

引用格式:卓奕弘,姜秋喜,刘方正,等.网络雷达对抗系统三种配置模型覆盖范围研究[J].电光与控制,2020,27(2):10-13,28. ZHUO Y H, JIANG Q X, LIU F Z, et al. Coverage analysis of three kinds of configuration models in network radar countermeasure system[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):10-13, 28.

网络雷达对抗系统三种配置模型覆盖范围研究

卓奕弘¹, 姜秋喜¹, 刘方正¹, 刘鑫², 何毅²

(1. 国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037; 2. 中国人民解放军77626部队,拉萨 851400)

摘要: 为了研究网络雷达对抗系统的检测性能,对网络雷达对抗系统3种配置模型的检测覆盖范围进行了研究。建立网络雷达对抗系统模型,根据基本雷达方程推导出网络雷达对抗系统在有源模式下的覆盖范围的边界方程,并对3种配置模型的全向搜索有源覆盖范围进行仿真。由仿真结果可得,相邻的检测单元距离决定了在一定信噪比条件下系统的覆盖范围边界,间隔距离较远的检测单元的覆盖范围则是取得分集效应的基础,故网络雷达对抗系统进行配置时,应在配置区域尽量均匀分布。仿真结果证明了所提方法的可行性。

关键词: 网络雷达对抗系统; 配置模型; 覆盖范围边界

中图分类号: TN958 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.003

Coverage Analysis of Three Kinds of Configuration Models in Network Radar Countermeasure System

ZHUO Yihong¹, JIANG Qiuxi¹, LIU Fangzheng¹, LIU Xin², HE Yi²

(1. Institute of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. No. 77626 Unit of PLA, Lhasa 851400, China)

Abstract: In order to study the detection performance of the network radar countermeasure system, the detection coverage of the three configuration models of the network radar countermeasure system was studied. Firstly, the network radar countermeasure system model was established. According to the basic radar equation, the boundary equation of the coverage of the network radar countermeasure system in active mode was derived, and active coverage of the three configuration models in omnidirectional search was simulated. The simulation results showed that: 1) The distance between the adjacent detection units determines the coverage boundary of the system under certain signal-to-noise ratio conditions; and 2) The coverage of the detection unit with a long separation distance is the basis for obtaining the diversity gain. Therefore, when configuring the network radar countermeasure system, it should be distributed as evenly as possible in the configuration area. The simulation results prove the feasibility of the method.

Key words: network radar countermeasure system; configuration model; coverage boundary

0 引言

网络雷达对抗系统是一种广域分布式雷达系统,它通过特定的网络协定,将分散部署的多部发射机、接收机及中心站连接成有机整体。其发射机可发射侦察信号和干扰信号,接收机可在无源模式及有源模式下工作,使整个系统实现空域、频域、时域的协同工作,完成对目标侦察探测、情报搜集、识别跟踪、干扰压制和

火力引导等任务。在侦察探测方面,网络雷达对抗系统兼具分布式雷达在检测时具有的空间分集增益和结构增益,并同时获得主被动探测的侦察结果,减少目标的闪烁效应,对隐身目标的探测具有结构优势^[1-3]。

现有分布式雷达的检测研究主要集中在信号处理上。文献[4-7]研究了分布式雷达的架构对检测性能的影响;文献[8-10]研究了分布式雷达的检测模式;文献[11-13]研究了目标的相关性对检测性能的影响。其中,文献[8]和文献[11]提及了分布式雷达的布站优化,认为增加发射阵元数目对检测性能有提高的作用。在这些研究中,空间分集条件被简化为站间距离远小于系统与目标之间的距离。文献[14-17]研究了分布式

收稿日期:2019-03-13

修回日期:2019-04-11

作者简介:卓奕弘(1995—),女,福建厦门人,硕士生,研究方向为目标检测及信号处理。

雷达的覆盖范围,但主要集中在对雷达系统架构的覆盖范围分析上,而没有针对雷达系统的配置模型对覆盖范围的影响进行探索。

网络雷达对抗系统的发射站采用小功率发射方式,其覆盖范围对某个区域目标的信号积累数目有直接影响,进而改变网络雷达对抗系统的检测性能,所以网络雷达对抗系统对覆盖范围的研究是必要的。文献[1]提出网络雷达对抗系统的3种典型配置:线形配置、环形配置和区域配置,本文针对这3种典型配置下的覆盖范围进行研究。

1 网络雷达对抗系统侦察探测模型

假设网络雷达对抗系统由 M 个发射站、 N 个接收站及1个中心站组成。网络雷达对抗系统的系统模型如图1(a)所示,观测模型如图1(b)所示。第 m 个发射站的球坐标 L_o 为 $(L_{om}, \theta_{om}, \varphi_{om})$,其中: L_{om} 为第 m 个发射站的几何中心到原点坐标的径向距离, θ_{om} 为其偏离 x 轴正方向的水平角, φ_{om} 为其偏离 z 轴正方向的俯仰角。第 n 个接收站的球坐标 L_i 为 $(L_{in}, \theta_{in}, \varphi_{in})$ 。所观测目标相对于原点坐标的空间球坐标 R 为 (R', θ, φ) ,其中: R' 为目标的几何中心到原点坐标的径向距离, θ 为其偏离 x 轴正方向的水平角, φ 为其偏离 z 轴正方向的俯仰角。

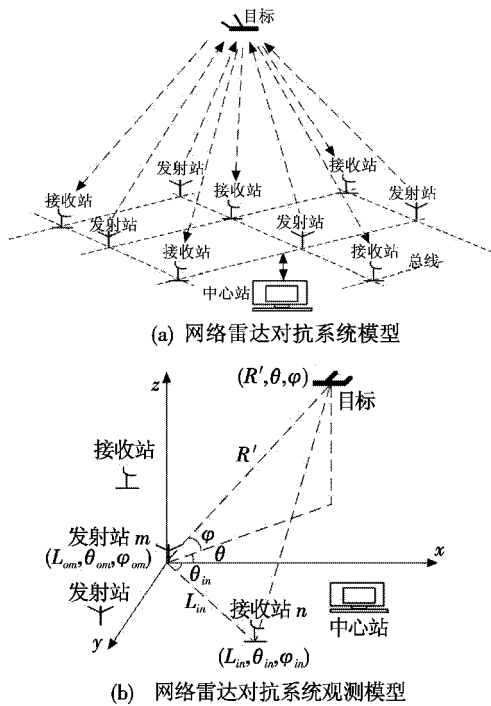


图1 网络雷达对抗系统

Fig. 1 Network radar countermeasure system

当网络雷达对抗系统对目标进行观测时,第 m 个发射站和第 n 个接收站与目标之间的瞬时距离为

$$\begin{cases} |R - L_o|^2 = R'^2 + L_{om}^2 - 2R'L_{om}\cos(\mathbf{R}, \mathbf{L}_o) \\ |R - L_i|^2 = R'^2 + L_{in}^2 - 2R'L_{in}\cos(\mathbf{R}, \mathbf{L}_i) \end{cases} \quad (1)$$

根据几何关系,由余弦定理可得

$$\begin{cases} \cos(\mathbf{R}, \mathbf{L}_o) = \cos\varphi\cos\varphi_{om}\cos(\theta - \theta_{om}) + \sin\varphi\sin\varphi_{om} \\ \cos(\mathbf{R}, \mathbf{L}_i) = \cos\varphi\cos\varphi_{in}\cos(\theta - \theta_{in}) + \sin\varphi\sin\varphi_{in} \end{cases} \quad (2)$$

网络雷达对抗系统在使用正交信号时可以获得最佳的探测、跟踪效果。当网络雷达对抗系统有 M 个发射站和 N 个接收站时,每个接收站可分离出 M 路目标回波,则可看作有 MN 个双基地雷达(下称检测单元)同时对目标进行观测。

2 覆盖范围分析

对于脉冲雷达系统,第 m 个发射站发射信号到达目标后,由第 n 个接收站接收的过程中,最低信噪比可以表示为

$$R_{S,Nmn} = \frac{P\tau G_o G_i \sigma_b \lambda^2 \eta}{(4\pi)^3 k T_e |R - L_o|^2 |R - L_i|^2} \quad (3)$$

式中: P 为发射信号功率; τ 为脉宽; G_o 为发射站最大天线增益; G_i 为接收站最大天线增益; σ_b 为双基地目标的雷达散射截面(RCS); λ 为发射波的载波波长; η 为总的功率损耗因子, $\eta < 1$; 波尔茨曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T_e 为接收机有效噪声温度。

式(3)变形可得雷达系统的覆盖范围,即

$$|R - L_o|^2 |R - L_i|^2 \leq \frac{P\tau G_o G_i \sigma_b \lambda^2 \eta}{(4\pi)^3 k T_e R_{S,Nmn}} \quad (4)$$

为了方便表述,令 $E^4 = \frac{P\tau G_o G_i \sigma_b \lambda^2 \eta}{(4\pi)^3 k T_e R_{S,Nmn}} = \frac{P\tau G_o \sigma_b S_e \eta}{(4\pi)^2 k T_e R_{S,Nmn}}$,

其中, $S_e = \frac{G_i \lambda^2}{4\pi}$,表示接收天线的有效孔径。

当 $R_{S,Nmn} = R_{S,Nmin}$ 时,式(4)取等号。 $R_{S,Nmin}$ 是接收机在给定的虚警概率下,实现一定检测概率的目标检测所要求最小的信噪比值。

将式(1)、式(2)代入式(4)可得

$$\{R'^2 + L_{om}^2 - 2R'L_{om}[\cos\varphi\cos\varphi_{om}\cos(\theta - \theta_{om}) + \sin\varphi\sin\varphi_{om}]\} \cdot \{R'^2 + L_{in}^2 - 2R'L_{in}[\cos\varphi\cos\varphi_{in}\cos(\theta - \theta_{in}) + \sin\varphi\sin\varphi_{in}]\} \leq E^4 \quad (5)$$

以等式代替不等式,式(5)给出了雷达覆盖范围边界的方程。这个边界是卡西尼卵形线,即到两个给定的焦点的距离乘积为常数的点的轨迹,表示了网络雷达对抗系统中一组等 $R_{S,Nmin}$ 轮廓线。根据两个焦点(即一组检测单元)之间的距离和 E^4 的大小关系,卡西尼卵形线的形状会发生变化。 E^4 数值越大,卡西尼卵

形线越近似于同心圆,随着 E^4 的减小,卵形线变得扁平,退化为贝努利双纽线,最后分裂成包围两个焦点的一对曲线^[16]。

3 仿真分析

假设发射功率 $P = 200$ W,脉冲宽度 $\tau = 10$ μ s,天线增益 $G_i = 20$ dB,信号载频为 3 GHz,则波长 $\lambda = 0.1$ m。系统有效噪声温度 $T_s = 290$ K,噪声功率谱密度为 $kT_s = 4 \times 10^{-21}$ W/Hz,损耗因子记 $\eta = 0.1$,目标 RCS 具各向同性, $\sigma_s = 1$ m²。

在 5 km \times 5 km 的 xoy 平面矩形区域范围,对网络雷达对抗系统 3 种模型的覆盖范围进行仿真,见图 2。

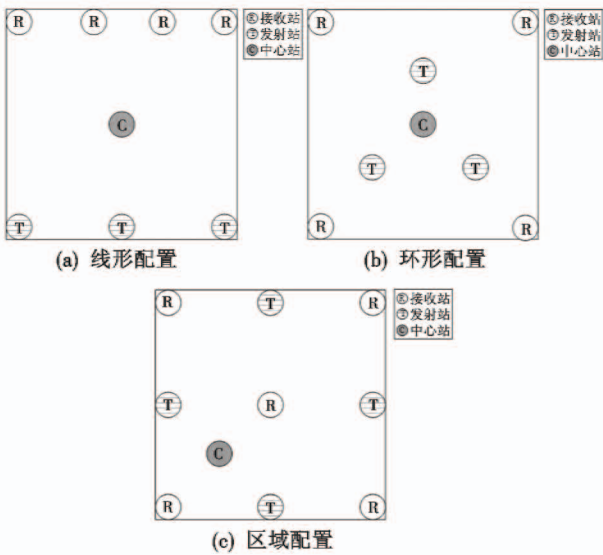


图 2 网络雷达对抗系统 3 种配置模型

Fig. 2 Three configuration models of network radar countermeasure system

3.1 试验 1

有源检测下网络雷达对抗系统的线形配置如图 2 (a) 所示,由 4 个接收站、3 个发射站和 1 个中心站构成。假设 4 个接收站的球坐标分别为 $(5\sqrt{2}, 3\pi/4, 0)$, $(5\sqrt{2}, \pi/4, 0)$, $(5\sqrt{10}/3, \arctan(1/3) + \pi/2, 0)$ 和 $(5\sqrt{10}/3, \arctan 3, 0)$, 3 个发射站的球坐标分别为 $(5\sqrt{2}, 5\pi/4, 0)$, $(5, 5\pi/4, 0)$ 和 $(5\sqrt{2}, 7\pi/5, 0)$ 。对 $R_{s,N \min}$ 分别为 -19.9 dB, -21.4 dB 和 -22.0 dB 时的覆盖范围进行仿真,如图 3 所示。

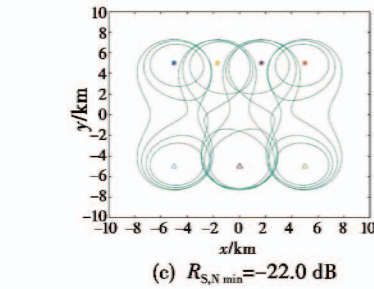
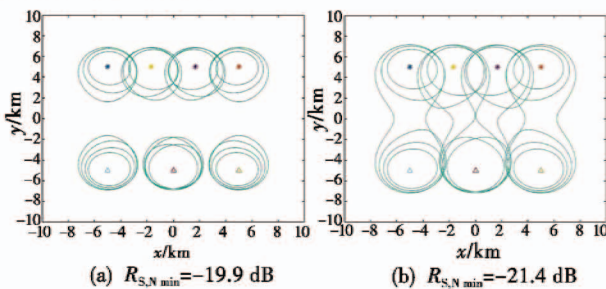


图 3 网络雷达对抗系统线形配置在 3 种 $R_{s,N \min}$ 下的覆盖范围

Fig. 3 Coverage of network radar countermeasure system with linear configuration under three $R_{s,N \min}$

3.2 试验 2

有源检测下网络雷达对抗系统的环形配置如图 2 (b) 所示,由 4 个接收站、3 个发射站和 1 个中心站构成。假设 4 个接收站的球坐标分别为 $(5\sqrt{2}, \pi/4, 0)$, $(5\sqrt{2}, 3\pi/4, 0)$, $(5\sqrt{2}, 5\pi/4, 0)$ 和 $(5\sqrt{2}, 7\pi/4, 0)$, 3 个发射站的球坐标分别为 $(5/2, \pi/2, 0)$, $(5\sqrt{3}/4, 7\pi/6, 0)$ 和 $(5\sqrt{3}/4, 11\pi/6, 0)$ 。对 $R_{s,N \min}$ 分别为 -9.9 dB, -13.0 dB 和 -16.0 dB 时的覆盖范围进行仿真,如图 4 所示。

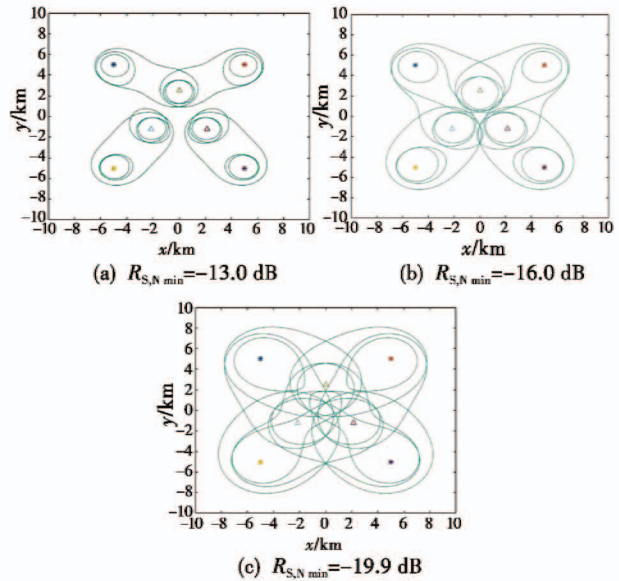


图 4 网络雷达对抗系统环形配置在 3 种 $R_{s,N \min}$ 下的覆盖范围

Fig. 4 Coverage of network radar countermeasure system with ring configuration under three $R_{s,N \min}$

3.3 试验 3

有源检测下网络雷达对抗系统的区域配置如图 2 (c) 所示,由 5 个接收站、4 个发射站和 1 个中心站组成。假设 5 个接收站的球坐标分别为 $(0, 0, 0)$, $(5\sqrt{2}, 3\pi/4, 0)$, $(5\sqrt{2}, \pi/4, 0)$, $(5\sqrt{2}, 5\pi/4, 0)$ 和 $(5\sqrt{2}, 7\pi/4, 0)$, 4 个发射站的球坐标分别为 $(5, \pi/2, 0)$, $(5, \pi, 0)$,

$(5, 3\pi/2, 0)$ 和 $(5, 0, 0)$ 。对 $R_{S,N \min}$ 分别为 -9.9 dB, -13.0 dB 和 -15.0 dB 时的覆盖范围进行仿真, 如图 5 所示。

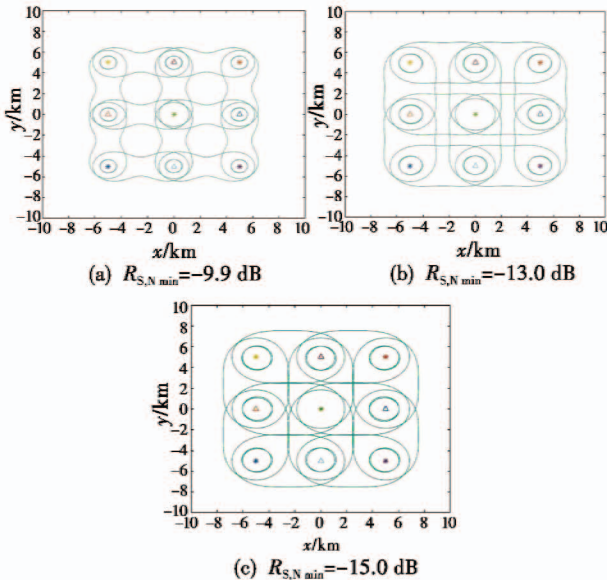


图5 网络雷达对抗系统区域配置在3种 $R_{S,N \min}$ 下的覆盖范围

Fig.5 Coverage of network radar countermeasure system with regional configuration under three $R_{S,N \min}$

3.4 分析

由仿真结果可得, 当 $R_{S,N \min} = -19.9$ dB 时, 如图 3 (a) 所示, 线形配置的覆盖范围仅为发射站和接收站附近圆域, 而如图 4 (c) 所示, 环形配置的覆盖范围已能大致覆盖预警区域。当 $R_{S,N \min} = -13.0$ dB 时, 图 4 (a) 所示的环形配置覆盖范围仅有相邻发射站和接收站之间的区域, 而图 5 (b) 所示的区域配置在此条件下有更广的覆盖区域, 当 $R_{S,N \min} = -15.0$ dB 时, 区域配置已基本完成对预警区域的覆盖。

由此可见, 在发射机、接收机皆采用全向搜索方式时, 因为网络雷达对抗系统的发射功率较小, 配置方式将影响系统的威力覆盖范围。一组检测单元间隔距离越近, 要达到一定覆盖范围所需的 $R_{S,N \min}$ 就越低。当 $R_{S,N \min}$ 数值使覆盖范围边界成为一个近似同心圆时, 提高 $R_{S,N \min}$ 对继续扩大这组检测单元覆盖范围的影响趋弱, 影响主要体现在提高间隔距离较远的检测单元覆盖范围。

在同样采用 3 个发射站、4 个接收站的情况下, 要覆盖相同的范围时, 环形配置比线形配置要求的灵敏度更低。这是因为环形配置的检测单元平均间距小于线形配置, 覆盖范围边界在较低 $R_{S,N \min}$ 情况时就能覆盖较大区域。同理, 区域配置使相邻检测单元的间距较低, 所以在较低 $R_{S,N \min}$ 情况下能完成较大的覆盖范围。

故在实际配置网络雷达对抗系统时, 应优先确定相邻检测单元间距, 将发射站和接收站均匀配置在区间内, 使雷达系统能优先覆盖指定范围, 再考虑在灵敏度条件下扩大间隔距离较远的检测单元的覆盖范围, 使多个角度的接收站威力范围彼此覆盖, 达到分集效果, 削弱 RCS 回波的闪烁效应。

4 结束语

本文对二维 xoy 平面上网络雷达对抗系统的覆盖范围进行研究, 并对有源全向搜索下 3 种配置模型的覆盖范围进行仿真。仿真结果表明, 由于网络雷达对抗系统具有低发射功率的优势, 配置模型对覆盖范围有较大影响, 其中, 站间距离较小的配置模型更容易覆盖检测区域。该研究对网络雷达对抗系统的配置模型设计和提升检测性能具有一定参考价值。

参考文献

- [1] 姜秋喜. 网络雷达对抗系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 周敬博, 胡波, 姜秋喜. 网络雷达对抗系统初探[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(6): 49-52.
- [3] 沙文浩, 姜秋喜, 周宇, 等. 网络雷达对抗系统反隐身优化部署技术[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(3): 141-147.
- [4] FISHLER E, HAIMOVICH A M, BLUM R S, et al. Spatial diversity in radars—models and detection performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 823-838.
- [5] FISHLER E, HAIMOVICH A M, BLUM R S, et al. Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity[C]//Conference on Signals, Systems & Computers, 2004: 305-309. doi: 10. 1109/ACSSC. 2004. 1399142.
- [6] AITTOMAKI T, KOIVUNEN V. Performance of MIMO radar with angular diversity under swerling scattering models [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 101-114.
- [7] HASSANIEN A, VOROBYOV S A. Phased-MIMO radar: a tradeoff between phased-array and MIMO radars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3137-3151.
- [8] 汤俊, 伍勇, 彭应宁, 等. MIMO 雷达对空域 Rician 起伏目标检测性能研究[J]. 中国科学, 2009(8): 866-874.
- [9] 刘月平, 姜秋喜, 毕大平, 等. 网络雷达中快起伏 Rician 目标检测性能分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1671-1677.

- [6] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3):583-596.
- [7] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(7):1409-1426.
- [8] CHEN L L, ZHU S H, LI X X, et al. Target tracking via improved TLD algorithm[C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference, 2015:5942-5947.
- [9] JIA C X, WANG Z L, WU X, et al. A tracking-learning-detection(TLD) method with local binary pattern improved[C]//Robotics and Biomimetics, 2015:1625-1630.
- [10] CHOI C, CHRISTENSEN H I. Robust 3D visual tracking using particle filtering on the special Euclidean group; a combined approach of keypoint and edge features[J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(4):498-519.
- [11] 王莹. 基于 Kinect 的 Tri-tracking 视频跟踪算法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [12] QI C R, LIU W, WU C, et al. Frustum pointnets for 3D object detection from RGB-D data[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018:918-927.
- [13] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:2117-2125.
- [14] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017:2980-2988.
- [15] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015:1440-1448.
- [16] QI C R, SU H, MO K, et al. Pointnet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:652-660.
- [17] GEIGER A, LENZ P, URTASUN R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012:3354-3361.

(上接第 9 页)

- [11] QIAN J H, HE Z S. Mainlobe interference suppression with eigenprojection algorithm and similarity constraints[J]. Electronics Letters, 2016, 52(3):228-230.
- [12] QIAN J H, HE Z S, JIA F D, et al. Mainlobe interference suppression in adaptive array[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, 2016:470-474.
- [13] KHABBAZIBASMENJ A, VOROBYOV S A, HASSANIEN A. Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6):2974-2987.

(上接第 13 页)

- [10] 刘月平,姜秋喜,孙志勇. 网络雷达对 Swerling II 目标检测性能分析[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1):255-262.
- [11] HE Q, BLUM R S, HAIMOVICH A M. Non-coherent MIMO radar for target estimation; more antennas means better performance[C]//Conference on Information Sciences & Systems, 2009:109-113. doi:10.1109/CISS.2009.5054700.
- [12] LIU W, LEI T. Multi-target detection algorithm for MIMO radar with arbitrarily distributed array-target configuration[C]//The 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics(IHMSC), 2016:541-544. doi:10.1109/IHMSC.2016.73.
- [13] ZHOU S, LIU H. Space-partition-based target detection for distributed MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 49(4):2717-2729.
- [14] 谷文堃,王党卫,马晓岩,等. 分布式 MIMO 雷达覆盖范围分析[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(6):391-395.
- [15] 费太勇,谭贤四,林强,等. 长基线统计 MIMO 雷达检测性能研究[J]. 现代雷达, 2017(7):75-79.
- [16] 王盛利. 分布式 MIMO 雷达威力覆盖研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(6):551-555.
- [17] CHERNYAK V S. 双(多)基地雷达系统[M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 等译. 北京:电子工业出版社, 2011.