

载波频偏对正交频分复用波形外辐射源雷达性能影响的研究

赵志欣 万显荣* 谢锐 柯亨玉
(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 利用正交频分复用(OFDM)波形外辐射源雷达进行目标跟踪和定位是国内外研究的热点之一。该文首先介绍了 OFDM 波形外辐射源雷达信号模型及其信号处理的关键技术。在此基础上重点从不同角度仿真研究了载波频偏估计误差对 OFDM 波形外辐射源雷达探测性能的影响,包括其对匹配滤波后目标参数估计精度的影响,对时域杂波抑制性能影响的定量分析,以及对参考信号重构误码率等方面的影响。仿真结果表明,不同时域杂波抑制算法对载波频偏估计误差要求不同;参考信号重构误码率对时域杂波抑制性能影响较大,对匹配滤波的影响较小。最后基于实测数据验证了分析结果的正确性。

关键词: 外辐射源雷达; 正交频分复用; 载波频偏; 匹配滤波; 杂波抑制; 参考信号重构

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-0871-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01011

Impact of Carrier Frequency Offset on Passive Bistatic Radar with Orthogonal Frequency Division Multiplexing Waveform

Zhao Zhi-xin Wan Xian-rong Xie Rui Ke Heng-yu
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Using passive radar with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) waveform for target track and location is recently a research spot at home and abroad. This paper first introduces the signal model for passive radar with OFDM waveform and key techniques during the signal processing. On that basis, how the estimation error of carrier frequency offset influences the detection performance of this radar is mainly investigated through simulation from different aspects, including the influences on target parameter estimation after match filtering, clutter rejection performance and bit error rate during reference signal reconstruction. The simulation results show that different temporal clutter rejection methods require different estimation accuracy of carrier frequency offset. The reconstruction bit error rate has a great impact on the temporal clutter rejection performance while having a little effect on match filtering. Finally, the analysis results are verified based on the measurement data.

Key words: Passive radar; OFDM; Carrier Frequency Offset (CFO); Match filtering; Clutter rejection; Reference signal reconstruction

1 引言

外辐射源雷达,即无源雷达,它是利用第三方发射的电磁信号探测跟踪目标的双/多基地雷达系统,该体制雷达本身并不发射能量,而是被动地接收目标反射的非协同式辐射源的电磁信号,从而实现目标的跟踪和定位。外辐射源雷达的主要优点有:(1)无需频率分配、无辐射、抗摧毁能力强;(2)反隐身、低空探测能力强;(3)研制和维护成本低、设备体积小、机动性强、易于部署等。数字广播取代模拟广播是时代发展的趋势,其覆盖面广,发射

功率大,为外辐射源雷达提供了极便利的非合作照射源。数字广播通常采用正交频分复用(OFDM)调制技术,一方面增强了广播接收机抗频率选择性衰落的能力,同时也为基于该波形的非合作照射源雷达探测提供了有力支撑,如使雷达系统具有探测性能稳定、分辨性能与节目内容无关^[1],易于纯净参考信号重构^[2,3]等优点。目前已被研究用来作为外辐射源雷达非合作照射源的 OFDM 波形数字广播信号包括:DAB(数字音频广播),DVB-T(数字视频广播),DTMB(数字地面电视),CMMB(中国数字移动多媒体视频广播),DRM(全球性数字调幅广播)等^[4-11]。

OFDM 波形外辐射源雷达通常设有两个通道:参考通道和监测通道,分别用来接收参考信号和监

2012-08-06 收到,2012-12-17 改回

国家自然科学基金(60971101, 41074116, 41106156)资助课题

*通信作者: 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

测信号。通过监测信号与参考信号的匹配滤波以提取目标的距离和多普勒信息。实际处理中面临的主要问题包括：参考通道信号中不可避免地存在多径和噪声污染，需要结合纠错编码技术利用 OFDM 波形信号优良的抗多径性能，对参考通道信号进行重构得到纯净的参考信号^[2,3,12-14]，使得参考信号可看作是发射信号的理想延迟信号。另一方面监测通道信号中往往存在直达波和多径回波，使得匹配滤波后的目标信号在距离多普勒(Range-Doppler, RD)谱上被掩盖，直达波和多径杂波抑制也是需要解决的关键问题。文献[15-17]研究了时域杂波抑制方法，它们均利用了监测信号中直达波和多径回波与参考信号之间的相关性。

然而，外辐射源雷达接收端与发射端广播系统采用独立的时钟源，因此收发两端之间会存在载波频偏(Carrier Frequency Offset, CFO)。在外辐射源雷达接收端通常需要对 CFO 进行估计并补偿，但估计值肯定会与真实值之间存在一定的偏差，使得接收端存在一定的残余 CFO。CFO 估计误差对探测性能的影响主要包括以下几方面：(1)残余 CFO 的存在会影响监测信号中直达波和多径回波与参考信号之间的时域相关性，从而会影响杂波抑制效果；(2)监测通道与参考信号之间存在的残余 CFO 会造成匹配滤波后目标多普勒频移的偏移；(3)CFO 估计误差会影响 OFDM 波形信号子载波的正交性，从而会影响参考信号的重构，而参考信号的提纯效果又会直接影响杂波抑制和匹配滤波的效果。本文在 OFDM 波形外辐射源雷达信号模型和信号处理流程的基础上，给出了匹配滤波、时域杂波抑制以及参考信号重构的基本原理，针对上述关键步骤研究了 CFO 估计误差对外辐射源雷达探测性能的影响，给出了定量的分析结果，并通过实测数据进行了验证。

2 信号模型和信号处理流程

与有源雷达的探测波形先前已知不同，外辐射源雷达系统的参考信号是未知且随机的，需要在接收端提取出参考信号。外辐射源雷达参考信号可通过将参考天线波束对准发射端方向得到，即直接采用参考通道的接收信号。OFDM 波形外辐射源雷达可采用另一种基于重构的参考信号获取方式。若参考信号由前一种方式获取，接收端就不存在 CFO 估计误差的问题，但此种方式获取的参考信号中会不可避免地面临多径和噪声污染，严重影响目标探测。因此本文重点介绍 CFO 估计误差对基于重构参考信号的 OFDM 波形外辐射源雷达性能影响。

OFDM 是一种多载波调制技术，它可以在多个正交的载波上分别调制数据，相邻子载波的频率间隔为各载波上码元周期的倒数，使得各路信号在频谱上是重叠的，从而既能并行发送信号节省带宽，又可以在接收端把每一路信号分离出来，实现解调；同时通过在 OFDM 符号之间插入循环前缀作为保护间隔，以最大限度地消除由于多径带来的符号间干扰。OFDM 波形数字广播的基带复信号可表示为

$$s(t) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} C_{r,k} e^{j2\pi \frac{k}{T_u}(t-T_g-rT_s)} q_r(t) \quad (1)$$

$$q_r(t) = \begin{cases} 1, & rT_s \leq t \leq (r+1)T_s \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中 k 为子载波序号， K_{\min} 与 K_{\max} 为 k 的上下限； r 为 OFDM 符号序号； $C_{r,k}$ 为符号 r 第 k 个子载波的复调制数据，如要传送的音频或非音频数据以及一些便于接收端进行 CFO 估计或其它同步和解调步骤的固定导频单元； T_u 表示 OFDM 符号有效部分时间长度，载波间隔即为 $\Delta F = 1/T_u$ ； T_g 表示 OFDM 符号循环前缀时间长度； T_s 表示一个完整 OFDM 符号时间长度。

OFDM 波形外辐射源雷达的参考通道信号可表示为

$$s_{\text{ref}}(t) = A_{\text{ref}} s(t - \tau_0) + \sum_{p=1}^{N_p} g_p s(t - \tau_p) + n_{\text{ref}}(t) \quad (3)$$

其中 A_{ref} ， τ_0 分别是直达波信号的复包络幅度和相对于发射信号的延迟； N_p 为多径条数； g_p ， τ_p 分别是第 p 条多径的复包络幅度和延迟； $n_{\text{ref}}(t)$ 为参考通道的噪声。

与参考信号存在 CFO 的监测通道信号可表示为

$$s_{\text{surv}}(t) = e^{j2\pi\varepsilon\Delta Ft} \left\{ A_{\text{lx}} s(t - \tau_0) + \sum_{i=1}^{N_c} c_i s(t - \tau_{ci}) + \sum_{m=1}^{N_T} T_m s(t - \tau_m) e^{j2\pi f_{dm} t} + n_{\text{surv}}(t) \right\} \quad (4)$$

其中 $\varepsilon\Delta F$ 表示 CFO；右边花括号中第 1 项为由旁瓣进入的直达波； N_c 和 N_T 分别为多径条数及目标个数； A_{lx} ， c_i 和 T_m 分别为监测通道中直达波、第 i 条多径和第 m 个目标的复包络幅度； τ_{ci} 和 τ_m 分别为第 i 条多径和第 m 个目标的时间延迟； f_{dm} 为第 m 个目标的多普勒频移； $n_{\text{surv}}(t)$ 为监测通道的噪声。

OFDM 波形外辐射源雷达的信号处理框图如图 1 所示。首先利用参考通道信号估计 CFO 并重构纯净的参考信号；在补偿监测通道信号的 CFO 后接着进行直达波和多径杂波抑制；然后将杂波抑制后

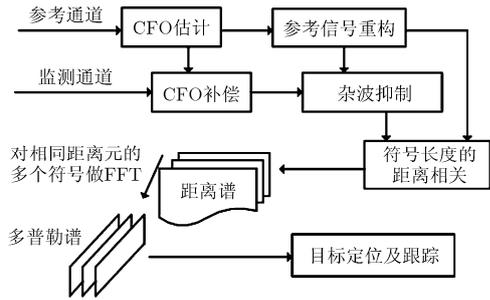


图1 信号处理框图

的监测信号与参考信号匹配滤波;最后利用匹配滤波的结果进行目标的定位及跟踪。下面结合信号处理关键技术,分析 CFO 估计误差对 OFDM 波形外辐射源雷达探测性能的影响。为了便于条理地说明问题,首先介绍 CFO 估计误差对匹配滤波的影响,然后是其对时域杂波抑制和参考信号重构的影响。

3 CFO 估计误差对匹配滤波的影响

匹配滤波即将经过杂波抑制后的监测信号与一系列经时间延迟和多普勒频移的重构参考信号样本相关,当时间延迟和多普勒频移与目标参数相吻合时,匹配结果就会在 RD 谱上产生相应的峰值;同时,通过相干累积可以提高目标的信噪比。匹配滤波可以用互相关法及傅里叶变换(FFT)快速算法实现,结合 OFDM 波形的特点,本文选用的方法为类调频连续波(FMCW)雷达信号处理法(如图1所示),即:先取每个 OFDM 符号做相关,得到距离谱;再对同一个距离元的连续多个 OFDM 符号进行 FFT,得到多普勒信息。

目标经过匹配滤波后的多普勒频移与其运动速度相关。很显然,由于监测信号与参考信号之间的残余 CFO,会使得匹配后的目标多普勒频移产生偏移,从而影响对目标速度的精确估计。

4 CFO 估计误差对时域杂波抑制的影响

时域杂波抑制方法主要是基于维纳滤波理论,即依据不同的准则寻找 M 阶最优权系数 \mathbf{W} 求解表达式 $e(n) = s_{\text{surv}}(n) - \mathbf{W}^H \mathbf{s}_{\text{ref}}(n)$,其中 $s_{\text{surv}}(n)$ 为监测通道样本, $\mathbf{s}_{\text{ref}}(n)$ 为 M 个参考样本构成的向量;根据不同的准则和计算方法,时域杂波抑制方法可分为最小均方误差(LMS)、归一化最小均方误差(NLMS)、递归最小二乘(RLS)迭代算法^[8]和基于最小二乘(LS)的 ECA-B 块算法^[17]等。本文主要研究 RLS 迭代算法和 ECA-B 块算法。

时域杂波抑制方法利用了监测信号中直达波和多径回波分量与参考信号的相关性,而目标分量由于存在多普勒频移与参考信号的相关性弱,从而使

得滤波后的监测信号中仅含目标信号和噪声。但实际上,监测通道中直达波和多径回波是发射信号的延迟信号,参考通道中重构出的参考信号可认为与发射信号无 CFO;若接收端与广播信号发射端之间存在 CFO 估计误差,即经 CFO 补偿后的监测通道与参考信号之间存在残余的 CFO;残余的 CFO 降低了监测信号中直达波和多径回波分量与参考信号的相关性,进而影响了对直达波和多径回波的抑制效果。

排除其它影响,这里仅衡量 CFO 估计误差对杂波抑制性能的影响。仿真参数如下:设参考信号即为发射信号;以 DRM 标准模式 B 信号^[19]为例,将信道参数设置如下:监测信号中直达波和多径信噪比(SNR)从 60 dB 到 0 dB,间隔为 5 dB,占据了前 13 个距离元;单目标的距离元为 30,多普勒频移为 8 Hz,且 SNR 比直达波低 60 dB。共取 256 个 OFDM 符号,积累时间约为 6.8 s。RLS 算法中设初始值 $\delta = 0.001$,遗忘因子 $\lambda = 0.9999$;ECA-B 分块数为 30;ECA-B 和 RLS 算法的阶数均选为 $M = 15$ 。

直达波和多径杂波抑制前的 RD 谱如图 2 所示,图中仅直达波和强多径杂波可见。图 3 和图 4 分别是在 CFO 估计误差为 $10^{-5}\Delta F$ 的情况下,经过 RLS 和 ECA-B 算法抑制直达波和多径杂波后的 RD 谱,在此 CFO 估计误差条件下处理后目标均可见。其中,图 3 中未抑制完全的多径杂波在零频仍可见;图 4 中除目标外,出现在零距离元处的尖峰是由于 ECA-B 抑制后的少量直达波或多径杂波残余分量被分块调制引起的。图 5 给出了在不同 CFO 估计误差下 RLS 和 ECA-B 算法抑制直达波和多径杂波能量的对比。对比可见,RLS 算法对 CFO 估计误差较敏感,当 CFO 估计误差在 $10^{-4}\Delta F$ 以下时,杂波抑制才有效果且 CFO 估计误差越小抑制杂波能量越多,当 CFO 估计误差在 $10^{-4}\Delta F$ 量级及以上时抑制杂波能量在 15 dB 以下;而 ECA-B 可以容忍 CFO 估计误差在 $10^{-3}\Delta F$ 以内,即当 CFO 估计误差在 $10^{-3}\Delta F$ 量级时就可抑制杂波能量 15~35 dB,当 CFO 估计误差在 $10^{-5}\Delta F$ 以内时,可将杂波抑制干净。

5 CFO 估计误差对参考信号重构的影响

参考信号的重构方法如下:首先利用通信中采用的解调、信道估计与均衡、解码和纠错技术获得纯净的码流,然后再重复发射端所进行的编码和调制过程重现发射信号,将其作为参考信号。OFDM 波形解调系统要求各子载波间保持严格的正交,CFO 估计误差导致的残余 CFO 会干扰子信道之间

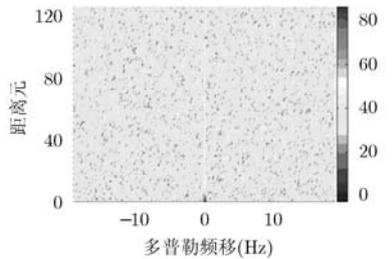


图2 直达波和多径杂波抑制前的RD谱

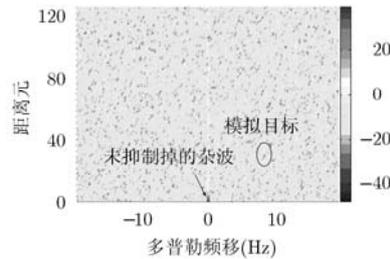


图3 RLS算法抑制直达波和多径杂波后的RD谱

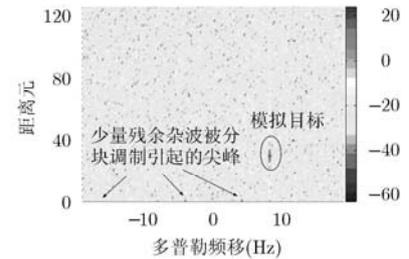


图4 ECA-B算法抑制直达波和多径杂波后的RD谱

的正交性,从而会增加解调信号的误码率。图6给出了高斯信道下信噪比为15 dB和20 dB时,不同的CFO估计误差对误码率的影响。由图可见,当CFO估计误差在 $10^{-4}\Delta F$ 量级以下时误码率基本保持在同一量级,由于其误差较小可在信道估计与均衡处理时被纠正及补偿;而当CFO估计误差达 $10^{-3}\Delta F$ 量级时,误码率随CFO变化较明显,在不同SNR下均提高了一个数量级,因为此时的CFO估计误差超出了正常信道估计的纠正范围。

误码率的高低显示了参考信号的重构性能。误码率越高,参考信号与发射信号的相似性越低,从而降低了参考信号与监测信号的相关程度,进而会对杂波抑制性能和匹配滤波的结果造成影响。杂波抑制性能随误码率的变化如图7所示,可见当误码率由 10^{-6} 上升至 10^{-1} 时,杂波抑制能量下降了50 dB,说明由解调误码率引起的参考信号掺杂对杂波抑制能力有较大影响;图8给出了不同误码率下的参考信号和监测信号的相关程度,如图所示当误码率为 10^{-2} 时,参考信号和监测信号的相关程度与0误码率时相当;当误码率提高为 10^{-1} 时,参考信号和监测信号的相关程度下降了约5 dB,说明匹配滤波结果随重构误码率而变化,但变化不明显。

6 实测数据分析

本文实测分析选用武汉大学OFDM波形合作式高频外辐射源雷达实验数据,具体参数介绍如下:

发射站位于青岛沿海,接收站位于烟台沿海,收发站间的距离约为50 km,通过频率综合器模拟产生DRM标准B模式信号,经由1 kW峰值功率放大器输出,经过地波传播模式到达接收天线;载波间隔 ΔF 为93.75 Hz。下面结合2011年8月某时段的接收数据进行分析。

整数倍CFO利用频率参考单元进行估计,小数倍CFO先用基于循环前缀的最大似然同步算法^[20]进行粗估计,再在信道估计后精估计^[21]。图9给出了约30 s内CFO估计值的统计结果,可见CFO估计误差在 $10^{-5}\Delta F$ 量级。

经过CFO补偿后的监测信号和参考信号的RD谱如图10所示,积累时间约为6.8 s,其中看不到除直达波外的目标回波信号。对CFO补偿后的监测信号用ECA-B算法对直达波和多径杂波抑制,经匹配滤波得到如图11所示的RD谱,由图可见在第60距离元多普勒频移为-3.4 Hz左右的飞机目标回波;而用RLS算法抑制后,看不到任何目标回波。为了进一步验证ECA-B算法对CFO估计误差的敏感程度,分别将CFO估计值减小0.3 Hz和1 Hz。两种CFO估计误差下,分别用ECA-B进行杂波抑制,图12给出目标所在距离元的归一化截面图。图12(a)为CFO为估计值和估计值减小0.3 Hz的比较,可见目标回波在CFO估计误差为 $10^{-3}\Delta F$ 量级时SNR几乎无变化,即杂波抑制能量几乎无变化;图

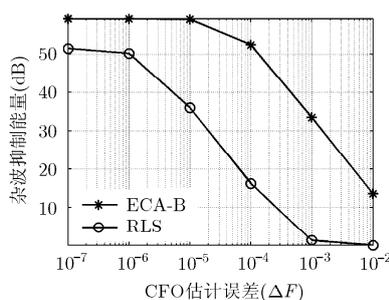


图5 直达波和多径杂波抑制能量随CFO估计误差的变化

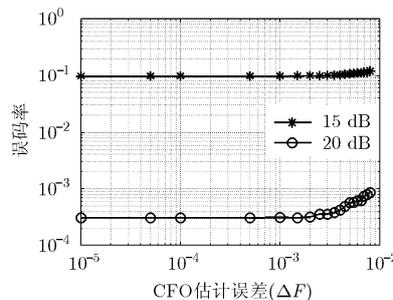


图6 不同信噪比下载波频偏与重构误码率关系

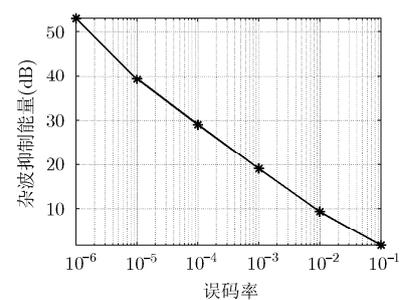


图7 误码率与杂波抑制能量关系统计

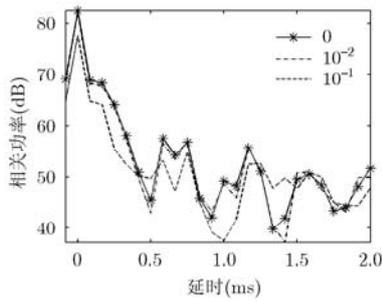


图 8 不同误码率下参考信号与监测信号的相关程度

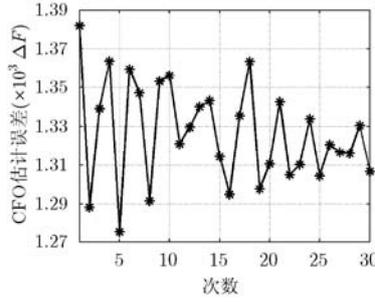


图 9 CFO 的多次估计值

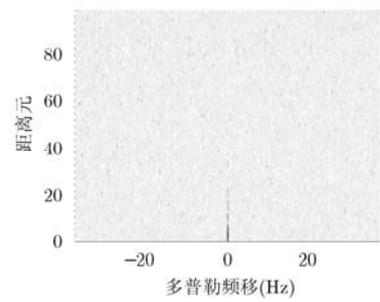


图 10 直达波和多径杂波抑制前的 RD 谱

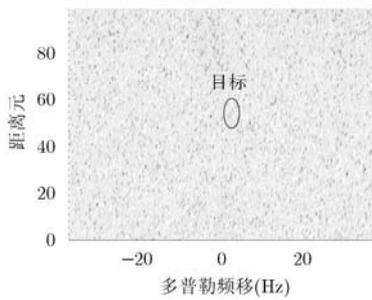
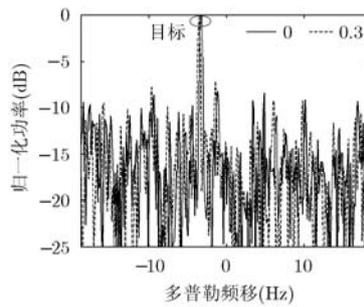
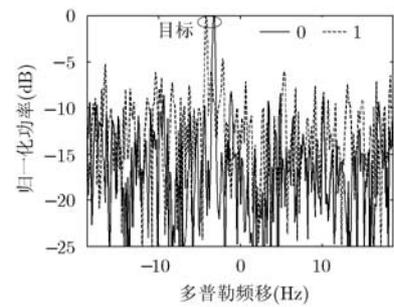


图 11 ECA-B 算法抑制直达波和多径杂波后的 RD 谱



(a) CFO 估计值偏差 0 和 0.3 Hz



(b) CFO 估计值偏差 0 和 1 Hz

图 12 不同 CFO 估计值偏差条件下直达波和多径杂波抑制后目标回波 SNR 对比

12(b)为 CFO 为估计值和估计值减小 1 Hz 的比较，可见，在 CFO 估计误差达 $10^{-2}\Delta F$ 量级时残余直达波和多径分量功率增大，目标回波 SNR 有所降低。另外，由图 12 也可看出，当 CFO 变化时，目标的多普勒频移会发生偏移，从而影响目标速度估计。

7 结束语

本文研究了载波频偏对 OFDM 波形外辐射源雷达性能的影响，说明了一方面载波频偏估计误差会影响参考信号的重构误码率，进而会影响时域杂波抑制和匹配滤波；另一方面，载波频偏估计误差的存在本身就会对时域杂波抑制性能产生影响，重点比较了载波频偏估计误差对两种常用时域杂波抑制方法(RLS 迭代算法和 ECA-B 块算法)的影响。通过仿真数据分析可知，相对于 RLS 算法，ECA-B 算法对监测信号和参考信号之间的载波频偏更不敏感，它要求载波频偏估计误差在 10^{-3} 倍载波间隔以内即可。另外，载波频偏估计误差还会影响目标的速度估计精度。利用高频雷达实验系统采集到的实测数据分析结果，进一步证实了载波频偏估计误差对时域杂波抑制和匹配滤波性能的影响，为提高 OFDM 波形外辐射源雷达的目标探测性能提供了理论支持和技术指导。

参考文献

[1] Baker C J and Griffiths H D. Passive coherent location radar

systems Part 2: waveform properties[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 160-168.

[2] O'Hagan D W, Kuschel H, Heckenbach J, et al. Signal reconstruction as an effective means of detecting targets in a DAB-based PBR[C]. *International Radar Symposium, Vilnius Lithuan*, 2010: 48-51.

[3] Marcin Kamil Baczyk and Mateusz Malanowski. Reconstruction of reference signal in DVB-T-based passive radar[J]. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2011, 57(1): 43-48.

[4] Coleman C J and Yardley H. Passive bistatic radar based on target illuminations by digital audio broadcasting[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(5): 366-375.

[5] Capria A, Petri D, Martorella M, et al. DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment[C]. *IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, USA*, 2010: 3917-3920.

[6] Alexander Schröder, Michael Edrich, and Frieder Wolschendorf. Multiband experimental PCL system: concept and measurement results[C]. *International Radar Symposium, Vilnius, Lithuania, June 2010*: 1-4.

[7] Thomas J M, Griffiths H D, and Baker C J. Ambiguity function analysis of Digital Radio Mondiale signals for HF passive bistatic radar[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(25): 1482-1483.

[8] 万显荣, 赵志欣, 柯亨玉, 等. 基于 DRM 数字调幅广播的高

- 频外辐射源雷达实验研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 11-18.
- Wan Xian-rong, Zhao Zhi-xin, Ke Heng-yu, *et al.*. Experimental research of HF passive radar based on DRM Digital AM broadcasting[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 11-18.
- [9] Yang Jin-lu, Shan Tao, and Tao Ran. A detector of DTTB based passive radar using FRFT and Hough transform[C]. International Conference on Pervasive Computing Signal Processing and Applications, Harbin, China, 2010: 212-215.
- [10] 万显荣, 岑博, 程丰, 等. 基于 CMMB 的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2489-2493.
- Wan Xian-rong, Cen Bo, Cheng Feng, *et al.*. Ambiguity function analysis and processing of CMMB signal based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2489-2493.
- [11] 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.
- Wan Xian-rong. 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.
- [12] 万显荣, 岑博, 易建新, 等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达参考信号获取方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 338-343.
- Wan Xian-rong, Cen Bo, Yi Jian-xin, *et al.*. Reference signal extraction methods for CMMB-based passive bistatic radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 338-343.
- [13] 万显荣, 张德磊, 柯亨玉, 等. 全球性数字广播高频外辐射源雷达参考信号重构[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2231-2236.
- Wan Xian-rong, Zhang De-lei, Ke Heng-yu, *et al.*. Reference signal reconstruction of HF passive bistatic radar based on DRM Digital AM broadcasting[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(11): 2231-2236.
- [14] Wan Xianrong, Wang Junfang, Hong Sheng, *et al.*. Reconstruction of reference signal for DTMB-based passive radar systems[C]. IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, China, Oct. 24-27, 2011: 165-168.
- [15] Xu Yuan-jun, Tao Ran, Wang Yue, *et al.*. Using LMS adaptive filter in direct wave cancellation[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2003, 12(4): 425-427.
- [16] Cardinali R, Colone F, Ferretti C, *et al.*. Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar[C]. IEEE Radar Conference, Boston, MA, 2007: 469-474.
- [17] Colone F, O'Hagan D W, Lombardo P, *et al.*. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698-722.
- [18] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 208.
- Zhang Xian-da. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 208.
- [19] ETSI ES 201 980 V3.1.1-Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification[S]. European Telecommunication Standards Institute (ETSI), 2009: 138-140.
- [20] Van de Beek Jan-Jaap, Sandell Magnus, and Borjesson Per Ola. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [21] Shi Kai, Serpedin E, and Ciblat P. Decision-directed fine synchronization in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(3): 408-412.
- 赵志欣: 女, 1986 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 万显荣: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究兴趣为无源雷达、超视距雷达、新体制雷达系统与雷达信号处理等.
- 谢 锐: 男, 1989 年生, 硕博连读生, 研究方向为雷达信号处理.
- 柯亨玉: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场理论、高频雷达海洋遥感技术等.