

米波 MIMO 雷达系统设计的几个问题

陆鹏程, 吴剑旗

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要: 多输入多输出(MIMO)雷达是近年雷达领域研究的热点之一, 国内外专家对 MIMO 雷达的认识也存在模糊的地方。MIMO 雷达计算复杂度高, 特别在阵元数量较多的情况下更为明显, 所以工程上在米波频段更容易实现 MIMO 雷达。基于米波 MIMO 雷达系统设计的角度, 并从 MIMO 雷达工作物理解结合理论分析, 对其独特的功率孔径资源设计、低空探测性能、抗干扰能力和测高精度四个关键问题进行分析。米波 MIMO 雷达具有明显的技术特点, 最后对部分结论进行了试验验证。

关键词: 米波多输入多输出雷达; 抗干扰; 低空探测; 分辨率

中图分类号: TN957; TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2337(2017)03-0236-05

Some Issues on VHF MIMO Radar System Design

LU Pengcheng, WU Jianqi

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: MIMO radar is one of the research hotspots in international radar community. Both domestic and foreign professionals are controversial on the performance of MIMO radar. As far as the high computation complexity of MIMO radar, especially in large amount of array elements, the VHF MIMO radar has its advantage in engineering realization. Based on the system design and the physical meanings of MIMO radar, the power-aperture resource design, low-altitude detection capability, anti-interference and height measurement of the VHF MIMO radar are analyzed. The VHF MIMO radar has obvious technical features. Finally, some experimental results are given.

Key words: VHF MIMO radar; anti-interference; low-altitude target detection; resolution

0 引言

米波雷达由于反隐身能力强, 近年来发展迅速^[1-3]。数字阵列技术的应用使得新一代米波雷达向智能化、软件化、多功能的方向发展。特别地, 米波数字阵列雷达采用 MIMO 方式工作时, 不仅克服了微波频段 MIMO 雷达运算量巨大不利于工程实现的障碍^[4], 而且较常规雷达在抗欺骗干扰、反隐身、探测低慢小目标探测等方面具有综合优势。本文将结合试验数据, 对米波 MIMO 雷达系统设计的关键问题进行分析。

1 功率孔径资源设计

功率孔径资源是雷达系统设计需要考虑的首要问题。Brookner 认为, MIMO 雷达功率孔径利

用没有常规相控阵利用率高^[5]。这一观点不全面, 主要是忽略考虑了跟踪资源的影响。

相对于微波频段, 隐身目标在米波频段的 RCS 得益约为 15 dB。依据搜索雷达方程, 在雷达工作频率、接收机灵敏度及目标 RCS 确定情况下, 雷达的作用距离主要由发射功率、发射和接收增益、数据率决定。设常规雷达的发射增益为 G_t 。MIMO 雷达采用正交波形发射, 发射无阵列增益(发射正交信号, 阵列间为功率叠加, 总功率和常规方式相同, 暂不考虑阵元增益), 但其发射波束宽度比常规体制宽 N 倍($10\lg N = G_t$), 故积累时间相对于常规雷达增加($10\lg N = G_t$) 倍。故在积累时间相同的情况下, MIMO 体制和常规雷达的系统得益大致相同。需要考虑的是, 常规雷达数据率一般为 6~10 s, 假定按 T_s 秒计算。MIMO 雷达考虑目标距离、多普勒跨越补偿的实现的可行性, 相干积

累时间一般为 1 s , T_s 次处理间进行非相干积累。在数据率同样为 T_s 的情况下,所以 MIMO 雷达相对于常规雷达的功率孔径损失为 $10\lg\sqrt{T_s}$ 。

上述分析是在仅仅考虑搜索情况下的系统资源分析。实际上,MIMO 雷达是一种真正实现 TAS(Track and Search) 体制的雷达,由于发射宽波束辐射,搜索同时覆盖全空域,跟踪不占用搜索资源,对于需要跟踪的目标,已有波束资源覆盖,所以仅通过后端计算就可实现对目标跟踪波束指向的调整。而常规雷达是通过分时方式实现搜索和跟踪资源的分配。因此,跟踪目标数量越多,特别是在饱和跟踪的情况下,MIMO 体制雷达的资源优势将更加明显。

假定跟踪数据率为 T_t ,跟踪目标数为 N_t 。假定相控阵搜索相对功率孔径资源为 R_s ,则相对跟踪资源为 $R_s/N \times (T_s/T_t) \times N_t$,总功率孔径资源消耗为 $R_s \times (1 + 1/N \times (T_s/T_t) \times N_t)$ 。同样探测能力情况下,MIMO 雷达相对功率孔径资源为 $R_s \times \sqrt{T_s}$ 。可见,MIMO 雷达在多目标跟踪情况下,系统功率孔径资源具有优势。

下面给出典型工作参数下,两种工作方式相对功率孔径需求的仿真。仿真条件:天线阵元 64 个,搜索数据率 10 s ,跟踪数据率 1 s ,系统相对功率孔径需求的对比如图 1 所示。由图可见,跟踪目标数量小于 16 个时,常规相控阵工作模式下功率孔径资源需求少,随着跟踪目标数目的增多,MIMO 工作方式需要的系统资源并不增加。由此可见,相对于常规相控阵雷达,实现搜索兼多目标跟踪时,MIMO 雷达将节省更多的功率孔径资源。

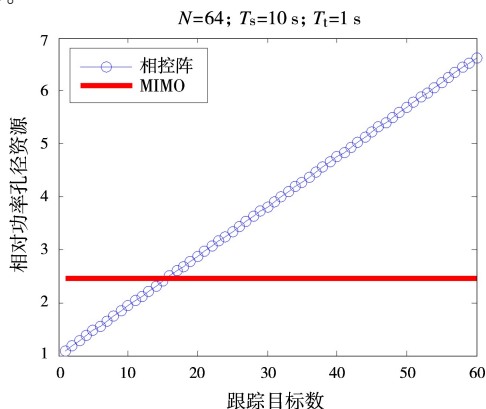


图 1 MIMO 和相控阵雷达相对功率孔径资源需求对比

2 低空探测性能分析

低空探测性能是衡量地基米波雷达的一项关键指标。特别是对直升机、巡航导弹、无人机等低空、慢速、小 RCS(简称“低慢小”)目标,常规米波雷达由于受到地球曲率、多径效应和地杂波等因素的影响,探测性能大打折扣,但米波 MIMO 雷达在探测“低慢小”目标方面具有潜在优势。

多径效应对米波雷达低空探测性能的影响不能一概而论。首先,米波雷达一般设计为长重复周期脉冲工作方式,确保距离上目标不模糊,同时采用短重复周期脉冲对长重复周期脉冲进行补盲,补盲探测范围一般在几十千米。可见,对于较近距离的低空目标,雷达探测经常使用能量较小的短重复周期脉冲进行探测。所以针对近程低空目标探测,雷达可通过优化资源,增加近距离目标探测的能量,靠能量积累来弥补仰角波束上翘的能量损失^[6]。由于补盲脉冲探测距离很近,一般仅占用系统资源的百分之几,即使成倍增加资源,也对系统整体的资源需求影响不大。所以,米波雷达近距离低空探测波束上翘问题并不可怕,可通过补盲脉冲能量的适当分配,提高对“低慢小”目标的探测性能。

近区“低慢小”目标检测易受地杂波、仙波等影响,增加相干处理时间,提高多普勒分辨能力是提高杂波中检测能力的有效手段之一。采用 MIMO 工作方式,发射宽波束,接收多波束同时处理,相干积累处理时间处理长,具有杂波中检测慢速目标能力强的潜在优势。

复杂气象引起的仙波是雷达探测中的常见现象,其回波特征从脉压波形上看和常规目标没有区别,运动速度一般小于 200 km/s 且非常稳定。图 2 为实际探测的典型仙波多普勒特征分布图,可见仙波速度非常稳定,最多不跨越两个多普勒通道,以 92% 的概率稳定在一个通道内。另外,仙波一般显示为多批目标同一方向运动。MIMO 雷达速度分辨率高,可利用上述特征有效滤除仙波。图 3 给出了仙波环境下探测效果,可见真实民航目标航迹可从仙波航迹中分辨出来(图中圆圈标记的航迹为仙波群)。

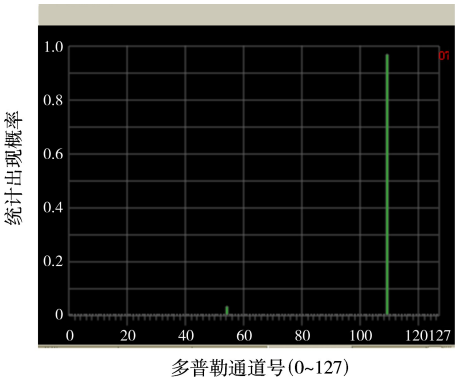


图 2 仙波多普勒特征分布图

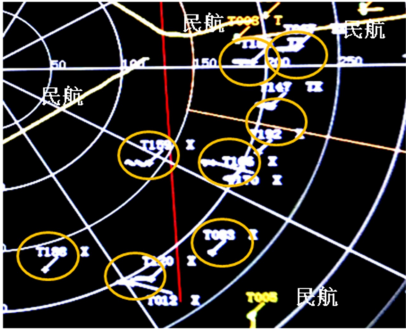
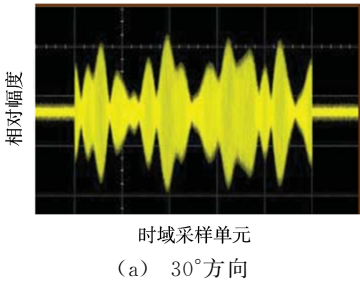


图 3 仙波群观测画面

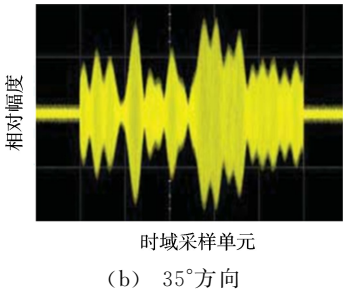
3 抗干扰能力分析

米波雷达遭受的有源干扰主要是压制式干扰、欺骗式干扰及混合干扰。米波 MIMO 雷达对欺骗式干扰和压制式干扰的处理有着自身的特点。

现代雷达系统的抗干扰设计主要从反侦察和抗干扰两个方面进行。从反侦察的角度来说,MI-MO 雷达由于各天线阵元发射正交波形,在空间各向叠加结果不同,干扰机从不同方位接收到的雷达波形各异,且形状复杂(如图 4 所示),非常规脉冲雷达矩形脉冲信号导致干扰机的侦察设备无法准确侦察脉冲前沿信号,即使干扰机能截获转发某一方位的信号,由于 MIMO 雷达处理在空间各方向的空间匹配滤波函数均不相同且正交,干扰机难以对 MIMO 雷达形成良好的欺骗效果。



(a) 30°方向



(b) 35°方向

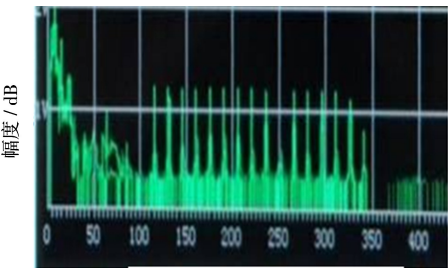
图 4 MIMO 雷达波形图

对于压制式干扰,MIMO 雷达采取的措施和常规雷达措施相似,主要手段是副瓣对消(SLC)和低副瓣设计^[7]。其中,副瓣电平基本是由天线的物理形式决定。副瓣对消处理的核心是利用辅助通道接收到的干扰信号来估计主通道的干扰信号。对于平稳的干扰信号在休止期采集干扰信号是可行的,但现代干扰越来越灵巧,休止期可能采集不到合适的干扰,或不能准确反映干扰情况。因此,工程上也可在非休止期进行干扰对消,但这会带来目标信号损失。为减少目标信号损失,常采用自适应对消处理方法(A-A)改善副瓣对消性能。MI-MO 雷达形成多波束同时覆盖观测方向,在观测某一方向时,可以利用其他方向干扰的主波束作为辅助波束,进行 A-A 对消处理,而不需要额外增加辅助波束。Brookner 认为由于主通道和辅助通道的指向不同,故空间匹配滤波系数不同。因此,MI-MO 雷达的辅助波数通道的采集的干扰经过匹配滤波后,和主通道干扰相关性差,不能实施干扰对消。实际上,MIMO 雷达也可用 A-A 处理,只须在匹配滤波前即在数字波束形成时进行干扰对消处理即可。

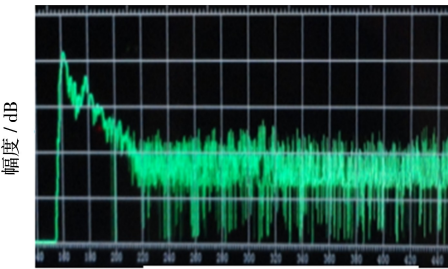
Brookner 还提到,MIMO 雷达对常规压制式干扰,并无特别优势。但是,MIMO 雷达由于采用复杂波形,对抗含有欺骗式干扰“基因片段”的灵巧式干扰效果突出。如图 5 仿真所示,35°方向欺骗干扰经过 MIMO 雷达在 30°方向处理后,无法获得脉冲压缩增益。可知欺骗式副瓣干扰对雷达无法达到理想效果。图 6 给出了相同工作频段的米波雷达和米波 MIMO 雷达在欺骗式副瓣干扰条件处理实际时域脉冲压缩后处理的结果,欺骗式干扰被 MIMO 雷达处理后已被噪声化,无法形成有效干扰。

表 1 给出了米波 MIMO 雷达在密集假干扰下的探测航迹统计(不采用副瓣对消抗干扰措施,以

二次雷达目标为真值),可见,密集假干扰对米波 MIMO 雷达欺骗干扰效果有限,虚假目标出现较少,当干扰超过 25 dB 时雷达探测目标数减少了一半以上,并没有出现虚假目标。这是因为随着干扰功率的加大,密集假目标产生的干扰效果与压制式干扰效果类似,MIMO 雷达可以利用典型的对消(SLC)处理进行抑制。



(a) 常规 LFM 波形处理



(b) MIMO 波形处理

图 5 30°波位对不同方向转发式干扰处理对比

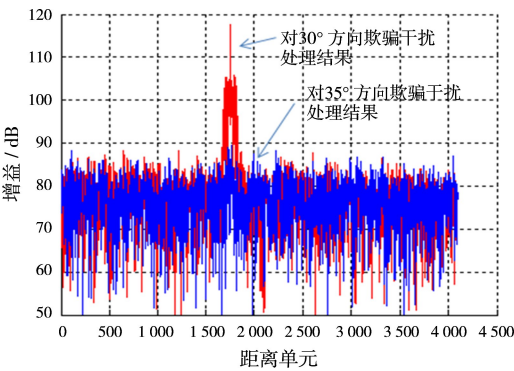


图 6 密集假时域处理对比图

表 1 密集假目标干扰处理结果

干噪比/dB	真实目标/个	虚假目标/个
0	34	0
10	31	0
15	23	1
25	14	2
30	8	2

4 测高精度分析

测高精度是三坐标雷达的关键技术指标。Li Jian 认为,MIMO 雷达由于增加了发射自由度,其测高精度将比常规相控阵雷达提高 M (发射阵元数) 倍。Brookner 对此进行分析^[8] 后认为,相同孔径的 MIMO 雷达的角度分辨率较相控阵雷达提高 $\sqrt{2}$ 倍。Brookner 论述的观点是对的。下面重点分析 MIMO 雷达测高精度能提高的本质原因。

众所周知,常规米波雷达受地面多径效应影响,测高精度差。当前,米波雷达低仰角测高主要通过超分辨、最大似然算法^[9] 等进行。

考虑多径效应,接收信号为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N}$$
 (1)

式中, $\mathbf{S}$ 为信号的波形, $\mathbf{N}$ 为接收机内部噪声矢量。

设方向矢量 $\mathbf{A}_r$ 为

$$\mathbf{A}_r(\theta) = [\exp(j2\pi\mathbf{R}_i/\lambda) \quad \rho \exp(j2\pi\mathbf{R}_d/\lambda)]$$

式中, $\mathbf{R}_i$ 为多径回波距离, $\mathbf{R}_d$ 为直达波回波距离。

得到仰角估计为

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t)x^H(t)$$

$$\mathbf{P}_A = \mathbf{A}(\mathbf{A}^H\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^H$$

$$\hat{\theta} = \arg(\max(\text{tr}(\mathbf{P}_A\hat{R})))$$

但这些算法受幅相校正误差,特别是米波雷达复杂多径环境的影响,实测数据的测高精度稳健程度很差。故在工程实现时,对其基本算法进行算法改良,如果对 $\mathbf{A}_r(\theta)$ 作个变换:

$$\mathbf{A}_r(\theta) = [\exp(j2\pi\mathbf{R}_i/\lambda) + \rho \exp(j2\pi\mathbf{R}_d/\lambda)]$$
 (2)

式中, $\mathbf{A}_r(\theta)$ 为 $N \times 1$ 的列向量。这个公式本质上是把雷达阵面作个变换,相当于以地面为镜像,多径信号受地面反射后进入等效镜面阵面。合成波束如图 7 所示。此算法较最大似然算法稳健,但带来两个问题:1) 测高模糊。由于等效阵面副瓣高,且随着雷达中心架高,栅瓣问题逐渐增多。在地面反射环境参数估计不准确的情况下,栅瓣和主瓣的幅度相近,形成测高模糊;2) 超低仰角测高能力弱。随着仰角逐渐变低,低仰角波瓣宽度迅速增大,严重影响测高精度。

采用 MIMO 雷达将减小这两个因素带来的影响。MIMO 雷达充分利用雷达发射阵元的自由度,其等效阵列导向矢量^[10] 为

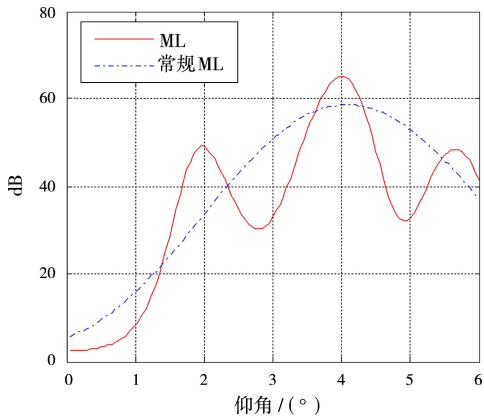
$$\mathbf{A}_{\text{MIMO}}(\theta) = \text{kron}(\mathbf{A}_r(\theta), \mathbf{A}_t(\theta))$$
 (3)

式中, $\mathbf{A}_{\text{MIMO}}(\theta)$ 为 $(N \times M) \times 1$ 维列向量, kron 为 Kronecker 积, 式(3) 表示的是 MIMO 雷达收发双程波束等效合成矢量。

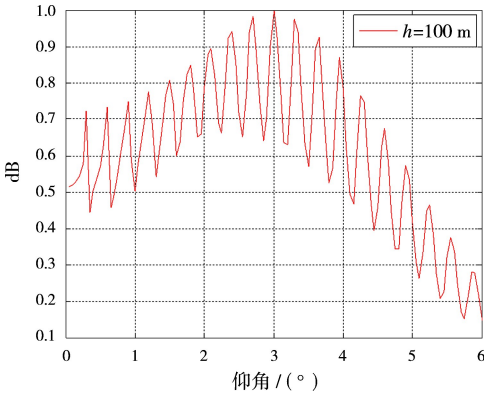
将合成导向矢量运用到 MIMO 雷达测高得

$$\theta = \arg(\max(\text{tr}(\mathbf{P}_{\text{AMIMO}} \hat{\mathbf{R}}))) \tag{4}$$

由图 8 可见, MIMO 雷达天线方向图在低仰角为非高斯形状的波形, 波束宽度减小大约 $\sqrt{2}$ 倍。在信噪比相当的情况下, 测高精度可提高大约 $\sqrt{2}$ 倍。



(a) $H_r = 12\text{ m}$



(b) $H_r = 100\text{ m}$

图 7 合成矢量测高典型图

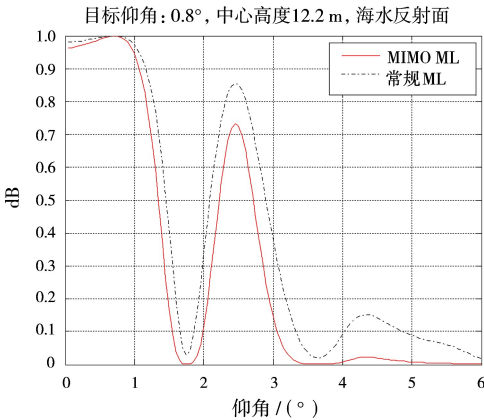


图 8 MIMO 合成矢量测高和常规波瓣测高对比

由上文分析, 可以得出结论: 米波 MIMO 雷达测高精度仍然由功率和俯仰孔径决定, 相同功率和孔径下, 米波 MIMO 雷达相对常规米波雷达测量精度可提高 40%。

5 结束语

MIMO 雷达是目前雷达研究热点之一, 但目前少有文献分析其特点, 缺少解决雷达工程使用和设计的关键问题分析, 本文结合米波雷达 MIMO 具体试验进行分析。可见, 米波 MIMO 雷达在保持反隐身性能的同时, 对低慢小目标探测、反欺骗干扰、低仰角测高等方面有着独特的优势。这些工作对于米波 MIMO 雷达设计将具有一定指导意义。

感谢中国电科第三十八所张远研究员、郭妍利工程师及空军装备研究院李建勋高工、李增辉博士对本文的支持。

参考文献:

[1] WU Jianqi, HE Ruilong, JIANG Kai. Researches of a New Kind of Advanced Metric Wave Radar[C]// IEEE Radar Conference, Waltham, MA: IEEE, 1999: 194-197.

[2] SKOLNIK M. Attributes of the Ubiquitous Phased Array Radar[C]// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, MA: IEEE, 2003: 101-106.

[3] LI J, STOICA P. MIMO Radar Signal Processing [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2009.

[4] WU Jianqi, XU Jin. Some Issues in the Development of Metric Surveillance Radar[C]// International Conference on Radar, Adelaide, SA: IEEE, 2013: 6-10.

[5] BROOKNER E. MIMO Radar Demystified and Where it Makes Sense to Use[C]// IEEE Radar Conference, Cincinnati, OH: IEEE, 2014: 411-416.

[6] 徐晋, 付启众, 陆鹏程, 等. 米波雷达对海面目标探测性能分析及验证[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4): 376-379.

XU Jin, FU Qizhong, LU Pengcheng, et al. Analysis and Experiment Verification of Maritime Target Detection Performance of Meter-Wave Radar[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(4): 376-379. (in Chinese)

[7] BROOKNER E, HOWELL J M. Adaptive-Adaptive Array Processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1986, 74(4): 602-604.