

# 基于相位梯度的定向贴片天线设计

王冬骏, 张介秋\*, 余积宝

(空军工程大学理学院,西安,710051)

**摘要** 为了实现贴片天线在弹载末制导上的应用,提出了基于相位梯度的定向贴片天线。利用相位梯度超表面能够改变电磁波传播方向的特性,设计了一款辐射主波瓣大角度偏离法向的贴片天线。该天线由 7 个 H 型贴片组成,通过优化结构参数,得到了所需要的相位梯度。仿真和测试结果显示,由于相位梯度的引入,在工作频率为 9.6 GHz 时,天线主波瓣的最大增益方向偏离法向  $45^\circ$ 。

**关键词** 相位梯度;贴片天线;异常辐射

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.016

**中图分类号** TN823.17 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0085-04

## A Design of Directivity Patch Antenna Based on Phase Gradient

WANG Dongjun, ZHANG Jieqiu, YU Jibao

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to realize the application of patch antenna in missile-borne terminal guidance, a new directivity patch antenna based on the phase gradient is designed. This paper utilizes phase gradient metasurface for changing the characteristics of electromagnetic wave propagation in direction, and designs a new patch antenna whose main lobes are deviated from normal of patch antenna at large angle. The antenna consists of seven H-shaped patches, and a desired phase gradient is obtained by optimizing the structure parameters. The results show that with the introduction of phase gradient, the main lobes of the antenna deviated from normal are about  $45^\circ$  in maximum gain direction while operating frequency is 9.6 GHz.

**Key words:** phase gradient; patch antenna; anomalous radiation

在地空导弹等飞行器的整流罩内,通常布置有多个天线,用于主动制导、半主动制导等。但由于对雷达天线的带宽要求越来越宽,同时对天线罩的隐身性能也有一定要求,传统的半波壁天线罩难以做到对多付不同中心频率的天线同时具有良好的透波性能,因此将其中一些天线以贴片天线的形式移至天线罩外是一个比较好的选择。

通常为了减小飞行阻力,导弹等飞行器的整流罩都设计成小锥角的锥形结构,而贴片天线的辐射主波瓣通常都位于表面法向附近,这就使得这种贴片天线的主波瓣方向难以指向飞行器的正前方,而造成飞行器正前方的探测盲区。使用波导缝隙阵列天线虽可通过频扫来改变波瓣偏离法向的角度,但其可调节幅度较小,难以满足波瓣指向飞行器正

**收稿日期:** 2015-02-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471388)

**作者简介:** 王冬骏(1991-),男,江苏无锡人,硕士生,主要从事天线设计研究.E-mail: d-f1991@163.com.

**通信作者:** 张介秋(1962-),男,广东汕头人,教授,博士生导师,主要从事天线与雷达罩的研究.E-mail: zhangjq0@163.com.

**引用格式:** 王冬骏,张介秋,余积宝.基于相位梯度的定向贴片天线设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):85-88. WANG Dongjun, ZHANG Jieqiu, YU Jibao. A Design of Directivity Patch Antenna Based on Phase Gradient[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 85-88.

前方的要求。本文设计研制的这款贴片天线可望克服这些问题。

贴片天线是一种常用的印刷天线,具有重量轻、低剖面、易共形、结构简单和方便组阵的优点<sup>[1]</sup>。传统贴片天线的主瓣方向通常指向法线方向,为了使主波束偏离法向,文献[2~4]通过将波导阵列贴片化提出了一种基于共面波导的漏波天线;文献[5~6]将八木天线的引向器及反射器引入贴片天线;文献[7~9,10]分别提出了一种基于八木偶极天线和基于 Vivaldi 的宽带平板端射天线;文献[11]提出了一种多频带的平面准八木天线。但是这些天线都不是全金属地板,不符合弹体表面的实际要求。进一步研究,文献[12~15]提出了覆有全金属地板并可以进行频扫的漏波天线,其扫描角较宽,但整个天线尺寸十分长,不适于贴于弹体表面。因此,本文将超材料中梯度超表面的思想引入贴片天线设计,来实现贴片天线辐射方向的偏置。

相位梯度超表面(Gradient Metasurfaces, GMs)通常用于实现电磁波的散射方向或透射方向的偏折<sup>[16-17]</sup>。其主要原理是对电磁波产生不同的反射或透射相移的结构单元排列起来,使得相邻单元间的相位差相同,从而呈现出相位梯度,以此实现电磁波的反射/透射方向的控制。我们借鉴了这种思想,设计了一种类似于平面八木天线的背馈式定向贴片天线。研究表明,各贴片辐射时的相位呈梯度变化,从而使整个天线的辐射方向偏离法向。进一步的研究表明,当辐射贴片增加时,偏离角度将增加。因此,将相位梯度超表面引入贴片天线可以实现天线方向图的重构。

### 1 天线设计与分析

本文设计的贴片天线结构及其尺寸见图 1,天线正面由 7 个“H”型结构的贴片组成,背面覆以金属地板以模仿飞行器金属表面。天线金属部分为铜,厚度 16 μm,电导率  $\sigma=5.8 \times 10^7$  s/m,介质基板采用 Rogers RT5800,相对介电常数  $\epsilon_r=2.2$ ,损耗正切  $\tan \delta=0.0009$ ,厚度  $H=0.787$  mm。

设计的天线工作于 X 波段,根据贴片天线尺寸计算公式计算得出  $L_0=8.5$  mm,为保证辐射效率且不出现在高次模辐射,具体设计尺寸为  $W_0=10.8$  mm,  $W_s=30$  mm,  $L_s=80$  mm,  $L_1=7.5$  mm,  $L_2=5.95$  mm,  $L_3=11.55$  mm,  $G_{ap}=0.5$  mm,  $D=1.75$  mm,  $W_1$  至  $W_7$  分别为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.4、8.8、10.2 mm。

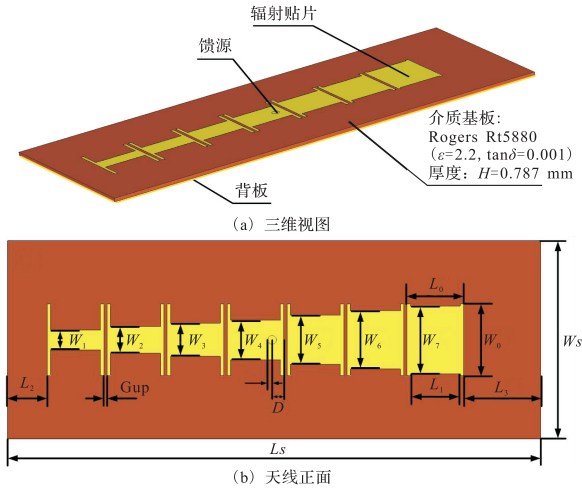


图 1 天线结构图

Fig.1 The structure of antenna

基于相位梯度的原理,相邻结构间的相位差  $\Delta\varphi$  是一定的<sup>[18]</sup>。所选的“H”型结构是为了适当缩小天线尺寸,抑制高次模且方便调控,适于作为梯度超表面的原始结构。设计天线采取背馈的方式对中间的贴片进行馈电,中心贴片首先进行辐射,即中间贴片相位  $\varphi_4=0$ 。其他贴片通过近场耦合,由中心贴片进行馈电。当周围贴片收到激励时,由于距离中心贴片的距离不同且设计的  $W$  值不同,各贴片产生辐射时相位不同,即  $\varphi_1 \sim \varphi_7$  各有差距,但  $\Delta\varphi$  相同。新天线的  $\Delta\varphi$  设计约  $2\pi/5$ ,整个天线辐射时将产生一个水平的波矢,大小与法向波矢相同,故最终的辐射方向将偏离法线方向约  $\pi/4$ 。

### 2 仿真与测试结果

采用基于商业电磁软件 CST 微波工作室的频域求解器,对新的定向贴片天线进行了仿真。仿真结果表明,以回波损耗低于 -10 dB 为基准,天线工作在 9.0~10.2 GHz,在 9.6 GHz 处谐振最强烈。为了证实计算机的仿真结果,加工了实物,见图 2。用 Aglient 公司生产的矢量网络分析仪进行了测试。图 3 为回波损耗  $S_{11}$  的仿真与测试结果,二者基本一致。



图 2 定向贴片天线实物图

Fig.2 Picture of the directivity patch antenna

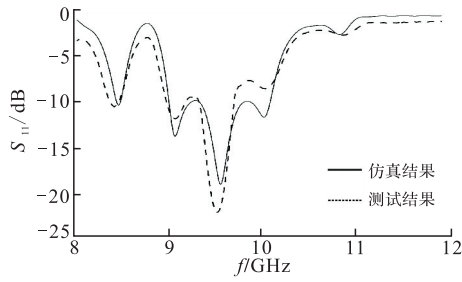


图 3 S<sub>11</sub> 仿真与测试结果

Fig.3 The result of simulation and measurement of return loss

由于相位梯度的原理,所设计天线的方向性将与法线方向不同,为了验证这一特性,在其工作带宽内选取了谐振最强烈的 9.6 GHz 这一频点,给出了其二维的 E 面辐射方向图,见图 4。从图中可以看出,天线辐射方向的主瓣偏离法线方向约 45°,最大增益为 9.12 dB,半功率波束宽度为 50°,主旁瓣抑制比为 8 dB,低于一般贴片天线,但可通过组阵的形式得以提高,来满足实际需求。

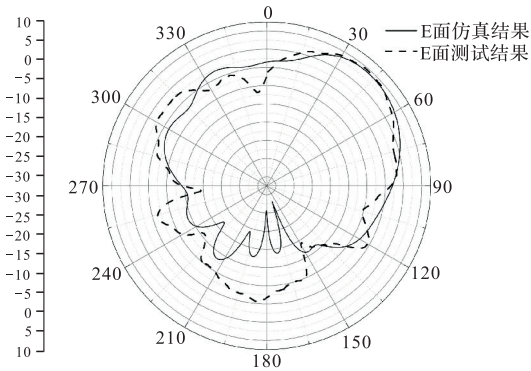
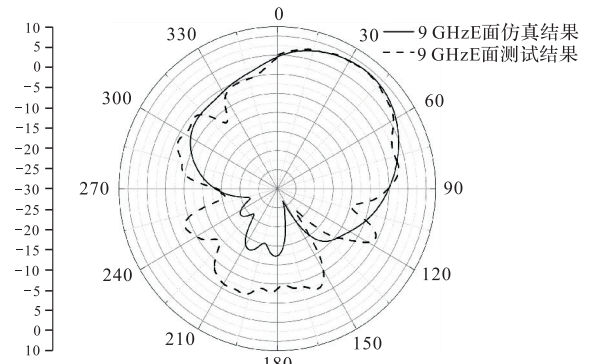


图 4 9.6 GHz E 面辐射方向

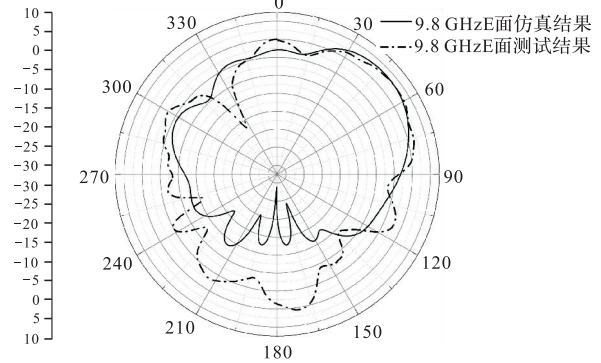
Fig.4 The E-plane pattern at 9.6 GHz

图 5(a)为天线 -10 dB 下边频(9.0 GHz)E 面辐射方向图。其主瓣偏离法线方向 38°,增益为 8.3 dB。图 5(b)为天线 -10 dB 上边频(9.8 GHz) E 面辐射方向图,主瓣偏离法线方向 48°,增益为 8.4 dB。

从图 5(a)、(b)中不难看出其波瓣的 -3 dB 处的最大角度达到约 70°,如果加上天线罩的倾斜锥角 15°左右,则其 -3 dB 波瓣很接近 90°,即飞行器的正前方。因此本文设计的天线具有很好的端射特性,适合用于锥形飞行器的贴片天线。



(a) 下边频9.0 GHz天线辐射E面方向



(b) 上边频9.8 GHz天线辐射E面方向

图 5 天线的上下边频方向图

Fig.5 The E-plane pattern at edge frequency

### 3 结语

基于相位梯度的定向贴片天线是一类新型的定向天线,相比于已有的波导缝隙阵列天线具有剖面低、重量轻、易加工、易共形和效率更高的特点。本文所设计的定向贴片天线工作于 X 波段,最大增益达到 9.12 dB,辐射方向与法线方向成 45°夹角,波瓣 -3 dB 的最大角度达到 70°,若考虑到锥形罩的倾角,其 -3 dB 处最大角几乎能够到达导弹等飞行器的正前方,因此在弹载天线上具有潜在的应用价值。

#### 参考文献(References):

[1] POZAR D M. Microstrip Antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(1):79-91.  
 [2] GRBIC A, ELEFTHERIADES G V. Leaky CPW-based Slot Antenna Arrays for Millimeter-Wave Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2002, 50(11):1494-1504.

- [3] CHEN T L, LIN Y D, Microstrip Leaky-Wave Antenna Fed by Short-End CPW-to-Slot Transition[J]. Electronics Letters, 1999, 35(2):100-101.
- [4] MEHDIPOUR A, ELEFThERIADES G V, Leaky-Wave Antennas Using Negative - Refractive Index Transmission-Line Metamaterial Supercells[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 3929-3942.
- [5] 郭蓉, 曹祥玉, 袁子东, 等. 一种新型宽带定向贴片天线设计[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 244102. GUO Rong, CAO Xiangyu, YUAN Zidong, et al. Design of a Novel Wideband Directivity Patch Antenna[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(24):244102. (in Chinese)
- [6] 曹卫平, 田国涛, 李思敏. 基于左右手传输线的贴片八木天线[J]. 微波学报, 2011, 27(2): 56-59. CAO Weiping, TIAN Guotao, LI Simin. A New Patch Yagi Antenna Based on Right-Left Handed Transmission Line[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(2):56-59. (in Chinese)
- [7] DEAL W R, KANEDA N, QIAN J S Y, et al. A New Quasi-Yagi Antenna for Planar Active Antenna Arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(6): 910-918.
- [8] KANEDA N, QIAN Y, ITOH T. A Novel Yagi - Uda Dipole Array Fed by a Microstrip-to-CPS Transition[C]//Asia-Pacific Microwave Conference, Japan, 1998:1413-1416.
- [9] QIAN Y, DEAL W R, KANEDA N, et al. A Uniplanar Quasi-Yagi Antenna with Wide Bandwidth and Low Mutual Coupling Characteristics[C]//IEEE Antennas and Propagation International Symposium, IEEE, 1999:924-927.
- [10] YNGVESSON K S, KORZENIOWSKI T L, KIM Y, et al. The Tapered Slot Antenna-A New Integrated Element for Millimeter-Wave Applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1989, 37(2): 365-374.
- [11] WU S J, KANG C H, CHEN K H, et al. A Multi-band Quasi-Yagi Type Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 593-596.
- [12] MARTINEZ-ROS A J, GOMEZ-TORNERO J L, GOUSSETIS G. Planar Leaky-Wave Antenna with Flexible Control of the Complex Propagation Constant[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2012, 60(3):1625-1630.
- [13] CHENG Y J, GUO Y X, BAO X Y, et al. Millimeter-Wave Low Temperature Co-fired Ceramic Leaky-wave Antenna and Array Based on the Substrate Integrated Image Guide Technology[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2014, 62(2):669 - 676.
- [14] LIU J, TANG X, LONG Y, Substrate Integrated Waveguide Leaky Wave Antenna with H-Shaped Slots[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2012, 60(8): 3962-3967.
- [15] 汪霆雷, 徐琰, 李贵泉, 等. 基于左手传输线的波束扫描微带漏波天线[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(4):701-705. WANG Tinglei, XU Yan, LI Guiquan, et al. Microstrip Leaky-Wave Antenna for Beam Scanning Based on Left-Handed Transmission Line [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(4):701-705. (in Chinese)
- [16] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. Science, 2011, 334(6054) : 333-337.
- [17] AIETA F, GENEVET P, YU N F, et al. Out-of-Plane Reflection and Refraction of Light by an Isotropic Antenna Metasurfaces with Phase Discontinuities[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1702- 1706.
- [18] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Flat Optics: Controlling Wavefronts with Optical Antenna Meta-Surfaces[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(3): 4700423.

(编辑:姚树峰)