

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.002

# MIMO 技术舰载反导探测系统构成方法

田燕妮<sup>1</sup>, 张 杨<sup>1</sup>, 徐晶晶<sup>2</sup>

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 针对目前舰载防空雷达对近程目标检测和抗干扰能力弱, 探测数据率较低等问题, 提出一种基于多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术用于舰载反导探测系统的作战使用设想。分析使用 MIMO 技术提高反导的探测优势, 给出 MIMO 技术用于反导探测系统构成方案和实现方法, 并进行分析验证。分析验证结果表明: 基于调频连续波 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 的 MIMO 技术探测性能和抗干扰能力在反导探测方面具有独特优势, 这种新思路是可行的。

**关键词:** MIMO 技术; 反导探测; FMCW**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

## Method of Shipboard Anti-Missile Detecting System Based on MIMO Technology

Tian Yanni<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Xu Jingjing<sup>2</sup>

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China;

2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor detection and anti-jamming capabilities, low data detection rate of the present ship borne air defense radar against close-range targets, this thesis raises the operational plan of integrating multiple-input multiple-output (MIMO) technology into the shipborne anti-missile detection system, analyses the use of MIMO technology to improve the advantage of anti-missile detection system, provides the MIMO technology and the testing method used in the anti-missile detection system scheme, and at the end verifies it. The analysis results show that it has unique advantages in anti-missile detection based on the detection performance of frequency modulated continuous wave (FMCW) MIMO technology and anti-interference capability and that this new idea is feasible.

**Keywords:** MIMO technology; antimissile detecting; frequency modulated continuous wave

### 0 引言

现代海战场上, 以围绕资源利益、主权争端等问题产生的近海局部短促冲突不可避免, 反舰导弹<sup>[1]</sup>是担任打击使命的重要武器, 攻击方往往采取各种技术手段干扰、压制舰载反导探测系统, 破坏舰艇防御环节, 进而达到成功打击的目的。

在反导作战方面, 研究先进舰载反导探测系统技术, 提高反导探测系统对低空掠海小目标的探测能力, 提高系统抗海面杂波、多路径和各种压制、转发等人为干扰的能力, 对于海上舰艇的生存具有十分重要的意义。

### 1 需求分析

具体分析当前舰载反导探测系统技术的需求, 在基本探测能力方面, 反导探测系统至少需要满足对典型低空掠海反舰导弹的探测需求。在抗干扰能力<sup>[2-3]</sup>方面, 反导探测系统不仅要完成基本的目标检测跟踪任务, 还必须具有低截获概率, 抑制对方采

取的压制、欺骗各种干扰措施等能力。

### 2 MIMO 技术反导探测的作战使用设想

针对上述需求分析, 综合分析各种技术, MIMO 技术在反导探测方面具有先天优势:

1) 频率、空间或波形的收发分集技术特别有利于对强杂波下低空小目标的抑制<sup>[4]</sup>;

2) 发射波形和频率的复杂设计加上低功率发射能够降低系统被截获的概率, 保护探测系统不受针对性的干扰, 等等。

MIMO 技术多种多样, 笔者在充分考虑舰载使用环境的基础上, 提出一种基于 MIMO 技术用于舰载反导探测系统的作战使用设想。

### 3 MIMO 技术舰载反导探测系统构成方法

考虑舰载反导探测系统的低空小目标探测需求和抗干扰能力要求, 在研究各种 MIMO 技术体制的基础上, 提出基于 FMCW 的 MIMO 技术舰载反导探测系统构成方法, 系统组成如图 1 所示。其中,

收稿日期: 2014-07-10; 修回日期: 2014-08-29

作者简介: 田燕妮(1978—), 女, 湖南人, 满族, 在读博士, 工程师, 从事导弹突防技术、信息化建设研究。

阵列信号分离接收处理单元的组成如图 2 所示。

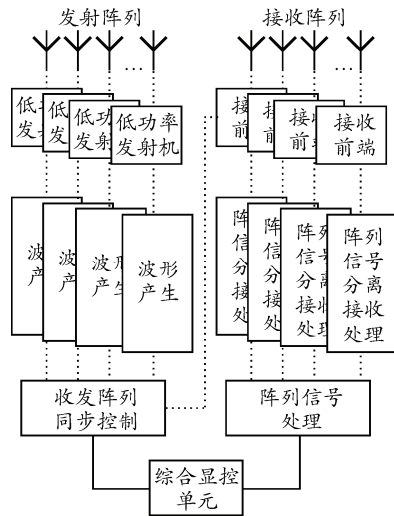


图 1 调频连续波 FMCW MIMO 技术结构组成

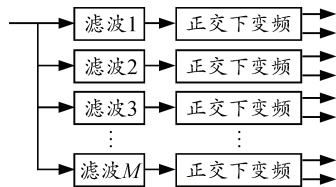


图 2 阵列信号分离接收处理

发射天线阵列和接收天线阵列分置与舰艇上。在发射端，发射阵列中的  $M$  个阵元向空中发射  $M$  个不同载频的 FMCW 信号波形，信号之间满足正交要求；在接收端， $N$  个接收阵元通过通道匹配滤波器分离出各个发射信号分量，每个阵元都对  $M$  个发射信号进行滤波和正交下变频处理，一共得到  $M \times N$  路正交信号，阵列信号处理单元对这些信号进行处理，通过多个观测通道的不同信息综合处理进行目标检测和参数估计。

该方案具有以下主要技术优势：

1) FMCW 的工作波形本身能够同时满足探测距离范围和距离分辨力的要求；

2) 收发天线分置有利于较高的收发隔离度；

3) 多个阵元发射不同载频、宽带、正交的 FMCW 波形信号，接收阵列收到的目标回波信息中携带丰富的信息，自由阵列的 MIMO 处理方式能够改善探测小目标的能力和参数估计精度；

4) 发射多频宽带信号的截获概率低，截获难度大，目前针对这种信号实施干扰的难度较大，这就提高了探测系统的抗干扰能力。

FMCW MIMO 技术的信号处理方法与传统雷达区别较大，主要体现在：

1) 频率分集的 MIMO 技术系统距离、速度是

模糊的，目标检测方法需要专门研究；

2) MIMO 技术也不同于相控阵雷达，目标方位尤其是多目标的方位分辨问题需要做专题考虑；

3) FMCW MIMO 技术的自由阵列接收处理算法运算量较大，在进行目标检测和参数估计算法研究时，必须考虑运算的实时性。

## 4 舰载反导探测系统的信号处理

### 4.1 FMCW MIMO 技术目标模型

对 FMCW MIMO 技术的目标建立一般性的回波模型便于目标检测<sup>[5]</sup>和参数估计分析。

设 MIMO 技术反导探测系统共有  $M$  个发射阵元， $M$  个阵元的发射信号矢量为

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$$

若第  $m$  个阵元发射的信号为

$$s_m(t) = d_m(t) \exp(j2\pi f_c t)$$

各个阵元发射信号为波形编码正交信号，其采样协方差矩阵为单位阵，即满足

$$R_{ss} = \sum_{L=1}^M S(n)S^H(n) / L = I_M$$

则第  $n$  个阵元接收的信号为

$$r_n(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_{mn} \sqrt{\gamma_{mn}(\zeta, \nu)} d_m[\sqrt{\gamma_{mn}(\zeta, \nu)}(t - \tau_{mn}(\zeta, \nu))] \exp[j2\pi f_c(t - \tau_{mn}(\zeta, \nu))] + w_n(t)$$

式中： $r_n(t)$ 为第  $n$  个阵元接收到的回波信号； $w_n(t)$ 为第  $n$  个阵元的接收噪声； $\alpha_{mn}$ 为第  $n$  个接收阵元接收到的第  $m$  个发射信号的回波幅度； $\zeta$ 表示目标的位置，包含距离和方位信息； $\nu$ 表示目标的径向速度，包含速度信息和方位信息； $\tau_{mn}$ 表示第  $n$  个接收阵元接收到的第  $m$  个发射信号的回波延迟。

$$\tau_{mn}(\zeta, \nu) = (R_{Tm} + R_{Rn}) / c = (R_{Tm} + \nu_{Tm}t + R_{Rn} + \nu_{Rn}t) / c = \tau_{mn}(\zeta) + (\nu_{Tm} + \nu_{Rn})t / c$$

其中

$$\tau_{mn}(\zeta) = \tau_{Tm}(\zeta) + \tau_{Rn}(\zeta) = (R_{Tm}(\zeta) + R_{Rn}(\zeta)) / c$$

式中  $\gamma_{mn}(\zeta, \nu)$  为目标运动引起的拉伸因子，并且有

$$\gamma_{mn}(\zeta, \nu) = 1 + f_{mn}(\zeta, \nu) / f_c,$$

其中

$$f_{mn}(\zeta, \nu) = f_m(\zeta, \nu) + f_n(\zeta, \nu) = \frac{1}{\lambda} \frac{d(R_{Tm} + R_{Rn})}{dt}$$

为目标相对于发射阵元和接收阵元引起的多普勒频移之和， $R_{Tm}$ 、 $R_{Rn}$  分别表示目标距离第  $m$  个发射阵元的初始距离和目标距离第  $n$  个接收阵元的

初始距离。

$$\text{令 } f_{mn}(v) = (v_{Tm} + v_{Rn})f_c / c。$$

经过中频正交采样以后，接收信号为

$$r_n(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_{mn} \sqrt{\gamma_{mn}(\zeta, v)} d_m [\sqrt{\gamma_{mn}(\zeta, v)} (t - \tau_{mn}(\zeta, v))] \cdot \exp[-j2\pi(f_c + f_{mn}(v))\tau_{mn}(\zeta)] \exp[j2\pi f_{mn}(v)t] + w_n(t)$$

对于 MIMO 技术舰载反导探测系统来说，目标位于空间远场处，接收阵和发射阵的阵元间距很小，可以认为目标相对于每个收发通道的散射特性是相同的，即  $\alpha_{mn} = \alpha$ 。

### 4.2 目标检测处理

在具体的反导探测应用中，有几个先验条件可以作为检测处理的输入，能在一定程度上简化目标的检测。

- 1) 来袭导弹目标都是高速运动目标，运动速度多在亚音速以上，最小不低于 150 m/s；
- 2) 相对于目标而言，舰艇的运动速度较低，可以视为 MIMO 雷达在静止平台上进行探测。

FMCW MIMO 技术舰载反导探测系统的目标检测主要针对高速运动目标进行，而且基本不需要考虑平台的运动补偿，借鉴传统的 MTI、MTD 等处理方法进行运动目标的检测具有较高的可行性。

在信号检测处理阶段，对信号做频谱分析，多通道相互比较抑制静止目标信号是较好而且可行的思路。信号检测的信号处理原理如图 3 所示。

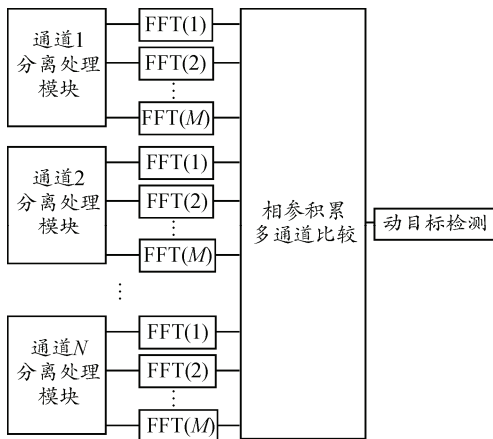


图 3 信号检测的信号处理原理

### 4.3 目标参数估计

对于 FMCW MIMO 技术反导探测系统，每个通道回波信号中所包含的距离、速度信息是耦合的，

目标检测完成后首先做距离-速度解耦合处理，估计出目标的距离和运动速度。

由于 FMCW MIMO 是宽带自由接收体制，接收阵列对于同一个目标在不同载频上形成的数字合成波束必然有差异，因此，利用数字多波束比较法可以精确测量目标方位。目标参数估计处理的流程如图 4 所示。

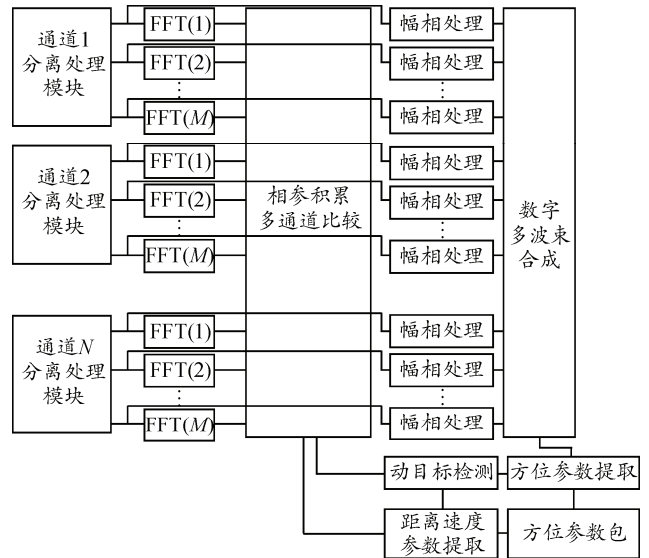


图 4 目标参数估计处理的流程

## 5 结束语

笔者提出将 MIMO 技术用于反导探测系统的作战使用设想，并给出 MIMO 技术用于反导探测系统构成方案和实现方法。分析验证结果证明：作为一种新的思路，基于 FMCW 的 MIMO 技术的探测性能和抗干扰能力在反导探测方面具有独特优势。随着科学技术的进步和 MIMO 技术使用领域的扩展，MIMO 技术用于反导探测方面还需要外场环境测试作为更为可靠的技术支撑。

### 参考文献：

- [1] 闫艳坤, 粟飞. 舰空导弹对反舰导弹攻击群射击效能评估[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 24-26.
- [2] 张林, 田燕妮. 护航任务下水面舰艇软硬武器协同反导作战使用研究[J]. 战术导弹技术, 2013(3): 41-45.
- [3] 夏昱, 滕克难, 高飞. 舰艇编队协同反导网络关键边评估[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 52-54.
- [4] 张林. 反舰导弹末端突防战法研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2010: 31-35.
- [5] 董伟. MIMO 系统中关键技术研究[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 20-32.