

四波束切换天线的分析与设计

高 雪¹, 胡鸿飞¹, 姚中兴², 傅德民¹, 肖良勇², 郭渭盛²

(1. 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, 陕西西安 710071;

2. 西安海天天线科技股份有限公司, 陕西西安 710065)

摘 要: 本文对一种覆盖 90 度扇区的四波束切换天线进行了分析和设计. 首先采用微带结构的 4×4 Butler 矩阵作为波束合成网络, 其中 90 度相差的混合接头用 3dB 定向耦合器实现. 文中给出了该 Butler 矩阵散射参数的计算和测量结果. 然后对实现预波束要求的阵列结构进行了分析和综合. 最后给出了整个波束切换样机天线的实际测试结果.

关键词: 波束切换天线; 微带 Butler 矩阵; 平面阵

中图分类号: TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1372-03

Analysis and Design of a Four-Beam Switched Antenna

GAO Xue¹, HU Hong-fei¹, YAO Zhong-xing², FU De-min¹, XIAO Liang-yong², GUO Wei-sheng²

(1. Institute of Antennas and EM Scattering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Xi'an Haitian Antenna Technologies Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: A four-beam switched antenna is analyzed and designed. Firstly, a microstrip Butler matrix is used as the beamforming network, in which the 90° hybrid is realized by a 3dB directional coupler. The S parameters of the network are computed and measured. Then, the planar array used to obtain the desired beam pattern is analyzed and synthesized. Finally, the experimental results of the prototype antenna are given.

Key words: switched-beam antenna; microstrip Butler matrix; planar array

1 引言

在移动通信系统中,为了抑制多径衰落、极化失配以及其他干扰,引入了雷达和声纳领域中广泛应用的智能天线技术. 智能天线分为波束切换智能天线和全自适应智能天线两大类. 从理论角度,全自适应智能天线的接收效果更优,是智能天线的最终形式,但是由于其计算量大、暂态反应速度慢以及成本高等问题的制约,在实际系统中应用还需时日. 波束切换天线预先设计几个高增益、低旁瓣的固定窄波束覆盖指定的扇区,然后根据用户的来波方向和特定的准则,选择某一波束指向. 波束切换天线用高增益窄波束实现空分、用低旁瓣抑制干扰,方向图的自适应性是有限的,但其波束合成可以在射频端实现,且成本低,实现相对容易,对现有通信系统的升级非常方便,是解决现有系统容量扩充问题的切实方案,所以工程上倍受瞩目^[1,2].

本文设计了一种工作频率为 2150MHz~2162MHz 的 4 波束切换天线,覆盖 90 度工作扇区. 采用微带结构的 4×4 Butler 矩阵,合成 4 个预定波束. 用半波对称振子组成沿各向等间距排列的 4×8 平面阵列,通过方向图综合,对阵列采用不等幅馈电,有效降低各模式波束的较大副瓣. 本文设计的天线不通过

数字信号处理形成波束,而采用射频部件产生多波束,这为未来的全自适应智能天线提供了一个重要的硬件解决方案,降低现有基站对移动通信系统性能的制约.

2 Butler 矩阵波束合成网络

波束切换天线的波束合成网络可以控制天线激励单元的幅相分布,形成预定多波束,是波束切换天线的重要组成部分. 当波束合成在射频端用硬件实现时,可以采用模拟合成器 Butler 矩阵来进行控制.

Butler 矩阵采用 90 度相差的混合接头,形成相互正交的波束. 4×4 Butler 矩阵和 90 度相差的混合接头的示意图如图 1 所示. 其波束合成过程与快速傅立叶变换 (FFT) 非常相似,只不过 Butler 矩阵对模拟数据进

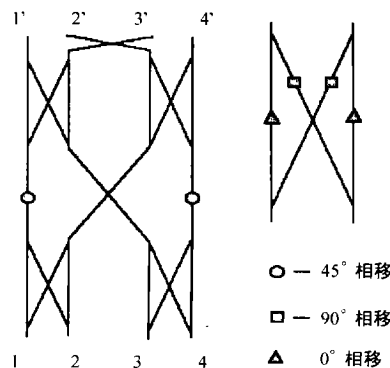


图 1 4×4 Butler 矩阵及混合接头示意图

行变换,而 FFT 在离散数据域进行.当 4×4 Butler 矩阵 4 个输入端口分别激励时,输出端口分别对应于 $-45^\circ, 135^\circ, -135^\circ$ 和 45° 等相位差^[3].

本文用微带结构实现上述功能,基片介质的相对介电参数 $\epsilon_r = 4.5$,厚度为 3mm. 45 相移器用微带传输线来实现,90 相差的混合接头采用微带分支线定向耦合器结构.在中心频率的条件下,根据经验公式^[4]设计相移器和耦合器,然后在整个频带内,采用文献^[5]中的方法对结构进行修正和调整,得到如图 2 所示的设计结构.

输出端口之间的相位差和输入端口之间的隔离度是 Butler 矩阵的重要性能参量.前者影响阵列的馈电相位,后者直接影响各工作模式之间的隔离性能.图 2 结构的上述参数的仿真结果如图 3~5 虚线和表 1 所示.考虑到该微带电路的对称性,只需分别研究输入端口 1 与端口 2、3、4 之间隔离情况.由图可见,在工作频带内,散射参数的幅度均呈近似线性关

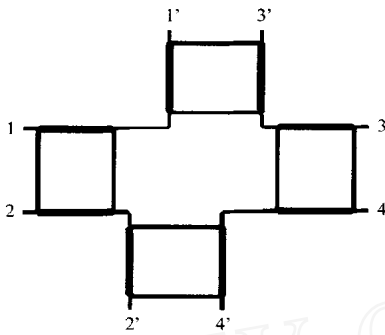


图 2 微带 Butler 矩阵的结构图

系,其中 $|S_{12}|$ 在频带内的变化幅度最大,但最大值与最小值之差仍不超过 5dB. $|S_{12}|$ 在 $f = 2150\text{MHz}$ 达到最大值,为 -21.71dB . $|S_{13}|$ 和 $|S_{14}|$ 在最高频率 $f = 2162\text{MHz}$ 达到最大值,分别为 -29.7dB 和 -19.13dB . 表 1 给出了中心频率上各输入和输出端口之间相位关系.可见 4 个输入端口分别激励时,4 个输出端口基本具有等相位差,分别是 $-45^\circ, 135^\circ, -135^\circ$ 和 45° .而且,整个频带内相位的一致性比较好,相对于中心频率的最大偏差不得超过 2° .由此可见,该设计结构可以实现各模式波束的相位控制和隔离.

表 1 4×4 Butler 矩阵端口的相对相位关系

	输出 1 '(度)	输出 2 '(度)	输出 3 '(度)	输出 4 '(度)
输入 1	- 43.2	- 88.8	- 136.0	- 179.5
输入 2	- 132.1	4.6	138.3	- 88.7
输入 3	- 88.7	138.2	4.4	- 132.2
输入 4	- 179.5	- 136.0	- 88.9	- 43.3

按照设计尺寸,实际制作的微带 Butler 矩阵的测量结果如图 3~5 实线所示.显见,该 Butler 矩阵输入端口之间的散射特性在工作频带内与计算结果基本吻合,两者之间有一些差别的主要原因是,微带介质基片性能的一致性不高,另外还有一些测量误差的影响.

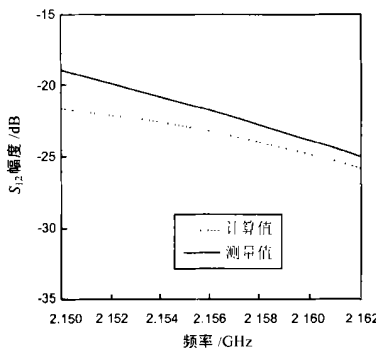


图 3 $|S_{12}|$ 计算和测量结果

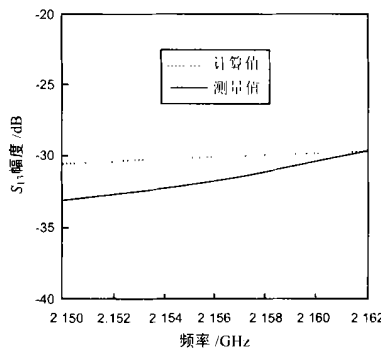


图 4 $|S_{13}|$ 计算和测量结果

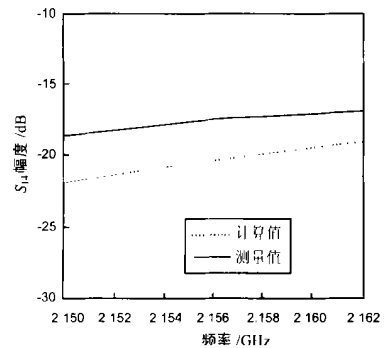


图 5 $|S_{14}|$ 计算和测量结果

3 平面阵的设计

波束切换天线利用多个窄波束实现空分,利用低副瓣降低干扰.为了保证 4 个波束覆盖 90 度的扇区,理论上需要 4 个波束的主瓣最大值分别在 $\theta = \pm 10^\circ$ 和 $\theta = \pm 33^\circ$ 的方向,且其 3dB 波束宽度分别为 20° 和 24° ,同时要求各波束增益不小于 15dBi . 众所周知,对于阵列天线,当阵列结构或单元方向图选择不当时,很容易产生栅瓣或较大的副瓣.在本文的波束切换天线中,当使用旁边的两个波束模式时,扫描角度达 $\theta = \pm 33^\circ$.如果伴随产生的高副瓣出现在 90 度扇区内,将会大大降低系统抑制干扰的能力.而且,为了保证 4 波束完全覆盖工作扇区,同时要求相邻波束的交叉电平不小于 -4dB .因此,如何设计阵列天线,从而产生上述要求的预波束,也是多波束天线设计的关键技术.

根据上述扫描角度、波束宽度以及增益的要求,采用半波振子为单元,振子沿 x 轴放置,首先可以确定阵列形式为 $4 \times$

8 均匀平面阵列,单元间距分别为 $dx = 0.6\lambda$ 和 $dy = 0.5\lambda$.

首先分析阵列单元等幅馈电的情况. Butler 矩阵的四个输出端口分别对应于 4 列直线阵,数值模拟该阵列 E 面、H 面方向图,结果如图 6 和 7 所示.可见,4 个波束的主瓣最大值分别出现在 $\pm 10.5^\circ$ 和 $\pm 31.5^\circ$ 左右,旁边波束和中间波束的 3dB 波束宽度分别为 20.8° 和 21° ,整个波束切换天线的 3dB 波束覆盖范围为 86° ,相邻波束的交叉电平为 -2.8dB ,H 面波束宽度约为 15° .以上参数基本满足要求,但是天线 E 面旁边两个波束伴随有 -7dB 的副瓣,所以当天线处在旁边某

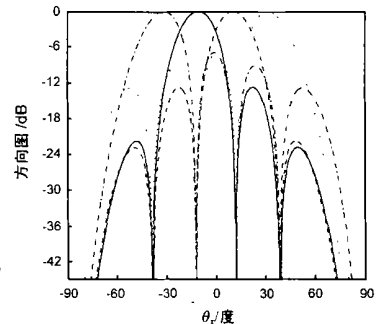


图 6 等幅馈电阵列的 E 面方向图

一波束的工作模式时,造成覆盖小区应该抑制干扰的中间区域有较大波瓣,所以有可能将较大的干扰同时接入到信道,降低信噪比.为此,必须考虑副瓣抑制.

E 面方向图主要取决于阵列 x 方向的间距和幅相分布,由于 x 方向单元均匀排列,可以用离散阵列方向图综合方法.我

们只改变单元激励幅度,采用幅度递减对称分布形式,即 $1 : A : A : 1$ ($A > 1$),压低副瓣电平.将波束增益最大作为目标,设 A 为优化变量,使其在 1 和 3 之间变化,令副瓣电平小于 -11 dB 和相邻波束交叉电平不小于 -4 dB 为约束条件,建立优化问题求解^[6].得到激励幅度依次为 $1 : 1.735 : 1.735 : 1$,对应的 E 面和 H 面方向图如图 8 和 9 所示.可见,在其他参数变化不大的情况下,高副瓣得到有效抑制.

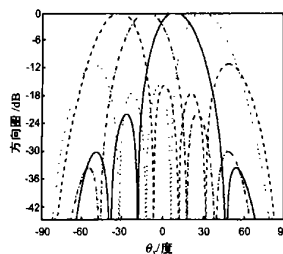


图 8 不等幅馈电阵列的 E 面方向图

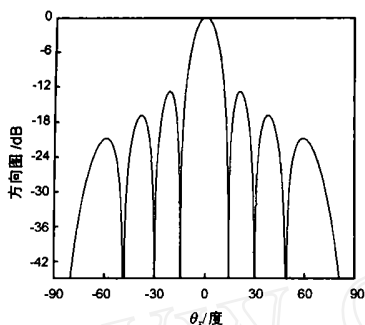


图 7 等幅馈电阵列的 H 面方向图

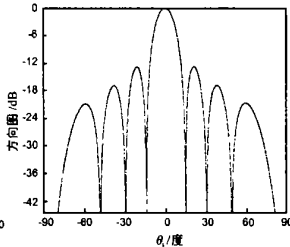


图 9 不等幅馈电阵列的 H 面方向图

4 天馈系统实验结果与分析

采用上述微带 Butler 矩阵和不等幅馈电的 4×8 平面阵,加工制作了波束切换天馈线系统,并对其电气性能进行了测试和测量.图 10 是其中中心频率上的方向图实测曲线^[7].E 面两个内波束分别指向 $\pm 10^\circ$ 左右,波束宽约为 21° ,波束增益约为 16 dBi,两个外波束分别指向 $\pm 33^\circ$ 左右,波束宽度为 23° ,波束增益约为 15 dBi.四个波束的覆盖角度为 88° ,最大副瓣电平

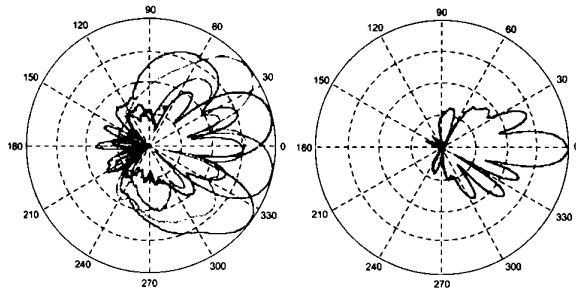


图 10 4 波束切换天线的 E 面和 H 面方向图实测结果
低于 -10 dB,整个频带内驻波比均小于 1.5.值得注意的是,当

采用不等幅馈电时,与等幅馈电相比会造成方向性系数降低.

5 结束语

本文介绍了工作频率为 2150 MHz - 2162 MHz 的四波束切换天线的分析和设计过程.采用微带结构的 4×4 Butler 矩阵作为模拟波束合成器,给出了设计结构和仿真及测试结果.研究了实现预波束的阵列结构,首先根据增益和扫描角度的要求确定天线阵单元、数目及排列方式,然后通过优化激励电流的幅度,有效降低旁边波束的较高副瓣,得到了实现期望方向图的阵列形式.文中最后给出了整个天馈系统的测试结果,说明本文的设计方案切实可行,该系统在移动通信中有良好的应用前景,并为全自适应智能天线提供重要的硬件设计参考.

参考文献:

- [1] M Chrysomallis. Smart antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 129 - 136.
- [2] S Swale, et al. The performance enhancement of multibeam adaptive base-station antenna for cellular and mobile radio system [J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 1990, 39(1): 56 - 67.
- [3] J Litva, T K Lo. Digital Beamforming in Wireless Communications [M]. Artech House, Boston London, 1996.
- [4] 《微带电路》编写组. 微带电路 [M]. 北京:清华大学出版社, 1976 年.
- [5] T Okoshi, Y Uehara, T Takeuchi. The segmentation method—an approach to the analysis of microwave planar circuits [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1976, 24(10): 662 - 668.
- [6] 高雪,等.移动通信系统中基站天线波束赋形设计 [J]. 微波学报, 2002, 18(1): 39 - 42.
- [7] 姚中兴,等.波束切换天线技术报告 [R]. 西安:西安海天天线科技股份有限公司, 2001.

作者简介:



高雪 1976 年生于辽宁,西安电子科技大学 2000 级博士生,分别于 1998 年和 2001 年获得该校电磁场与微波技术专业学士和硕士学位,目前主要研究兴趣为智能天线与信号处理、实用天线的分析与设计和电磁场数值计算.



胡鸿飞 1972 年生于安徽,分别于 2000 年和 2002 年在西安电子科技大学获电磁场与微波技术专业硕士和博士学位,主要研究兴趣为近场测量技术、天线分析和设计,以及智能天线技术.