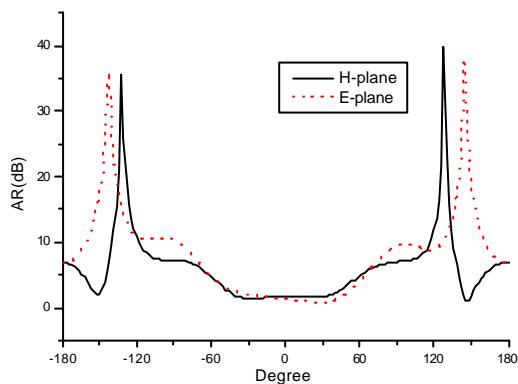


图6 天线单元中心频率的轴比方向图

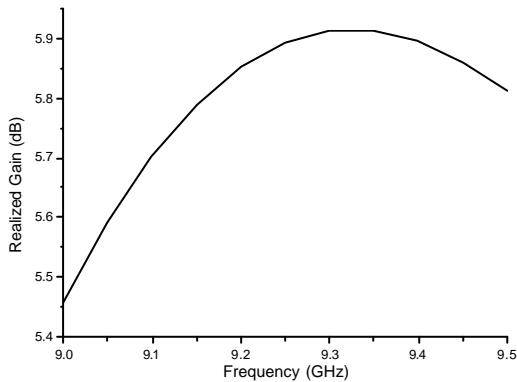


图7 频率与增益的关系

### 3 六角形阵列设计

六角形阵由一个中心单元和若干个以其为中心按六角形排列的单元构成，所有单元均位于同一平面上，称周期性排布。19元六角形阵列分布如图8所示。这种阵列的优点在于可以获得圆对称的方向图，因而已在相控阵雷达和卫星导航等领域得到了广泛的应用。

在相控阵天线宽角扫描时，若出现栅瓣则天线性

能会受到一定的限制。如对阵元间距作以下限制，则栅瓣峰值将不会出现在可见区：

$$d < \frac{I}{1 + |\sin q_{0\max}|} \quad (1)$$

根据栅瓣的特性和等边三角形排列的特点，选择单元间距为0.6。在此基础上，在考虑4bit移相器量化相位的基础之上分析了19元六角形阵列的宽角扫描特性，其结果如图9所示。在扫描到15度时，天线增益下降约0.3dB；扫描到30度时，增益下降约1dB；在45度时，增益下降了3dB。可以预见的是，在扫描角进一步增大时，天线增益也将随之下降。

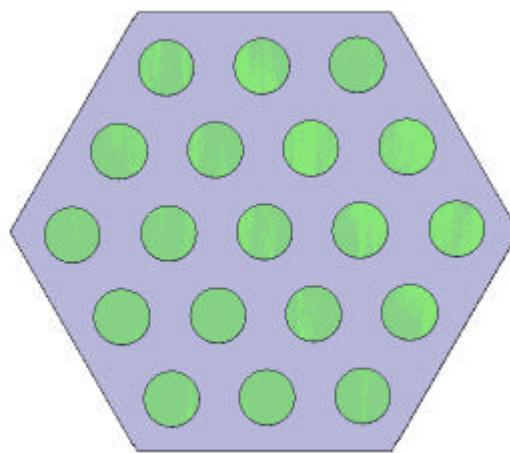


图8 六角形天线阵列

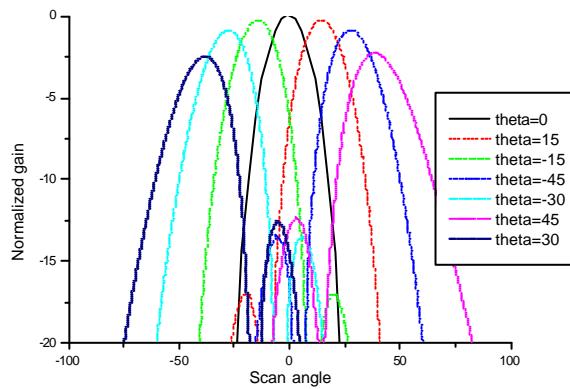


图9 六角形阵列的扫描特性

### 4 结论

本文设计了一种新型低剖面圆极化相控阵天线单元，并以此为基础设计了一种19元六角形阵列。天线单元沿用了介质加载开口波导的形式，但为了减小重量和纵向尺寸，采用了双点馈电的方式，即首先通

过耦合电桥形成幅度相等、相位相差90度的两路激励，然后经过两路底馈探针连接到两个印刷探针。通过优化印刷探针的形状和口面上的阻抗匹配层，得到了最佳的天线增益和驻波特性。通过设计结果可以看到，天线性能良好，各项参数均满足了设计要求。该单元不仅可以产生双圆极化电磁波，且其纵向尺寸和重量与文献中的单元相比减小了70%左右，适应了星载天线对于重量和尺寸的要求。天线阵列的扫描性能良好，能够满足系统的需求。

## 参考文献

- [1] 叶云裳，李全明，资源一号卫星X波段IR-MSS数传天线，宇航学报，2001(6):1-9
- [2] 张正光，叶云裳，对地观察卫星赋形反射面数传天线设计，中国空间科学技术，2004(1):7-11
- [3] Robert J. Mailloux, “Phased array antenna handbook”, Artech House, 2000
- [4] 唐保富，包封印刷振子天线的耐功率设计，现代雷达，2004, 26(4): 62-64
- [5] David Pozar, “Microwave engineering (2nd Edition)”, John Wiley & Sons, 1998
- [6] E.G. McGill, H.A. Wheeler, “Wide angle impedance matching of a planar array antenna by a dielectric sheet”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.AP-14, 1966, pp.49-53.

- [1] 叶云裳，李全明，资源一号卫星X波段IR-MSS数传天

## 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>