

# 六元全向比幅测向阵列设计

储小文<sup>1</sup> 陈 星<sup>1</sup>  
CHU Xiaowen CHEN Xing

## 摘 要

为实现微波信号定位,文章设计了一款应用于全向比幅测向系统的六元天线阵列。阵列单元为一种基于折叠技术的新型小型化宽带磁电偶极子天线,采用折叠L型振子代替传统磁电偶极子天线的半波电偶极子,一对折叠短金属片作为磁偶极子,引入了U形金属地板,实现天线的小型化结构和超宽工作频带。仿真和测试表明,该天线电尺寸仅为 $0.29\lambda_L\times 0.29\lambda_L\times 0.12\lambda_L$ , $\lambda_L$ 为天线有效工作频段低端频率对应波长;其VSWR<2阻抗带宽达到114%(3~11 GHz);该天线在整个工作频段内保持稳定的定向方向图和增益值,实测平均增益约为4.5 dBi,增益波动在 $\pm 1$  dB以内。采用该天线构建了直径22.4 cm的六元环阵用于幅度测向,实验验证了该阵列测向的有效性。

## 关键词

无源测向;全向比幅测向系统;磁电偶极子天线;幅度测向天线阵列;定位技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.022

## 0 引言

在现代化战争的复杂环境下,能否精准锁定敌方武器装备的位置,进而发动精确打击,很大程度上决定了战争的胜负走向,因此,无线电定位系统因其精确的定位能力被广泛关注。

无线电测向系统主要分为两类,分别是有源测向系统 and 无源测向系统。其中无源定位因其不需要向外发射电磁波的特性,具有较高的隐蔽性,且同时兼顾了较高的测向精度,在搜救勘测、通信定位、电子对抗等各大领域都有广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

在电磁环境愈发复杂的今天,精确定位信号的来波方向就显得愈发困难,这需要测向设备具有更高精度的信号分选能力、更强的抗外界干扰能力、更灵敏的接收系统以对更大范围内的信号进行接收和处理。天线作为测向系统的前端接收结构,其性能也会影响到测向系统的精度,因此受到学者的广泛关注<sup>[4-6]</sup>。

幅度测向系统作为出现最早,应用最广泛的无源测向系统,一直被广大学者研究关注。对于该系统所用的天线,也有许多的研究。应用较多的是喇叭天线组成的阵列<sup>[7-8]</sup>,其结构简单、成本较低、工作频带宽并能保证良好的方向性,但在有限空间组成数量较多的单元阵并不容易。于是,Lopez等人<sup>[9]</sup>提出了一种带异形腔的梯形缝隙天线阵应用于幅度测

向系统,以尺寸的代价换来了更宽频带内波束宽度的稳定性。Prince等人<sup>[10]</sup>利用一种半解析法设计了一款以全金属Vivaldi单元馈电,工作在Ka波段的圆柱形伦伯格透镜天线用以幅度测向,实现了宽频带内较好的波束一致性,但存在一定的副瓣干扰。

本文从全向比幅测向原理出发,分析其对于前端天线的需求并设计了一款适用于该系统的新型折叠小型化宽带磁电偶极子天线,相较于传统的磁电偶极子天线进行了结构及尺寸的优化<sup>[11]</sup>。并且与常用的幅度测向天线相比,该天线兼顾小尺寸的同时在工作带宽内保持了稳定的波束宽度及增益,能保证全向比幅测向系统在一个宽频带内完成较高精度测向。

## 1 比幅测向系统分析

### 1.1 测向原理

比幅法测向的原理是借助相互独立的天线单元构建相邻的天线波束,当同一来波信号被相邻波束接收时,其幅度响应会存在差异,通过比较相邻两天线的通道所输出的幅度实现来波信号的到达角度测量。当来波信号入射时,接收到该信号的两相邻天线阵元的接收情况如图1所示。

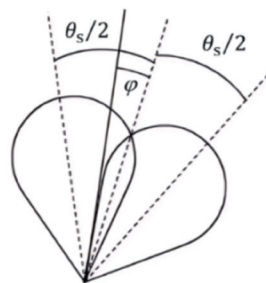


图1 比幅测向系统信号入射示意图

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

[基金项目] 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (A132304212-006)

将最强信号与次强信号进行对数转化并相减，可得到两信号的电压比值  $K$  近似为：

$$K = \frac{24\theta_s}{\theta_r^2} \varphi \quad (1)$$

式中： $\theta_s$  表示相邻天线间的夹角； $\varphi$  表示来波信号偏离等信号方向的夹角。

可得出来波信号的入射角度  $\varphi$ ：

$$\varphi = \frac{\theta_r^2}{24\theta_s} K \quad (2)$$

式中： $\theta_r$  表示天线单元的半功率波束宽度。

从上式可知，只需确定接收到来波的两相邻天线的接收信号幅度比值，就可以得出来波信号的入射方位信息。

## 1.2 误差分析

上文给出了比幅测向的核心计算公式，在理想情况下这种测向方式能够快速准确地获得来波信号的入射方位信息，因此在工程中广泛应用。但在实际测向应用中会存在一些在或偶然的因素导致测向误差，下文将分别对可能引起的误差进行理论分析。

就上文所推导出的入射角度公式来说，其中主要影响入射角度的因素即  $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $K$ 。为进一步分析其对测向结果精度的影响，对角度计算公式进行全微分运算得：

$$\Delta\varphi = \frac{\theta_r}{12\theta_s} K \Delta\theta_r - \frac{\theta_r^2}{24\theta_s^2} K \Delta\theta_s + \frac{\theta_r^2}{24\theta_s} \Delta K \quad (3)$$

对上式进行分析可得，天线的半功率波束宽度越窄（即  $\theta_r$  越小），天线的测向精度就越高，对应产生的系统误差越小；此外，在表征最大响应信号与次大响应信号强度的比值  $K$  值越小的情况下，测向误差越小，表明来波方向越靠近等信号强度方向时，系统误差越小。同时，观察上式还可发现，天线半功率波束宽度的变化量  $\Delta\theta_r$ 、相邻两天线间的夹角变化量  $\Delta\theta_s$ 、接收信号的两天线的电压幅度比值的变化量  $\Delta K$  也会致使测向误差的产生。

通常比幅测向系统会在一个较宽频带内工作，故测向天线中的天线单元也会选择为宽带天线。对宽带天线来说，在不同的频段内天线的半功率波束宽度、方向图增益等特性是会产生变化的，所以在这样的系统中考虑天线的半功率波束宽度对测向精度造成的影响是很有必要的。将角度公式对  $\theta_r$  求一次微分得：

$$d\varphi = \frac{\theta_r K}{12\theta_s} d\theta_r = 2 \frac{\varphi}{\theta_r} d\theta_r \quad (4)$$

可以看出，测向误差与天线波束宽度的变化量明显成正比关系。故当测向系统的工作频率改变时，天线波束宽度的

变化会使得测向误差的出现。

在前文的公式推导中本文并未考虑通道间的误差，但在实际测向过程中由于通道失衡所导致的系统误差是不可避免的，这也是系统误差的一大主要原因。

将角度公式对电压比值进行微分得：

$$d\varphi = \frac{\theta_r^2}{24\theta_s} dK \quad (5)$$

由通道失衡带来的电压幅度比值的变化量也会使得误差的出现。同理，相邻两天线间的夹角变化量也会如此，所以在实测过程中，也要注意保证天线阵列结构的稳定性。

在实际测向中，波束交点损失也是测向系统中的一大重要指标。前文中已将天线单元间的夹角定为  $\theta_s$ ，则两天线的波束交点处的方向图函数可记为  $F(\theta_s/2)$ 。将波束交点处及最大增益处的方向图函数  $F(\theta)$  对比，并将比值记为波束交点损失  $L_s$ ，单位为分贝。交点损失表达为：

$$L_s = 20 \lg \left[ \frac{F(\theta_s/2)}{F(0)} \right] = -3 \left( \frac{\theta_s}{\theta_r} \right)^2 \quad (6)$$

假设测向天线阵中的阵元数目为  $N$ ，且  $N$  个天线均匀分布组成圆阵，则式（6）可简化为：

$$L_s = - \left( \frac{360^\circ}{N\theta_r} \right)^2 (\text{dB}) \quad (7)$$

所以在已确定结构的阵列中，如果已知阵元间的波束交点损失，就可求出天线单元的半功率波束宽度  $\theta_r$ 。同样的，若已知阵列结构及天线单元的半功率波束宽度，则也可反求出波束交点损失。

当天线的半功率波束宽度  $\theta_r$  恰好等于天线单元夹角  $\theta_s$  时，也就是波束交点损失为 -3 dB 时，角度的误差全微分公式可简化为：

$$\Delta\varphi = \frac{K}{12} \Delta\theta_r - \frac{K}{24} \Delta\theta_s + \frac{15^\circ}{N} \Delta K \quad (8)$$

当  $K$  值最大，也就是来波正对天线的波束中心方向时，前两项由  $\theta_r$  和  $\theta_s$  带来的系统误差会增大。对于第三项误差项，可以看出误差和天线单元的数目成反比。即当天线数目增多的时候，会进一步提升比幅测向系统的测量精度，但在实际应用过程中，要综合考虑天线阵列的尺寸及制造成本以确定最合适的天线单元数目。

此外，在阵元组成阵列时，阵元间不可避免地会互相造成影响，为保证测向阵列的测向性能，天线阵元也应该保持良好的性能稳定性，不易受外部干扰。再结合整体测向天线阵列的尺寸及便携性考虑，天线单元的尺寸也是设计重点之一。

## 2 天线结构设计

基于前文对比幅测向系统的误差分析可得,在对全向比幅测向天线阵列进行设计时,天线阵元的尺寸、阵元的带内波束宽度稳定性及天线单元数目都是十分重要的。且现有的研究较少有兼顾尺寸及宽频带波束宽度稳定的存在,因此本文提出了如图2所示的磁电偶极子天线,天线由一个折叠L型电偶极子、一对垂直折叠短路金属板以及U型地板组成。

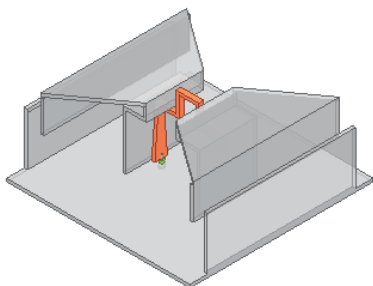


图2 天线单元结构图

其中,折叠L型电偶极子水平部分采用梯形化设计以拓宽带宽,垂直部分向下弯折,减小了天线的电尺寸。L型电偶极子与两个垂直折叠短路板顶端相连。为改善阻抗匹配,在电偶极子的水平下方引入U型地板补偿了一部分容性。馈电部分,天线采用多重弯折的Γ型馈电条进行激励馈电,整个馈电条采用梯形结构及末端弯折结构,完成了宽频带内的阻抗匹配。天线单元实现了 $0.29\lambda_L \times 0.29\lambda_L \times 0.12\lambda_L$  ( $\lambda_L$ 为天线有效工作频段低端频率对应波长)的电尺寸。

随后结合阵列尺寸及单元波束宽度考虑,本文使用6个天线单元在水平 $360^\circ$ 方向均匀排布组成环阵作为全向比幅测向天线阵,天线阵直径为22.4 cm。其仿真结构示意图如图3所示。

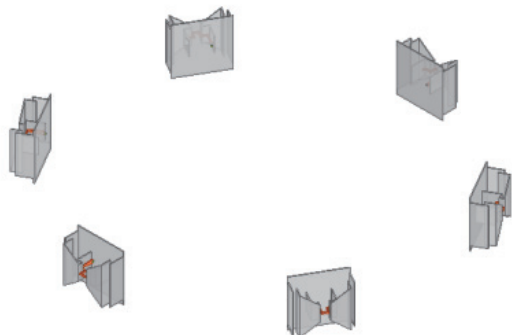


图3 六元测向天线环阵仿真结构图

## 3 测试与分析

将设计的六元测向天线阵进行加工测试。天线阵实物图如图4所示,天线单元内嵌于硬质泡沫板中进行固定。



图4 天线阵实物图

图5和图6分别为天线单元仿真及测试的VSWR曲线和方向图。仿真和测试结果吻合良好,天线在3~11 GHz内满足 $VSWR < 2$ ,阻抗带宽达到114%。且在整个工作频段,天线的半功率波束宽度都保持在一个较稳定的水平,保证了测向系统能在宽频带内较稳定地工作。

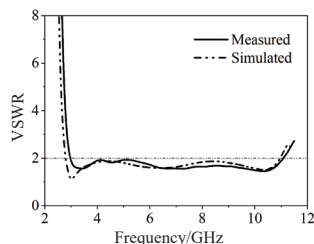
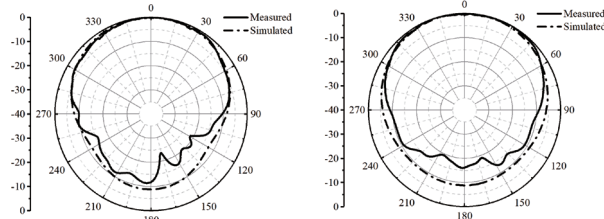
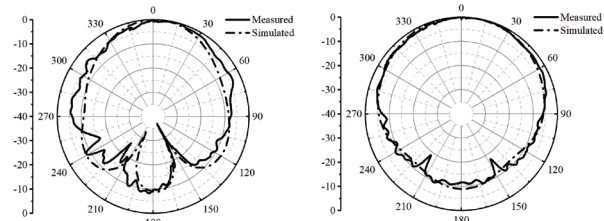


图5 天线单元的仿真及测试 VSWR



(a) 3 GHz处E面及H面



(b) 9 GHz处E面及H面

图6 天线归一化方向

图7为天线单元仿真与测试最大增益曲线,可以看出,天线实测最大增益处于一个较稳定的水平,平均增益大约为4.5 dBi,增益波动在 $\pm 1$  dB以内。

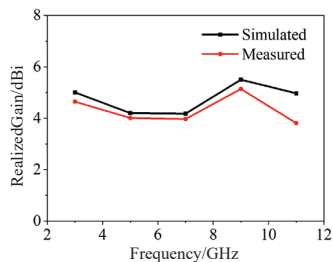


图7 天线仿真与测试最大增益曲线

以阵列相邻两天线所划分的 60° 区域为例, 对来波信号进行测向实验。将两天线分别记为天线 1 和天线 2, 并将 0° 记为天线 1 的波峰方向, 60° 记为天线 2 的波峰方向。将标准喇叭作为来波信号对阵列入射, 测量两天线的信号差值, 将其带入角度计算公式最终得出计算角度。将 3 GHz、5 GHz 及 9 GHz 处的实验结果如表 1~ 表 3 所示。

表 1 3 GHz 处测向结果统计

| 实际角度 | 测量角度  | 误差   | 实际角度 | 测量角度  | 误差   |
|------|-------|------|------|-------|------|
| 0°   | -3.9° | 3.9° | 40°  | 40.7° | 0.7° |
| 10°  | 7.2°  | 2.8° | 50°  | 51.3° | 1.3° |
| 20°  | 21.5° | 1.5° | 60°  | 55.6° | 4.4° |
| 30°  | 31°   | 1°   |      |       |      |

表 2 5 GHz 处测向结果统计

| 实际角度 | 测量角度  | 误差   | 实际角度 | 测量角度  | 误差   |
|------|-------|------|------|-------|------|
| 0°   | -4.2° | 4.2° | 40°  | 37.4° | 2.6° |
| 10°  | 7.1°  | 2.9° | 50°  | 47.9° | 2.1° |
| 20°  | 17.9° | 2.1° | 60°  | 62.4° | 2.4° |
| 30°  | 28°   | 2°   |      |       |      |

表 3 9 GHz 处测向结果统计

| 实际角度 | 测量角度  | 误差   | 实际角度 | 测量角度  | 误差   |
|------|-------|------|------|-------|------|
| 0°   | 6.3°  | 6.3° | 40°  | 46.9° | 6.9° |
| 10°  | 12.9° | 2.9° | 50°  | 53.2° | 3.2° |
| 20°  | 24.7° | 4.7° | 60°  | 53.5° | 6.5° |
| 30°  | 27.3° | 2.7° |      |       |      |

从表中的测向数据可以看出, 在以上几个频点, 该天线阵均实现了较高精度的测向功能。并且实验结果也显示, 当来波方向越接近等信号强度方向时, 测向精度越高, 越靠近天线单元波峰时, 测向误差越大, 这也印证了前文关于  $k$  值对测向精度的影响分析。在边缘高频部分, 天线间的互耦导致方向图稳定性变差, 测向精度一定程度降低, 但也能在测向范围内保持 7° 以内的测角误差。

4 结语

本文从全向比幅测向的原理入手, 在理论层面将天线性能可能对测向误差的影响进行分析, 并就所分析的需求, 提出了以一种利用折叠技术的新型小型化宽带磁电偶极子天线为单元的六元测向阵列。对于传统的幅度测向天线阵列, 本文提出的阵列兼顾了尺寸及宽带内的测向稳定性。在仿真及实测中, 阵元在工作频段内展现了较好的工作性能及波束稳定性, 整个阵列在 3~9 GHz 内实现了较高精度的测向, 验证了该设计的可行性。

参考文献:

[1] 背负式测向系统 R&S MP007[J]. 中国无线电 ,2015(10):71-73.

[2] 邓杰. 一种轻便快拆式车载无线电测向天线阵的设计与开发 [D]. 成都: 电子科技大学 ,2015.

[3] SULTAN F, ALI H, SHARAWI M S, et al. A printed v-shaped circular antenna array for direction finding applications[C]//2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE, 2012: 3115-3118.

[4] ESQUIUS-MOROTE M, ZURCHER J F, MOSIG J R, et al. Low-profile direction finding system with SIW horn antennas for vehicular applications[C]//2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Piscataway:IEEE,2014: 591-592.

[5] BAILEY M C, CAMPBELL T G, REDDY C J, et al. Compact wideband direction-finding antenna[J]. IEEE antennas and propagation magazine, 2012, 54(6): 44-68.

[6] AL-SADOON M A G, ASIF R, AL-YASIR Y I A, et al. AOA localization for vehicle-tracking systems using a dual-band sensor array[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(8): 6330-6345.

[7] 罗凯. 宽带天线及新型阵列天线研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学 ,2022.

[8] AL-TARIFI M A, FILIPOVIC D S. On the assessment of antenna patterns for wideband amplitude-only direction finding[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17(3): 385-388.

[9] LOPEZ D G, AL-TARIFI M A, LASSER G, et al. Wideband antenna systems for millimeter-wave amplitude-only direction finding[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(6): 3122-3129.

[10] PRINCE T J, ELMANSOURI M A, FILIPOVIC D S. Cylindrical luneburg lens antenna systems for amplitude-only direction-finding applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2023,71(10):7924-7932.

[11] LUK K M, WONG H. A new wideband unidirectional antenna element[J].International journal of microwave and optical technology, 2006, 1: 35-44.

【作者简介】

储小文 (2001—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向: 天线设计。

陈星 (1970—), 男, 四川巴中人, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向: 电磁场理论与微波工程。

(收稿日期: 2024-12-17)