

外辐射源雷达网络定位性能评估与实验验证

谢锐 万显荣* 方高 易建新 程丰

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 外辐射源雷达网络的探测性能受网络几何架构、电波传播环境、硬件系统性能及信号和数据处理能力等诸多因素的影响,网络优化部署需综合考虑上述各个方面,网络性能评估为需要解决的首要问题。该文围绕外辐射源雷达网络定位性能展开,首先给出一种切实可行的外辐射源雷达网络优化系统定位性能评估方案,利用蒙特卡洛仿真分析了一定站位配置下定位精度分布图。接着重点介绍了外辐射源雷达组网探测实验开展情况,包括系统配置、空中目标探测典型结果及分析。最后统计评估了实测目标的定位精度,并与仿真结果进行对比,从实验角度验证了定位性能评估方案的有效性。

关键词: 外辐射源雷达网络; 网络优化; 性能评估; 定位精度

中图分类号: TN958.57

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0753-05

DOI: 10.11999/JEIT150733

Positioning Performance Evaluation for Passive Radar Network and Experimental Verification

XIE Rui WAN Xianrong FANG Gao YI Jianxin CHENG Feng

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Detection performance of Passive Radar Network (PRN) is affected by many factors including network geometry, radio propagation environment, performance of system, signal and data processing capability, and so on. Optimized disposition with passive radar network needs to consider all the aspects, and performance evaluation of the network should be firstly taken into consideration. Launching from the positioning performance of passive radar network, first a feasible evaluation scheme is proposed, and the distribution of positioning precision is obtained by Monte-Carlo simulation under a specified network configuration. Then, the experimental scenario and the experimental progress is highlighted, involving system introduction, illustration, and analysis of typical detection results of airplanes. Finally, the positioning accuracy is compared with reference information and simulation results, which proves the validity of passive radar network positioning performance evaluation scheme.

Key words: Passive Radar Network (PRN); Network optimization; Performance evaluation; Positioning accuracy

1 引言

近年来,利用广播电视、通信基站、导航和通信卫星、无线局域网络等机会照射源的外辐射源雷达逐渐受到人们重视并成为新型探测技术的研究重点^[1-3]。随着广播电视网、移动互联网的快速发展,其大规模覆盖为外辐射源雷达组网探测提供了天然的便利条件,通过网络优化设计可构建更加灵活高效的外辐射源雷达网络(PRN),一方面扩大了雷达探测范围,获取目标或环境更多的信息,同时亦可

提高系统测量精度以及定位跟踪性能^[1,3,4]。

近年来有关 PRN 的研究成果重点围绕系统仿真、性能评估及网络优化等方面展开^[5-7]。PRN 优化问题涵盖甚广,既包含电波传播理论,又涉及雷达硬件系统性能,如天线阵列性能、接收机性能等,更与后续信号和数据处理能力有关,如杂波抑制性能、检测性能、定位跟踪性能等。网络优化问题的研究基础在于建立有效的系统性能评估方案,文献[6]分析了雷达网络的检测与跟踪性能,利用后验克拉美罗界衡量跟踪性能。文献[7]考虑了探测覆盖率、定位跟踪精度等各项评价指标,阐述了多评估模型下的 PRN 规划系统构成。

然而实际系统性能并不能达到理想的克拉美罗界,其与网络配置、电波传播环境及信号处理算法等诸多因素相关,因此性能评估模型应当考虑更多实际因素。为验证性能评估方案的可行性,还需组

收稿日期: 2015-06-15; 改回日期: 2015-12-02; 网络出版: 2016-02-03

*通信作者: 万显荣 xrw@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61331012, 61371197), 中央高校基本科研业务费专项资金(2014212020201)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61331012, 61371197), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014212020201)

织实验对比分析。文献[8]介绍了雷达网络实验及合作目标定位精度分析结果,文献[9]以实测统计定位精度为指标,研究了接收站优化配置的方法。

本文展示了 PRN 探测实验结果,通过比较分析 PRN 实测定位精度与理论分析结果的差异,论证定位性能评估方案的有效性。论文首先探讨了 PRN 定位性能评估方案;然后介绍了实验场景,根据实验场景中 PRN 配置给出相应的定位精度分布图;最后给出了 PRN 实验结果,与仿真结果进行对比,以实测数据验证定位性能评估方案的有效性。

2 定位性能评估

一般目标方位角、仰角的量测误差值较大,将其引入定位方程中会降低 PRN 的定位精度。而定位方程包含多普勒频移量测值时,定位将变得相当复杂^[10],因此 PRN 系统中通常采用时差法定位,其它量测值有助于 PRN 中定位模糊问题(即目标与发射站关联模糊问题、目标与接收站量测值关联模糊问题)的解决^[11],定位方程组为

$$r_{bij} = \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{ti}\| + \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{rj}\| \quad (1)$$

其中 $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ 表示目标位置状态向量,第 i 个发射站的位置坐标为 $\mathbf{s}_{ti} = [x_{ti}, y_{ti}, z_{ti}]^T$,第 j 个接收站的位置坐标为 $\mathbf{s}_{rj} = [x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}]^T$, r_{bij} 表示测量所得第 i 个发射站到目标与目标到第 j 个接收站的距离和,即双基距离值,将所有的方程组应用到定位中,可得目标位置估计误差的协方差矩阵为^[12]

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{H} = [\mathbf{A}_{11}, \dots, \mathbf{A}_{ij}, \dots, \mathbf{A}_{N_T N_R}]$, $\mathbf{A}_{ij} = [(\mathbf{r} - \mathbf{s}_{ti}) / \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{ti}\| + (\mathbf{r} - \mathbf{s}_{rj}) / \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{rj}\|]^T$, $\mathbf{Q} = \text{diag}[\sigma_{rb11}^2, \dots, \sigma_{rbij}^2, \dots, \sigma_{rbN_T N_R}^2]$, σ_{rbij} 为第 j 个接收站的距离量测精度。

式(2)给出了定位精度 CRLB 值,实际探测时 PRN 中并非所有的收发对都能探测到同一目标,采用部分收发对组合进行定位时,不同的组合情况下定位结果不同,进一步考虑 PRN 定位模糊问题,根据文献[14]提出的全局解模糊算法,目标位置估计误差协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{opt}} = \min_{w_k=1} \{w_k \mathbf{P}^{(k)}\} \quad (3)$$

其中 k 表示第 k 个组合方程组, w_k 为一加权值,表征第 k 个组合方程组参与定位情况,其值为 0 时表示不参与,为 1 时表示参与。数据融合过程中选取的某些定位结果可能是“鬼点”,其影响目标位置估计误差协方差矩阵的可靠性,采用选优法可解决该问题,此时得到的定位精度分布更符合实际情况。

另外,不同的定位方法下目标位置估计精度不同,相关文献都已详细地分析了不同方法的定位精度^[12,13],在此不再赘述。本文利用实测数据进行定位时,首先利用球形插值(Spherical Interpolation, SI)算法^[13]进行粗估计,然后利用牛顿迭代法进行精估计,相应的目标函数为

$$f = \underset{\mathbf{r}}{\text{argmin}} \sum_k (\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{ti}\| + \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_{rj}\| - r_{bij})^2 \quad (4)$$

式(4)表示 k 个方程中量测值与估计双基距离之间差值的平方和。当定位方法中包含迭代法时,利用蒙特卡洛仿真可简便地分析得出其定位精度。

3 实验场景

为验证 PRN 定位跟踪性能,武汉大学于 2014 年 10 月开展了一系列原理性验证实验。实验中辐射源采用数字广播电视信号,信号带宽 $B = 1 \text{ MHz}$,采样率 $f_s = 2 \text{ MHz}$ 。实验系统包含一个发射站 3 个接收站,以发射站为原点,正东方向为 x 正轴,正北方向为 y 正轴,构建直角坐标系,接收站坐标值由表 1 给出,收发配置如图 1 所示。

表 1 接收站相对位置(km)

接收站	x 坐标	y 坐标	z 坐标
Rx1	13.60	1.43	0.01
Rx2	-19.52	2.22	0.01
Rx3	15.92	-8.09	0.01

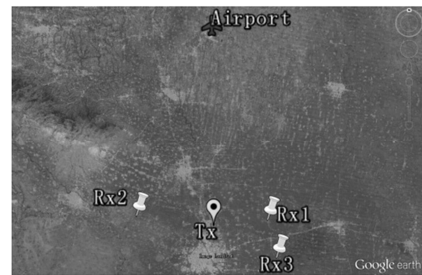


图 1 收发站点分布图

由于航线并非实验人员所设计,故所探测的目标为非合作目标。为获得非合作目标的位置速度信息用于实验参考对比,实验过程还接收记录了民航飞机发射的 ADSB 信号,经解码、插值后可得相应的位置速度信息,视为非合作目标的真实状态信息。

4 定位精度仿真分析

分析上述收发配置下的定位精度分布图。将 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 的区域网格化,每个网格点代表一个目标,目标高度为 3 km ;然后构建每个目标点的权

值矩阵 w_k ，利用蒙特卡洛仿真获得 $w_k = 1$ 的方程组目标位置估计误差协方差矩阵 $\mathbf{P}^{(k)}$ ；最后利用选优法获得最小定位误差协方差矩阵，进而获得相应探测区域的定位精度分布图。

这里双基距离的量测噪声服从均值为 0 标准差 $\sigma_R = 75 \text{ km}$ 的高斯分布，初步认为双基距离量测噪声只与采样率有关，即 $\sigma_R = c / (2f_s)$ ，实际应用中双基距离量测噪声还与信噪比、信号波形及时钟精度等因素有关^[12]。对每个网格点进行 1000 次蒙特卡洛仿真，然后统计得出位置估计值与真实值之间的标准差，由此可得 x 坐标， y 坐标的估计精度分布图如图 2(a)，图 2(b)所示。

图 2 中估计精度值单位为 km，其值越大，估计精度越低。可以看出 y 坐标的估计精度低于 x 坐标的估计精度，其形成原因可以从几何角度进行阐释。众所周知，多站双基地距离定位时，利用多个椭圆相交的公共交点估计得到目标的位置。若多个收发站在某一维度上分布差别不大，各椭圆在交点处切面的共同特点是与该维度接近垂直，此时维度值的变化所引起双基距离变化很小，该维度估计精度低。

由于各种因素的限制，图 2 中接收站分布在 y 方向上的差别不大，这导致 y 坐标的估计精度较低。同理，当各接收站海拔高度差别不大时，单纯利用双基距离定位时高度估计精度较低，此时引入仰角信息可提高高度估计精度，文献[4]对此进行了深入的阐述。而在单纯的时差定位系统中，为使系统在各个维度上都有较高的定位精度，站位的分布应当使各收发对在每个维度上尽量保持一定的差别。理想情况下，一发多收系统中多个接收站应当围绕发

射站呈正多边形分布，收发直线距离在可观测范围内应越大越好。

5 实验结果分析

5.1 实验结果

在众多采集数据中，选用 2014 年 10 月 9 号 11:05 左右的一组典型数据进行分析。

每个接收站的信号经杂波抑制、匹配滤波及恒虚警检测之后得到相应的量测信息，3 个接收站的双基距离量测信息和多普勒量测信息分布分别如图 3(a)，图 3(b)所示。数据处理的总时长为 1 min，处理场间间隔为 0.5 s。利用三站双基距离量测值进行定位，所得定位结果如图 4(a)所示，该结果没有进行解模糊处理，仅为列举所有的量测关联组合所得定位结果，其中存在大量的虚假目标。利用文献[11]中所解模糊方法，可得定位结果如图 4(b)所示，可以看出解模糊后大量虚假点迹被剔除，真实目标点迹凸显出来。由图 4(b)可以看出仍存在少许虚假点迹，需进一步优化 PRN 中解模糊算法，其效能直接影响网络跟踪性能的评估。

提取相应时刻航空器的广播式自动相关监视 (ADSB) 参考信息，得到某一航班信息与第一象限的目标信息较为吻合，提取 x 坐标， y 坐标， x 方向速度及 y 方向速度进行对比，结果分别如图 5(a)至图 5(d)所示。由对比图可以看出各实测信息与参考信息较一致。实测结果与参考信息之间有一定的差别，其形成原因有三：(1)定位精度的影响；(2)ADSB 参考信息由插值而成，与实际可能有些差别；(3)速度分辨率约为 3.6 m/s，影响速度估计精度。

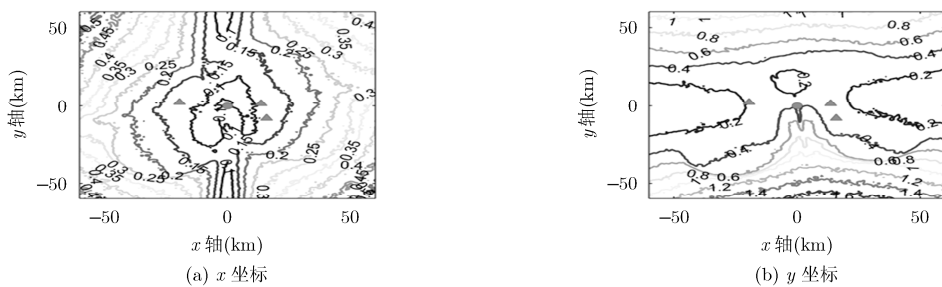


图 2 坐标估计精度分布图

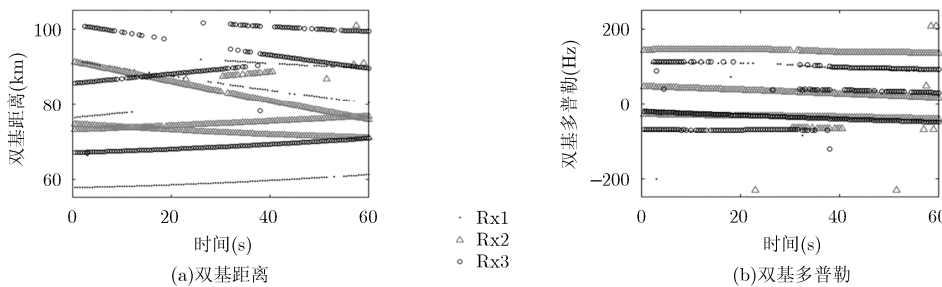


图 3 三站量测值随时间变化图

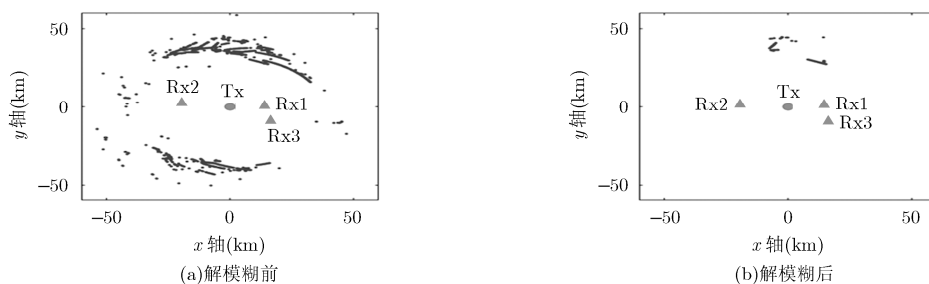


图 4 定位结果点迹分布图

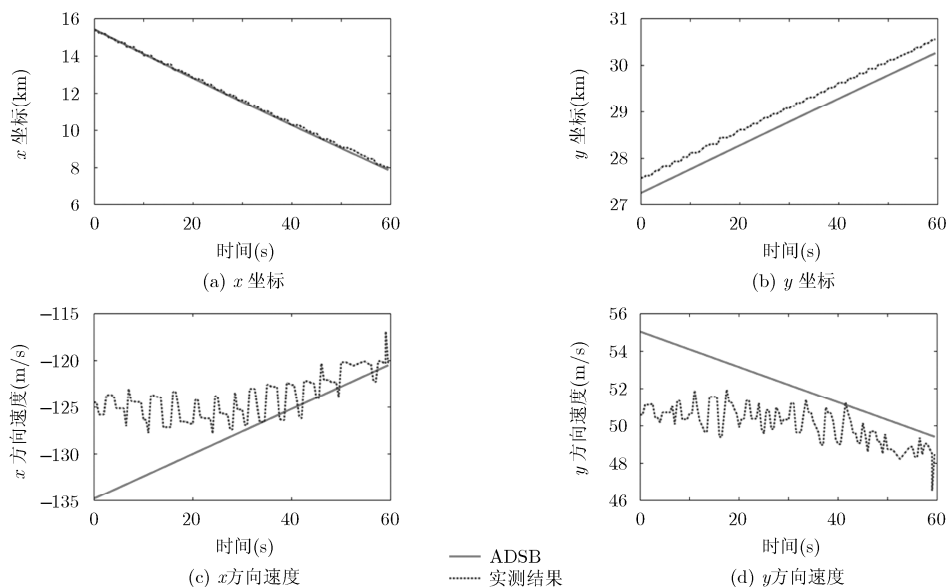


图 5 实测结果与 ADSB 对比图

5.2 误差分析

为定量分析多基地雷达其定位精度,对多个时段中有 ADSB 对比信息的实测样本进行统计分析,可得 x 坐标, y 坐标, x 方向速度及 y 方向速度的估计精度如表 2 所示。从表 2 中可知,该目标的 x 坐标估计精度可达 111.27 m, y 坐标估计精度可达 294.65 m,而 x 方向速度及 y 方向速度均有较高的估计精度,分别为 4.92 m/s, 2.48 m/s。可知 x 坐标估计精度高于 y 坐标估计精度,这与理论结果相符合。

另外根据 ADSB 给出航线信息,利用第 3 节中仿真方法得出 x 坐标和 y 坐标的定位精度随时间变化图如图 6 所示, x 坐标的仿真估计精度为 70~90 m, y 坐标的仿真估计精度为 190~210 m,可以得出其实测估计精度都略低于仿真估计精度,究其原因在于实际中双基距离的量测噪声值要大于仿真给出的量测噪声值。虽然实验中定位估计精度要低于理论估计精度,但综合考虑双基距离量测噪声、参考信息的获取方式等因素后,在一定程度上认为二者差别可以接受,从而进一步从实验的角度验证了 PRN 中定位精度评估方案的可行性与有效性。

表 2 目标定位精度统计结果

	x 坐标 (m)	y 坐标 (m)	x 速度 (m/s)	y 速度 (m/s)
平均误差	-75.04	-291.62	-3.75	2.19
均方根误差	111.27	294.65	4.92	2.48

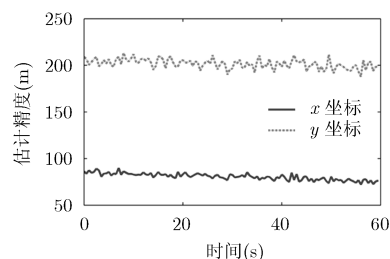


图 6 某航线定位精度变化图

6 结束语

论文对 PRN 中定位精度评估问题进行了系统的阐述,并展示了最新 PRN 探测实验的部分结果,定量地分析了实验中准合作目标的定位精度,对比验证了本文中定位精度评估方案的可行性与有效

性,实验数据为进一步研究 PRN 优化问题提供了有力保障。实验中也有不足之处,如利用 ADSB 虽然能够获取目标信息,但由于电波传播原因,在观测时间内可能无法接收到较为连续的 ADSB 信息,此时采取插值的方式并不能反映目标的真实状态信息,对 PRN 性能评估与验证不利。另外实验中接收站数目较少,实验场地也受到较大的限制,后续将进一步改善实验条件,同时完善现有的 PRN 规划系统,通过大量的实验进一步验证 PRN 规划系统的有效性。

致谢 论文相关实验得到河南星河辰雨通讯科技有限公司的协助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109-123. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.20027.
WAN Xianrong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109-123. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.20027.
- [2] 杨金禄, 单涛, 陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 407-411. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00414.
YANG Jinlu, SHAN Tao, and TAO Ran. Method of migration compensation in coherent integration for digital TV based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 407-411. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00414.
- [3] 万显荣, 易建新, 程丰, 等. 单频网分布式外辐射源雷达技术[J]. 雷达学报, 2014, 3(6): 623-631. doi: 10.12000/JR14156.
WAN Xianrong, YI Jianxin, CHENG Feng, et al. Single frequency network based distributed passive radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6): 623-631. doi: 10.12000/JR14156.
- [4] 万显荣, 易建新, 方高, 等. 三坐标数字电视外辐射源雷达实验研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1263-1268. doi: 10.3969/j.issn.1001-506x.2014.07.07.
WAN Xianrong, YI Jianxin, FANG Gao, et al. Experimental research of digital television based three dimensional passive radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(7): 1263-1268. doi: 10.3969/j.issn.1001-506x.2014.07.07.
- [5] 刘钦, 刘峥, 谢荣. 防空雷达网对多隐身目标的协同检测与跟踪[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 601-607. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01072.
LIU Qin, LIU Zheng, and XIE Rong. Collaborative detection and tracking of stealthy target by netted radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 601-607. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01072.
- [6] HACKD E, PATTON L K, HIMED B, et al. Detection in passive MIMO radar network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(11): 2999-3012. doi: 10.1109/TSP.2014.2319776.
- [7] EDRICH M, SCHROEDER A, and MEYER F. Design and performance evaluation of a mature FM/DAB/DVB-T multi-illuminator passive radar system[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(2): 114-122. doi: 10.1049/iet-rsn.2013.0162.
- [8] STEVENS M, POMPAIRAC D, and MILLET N. Multi-Static primary surveillance radar assessment[C]. Radar Conference, Lille, 2014: 1-6. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060357.
- [9] GUMIERO F, SANTARELLI S, BONGIOANNI C, et al. Using real data for the implementation of multistatic passive radar geometry optimization procedure[C]. European Radar Conference, Manchester, 2011: 93-96.
- [10] HO K C and XU Wenwei. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 50(9): 2453-2463. doi: 10.1109/TSP.2004.831921.
- [11] YI Jianxin, WAN Xianrong, CHENG Feng, et al. Deghosting for target tracking in single frequency network based passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, doi: No.10.1109/TAES.2015.130424.
- [12] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 117-131.
SUN Zhongkang, ZHOU Yiyu, and HE Lixing. Single Multi-base Active Passive Positioning Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996: 117-131.
- [13] MALANOWAKI M and KULPA K. Two methods for target localization in multistatic passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 572-580. doi: 10.1109/TAES.2012.6129656.

谢锐: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。

万显荣: 男, 1975年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为外辐射源雷达系统、高频雷达系统及雷达信号处理等。

方高: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为雷达系统。

易建新: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。

程丰: 男, 1975年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达信号处理等。