

微带线-槽线馈电缝隙等角螺旋天线设计

方庆园^① 金铭^{*②} 宋立众^② 韩勇^② 乔晓林^②

^①(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

^②(哈尔滨工业大学(威海) 威海 264209)

摘要: 被动雷达导引头为探测与跟踪目标可采用宽带等角螺旋天线, 针对降低等角螺旋天线剖面, 该文提出一种低剖面背腔式微带线-槽线馈电缝隙等角螺旋天线。微带线-槽线巴伦(Balun)中渐变微带线将同轴线激励的不平衡电场最终转化为槽线处平衡电场。实测结果表明, 该缝隙等角螺旋天线实现了 1:9 的电压驻波比(VSWR)带宽, 良好的辐射方向图与圆极化特性。在天线背面加入高度仅有 $0.05\lambda_L$ (λ_L 为最低工作频率所对应自由空间中波长) 的反射腔, 腔内放置矩形环状吸波材料, 有效拓展了天线低频段带宽。测试结果表明带有反射腔的缝隙等角螺旋天线实现了 1:6.4 的电压驻波比带宽, 天线增益大于 4 dB, 良好的圆极化与方向图特性。平面化、一体化的馈电方式与低剖面反射腔有效降低了缝隙等角螺旋天线剖面, 测试结果验证了该文所提出的微带线-槽线巴伦馈电缝隙等角螺旋天线设计方法的有效性。

关键词: 宽带天线; 被动雷达导引头; 缝隙等角螺旋天线; 微带线-槽线巴伦

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)01-0228-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00486

Design of Slot Equiangular Spiral Antenna Fed by Microstrip to Slotline

Fang Qing-yuan^① Jin Ming^② Song Li-zhong^② Han Yong^② Qiao Xiao-lin^②

^①(School of Electronics Information on Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

^②(Harbin Institute of Technology at Weihai, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

Abstract: Wideband equiangular spiral antennas are typically applied to detection and tracing of passive radar seeker. In order to reduce the height of the equiangular spiral antenna, a low-profile slot equiangular spiral antenna fed by a microstrip to slotline and backed by a cavity is proposed. This microstrip to slotline Balun (unbalance to balance) transforms unbalanced electrical distribution produced by coaxial line into balanced electrical distribution to feed the slot equiangular spiral antenna. Measure results indicate that a wide band (1 : 9) of Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), good radiation pattern and circular polarization are realized. The height of back cavity for a unidirectional radiation is $0.05\lambda_L$ (λ_L is the wavelength of lowest operation frequency). Lower working frequency band is expanded by filling the back cavity with a ring-shaped rectangular absorber. Measured results show that a frequency band of 1: 6.4 (voltage standing wave ratio VSWR below 2), better than 4 dB antenna gain, good circular polarization and radiation pattern are achieved. Planar feed structure and shallow cavity contribute to a low-profile slot equiangular antenna. Measured results verify the effectiveness of the microstrip to slotline Balun used to feed the slot equiangular slot antenna.

Key words: Wideband antennas; Passive radar seeker; Slot equiangular spiral antenna; Microstrip to slotline Balun

1 引言

被动雷达导引头为探测与跟踪目标一般采用宽带天线。等角螺旋天线具备宽频带、高增益、宽波束、圆极化等特性, 因此适用于被动雷达导引头天线系统^[1]。但导引头内局促的天线安装空间迫切要求降低天线剖面, 同时集成化、一体化的天线设计能

避免人工焊接带来的误差。因此低剖面、一体化的等角螺旋天线设计有重要意义。

等角螺旋天线为了实现平衡馈电, 需要采用不平衡到平衡的转换装置-巴伦(unbalance-balance Balun)^[2]。通常使用超宽带微带线渐变巴伦^[3]。巴伦终端与天线两臂焊接相连。此种馈电方式缺点是巴伦与天线平面垂直, 整体剖面高, 机械紧固性低, 且在关键平衡馈电点处引入了人工焊接误差。弯折巴伦从一定程度上降低了巴伦剖面^[4], 但巴伦所在平

2013-04-15 收到, 2013-09-10 改回

国家自然科学基金(61171181)资助课题

*通信作者: 金铭 hit0987@sohu.com

面仍与天线平面垂直^[5]，天线剖面降低程度有限。

Eubanks 等人^[6]设计了平衡微带线馈电椭圆极化的等角螺旋天线。微带线与螺旋臂之间的耦合不可避免地影响了天线与馈线之间的匹配。为实现螺旋天线单向辐射，可以在天线背面加反射腔或采用高介电常数介质板^[7]。对于电流辐射的天线，反射腔高度为 $\lambda/4$ ，是窄带结构破坏了等角螺旋天线的超宽带特性。尤其是当反射腔高度降低时，天线低频段的阻抗特性、方向图等特性会受到严重影响。可在腔内填充吸波材料消除低频段反射腔对天线的影
响^[8]。也可在天线背面加入 EBG 结构^[9,10]实现天线的单向辐射。Nurnberg 等人^[11]研究了缝隙阿基米德螺旋天线。若反射腔感应电流不影响缝隙中电磁场分布，可采用极低剖面反射腔^[12]，研究表明反射腔高度会影响天线圆极化特性。Nakano 等人^[13]仿真计算表明缝隙螺旋天线的输入阻抗对缝隙外金属板直径不敏感。

本文提出了一种微带线-槽线巴伦馈电缝隙螺旋天线。渐变微带线以等角螺旋天线一条臂为地板，将同轴线所馈入的不平衡电场转化为槽线处平衡电场。微带线终端开路，采用扇形枝节减小终端反射。天线底面加入一个高度为 $0.05\lambda_L$ (λ_L 为 2 GHz 所对应自由空间下波长)的矩形反射腔，实现了天线单向辐射。反射腔内放置矩形环状吸波材料扩展了天线低频段带宽。文中对数值仿真结果进行了分析，且实测数据表明本文所提出的带有反射腔的微带线-槽线馈电缝隙等角螺旋能够满足工程需要，实现了超宽带低剖面单向辐射。

2 缝隙等角螺旋天线设计

2.1 缝隙等角螺旋天线结构

Dyson^[14]提出的等角螺旋天线一条臂在极坐标下的方程为

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_0 e^{a\varphi} \\ r_2 &= r_0 e^{a(\varphi-\delta)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

r_0 为初始半径， a 为螺旋增长率， φ 为极坐标系下的角度。另外一条臂由式(1)旋转 180° 得到。 r_0 由最高工作频率来决定^[15]，一般取 $r_0 = \lambda_H / 4$ ，螺旋臂最大半径由最低工作频率决定，一般取 $r_m = \lambda_L / 4$ 。为使导体螺旋臂与臂的间隙形成自互补结构，取 $\delta = 90^\circ$ 。缝隙等角螺旋天线与导体等角螺旋互为互补结构如图 1 所示。若忽略导体螺旋臂起始位置处扇形导体，当等角螺旋天线半径趋向于无穷大时，导体螺旋臂与缝隙螺旋臂互补。图 1 中 r_m 表示等角螺旋天线最大半径， r_0 为最小半径， φ_s 为螺旋臂初始角度。该等角螺旋天线的具体参数如表 1 所示。

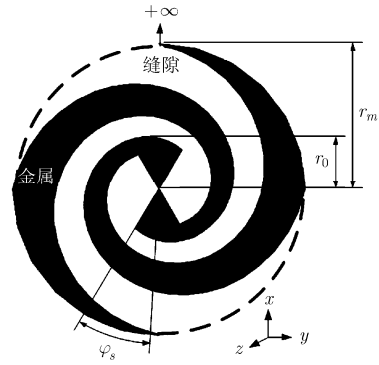


图 1 互补等角螺旋天线结构示意图

表 1 缝隙等角螺旋天线参数

变量名	变量值
a	0.221
r_0	15 mm
r_m	42.5 mm
φ_s	$-\pi/6$ rad

2.2 微带线转槽线馈电结构设计

槽线是一种平衡的馈电结构^[16]，在此采用渐变微带线-槽线对缝隙螺旋天线馈电，如图 2 所示。在微带线始端由同轴线激励，渐变微带线沿螺旋臂向内逐渐延伸进行阻抗变换，终端为扇形开路枝节。微带线与螺旋天线两臂分别印刷于介质板两侧(介质板采用 Rogers 5880，介电常数 2.2，厚度 0.508 mm)。

微带线电场如图 3(a)所示，微带线转槽线处电场如图 3(b)所示。以微带线中心(图 3(b)中微带线如虚线所示)为界，槽线上下均分为两个缝隙，两缝隙中电场相同，相当于微带线激励两个并联缝隙。

图 2(b)所示结构可看作微带线馈线到槽线的转化，由槽线给缝隙天线平衡馈电。通常微带线地板宽度为微带线宽度的 8~10 倍，在此微带线地板不满足该准则，且槽线也非标准槽线结构。此处微带

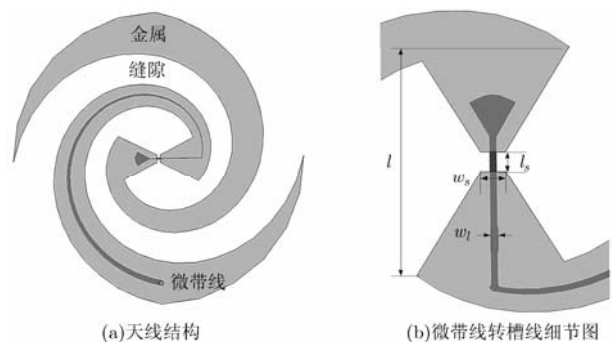


图 2 微带线转槽线馈电缝隙等角螺旋天线

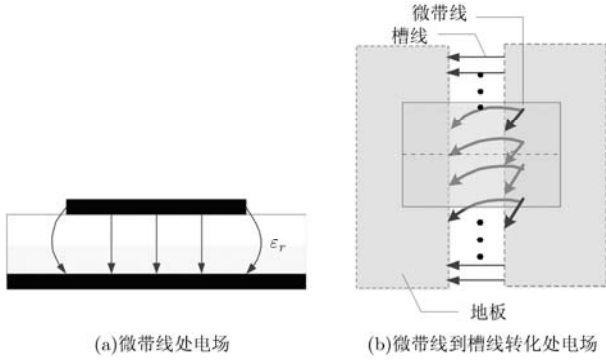
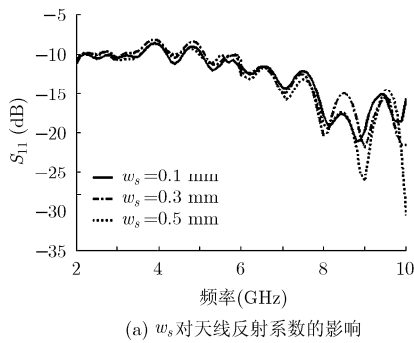


图 3 微带线到槽线转化处电场示意图

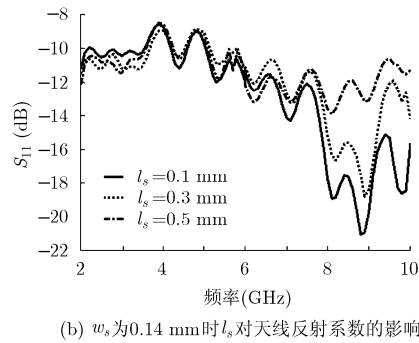
线与槽线可认为是两种传输线的近似，通过数值仿真确定微带线与槽线物理参数。

3 缝隙等角螺旋天线仿真与测试结果与分析

微带线-槽线处各参量定义如图 2(b)所示，设计



(a) w_s 对天线反射系数的影响



(b) w_s 为 0.14 mm 时 l_s 对天线反射系数的影响

图 4 不同槽线参数对应的天线反射系数仿真结果

表 2 微带线转槽线处各参数值

变量名	变量值(mm)
w_l	0.15
w_s	0.14
l_s	0.20
l	25.44

试电压驻波比(VSWR)。VSWR 测试结果与仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可见在 1.4~13 GHz 频段内基本上 VSWR 小于 2，实现了 1 : 9 的阻抗带宽，由于仿真天线模型为简化模型，仿真结果与测试结果略有偏差。

测得的不同频率下天线增益如图 7 所示。超宽带喇叭天线分别发射水平与垂直极化电磁波，得到被测天线在这两种正交极化状态下的电场数据。设接收到的水平极化与垂直极化分别为 E_H 与 E_V ，经极化基变换得到的左旋极化与右旋极化分量^[2]为

w_s 与 l_s 以使微带线特性阻抗与槽线特性阻抗匹配。仿真得到螺旋缝隙天线(包含槽线)的输入阻抗为 200 Ω 。确定最初 w_l 为 0.15 mm，此线宽对标准微带线来说特性阻抗约为 145 Ω 。不同 w_s 与 l_s 对天线反射系数的影响如图 4 所示。

如图 4(a)所示当 w_s 减小时低频段天线反射系数降低，由第 2 节分析知微带线-槽线处的微带线为准微带线，它的特性阻抗与微带传输线特性阻抗有所不同。当微带线地板宽度减小即 w_s 减小时，微带线特性阻抗增加，与天线的输入阻抗 200 Ω 更接近，因此反射系数降低。如图 4(b)所示当 w_s 为 0.14 mm， l_s 减小时天线反射系数在频率大于 5 GHz 时有所降低，因为 l_s 减小时槽线特性阻抗减小，进而使得天线输入阻抗减小与微带线能够更好地匹配。通过仿真优化最终确定微带-槽线处各参数如表 2 所示。

依据上述优化结果加工的缝隙等角螺旋天线如图 5 所示。采用安捷伦矢量网络分析仪 E8363B 测

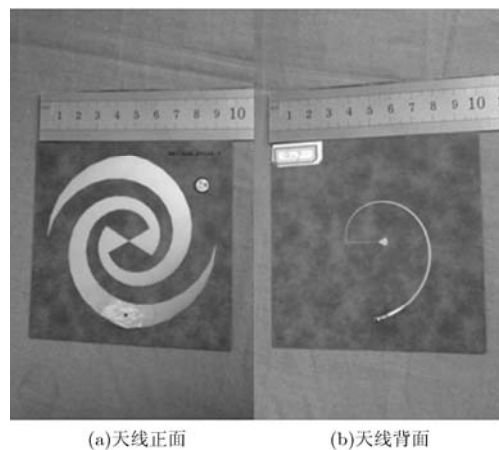


图 5 缝隙等角螺旋天线实物图

$$E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} E_H - \frac{1}{\sqrt{2}} jE_V \tag{2}$$

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} E_H + \frac{1}{\sqrt{2}} jE_V \tag{3}$$

待测天线的轴比(AR)为

$$AR = \frac{\|E_L\| + \|E_R\|}{\|E_L\| - \|E_R\|} \quad (4)$$

测得不同频率下天线轴比方向图如图 8 所示。

由图 7 可得天线增益在工作频率内均大于 4 dB，随着频率升高增益有所增加，在 10 GHz 处为 6 dB。测得该天线归一化功率方向图在 yoz 平面与

xoy 平面内的 3 dB 波束宽度均大于 60° ，具有良好的对称性。由图 8 可见 3 GHz 时在 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内 AR 均小于 3 dB，天线在该频段内能够实现良好的圆极化特性。随着频率升高 AR 略有升高，在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 范围内 AR 均小于 5 dB，属工程中可接受范围内。

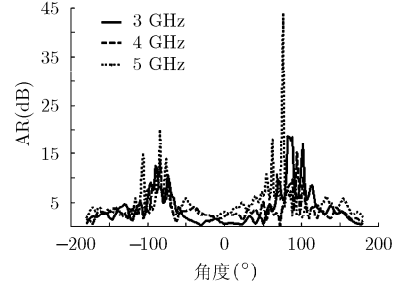
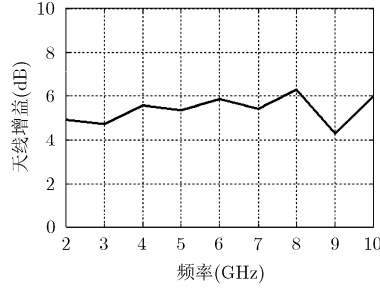
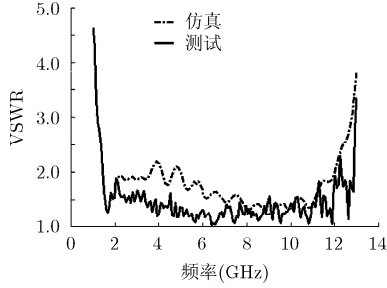


图 6 缝隙等角螺旋天线驻波比仿真与测试结果

图 7 缝隙等角螺旋天线增益测试结果

图 8 缝隙等角螺旋天线轴比方向图测试结果

4 带反射腔的低剖面缝隙等角螺旋天线

被动雷达导引头探测前方目标需要天线单向辐射。本文所设计的缝隙等角螺旋天线，为缝隙辐射即磁流辐射，因此反射腔的高度可以降低。如图 9 所示，对于磁流辐射的天线，反射腔高度的确定可以由镜像原理来说明。

缝隙天线可以等效为磁流辐射，假设在导体上方存在磁流 I^m ，磁流的方向垂直于 yoz 平面向外，在距磁流 I^m 高度为 H 的下方存在一个导体平面。由镜像原理可以等效为在导体平面下方 H 处有一相同流向磁流。 θ 表示天线远场 P 与坐标轴 y 的夹角。两磁流在 yoz 平面内的辐射叠加为

$$E = E_1 + E_2 = f(\theta)e^{-jkr + jkH \sin \theta} + f(\theta)e^{-jkr - jkH \sin \theta} \\ = 2f(\theta)e^{-jkr} \cos(kH \sin \theta) \quad (5)$$

式中 $f(\theta)$ 代表导体上方磁流在 yoz 平面上远场辐射方向图。加入反射腔相当于在天线下方加入有限理

想导电平面。由式(5)可以看出 H 越小，天线在远场辐射越大，当 H 为 $\lambda/4$ 时天线沿 z 方向没有辐射。因此相对于导体辐射天线，缝隙天线的反射腔高度可以显著降低。但反射腔高度不能无限度降低，高度很低时反射腔感应的电流会破坏缝隙天线中电磁场的分布^[13]。

5 仿真与测试结果分析

带有反射腔的缝隙等角螺旋天线剖面图如图 10 所示。反射腔高度为 h ，长度 $d_c = 100$ mm，宽度为 100 mm。不同的反射腔高度对天线反射系数的影响如图 11 所示。

对比图 11 中加入反射腔后与不加反射腔的数据，可以得到加入反射腔后天线的反射系数在 2~5 GHz 范围内波动较大，6~9 GHz 范围内反射系数有所升高，变化趋势与不加腔时一致，9~10 GHz 范围内加反射腔后反射系数比不加反射腔时好。反射腔高度为 5.5~7.5 mm 仅有 $0.0367\lambda_L - 0.63\lambda_L$ (λ_L 为 2 GHz 所对应自由空间波长)。低剖面反射腔在低频段所感应电流造成导体螺旋臂上的电流由末端向馈电方向流动，破坏了缝隙螺旋中原来电磁场分布，反射系数有所提高。在高频段反射腔高度相对于该频率自由空间波长来说有所增加，反射腔造成影响减小，反射系数较低频段变小。在 9~10 GHz 范围内加入反射腔后的天线输入阻抗如图 12 所示。

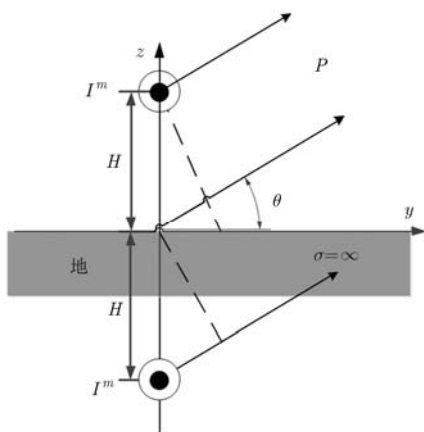


图 9 导体平面上磁流辐射示意图

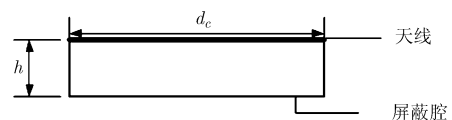


图 10 反射腔侧视剖面图

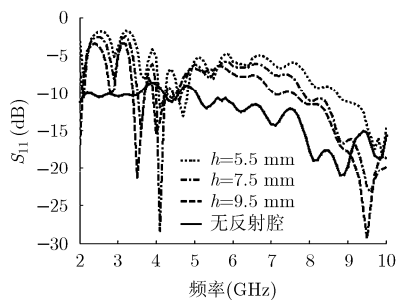
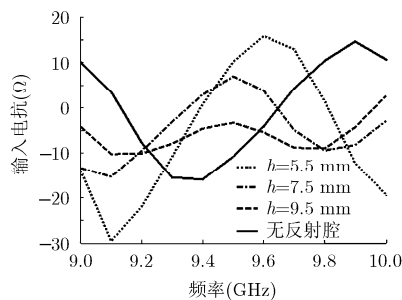
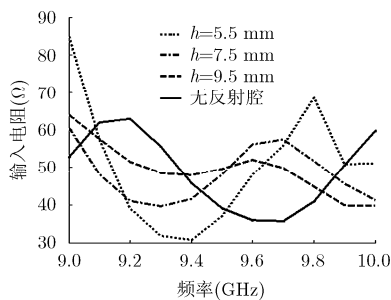


图 11 反射腔高度对天线反射系数的影响仿真结果



(a)不同反射腔高度下天线输入电阻仿真结果 (b)不同反射腔高度下天线输入电抗仿真结果

图 12 不同反射腔高度下天线输入阻抗仿真结果

由图 12 可得加金属反射腔后，在 9~10 GHz 频带内随着反射腔高度增加天线输入电阻与电抗趋于平缓且越来越接近于 $(50 + j0) \Omega$ 。此时反射腔可看作容性加载改变了天线的输入电抗，反射腔感应的表面电流改变了天线的输入电阻。使得天线输入阻抗与馈电端口匹配，从而反射系数较不加反射腔时有所降低。兼顾低频段与高频段最终选取 $h = 7.5 \text{ mm}$ ，这时低频段反射系数较高不能满足工程要求。反射腔高度太低在低频段影响了天线阻抗特性，在反射腔内加入矩形环状吸波材料来改善天线在低频段的驻波特性。加入吸波材料后反射腔剖面图如图 13 所示，实物图如图 14 所示。测试的天线电压驻波比(VSWR)测试如图 15 所示。

如图 14 所示的反射腔高度为 7.5 mm，设吸波材料宽度为 d_{ABS} ，不同宽度的 d_{ABS} 对于天线驻波影响的测试结果如图 15 所示。 $d_{\text{ABS}} = 30 \text{ mm}$ 与 $d_{\text{ABS}} = 50 \text{ mm}$ (反射腔内完全填充吸波材料)情况下天线

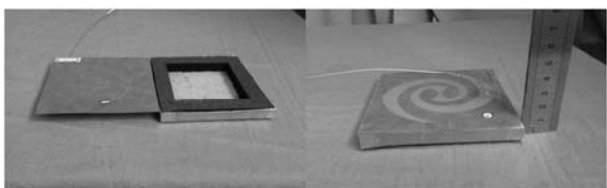


图 13 加入吸波材料的反射腔 图 14 天线与带吸波材料反射腔

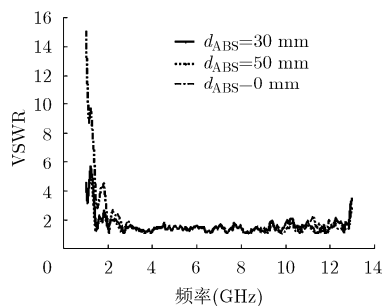


图 15 吸波材料宽度对天线驻波影响测试结果

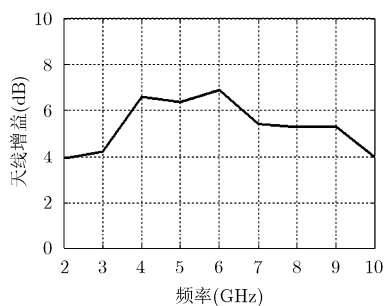


图 16 带反射腔缝隙等角螺旋天线增益测试结果

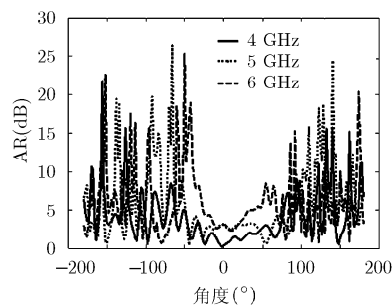


图 17 带反射腔缝隙等角螺旋天线轴比方向图测试结果

的驻波比基本相同，当 $d_{\text{ABS}} = 0 \text{ mm}$ 时，天线驻波在 1.45~2 GHz 频带内有所升高。环形吸波材料可以改善天线低频段驻波比，进而扩展低频段带宽。在微波暗室中测得不同频率下天线增益如图 16 所示。

加反射腔后天线增益在 2 GHz 时约为 4 dB，在 4~6 GHz 时均大于 6 dB，比不加反射腔时增益有所增加，这是反射腔镜像作用的结果。在 8~10 GHz 频带内加入反射腔后与不加腔相比天线增益有所下降，这是由于反射腔高度 $h = 7.5 \text{ mm}$ ，相当于此频带内工作波长的 $1/5 \sim 1/4$ 。由式(5)可知由于反射腔的镜像作用，在 $\theta=90^\circ$ 天线的电场强度为不加腔时的 $0 \sim 0.618$ 倍。又由于天线平面对反射腔反射电磁波的遮挡以及吸波材料的吸收作用。共同使得天线增益比不加腔时降低。测得 4~6 GHz 频带内天线的轴比方向图如图 17 所示。

天线在 4 GHz 时在 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 的主波束范围内 AR 均小于 4 dB，圆极化特性良好。6 GHz 时 AR 略有升高，在 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 内 AR 均小于 5 dB。

天线在 $yo z$ 平面与 xoz 平面内归一化功率方向图测试结果如图 18 所示。在 4 GHz 时方向图的 3 dB 波束宽度大于 50° 。在 5 GHz 与 6 GHz 时方向图的 3 dB 波束宽度均大于 70° 。方向图在 $yo z$ 平面与 xoz 平面具有良好的对称性。加反射腔后天线的功率方向图前后瓣比(F/B)基本大于 20 dB。实现了良好的单向辐射。

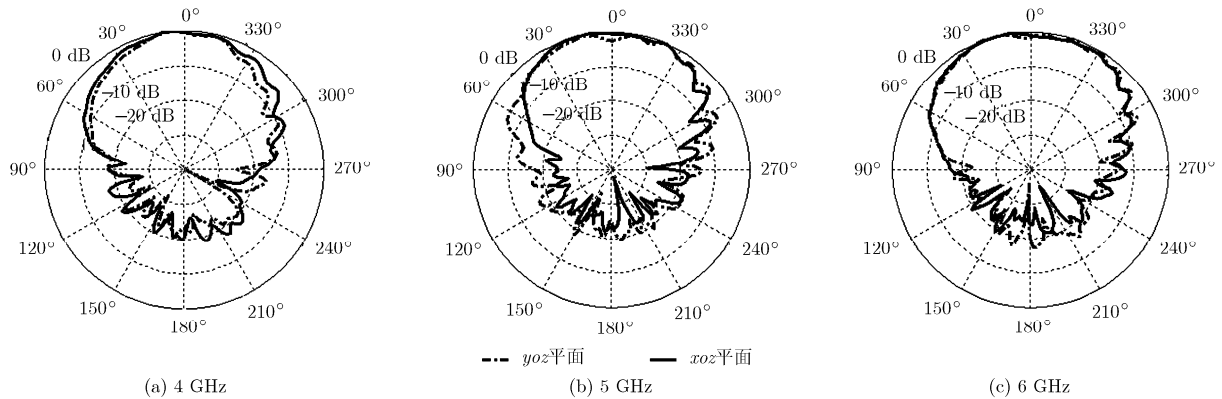


图18 带反射腔缝隙等角螺旋归一化功率方向图测试结果

6 结论

本文提出了一种微带线-槽线馈电的缝隙等角螺旋天线，可作为被动雷达导引头探测与跟踪的天线实现方案。微带线-槽线的转换实现了将不平衡电场转化为平衡电场。加入带有矩形环状吸波材料的反射腔实现了天线的单向辐射拓展了天线在低频段带宽。文中分析了微带线-槽线馈电缝隙等角螺旋天线关键设计参数的影响，且天线测试结果良好。为该天线在被动雷达导引头中的应用提供了技术基础。

参考文献

- [1] 刘其中, 李莉. 机载螺旋天线辐射特性的研究[J]. 电子科学学报, 1994, 16(3): 315-320.
Liu Qi-zhong and Li Li. A study on radiation characters of spiral antennas on an aircraft[J]. *Journal of Electronics (CHINA)*, 1994, 16(3): 315-320.
- [2] De Mingo J, Roncal C, and Carro P L. 3-D conformal spiral antenna on elliptical cylinder surfaces for automotive applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 148-151.
- [3] 宋立众, 乔晓林, 曹丙霞. 微带巴伦馈电圆锥等角螺旋天线设计与实验[J]. 微波学报, 2012, 28(1): 29-32.
Song Li-zhong, Qiao Xiao-lin, and Cao Bing-xia. Design and experiment of a conical equiangular spiral antenna fed by microstrip balun[J]. *Journal of Microwaves*, 2012, 28(1): 29-32.
- [4] 宋朝晖, 李红梅, 邱景辉. 一种小型化宽带螺旋天线的数值分析与实验[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 174-178.
Song Zhao-hui, Li Hong-mei, and Qiu Jing-hui. Numerical analysis and experiment of a miniaturization ultra-wideband spiral antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(1): 174-178.
- [5] 王亚伟, 王光明, 梁建刚. 新型低剖面阿基米德螺旋天线设计[J]. 微波学报, 2012, 28(4): 5-9.
Wang Ya-wei, Wang Guang-ming, and Liang Jian-gang. Design of a Archimedean spiral antenna with low-profile[J]. *Journal of Microwaves*, 2012, 28(4): 5-9.
- [6] Eubanks T W. A compact parallel-plane perpendicular-current feed for a modified equiangular spiral antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(7): 2193-2202.
- [7] Ghassemi N, Wu Ke, and Claude S, et al. Compact coplanar waveguide spiral antenna with circular polarization for wideband applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 666-669.
- [8] Nakano H, Kikkawa K, and Iitsuka Y, et al. Equiangular spiral antenna backed by a shallow cavity with absorbing strips[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(8): 2742-2747.
- [9] Nakano H, Kikkawa K, and Kondo N, et al. Low-profile equiangular spiral antenna backed by an EBG reflector[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009, 57(5): 1309-1318.
- [10] Nakano H, Oyanagi H, Miyake J, et al. Recent progress in antennas with an EBG reflector and antennas with periodically arrayed loops[C]. 2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Hong Kong, 2011: 98-101.
- [11] Nurnberger M W and Volalas J L. A new planar feed for slot spiral antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(1): 130-131.
- [12] Nurnberger M W and Volakis J L. Extremely broadband slot spiral antenna with shallow reflecting cavities[J]. *Electromagnetics*, 2000, 20(4): 357-376.
- [13] Nakano H, Kikkawa K, and Yamauchi J. A Low-profile equiangular spiral antenna backed by a cavity with an absorbing strip[C]. First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), Nice, 2006: 1-5.
- [14] Dyson J D. The equiangular spiral antenna[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1959, 7(2): 181-187.
- [15] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 223-224.
- [16] 张旭春, 谢军伟, 王积勤. 新型微带-槽线转换接头的设计[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 390-392.
Zhang Xu-chun, Xie Jun-wei, and Wang Ji-qin. Design of novel microstrip-slot line transitions[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 390-392.

方庆园: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为共形天线技术与共形阵列信号处理。

金 铭: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信息处理及电子对抗等。

宋立众: 男, 1975年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事天线与微波技术和雷达信号处理等方面的研究。