

文章编号: 2095-4980(2019)06-0954-05

## 基于改进波形太赫兹雷达的多目标检测

江 锋, 李跃华, 刘国庆

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 太赫兹雷达在测点目标时具有极高的分辨力。然而在多目标条件下, 使用经典的线性调频波形调制可能会引起错误的差频组合, 从而出现虚假目标。为此, 提出一种工作在 0.22 THz 频段的改进波形, 它由梯形波与三角波两部分组成。通过梯形波的上、下扫频计算速度-距离的模糊范围, 并通过恒频段检测目标的相对速度。由于速度-距离交叉点的不匹配, 虚假目标仍存在, 而后续的不同调频斜率的三角波则能在其基础上完全剔除虚假目标。文中给出了这种体制的太赫兹雷达系统的架构, 并通过近乎现实的仿真, 证明在这种新型波形体制下, 太赫兹雷达差频配对的准确度将得到大幅度提升。

**关键词:** 太赫兹; 梯形波; 三角波; 线性调频; 多目标检测

**中图分类号:** TN958.94

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201906.0954

## Multi-target detection of terahertz radar based on improved waveform

JIANG Feng, LI Yuehua, LIU Guoqing

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Terahertz radar has extremely high resolution when measuring single targets. However, under multi-target conditions, the use of classical chirp waveform modulation may result in false difference frequency combinations, thus creating ghost targets. Aiming at this problem, a design scheme of multi-target detection for terahertz radar with improved waveform working at 0.22 THz is proposed. It consists of two parts: trapezoidal wave and triangular wave. The speed-distance blur range is calculated by the upper and lower sweep of the trapezoidal wave, and the relative speed of the target is detected by the constant frequency band. Nevertheless, the ghost target still exists owing to the mismatch of the velocity-distance intersection. The subsequent triangular waves with different frequency modulation slopes can help completely eliminate the ghost target. The architecture of the terahertz radar system is given in this paper, and through the near-realistic simulation, it is proved that the accuracy of terahertz radar for difference frequency pairing will be greatly improved under this new waveform system.

**Keywords:** terahertz; trapezoidal modulation; triangular wave; linear frequency modulation; multi-target detection

太赫兹(THz)信号在频率低端与亚毫米波频段重合, 在频率高端则与红外重合, 具有很多独特的性质<sup>[1]</sup>。由于太赫兹波的波长远小于微波, 因此它具有更高的分辨力。其次, 由于太赫兹波的波长短, 其多普勒效应比微波波段更为显著, 这样有利于低速运动目标在复杂环境下的检测。在军事上, 由于战场环境形势多变, 一般的雷达很容易受到敌方干扰, 而太赫兹雷达避开了传统雷达的微波波段, 具有很好的抗干扰能力<sup>[2]</sup>。这些特点使得太赫兹雷达具有巨大的应用前景, 日益受广大研究者重视。

线性调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFM CW)体制雷达由于是全占空比工作, 平均发射功率较低, 抗干扰能力强, 其扩谱容易, 因此容易实现高距离分辨, 不存在距离盲区, 特别适用于近距离探测<sup>[3-4]</sup>。由于太赫兹波本身具有极大带宽, LFM CW 太赫兹雷达结合了太赫兹大带宽和 LFM CW 雷达距离分辨力高的特点, 可以获得极高的距离分辨力<sup>[5-6]</sup>。目前 LFM CW 雷达发射波形广泛采用锯齿波调制和对称三角波调制方式。锯齿波调频是最原始的一种调频方式, 它的信号处理比较方便, 但会产生严重的距离-速度耦合现象<sup>[7-8]</sup>;

根据改进后的波形, 如果有  $n$  个目标, 则每个目标都可以得到 3 个不同上、下扫频段的差拍信号和一个恒定频率段的差拍信号。如果只提取每个目标的上扫频差拍信号和恒定频率段差拍信号, 则有:

$$\begin{cases} f_{A,b,c,1} = f_2 \frac{2v_1}{c}, f_{A,b,c,2} = f_2 \frac{2v_2}{c}, \dots, f_{A,b,c,n-1} = f_2 \frac{2v_{n-1}}{c}, f_{A,b,c,n} = f_2 \frac{2v_n}{c} \\ \left[ \begin{array}{ll} f_{A,b,up,1} = \mu_A \frac{2R_1}{c} - f_2 \frac{2v_1}{c} & f_{B,b,up,1} = \mu_B \frac{2R_1}{c} - f_2 \frac{2v_1}{c} \\ f_{A,b,up,2} = \mu_A \frac{2R_2}{c} - f_2 \frac{2v_2}{c} & f_{B,b,up,2} = \mu_B \frac{2R_2}{c} - f_2 \frac{2v_2}{c} \\ \vdots & \vdots \\ f_{A,b,up,n} = \mu_A \frac{2R_n}{c} - f_2 \frac{2v_n}{c} & f_{B,b,up,n} = \mu_B \frac{2R_n}{c} - f_2 \frac{2v_n}{c} \end{array} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_{A,b,up,n}$  为第  $i$  个目标在  $A$  段信号上扫频阶段引起的差频信号;  $f_{A,b,c,n}$  为第  $i$  个目标在  $A$  段信号恒频阶段引起的差频信号;  $f_{B,b,up,n}$  为第  $i$  个目标在  $B$  段信号上扫频阶段引起的差频信号;  $\mu_A, \mu_B$  为 2 段信号的调频斜率;  $c$  为电磁波传播速度;  $v_n$  为径向速度;  $R_n$  为径向距离。假定在恒定频率段上目标与差拍信号一一对应,但在上扫频段中,差拍信号不一定能与目标一一对应,故需用未知数  $i, j, k (i, j, k \in [1, n])$  表示与差拍信号对应的目标。无论调频斜率  $\mu$  怎么变化,运动目标的径向距离和径向速度都为常量,不会随它的变化而变化。把  $f_{A,b,c,1}$  代入所有目标的 3 个不同调频斜率的上扫频差拍信号表达式,可得到式(2):

$$\begin{bmatrix} R_i \\ R_j \\ \vdots \\ R_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(f_{A,b,up,1} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_A} & \frac{(f_{B,b,up,1} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_B} \\ \frac{(f_{A,b,up,2} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_A} & \frac{(f_{B,b,up,2} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_B} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(f_{A,b,up,3} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_A} & \frac{(f_{B,b,up,3} + f_{A,b,c,1})c}{2\mu_B} \end{bmatrix} \quad (2)$$

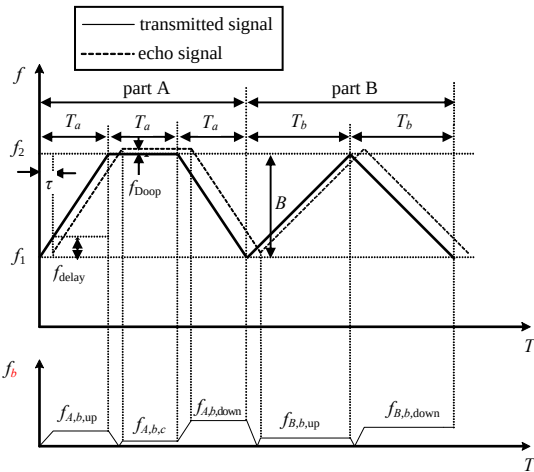


Fig.2 Improved waveform transmitting, receiving, and beat signals  
图 2 改进波形发射、接收以及差拍信号

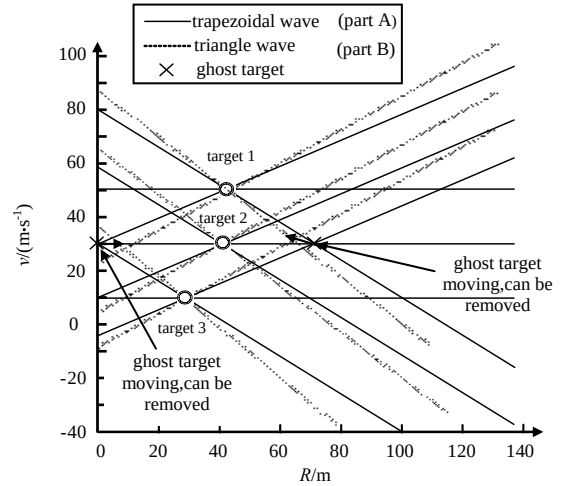


Fig.3 Real target after improving the waveform  
图 3 改进波形后得到的真实目标

从中选出 2 个值都相等的一行,这个值就是径向速度为  $v_n$  的运动目标所对应的径向距离  $R_n$ 。将这个结果与由下扫频段差拍信号得出的结果联合推导后,可以得到每个速度为  $v_n$  的运动目标对应的距离。

在距离—速度坐标系里,这种关系将变得更加一目了然。如图 3 所示,实际的目标径向距离与径向速度与波形的调频斜率没有关系,而虚假目标的径向距离和径向速度的测量值则随调频斜率的变化而变化,虚假目标在不同调频斜率的波形测量中必然会得到不同的径向速度和径向距离值。但对于真实目标,在不同的调频情况下都应该得到同样的径向距离和径向速度值<sup>[15]</sup>。

### 3 仿真分析

算法使用 Matlab 进行仿真,发射信号的带宽为 10 GHz,载波中心频率为 220 GHz,梯形波的单个扫频段时

长为 0.8 ms, 三角波的单个扫频段时长为 1 ms。所有目标均沿雷达与目标的径向方向移动(接近雷达方向速度为正), 表 1 给出了每个目标的参数。

表 1 目标的参数  
Table1 Target parameters

|          | $R/\text{m}$ | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |           | $R/\text{m}$ | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|----------|--------------|----------------------------------|-----------|--------------|----------------------------------|
| target 1 | 21           | 1 300                            | target 6  | 44           | -990                             |
| target 2 | 67           | 1 110                            | target 7  | 56           | -800                             |
| target 3 | 50           | 1 000                            | target 8  | 28           | 850                              |
| target 4 | 37           | -920                             | target 9  | 15           | 800                              |
| target 5 | 9            | 930                              | target 10 | 61           | -1 200                           |

为更贴近多目标情况下复杂的实际环境, 仿真时在回波上叠加了方差为 4 的高斯白噪声, 相较于理想情况下, 识别会存在一定的偏差。仿真中设定的速度阈值为 $-2\sim 2\text{ m/s}$ , 即在此范围内均判定为疑似目标。由于梯形波的恒频段的差频由多普勒效应引起, 因此通过恒频段的差频能快速锁定这 10 个目标移动速度。给定目标速度的测量范围为 $-1\,300\sim 1\,400\text{ m/s}$ , 同理, 给定目标距离的范围为 $5\sim 80\text{ m}$ , 图 4 中的直线表示根据仿真得到的各个目标的速度, 在通过梯形波调制识别以后, 某些速度上会出现虚假目标, 图 4 中箭头所指的均为虚假目标, 数量总计为 9 个, 这显然很难达到要求。

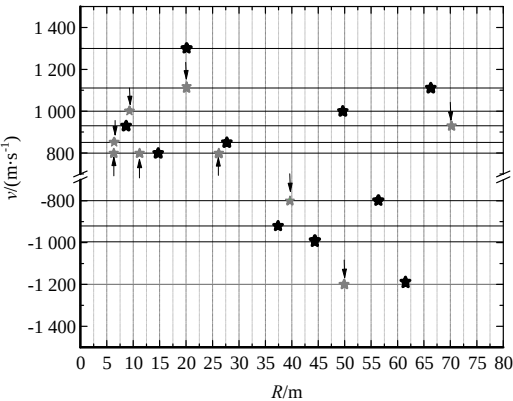


Fig.4 Results of trapezoidal wave recognition  
图 4 梯形波形识别结果

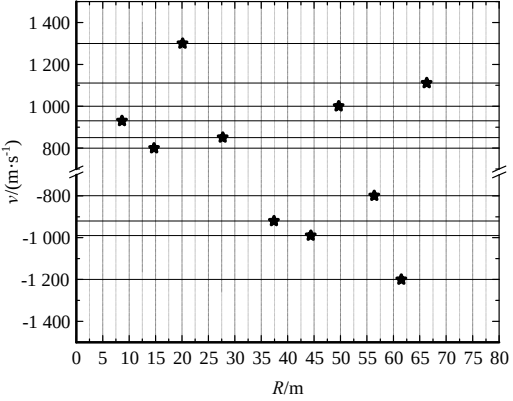


Fig.5 Results of improved waveform recognition  
图 5 改进波形识别结果

在改进波形情况下, 即相对于传统梯形波调制增加了三角波的调制部分, 使得原有阈值内虚假目标偏移, 如图 5 所示, 10 个真实目标均被一一检测到, 而且虚假目标均被清除。仿真结果表明该方法在理论上对多目标的识别切实可行。

4 结论

线性调频连续波雷达多目标检测问题一直是阻碍其得到广泛应用的难题。本文提出一种工作在太赫兹波段的改进波形来解决此问题, 它利用梯形波的上、下扫频段来解距离-速度耦合, 利用梯形波的恒频段进行目标谱线配对, 再利用三角波的上、下扫频段对目标精确定位, 有效去除虚假目标。仿真结果证实了该方法可在多目标配对的情况下有效去除虚假目标, 对工程设计方案有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 卢铮,李超,方广有. 调频连续波太赫兹雷达方案研究及系统验证[J]. 电子测量技术, 2015,38(8):58-63. (LU Zheng, LI Chao,FANG Guangyou. Scheme research and system verification of the terahertz LFM CW radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2015,38(8):58-63.)

[2] 梁达川. 太赫兹波雷达与隐身研究[D]. 天津:天津大学, 2017. (LIANG Dachuan. Terahertz wave radar and stealth research[D]. Tianjin,China:Tianjin University, 2017.)

[3] 李兴国,李跃华. 毫米波近感技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009. (LI Xingguo,LI Yuehua. The foundation of millimeter wave proximity technology[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2009.)

- [4] 廖胜宝. 8 mm 波段调频连续波测距引信关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2017. (LIAO Shengbao. A study on key technology of 8 mm band frequency modulation continuous wave distance-detecting fuze[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2017.)
- [5] 周川. 太赫兹 LFMCW 雷达中频接收机的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (ZHOU Chuan. Research and implementation of terahertz LFMCW radar IF receiver[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [6] 付春,潘曦,宋承天. 调频连续波激光与无线电复合探测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):40-45. (FU Chun,PAN Xi,SONG Chengtian. Frequency modulated continuous wave laser and radio compound detecting technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):40-45.)
- [7] 吴礼,彭树生,肖泽龙,等. 一种 LFMCW 雷达距离速度去耦合方法[J]. 现代雷达, 2008,30(11):44-47. (WU Li,PENG Shusheng,XIAO Zelong,et al. A method of range-velocity decoupling for LFMCW radar[J]. Modern Radar, 2008,30(11):44-47.)
- [8] 杨建宇,凌太兵,贺峻. LFMCW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[J]. 电子与信息学报, 2004(2):169-173. (YANG Jianyu,LING Taibing,HE Jun. Moving target detection and range-velocity decoupling of LFMCW radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004(2):169-173.)
- [9] 严鑫. 毫米波雷达多目标检测与参数估计算法研究[D]. 南京:东南大学, 2017. (YAN Xin. Multi-target detection and parameter estimation algorithm for millimeter wave radar[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2017.)
- [10] HYUN E,LEE J. A method for multi-target range and velocity detection in automotive FMCW radar[C]// 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. St. Louis,MO,USA:IEEE, 2009:1-5.
- [11] 周贻能. 连续波雷达多目标信号处理方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (ZHOU Yineng. Research on multi-target signal processing method of continuous wave radar[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [12] 张晨,史再峰,郭炜,等. 调频连续波太赫兹雷达近程测距精度提高算法[J]. 传感器与微系统, 2016,35(9):141-143,151. (ZHANG Chen,SHI Zaifeng,GUO Wei,et al. Short-range measurement precision improvement algorithm frequency modulated continuous wave terahertz radar[J]. Sensors and Microsystems, 2016,35(9):141-143,151.)
- [13] 邱于保. 太赫兹雷达发射机和接收机研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015. (QIU Yubao. Research on terahertz radar transmitter and receiver[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2015.)
- [14] 陆威. 毫米波调频连续波雷达机动目标检测与跟踪技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018. (LU Wei. Research on maneuvering target detection and tracking technology of millimeter wave frequency modulated continuous wave radar[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.)
- [15] 薛效龙. 基于梯形波 FMCW 雷达的多目标探测技术的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2014. (XUE Xiaolong. Research on multi-target detection technology based on trapezoidal wave FMCW radar[D]. Hangzhou,China:Hangzhou University of Electronic Technology, 2014.)

#### 作者简介:



江 锋(1995-), 男, 安徽省黄山市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为近程目标的探测与识别、雷达的信号与信息处理 .email: njstjiangfeng@163.com.

李跃华(1959-), 男, 南京市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为探测与目标识别、信号处理与智能化技术.

刘国庆(1995-), 男, 山西省大同市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理.