

## 低 RCS 宽带磁电偶极子贴片天线设计

张晨<sup>①</sup> 曹祥玉\*<sup>①</sup> 高军<sup>①</sup> 李思佳<sup>①</sup> 黄河<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

<sup>②</sup>(西安通信学院 西安 710106)

**摘要:** 该文设计了一种低雷达散射截面(RCS)的宽带磁电偶极子贴片天线,其中印刷在介质板上的金属贴片为电偶极子,3个金属过孔连接辐射贴片与金属地板构成磁偶极子。整个天线采用“T”型渐变馈电结构同时激励电偶极子与磁偶极子,天线的频带范围为7.81~13.65 GHz,覆盖了整个X波段。实测和仿真结果表明,通过在磁电偶极子贴片天线底面采用开槽技术并优化开槽的形状、大小、位置等变量,在天线工作频带范围内实现了RCS的减缩,最大减缩量达到了17.9 dB,同时天线保持了增益稳定不变,E面、H面方向图一致的特性。

**关键词:** 磁电偶极子天线;宽频带;开槽技术;低RCS;一致性

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)04-1012-05

DOI: 10.11999/JEIT150897

## Low Radar Cross Section and Broadband Magneto-electric Dipole Patch Antenna

ZHANG Chen<sup>①</sup> CAO Xiangyu<sup>①</sup> GAO Jun<sup>①</sup> LI Sijia<sup>①</sup> HUANG He<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

<sup>②</sup>(Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China)

**Abstract:** A low Radar Cross Section (RCS) and broadband Magneto-Electric (ME) dipole patch antenna from 7.81 GHz to 13.65 GHz covering the whole X band is designed and fabricated. Metal patches printed on the substrate form the electric dipoles, three metallic vias connected to the radiation patches and the metal ground account for the magnetic dipole radiation. The whole antenna is connected with a T-shaped feed structure which excites electric and magnetic dipoles simultaneously. Numerical and experimental results incident that the RCS of the ME dipole patch antenna can be reduced in the whole bandwidth which the largest value is up to 17.9 dB by cutting slots on the ground and optimizing the size, shape, position of the slots. Also, the antenna shows advanced performances such as stable gain and almost consistent pattern in E and H plane.

**Key words:** Magneto-Electric (ME) dipole antenna; Broadband; Cutting slot technique; low RCS; Consistency

### 1 引言

微带贴片天线以其低剖面、易共形等优点在战场通信、监视及其它作战平台上得到了广泛应用,但由于带宽窄,不能用于宽频天线系统,且E面、H面方向图差异较大,不易于组成天线阵<sup>[1,2]</sup>。

近年来,磁电偶极子天线得到了快速发展。其优势在于:宽带、低后瓣、低交叉极化,更重要的是辐射方向图在工作频带内能保持稳定、一致,这对于保证高品质的通信质量至关重要。2006年,文

献[3]首次提出了一种新型的宽带互补型磁电偶极子天线;之后,文献[4-8]提出了可以用于UWB通信的一种采用新型馈电方式的磁电偶极子天线,它们都具有良好的方向性、增益稳定、低后瓣以及低交叉极化的优点。但金属接地板带来的较大RCS限制了其在军事隐身领域的应用。国内外的学者针对减缩天线的RCS也提出过很多方案,但多数方案是以牺牲天线辐射性能为代价,如何在保持天线优良辐射特性的基础上,最大程度上减小天线RCS,是摆在众多学者面前的一个重要课题<sup>[9,10]</sup>。

开槽技术在天线RCS减缩中有着重要的应用<sup>[11-13]</sup>,本文在文献[14]的基础上,设计了一种新贴片形式的宽带磁电偶极子天线。该天线在X波段内具有稳定的方向图以及增益。同时,本文分析了开槽技术对该天线辐射和散射性能的影响,理论分析和仿真结果均表明:通过接地地板开槽,可以在保持天线辐射性能的同时,减缩带内和带外RCS。

收稿日期: 2015-07-28; 改回日期: 2015-11-27; 网络出版: 2016-02-19

\*通信作者: 曹祥玉 gjgj9694@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271100, 61471389, 61501494), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JMS003)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271100, 61471389, 61501494), Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (2012JMS003)

## 2 天线结构与与设计

本文设计了一种工作于 X 波段的“T”型渐变馈电结构的磁电偶极子贴片天线, 天线结构如图 1 所示。图中, 方形的电偶极子辐射贴片印刷在介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02 的 FR4-epoxy 介质板上, 介质板厚度为  $H=3$  mm, 介质板长  $L_s=40$  mm, 宽  $W_s=40$  mm, 贴片长度为  $L_1=3.8$  mm, 宽度为  $W=7$  mm, 平面辐射贴片间距  $L_0=2.3$  mm。3 个金属过孔同时连接两个辐射贴片和金属地板充当天线的磁偶极子部分, 整个天线采用“T”型渐变耦合馈线结构和导电通孔相连接, 导电通孔直径  $D=1.2$  mm, 馈线结构位于导电通孔顶部, 形成了共面波导传输线结构, 实现了  $50\Omega$  的输入阻抗, 极大提高了天线的匹配性能, 并同时激励电偶极子和磁偶极子, 实现了天线近乎一致的 E 面和 H 面方向图。天线的具体参数如表 1 所示。

## 3 天线仿真分析

利用基于有限元法的电磁仿真软件 Ansoft HFSS 14 对所设计的天线进行了仿真, 图 2(a)为天线的增益以及驻波曲线, 由图可知, 天线的工作频段为  $7.36\sim 12.66$  GHz( $S_{11}<-10$  dB), 相对带宽为 52.9%, 覆盖了整个 X 波段, 天线的增益在  $9\sim 12.5$  GHz 频段内相对稳定, 维持在 4.5 dBi 左右。图 2(b), 2(c), 2(d)为天线在 10 GHz, 11 GHz, 12 GHz 处的辐射方向图, 由图可知, 天线的 E 面和 H 面的方向图近乎一致。E 面的方向图相对于 H 面的方向图略有偏移, 这是由于平面辐射贴片结构不对称引起的。

## 4 低 RCS 磁电偶极子天线设计与仿真

本节将接地板开槽技术<sup>[15]</sup>引入到了天线的 RCS 减缩中, 分别仿真分析了不同的开槽形状, 开槽大小及位置对天线辐射及散射性能的影响。仿真结果表明, 接地板开槽是减缩天线 RCS 的有效方案, 可以在保证天线辐射性能不变的情况下, 尽可能减小天线 RCS。

### 4.1 开槽形状

接地板上开槽的形状对天线的散射特性影响较大, 图 3 为天线 3 种不同的开槽方式, 分别在地板上开出三角形槽、矩形槽与圆形槽进行对比。(三角形槽的边长、矩形槽的边长与圆形槽的直径均相等, 为 8 mm)

图 4 为 3 种不同开槽形状下天线的散射特性曲线, 当平面波垂直入射时( $\theta=0^\circ$ ), 3 种开槽方式在天线的工作频带内均得到了有效减缩, 其中, 开三角形槽的天线在 12.1 GHz 频点处 RCS 值最小, 但其余频点处效果均不明显, 开矩形槽与圆形槽的天线在整个频带范围内均有较明显的 RCS 减缩, 分析认为, 由于矩形槽的面积较大, 带来了明显的漏波效应, 因此其 RCS 减缩效果更好。当平面波斜入射时( $\theta=30^\circ$ ), 可以看出开圆形槽的天线效果较好, 在整个工作频带内天线的 RCS 值均得到了减缩, 这是由于在斜入射时, 漏波效应对于 RCS 值的影响减弱。斜入射时, 相较于开圆形槽的天线, 三角形槽与矩形槽的多棱角结构对平面波的反射较为剧烈, 导致其减缩效果变差。因此, 为了使天线达到最好的 RCS 减缩效果, 应在接地板上开圆形槽。

表 1 低 RCS 宽带磁电偶极子天线相关参数

天线参数	$H$	$D$	$L_0$	$L_1$	Lf2	$W$	$W_0$
参数值	3 mm	1.2 mm	2.3 mm	3.8 mm	0.1 mm	7 mm	5 mm
天线参数	$W_1$	Wf0	Wf1	Wf2	Lf1	$L_s$	$W_s$
参数值	1 mm	1 mm	2 mm	5.6 mm	2.2 mm	40 mm	$L_s$

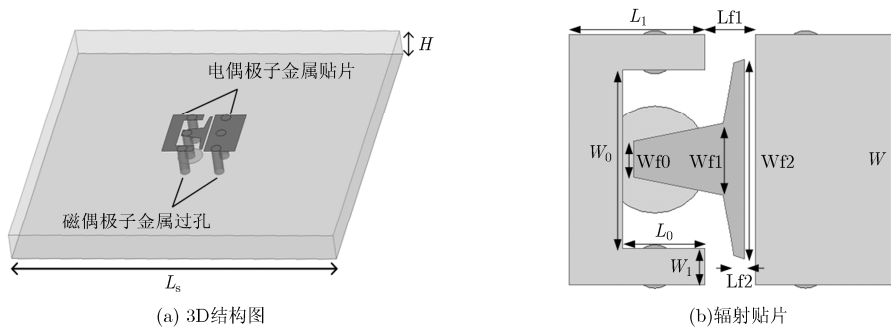


图 1 天线结构

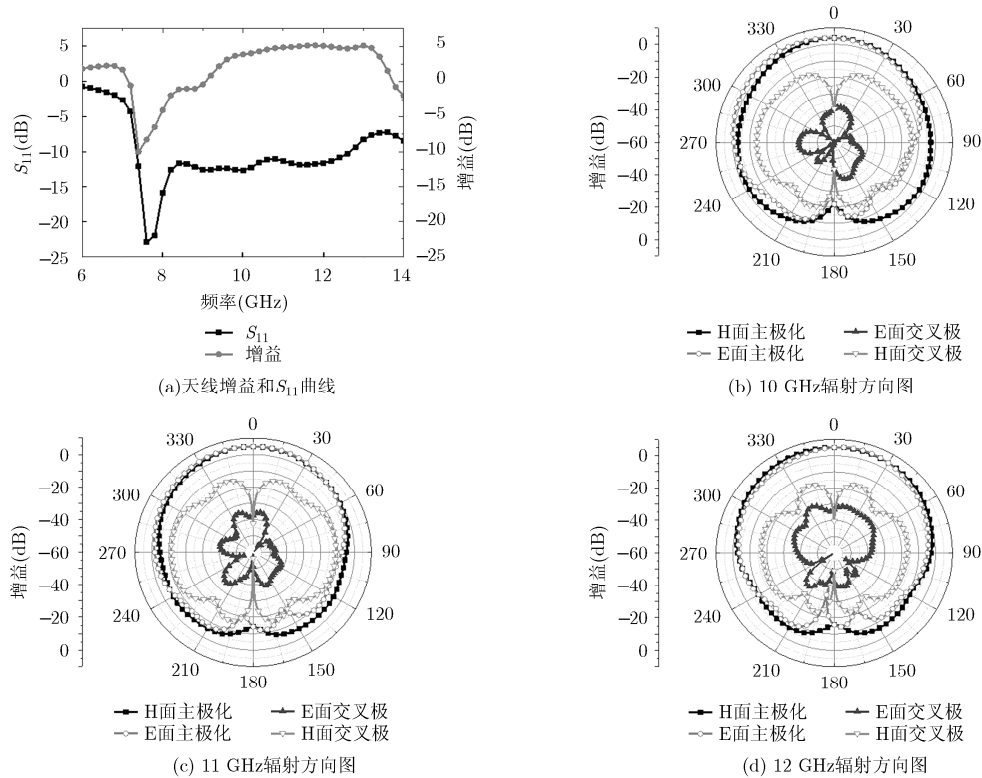


图 2 原始天线匹配及辐射特性

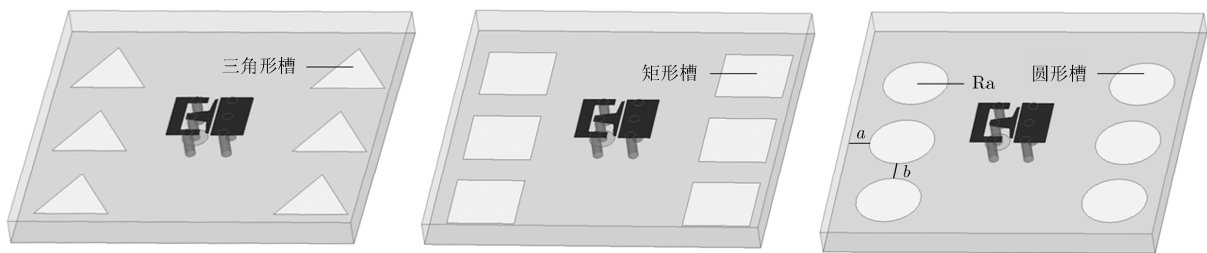


图 3 3种不同开槽方式

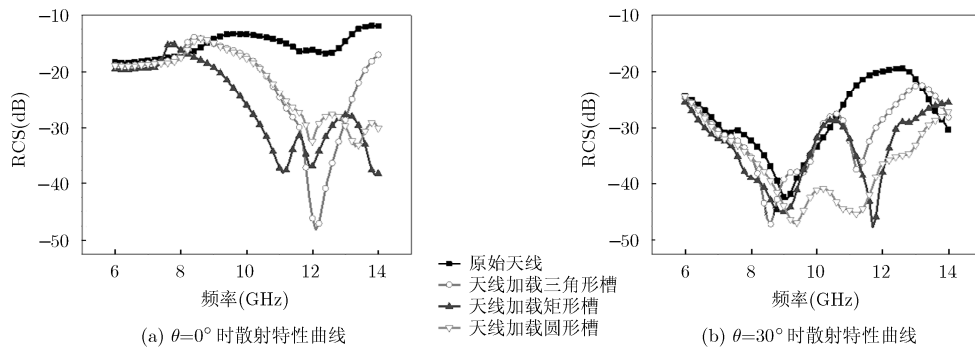


图 4 3种不同开槽方式下天线的散射特性曲线

### 4.2 开槽的大小以及位置

图 5 给出了天线的 RCS 值随着圆形槽与天线地板边缘之间的间距  $a$  变化而变化的曲线, 当平面波垂直入射时, 在频带范围 8~14 GHz 都实现了 RCS 值较大的减缩, 随着间距  $a$  的变大, RCS 值逐渐减

小, 在  $a=2.4\text{ mm}$  与  $a=3.2\text{ mm}$  处, RCS 减缩量最大相差 2 dB 左右。当平面波斜入射时, 这种规律则不是十分明显, 在 9~12 GHz 处时, 随着间距  $a$  的增大, RCS 值逐渐减小, 在  $a=2.4\text{ mm}$  时, 这种规律失效。而在 12 GHz 之后, 随着间距  $a$  的增大,

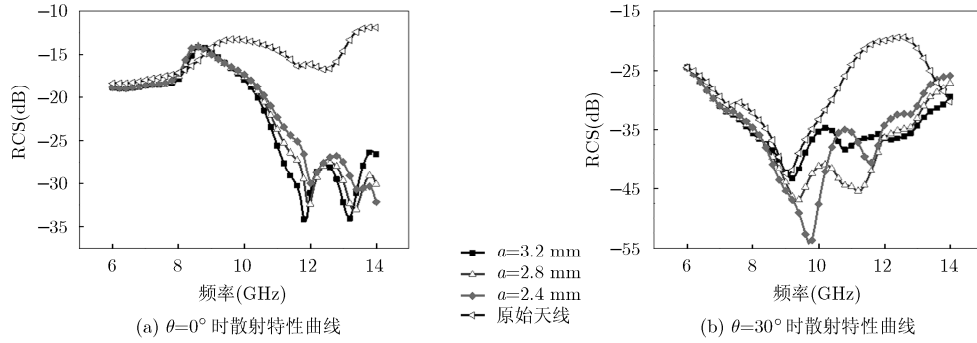


图5 间距  $a$  取不同值天线的散射特性曲线

RCS 值逐渐减小，因此，综合考虑垂直入射与斜入射的情况后，选取间距  $a=2.8$  mm。

为了使天线在整个工作频带范围内都有较为理想的 RCS 减缩，且仍保留原本磁电偶极子天线的优良特性，这就要求开槽大小合适，开槽过小可能会减小漏波效应，RCS 减缩效果不明显，而开槽过大则会影响斜入射时的 RCS 值，并且天线的辐射性能也会改变。当平面波垂直入射时，随着半径的增加，天线的 RCS 值也随之减小，在整个频带范围内都能实现不同程度的 RCS 减缩效果。当平面波斜入射时，规律基本保持不变，但在 9.1~10.9 GHz 时，随着  $Ra$  的逐渐增长，RCS 值却得到了增加。天线散射特性曲线如图 6 所示，依据优选原则，选取  $Ra=3.9$  mm。

### 5 加工实测

图 7 为对所仿真的天线进行了实物加工，并利用 Agilent N5230C 矢量网络分析仪对天线的相关辐射特性进行了测试，结果如图 8 所示。测试结果表明，天线的工作频带范围是 7.88~13.68 GHz，相对带宽为 53.8%，与仿真结果基本一致。

### 6 结论

本文设计了一种新型的低 RCS 贴片形式的宽带磁电偶极子天线，其工作频段覆盖整个 X 波段，为 7.81~13.65 GHz，整个天线具有良好的方向性、稳定的增益和较低的后瓣等优良性能。同时，在工作频带内也实现了较为理想的 RCS 减缩，较好地解决了该天线良好的辐射性能与低 RCS 之间的矛盾。

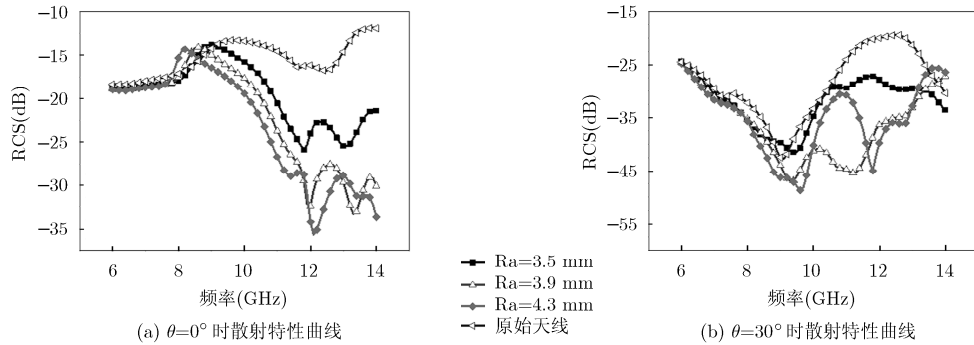


图6 开槽  $Ra$  取不同值天线的散射特性曲线

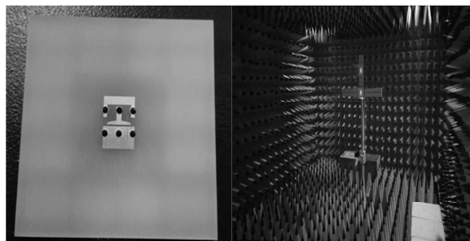


图7 加工图和测试图

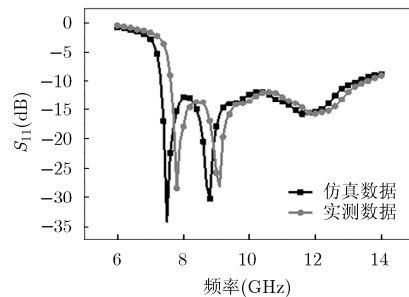


图8 仿真和实测的  $S_{11}$  曲线

## 参考文献

- [1] 张呈辉, 曹祥玉, 高军, 等. 宽频带宽波束磁电偶极子天线设计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 758-761. doi: 10.11999/JEIT140579.  
ZHANG Chenghui, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband and wide beam magneto-electric dipole antenna design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 758-761. doi: 10.11999/JEIT140579.
- [2] BAI Yanying, XIAO Shaoqiu, TANG Mingchun, *et al.* Wide-angle scanning phased array with pattern reconfigurable elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(11): 4071-4076. doi: 10.1109/TAP.2011.2164176.
- [3] LUK K M and Wong H. A new wideband unidirectional antenna element[J]. *Microwave Optical Technology Letters*, 2006, 1(1): 35-44.
- [4] 安文星. 新型宽带电磁偶极子微带天线的研究[D]. [博士学位], 北京邮电大学, 2012.
- [5] GE L and LUK K M. A magneto-electric dipole antenna with low-profile and simple structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(2): 140-142. doi: 10.1109/TAP.2013.2276924.
- [6] LI Mingjian and LUK K M. A wideband circularly polarized antenna for microwave and millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(3): 1872-1879. doi: 10.1109/TAP.2014.2298246.
- [7] CHEN S and LUK K M. A dual mode wideband MIMO cube antenna with magneto-electric dipoles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 5951-5959. doi: 10.1109/TAP.2014.2359492.
- [8] LI Mingjian and LUK K M. A different-fed magneto-electric dipole antenna for UWB applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 92-99. doi: 10.1109/TAP.2012.2220100.
- [9] LI Sijia, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Loaded metamaterial perfect absorber using substrate integrated cavity[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(21): 213703. doi: 10.1063/1.4881115.
- [10] LI Sijia, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Loading metamaterial perfect absorber method for radar cross section reduction based on the surface current distribution of guidewave slot array antennas[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(5): 399-406. doi: 10.1049/iet-map.2014.0490.
- [11] JIANG Wen, ZHANG Yang, DENG Zhaobin, *et al.* Novel technique for RCS reduction of circularly polarized microstrip antennas[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27(9): 1077-1088. doi: 10.1080/09205071.2013.800461.
- [12] WANG W T, GONG S X, WANG X, *et al.* Differential evolution algorithm and method of moments for the design of low-RCS antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 9(1): 295-298. doi:10.1109/LAWP.2010.2047837.
- [13] LI Sijia, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Multiband and broadband polarization-insensitive perfect absorber devices based on a tunable and thin double split-ring metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3523-3533. doi: 10.1364/OE.23.003523.
- [14] NG Kung bo, Wong Hong, SO kwok Kan, *et al.* 60 GHz plated through hole printed magneto-electric dipole antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(7): 3129-3136. doi: 10.1109/TAP.2012. 2196916.
- [15] 张明旭, 龚书喜, 刘英. 利用接地板开槽减缩微带贴片天线的 RCS[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 498-500.  
ZHANG Mingxu, GONG Shuxi, and LIU Ying. Reducing the RCS of microstrip patch antenna by cutting slots on the groundplane[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 498-500.
- 张 晨: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为微带天线、磁电偶极子天线、人工电磁材料等.
- 曹祥玉: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等.
- 高 军: 男, 1962年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电磁散射理论、电磁超材料、天线设计等.
- 李思佳: 男, 1987年生, 讲师, 博士, 研究方向为人工电磁材料、双极化天线设计等.
- 黄 河: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为人工电磁材料、通信天线、通信保密等.