

基于 SIW 的宽角度波束扫描 CPW-CTS 天线阵设计

于英杰 杨雪霞 楼天 邱厚童

(上海大学通信与信息工程学院 上海 200072)

摘要: 本文基于基片集成波导 (substrate integrated waveguide, SIW) 提出了一种具有宽扫描角度的连续横向枝节 (continuous transverse stub, CTS) 频扫天线阵。沿纵向周期排列在共面波导馈线 (coplanar waveguide, CPW) 上的 SIW 结构 CTS 阵列向空间辐射电磁波。提出一种新型宽带 CPW 慢波结构作为天线阵的馈线,用以增大相邻天线单元之间的相位差,在 8.6~13.7 GHz 频带内,相位变化范围在 $89.3^\circ \sim -83.3^\circ$,从而使天线阵主波束随频率实现大范围扫描。为了减少天线阵的后向辐射,在其背面 $1/4$ 波长处加反射板。设计了一个 4 元 SIW 结构 CPW-CTS 天线阵,利用全波仿真软件 HFSS 进行了分析。结果表明,在 8.6~14 GHz 频带内天线阵反射系数小于 -10 dB,随频率增大实现 E 面 $-40^\circ \sim 56^\circ$ 的扫描,在各方向上的最大增益在 9.8~12.3 dBi。

关键词: 连续横向枝节 (CTS); 天线阵; 波束扫描; 宽带; 基片集成波导 (SIW); 共面波导 (CPW)

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of abeam scanning CPW-CTS array based on SIW with broad angle range

Yu Yingjie Yang Xuexia Lou Tian Qiu Houtong

(School of Electronic Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper presents a broadband continuous transverse stub (CTS) antenna array with wide scanning range based on substrate integrated waveguide (SIW). The SIW-CTSs radiators are periodically arranged on the coplanar waveguide (CPW). A novel broadband CPW slow-wave structure is proposed as the feedline to increase the phase difference of the adjacent antenna elements. Depending the phase variation from 89.3° to -83.3° within the frequency range of 8.6~13.7 GHz, a wide beam steering range depending on frequency is achieved. A reflector is located at one-fourth wavelength away from the antenna array to reduce the backward radiation. A 4-element CPW-CTS antenna array based on SIW is designed and simulated using the HFSS full-wave analysis software. The simulated results show that the frequency range of the reflection coefficient less than -10 dB is 8.6~14 GHz. The main beam of the antenna is scanned from -40° to 56° in E-plane with the frequency increasing. At every main radiation direction, the gain varies within the range of 9.8 ~ 12.3 dBi.

Keywords: continuous transverse stub (CTS); antenna arrays; beam steering; broadband; substrate integrated waveguide (SIW); coplanar waveguide (CPW)

0 引言

随着各种无线通信技术的迅速发展,需要天线具有快速而灵活的波束扫描能力。抛物面机械扫描天线扫描速度慢、体积大,难以满足这种需求,能够实现波束快速切换的电扫天线受到了广泛关注。根据波束扫描方式的不同,电扫天线分为相控阵天线和频扫天线。相控阵天线通过数字移相器、T/R 组件等控制天线阵中每个单元的馈电相位来实现波束扫描,这些有源器件使其结构复杂、造价昂贵^[1]。

频扫天线通过工作频率的改变使天线单元间的相位不同,从而实现天线波束指向的改变^[2-3]。频率扫描天线结构简单、成本低、体积小,且有利于实现系统的集成化和小型化。

20 世纪 60、70 年代,频扫天线阵多为波导缝隙天线。但这类天线阵体积和重量大、剖面高。随着平面印刷电路技术 (printed circuit board, PCB) 的逐渐成熟,基于微带和基于 SIW 波导缝隙的频扫天线阵得到快速发展。文献[4]串馈微带贴片天线,实现 32° 波束扫描角度。文献[5]设计的 SIW 缝隙天线,随频率的增大,主波束方向从 131° 变化

到 99° 。为了扩展频扫天线阵的扫描范围,慢波结构和左右手材料被引入到天线阵的设计中。文献[6]通过在 SIW 缝隙天线单元之间设计慢波结构来增大波束扫描角度,16 元天线阵在 24.3~26.7 GHz 的频带范围内实现 $-30^\circ\sim 30^\circ$ 扫描范围,天线阵最大增益为 14.4 dBi。文献[7]则将左右手材料加载到 SIW 缝隙天线阵中,可以实现 $-60^\circ\sim 66^\circ$ 的扫描,但 15 元天线阵的最大增益只有 12 dBi。

20 世纪 90 年代,美国休斯航空公司提出在平行板波导的上层金属板开连续横向开路枝节(continuous transverse stub, CTS)来设计天线阵^[8-9]。CTS 天线阵具有高增益、高辐射效率、低损耗、结构紧凑等优点。此后,不同类型的 CTS 天线阵被提出。同轴 CTS 天线可以实现全向辐射,也可以获得多频特性^[10-11]。在 CPW 传输线上开连续横向枝节可以得到单向辐射的 CPW-CTS 天线^[12-14]。为了实现波束扫描能力,文献[13]将铁电体材料作为移相器应用到 CPW-CTS 天线中,实现 E 面 $\pm 20^\circ$ 的扫描。在文献[14]中,通过加载超材料移相器,3 元 CPW-CTS 天线阵实现 $58^\circ\sim 124^\circ$ 的扫描。这些 CPW-CTS 天线都是在 CPW 传输线上人工焊接平行板枝节,加工复杂、精度低,且铁电体和超材料都增加了天线的损耗。

2014 年,Choe 等人提出 CTS 频扫天线阵,平板 CTS 枝节排列在 SIW 传输线上,18 元天线阵最大增益为 16.9 dBi,随频率变化实现 $-43^\circ\sim 3^\circ$ 扫描^[15]。2017 年本课程组提出具有宽扫描角的 CTS 频扫天线阵,通过同轴探针激励抛物面形成平面波,为平板 CTS 天线阵馈电,16 元天线阵随频率在 8.5~14.1 GHz 之间变化时具有 $52.2^\circ\sim -16.8^\circ$ 的扫描范围^[16]。SIW 具有低剖面、低损耗、低成本的优点^[17]。本文设计了一副具有宽扫描角度的 CPW-CTS 频扫天线阵,在 CPW 传输线的地板上开矩形缝隙,能量通过缝隙耦合到 SIW 结构的 CTS 并向自由空间辐射。提出新型慢波结构来增大天线阵主波束扫描范围。利用 HFSS 软件仿真了 4 元阵。整个天线采用 PCB 技术加工,结构简单,成本低。

1 CPW 慢波结构的分析与设计

频率扫描天线阵通过改变工作频率实现波束扫描。在线形阵列中,当天线阵工作在中心频率时,最大辐射方向出现在天线阵的法线上;当天线阵的输入频率改变时,最大辐射方向偏离法线方向。频扫天线阵相邻天线单元间距为 d ,则单元间产生的相差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_e} \quad (1)$$

式中: λ_e 为馈线的等效波导波长。当间距 d 一定时,改变工作频率即改变了 λ_e , $\Delta\varphi$ 随之改变,则天线阵的主波束方向就会发生改变。

慢波结构通过弯折传输线增加电流的传输路径,可使天线阵单元之间的相位差在有限的带宽内随频率变化显

著。设计慢波结构时需要考虑损耗和空间的占用。CPW 传输线具有损耗小、色散小、易于集成的优点。本文所提出的新型 CPW 慢波结构如图 1 所示,通过弯折中心导带来增加电长度。由于电磁能量主要在 CPW 的内外导体之间传输,因此在中心导带上设计 3 对长 l_1 、宽 w_2 的矩形凸起来进一步增加电磁波的传输路径。慢波结构的电长度为

$$L_e = L + 2l_1 + 6w_2 \quad (2)$$

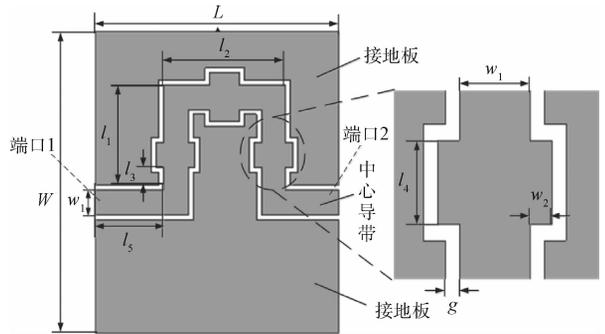


图 1 CPW 慢波结构

使用全波电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对所设计的 CPW 慢波结构进行分析。采用 F4B-2 介质板,相对介电常数 2.65,厚度 1 mm。CPW 慢波结构的具体尺寸为: $W=26.5$ mm, $L=10$ mm, $l_1=4.3$ mm, $l_2=5$ mm, $l_3=0.75$ mm, $l_4=1.2$ mm, $l_5=2.8$ mm, $w_1=1$ mm, $w_2=0.5$ mm, $g=0.1$ mm。仿真得到的反射系数 $|S_{11}|$ 和 S_{21} 的相位随频率变化如图 2 所示。在 8~15 GHz 的频带范围内 $|S_{11}| < -20$ dB,阻抗匹配良好。在 8.6~13.7 GHz 频带内, S_{21} 相位在 $89.3^\circ\sim -83.3^\circ$ 呈线性变化。因此,该 CPW 慢波结构可以使 CTS 天线随频率获得大角度扫描范围。由仿真得到在中心频率 11 GHz 时 S_{21} 的相位为 348° ,将其代入式(1)得到慢波结构的等效波导波长为 10.3 mm。所设计的 CPW 慢波结构可以根据公式快速地计算得到等效波导波长,并用于天线阵的设计。

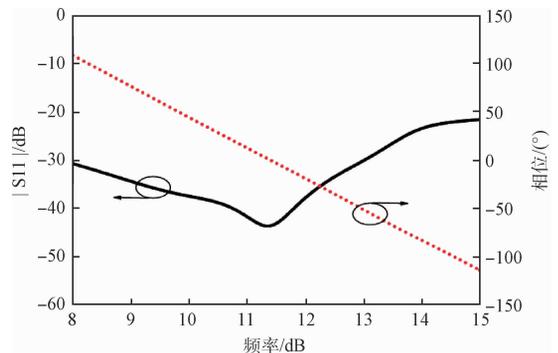


图 2 CPW 慢波结构的 $|S_{11}|$ 和 S_{21} 相位

2 基于 SIW 的 CPW-CTS 天线单元设计

基于 SIW 结构 CPW-CTS 天线单元,如图 3 所示。天

线由两层介质板构成,下层介质板上是 CPW 传输线,上层介质板上排列 CTS 辐射单元。在 CPW 传输线地板上开耦合缝隙,耦合缝隙与地板边缘相距 l_x ,并没有将地板完全切断,这样可以减少天线单元间的耦合。在耦合缝隙两边设计 SIW 结构 CTS。用 HFSS 仿真优化参数得到: $s=2\text{ mm}$, $h_1=3\text{ mm}$, $h_2=1\text{ mm}$, $l_x=5.5\text{ mm}$ 。

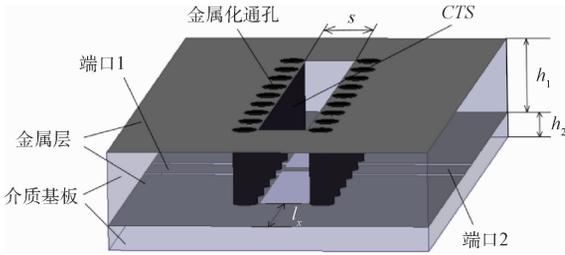


图 3 SIW 结构 CPW-CTS 天线单元

图 4 显示 SIW 结构 CPW-CTS 天线 S 参数的频响特性。 $|S_{11}| < -10\text{ dB}$ 的带宽为 $8.6\sim 13\text{ GHz}$ (40.7%),在这个频带内,差损 $|S_{21}|$ 小于 1.5 dB。天线单元辐射的功率比为

$$P_r = (1 - |S_{11}| - |S_{21}|) \times 100\% \quad (3)$$

由式(3),结合仿真 S 参数,得到天线单元辐射的功率比大于 28%。在串馈组阵时,能量从由输入端口进入天线阵,有 28% 的能量耦合到第 1 个阵元;而剩余能量的 28% 将进入第 3 个阵元。这样,能量逐级耦合到天线阵的每一个阵元。

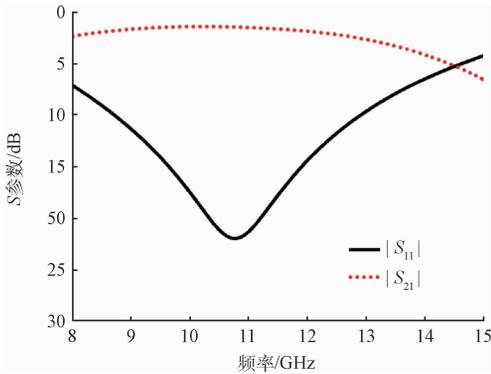


图 4 CPW-CTS 天线单元的 S 参数

图 5 是天线单元方向图,单元增益为 5.8 dBi。前后比为 5 dB,在组阵时将通过加反射板来减少后向辐射。

3 SIW 结构 CPW-CTS 频扫天线阵设计

结合前面提出的 CPW 慢波传输线和 SIW 结构 CTS 单元设计宽扫描角的频扫天线阵。当频率为 f_1 和 f_2 时,主波束分别指向 θ_{m1} 和 θ_{m2} 方向,天线阵的频带范围为 $f_1\sim f_2$,波束扫描范围为 $\theta_{m1}\sim\theta_{m2}$ 。根据以上要求可以得到方程组

$$\left. \begin{aligned} -2m\pi &= \frac{2\pi d \sin\theta_{m1}}{\lambda_1} - \frac{2\pi}{\lambda_{g1}} L_c \\ -2m\pi &= \frac{2\pi d \sin\theta_{m2}}{\lambda_2} - \frac{2\pi}{\lambda_{g2}} L_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

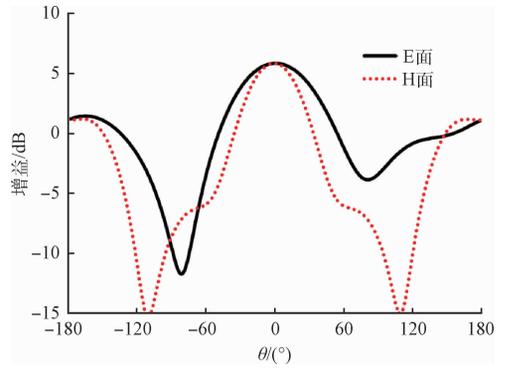


图 5 CPW-CTS 天线单元方向

式中: L_c 是相邻两辐射单元之间馈线电长度, d 是阵元间距, λ_1 和 λ_2 分别为频率 f_1 和 f_2 的自由空间波长, λ_{g1} 和 λ_{g2} 为相应的波导波长。在频扫天线阵中,给定频率和最大扫描角的情况下,为了抑制栅瓣, d 要满足

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin\theta_m} \quad (5)$$

式中: λ 为最大扫描角所对应电磁频率的自由空间波长, θ_m 为频带内的最大扫描角度。

基于 SIW 的 CPW-CTS 频扫天线结构如图 6 所示。将 SIW 结构 CTS 用 CPW 慢波线进行串馈,在天线背面 1/4 的位置放置反射板减少后向辐射。天线单元工作在 $8.6\sim 13\text{ GHz}$ 频带,保证天线阵最大扫描角不出现栅瓣,由式(5)取 $d=11.2\text{ mm}$ 。根据式(2)、(4)得到天线阵的波束扫描范围为 $-36^\circ\sim 54^\circ$ 。

用 HFSS 优化设计天线阵。从图 7 可以看出,天线阵 $|S_{11}| < -10\text{ dB}$ 的带宽为 $8.6\sim 14\text{ GHz}$ (47.8%),比天线单元带宽略大。这是因为在每个耦合缝隙处设计了宽为 w_m 的导带来调整天线的匹配。 w_m 对天线 $|S_{11}|$ 的影响如图 8 所示,匹配导带可以使天线阵在较宽的频带范围内获得良好的阻抗匹配。

在设计天线阵时,计算 $50\ \Omega$ CPW 传输线的中心导带宽为 1.7 mm 。由于相邻两个 CTS 单元之间的间距有限,若采用中心导带宽 1.7 mm 会导致慢波结构占用空间大,在弯折处的传输线将存在强耦合。因此,选取中心导带宽 1 mm ,这时 CPW 的特性阻抗为 $55.5\ \Omega$ 。为了使天线的输入阻抗为 $50\ \Omega$,在天线端口处设计 $1/4$ 波长阻抗变换器,长 $l_p=4.1\text{ mm}$,宽 $W_p=1.3\text{ mm}$ 。

图 9 是 SIW 结构 CPW-CTS 天线阵随频率变化的归一化波束扫描方向图。在 $8.6\sim 13.7\text{ GHz}$ 频率范围内,天线主波束扫描范围为 $-40^\circ\sim 56^\circ$ 。由式(4)计算得到的扫描角度为 $-36^\circ\sim 60.8^\circ$ 。仿真结果与计算结果基本吻合。由于在频率 14 GHz 时, d 不满足式(5),因此波束出现较大的栅瓣。天线阵的波束扫描角度和增益随频率变化如图 10 所示。在整个波束扫描范围内,天线阵的增益在 $9.8\sim 12.3\text{ dBi}$ 变化。

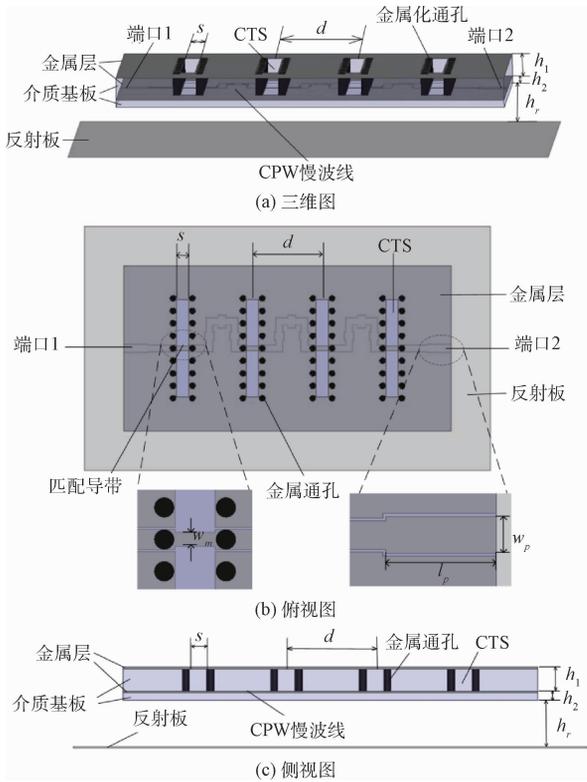


图6 基于SIW的CPW-CTS频扫天线阵结构

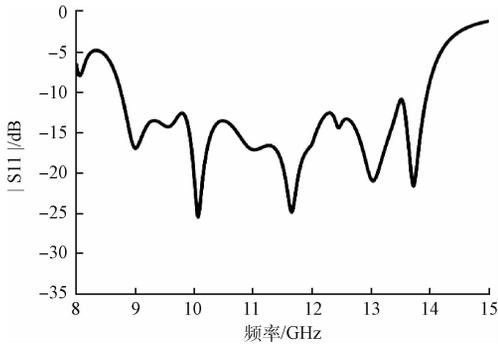


图7 SIW结构CPW-CTS天线阵|S₁₁|

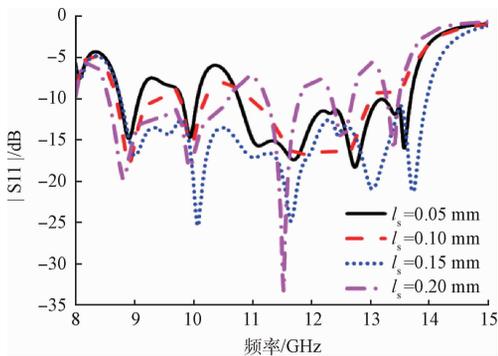


图8 匹配导带对天线阵|S₁₁|的影响

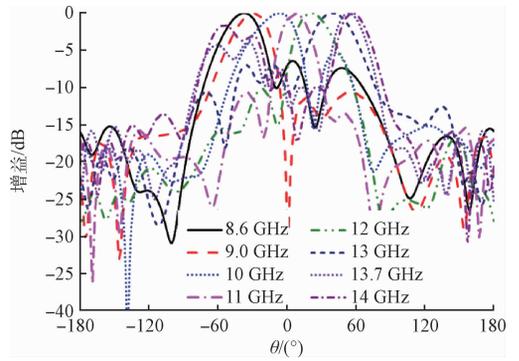


图9 SIW结构CTS天线波束归一化扫描方向图

文献[7]中的天线阵扫描角度达到126°,但15元天线阵的增益只有12 dBi。文献[15]在-43°~3°的扫描范围内,增益在11.6~17.8变化。相比文献[16],本文通过慢波结构提高了波束扫描范围。

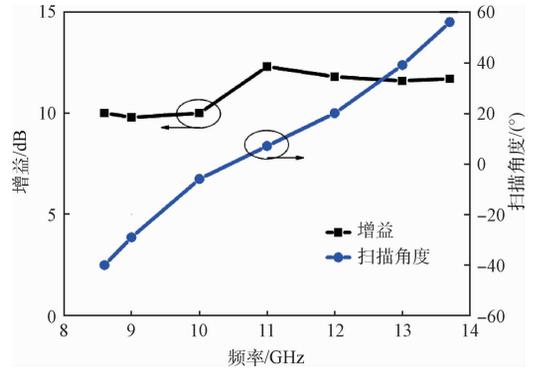


图10 扫描角度和增益随频率变化图

表1 频扫天线阵的性能对比

文献	频率范围/GHz	扫描角度/(°)	增益/dBi	天线阵元数
[4]	2.61~2.67	32	14	16
[5]	14.6~20.2	131~99	13.2~18.8	24
[7]	8.25~13	-60~66	12	15
[15]	27~36	-43~3	11.6~17.8	16
[16]	8.5~14.1	52.2~-16.8	15.1~18.1	16
本文	8.6~13.7	-40~56	9.8~12.3	4

4 结论

本文提出一种新型的宽带CPW慢波线为天线阵单元馈电,设计了一个新型的宽带宽扫描角的频扫天线阵。所提出的CPW慢波结构可以增加相邻天线单元的相位差,使天线阵随频率变化实现主波束大角度扫描,并且带宽大、损耗小。SIW结构CTS作为辐射单元,整个天线结构可以用PCB加工。天线阵背面加反射板减少天线的后向辐射。设计了一个4单元SIW结构CPW-CTS频扫天线阵。仿真结果表明,天线阵的相对带宽达到47.8%,在整个频段内

表1对比了各文献中频扫天线阵的性能。从表中可以看出,文献[4-5]的扫描角度只有32°。通过加载超材料,使

波束扫描角为 $-40^{\circ}\sim 56^{\circ}$ 。该天线阵表现出良好的辐射性能,结构简单且易于加工,在低成本频扫雷达中具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 林存银,周以国. X波段宽带 Vivaldi 相控阵天线的 设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8):19-23.
- [2] ZANDIEH A, ABDELLATIF A S. Low-cost and high efficiency antenna for millimeter-wave frequency scanning applications[J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2013, 12:116-119.
- [3] CUI L, WU W. Printed frequency beam-scanning antenna with flat gain and low sidelobe levels[J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2013(12): 292-295.
- [4] WANG H, NI J. A novel frequency scanning monopulse microstrip antenna array[C]. Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010: 1118-1121.
- [5] JAVANBAKHT N. Periodic leaky-wave antenna with transverse slots based on substrate integrated waveguide [C]. Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2016: 608-612.
- [6] CAO W, HONG W. Gain enhancement of beam scanning substrate integrated waveguide slot array antennas using a phase-correcting grating cover[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(9):4584-4591.
- [7] NASIMUDDIN, CHEN Z N. Substrate integrated metamaterial-based leaky-wave antenna with improved boresight radiation bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61 (7): 3451-3457.
- [8] ZHANG P, MITTRA R. Compact line source generator for low profile continuous transverse stub array antenna [C]. International Workshop on Antenna Technology (IWAT), 2016: 77-79.
- [9] LIU X L, CHENG Y J. Planar parallel-plate waveguide continuous transverse stub antenna array fed by substrate integrated waveguide divider[C]. IEEE Asia-Pacific Conference on Antenna and Propagation (APCAP), 2015: 283-284.
- [10] JOTHILAKSHMI P, RAJU S. Performance enhancement of continuous transverse stub(CTS) antenna array with monopole termination[C]. IEEE International Conference on Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010: 61-65.
- [11] JOTHILAKSHMI P, RAJU S. Miniaturised multiband two-element coaxial continuous transverse stub antenna for satellite C-band application [J]. IET Microwave Antenna and Propagation, 2014, 8(7): 474-481.
- [12] ISKANDER M F, LI Y. A phased CPW-CTS array with reconfigurable NRI phase shifter for beam steering application[C]. IEEE International Wireless Symposium (IWS), 2013:1-3
- [13] ISKANDER M F, KIM W. Antenna arrays technologies for advance wireless systems[C]. IEEE International Conference on Microwaves Communications Antennas and Electronics Systems, 2009.
- [14] LI Y, ISKANDER MF, ZHANG Z. A new low cost leakywave coplanar waveguide continuous transverse stub antenna array using metamaterial-based phase shifters for beam steering [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(7): 3511-3518.
- [15] CHOEH, LIM S. Millimeter-wave continuous transverse stub (cts) antenna array using substrate integrated waveguide (SIW) technology [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5497-5503.
- [16] YANG X X, DI L Q, YU Y Y. Low-profile frequency-scanned antenna based on substrate integrated waveguide [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017.
- [17] BOZZI M, GEORGIADIS A, WU K. Review of substrate integrated waveguide circuits and antennas[J]. IET Microwaves Antennas and Propagation, 2011, 5(8): 909-920.

作者简介

于英杰,上海大学通信与信息工程学院攻读电磁场与微波技术工学硕士学位,主要研究方向为波束扫描天线阵设计。

E-mail:yingjieyu2014@163.com

杨雪霞,2001年获上海大学博士学位。现为上海大学通信与信息工程学院教授,主要研究方向为天线、微波输能和计算电磁学。

楼天,上海大学通信与信息工程学院攻读电磁场与微波技术工学硕士学位,主要研究方向为波束扫描天线阵设计。