

# C 波段多波束阵列天线的研究

秦冰 姜兴 徐俊珺 黄明华  
(桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004)

**摘要:** 介绍一种通过采用基于 3dB 电桥和 45°固定相移器构成的  $4 \times 4$  的 Butler 矩阵对 c 波段天线阵进行激励, 从而实现四波束阵列天线覆盖 90°空间的目标。在一定区域运动的物体, 由于物体的运动使物体与通信目标间的角度发生了变化。在这种情况下, 采用四波束阵列天线实现空间划分, 通过切换到合适的波束从而实现不间断的通信。本文对 Butler 矩阵和阵列天线进行了分析, 并对天线阵进行仿真。最后给出多波束阵列天线的仿真结果。

**关键词:** Butler 矩阵, 多波束, 阵列天线

## Study on the Multi-beam Array Antenna at C-band

QIN Bing, JIANG Xing, XU Jun-jun, HUANG Ming-hua

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** A four-beam array antenna at C-band is introduced in this paper, it is fed by a 4 by 4 Butler-matrix that consists of 3dB electric bridge and 45 degrees fixed phase shift device, in order to achieve the goal to cover 90 degrees of space. As the moving objects in a certain region, the angle between the moving objects and the communication target is changed. In this case, the four-beam array antenna is used to achieve spatial division, and the appropriate beam switching is also used to achieve sustained communication. The array antenna and Butler-matrix are analyzed, and the array antenna is simulated in this paper. Finally, the results of the multi-beam array antenna are given.

**Key words:** Butler matrix, Multi-beam, Array antenna

### 引言

随着现代通信的发展, 人类对通信的需求也越来越广。对于运动中的物体, 为了满足其能够在运动中进行不间断通信的目标, 对 c 波段多波束阵列天线进行了研究、仿真。多波束天线指在空间上形成多个独立的波束, 其中的每个波束和一传统的天线相对应。多波束天线从天线的形式看主要有三种基本的类型: 多波束透镜天线, 多波束反射面天线和直接辐射阵列天线。如果多波束天线从其与子波束关系角度考虑, 可以分为: 固定区域点波束覆盖、赋形波束覆盖和非固定点波束覆盖这三种类型。

多波束阵列天线采用波束形成网络 (BFN) 激励阵列天线。多波束阵列天线的波束形成网络有多种形式, 比如功分器组成的 BFN、Butler 矩阵组成的 BFN、Blass 矩阵组成的 BFN 等。BFN 是实现多波束关键技术之一, 许多文献对此进行了研究, 比如文献[1-2]对 Butler 矩阵进行研究使其适用于宽频带, [3]改进了 Butler 使其适用于面阵, [4]研究了 Butler 低损耗问题, [5-6]研究了如何使旁瓣降低。由美国劳拉公司和高通公司倡导的全球星 (Globalstar) 使用的是功分器构成的 BFN、美国铱星 (Iridium) 采用的是 Butler 矩阵组成的 BFN。

本文对 c 波段多波束阵列天线进行分析, 对物体在一定区域内运动时进行通信的问题进行研究。天线单元为右圆极化, 采用平板阵列方式, 使用 Butler 矩阵对阵列进行网络馈电, 实现 90°范围覆盖。天线具有四个输入端口, 每个输入端口可实现一个空间波束, 从而在空间上形成四个 90°范围的波束覆盖。

### 1 Butler 矩阵

多波束天线通过采用阵列形式, 实现综合若干传统天线的功能, 因而多波束天线技术包括研究如何使天线阵实现目标功能的激励网络。天线阵列采用  $4 \times 4$  的 Butler 矩阵馈电网络进行馈电。Butler 矩阵是由 3dB 电桥和固定相移器基本元件组成。3dB 电桥 (如图 1) 的两输出端具有 90°的相位差, 与 45°的固定相移器共同组成  $4 \times 4$  的 Butler 矩阵。

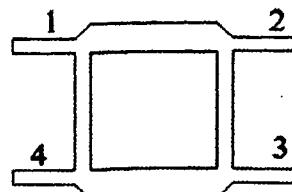


图 1 3dB 电桥

基金项目: 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室 (桂林电子科技大学) 基金资助项目

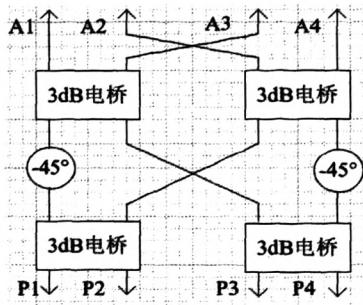


图 2 4x4 Butler 矩阵

3dB 电桥具有结构对称性，其任意端口都可作输入端口，两输出端口总是在于输入端口相反的一边。其  $s$  参数如下：

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

4x4 Butler 矩阵如图 2 所示，工作原理为：当分别选择  $P1, P2, P3, P4$  输入时，在输出端口天线单元间分别形成  $-45^\circ, 135^\circ, -135^\circ, 45^\circ$  的相位差。根据 Butler 多波束矩阵的原理有：设阵列单元数目为  $N=2^k$ ，则

3dB 电桥定向耦合器数量  $N_c$  为：

$$N_c = \frac{N}{2} \log_2 N = \frac{N}{2} k \quad (2)$$

固定移相器数目  $N_{ph}$  为：

$$N_{ph} = \frac{N}{2} (\log_2 N - 1) = \frac{N}{2} (k - 1) \quad (3)$$

## 2 阵列天线分析<sup>[7]</sup>

### 2.1 方向函数

对于  $N$  单元线阵，当各元的电流幅度相等，电流相位依次递增即相邻元相位差相同（由 Butler 矩阵阵内相移提供），相邻元的间距相等时，其方向函数为：

$$|f_\alpha(\alpha)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right| \quad (4)$$

其中  $\psi = \beta + \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \alpha$ ， $\beta$  为相邻元相位差， $\alpha$  为偏离阵轴方向的角度， $d$  为相邻元间距。

对于左边的第  $k$  个波束，Butler 矩阵提供的阵内相移差  $\beta_{Lk}$ ，

$$\beta_{Lk} = \frac{(2k-1)\pi}{N} \quad (5)$$

同理对于右边的第  $k$  个波束，Butler 矩阵提供的阵内相移差  $\beta_{Rk}$ ，

$$\beta_{Rk} = -\frac{(2k-1)\pi}{N} \quad (6)$$

即可得到 Butler 矩阵多波束的方向图函数为：

$$|f_\alpha(\alpha)| = \left| \frac{\sin N \left[ \left( \frac{(2k-1)\pi}{2N} + \frac{\pi d \cos \alpha}{\lambda} \right) \right]}{\sin \left[ \left( \frac{(2k-1)\pi}{2N} + \frac{\pi d \cos \alpha}{\lambda} \right) \right]} \right| \quad (7)$$

### 2.2 波束指向

当令  $N \left[ \left( \frac{(2k-1)\pi}{2N} + \frac{\pi d \cos \alpha}{\lambda} \right) \right] = 0$  时，则可得到第  $k$  个波束最大值指向。第  $k$  个波束的最大值指向  $\alpha_k$ ，

$$\cos \alpha_k = \frac{\lambda(1-2k)}{2Nd} \quad (8)$$

## 3 天线阵列结构设计

材料选用介电常数为 2.65，厚度为 1mm 的板材，通过在接地板上开缝进行缝隙耦合馈电。阵列采用 2x4 平面阵方式进行组阵如图 3、4、5 所示。

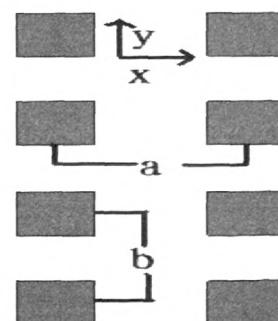


图 3 天线阵列

采用低介电常数和空气层可以达到降低 Q 值得目的，从而可以获的更好的带宽。通过优化，反射板与介质 1 的距离为 13mm，介质 1 与介质

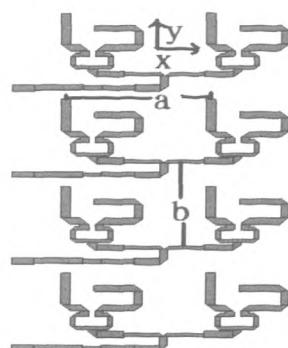


图 4 匹配网络

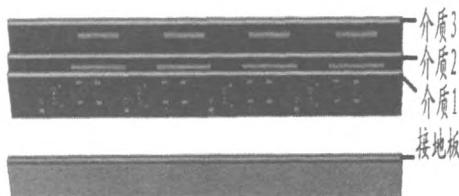
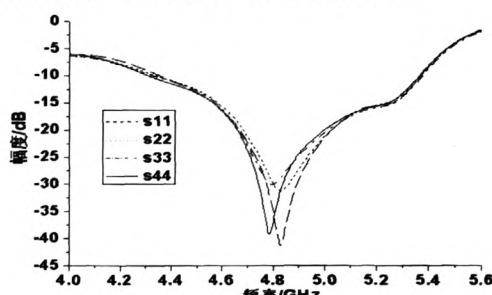
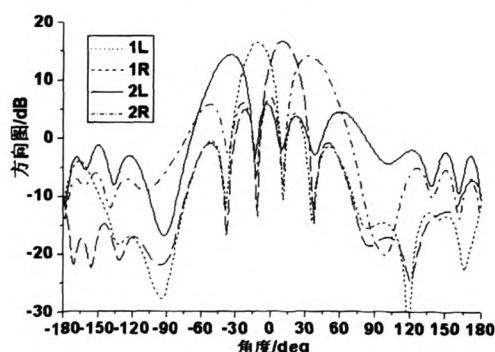
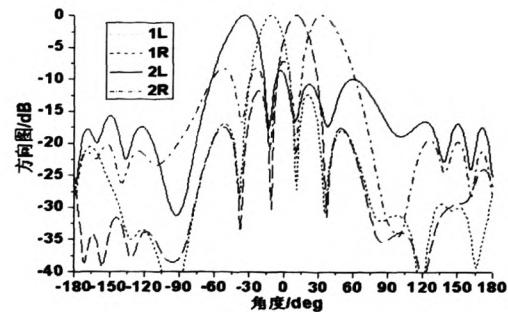


图 5 侧面图

2 距离为 2mm, 介质 2 与介质 3 距离为 4.5mm。天线阵列在  $x$  轴方向等间距 (距离为  $a$ ) 分布。 $y$  轴方向等间距 (距离为  $b$ ) 分布。

#### 4 仿真分析

天线阵四输入端口使用  $4 \times 4$  Butler 矩阵馈电网络进行馈电, 采用 1:1:1:1 等振幅馈电方式进行激励。图 6 为天线阵四激励端口的  $s$  参数图。从图可以得到: 天线馈电端口匹配良好。

图 6  $s$  参数图图 7 四波束方向图 ( $\phi=90^\circ$ )图 8 归一化四波束方向图 ( $\phi=90^\circ$ )

四波束方向图如图 7、图 8 所示。从仿真结果有: 当选择 Butler 的 P1 端口为输入时, 天线阵形成的波束为 1R; P2 时, 波束为 2L; P3 时, 波束为 2R; P4 时, 波束为 1L。四波束的参数为: 1L 波束增益为 16.5dB, 3dB 波束带宽为  $20.6^\circ$ ; 1R 波束增益为 16.7dB, 3dB 波束带宽为  $20.5^\circ$ ; 2L 波束增益为 14.4dB, 3dB 波束带宽为  $24.8^\circ$ ; 2R 波束增益为 14.2dB, 3dB 波束带宽为  $26.6^\circ$ 。波束间的交差电平为: 2L 波束与 1L 波束交差电平为 11.8dB (归一化为 -3.0dB); 1L 波束与 1R 波束交差电平为 13dB (归一化为 -3.6dB); 1R 波束与 2R 波束交差电平为 12.3dB (归一化为 -3.6dB)。Butler 矩阵输出相位差及形成分布参数如表 1 所示。

表 1 Butler 矩阵输出相位差及形成分布参数

馈电端	Butler 输出端相位差	天线最大波束指向
P1	$-45^\circ$	$11^\circ$
P2	$135^\circ$	$-34^\circ$
P3	$-135^\circ$	$33^\circ$
P4	$45^\circ$	$-11^\circ$

通常近似地称 Butler 多波束的归一化相交电平为 -4dB, 图 8 表明符合理论值。从图 7 波束间交差电平值的仿真结果知道, 交差电平的最小值达到设计要求, 即 c 波段多波束阵列天线可满足四波束覆盖  $90^\circ$  范围的设计要求。

#### 5 结语

本文介绍了一种通过采用微带线的 Butler 矩阵方式进行馈电, 利用 Butler 矩阵中输出端的相位差激励天线阵, 从而实现在 c 波段通信的目标要求。仿真结果表明, 这种多波束阵列天线可以实现  $90^\circ$  范围的覆盖, 可以实现在一定区域内, 在运动中进行通信的目的, 具有一定的应用价值。

#### 参 考 文 献

- [1] Siti Zuraiyah Ibrahim, Marek E. Bialkowski. Wideband Butler Matrix in Microstrip-Slot Technology[J]. Microwave Conference, 2009, 2104-2107

- [2] Marek E. Bialkowski, Feng-Chi E. Tsai, Yu-Chuan Su, Kai-Hong Cheng. Design of Fully Integrated 4x4 and 8x8 Butler Matrices in Microstrip/Slot Technology for Ultra Wideband Smart Antennas [J]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008, Page(s): 1-4
- [3] 杨煜, 冯正和. 用改进的 Butler 矩阵实现固定多波束面天线阵[J]. *微波学报*, 2000, 16 (3)
- [4] M. Bona, L. Manholm, J.P. Starski, B. Svensson. Low-loss compact Butler matrix for a microstrip antenna[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(9):2096-2075
- [5] K. Wincza, S. Gruszczyński and, K. Sachse. Reduced side lobe four-beam antenna array fed by modified Butler matrix [J]. *Electronics Letters*, 2006: 508-509
- [6] W.-R. Li, C.-Y. Chu, K.-H. Lin and S.-F. Chang. Switched-beam antenna based on modified Butler matrix with low side lobe level[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(5)
- [7] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009

秦冰 男, 硕士研究生, 电磁场与微波技术专业, 研究方向为微带天线阵列。

E-mail:2008qinbing@163.com

姜兴 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电磁场、天线方面的教学和研究工作。

徐俊珺 女, 讲师, 主要研究领域为微带小型化天线、阵列天线等。

黄明华 男, 硕士研究生, 电磁场与微波技术专业, 研究方向为微带天线阵列。

## 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>