

文章编号: 2095-4980(2017)06-0992-05

## 基片集成波导双极化多波束天线的设计

张彦, 陈飞, 宋喆

(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 提出了一种基于基片集成波导技术的双极化多波束天线设计方法, 利用 Butler 矩阵作为波束成型网络, 通过激励成对的正交缝隙辐射单元组, 实现双极化多波束辐射特性。通过配置正交辐射单元组之间的相位关系为同相或反相, 可以分别实现极化共波束和极化独立波束的多波束辐射特性, 从而适应不同无线通信场景需求, 利用空间波束分集或极化分集方式提升无线通信容量。最终, 在 X 波段给出了一种基于基片集成波导技术的双极化独立波束的多波束天线设计实例, 仿真结果表明该天线阻抗带宽为 9.64~10.25 GHz, 对 4 个输入端口分别激励时可实现双极化四波束辐射, 波束增益为 14 dBi, 验证了所提出的设计思想和方法。

**关键词:** 多波束天线; 双极化; 波束成型网络; 基片集成波导

**中图分类号:** TN820

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201706.0992

## Design of substrate integrated waveguide dual polarized multibeam antenna

ZHANG Yan, CHEN Fei, SONG Zhe

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** A dual polarized multibeam antenna based on substrate integrated waveguide technology is proposed, which utilizes Butler matrix as the beamforming network to excite pairs of orthogonal radiating slots, forming dual polarization multi-beam radiations. To configure the exciting signals of orthogonal slots as in-phase or out-of-phase, dual polarized co-beam or independent-beam can be achieved accordingly, which can be adopted in different wireless communication scenarios, through space beam diversity or polarization diversity scheme, to enhance wireless communication capacity. Finally, a prototype of dual polarized independent-multibeam antenna is implemented at X-band by using substrate integrated waveguide technology. Simulation results show that the developed antenna has an impedance bandwidth of 9.64–10.25 GHz; and by exciting four input ports of the antenna, four dual-polarized independent beams are achieved accordingly with the gain about 14 dBi, which verifies the proposed design concept and method.

**Keywords:** multibeam antenna; dual polarization; beamforming network; substrate integrated waveguide

多波束天线具有窄波束、高增益等显著特点, 可以通过空间分集方式优选出所需的信号, 从而改善无线通信系统的信干比<sup>[1-2]</sup>。因此, 多波束天线是一种有效地提高无线通信系统容量和提升频谱资源利用率的关键技术, 已成为第五代(5th Generation, 5G)移动通信标准化进程中不可或缺的一部分。双极化天线是无线通信系统中经常使用的另一类提升信道容量的天线技术, 通过引入具有正交辐射特性的天线单元, 利用正交极化的隔离特性, 可以实现极化分集<sup>[3-4]</sup>。

本文以 Butler 矩阵作为原型, 通过在矩阵的输出端增加 3 dB 功分器或 180° 电桥方式使矩阵输出端加倍, 同时在扩充后的输出端口上进行交替连接具有极化正交特性的辐射单元组(子阵), 从而形成了具有双极化特性的多波束天线。本文首先讨论了基于 Butler 矩阵构成双极化多波束天线的原理, 并根据多波束与极化的特性进行了分类; 其次, 利用基片集成波导技术在 X 波段设计并仿真了具有极化独立波束的多波束天线阵; 最后给出了数值

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2016-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61302019)

仿真结果, 对设计方法进行了验证。

### 1 双极化多波束天线原理

通常, 多波束天线的实现方式分为波束成型矩阵和透镜 2 大类<sup>[5-8]</sup>。Butler 矩阵是最为广泛应用的波束成型网络<sup>[6-7]</sup>, 如图 1(a)所示, 它由传输线连接的若干 90°电桥和固定移相器(0°和 45°移相器)构成。从 Butler 矩阵的任意输入端口(图 1(a)中端口 1~4)激励, 在其输出端口(图 1(a)中端口 5~8)均会产生具有等振幅、等相差的信号。因此, 将 Butler 矩阵的输出端口均与相同辐射单元连接, 即可产生若干正交波束。所产生的波束与输入端口对应方式见图 1(b), 波束按照输入端口进行相应编号。图 1(b)中的多个波束可以通过逐次激励输入端口 1~4 而依次产生, 也可以同时激励 4 个端口产生, 以实现辐射方向图的赋形。

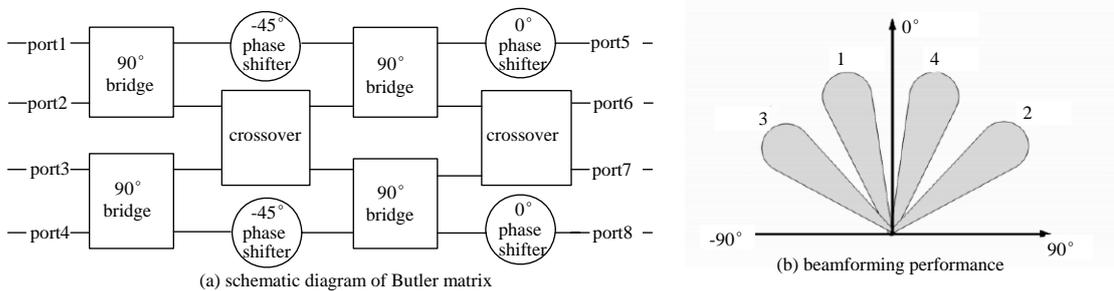


Fig.1 Butler matrix network and its performance  
图 1 Butler 矩阵网络及其特性

如果在 Butler 矩阵的每个输出端(图 1(a)中端口 5~8)上分别连接 1 个 3 dB 等功率分配器, 可以将 Butler 矩阵输出端扩展 1 倍。同时, 在每个 3 dB 等功分器的 2 个输出端上分别连接 1 对具有极化正交特性的辐射单元组(子阵), 即每个端口连接 1 组辐射单元组(子阵)且 2 个输出端所连接的辐射单元组(子阵)的辐射场是相互正交的, 并且满足各个输出端口所连接的相同极化的辐射单元间距小于 $\lambda_0$ 时, 就可以同时产生具有正交极化的多波束组。Butler 矩阵的每一个激励端口对应一组波束完全相同的正交极化波束对, 称之为极化共波束的多波束天线。该类多波束天线适用于对固定区域实现多波束连续覆盖, 同时可以利用空间分集和极化分集有效提升无线系统的容量。类似地, 如图 2 所示, 如果在 Butler 矩阵的输出端(图 1(a)中端口 5~8)分别交替连接 3 dB 等功率分配器或 180°电桥(等功率分配), 从而形成 8 端口输出时, 从 Butler 矩阵的任意输入端口(端口 1~4)激励时, 根据此时输出端口间等相差关系, 可以将输出端口分为 2 组: 端口组 I(端口 5a,6a,7a,8a)和端口组 II(端口 5b,6b,7b,8b), 其相差关系见表 1。当 2 组等相差端口组 I 和端口组 II 分别依次间隔地连接到具有极化正交的辐射单元组(或子阵), 并且满足相同极化的辐射单元间距小于 $\lambda_0$ 时, 就会同时实现 2 组波束指向不同且极化正交的波束组。如图 3 所示, 图 3(a)、3(b)分别给出了对上述改进型 Butler 矩阵的输入端口激励时, 在空间中产生的 2 个极化正交的波束, 此时每个极化对应一个空间指向的波束,

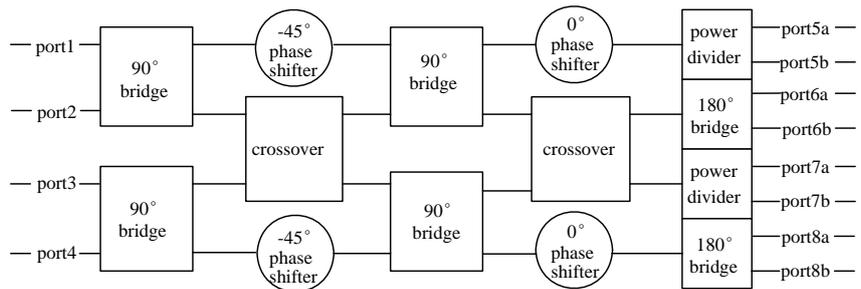
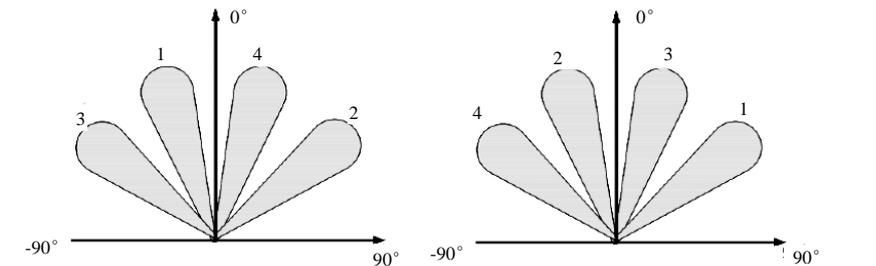


Fig.2 Schematic diagram of improved Butler matrix with dual polarized independent beams  
图 2 双极化独立波束的改进型 Butler 矩阵原理图



(a) beams of polarization 1 corresponding to input ports (b) beams of polarization 2 corresponding to input ports  
Fig.3 Schematic diagram of dual polarized independent beams radiated by improved Butler matrix  
图 3 双极化独立波束的改进型 Butler 矩阵合成波束示意图

并且 2 个正交极化的波束在空间上也是正交的，称之为双极化独立波束的多波束天线。这种天线适用于点对多点通信，不同波束(信道)之间通过波束正交和极化正交的方式来有效降低互干扰。

## 2 极化独立的多波束天线设计

上述 2 种双极化多波束天线的架构略有区别，但其性能与使用场景不尽相同。本文选取第 2 种双极化独立波束的多波束天线为例，在 X 波段采用基片集成波导技术设计实现，并进行仿真验证。第 1 种多波束天线的实现方式与之类似，不再赘述。

表 1 改进型 Butler 矩阵输出端口分组相差

Table1 Output phase differences of proposed improved Butler matrix

input ports	phase differences of port	phase differences of port
	5a,6a,7a,8a/(°)	5b,6b,7b,8b/(°)
port 1	-45	135
port 2	135	-45
port 3	-135	45
port 4	45	-135

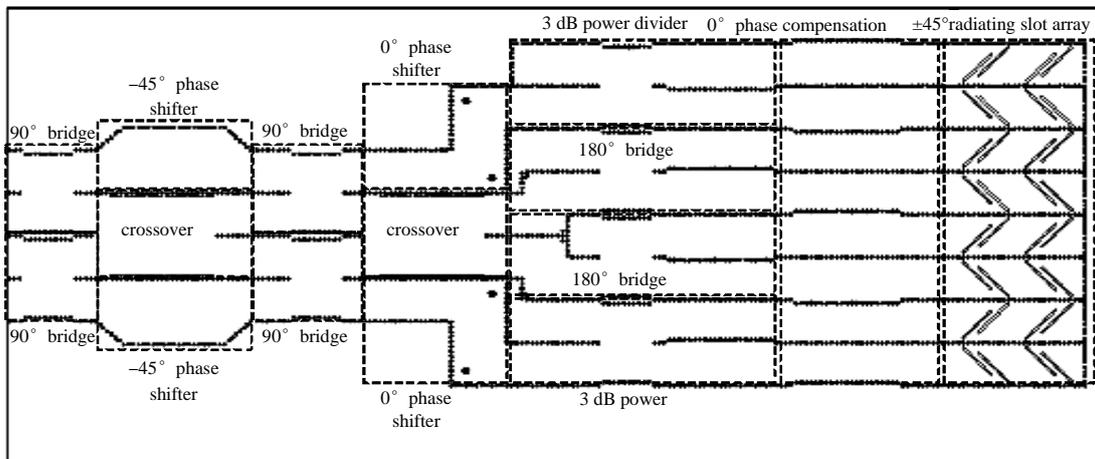


Fig. 4 Structures and functions of substrate integrated waveguide dual polarized independent multibeam antenna

图 4 基片集成波导双极化独立波束的多波束天线的结构组成和功能

如图 4 所示，图 2 中所给出的双极化独立波束的改进型 Butler 矩阵采用基片集成波导形式实现，并在该矩阵的输出端上依次间隔地连接到具有正交极化的 $\pm 45^\circ$ 辐射缝隙子阵上。其中，与传统基片集成 Butler 矩阵相同的部分，包括  $90^\circ$ 电桥、 $-45^\circ$ 相移器、交叉耦合器和  $0^\circ$ 相移器部分，其设计与文献[2]类似。改进型 Butler 矩阵中的 3 dB 等功率分配器和  $180^\circ$ 定向耦合器分别采用了  $90^\circ$ 电桥加移相器的结构实现，通过选择在  $90^\circ$ 电桥的直通或耦合端上再增加一段  $90^\circ$ 移相器，就可以实现 3 dB 等功率分配器或者  $180^\circ$ 电桥。其中，基片集成波导移相器具有宽带自补偿特性<sup>[5]</sup>，即通过调节基片集成波导的宽度可实现相位调整。改进型 Butler 矩阵的每一个输出端均连接一段  $0^\circ$ 相位补偿器，用于补偿输出端对应各支路中由于实际基片集成波导馈电物理长度所形成的相位差，从而保证经过  $0^\circ$ 相位补偿器输出的相位差严格满足表 1 中的相位差分布。

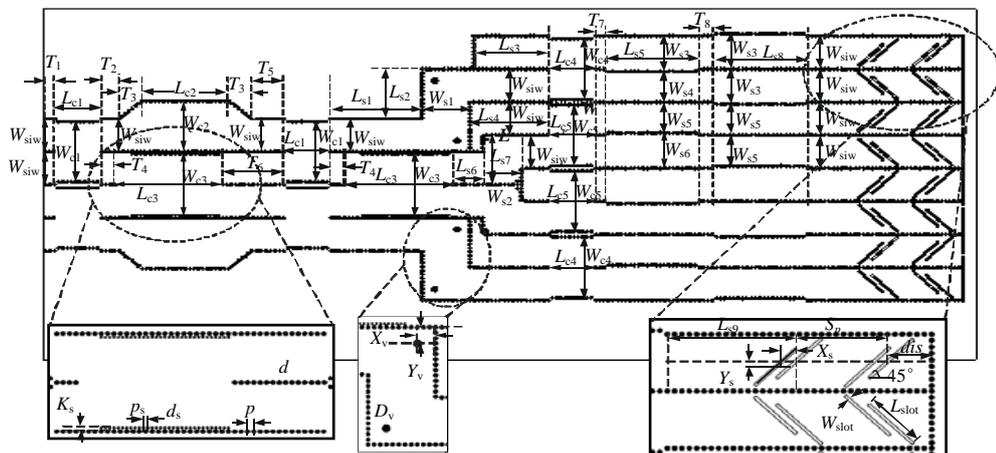


Fig.5 Parameters of substrate integrated waveguide dual polarized independent multibeam antenna

图 5 基片集成波导双极化独立波束的多波束天线模型参数

辐射单元采用了基片集成波导斜缝隙阵形式, 缝隙开槽走向为 $\pm 45^\circ$ 。改进型 Butler 矩阵的输出端经  $0^\circ$  相位补偿器后分别接到包含 2 对间距约为  $\lambda_g/2$  的斜缝隙组, 2 对缝隙组为串联馈电; 基片集成波导末端为短路端, 距离缝隙组中心的距离为  $\lambda_g/4$ 。每一对缝隙组由 2 个等长的缝隙组成, 2 个缝隙分别等间距地偏离基片集成波导中线两侧分布。通过优化每组缝隙之间的间距和偏离中线的大小可以有效降低反射系数, 从而实现较好的阻抗匹配。

最终, 所设计的中心工作频率为 10 GHz 的基片集成波导, 双极化多波束天线阵列模型和详细结构参数见图 5。设计选用的介质基片为 Rogers 5880, 介电常数为 2.2, 损耗角正切为 0.000 9, 板材厚度 0.508 mm。该模型利用 HFSS 进行了建模分析和性能优化, 最终得到的优化参数见表 2。

表 2 基片集成波导双极化独立波束的多波束天线模型参数优化表

Table2 Optimized parameters for substrate integrated waveguide dual polarized independent multibeam antenna

$W_{slw}/mm$	$W_{c1}/mm$	$L_{c1}/mm$	$W_{c2}/mm$	$L_{c2}/mm$	$W_{c3}/mm$	$L_{c3}/mm$	$W_{c4}/mm$	$L_{c4}/mm$	$W_{c5}/mm$	$L_{c5}/mm$	$T_1/mm$
13.2	24.18	16.65	20.2	30	25.4	37.5	24.18	16.65	24.18	16.65	3.5
$T_2/mm$	$T_3/mm$	$T_4/mm$	$T_5/mm$	$T_6/mm$	$T_7/mm$	$T_8/mm$	$L_{c1}/mm$	$L_{c2}/mm$	$L_{c3}/mm$	$L_{c4}/mm$	$L_{c5}/mm$
6	8	4.5	11.15	21.15	3	4.5	31.5	19.8	25.65	27	33
$L_{s1}/mm$	$L_{s2}/mm$	$L_{s3}/mm$	$L_{s4}/mm$	$W_{s1}/mm$	$W_{s2}/mm$	$W_{s3}/mm$	$W_{s4}/mm$	$W_{s5}/mm$	$W_{s6}/mm$	$d/mm$	$p/mm$
10.5	19.8	33	23	16.5	13.5	14.1	12.3	12.3	14.1	1	1.5
$d_s/mm$	$p_s/mm$	$K_s/mm$	$D_s/mm$	$X_s/mm$	$Y_s/mm$	$S_p/mm$	$dis/mm$	$X_s/mm$	$Y_s/mm$	$W_{slor}/mm$	$L_{slor}/mm$
0.5	1	1	2	4.4	4.6	20.75	8.5	2.23	0.82	0.7	13

### 3 仿真结果

本文直接给出阵列最终的优化仿真的结果, 仿真得到的基片集成波导双极化独立波束的多波束天线 4 个输入端口 -10 dB 阻抗带宽为 9.64~10.25 GHz, 如图 6 所示。所提出的天线的双极化多波束方向图如图 7 所示, 其中黑色实线和黑色虚线分别代表不同的极化波束, 图 7(a)~(d)分别为天线输入端口 1~4 激励时的情况, 与前述分析结果图 3 基本相同, 波束仿真增益约为 14 dBi。在改进型 Butler 矩阵输出端相位差较大时( $135^\circ/-135^\circ$ ), 会出现较高的副瓣, 可以通过改进辐射单元进一步优化。

### 4 结论

本文讨论了适用于不同应用场景的 2 种双极化多波束天线形式, 并基于基片集成波导技术, 设计实现了双极化独立波束的多波束天线形式。所提出的多波束天线, 采用了改进型 Butler 矩阵, 辐射单元采用了串馈两元斜缝隙组阵。仿真结果表明, 该天线在单一端口激励时, 可以同时实现极化正交的一对正交波束, 波束增益约为 14 dBi, 天线带宽为 9.64~10.25 GHz。其极化正交和波束正交特性, 可通过极化分集和空间分集方式来提高波束(信道)隔离度和信道容量, 适用于点对多点通信情景。

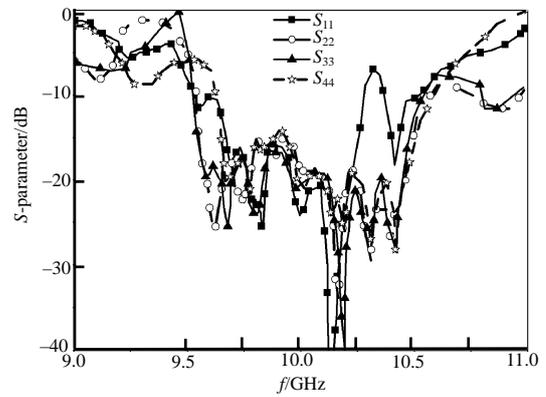
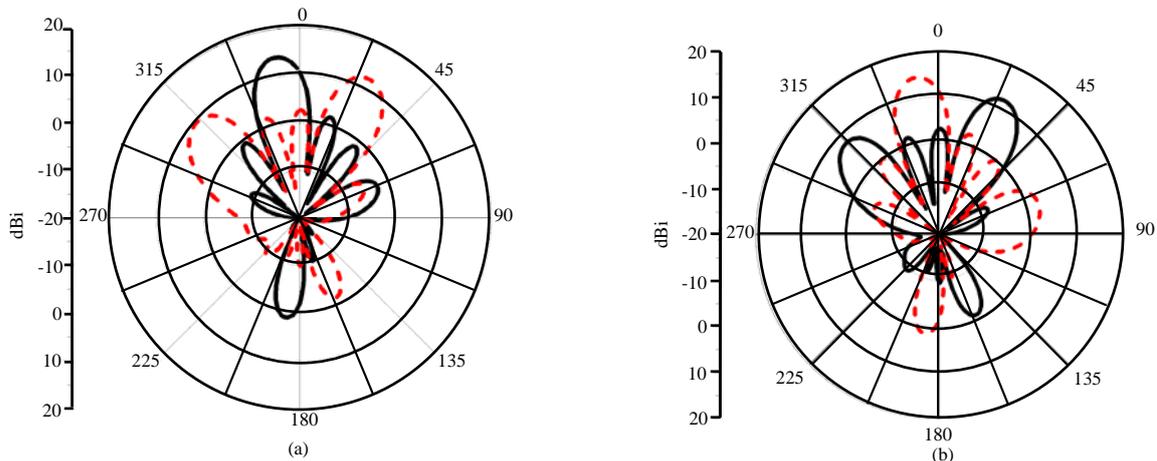


Fig.6 Simulated S-parameter of substrate integrated waveguide dual polarized independent multibeam antenna

图 6 基片集成波导双极化独立波束的多波束天线仿真端口



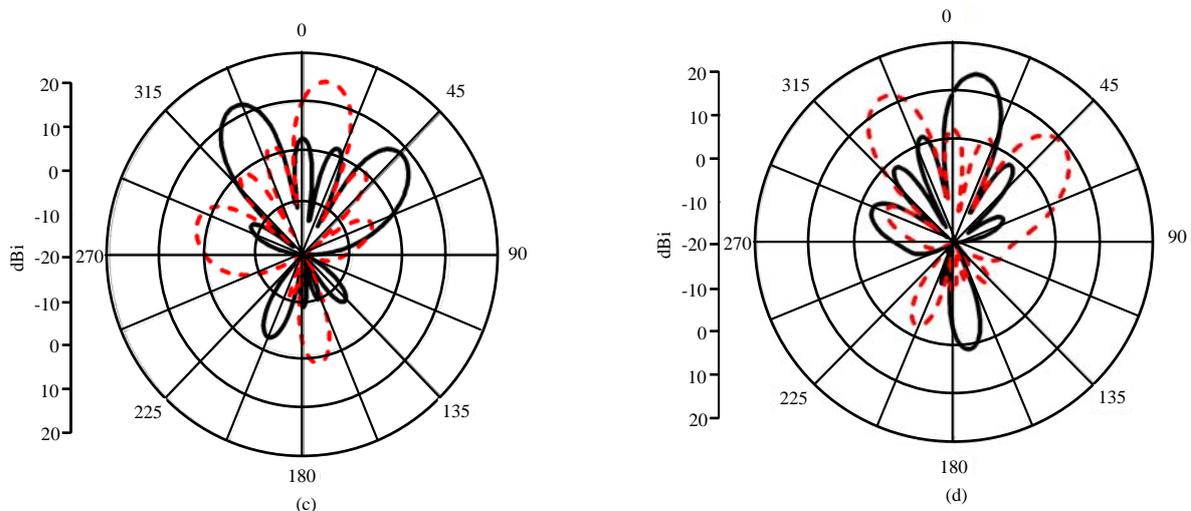


Fig.7 Simulated radiation patterns of substrate integrated waveguide dual polarized independent multibeam antenna(unit:dBi,black and red lines indicate different polarizations.)

图 7 基片集成波导双极化独立波束的多波束天线仿真方向图(单位:dBi, 黑色与红色代表不同极化)

#### 参考文献:

- [ 1 ] 梁洪灿,贺友龙,潘伟,等. 宽频带多波束天线阵及其 RCS 的缩减技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):236-240. (LIANG Hongcan,HE Youlong,PAN Wei,et al. Design of broadband multibeam antenna array and RCS reduction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):236-240.)
- [ 2 ] 陈鹏,洪伟,徐俊峰. 一种新型的基于半模基片集成波导技术的 Butler 矩阵[J]. 微波学报, 2008,24(3):5-9. (CHEN Peng,HONG Wei,XU Junfeng. A novel Butler matrix based on half mode substrate integrated waveguide technology[J]. Journal of Microwaves, 2008,24(3):5-9.)
- [ 3 ] 陈春红. 基于 Butler 矩阵的双频双极化多波束天线关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012. (CHEN Chunhong. The research of key techniques on Butler matrix-based dual-frequency dual-polarization multi-beam antenna[D]. Nanjing, China:Nanjing University of Science and Technology, 2012.)
- [ 4 ] 文瑞虎,王海彬,李元光,等. 基于基片集成波导的巴特勒矩阵馈电网络[J]. 探测与控制学报, 2012,33(5):29-33. (WEN Ruihu,WANG Haibin,LI Yuanguang,et al. Butler matrix feeding network based on substrate integrated waveguide[J]. Journal of Detection & Control, 2012,33(5):29-33.)
- [ 5 ] CHENG Y,HONG W,WU K. Broadband self-compensating phase shifter combining delay line and equal-length unequal-width phaser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(1):203-210.
- [ 6 ] DJERAFI T,KE Wu. A low-cost wideband 77 GHz planar Butler matrix in SIW technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(10):4949-4954.
- [ 7 ] CERNA R D,YARLEQUE M A. Design and implementation of a wideband 8×8 Butler matrix for AWS and PCS 1 900 MHz beamforming networks[J]. IEEE International Wireless Symposium, 2015,1(1):1-4.
- [ 8 ] Schuhler M. On evaluation of beamforming networks[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):766-769.

#### 作者简介:



张彦(1983-),男,河北省邯郸市人,博士,讲师,主要研究方向为毫米波天线与无源器件、卫星通信中的天线与射频技术、超宽带天线技术等,email:yanzhang@seu.edu.cn.

陈飞(1988-),男,南京市人,在读博士研究生,主要研究方向为超宽带雷达技术.

宋喆(1982-),男,南京市人,博士,讲师,主要研究方向为计算电磁学、应用电磁学.