

文章编号:1004-9037(2014)06-0970-05

数字子阵级 MIMO 雷达设计方法

王 峰¹ 郭国强¹ 李 品¹ 龙伟军^{1,2}

(1. 南京电子技术研究所信号处理部,南京,210039; 2. 南京航空航天大学电子与信息工程学院,南京,210016)

摘要:设计并实现了一种集中式数字子阵级 MIMO 雷达实验系统,该系统在子阵间实现正交二相相位编码信号发射,接收端实现了子阵级发射数字多波束合成与接收数字多波束合成,有效完成了对民航飞机的观测。子阵多波束与子阵正交波形发射成倍简化了系统设计复杂度,具有良好的工程应用价值,使得 MIMO 雷达功能可作为数字相控阵雷达的典型工作模式在数字阵中推广应用。

关键词:MIMO 雷达;数字阵雷达;数字波束形成

中图分类号:TN951 **文献标志码:**A

Design of Digital Subarray MIMO Radar

Wang Feng¹, Guo Guoqiang¹, Li Pin¹, Long Weijun^{1,2}

(1. Signal Processing Department, Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The test bed of digital multi-input multi-output (MIMO) radar in sub-array level is developed and realized. Orthogonal binary phased shift keying signals are exploited in the sub-array level. The transmit and receive digital beam-forming is implemented in the receiving channel, and the observation of civil aircraft is accomplished successfully. The complexity of system design reduces greatly with the implementation of the orthogonal transmitting wave and multi-beam techniques in subarray level, which is promising for engineering application. The MIMO radar function can be utilized as a kind of typical working mode in the digital array radar.

Key words: MIMO radar; digital array radar; digital beamforming

引 言

多输入多输出(Multi-input multi-output, MI-MO)雷达凭借其低截获概率,同时全空域覆盖等优点,成为目前雷达界研究的热点。与传统的有源相控阵雷达相比,MIMO 雷达的每个子阵或者单元,可以发射相互正交的分级波形,该种波形对于敌方侦察接收设备极具迷惑性,抗分选与识别的能力强。而且由于没有形成发射波束,发射增益小于常规雷达,从而造成敌方侦收距离大大下降。同时由于 MIMO 雷达的发射波束在接收端形成,发射

波束形成具有灵活性^[1-3]。MIMO 雷达可分为两类:统计 MIMO 雷达与集中式 MIMO 雷达。集中式 MIMO 雷达主要利用波形分集获得得益。统计 MIMO 雷达还可以利用回波的非相参性,获得目标回波的空间分集得益。

数字阵雷达已进入工程应用阶段,但其工作方式普遍采用传统的模拟有源相控阵模式,优越性的发挥受到很大限制。随着技术的发展,结合数字阵列雷达实现 MIMO 雷达功能越来越具备工程可实现性。将数字相控阵与 MIMO 雷达有机结合起来,是推动数字阵雷达技术进步和促进 MIMO 雷达应用的重要技术途径。

由于大规模数字阵列具有几千单元的数字化通道,单元级正交化存在很大的困难。本文根据正交信号的特点,结合数字阵工程应用经验,设计了 12 子阵数字阵 MIMO 雷达,成功地实现了对民航飞机的观测实验。

1 集中式 MIMO 雷达基本信号模型

集中式 MIMO 雷达主要通过多子阵正交信号发射实现目标探测。由于 MIMO 雷达与常规雷达处理的主要差异在于接收端形成发射波束和正交信号收发,以下主要针对该过程进行数学模型分析。

1.1 接收端形成发射波束

MIMO 雷达采用接收阵列同时形成接收波束和等效发射波束,称之为 MIMO 联合波束。本文设计的系统收发采用单元相同,因此发射导向矢量与接收导向矢量指向相同,可写成相同的形式^[4-5]

$$A(\alpha) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin\alpha}, e^{-j\frac{2\pi 2d_x}{\lambda} \sin\alpha}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d_x}{\lambda} \sin\alpha} \right] \quad (1)$$

$$B(\alpha) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin\alpha}, e^{-j\frac{2\pi 2d_x}{\lambda} \sin\alpha}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d_x}{\lambda} \sin\alpha} \right] \quad (2)$$

式中: α 为波束指向, d_x 为单元间隔, λ 为波长。收发联合导向矢量

$$U(\alpha) = A(\alpha) \otimes B(\alpha) \quad (3)$$

式中: \otimes 表示向量之间进行 Kronecker 积运算。

1.2 正交波形发射

MIMO 雷达发射 L 个正交信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_L(t)$, 接收端针对每个发射信号分量进行匹配滤波处理。 L 个相互正交的发射信号需满足下式^[6-9]

$$\int_0^T s_l(t) s_k^*(t) dt = \begin{cases} \delta_l & l = k \\ 0 & l \neq k \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为脉冲宽度, δ_l 为单位冲击响应, $\int [\cdot] dt$ 表示积分运算。阵元 i 接收到的信号为各发射信号的延迟之和

$$x_i(t) = \sum_{l=1}^L \gamma_l \cdot s_l(t - \tau_{il}) \quad (5)$$

式中: γ_l 为幅度系数, τ_{il} 为信号从 i 阵元发射后到达目标,之后到第 i 接收阵元的双程时间延迟。

用 $s_l(t) (l=1, 2, \dots, L)$ 分别与 $x_i(t)$ 进行匹配滤波来恢复发射信号分量 $y_{il}(\tau) (l=1, 2, \dots, L)$ 。

$$y_{il}(\tau) = \int_T x_i(t) s_l^*(t - \tau) dt = \gamma_l \cdot \delta_l + \sum_{n \neq l}^L \gamma_n \cdot \eta_n \quad (6)$$

式中: δ_l 为信号的自相关主瓣输出,而第二部分 η_n 代表了自相关旁瓣及所有可能的互相关输出,在理想无噪声情况下,由式(4)可知该项为 0。

2 数字子阵 MIMO 雷达设计原理

2.1 MIMO 雷达子阵划分

由于数字阵多数在单元级实现数字化,而单元往往多达几千,实现所有自由度的 MIMO 发射与接收存在工程难度,而且是没有必要的。在子阵级实现 MIMO 雷达功能,可以获得 MIMO 正交波形发射的优势,同时简化了系统设计,便于工程实现。

为了简化系统设计,本文所设计的 MIMO 雷达实验阵在俯仰方向不做波束扫描,仅在方位做多波束形成,完成目标方位角度测量。所设计 P 波段实验阵具有 48 单元,进行如图 1 的子阵划分,垂直方向每 4 个单元构成 1 个子阵,整个阵面划分成 12 个子阵,天线单元采用三角形排列。雷达阵面单元排布形式见图 1。对应该天线设计,每个子阵发射一组正交编码信号,12 个子阵共发射 12 组正交编码。

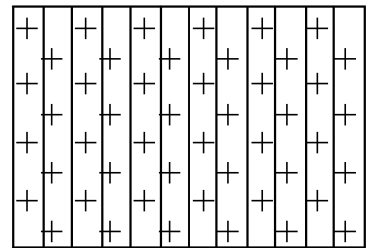


图 1 子阵 MIMO 雷达的子阵划分方式

Fig. 1 Partitioning method of MIMO radar array

2.2 子阵 MIMO 雷达原理框图

子阵 MIMO 雷达原理框图见图 2。天线接收信号经过数字收发 (Transmit/Receive, T/R) 组件,主要完成信号的滤波、放大、模拟数字转换 (Analog to digital, AD) 采样与正交变换。为了便于形成多波束,在 T/R 组件内合成子阵多波束。数据经过光纤网络传输至数字波束形成 (Digital beam forming, DBF) 系统进行二级接收波束合成。之后每个接收波束输出采用对应的正交信号完成匹配滤波处理,然后完成发射波束形成与动目标检测,最后采用恒虚警处理获得目标的点迹。

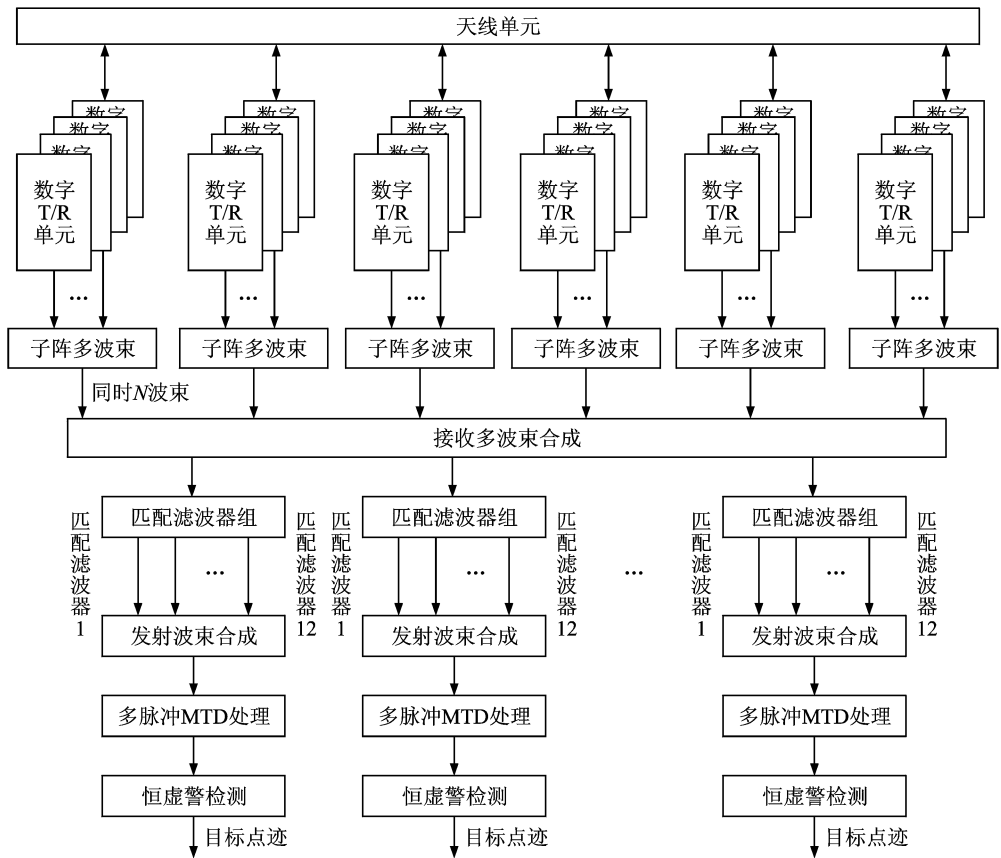


图 2 子阵 MIMO 雷达原理

Fig. 2 Block diagram of subarray MIMO radar

2.3 子阵 MIMO 雷达功能

(1) 波形发射 数字阵雷达收发均采用 DBF 形成波束。其中,发射采用直接数据合成(Direct digital synthesize, DDS)器件形成所需信号相位移相,而接收采用数字器件运算完成相位加权,这为 MIMO 雷达工作模式的使用奠定了基础。单站的 MIMO 雷达系统采用多组正交波形,形成所需发射无方向性宽波束,接收采用 DBF,形成多波束窄波束。与常规数字阵列雷达不同的是,MIMO 雷达多组正交编码是不同的,而常规雷达发射的是单组信号。

理论上,正交信号存在很多组,可以满足几百甚至几千个单元的应用。但是,由于正交信号需要采用接收端形成发射波束,过多的正交信号需要形成发射波束的计算量越大,而且实际使用中正交信号个数的增多,副瓣性能会下降。本文系统设计采用二相编码构成 12 组正交信号,针对 12 个子阵进行发射。该正交信号采用遗传算法搜索产生。

子阵级 MIMO 发射的过程如下:在子阵内部,每个数字 T/R 通道采用相同的发射控制码,从而

使每个 T/R 组件的 DDS 产生相同的发射信号,而子阵之间的 T/R 组件则采用不同的控制码,按照预先设置的波形,产生相互正交的波形。该波形通过上行通道发射出去。

(2) 数字 T/R 组件 数字 T/R 组件主要完成 DDS 正交信号产生,并经过上行放大、滤波、上变频等处理,通过功放,将射频信号送至天线。下行的天线信号,经过数字 T/R 组件处理,经过放大、滤波、AD 采样与数字正交处理,采用光纤传输到 DBF 系统进行波束合成。

组件内子阵多波束形成。通过子阵多波束形成,预先形成接收所需波束,从而保障接收多波束最终形成的波束无栅瓣。本系统设计采用同时 11 波束,实现 1 dB 交叠,从而完成对 $\pm 30^\circ$ 的波束覆盖,如图 3 所示。

(3) 接收波束合成 形成 11 个接收波束覆盖 $\pm 30^\circ$ 。通道号 1~11 对应角度分别为: $-30^\circ, -24^\circ, -18^\circ, -12^\circ, -6^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ, 24^\circ, 30^\circ$ 。

(4) 匹配滤波 针对每一个接收波束进行 12 组匹配滤波,得到 12 组正交输出。匹配滤波主要

针对接收波束输出,按照发射的正交编码个数。波形的正交性性能见图 4,5。

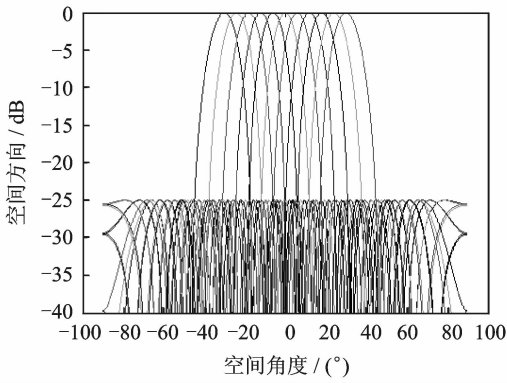


图 3 接收形成的 11 个波束
Fig. 3 Eleven received beams

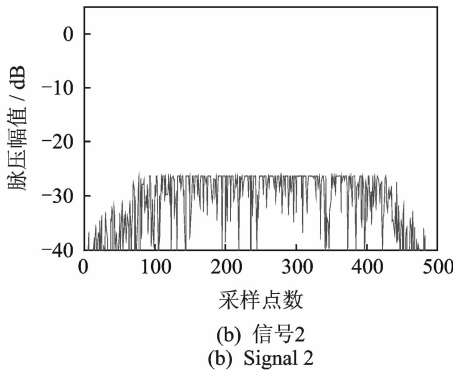
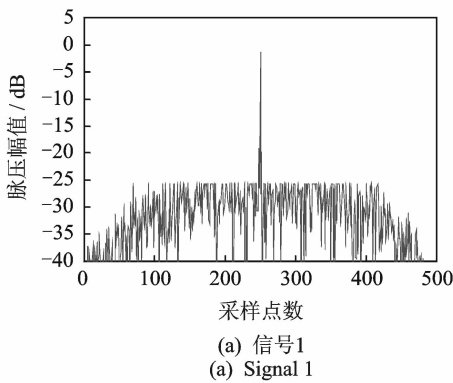


图 4 两种信号经过脉压器 1 输出
Fig. 4 Output of two signals after the first pulse compression

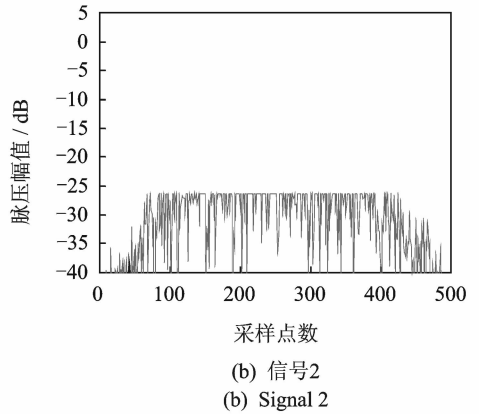
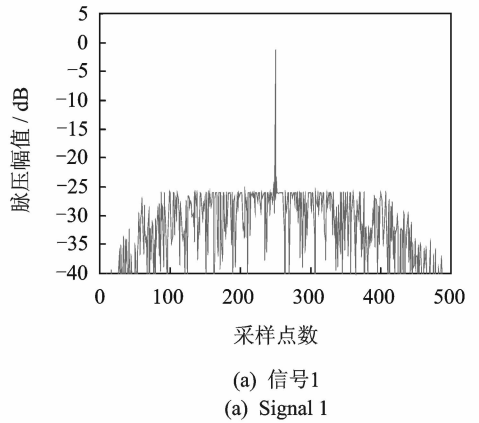


图 5 两种信号经过脉压器 2 输出
Fig. 5 Output of two signals after the second pulse compression

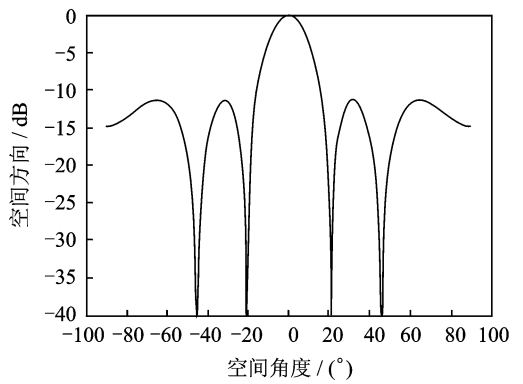


图 6 发射子阵波束俯仰波瓣
Fig. 6 Pitch beam pattern of transmitting beam

(5)发射波束合成 针对每个接收波束的 12 组正交输出,进行发射波束形成,加权即接收波束覆盖的方向。而波瓣俯仰方向是 4 个单元预先合成的,发射波束俯仰波瓣性能见图 6 所示。

(6)多脉冲动目标检测(Moving target detection, MTD)与恒虚警检测 对发射波束合成的数据,积累 128 脉冲,进行 MTD 处理,采用脉冲对其后进行快速傅里叶变换的方法完成。针对 MTD

的输出,求取包络,采用滑动平均构建快门限检测,形成点迹输出,最终形成航迹。

3 实验数据处理

采用该 MIMO 实验系统,针对民航目标进行了观测,获取的单帧数据处理距离与多普勒图见图 7,所形成航迹见图 8。

图 8 为本雷达观测民航目标形成的航迹。

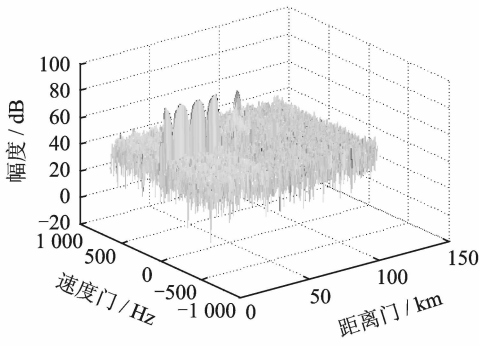


图7 第5波束通道输出距离与多普勒图

Fig.7 Distance and Doppler plot of the 5th beam

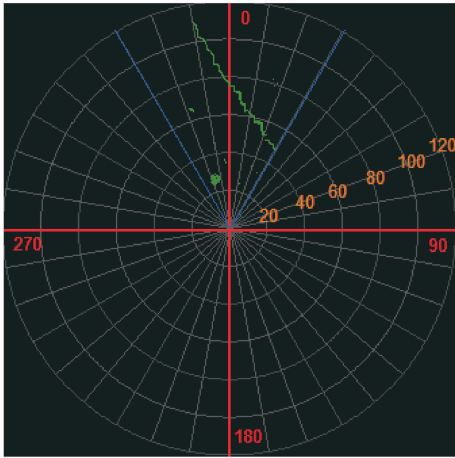


图8 观测民航飞机形成的航迹(同心圆单位 km, 0°为正北方向)

Fig.8 Track of observing civil aircraft (circle unit km, due north is 0°)

4 结束语

本文给出了一种子阵级 MIMO 雷达设计方法,通过采用二相编码信号正交波形发射,并在接收端形成发射波束,成功实现了目标观测。该设计方法可以作为数字阵的 MIMO 雷达工作方式推广应用,具有很强的工程应用价值。

参考文献:

[1] Chen Haowen, Li Xiang, Jiang Weidong, et. al. MIMO radar sensitivity analysis of antenna position for direction finding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012,60(10):5201-5216.

- [2] Khan W, Qureshi I M, Sultan K. Ambiguity function of phased-MIMO radar with colocated antennas and its properties[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014,1(7):1220-1224.
- [3] Hassanien A, Vorobyov S A. Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 58(6):3137-3151.
- [4] Xu Lei, Liang Qilian. Zero correlation zone sequence pair sets for MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(3): 2100-2113.
- [5] Moo P W, Zhen Ding. Tracking performance of MIMO radar for accelerating targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(21):5205-5216.
- [6] Forsythe K W, Bliss D W, Fawcett G S. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar: performance issues[C]//Conference Record of the Thirty-Eighth Asimolar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, N J: IEEE, 2004:310-315.
- [7] Bekkerman I, Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 3873-3883.
- [8] 和洁,冯大政,李晓明. 基于遗传算法和禁忌搜索的 MIMO 雷达天线布阵优化[J]. 数据采集与处理, 2011,26(4):413-419.
He Jie, Feng Dazheng, Li Xiaoming. Optimization of antenna array geometry in MIMO radar based on genetic algorithm and tabu search[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011,26(4):413-419.
- [9] 施群,张弓,刘文波. 混沌理论在 MIMO 雷达波形设计中的应用[J]. 数据采集与处理,2010,25(4):525-529.
Shi Qun, Zhang Gong, Liu Wenbo. Application of chaos theory to MIMO radar waveform design[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010,25(4):525-529.

作者简介:王峰(1976-),男,研究员,博士,研究方向:雷达信号处理, E-mail: littlestone2006@126.com; 郭国强(1983-),男,高级工程师,博士,研究方向:雷达信号处理; 李品(1982-),男,高级工程师,博士,研究方向:雷达信号处理; 龙伟军(1979-),男,高级工程师,博士,研究方向:雷达信号处理。