

文章编号: 2095-4980(2015)03-0409-06

时间反转技术在LFMCW雷达目标检测中的应用

刘泽龙, 杨威, 苗楠楠, 曹新贞

(酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

摘要: 为提高复杂环境下线性调频连续波(LFMCW)雷达的目标检测性能, 分析了多路径对目标检测的影响, 针对时间反转(TR)技术的优点, 提出了基于时间反转技术的检测模型, 并探讨了该模型的可行性, 最后通过仿真比较了不同检测算法的检测性能。仿真结果表明, 基于时间反转技术的检测模型相比于传统目标检测算法具有更好的检测性能。

关键词: 线性调频连续波雷达; 时间反转技术; 多路径; 杂波; 目标检测

中图分类号: TN97.51

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0409

Application of Time Reversal technology in target detection of Linear Frequency Modulation Continuous Wave radar

LIU Zelong, YANG Wei, MIAO Nannan, CAO Xinzhen

(Jiuquan Satellite Launch Centre, Jiuquan Gansu 732750, China)

Abstract: Multi-path effects on target detection are analyzed in order to improve target detection performance of Linear Frequency Modulation Continuous Wave(LFMCW) radar under complex environment. A model is proposed based on Time Reversal(TR) technology considering its advantages and the effectiveness of the model is discussed. The detection performances of different methods are compared through the simulation. Simulation results verify that the proposed method outperforms other traditional methods on target detection.

Key words: Linear Frequency Modulation Continuous Wave radar; Time Reversal technology; multi-path; clutter; target detection

线性调频连续波(LFMCW)雷达^[1]具有结构简单、体积小、重量轻、发射峰值功率低、时间带宽积大、距离分辨力高、无距离盲区、低截获概率等优点, 近年来得到了广泛应用。在强杂波、多径存在的复杂环境下, 雷达接收到的回波信号往往比较弱, 回波信号中多路径的存在, 尤其在直达路径(Direct Path, DP)并不是能量最强路径时, 导致检测到的目标可能为虚假目标, LFMCW雷达的目标检测技术面临严峻挑战。

时间反转(TR)技术^[2]具有时间和空间聚焦特性, 在抑制多路径方面有着独特的优势, 近年来受到越来越多的关注, 当前关于TR技术的研究主要集中在声通信中。TR镜分类研究及其在水声通信中的应用^[3]和TR法在水下通信中的应用^[4]均利用TR技术的时间空间聚集特性, 在抑制多路径方面取得了不错的效果。TR在超宽带-多输入多输出(Ultra Wide Band-Multiple Input Multiple Output, UWB-MIMO)雷达中的应用^[5]是TR技术在雷达抗多径领域的成功运用。当前, 国内关于TR技术在LFMCW雷达中的应用研究比较少。基于TR技术良好的抗多径性能, 本文将TR技术应用到LFMCW雷达目标检测中, 并验证了其有效性和适应性。

1 LFMCW 雷达目标频谱特性

实际环境中, 杂波的干扰, 多路径的存在等因素都可能导致对目标的非有效检测。多路径环境下, 雷达发出的信号最终通过多条路径到达接收端。不同的路径上信号的衰减、时延、载波的相位以及多普勒频移均不相同, 导致接收到的回波信号呈现出和理想环境下不一致的情形, 因此研究此时的雷达频谱特性对目标检测具有十分重要的意义。

现实中目标运动速度很小,由速度带来的多普勒频率很小,其差异更小,因此可忽略多普勒频率的不同,不考虑每条路径径向速度的不同带来的多普勒的频率差异,认为接收到的信号为衰减、时延、相位不同,但频率相同的多路信号的叠加^[6]。设 LFM CW 雷达的发射机工作频率为 f_0 , 调制周期为 T , 调制带宽为 B , 则在有效扫频段内的发射信号为:

$$s_t(t) = A \exp j[2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2) + \varphi_0], t \in [0, T] \quad (1)$$

式中: A 为信号包络; 调频斜率为 $\mu=B/T$; φ_0 为发射信号初始相位。

设多路径信道的冲激响应为:

$$h(t) = \sum_{i=0}^N a_i \delta(t - \tau_i) \quad (2)$$

式中: a_i 和 τ_i ($i=0$ 时代表 DP 路径的衰减和时延) 分别为第 i 条路径相对于 DP 路径的衰减系数和等效时延; N 表示多路径条数; $\delta(t)$ 表示冲激响应函数。

径向速度为 0, 初始距离($t=0$)为 R_{DP} 的点目标在多路径环境下产生的回波信号为:

$$r(t) = K s_t(t - \tau_{DP}) \otimes h(t) = \sum_{i=0}^N a_i K s_t(t - \tau_i - \tau_{DP}) = \sum_{i=0}^N a_i K A \exp j \left\{ 2\pi \left[f_0 (t - \tau_i - \tau_{DP}) + \frac{1}{2} \mu (t - \tau_i - \tau_{DP})^2 \right] + \varphi_0 + \varphi_i \right\} \quad (3)$$

式中: K 为 DP 路径的传输损耗因子; $\tau_{DP} = \frac{2R_{DP}}{c}$ 为 DP 路径的传输延时; \otimes 为卷积运算符; φ_i 为第 i 条路径目标反射引起的附加相移。

经过基带混频并滤去高频分量后, 得到差拍信号为:

$$s_b(t) = \frac{1}{2} K A^2 \sum_{i=0}^N a_i \exp j \left\{ 2\pi \left[\mu (\tau_{DP} + \tau_i) t + (\tau_{DP} + \tau_i) f_0 - \frac{1}{2} \mu (\tau_{DP} + \tau_i)^2 \right] - \phi_i \right\} \quad (4)$$

将得到的差拍信号进行傅里叶变换, 并舍去负频部分, 可得差拍信号频谱近似为:

$$S_b(w) = \frac{K^2 T^2 A^4}{16} \sum_{i=0}^N a_i^2 S a^2 \frac{(w - w_{DP} - w_i) T}{2} \quad (5)$$

式中: $w_{DP} = \frac{2\pi B \tau_{DP}}{T} = \frac{2\pi R_{DP}}{T \delta R}$; $w_i = \frac{2\pi r_i}{T} = \frac{2\pi r_i}{T \delta R}$ ($\delta R = \frac{c}{2B}$ 为距离分辨力, r_i 为第 i 条路径相对于 DP 的等效路径差)。将 w_{DP}, w_i 代入式(5)得到距离谱为:

$$S_b(R) = \frac{K^2 T^2 A^4}{16} \sum_{i=0}^N a_i^2 S a^2 \left[\frac{\pi}{\delta R} (R - R_{DP} - r_i) \right] \quad (6)$$

从式(6)中可以看出, 在 $N=0$ 即不考虑多路径的情况下, 差拍信号频谱的最大峰值出现在 $R=R_0$ 处, 也就是 $S_b(R)$ 频谱能量最强的位置。因此, 理想情况下可以通过观测 $S_b(R)$ 频谱最大峰值的位置来检测目标。但现实情况下, 雷达回波中不仅有多路径的存在, 也有杂波的干扰。杂波、多路径的存在都可能导致检测出的目标并不是真正的目标。从式(6)还可以看出, 多路径环境下目标的频谱等效于目标和多个等效位置镜像目标频谱的积累, 此时要正确地检测出目标, 就必须对多路径分量进行抑制, 使得目标信号能更好地显现出来, 为此更好的目标检测技术是实现的关键。

2 提高目标检测性能的 TR 技术

TR 技术是一项空间信道匹配技术, 具有空间及时间聚焦特性, 在克服码间干扰、共道干扰和多址干扰等方面具有独特优势。不同目标间的信道冲激响应一般是不相关或弱相关的, 因此可以利用 TR 技术使得信号能量在空间和时间聚焦, 提高目标检测概率。在 LFM CW 雷达中, 目标的回波信号经过多条路径到达接收机, 在前面的

分析中可以知道, 每条多路径可以近似作为目标的镜像目标来处理, 因此将每条多路径信道的冲激响应近似为不相关或弱相关处理是合理的。

假设一条多路径信道有 N 条路径, 多路径信道的冲激响应满足式(2), 则多路径信道冲激响应的 TR 的共轭形式为:

$$h^*(-t) = \sum_{i=0}^N a_i^* \delta(t + \tau_i) \tag{7}$$

令

$$y(t) = h(t) \otimes h^*(-t) = \sum_{i=0}^N a_i \delta(t - \tau_i) \otimes \sum_{j=0}^N a_j^* \delta(t + \tau_j) = \sum_{\substack{i=j \\ i=0}}^N |a_i|^2 \delta(t) + \sum_{\substack{i=0, j=0 \\ i \neq j}}^N a_i a_j^* \delta(t - \tau_i + \tau_j) \tag{8}$$

由于 $i \neq j$ 时, $a_i \neq a_j$, 令 $\tau_i - \tau_j = c \neq 0$ (c 为常数), 则有

$$\sum_{\substack{i=0, j=0 \\ i \neq j}}^N a_i a_j^* < \left(\sum_{i=0}^N |a_i|^2 + \sum_{j=0}^N |a_j|^2 \right) / 2 = \sum_{i=0}^N |a_i|^2 \tag{9}$$

从式(8)、式(9)可以看出, $y(t)$ 在 $t=0$ 时具有最大幅度。这是由于经过 TR 处理后, 各条路径能量在 $t=0$ 处得以汇聚, 使得信号在 $t=0$ 具有最大幅度, 这也与 TR 技术的空间和时间聚焦特性相吻合。

在多路径环境下, 到达接收机的信号呈现不同的幅频特性, 若目标检测算法选择不当, 很容易导致目标检测失败。在多径环境下利用 TR 技术, 可以使得多路径信号的能量在目标位置(即首径处)得到汇聚, 使得目标处具有最强的能量。这时, 在多径环境下对目标进行检测, 只需要检测信号能量最强或幅度最大的位置即可, 不再需要考虑多路径中首径是否最强的问题, 降低了目标检测算法的复杂性。文中, 将 TR 技术用于 LFMCW 雷达中, 利用 LFMCW 雷达的频域目标检测特性来获取目标信息, 其检测原理如图 1 所示。

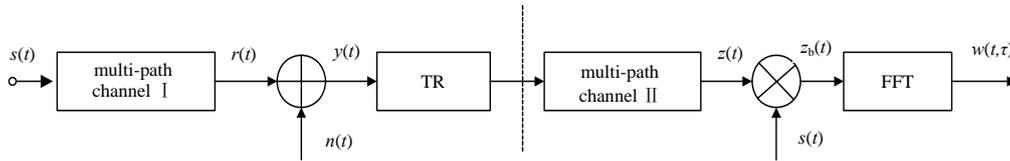


Fig.1 Principle of TR technology
图1 时间反转技术原理框图

利用 TR 技术实现目标检测的过程如下:

雷达信号 $s(t)$ 经过多路径信道 I 到达目标后被接收机接收, 在信号的传输过程中信号受到杂波等的干扰, 最终接收机的输出 $y(t) = s(t) \otimes h(t) + n(t)$ 。

得到多路径信道 II 的信道冲激响应 $h'(t)$ 。多路径信道 II 和多路径信道 I 原则上为同一多路径信道, 但是由于信道的时变特征, 导致信道 II 和信道 I 不一定相同。多路径信道 I 为信号传输的真实信道, 多路径信道 II 可以由接收机的输出 $y(t)$ 和 $s(t)$ 进行解算得到, 也可以通过实测的雷达信号模型进行计算机建模得到。

将接收机的输出 $y(t)$ 进行 TR 处理, 在计算机内部与得到的多路径信道 II 的信道冲激响应 $h'(t)$ 进行卷积处理, 得到输出 $z(t) = y^*(-t) \otimes h'(t)$ 。

将得到的时反信号 $z(t)$ 与本地信号 $s(t)$ 进行混频处理, 并对得到的差拍信号进行 FFT 处理, 可得到目标的频谱图。对得到的频谱图进行分析和处理, 并通过一定的检测手段检测出目标。

在不考虑杂波的情况下, 由图 1 可知

$$z(t) = y^*(-t) \otimes h'(t) = s^*(-t) \otimes \underbrace{h^*(-t) \otimes h'(t)}_{H(t)} = s(t) \otimes H(t) \tag{10}$$

由式(10)可以看出, 经过 TR 技术处理后, 系统的输出结果等效于发射信号 $s(t)$ 和多路径信道 $H(t)$ 的卷积。由式(8)可知, $H(t)$ 和 $h(t)$ 具有相似的表达式形式, 此时后续的信号处理过程就转变为 LFMCW 雷达的信号处理问题, 如式(3)~式(6)。经过信号处理, 目标呈现出如式(6)的目标频谱特性, 根据前面分析的 TR 技术聚焦原理可知, 目标的位置出现在频谱中频谱能量或者峰值最大处。

通过上面的分析可知，将 TR 技术用于 LFMCW 雷达目标检测中不仅可以增强抗多径性能，降低目标检测算法的复杂性，还能提高多路径环境下目标的检测性能，对提高定位精确度起到了一定的作用。

3 仿真分析

为了更好地说明 TR 技术在提高 LFMCW 雷达目标检测性能中的有效性，在前文理论分析的基础上进行如下仿真。

由于航天任务中，天气对发射和测量有较大的影响，甚至可能导致任务的推迟实施，为此，发射时要选择合适的发射时间窗口，减少天气的影响。仿真中，多路径信道采用 IEEE 802.15.4a 室外信道模型。为了分析方便，设定目标位于 1 000 m 的某处。LFMCW 雷达系统工作频率 f_0 为 750 MHz，调制带宽 B 为 150 MHz，调频周期 T 为 1 ms。为了说明 TR 技术在抑制多径、提高目标检测性能中的作用，文中选定 IEEE 802.15.4a 信道模型中的一条典型信道进行仿真说明，多路径信道响应如图 2 所示。

从图 2 中可以看到，该信道中包含多条路径，并且目标的首径(或直达路径)并不是最强的路径。这时，如果选择不恰当的目标检测算法，可能导致检测到的为目标镜像目标，从而引起一定的测距、定位误差。为了说明杂波对目标检测的影响，假定目标处于较为理想的环境下，杂波服从高斯分布，经过仿真得到不同信杂比条件下目标频谱图，其中 SCR 表示信杂比，单位用 dB 表示，如图 3 所示。

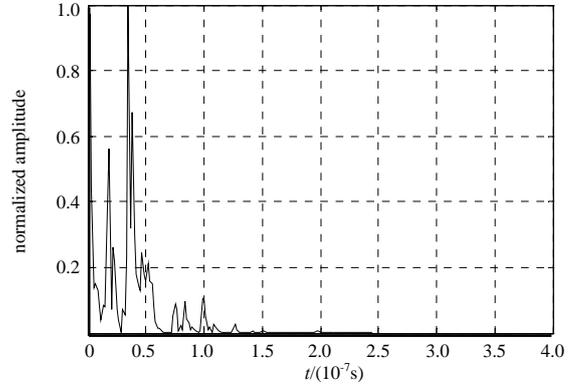


Fig.2 A typical channel in IEEE802.15.4a channel model
图 2 IEEE802.15.4a 信道模型中的典型信道

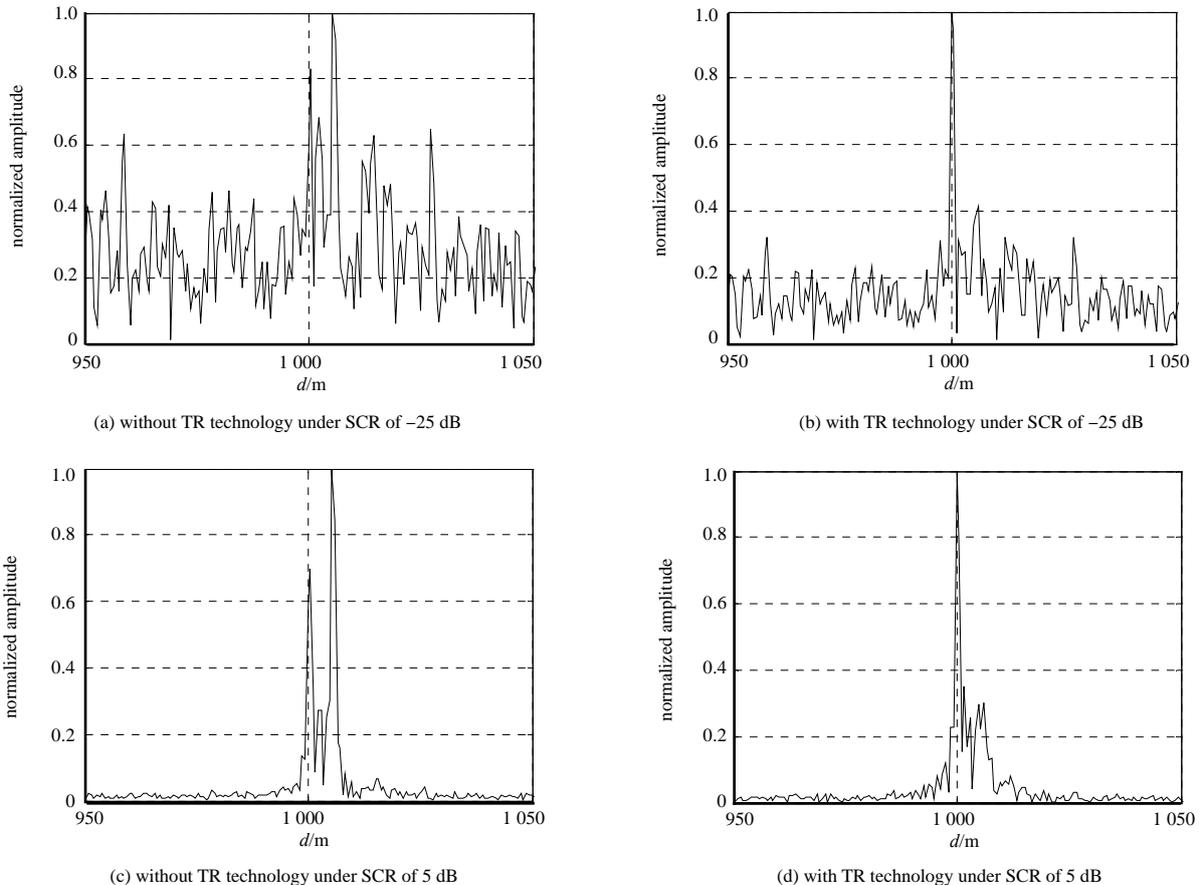


Fig.3 Target spectra under different environments
图 3 不同环境下目标频谱图

从图3可以看出,杂波对目标的检测具有重要的影响。在强杂波环境下(如 $SCR=-25$ dB时),目标受杂波的影响较为严重,甚至目标完全被杂波淹没,这时目标不易被检测出来,如图3(a)所示。但是此时采用TR技术,则可以看出经过TR技术处理后,多路径信号的能量在目标位置处得以汇聚,使得目标信号能量明显高于杂波信号能量,目标很容易被检测出来,如图3(b)所示。弱杂波环境下,杂波对目标的影响较小,但是此时多路径信号和目标信号混在一起,使得目标检测难度加大,如图3(c)所示。此时,如果目标检测算法或多径抑制算法选择不适合,则可能导致检测到的目标实际是多路径信号镜像目标,从而产生一定的测距和定位误差,而且选择多径抑制算法必然增加目标检测算法复杂度,带来硬件上实现的困难。但是采用TR技术处理后,多路径信号的能量得以在目标位置处聚集,使得目标信号的能量明显高于其他多路径信号的能量,这时只需要简单的目标检测算法即可检测出目标,如图3(d)所示。这也间接证明了TR技术具有抗多路径的性能。从图3纵向比较可以看出,在多径、杂波共存的复杂环境下,采用TR技术可以抑制多路径信号对目标的干扰,提高目标的检测性能。

为了更好地说明TR技术在提高LFMCW雷达目标检测性能中的优势,将其与未经过TR处理时的目标检测结果作定量分析比较。未经过TR处理时,多路径的存在、杂波的干扰都增加了目标检测的难度。要正确检测出目标位置,必须要进行后续处理,本文选择最大能量选择法(Max Energy Selection, MES)^[7]和恒定门限法(Constant Threshold, CT)^[8]为2种对比检测算法。性能评价采用均值绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)准则^[9],其表达式如式(11)所示。

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |R_j - \hat{R}_j| \quad (11)$$

式中: M 为仿真次数; R_j 为第 j 次目标的真实位置; \hat{R}_j 为第 j 次检测出的目标位置。利用IEEE 802.15.4a室外信道模型对同一 SCR 下目标位置进行200次统计,得到目标位置误差仿真结果如图4所示,图中TR代表经过TR处理后的结果,NO-TR-MES代表未经过TR技术处理但采用最大能量选择检测算法的结果,NO-TR-CT代表未经过TR技术处理但采用恒定门限检测算法的结果。

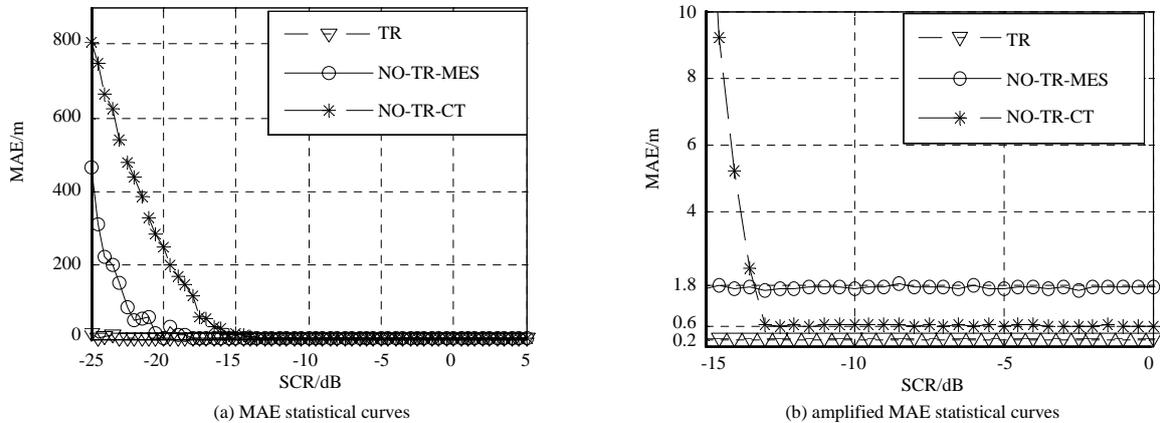


Fig.4 MAE statistical curves of different detection methods
图4 不同检测方法的MAE统计曲线

从图4可以很明显看出, $SCR \geq -25$ dB时,经过TR处理后检测算法性能要明显好于未经TR处理过的检测算法性能。 $SCR \geq -25$ dB时,经过TR处理后的检测算法性能趋于稳定,其统计误差最小, $MAE \approx 0.2$ m,此时产生的统计误差是由采样间隔引起的。未经TR处理但经CT处理的检测算法在 $SCR \geq -12$ dB时,具有较好的目标检测性能,统计误差 $MAE \approx 0.6$ m,此时产生的统计误差主要是由于多径的干扰引起的。由于多径的干扰和CT门限因子选择不恰当,可能导致CT算法检测到的目标并不是真正的目标,从而带来一定的误差。在 $SCR \leq -12$ dB时,噪声的影响相对较强,导致CT目标检测算法性能急剧下降,不能适应强杂波环境的需要;相反,TR技术的能量聚焦特性使得目标能量相对增强,更能适应强杂波环境下的目标检测,相比于单纯CT算法可以提升约13dB的抗杂波性能。未经TR处理但经MES处理的检测算法在 $SCR \geq -18$ dB的环境下性能趋于稳定,统计误差最大, $MAE \approx 1.8$ m。此时误差主要是由于检测算法本身的缺陷引起的,室外环境下目标位置的能量并不一定是最强的,选择此种算法检测到的为多路径信号,从而产生一定的误差。 $SCR \leq -20$ dB时,杂波影响较为严重,加之杂波的随机性,使得未采用TR处理的检测算法由于检测不到正确的目标信号而引起统计误差急剧增大。

综上分析可以看出,采用TR技术处理后的目标检测算法,具有良好的抗多径性能,在多径、杂波共存的环

境下可以间接提高约 10 dB 的抗杂波性能。因此,将 TR 技术用于 LFM CW 雷达目标检测中,不仅可以抑制多路径的影响,而且检测算法简单,更易实现,具有一定的有效性和适用性。

4 结论

复杂的环境下,杂波和多径的存在严重影响了 LFM CW 雷达目标检测性能。文章在分析多路径影响目标检测性能的基础上,将 TR 技术运用到 LFM CW 雷达信号处理中,并定性分析了运用的可行性和产生的检测效果,最后通过仿真结果证明了 TR 技术运用到 LFM CW 雷达目标检测中的有效性和适用性。下一步本文将主要围绕实测数据展开对 TR 技术的运用以及 LFM CW 雷达后续的数据处理算法的研究。

参考文献:

- [1] 张琳. 线性调频连续波雷达信号处理技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2003. (ZHANG Lin. A signal processing method of LFM CW radar[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2003.)
- [2] 赵龙龙,邓伟,生雪莉,等. 基于声压时间反转镜的水下目标被动定位技术[J]. 声学技术, 2010,29(2):224-227. (ZHAO Longlong, DENG Wei, SHENG Xueli, et al. Passive underwater positioning based on pressure time reversal mirror[J]. Technical Acoustics, 2010,29(2):224-227.)
- [3] 殷敬伟,惠俊英. 时间反转镜分类研究及其在水声通信中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008,20(9):2449-2453. (YIN Jingwei, HUI Junying. Classified study on Time Reverse mirror in underwater acoustic communication[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(9):2449-2453.)
- [4] 陆铭慧,张碧星,汪承灏. 时间反转法在水下通信中的应用[J]. 声学学报, 2005,30(4):349-354. (LU Minghui, ZHANG Bixing, WANG Chenghao. Application of time reversal in underwater communication[J]. ACTA ACUSTICA, 2005,30(4):349-354.)
- [5] 蒋艳英,欧阳缙,晋良念,等. 时间反转在 UWB-MIMO 雷达中的应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2013,33(3):173-176. (JIANG Yanying, OUYANG Shan, JIN Liangnian, et al. Time reversal detection in UWB multiple-input multiple-output radar[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2013,33(3):173-176.)
- [6] 刘泽龙,雷鹏正,刘文彦,等. 基于 LFM CW 雷达测距的改进频域 CFAR 算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(6):707-712. (LIU Zelong, LEI Pengzheng, LIU Wenyan, et al. An improved CFAR algorithm in frequency domain based on LFM CW radar for ranging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):707-712.)
- [7] 刘泽龙,刘文彦,丁宏,等. UWB 密集多路径下基于检测概率差值最大的 TOA 估计方法[J]. 信号处理, 2012,28(8): 1120-1126. (LIU Zelong, LIU Wenyan, DING Hong, et al. A novel probability of detection difference maximum-based TOA estimation method in UWB dense multipath channels[J]. Signal Processing, 2012,28(8):1120-1126.)
- [8] Ismail Guvenc, Sahin Iglu Z. Threshold-based TOA estimation for impulse radio UWB systems[C]// Ultra-Wideband, 2005. ICU 2005. 2005 IEEE International Conference on. [S.l.]:IEEE, 2006:420-425.
- [9] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume II: Detection Theory[M]. [S.l.]:Prentice Hall PTR, 2006.

作者简介:



刘泽龙(1988-),男,河南省邓州市人,硕士,工程师,主要从事无线通信和超宽带信号处理方面的工作。email:mcz_zzhp@sina.com.

杨威(1974-),男,陕西省户县人,工程师,主要从事通信总体技术方面的研究工作。

苗楠楠(1985-),女,河南省泌阳市人,助理工程师,主要从事通信系统研究方面的工作。

曹新贞(1980-),女,河南省新乡市人,工程师,主要从事无线通信技术方面的研究工作。