

# 基于 $4 \times 4$ 巴特勒矩阵的双层SIW毫米波多波束天线

朱吾颖舒,李彦霏\*,关亚林

(中国传媒大学,北京 100024)

**摘要:**本文提出了一款工作在28GHz的双层多波束天线,由基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)来实现。该天线的波束形成网络(beam forming network, BFN)采用双层 $4 \times 4$  butler矩阵结构,这不仅减小了BFN的尺寸,还简化了网络复杂度。本文用 $2 \times 4$ 缝隙天线阵作为辐射天线。仿真结果显示,BFN各端口的输出相位误差分别为 $13^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $15^\circ$ 。该天线在不同端口馈电时,可分别实现 $16^\circ$ 、 $-40^\circ$ 、 $46^\circ$ 、 $-12^\circ$ 的波束指向,与理论计算结果基本吻合。

**关键词:**多波束天线;双层基片集成波导;毫米波段;butler矩阵

中图分类号:O422 文献标识码:A 文章编号:1673-4793(2022)01-0059-05

## Dual-layer SIW millimeter-wave multi-beam antenna based on $4 \times 4$ butler matrix

ZHU Wuyingshu, LI Yanfei, GUAN Yalin

(Communication University of China, Beijing 100024, China)

**Abstract:** A dual layer multibeam antenna array working in the millimeter-wave band using substrate-integrated waveguide (SIW) technology is presented in this paper. The double layer beam forming network (BFN) adopt a  $4 \times 4$  butler matrix, it can reduce both the size and the complexity of the BFN. A  $2 \times 4$  slot antenna array is used as the radiation antenna in this paper. Simulation results show that, the output phase errors of each port of BFN are  $13^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $17^\circ$  and  $15^\circ$  respectively. The beam direction of  $16^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $46^\circ$  and  $-12^\circ$  can be realized when the antenna is fed at different port, which is consistent with the theoretical calculation results.

**Key words:** multi-beam antenna; substrate integrated wave-guide; butler matrix; millimeter wave frequency

### 1 引言

随着毫米波被正式划分为5G商用频段,毫米波多波束天线因其高增益、高覆盖、低损耗和低成本的特点在5G移动通信应用中有着巨大的潜力。其中无源多波束天线设计和实现方便,被广泛研究。为了获得低损耗、小体积、高品质因数等优点,人们多采用SIW传输线来

设计多波束天线。文献[1]介绍了一种用于手机的SIW多波束天线,可以完全嵌合在移动手机当中。文献[2]设计了一款基于 $4 \times 8$  butler矩阵的4波束天线,在 $4 \times 4$  butler矩阵后加了振幅锥形结构,有效地控制了副瓣电平。文献[3]采用了两组正交的锥形激励,第一次实现了二维扫描阵列低副瓣问题。文献[4]设计了可用于一维和二维扫描的改进型butler矩阵,实现了波束形成网络的多维

复用。文献[5]创造性地提出平面喇叭BFN,并和漏波天线结合起来,设计了一款二维扫描的平面高增益多波束漏波天线。文献[6][7]通过使用基于SIW的超材料,减小了SIW传输线纵向尺寸,实现了多波束天线纵向小型化。文献[8]使用折叠C型SIW设计了一款毫米波4波束天线,与传统SIW传输线相比,横向尺寸减小很多,然而纵向尺寸依然较大。本文采用双层SIW结构,基于 $4 \times 4$  butler矩阵设计了一款可实现4个波束指向的结构紧凑的多波束天线,相比文献[8],纵向尺寸大大减小。

## 2 多波束天线的设计

### 2.1 波束形成网络

#### (1) $4 \times 4$ butler矩阵

双层SIW  $4 \times 4$  butler矩阵如图1所示。

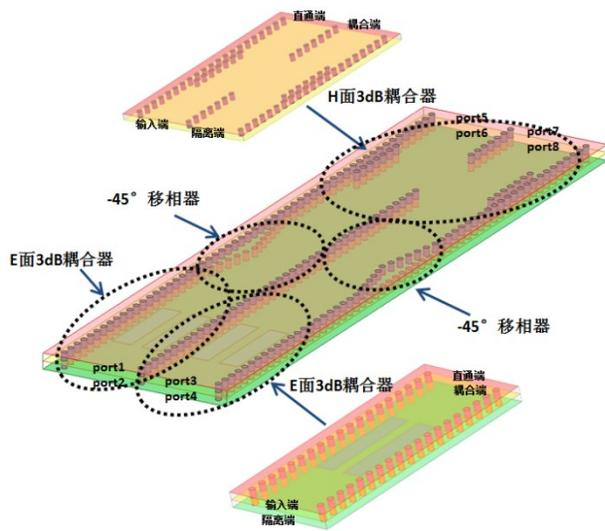
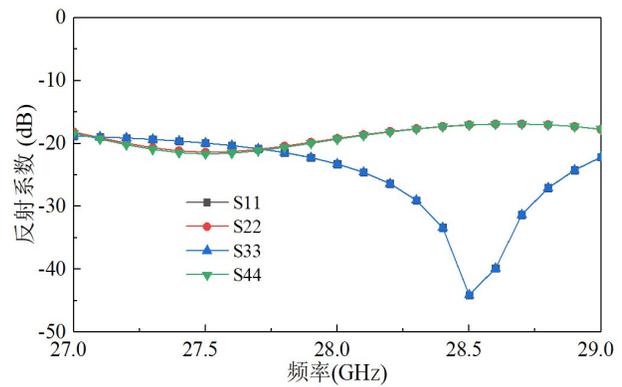
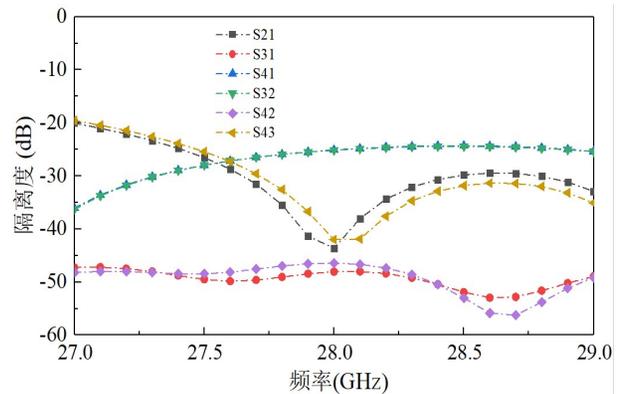


图1 双层butler矩阵

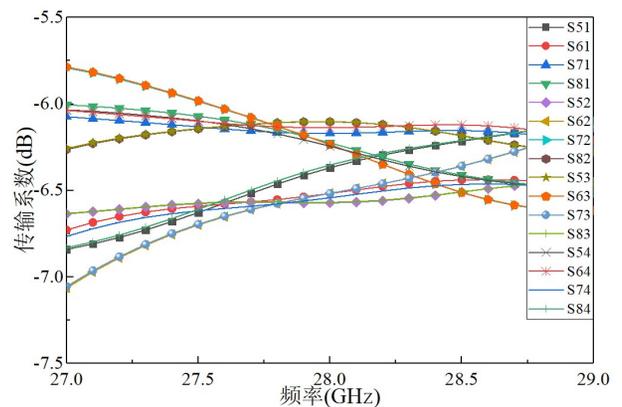
整个结构包含2个E面3dB耦合器、一个H面3dB耦合器<sup>[9]</sup>和两个 $-45^\circ$ 移相器。E面3dB耦合器是双层上下耦合结构,采用在两层介质中间的金属板上开两个对称的长方形槽实现耦合。一半能量从同层直通端输出,另一半能量穿过耦合槽,从耦合端输出,相位比直通端滞后 $90^\circ$ ,而隔离端无能量输出。所使用的 $-45^\circ$ 移相器通过改变金属柱的横向偏移量来改变波程,从而使输出端相位比相同长度的标准SIW传输线输出相位超前 $45^\circ$ 。H面3dB耦合器是单层结构,能量从直通端和耦合端等分输出,同样地,耦合端相位比直通端滞后 $90^\circ$ 。



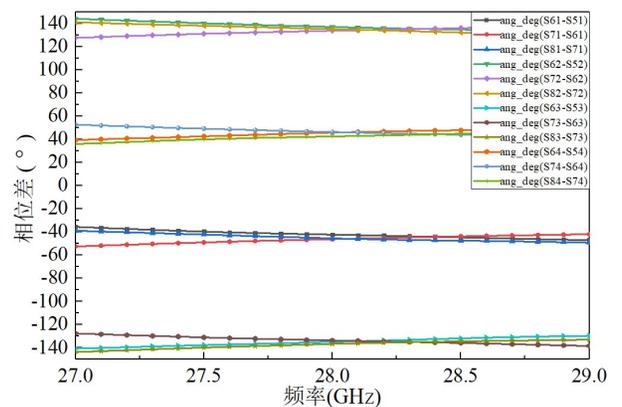
(a)反射系数



(b)隔离度



(c)传输系数



(d)各输出端口相位差

图2  $4 \times 4$ butler矩阵仿真结果

整个设计采用 Rogers 5880 介质板(相对介电常数为 2.2),厚度为 0.508mm。Butler 矩阵在 27-29GHz 内的仿真结果如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,各输入端口的反射系数 S11、S22、S33、S44 均在 -15dB 以下。图 2(b)显示,各端口隔离度在 -15dB 以下。图 2(c)显示,传输系数大于 -7dB。图 2(d)显示, port1~port4 分别输入时, port5~port8 输出的递进相位差分别为  $-45^\circ \pm 10^\circ$ 、 $135^\circ \pm 8^\circ$ 、 $-135^\circ \pm 8^\circ$ 、 $45^\circ \pm 10^\circ$ 。

(2) 双层转单层结构

由于天线阵最终排列在同一层介质板上,因此需要把 butler 矩阵下层的两个端口 port6 和 port8 转接到上层,并使端口 port5~port8 按顺序排列。转接结构如图 3 所示,在两层介质的中间横向开一个  $4.8\text{mm} \times 0.25\text{mm}$  的槽,从而使得 port6 和 port8 的信号从下层耦合到上层。

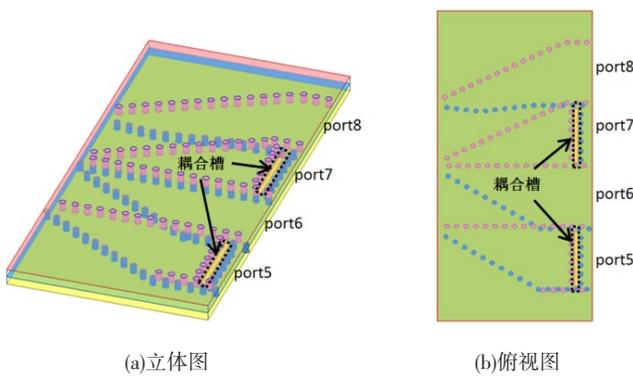
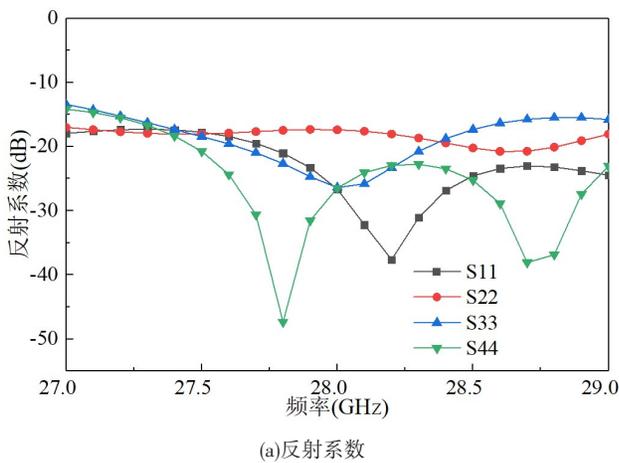
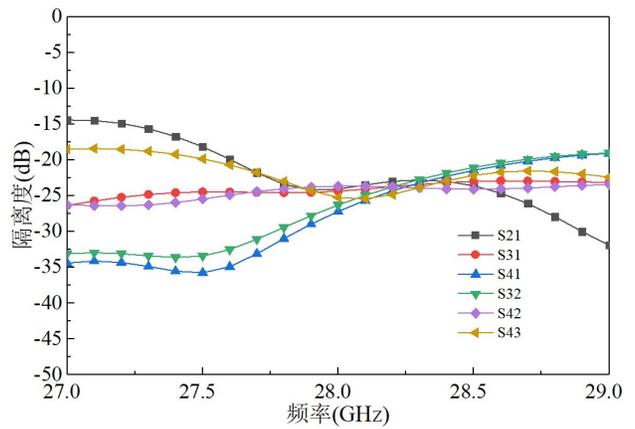


图3 双层转单层结构

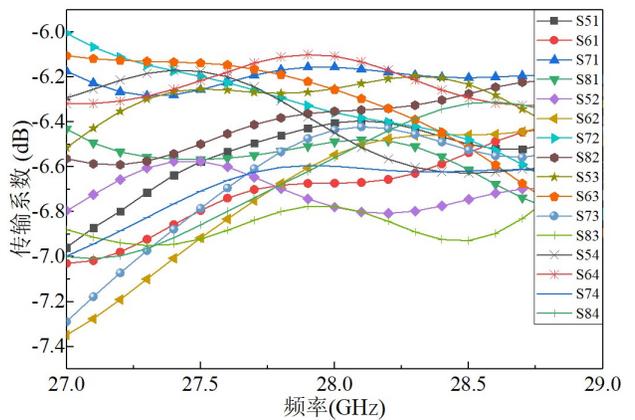
加上转换结构后,信号将从两层 SIW 结构的输入端传输到一层结构输出端,整个波束形成网络在 27-29GHz 内的仿真结果如图 4 所示。



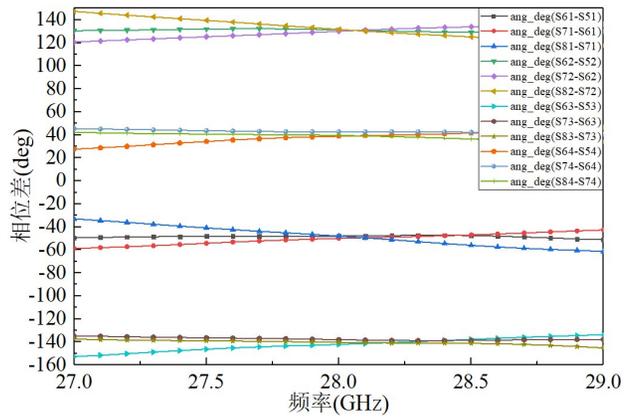
(a)反射系数



(b)隔离度



(c)传输系数



(d)各输出端口相位差

图4 波束形成网络仿真结果

从图 4 可以看出在整个频段内,整体性能相比加入转接结构之前略有下降。图 4(a)和图 4(b)显示,反射系数、隔离度均小于 -10dB。图 4(c)显示,传输系数大于 -7dB。图 4(d)显示, port1~port4 分别输入时, port5~port8 输出的递进相位差分别为  $-45^\circ \pm 13^\circ$ 、 $135^\circ \pm 12^\circ$ 、 $-135^\circ \pm 17^\circ$ 、 $45^\circ \pm 15^\circ$ 。

2.2 缝隙天线阵列

本小节基于缝隙天线阵的基本理论<sup>[10]</sup>,设计  $2 \times 4$

缝隙天线。每个单元由两个宽边纵向开槽的缝隙阵列组成,缝隙间距为 $\lambda_0/2$ ,在 $\lambda_0/4$ 终端处短路。天线阵列单元之间的间距为半波长,如图5所示。由于下层信号和预期相位有 $180^\circ$ 相位差,因此对port6和port8端口后的缝隙天线单元沿单元轴向对称,使缝隙截断相反方向的电流,从而弥补 $180^\circ$ 相位差。

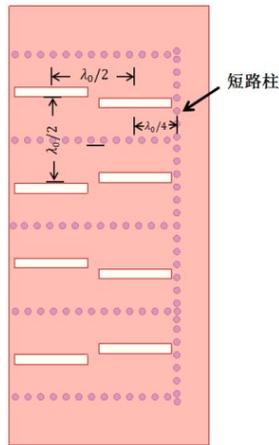


图5 缝隙天线俯视图

### 3 多波束天线整体结构与仿真结果

将上述波束形成网络与缝隙天线阵连接到一起,多波束天线整体结构如图6所示。

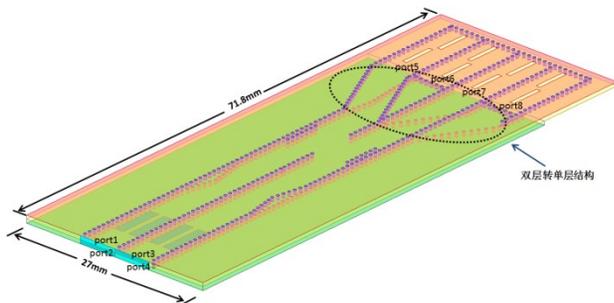
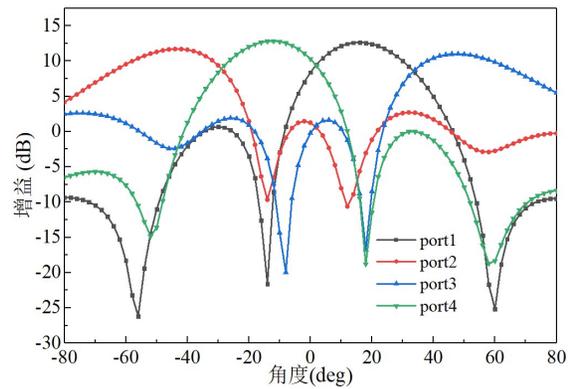
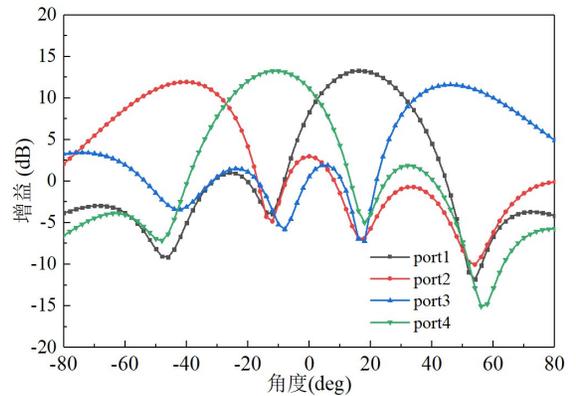


图6 多波束天线立体图

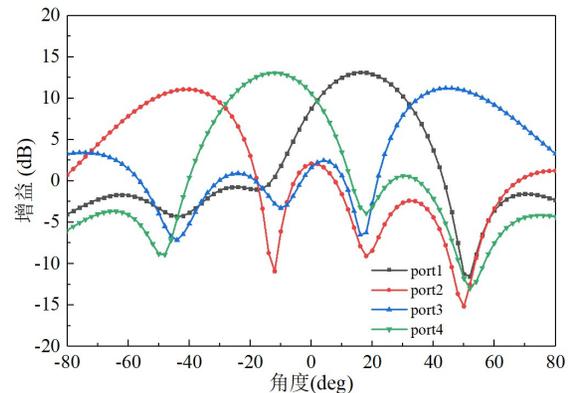
天线阵使用与波束形成网络相同的介质板,对该多波束天线进行仿真,得到其不同频率下的辐射方向图如图7所示。port1~port4 馈电时,在 27GHz、28GHz、29GHz 下,该多波束天线可分别产生 $(16^\circ, -43^\circ, 47.5^\circ, -12.5^\circ)$ , $(16^\circ, -40^\circ, 46^\circ, -12^\circ)$ , $(16^\circ, -42^\circ, 45^\circ, -12^\circ)$  4种波束指向。port1~port4 波束指向在三个频点上的误差分别为 $\pm 0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 1.5^\circ, \pm 0.5^\circ$ 。根据阵列天线理论计算的波束指向为 $14.5^\circ, 48.6^\circ, -48.6^\circ$ 和 $-14.5^\circ$ 。整个天线的物理尺寸为 $71.8\text{mm} \times 27\text{mm}$  ( $6.7\lambda_0 \times 2.5\lambda_0$ ),厚度为 $1.106\text{mm}$ 。



(a) 27GHz



(b) 28GHz



(c) 29GHz

图7 多波束天线辐射方向图(Realized Gain)

### 4 结论

本文基于SIW结构设计了 $4 \times 4$ 巴特勒矩阵,采用缝隙阵列天线作为辐射天线,波束形成网络具有良好的传输系数和隔离度,并可以为天线阵提供满足要求的递进相位差。多波束天线工作在27GHz-29GHz,相对带宽为7%,最大增益为13.29dB,波束扫描角度为 $\pm 46^\circ$ ,可实现 $16^\circ, -40^\circ, 46^\circ, -12^\circ$ 的4个波束指向,与理论计算最大偏差为 $8.6^\circ$ 。

**参考文献 (References):**

- [1] 杨清凌. 用于5G终端的毫米波多波束天线[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
- [2] Ji-Wei Lian, Yong-Ling Ban, Chun-Hua Xiao. Compact Substrate-Integrated  $4 \times 8$  Butler Matrix With Sidelobe Suppression for Millimeter-Wave Multibeam Application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(5):928-932.
- [3] Ji-Wei Lian, Yong-Ling Ban, Jia-Qi Zhu, Jin-Hong Guo, and Zhi Chen. Planar 2-D scanning SIW multibeam array with low sidelobe level for millimeter-wave applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7):4570-4578.
- [4] Chad Bartlett, Jens Bornemann. Cross-Configuration Substrate Integrated Waveguide Beamforming Network for 1D and 2D Beam Patterns[J]. IEEE Access, 2019, 7:151827-151835.
- [5] Ji-Wei Lian, He Zhu, Yong-Ling Ban. Uniplanar High-Gain 2-D Scanning Leaky-Wave Multibeam Array Antenna at Fixed Frequency [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7):5257-5268.
- [6] Qiang Sun, Yong-Ling Ban, Yong-Xing Che, and Zai-Ping Nie. Coexistence-Mode CRLH SIW Transmission Line and Its Application for Longitudinal Miniaturized Butler Matrix and Multibeam Array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11):7593-7603.
- [7] Qiang Sun, Yong-Ling Ban. Coexistence-Mode Composite Right/Left-Handed E-Plane Substrate Integrate Waveguide Butler Matrix [C]. 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2021: 1-3.
- [8] Qiang Sun, Yong-Ling Ban, Xing-Ying Zhao, et al. Folded C-Type SIW Butler Matrix [C]. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2019: 1-2.
- [9] 吕泽伟. 基于巴特勒矩阵的无源多波束天线设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
- [10] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:242-261.

编辑:龙学锋,李树锋