

多调频广播外辐射源雷达目标探测实验研究

邵启红 龚子平* 张勋 尤君 万显荣
(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 该文针对单调频广播外辐射源雷达面临的带宽时变及 RCS 闪烁等问题, 研究了多调频信号联合探测的实验方案, 并利用武汉大学研制的多调频外辐射源雷达系统开展了外场实验验证。首先, 阐述了多调频广播外辐射源雷达的工作原理。然后, 分析了多调频广播信号特性, 论证了利用多调频信号联合探测的必要性和优越性。最后, 重点展示了实测数据的处理结果。研究表明: 多调频探测方案能大幅提高目标检测概率, 提升调频外辐射源雷达探测稳健性, 外场实验验证了该方案的可行性。

关键词: 外辐射源雷达; 调频广播; 多调频探测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)05-1256-05

DOI: 10.11999/JEIT150868

Experimental Study on Target Detection for Multi-FM Broadcasting Based Passive Radar

SHAO Qihong GONG Ziping ZHANG Xun YOU Jun WAN Xianrong
(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: FM based passive radar faces some issues such as time varying bandwidth and RCS glint, a multiple FM joint detection scheme is proposed, and the corresponding experiments with passive radar system developed by Wuhan University are carried out. First, the process flow of multi-FM based Passive Radar is introduced. Then, the signal characteristics of multi-FM for radar application are analyzed, meanwhile, the necessity and advantages of multi-FM scheme are demonstrated. Finally, the practical processing results are presented. Experiment result proves that multiple frequency detection scheme can substantially improve target detection performance, enhancing the robustness of passive radar system.

Key words: Passive radar; FM broadcasting; Multi-FM detection

1 引言

基于调频广播(FM broadcasting, FM)的外辐射源雷达具有覆盖面积广、绿色无污染、抗摧毁、组网潜力大等优点, 逐渐受到国内外学者的重视^[1]。利用单个调频广播(Single FM broadcasting, SFM)信号进行目标探测易受信号带宽时变、目标 RCS 频率闪烁、甚至电波传播等因素制约, 导致系统探测性能具有不稳健性^[2]。多调频广播外辐射源雷达(Multi-FM based Passive Bistatic Radar, MFPBR)同时利用多个调频广播(Multi-FM, MFM)信号, 通过带宽合成、增加处理维度等分集手段, 克服 SFM 探测目标面临的带宽时变及目标 RCS 频率闪烁问题, 具有实用价值和研究意义^[3]。如何充分利用

MFM 信号改善外辐射源雷达的探测性能, 使系统功能最优化, 是当今雷达领域的研究热点。

目前国内外关于 MFPBR 的研究总体处于理论论证和原理性实验阶段。意大利罗马第一大学(University of Rome “La Sapienza”)研究了非相干积累用于增强目标检测性能^[3], 通过数据融合来提高目标角度估计精度^[4], 没有对如何选频展开论述; 英国伦敦大学(University College London)讨论了多 FM 广播信号的带宽合成^[5], 仿真证实了多调频探测能分辨单调频信号无法分辨的两个临近目标^[6], 默认目标回波相位具有频率一致性, 与实际情况符合度低; 波兰华沙工业大学(Warsaw University of Technology)研究了地杂波及海杂波的抑制方法^[7], 提出了利用多组收发设备进行目标 3 维定位^[8]; 荷兰的代尔夫特理工大学(Delft University of Technology)研究了调频广播外辐射源雷达接收阵列的互耦效应并提出了对应的补偿方法^[9]; 伊朗设拉子大学(Shiraz University)推导出了用于多调频广播外辐

收稿日期: 2015-07-20; 改回日期: 2016-01-15; 网络出版: 2016-03-11

*通信作者: 龚子平 zpgong@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61331012, 61371197, 61271400)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61331012, 61371197, 61271400)

射源雷达的检测器^[10]。国内也积极开展了理论探索等相关研究工作^[11-13],但鲜见多调频联合探测实验研究的报道专文。

为明确 MFM 信号探测性能与波形、频率、RCS 特性等因素的相关性,本文给出了 MFM 目标探测实验方案,利用武汉大学自行研制的 MFPBR 系统开展外场实验并对实验结果展开了分析讨论。首先阐述了 MFM 信号子带分集的目标探测信号处理流程;结合 MFM 信号波形特征分析了频率数量与检测概率的关系;利用实测数据论证了检测概率与频率、波形、目标姿态的相关性;最后对预估性能与实测性能之间的差异进行合理解释。

2 工作原理

MFPBR 以 MFM 信号为工作波形,是 SFM 信号的扩展与综合。MFPBR 至少需要两个通道:参考通道用于获取参考样本;监测通道用于获取目标散射回波。将参考通道和监测通道接收到的信号进行带通滤波及数字抽取得到各子带,分别进行干扰及杂波抑制处理得到纯净的参考样本和目标回波信号,通过距离多普勒 2 维互相关函数(Range-Doppler Cross Correlation Function, RD-CCF)处理得到距离多普勒谱(RD 谱)。为保证同一目标落入同一检测单元内,对采样快拍长度进行归一化处理^[5]。将多个频率的 RD 谱进行恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测,然后利用频率的二元积累综合判定有无目标。

3 MFM 信号特性

3.1 平均信噪比

平均信噪比(Average Signal to Noise Ratio, ASNR)是信号带宽范围内信号功率均值与噪声功率比值,该指标常用于表征雷达探测性能,如最大可探测距离^[14-16]。ASNR 与节目内容、收发站间距、收发天线高度、电波传播环境、天线极化方式及增益等因素有关,是 MFPBR 系统优化选频重要参数。

图 1 为 2013 年 11 月在武汉市采用垂直极化天线接收到的 MFM 信号频谱图和 ASNR 时变曲线,其中图 1(a)为 96~104 MHz 范围内的频谱图,处理时间为 1 s,基于峰值进行归一化处理;图 1(b)为 4 个频率 25 min 内等间隔 ASNR 曲线,抽样处理时间 1 s,噪声功率为 FM 信号中心频率 ± 100 kHz 处 5 kHz 范围功率均值。

图 1(a)不同 FM 信号功率差异超过 60 dB 表明 MFPBR 接收系统具有大动态范围需求,且对站位布局、天线极化形式具有敏感性。图 1(b)频率为 102.6 MHz 的曲线相比其他 3 条曲线具有更小的方差,表明不同类型节目具有不同的二阶统计特性,音乐节目一般比谈话节目信噪比稳定。ASNR 低值时段雷达容易失效,MFM 方案以处理复杂度为代价,降低失效概率,提高探测稳健性。

3.2 带宽时变统计

信号带宽决定雷达距离分辨率,FM 广播具有带宽时变特性。对 2013 年 11 月在武汉市采用垂直极化接收到的 MFM 信号进行带宽统计分析发现:(1)信号带宽与节目内容相关,如 103.8 MHz 的带宽明显大于 97.8 MHz;(2)多个调频信号平均带宽约为 120 kHz,对应的单基地距离分辨率为 1.25 km 左右。

4 多调频目标检测

MFM 信号进行频率积累以提高检测性能的办法主要有^[17-19]:(1)对复数采样数据直接相加,形成高信噪比 RD 之后进行 CFAR 检测,称为相干积累;(2)将多个频率 RD 谱幅度相加(去除相位信息)后进行 CFAR 检测,称为非相干积累;(3)多个频率分别 CFAR 检测,对二元判决结果计数并综合判决,称为二元积累。相干积累具有提高 MFPBR 距离分辨力的潜力,但工程上面临 2 个问题:(1)MFM 子带信号载频间隔远大于信号自身带宽,这种稀疏频率信号存在距离栅瓣^[9,10];(2)子带间的高精度相参配

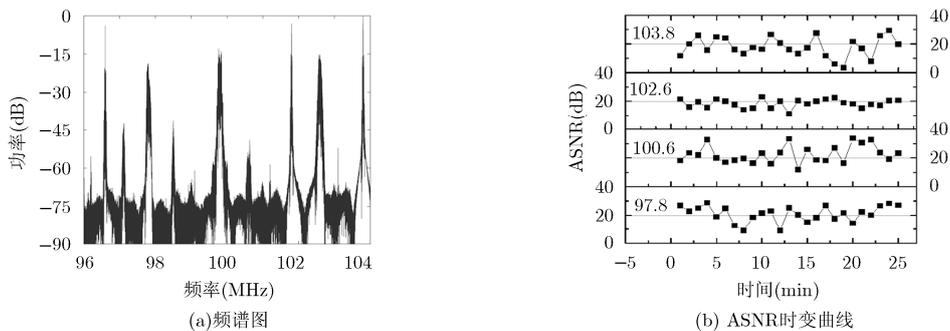


图 1 武汉 FM 广播信号特性

准仍是难以克服的工程难点^[11,15],因此本文仅就非相干积累和二元积累对探测性能的改善进行讨论。

5 多调频实验及结果

5.1 实验介绍

实验数据基于武汉大学新近研制的 MFPBR 实验系统采集,接收频段为 VHF 波段,中心频率为 100 MHz,采样带宽为 10 MHz,接收天线单元为无源偶极子及八木天线。图 2 为实验场景图:其中图 2(a)为收发站位置,基线距离约为 25 km;图 2(b)为偶极子天线单元构成的线性阵列,阵元间距 1.3 m;图 2(c)为均匀圆形阵列,阵元间距 2.8 m;图 2(d)为用于获取参考信号定向八木天线,具有多种极化方式。

5.2 不同频点检测结果

图 3 给出了 6 个频率 2 个方位的目标检测结果,其中图 3(a)、图 3(b)波束指向正东;图 3(c)、图 3(d)波束指向北偏西 20°。系统配置参数为:接收通道总数为 16,其中参考通道 4 个,监测通道 12 个;参考天线为定向八木天线;监测天线为偶极子阵列;选取频点分别为 96.6 MHz, 97.8 MHz, 99.8 MHz, 101.8 MHz, 102.6 MHz, 103.8 MHz 共 6 个,子带划分宽度为 500 kHz,处理的数据总采样时长约 3 min;检测虚警率为 10^{-6} ;通过常规数字波束形成进行电控扫描。

图 3 表明:(1)不同频率检测到的点迹数差异大,如图 3(a)、图 3(c)中的点迹数明显少于图 3(b)、图 3(d);(2)不同频率具有较好的互补性,图中非重

合点迹的数量较多。将点迹数进行统计并给出对应时刻的 ASNR 及带宽(BW)如表 1 所示。将信噪比带宽乘积($ASNR \times BW$)与点迹数进行相关性分析,得到相关系数均值为 0.46(相关性不高),表明波形之外还有其他非可控因素影响着检测性能,例如:(1)VHF 频段电磁波地面反射导致的在不同的高度出现相干增强或相干减弱;(2)目标的航向与姿态可能导致部分频段陷入双基地 RCS 低谷区域。

5.3 多调频检测点迹融合结果

图 4 为不同方位进行 N/M 二元积累($N=2, M=6$)检测及融合结果,即同一检测单元 6 个中有 2 个目标点迹判定为点迹并融合,图中圆点为融合后的点迹;星点为 103.8 MHz 的检测结果;实线为 ADSB 信号对应的飞机航迹。

将最优单频(103.8 MHz)的点迹数 $P(SFM)$ 、6 个频率迹数 $P(MSF)$ 、融合后点迹数 $P(FU)$ 、单频融合比 $R(SFM)=P(SFM)/P(FU)$ 、多频融合比例 $R(MFM)=P(MFM)/P(FU)$ 按不同方位统计如表 2 所示。

表 2 结果表明:(1)最优单频融合比均值为 0.59 说明实际 SFM 方案漏警率大于设想值。(2)不同方位融合比具有较大差异,说明检测性能具有频率和方位的双重敏感性。进一步说明用系统复杂性增加换取更优检测性能具有必要性,但要建立实际有效的检测优化模型,即以波形、频率、目标方位等变量相关的优化函数仍需要大量的实测数据作支撑。

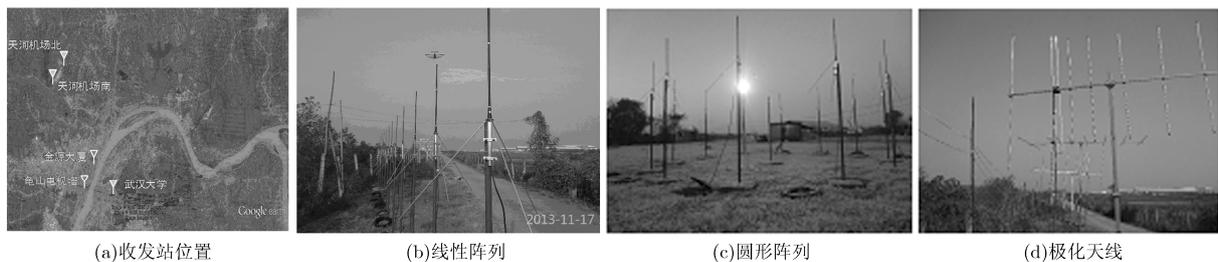


图 2 实验场景

表 1 MFM 信号参数与检测点迹数

| 频率(MHz) | ASNR(dB) | BW(kHz) | 方位 1 | 方位 2 | 方位 3 | 方位 4 |
|---------|----------|---------|------|------|------|------|
| 96.6 | 9.0 | 115.9 | 31 | 19 | 23 | 20 |
| 97.8 | 21.6 | 91.8 | 45 | 31 | 20 | 23 |
| 99.8 | 25.6 | 121.5 | 31 | 31 | 58 | 49 |
| 101.8 | 18.1 | 157.9 | 56 | 56 | 158 | 136 |
| 102.6 | 16.2 | 101.1 | 29 | 29 | 134 | 172 |
| 103.8 | 17.4 | 150.5 | 59 | 59 | 121 | 173 |

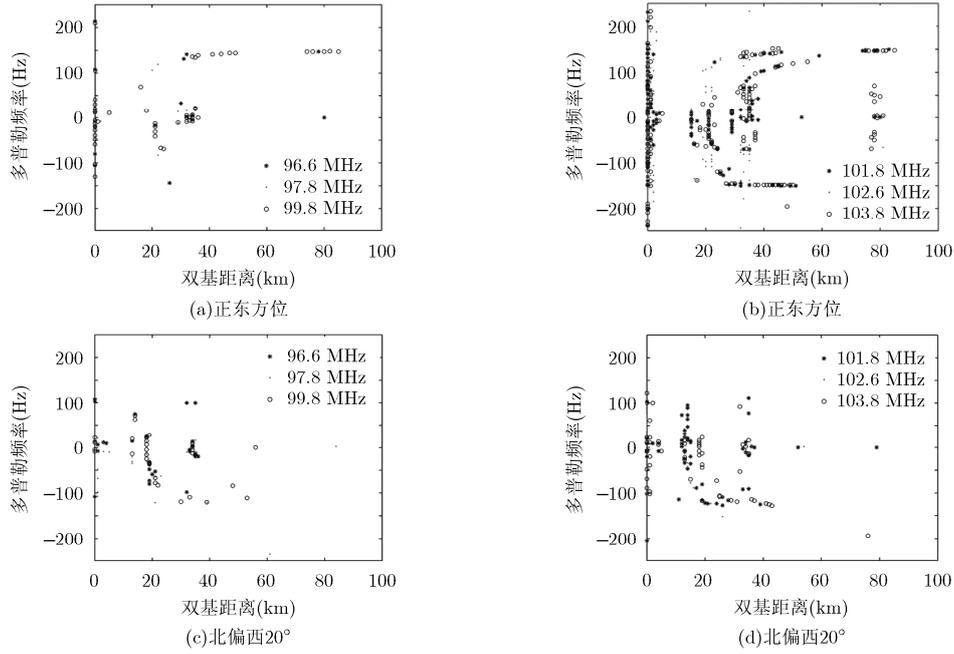


图 3 不同频率检测结果

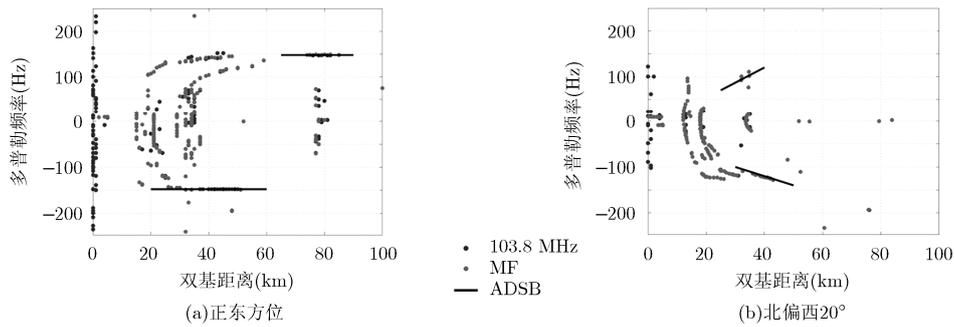


图 4 多调频检测与数据融合结果

表 2 点迹融合前后数量统计

| 参数 | 方位 1 | 方位 2 | 方位 3 | 方位 4 | 均值 |
|--------|------|------|------|------|------|
| P(SFM) | 59 | 59 | 121 | 173 | 103 |
| P(MFM) | 251 | 225 | 514 | 573 | 391 |
| P(FU) | 133 | 125 | 231 | 202 | 173 |
| R(SFM) | 0.44 | 0.47 | 0.52 | 0.86 | 0.59 |
| R(MFM) | 1.89 | 1.80 | 2.23 | 2.84 | 2.26 |

6 结束语

本文展示并分析了武汉大学 MFPBR 实验系统目标检测结果。MFM 方案利用多个信号的分集和综合，显著提高了雷达目标探测性能。文中计算了实际检测性能与波形特征参数的相关系数、分析了检测性能具有频率敏感性的原因、统计了不同频率目标点迹的融合比。尽管目标检测概率与波形、频

率、目标方位等变量有关，但是多调频方案能缓解单频面临的带宽时变、RCS 闪烁等问题。后续将进行选频方案及检测算法的优化设计，以发挥 MFPBR 在目标探测、环境遥感、电波传播研究等领域的作用。

参考文献

[1] KUSCHEL H and O'HAGAN D. Passive radar from history to future[C]. IEEE International Radar Symposium (IRS), Vilnius, Lithuania, 2010: 1-4.

[2] 尤君, 万显荣, 龚子平, 等. 多调频广播外辐射源雷达波形综合的相位补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1985-1991. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01466.

YOU Jun, WAN Xianrong, GONG Ziping, et al. Phase compensation method for multi-frequency passive radar signal synthesis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 1985-1991. doi: 10.3724/SP.J.1146.

- 2013.01466.
- [3] BONGIOANNI C, COLONE F, and LOMBARDO P. Performance analysis of a multi-frequency FM based passive bistatic radar[C]. IEEE Radar Conference, Roma, 2008: 1-6. doi: 10.1109/RADAR.2008.4720805.
- [4] COLONE F, BONGIOANNI C, LOMBARDO P, *et al.* Direction of arrival estimation for multi-frequency FM-based passive bistatic radar[C]. IEEE Radar Conference, 2011: 441-446. doi: 10.1109/RADAR.2011.5960577.
- [5] OLSEN K E and WOODBRIDGE K. FM based passive bistatic radar range resolution improvement[C]. IEEE International Radar Symposium, Leipzig, 2011: 327-332.
- [6] OLSEN K E, WOODBRIDGE K, and ANDERSEN I A. FM based passive bistatic radar target range improvement - Part II[C]. IEEE International Radar Symposium, Vilnius, Lithuania, 2010: 1-8.
- [7] MALANOWSKI M, HAUGEN R, GRECO M S, *et al.* Land and sea clutter from FM-based passive bistatic radars[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(2): 160-166. doi: 10.1049/iet-rsn.2013.0186.
- [8] MALANOWSKI 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.
- [9] BELFIORI F, MONNI S, VAN ROSSUM W, *et al.* Antenna array characterisation and signal processing for an FM radio-based passive coherent location radar system[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(8): 687-696. doi: 10.1049/iet-rsn.2011.0401.
- [10] ZAIMBASHI A, DERAKHTIAN M, and SHEIKHI A. Invariant target detection in multiband FM-based passive bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 720-736. doi: 10.1109/TAES.2013.120248
- [11] 李军, 刘红明, 何子述, 等. 一种多频外辐射源雷达信号相参处理方法[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2890-2894.
LI Jun, LIU Hongming, HE Zishu, *et al.* Coherent processing technique of passive radar based on multi-frequency signals[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(12): 2890-2894.
- [12] 武勇, 王俊. 混合卡尔曼滤波在外辐射源雷达目标跟踪中的应用[J]. 雷达学报, 2014, 3(6): 652-659. doi: 10.12000/JR14113.
WU Yong and WANG Jun. Application of mixed Kalman filter to passive radar target tracking[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6): 652-659. doi: 10.12000/JR14113.
- [13] 邹永强, 高勋章, 黎湘. 低信噪比下多频段雷达数据高精度相参配准[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(1): 48-54. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.01.09.
ZOU Yongqiang, GAO Xunzhang, and LI Xiang. High precision coherent compensation for multiband radar data at low SNR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(1): 48-54. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.01.09.
- [14] BONGIOANNI C, COLONE F, BERNARDINI S, *et al.* Passive radar prototypes for multifrequency target detection[C]. SPIE — The International Society for Optical Engineering, San Diego, 2007. doi: 10.1117/12.784818.
- [15] ISODA K and HARA T. A high-range-resolution method by using Wiener filter for synthetic bandwidth radars[C]. IET International Conference on Radar Systems, Glasgow, 2012: 1-4.
- [16] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 304-331.
CHEN Boxiao. Modern Radar System Analysis And Design [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 304-331.
- [17] COLONE F, BONGIOANNI C, and LOMBARDO P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part I: Target detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(4): 28-39. doi: 10.1109/MAES.2013.6506827.
- [18] COLONE F, BONGIOANNI C, and LOMBARDO P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part II: Direction of arrival estimation[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(4): 40-47. doi: 10.1109/MAES.2013.6506828.
- [19] SHNIDMAN D A. Binary integration for swerling target fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 1043-1053. doi: 10.1109/7.705926.
- 邵启红: 男, 1982年生, 博士, 研究方向为雷达信号与信息处理。
龚子平: 男, 1977年生, 讲师, 研究方向为无线电海洋学、电磁计算。
张 勋: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为雷达信号处理。
尤 君: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为宽带天线设计与实现。
万显荣: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为外辐射源雷达系统设计 with 实现。