

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.010

机载 MIMO 雷达最优发射波形合成结构设计*

赵红言¹, 贺刚^{2,**}, 林晋福², 周万银³, 苏令², 张西川⁴, 李孟达², 曹晖²

(1.空军工程大学 理学院, 西安 710051; 2.空军工程大学 科研部信息中心, 西安 710051;
3.空军工程大学 训练部, 西安 710051; 4.空军装备部, 北京 100161)

摘要:为进一步满足未来现代化战争中预警机多功能、一体化和小平台的设计要求,提出了机载 MIMO 雷达基于对地/海监视任务模式下的最优阵列合成结构设计方法,并给出了相应的最优化问题的解法。最后,对该算法进行仿真,结果表明该算法实现了机载 MIMO 雷达在最小的阵元负荷下最好的阵元利用率,当最小可检测速度小于 10 m/s 时,改善因子明显高于均匀发射波形结构,对低速目标的检测性能优势更为明显。

关键词:预警机; MIMO 雷达; 发射波形合成结构; 对地/海监视; 最优化设计

中图分类号: TN957.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)01-0051-04

Design of Optimal Transmitted Waveform Synthetic Structure for Airborne MIMO Radar

ZHAO Hong-yan¹, HE Gang², LIN Jin-fu², ZHOU Wan-yin³, SU Xi², ZHANG Xi-chuan⁴, LI Meng-da², CAO Hui²

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Information Centre of Research and Development Section, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. Training Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 4. Air Force Department, Beijing 100161, China)

Abstract: To further satisfy the design requests of early-warning aircraft for multi-purpose, integrated and the small platform in future modernization war, an optimal array synthetic structure design method for airborne Multiple Input Multiple Output (MIMO) radar is proposed, which works under the mode of Ground/Sea Moving Target Indicator (GMTI). At the same time, a resolvent for optimal problem is proposed. Simulation of the proposed algorithm shows that the method can realize the best sensor utilization ratio under the least sensor burden, and when the Minimum Detectable Velocity (MDV) is smaller than 10 m/s, the improvement factor is higher than that of the even launch profile structure obviously and is more obvious to the low and slow target examination performance.

Key words: early-warning aircraft; MIMO radar; transmitted waveform synthetic structure; ground/sea moving target indicator (GMTI); optimization design

1 引言

多功能、一体化是第三代预警机的重要技术特征,其中将对地/海监视与对空监视的一体化结合是未来预警机发展的重要思路。如美军正计划将 E-

8“联合警戒与目标攻击雷达系统”和 E-3 的对空监视系统结合起来形成一体化的预警监视系统^[1-3]。随着对预警监视的军事需求的日益提高,又迫切需要增加预警机的航时,降低载机负荷,减少造价。

机载多输入多输出 (Multiple Input Multiple Out-

* 收稿日期: 2012-07-03; 修回日期: 2012-09-04 Received date: 2012-07-03; Revised date: 2012-09-04
基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 (2009CB613306)

Foundation Item: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (2009CB613306)

** 通讯作者: greetree_1234@163.com Corresponding author: greetree_1234@163.com

put, MIMO)雷达具有非常灵活的工作模式,它可以通过自适应调整各发射阵元的发射信号的相干性,灵活实现发射子阵的实时合成,而不同的发射子阵合成结构又具有不同的目标探测特性和检测性能,因此机载 MIMO 雷达在多功能预警探测和任务、环境自适应方面具有极大的潜力。文献[4]研究了 MIMO 雷达非均匀线阵结构,研究得出非均匀线阵能够产生更多的有效虚拟阵元,降低了均匀配置的 MIMO 雷达阵列虚拟阵元的冗余数量,研究表明该结构具有更多的空间自由度、更好的克拉美-罗界和更好的到达方向角(Direction of Arrive, DOA)估计性能。加州工学院沈俊阳以及华中科技大学董建等人基于传统相控阵雷达接收端最小冗余阵列的设计思想,针对均匀线阵配置下虚拟阵元冗余度高的问题,分别提出了发射阵列配置设计的最小冗余阵列设计算法和基于差集理论的最小冗余算法^[5-6],有效提高了 MIMO 雷达的阵元利用率。西安电子科技大学也对该问题进行了详细研究,并提出了一系列 MIMO 雷达阵列优化配置的高效算法^[7-12]。

以上各文献中所研究天线阵列的设计方法是在一定阵元数量下,通过调整收发阵列元的物理间距实现整个阵列的最小冗余,得到最优设计方案,然后依据该方案进行天线的生产制造,这些方法均为静态的离线设计方法。而文中所提的研究方法是在机载 MIMO 雷达物理结构固定时,如何依据实战中预警探测的任务需求实时自适应调整各发射阵元的波形相干合成结构以及接收阵列的子阵合成结构,使得机载 MIMO 雷达在 GMTI 任务模式下探测性能最优。

2 GMTI 模式下的最优发射波形合成结构设计

当机载 MIMO 雷达具有 M 个发射阵元、 N 个接收阵元的线性阵列,以 GMTI 模式进行探测时,由于目标检测所关心的低慢速小目标主要分布于主杂波附近,通过对发射波形任意合成结构对杂波抑制性能影响的分析可得,非均匀划分的子阵结构具有更好的改善因子。此时以主杂波附近杂波抑制性能的最优为目标,在接收阵列子阵合成结构固定情况下的发射波形合成结构设计的最优化问题可描述如式(1),此处称之为基于改善因子性能最优的 OTWSS 设计方法。

$$\begin{aligned} & \max_{\Theta} f_{\text{IF}}(\Theta) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} 1 \leq M_q < M, \\ \sum_{q=1}^Q M_q = M \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $f_{\text{IF}}(\Theta)$ 表示与发射波形合成结构有关的改善因子表达式。

$$f_{\text{IF}}(\Theta) = \mathbf{S}_{\text{sg}}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}_{\text{sg}} \cdot \frac{\text{tr}(\mathbf{R})}{\mathbf{S}_{\text{sg}}^H \mathbf{S}_{\text{sg}}} \quad (2)$$

其中, \mathbf{S} 为导向矢量。且有杂波协方差矩阵

$$\mathbf{R} = (\mathbf{I}_{NK} \otimes \mathbf{T}^H) \mathbf{R}_O (\mathbf{I}_{NK} \otimes \mathbf{T}) + \delta^2 \mathbf{I}_{QNK} \quad (3)$$

式中, \mathbf{T} 由合成结构 Θ 决定, \mathbf{R}_O 表示全正交 MIMO 雷达时的杂波协方差矩阵。

综上所述,在 GMTI 探测模式下的实现流程如图 1 所示。任务切换雷达系统依据任务需求选择 GMTI 探测模式后进行阵列结构的优化调整,优化的策略采用式(1)。

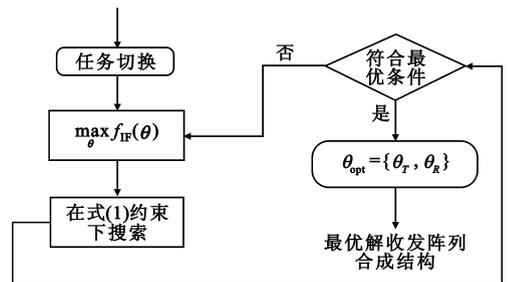


图 1 最优发射波形合成结构设计流程图

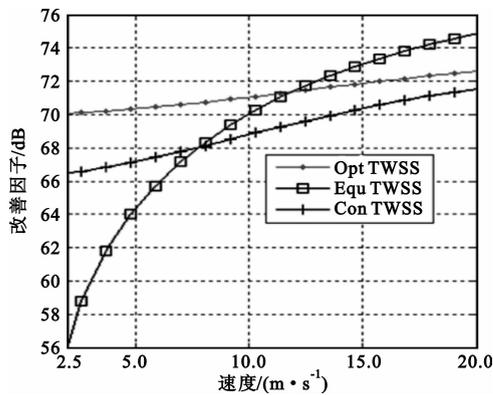
Fig.1 Design flow chart of optimal transmitted waveform synthetic structure

3 仿真实验

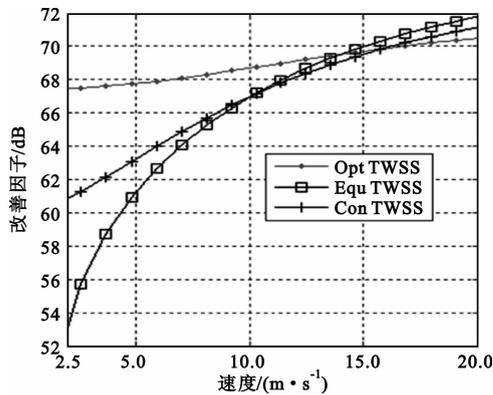
设定发射正交波形个数 $Q = 4$; 发射通道数 $M = 16$, 接收通道数 $N = 8$; 最大可用阵元数 $N_{\text{max}} = 64$; $\lambda = 0.23$ m。杂噪比 $\text{CNR} = 60$ dB。接收阵元间距均为 $d_R = \lambda/2$, 发射阵元间距为 $d_T = \alpha d_R$ 。

GMTI 模式下依据式(1) IF-OTWSS 方法进行最优化设计,图 2 给出了机载 MIMO 雷达在该模式的发射波形结构的最优集合。当 $Q = 8$ 时最优集合为 $\Theta_{\text{opt}} = \{1, 5, 1, 1, 1, 1, 5, 1\}$, 如图 2(a) 所示, 其中参照发射波形合成结构为 $\Theta = \{2, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 2\}$ 。当 $Q = 4$ 时对应最优集合为 $\Theta_{\text{opt}} = \{7, 1, 1, 7\}$, 如图 2(b) 所示, 其中参照发射波形合成结构为 $\Theta = \{5, 3, 3, 5\}$ 。可见由该最优结构下主杂波附近目标的最小可检测速度(MDV)有了较大降低。MDV < 10 m/s 范围内最优发射波形合成结构(最优 TWSS)改善因子

明显高于均匀发射波形合成结构(均匀 TWSS)。相比均匀发射波形结构, 随着目标速度减小, 最优阵列 STAP 性能下降不大, 因此本文对低慢速小目标的检测性能优势越明显。如图 2(b) 所示, 当 $Q = 4$ 、待检测目标速度为 5 m/s 时, 最优发射波形合成结构下的输出改善因子比均匀阵列的改善因子高约 6 dB 。当待检测目标速度增大时, 如图 20 m/s 处, 均匀 TWSS 的性能上升并与非均匀 TWSS 的性能趋于一致。对比图 2(a)、(b) 可得 Q 越大, IF 越高, 对目标的检测性能越好。



(a) $Q = 8$



(b) $Q = 4$

图 2 最优发射波形合成结构

Fig.2 Optimal transmitted waveform synthetic structure

图 3 给出了经 500 次蒙特卡罗仿真得出的最优 TWSS 和均匀 TWSS 分别在 $Q = 8$ 和 $Q = 4$, 归一化改善因子为 -6 dB 时, 平均 MDV 随 CNR 的变化曲线, 可见在杂噪比较低时, 均匀 TWSS 和最优 TWSS 的性能相近, 甚至高于最优 TWSS, 但随着 CNR 上升, 可视待检测多普勒区域逐渐靠近主杂波区域, 杂波强度逐渐增大, 最优 TWSS 的 MDV 逐渐变小, 检测性能优于均匀 TWSS。可见该模式下本文算法设计的发射波形合成结构具有较好的性能。

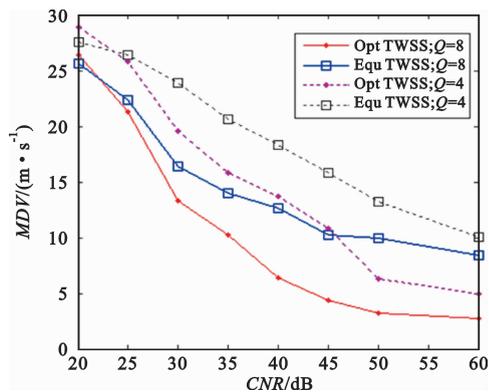


图 3 MDV 随 CNR 的变化曲线

Fig.3 MDV vs. CNR

4 结论

本文主要研究了发射波形影响下的机载 MIMO 雷达最优发射波形合成结构的设计问题, 提出了对地/海监视任务模式下的最优阵列合成结构设计方法。研究得出如下结论:

- (1) 本文算法得出的最优子阵合成结构是一种非均匀子阵划分结构, 最优结构内由于子阵内的阵元数不等, 避免了均匀子阵划分在等效相位中心间距超出半波长时出现的栅瓣现象, 极大地提高了系统杂波抑制和目标检测性能;
- (2) 由于 MIMO 雷达在各杂波分布区域的杂波抑制效果不同, 在 GMTI 探测模式下, 为了提高系统探测性能, 应当使得正交波形的个数 Q 尽量大。

参考文献:

- [1] 王小漠. 第三代预警机[J]. 雷达与探测技术动态, 2009(6):1-5.
WANG Xiao-mo. The Third Early Warning Aircraft[J]. Dynamic Information of Radar and Detect Technology, 2009 (6):1-5. (in Chinese)
- [2] 葛建军. 机载预警雷达的未来发展[J]. 雷达与探测技术动态, 2009(6):67-71.
GE Jian-jun. Development of Airborne Warning Radar[J]. Dynamic Information of Radar and Detect Technology, 2009 (6):67-71. (in Chinese)
- [3] 金林. 机载预警雷达新技术展望[J]. 雷达与探测技术动态, 2009(6):71-76.
JIN Lin. New Technology View of Airborne Warning Radar [J]. Dynamic Information of Radar and Detect Technology, 2009(6):71-76. (in Chinese)
- [4] 邵慧, 田文涛, 张浩, 等. MIMO 雷达非均匀布阵的性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(4): 247-250.
SHAO Hui, TIAN Wen-to, ZHANG Hao, et al. Performance Analysis of Unequality Arrays of MIMO Radar[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(4):247-250. (in Chinese)

- [5] Chen C, Vaidyanathan P P. Minimum redundancy MIMO radars[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, WA, USA: IEEE, 2008:45-48.
- [6] Dong J, Li Q, Guo W. A combinatorial method for antenna array design in minimum redundancy MIMO radars[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8(1): 1150-1153.
- [7] 张娟, 张林让, 刘楠. 阵元利用率最高的 MIMO 雷达阵列结构优化算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(1): 86-90.
ZHANG Juan, ZHANG Lin-rang, LIU Nan. The most Using Ratio Algorithm of Array Unit of MIMO Radar Array Structure [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(1): 86-90. (in Chinese)
- [8] Zhang J, Zhang L R, Liu N, et al. An efficient algorithm for array optimization of MIMO radar[C]//Proceedings of 2009 IET International Radar Conference. Guilin: IET, 2009: 1-4.
- [9] Zhang Zhaoyang, Zhao Yongbo, Huang Jingfang. Array Optimization for MIMO Radar by Genetic Algorithms[C]// Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin: IEEE, 2009: 4654-4657.
- [11] Fuhrmann D R, Antonio G S. Transmit beamforming for MIMO radar systems using signal cross-correlation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 171-186.

- [12] Fuhrmann R D, Antonio S G. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation[C]//Proceedings of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. California: IEEE, 2004: 295-299.

作者简介:



赵红言(1965—),男,陕西西安人,分别于1997年和2006年获西安空军工程大学硕士学位和博士学位,现为硕士生导师,主要从事电子设计、信息及信号处理;

ZHAO Hong-yan was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1965. He received the M. S. degree and the Ph. D. degree from Air Force Engineering University in 1997 and 2006, respectively. He is now an instructor of graduate students. His research interests include VLSI architecture design, signal and information processing.

贺刚(1979—),男,江西永新人,2005年于西安空军工程大学获硕士学位,现为博士研究生,主要从事信息及信号处理、电子设计方向的研究。

HE Gang was born in Yongxin, Jiangxi Province, in 1979. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2005. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns electronic design, signal and information processing.

Email: greetree_1234@163.com