

一种基于检测单元观测数据的目标检测算法

黄情操

湖南铁道职业技术学院轨道交通机车车辆学院, 湖南 株洲

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

基于目标、杂波与频率可控阵列MIMO雷达系统响应之间的互耦机制, 本文将频率分集对杂波散射特性的影响纳入检测器设计框架。推导出—阶检测器OS-GLRT, 该检测器仅使用被测单元的回波数据即可完成整个检测过程。数值仿真结果验证了该检测器的有效性。

关键词

频控阵MIMO雷达, 自适应目标检测, 信号依赖杂波, 空时自适应处理, 主瓣干扰抑制

A Target Detection Algorithm Based on Observation Data from Detection Units

Qingcao Huang

School of Locomotive and Vehicle, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou Hunan

Received: June 24, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Based on the mutual coupling mechanism between the target, clutter, and frequency-controllable array radar system response, this paper incorporates the influence of frequency diversity on clutter scattering characteristics into the detector design framework. A first-order detector is derived, which can complete the entire detection process using only the echo data of the unit under test. Numerical simulation results verify the effectiveness of this detector.

Keywords

FDA-MIMO Radar, Adaptive Target Detection, Signal Dependent Clutter, Space-Time Adaptive Processing, Main-Lobe Jamming Suppression



1. 引言

近年来, 频率可控阵列雷达[1]因其显著的应用潜力而持续受到国内外学术界的密切关注[2]-[4]。Antonik [5]等人设计了一种基于广义似然比检验(GLRT)准则的噪声背景下的训练数据检测器, 并随后将频率可控阵列(FCA)多输入多输出(MIMO)系统扩展到极化域, 构建了相应的检测方法。由于 FCA 的距离依赖杂波, 相邻距离单元的传统参数估计方法难以应用。因此, Cui [6]等人和 Wang [7]-[9]等人分别提出了基于 GLRT 和 Rao-Wald 准则的无训练数据检测器。Wang [7]-[9]等人提出了三种基于 GLRT、Rao 和 Wald 准则的贝叶斯检测器。此外, 结合 FCA-MIMO 的距离超分辨率特性, Wang 等人研究了分布式目标的检测方法。朱圣棋[10]等人提出了一种迭代多目标检测算法, 并在后续工作中提出了在主瓣欺骗干扰场景下同时检测目标和干扰的联合方案。Wang [11]等人设计了已知和未知目标多普勒场景下的相应自适应检测方案。在有训练数据的条件下, Gao [12]等人研究了高斯噪声背景下基于 GLRT 准则的一步和两步检测方法。Wang、Li、Qin、Xu [13]-[16]等人研究了在主瓣干扰和高斯噪声环境下的一步和两步 GLRT 检测器进行目标检测, 其中主瓣干扰是由转发干扰机生成的静止假目标。Li [14]等人研究了复合高斯杂波背景下的分布式目标检测, 假设杂波的非平稳纹理分量遵循伽马分布, 而斑点分量遵循复高斯分布, 并分别基于两步 GLRT、两步 Rao 和两步 Wald 准则提出了三种检测器。Gui 等人考虑了时空二维导向矢量失配下的目标检测问题, 通过在原始导向矢量的基础上引入具有特定结构的虚拟信号, 构建了新的假设检验模型, 并使用 GLRT 和 Wald 准则推导出了相应的鲁棒检测器。Huang 解决了由于实际可用的传输样本数量远小于待检测数据的维度(即无法获得正定协方差矩阵)而导致检测性能急剧下降的问题, 并分别基于 GLRT 和 Rao 准则设计了相应的降维检测器。

2. 基本设计思想

关于频率可控阵列雷达目标检测的大多数研究都遵循统计信号处理的基本思想。本文将实际的检测问题抽象为二元假设检验问题, 即通过构建适当的检验统计量来在目标存在(H_1 假设)和目标不存在(H_0 假设)这两个假设之间做出判断。基本过程如下: 1) 基于观测模型建立统计假设模型; 2) 基于统计假设模型, 建立两个假设下回波数据的条件概率分布 $P(y|H_1)$ 和 $P(y|H_0)$; 3) 根据一定的检测器设计准则构建检验统计量 $T(y)$; 4) 根据所选的决策准则确定相应的决策阈值 n ; 5) 通过比较检验统计量与阈值, 推断并做出假设检验状态的决策, 即如果 $T(y) > n$, 则判断为 H_1 , 如果 $T(y) < n$, 则判断为 H_0 。

3. OS-GLRT 的推导

$$y_l = \left[A_T(\theta_0, \gamma_0) \begin{pmatrix} x^r \\ x_l^c \end{pmatrix} \right] a_R(\theta_0) + n_l = \left[A_T(\theta_0, \gamma_0) a_R(\theta_0) \right] \begin{pmatrix} x^r \\ x_l^c \end{pmatrix} + n_l, l=1, 2, \dots, l \quad (1)$$

其中, n_l C^{MN} 表示噪声。 $A_T(\theta_0, \gamma_0)$, $a_R(\theta_0)$ 如公式(2), 公式(3)所示。 x^r , C^M 分别为表示目标与第 l 个脉冲的杂波复散射系数矢量。 l 表示发射的脉冲数量。

$$A_T(\theta_0, \gamma_0) = \text{diag}[a_T(\theta_0, \gamma_0)] \in C^{MN} \quad (2)$$

$$a_R(\theta_0) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} \sin \theta_0}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} (N-1) \sin \theta_0} \right]^T \in C^N \quad (3)$$

进一步, 有:

$$y_l = B(\theta_0, \gamma_0) x^r + B(\theta_0, \gamma_0) x_l^c + n_l, l = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

其中 $B(\theta_0, \gamma_0) = A_T(\theta_0, \gamma_0) a_R(\theta_0)$ 。假设杂波散射系数矢量 x_l^c 独立同分布, 并且服从均值为 0 的复高斯随机分布:

$$x_l^c \sim C N_M(0, R_C) \quad (5)$$

其中 R_C 表示未知的杂波协方差矩阵, 且噪声服从均值为 0 的复高斯随机分布:

$$n_l \sim C N_{MN}(0, \sigma^2 I_{MN}) \quad (6)$$

其中 I_{MN} 表示 MN 维的单位矩阵, σ^2 表示噪声的功率。则有:

$$y_l \sim C N_{MN}(B(\theta_0, \gamma_0) x^r, R), l = 1, 2, \dots, l \quad (7)$$

$$\text{其中 } R = B(\theta_0, \gamma_0) R_C B^H(\theta_0, \gamma_0) + \sigma^2 I_{MN} \quad (8)$$

若目标不存在的情况定义为 H_0 假设; 目标存在的情况定义为 H_1 假设。记 $B = B(\theta_0, \gamma_0)$, 则有:

$$\begin{cases} H_0 : y_l = B x_l^c + n_l, l = 1, 2, \dots, l \\ H_1 : y_l = B x^r + B x_l^c + n_l, l = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (9)$$

进一步, OS-GLRT 统计表达式为:

$$\frac{\max_{x^r R_C} PH_1(y_1, \dots, y_L | x^r, R_C)}{\max_{R_C} PH_0(y_1, \dots, y_L | R_C)} > \eta_{og} \quad (10)$$

$$\frac{\max_{x^r R_C} PH_1(y_1, \dots, y_L | x^r, R_C)}{\max_{R_C} PH_0(y_1, \dots, y_L | R_C)} \leq \eta_{og} \quad (11)$$

其中, $PH_1(\cdot)$ 和 $PH_0(\cdot)$ 表示 H_1 和 H_0 下的联合概率密度函数。 η_{og} 表示检测门限。取对数, 有:

$$\ln PH_1(y_1, \dots, y_L | x^r, R_C) - \ln PH_0(y_1, \dots, y_L | R_C) > \eta_{og} \quad (12)$$

$$\ln PH_1(y_1, \dots, y_L | x^r, R_C) - \ln PH_0(y_1, \dots, y_L | R_C) \leq \eta_{og} \quad (13)$$

则有待检测单元的数据, 在二元假设下的联合概率密度分布函数为:

$$\begin{aligned} PH_0(y_1, \dots, y_L | R_C) &= \prod_{l=1}^L \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-y_l^H R^{-1} y_l} \\ &= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-\sum_{l=1}^L \text{tr}(R^{-1} y_l y_l^H)} \\ &= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-\text{tr}(\sum_{l=1}^L R^{-1} y_l y_l^H)} \\ &= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-\text{tr}(L R^{-1} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l y_l^H)} \\ &= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-L \text{tr}(R^{-1} Z_0)} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
PH_1(y_1, \dots, y_L | x^T R_C) &= \prod_{l=1}^L \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-(y_L - u)^H R^{-1} (y_L - u)} \\
&= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-\sum_{l=1}^L tr(R^{-1} (y_L - u)(y_L - u)^H)} \\
&= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-tr(\sum_{l=1}^L R^{-1} (y_L - u)(y_L - u)^H)} \\
&= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-tr(L R^{-1} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (y_L - u)(y_L - u)^H)} \\
&= \frac{1}{\pi^{MN} \det(R)} e^{-L tr(R^{-1} Z_0)}
\end{aligned} \tag{15}$$

其中, 有:

$$Z_u = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (y_l - u)(y_l - u)^H \tag{16}$$

$$Z_0 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l y_l^H \tag{17}$$

$$u = Bx^t \tag{18}$$

$$R = BR_c B^H + \sigma^2 I_{MN} \tag{19}$$

其对数似然函数为:

$$\ln PH_0(R_c) = -MNL \ln \pi - L \ln \det(R) - L tr(R^{-1} Z_0) \tag{20}$$

$$\ln PH_1(x^T, R_c) = -MNL \ln \pi - L \ln \det(R) - L tr(R^{-1} Z_u) \tag{21}$$

可以分别得到 H_0 假设下 R_c 的最大似然估计和相应的对数似然函数为:

$$\hat{R}_0 = B^+ R Z_0 B^{+H} - \sigma^2 (B^H B)^{-1} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
\ln PH_0(\hat{R}_0) &= -L \left[M + MN \ln \pi + (MN - M) \ln \sigma^2 + \ln \det(B^H B) \right. \\
&\quad \left. + \sigma^{-2} tr(R^{-1} Z_0) + \ln \det(B^+ Z_0 B^{+H}) \right]
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\hat{R}_1 = B^+ Z_1 B^{+H} - \sigma^2 (B^H B)^{-1} \tag{24}$$

$$\hat{x}^t = B^+ \bar{y} \tag{25}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l \tag{26}$$

$$Z_l = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (y_l - \bar{y})(y_l - \bar{y})^H \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
\ln PH_1(\hat{x}^t, \hat{R}_1) &= -L \left[M + MN \ln \pi + (MN - M) \ln \sigma^2 \right. \\
&\quad \left. + \ln \det(B^H B) + \sigma^{-2} tr(R^{-1} Z_0) + \ln \det(B^+ Z_1 B^{+H}) \right]
\end{aligned} \tag{28}$$

考虑到:

$$\ln \det(B^+ B B^{+H}) = \ln \det(B^H X B) - 2 \ln \det(B^H B) \tag{29}$$

可得:

$$\ln \det(B^H Z_0 B) - \ln \det(B^H Z_1 B) \stackrel{H_1}{>} \eta_{og} \quad (30)$$

$$\ln \det(B^H Z_0 B) - \ln \det(B^H Z_1 B) \stackrel{H_0}{<} \eta_{og} \quad (31)$$

$$Z_l = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (y_l - \bar{y})(y_l - \bar{y})^H = Z_0 - \bar{y}\bar{y}^H \quad (32)$$

$$\bar{y}^H B (B^H Z_1 B)^{-1} B^H \bar{y} \stackrel{H_1}{>} \eta_{og} \quad (33)$$

$$\bar{y}^H B (B^H Z_1 B)^{-1} B^H \bar{y} \stackrel{H_0}{<} \eta_{og} \quad (34)$$

利用计算机仿真来进行验证,其主要仿真参数如表 1 所示。其中待检单元相对于雷达参考阵元的坐标为(60°, 10 Km)。定义信杂比(Signal-to-Clutter ratio, SCR)为:

$$\text{SCR} = \frac{\|x'\|^2}{\text{tr}(R_c)} \quad (35)$$

杂噪比(Cutter-to-noise ratio, CNR)为:

$$\text{CNR} = \frac{\text{tr}(R_c)}{\sigma^2} \quad (36)$$

4. 实验仿真

检测门限和检测概率 P_a 分别通过 $100/P_{fa}$ 和 10^4 次独立 MC 试验得到。虚警率设置为 10^{-3} 。

Table 1. Simulation parameters

表 1. 仿真参数

参数	符号	数值
载频	f_0	1 GHz
频偏	Δf	1 MHz
带宽	B_r	1 MHz
脉宽	T_p	20 μ s
脉冲重复频率	PRF	1000 Hz
发射阵元数	M	16
接收阵元数	N	2
发射/接收阵元间距	d	0.15 m

图 1~4 展示了在不同的 CNR 与发射脉冲数 L 下,OS-GLRT 的目标检测概率 P_a 随 SCR 变化的曲线。观察图 1~4 可以发现,随着 SCR 增加,OS-GLRT 的检测概率逐渐趋于 1。图 4 表明,在 CNR = 15 dB, $L = 50$ 时,OS-GLRT 在 SCR 为 -16 dB 的检测概率超过 90%。并且在不同的 CNR 下,更多的发射脉冲数可以带来更高的目标检测增益。此外,随着 CNR 的增加,OS-GLRT 的检测性能逐渐提升。这是得益于信号依赖杂波的假设,相比于噪声,本文建立的信号模型可以更好地捕捉杂波特性。图 5、图 6 绘制了 OS-GLRT 的接收机工作性(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线,其中图 5 的 SCR = -15 dB, CNR

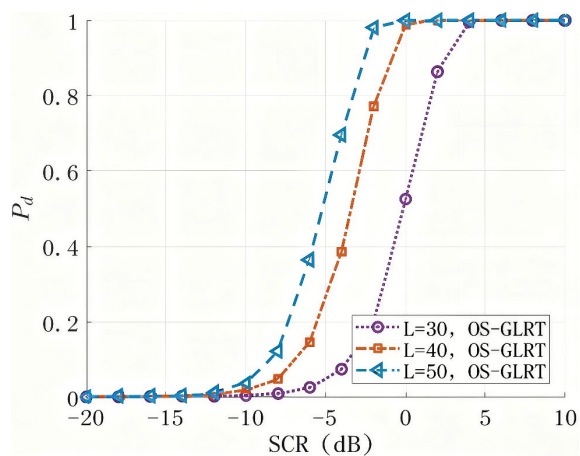


Figure 1. Curve diagram of detection probability of the next-step detector with different pulse numbers and CNR as SCR changes (CNR = 0 dB)

图 1. 不同脉冲数、CNR 下一步法检测器的检测概率随 SCR 变化的曲线图(CNR = 0 dB)

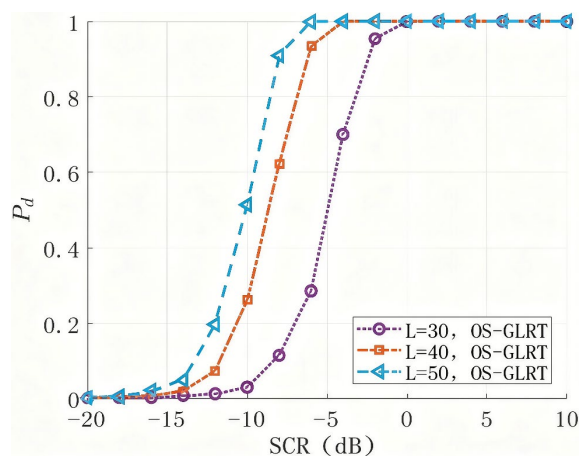


Figure 2. Curve diagram of detection probability of the next-step detector with different pulse numbers and CNR as SCR changes (CNR = 5 dB)

图 2. 不同脉冲数、CNR 下一步法检测器的检测概率随 SCR 变化的曲线图(CNR = 5 dB)

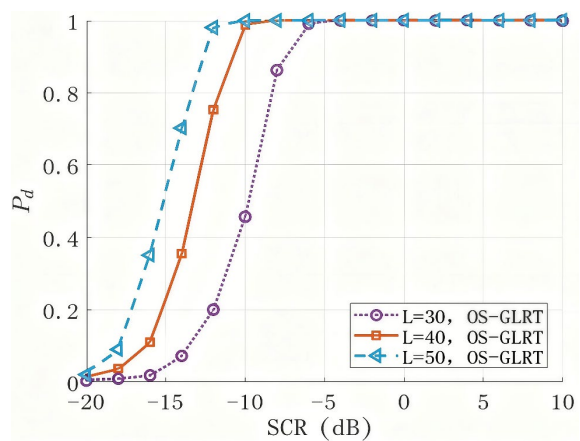


Figure 3. Curve diagram of detection probability of the next-step detector with different pulse numbers and CNR as SCR changes (CNR = 10 dB)

图 3. 不同脉冲数、CNR 下一步法检测器的检测概率随 SCR 变化的曲线图(CNR = 10 dB)

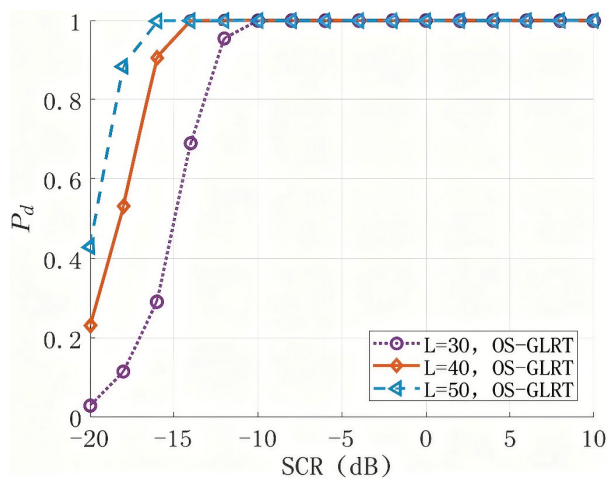


Figure 4. Curve diagram of detection probability of the next-step detector with different pulse numbers and CNR as SCR changes (CNR = 15 dB)

图 4. 不同脉冲数、CNR 下一步法检测器的检测概率随 SCR 变化的曲线图(CNR = 15 dB)

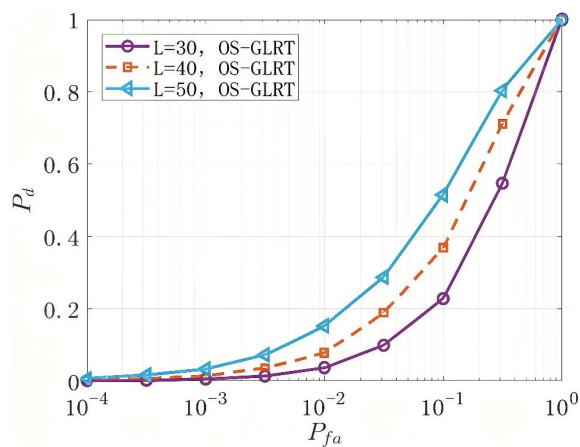


Figure 5. ROC curve diagram of the one-step detector under different CNRs (CNR = 5 dB)

图 5. 一步法检测器在不同 CNR 下的 ROC 曲线图(CNR = 5 dB)

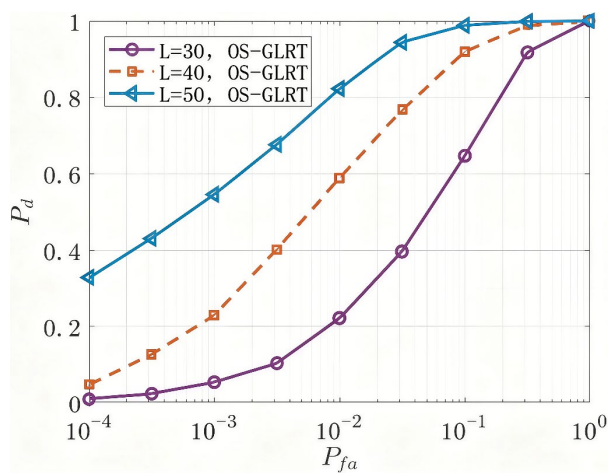


Figure 6. ROC curve diagram of the one-step detector under different CNRs (CNR = 10 dB)

图 6. 一步法检测器在不同 CNR 下的 ROC 曲线图(CNR = 10 dB)

= 5 dB, 图 6 的 SCR = -15 dB, CNR = 10 dB。可以看到, 随着虚警率 P_{fa} 增加, OS-GLRT 的检测概率逐渐趋于 1。并且与图 1~4 中展示的结果相一致, 在不同的虚警率下, OS-GLRT 在 CNR 高的场景中展现出更好的目标检测性能。

参考文献

- [1] 黄栌冰. 频控阵 MIMO 雷达自适应目标检测方法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [2] Li, W., Li, X., Yang, F. and Cui, G.L. (2025) Range Deception Interference Recognition and High-Speed Target Integration Detection Method for Multistatic Radar System. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **62**, 1965-1977.
- [3] Joshi, S.K., Baumgartner, S.V. and Krieger, G. (2022) Tracking and Track Management of Extended Targets in Range-Doppler Using Range-Compressed Airborne Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **60**, 1-20. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3084862>
- [4] 徐健. 基于频控阵的雷达抗干扰方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [5] Antonik, P., Wicks, M.C., Griffiths, H.D. and Baker, C.J. (2006) Frequency Diverse Array Radars. 2006 *IEEE Conference on Radar*, Verona, 24-27 April 2006, 215-217. <https://doi.org/10.1109/radar.2006.1631800>
- [6] Cui, C., Xu, J., Gui, R., Wang, W. and Wu, W. (2018) Search-Free DOD, DOA and Range Estimation for Bistatic FDA-MIMO Radar. *IEEE Access*, **6**, 15431-15445. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2816780>
- [7] Wang, W.Q. and Shao, H.Z. (2014) Range-Angle Localization of Targets by a Double-Pulse Frequency Diverse Array Radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **8**, 106-114. <https://doi.org/10.1109/jstsp.2013.2285528>
- [8] Wang, W.Q. (2014) Subarray-Based Frequency Diverse Array Radar for Target Range-Angle Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **50**, 3057-3067. <https://doi.org/10.1109/taes.2014.120804>
- [9] Wang, Y., Wang, W.Q., Chen, H. and Shao, H. (2015) Optimal Frequency Diverse Subarray Design with Cramér-Rao Lower Bound Minimization. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1188-1191. <https://doi.org/10.1109/lawp.2015.2396951>
- [10] 朱圣棋, 余昆, 许京伟, 等. 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 795-810.
- [11] Wang, S.L., Xu, Z.H., Liu, X.H., Dong, W. and Wang, G.Y. (2018) Subarray-Based Frequency Diverse Array for Target Range-Angle Localization with Monopulse Processing. *IEEE Sensors Journal*, **18**, 5937-5947.
- [12] Gao, K., Wang, W.Q. and Cai, J. (2016) Frequency Diverse Array and MIMO Hybrid Radar Transmitter Design via Cramér-Rao Lower Bound Minimisation. *IET Radar, Sonar & Navigation*, **10**, 1660-1670. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0644>
- [13] Wang, W.Q. and So, H.C. (2014) Transmit Subaperturing for Range and Angle Estimation in Frequency Diverse Array Radar. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **62**, 2000-2011. <https://doi.org/10.1109/tsp.2014.2305638>
- [14] Li, B., Bai, W. and Zheng, G. (2018) Successive ESPRIT Algorithm for Joint Doa-Range-Polarization Estimation with Polarization Sensitive FDA-MIMO Radar. *IEEE Access*, **6**, 36376-36382. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2844948>
- [15] Qin, S., Zhang, Y.D., Amin, M.G. and Gini, F. (2017) Frequency Diverse Coprime Arrays with Coprime Frequency Offsets for Multitarget Localization. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **11**, 321-335. <https://doi.org/10.1109/jstsp.2016.2627184>
- [16] Xu, J., Liao, G., Zhu, S. and So, H.C. (2015) Deceptive Jamming Suppression with Frequency Diverse MIMO Radar. *Signal Processing*, **113**, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014>