

文章编号: 2095-4980(2021)02-0210-07

## 基于双曲线调频波形的高速目标成像

范英彪<sup>1</sup>, 张彦<sup>2</sup>, 鲁耀兵<sup>2</sup>, 叶春茂<sup>2</sup>

(1.海装驻北京地区第二代表室, 北京 100854; 2.北京无线电测量研究所, 北京 100854)

**摘要:** 高速运动目标下, 雷达回波的尺度调制效应不可忽略, 线性调频(LFM)波形的常规脉压性能恶化, 造成成像散焦。双曲线调频(HFM)波形作为一种多普勒不变性波形, 在高速目标成像中具有重要应用价值。本文建立高速运动目标回波模型, 基于瞬时频率分析比较线性调频波形与双曲线调频波形面对高速运动目标的成像效果, 重点分析双曲线调频波形的系统实现、成像特点和应用优势, 并与线性调频波形成像进行比较, 数值仿真实验结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 双曲线调频波形; 线性调频波形; 高速运动目标; 脉冲压缩

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019483

## Imaging of high speed targets based on hyperbolic frequency modulated waveform

FAN Yingbiao<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, LU Yaobing<sup>2</sup>, YE Chunmao<sup>2</sup>

(1.Second Representative Office of Naval Equipment in Beijing, Beijing 100854, China;

(2.Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** When the relative velocity between radar and targets is really high, the scale modulation effect of radar echoes is not negligible. The pulse compression of received Linear Frequency Modulated (LFM) echoes is degraded significantly, which causes defocused image of radar systems. Hyperbolic Frequency Modulated(HFM) waveform is of the characteristic of Doppler invariance, and it has a high application value in the imaging of high speed targets. First, the received echoes of high speed moving targets are modeled and the imaging results are compared between LFM and HFM by instantaneous frequency analysis. Then, the system implementation, imaging characteristics and application superiority of HFM echoes from high speed targets are analyzed in detail, and compared with that of LFM method. Finally, numerical results validate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Hyperbolic Frequency Modulated(HFM); Linear Frequency Modulated(LFM); high speed moving target; pulse compression

雷达对远距目标成像需要采用大时宽波形增加有效探测距离, 采用大带宽波形增加距离分辨力, 此时在一个脉宽时间内, 目标运动产生的位移对于雷达分辨力已不可忽视, 称为高速运动目标场景。这种场景下, 线性调频(LFM)雷达的脉压效果下降明显, 出现分裂与展宽, 严重影响雷达的探测和成像<sup>[1-2]</sup>。针对高速运动目标问题, 现阶段多采用回波补偿方法<sup>[3-4]</sup>, 回波补偿方法对于非合作目标的测速精确度有限<sup>[5-6]</sup>, 耗费大量系统资源且处理效果一般, 特别是在同一个距离单元内出现多个速度差异较大的高速目标时, 目标的分割补偿成像更加难以实现, 急需研究一种具有多普勒不变特性的波形, 在不经回波速度补偿的情况下, 仍能够保持成像特性。

双曲线调频(HFM)波形是一种具有多普勒不变性的波形, 适用于远距高速运动目标的探测与成像。目前, 针对双曲线调频波形的研究已经取得一些进展, 包括研究其模糊函数<sup>[7]</sup>、距离分辨力<sup>[8]</sup>、距离速度耦合关系<sup>[9-10]</sup>和 HFM 波形的系统实现方法等<sup>[11-12]</sup>。本文则从瞬时频率分析的角度出发, 比较高速运动目标下 LFM 与 HFM 波形的脉压结果, 重点分析双曲线调频波形的系统实现、成像方法和应用优势, 与线性调频波形成像结果进行比较。

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-01-07

作者简介: 范英彪(1962-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为武器系统总体设计。email:empty165105@sina.com

## 1 高速运动目标回波模型

### 1.1 LFM 回波模型

首先建立高速运动目标的散射点回波模型，令波形到达目标时雷达与目标的径向距离为  $R_0$ ，目标与雷达间径向速度为  $v$ ，远离雷达方向为正，电磁波传播速度为  $c$ ，则目标与雷达间的瞬时距离：

$$R(t) = R_0 - v(R_0/c) + vt \quad (1)$$

设电磁波运动的双程时延为  $\tau(t)$ ，则满足：

$$\frac{c}{2}\tau(t) = R\left(t - \frac{\tau(t)}{2}\right) \quad (2)$$

结合式(1)~式(2)可得：

$$\tau(t) = \frac{2R_0 + v(2R_0/c) + 2vt}{c + v} \quad (3)$$

则运动目标回波为：

$$s_r(t) = \sigma_0 s_0[t - \tau(t)] = \sigma_0 s_0[\alpha(t - \tau_0)] \quad (4)$$

式中： $s_0(t)$ 为发射波形； $\sigma_0$ 为散射点反射系数； $\alpha = \frac{c-v}{c+v}$ 为回波尺度调制因子； $\tau_0 = 2R_0/c$ 为目标静止时的双程时延。

LFM 的发射波形为：

$$s_{0\_LFM}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi\gamma t^2) \exp(j2\pi f_c t) \quad (5)$$

式中： $\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq t \leq T_p/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ， $T_p$ 为脉冲宽度； $\gamma = B/T_p$ 为调频斜率； $f_c$ 为载频。则 LFM 运动目标回波信号表示为：

$$s_{r\_LFM}(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha(t - \tau_0)}{T_p}\right) \exp[j\pi\gamma\alpha^2(t - \tau_0)^2] \exp[j2\pi f_c\alpha(t - \tau_0)] \quad (6)$$

匹配滤波为将回波信号与发射信号求互相关，基于此原理，通过对比分析发射信号与回波信号的瞬时频率曲线，即可得出匹配滤波输出结果。

LFM 发射信号瞬时频率为：

$$f_{\text{inst\_LFM0}}(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial(\pi\gamma t^2 + 2\pi f_c t)}{\partial t} = \gamma t + f_c \quad (7)$$

LFM 运动目标回波信号瞬时频率为：

$$f_{\text{inst\_LFM1}}(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial[\pi\gamma\alpha^2(t - \tau_0)^2 + 2\pi f_c\alpha(t - \tau_0)]}{\partial t} = \gamma\alpha^2(t - \tau_0) + \alpha f_c \quad (8)$$

可以发现 LFM 运动目标回波信号瞬时频率相对于发射信号瞬时频率除了时延与频移外，调频斜率也发生了变化，这造成了匹配滤波输出的一维距离像出现了分裂与展宽。

### 1.2 HFM 回波模型

HFM 的发射波形为：

$$s_{0\_HFM}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left\{j\frac{2\pi}{K} \ln[1 + Kf_0 t]\right\} \quad (9)$$

式中： $f_0 = f_1 f_2 / f_c$ 为参考频率； $B$ 为信号带宽； $f_c$ 为中心频率； $f_1 = f_c - B/2$ 为下限频率； $f_2 = f_c + B/2$ 为上限频率； $K = -B / f_1 f_2 T_p$ 为调频常数。则 HFM 运动目标回波信号为：

$$s_{r\_HFM}(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha(t - \tau_0)}{T_p}\right) \exp\left\{j\frac{2\pi}{K} \ln[1 + Kf_0\alpha(t - \tau_0)]\right\} \quad (10)$$

HFM 发射信号瞬时频率为：

$$f_{\text{inst\_HFMO}} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial \{(2\pi/K) \ln[1 + Kf_0 t]\}}{\partial t} = \frac{f_0}{1 + Kf_0 t} \quad (11)$$

当  $t = -T_p/2$  时  $f_{\text{inst\_HFMO}} = \frac{f_0}{1 + Kf_0(-T_p/2)} = f_1$  为下限频率, 当  $t = T_p/2$  时  $f_{\text{inst\_HFMO}} = \frac{f_0}{1 + Kf_0(T_p/2)} = f_2$  为上限频率。

HFM 运动目标回波信号瞬时频率为:

$$f_{\text{inst\_HFMI}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \{(2\pi/K) \ln[1 + Kf_0 \alpha(t - \tau_0)]\}}{\partial t} = \frac{\alpha f_0}{1 + \alpha Kf_0(t - \tau_0)} \quad (12)$$

可以进一步转化为:

$$f_{\text{inst\_HFMI}} = \frac{f_0}{1 + Kf_0(t - \tau_0 - \tau_1)} \quad (13)$$

其中  $\tau_1 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \frac{1}{Kf_0}$  为目标运动速度产生的时延, HFM 回波瞬时频率中只有  $\tau_1$  与速度  $v$  有关, 即:

$$f_{\text{inst\_HFMI}}(t) = f_{\text{inst\_HFMO}}(t - \tau_0 - \tau_1) \quad (14)$$

可以发现 HFM 波形下运动目标回波信号瞬时频率仅为发射信号的时延, 这成就了 HFM 波形独特的多普勒不变性, 即匀速运动目标回波的脉压输出不会出现分裂与展宽。

通过对 LFM 与 HFM 波形高速运动目标散射点回波模型的分析, 可以进一步得到宽带模糊函数:

$$\chi(\tau, \alpha) = \sqrt{\alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*[\alpha(t - \tau)] dt \quad (15)$$

分别画出 LFM 与 HFM 宽带模糊函数的等高线图, 如图 1 所示。图 1(a) 为 LFM 宽带模糊函数图, 图 1(b) 为 HFM 宽带模糊函数图。可以看出 LFM 与 HFM 波形均存在距离速度耦合, 在速度偏离较大时, LFM 模糊函数发散明显, 体现在一维距离像中即为散射点分裂与展宽, HFM 模糊函数没有出现发散现象, 具有多普勒不变性。

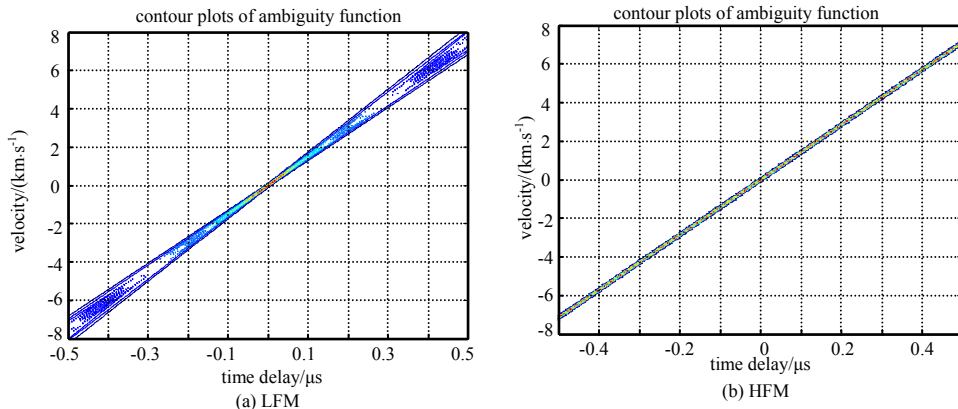


Fig.1 Contour plots of ambiguity function  
图 1 模糊函数等高线

## 2 去斜回波的解调频接收

### 2.1 LFM 去斜接收

去斜成像是一种针对大时宽带宽积 LFM 信号的脉压成像方法, 通过将回波信号与发射信号进行混频处理, 再经过低通滤波器得到基带信号后经过傅里叶变换得到目标的高分辨一维距离像。这种成像处理方法可极大地减小采样频率, 从而降低模数转换器的需求, 减少信号处理时间。

LFM 去斜成像参考信号为:

$$s_{\text{ref\_LFM}}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}}}\right) \exp\left[j\pi\gamma(t - \tau_{\text{ref}})^2\right] \exp\left[j2\pi f_c(t - \tau_{\text{ref}})\right] \quad (16)$$

式中:  $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$  为参考目标位置双程时延;  $R_{\text{ref}}$  为参考目标位置。去斜混频结果为:

$$s_{\text{d\_LFM}}(t) = s_{r\_LFM}(t) s_{\text{ref\_LFM}}^*(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha(t - \tau_0)}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}}}\right) \exp\left\{j\pi\gamma\left[\alpha^2(t - \tau_0)^2 - (t - \tau_{\text{ref}})^2\right]\right\} \exp\left\{j2\pi f_c\left[\alpha(t - \tau_0) - (t - \tau_{\text{ref}})\right]\right\} \quad (17)$$

提取其相位信息为：

$$\varphi_{d\_LFM}(t) = \pi\gamma(\alpha^2 - 1)t^2 + 2\pi\gamma(-\alpha^2\tau_0 + \tau_{ref})t + 2\pi f_c(\alpha - 1)t + \pi\gamma(\alpha^2\tau_0^2 - \tau_{ref}^2) + 2\pi f_c(-\alpha\tau_0 + \tau_{ref}) \quad (18)$$

对其中的零次相位项进行补偿，二次相位项进行忽略后，求傅里叶变换可得高分辨一维距离像，一次项瞬时频率为：

$$f_{hd\_LFM} = \gamma(-\alpha^2\tau_0 + \tau_{ref}) + f_c(\alpha - 1) \leq \gamma \frac{r_{de}}{c} \quad (19)$$

式中  $r_{de}$  为散射点到参考目标位置的最远距离。

去斜接收信号带宽为：

$$B_{d\_LFM} = 2|f_{hd\_LFM}(t)| = \frac{B}{T_p} \times \frac{2r_{de}}{c} \quad (20)$$

根据跟踪需求设计接收机带宽为  $B_{rec}$ ，去斜成像场景宽度为：

$$R_{img\_LFM} = \frac{B_{rec}}{B} \times \frac{c}{2} T_p \quad (21)$$

## 2.2 HFM 解调频接收

仿照 LFM 去斜成像方法，对 HFM 波形提出了类似的解调处理与成像方法。HFM 去斜成像参考信号为：

$$s_{ref\_HFM}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{ref}}{T_{ref}}\right) \exp\left\{j \frac{2\pi}{K} \ln[1 + Kf_0(t - \tau_{ref})]\right\} \quad (22)$$

根据 1.2 节瞬时频率分析，HFM 运动目标回波信号可进一步表示为：

$$s_r\_HFM(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha(t - \tau_0)}{T_p}\right) \exp\left\{j \frac{2\pi}{K} \ln[1 + Kf_0(t - \tau_0 - \tau_1)]\right\} \exp\left\{j \frac{2\pi}{K} \ln \alpha\right\} \quad (23)$$

混频结果为：

$$s_{d\_HFM}(t) = s_r\_HFM(t) s_{ref\_HFM}^*(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha(t - \tau_0)}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{ref}}{T_{ref}}\right) \exp\left\{j \frac{2\pi}{K} \ln\left[1 + \frac{Kf_0[-\tau_0 - \tau_1 + \tau_{ref}]}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})}\right]\right\} \exp\left\{j \frac{2\pi}{K} \ln \alpha\right\} \quad (24)$$

提取其相位信息为：

$$\varphi_{d\_HFM}(t) = \frac{2\pi}{K} \ln\left[1 + \frac{Kf_0\tau_{de}}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})}\right] + \frac{2\pi}{K} \ln \alpha \quad (25)$$

式中  $\tau_{de} = \tau_{ref} - \tau_0 - \tau_1$  为相对时延，为了进一步得到 HFM 回波一维距离像，可对此相位信息麦克劳林展开：

$$\varphi_{d\_HFM}(t) = \frac{2\pi}{K} \ln \alpha + \frac{2\pi}{K} \left\{ \frac{Kf_0\tau_{de}}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})} - \frac{1}{2} \left[ \frac{Kf_0\tau_{de}}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})} \right]^2 + O\left(\frac{Kf_0\tau_{de}}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})}\right)^3 \right\} \quad (26)$$

忽略高次项影响分析得：

$$\varphi_{d\_HFM}(t) \approx \frac{2\pi}{K} \ln \alpha + \frac{2\pi f_0 \tau_{de}}{1 + Kf_0(t - \tau_{ref})} \quad (27)$$

一次项瞬时频率为：

$$f_{hd\_HFM}(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial \varphi_{d\_HFM}(t)}{\partial t} = \frac{Kf_0^2 \tau_{de}}{[1 + Kf_0(t - \tau_{ref})]^2} \leq \frac{r_{de}}{c} \frac{Kf_0^2}{(1 + Kf_0 T_p / 2)^2} \quad (28)$$

式中  $r_{de}$  为散射点到参考目标位置的最远距离。

去斜接收信号带宽为：

$$B_{d\_HFM} = 2|f_{hd\_HFM}(t)| = \frac{2r_{de}}{c} \times \frac{Kf_0^2}{(1 + Kf_0 T_p / 2)^2} \quad (29)$$

根据跟踪需求设计接收机带宽为  $B_{rec}$ ，则去斜成像场景宽度为：

$$R_{img\_HFM} = \frac{c}{2} \times \frac{B_{rec} (1 + Kf_0 T_p / 2)^2}{Kf_0^2} \quad (30)$$

可以发现，HFM 波形可同样应用于现有宽带去斜体制雷达，具有良好的系统实现能力与应用价值。

### 3 数值仿真分析

为了更好地验证双曲线调频波形多普勒不变性带来的良好的高速目标成像效果，将 HFM 与 LFM 波形比较设计 3 组仿真实验：一是设置具有同一速度的单散射点目标，通过峰值旁瓣比(Peak Side-lobe Level Ratio, PSLR)比较 2 种波形一维距离像峰值下降情况，画出峰值幅度、展宽随运动速度变化的曲线；二是设置具有同一速度的多散射点目标，通过信息熵评价 2 种波形距离像成像效果；三是设置 2 个具有不同速度的多散射点目标，比较经过速度补偿时 2 种波形距离像成像效果，具体参数设置与仿真结果如下。

#### 3.1 仿真实验 1

设定 HFM 与 LFM 具有相同的波形参数，波形中心频率  $f_c = 3 \text{ GHz}$ ，带宽  $B = 300 \text{ MHz}$ ，脉宽  $T_p = 1 \text{ ms}$ ；目标具有单个散射点，散射点截面(Radar Cross Section RCS)设为  $\sigma = 1 \text{ m}^2$ ，分别设定目标匀速运动速度为  $v_0 = 0 \text{ m/s}$ ， $v_1 = 500 \text{ m/s}$ ， $v_2 = 1500 \text{ m/s}$ ，仿真结果如图 2 所示。

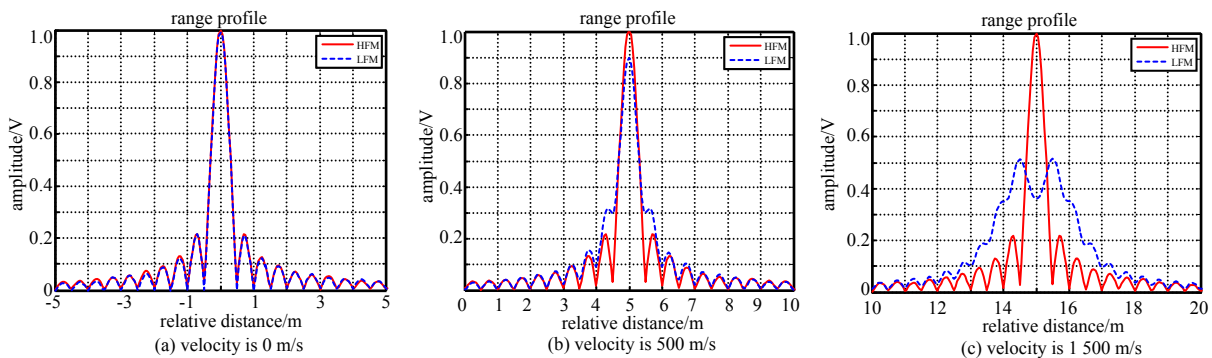


Fig.2 Range profile of single scattering point  
图 2 单散射点一维距离像

引入峰值旁瓣比评价两种波形一维距离像峰值下降情况，峰值旁瓣比定义为：

$$PSLR = 10 \lg \left( P_{\text{peak}} / P_{\text{sidelobe}} \right) \tag{31}$$

式中： $P_{\text{peak}}$  为一维距离像峰值功率； $P_{\text{sidelobe}}$  为一维距离像第一旁瓣功率。

图 2(a)中，目标静止，此时 LFM 与 HFM 回波距离像重合，LFM 与 HFM 的 PSLR 均为 13.26 dB，符合理论值；图 2(b)中，目标匀速运动速度为 500 m/s，LFM 的 PSLR 下降为 9.01 dB，HFM 的 PSLR 仍为 13.26 dB，LFM 散射点展宽而 HFM 无变化；图 2(c)中，目标匀速运动速度为 1500 m/s，LFM 散射点分裂而 HFM 无变化。

进一步研究 2 种波形一维距离像峰值幅度、展宽与目标运动速度的关系，定义一维距离像展宽为峰值幅度下降 3 dB 处对应的成像宽度。不同运动速度下，目标一维距离像的峰值幅度变化曲线如图 3(a)所示，展宽曲线如图 3(b)所示。

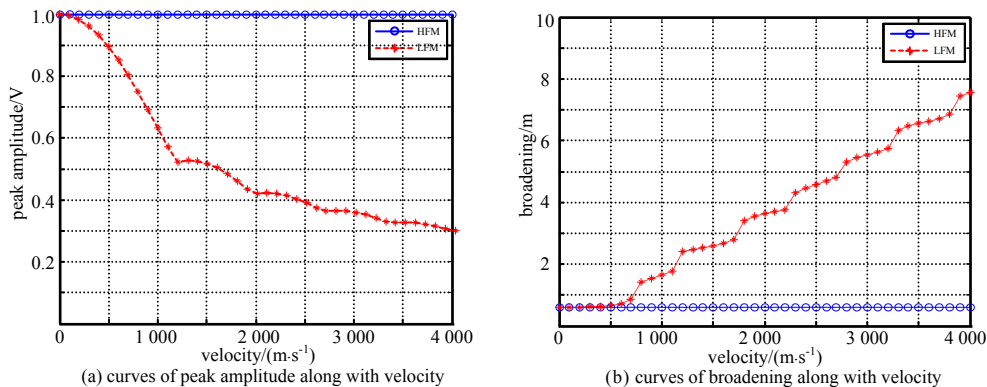


Fig.3 Curves of peak amplitude and broadening along with velocity  
图 3 一维距离像峰值幅度与展宽随速度变化曲线

发现在 LFM 波形下，目标一维距离像峰值幅度随速度增大而降低，展宽随速度增大而增大，对雷达探测与成像不利；HFM 波形下，目标一维距离像峰值幅度与展宽不随速度改变，具有多普勒不变性，即在经过速度补偿处理时仍能有很好的高速目标成像效果。

### 3.2 仿真实验 2

波形仿真参数如仿真实验 1，目标具有 5 个散射点，散射点 RCS 设为  $\sigma = [0.2 \ 0.7 \ 1 \ 0.6 \ 0.9] \text{m}^2$ ，设定目标匀速运动速度为  $v_2 = 1500 \text{ m/s}$ ，仿真结果如图 4 所示。

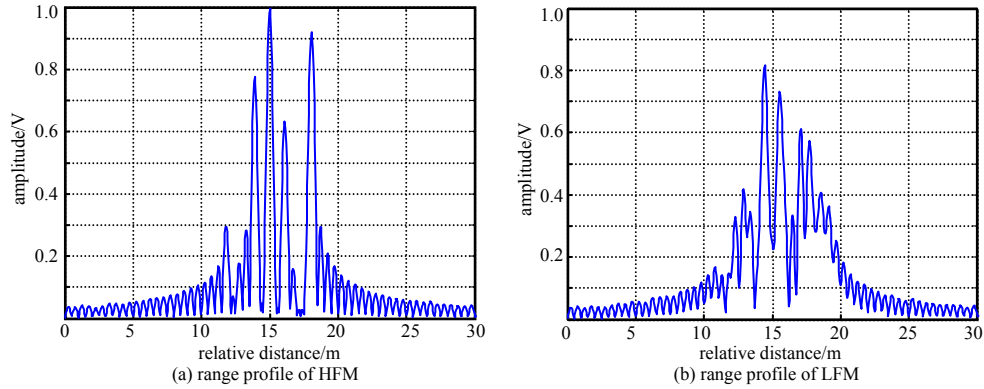


Fig.4 Range profile of multiple scattering points

图 4 多散射点一维距离像

引入信息熵评价 2 种波形一维距离像成像效果，信息熵定义为：

$$H(x) = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (32)$$

式中： $P(x)$  为采样点幅值； $N$  为图像窗口内采样点数。

目标匀速运动速度为  $1500 \text{ m/s}$ ，图 4(a) 中，HFM 一维距离像的熵值为  $1.2481 \text{ bit}$ ，图 4(b) 中，LFM 一维距离像的熵值为  $1.4916 \text{ bit}$ ，熵值越大图像成像效果越差，与观察结果一致。仿真实验通过信息熵证明 HFM 具有良好的高速目标成像效果，而 LFM 面对高速运动场景，成像性能恶化。

### 3.3 仿真实验 3

波形参数如仿真实验 1，目标参数如仿真实验 2，设定在同一个距离单元内 2 个目标具有相反的运动速度，分别设定目标匀速运动速度为  $v_1 = 2000 \text{ m/s}$ ， $v_2 = -2000 \text{ m/s}$ ，仿真结果如图 5 所示。

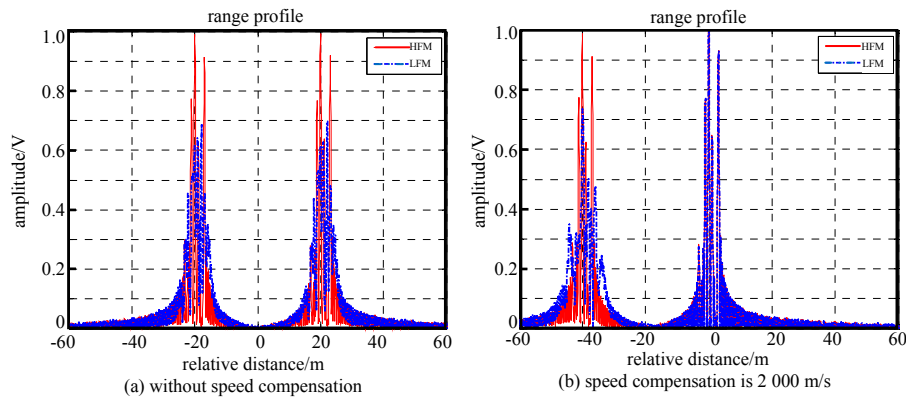


Fig.5 Range profile of multiple targets

图 5 多目标一维距离像

图 5(a) 中，目标匀速运动速度为  $2000 \text{ m/s}$ ，LFM 距离像的熵值为  $1.5233 \text{ bit}$ ，HFM 距离像的熵值为  $1.2464 \text{ bit}$ ，熵值越大图像成像效果越差；图 5(b) 中，没有经过目标的分割处理，直接对 LFM 回波进行精确的速度补偿，发现其中一个目标在正确的速度补偿后拥有良好的成像效果，与 HFM 成像效果一致，而另一个目标则在相反的速度补偿下展宽更为严重，想要对一个距离单元内回波补偿不同的速度，需经过目标分割处理，处理过程复杂且效果一般。HFM 回波不经过速度补偿即可同时获得不同速度目标的无展宽一维距离像，这种多普勒不变性在复杂场景下更具有实用价值。

## 4 结论

目标的高速运动对雷达成像带来了不利的影响,常用的线性调频波形脉压输出不仅存在幅度下降,并伴随着分裂与展宽。本文从波形设计的角度出发,研究了双曲线调频波形特有的多普勒不变性,针对远距离高速运动目标进行了成像方法的研究,并与线性调频波形进行成像效果的比较分析,仿真验证了双曲线调频波形良好的高速目标成像效果。接下来可进一步研究大时宽带宽积的双曲线调频波形产生与特征提取方法,研究其面对杂波与干扰时的特性与处理方法。

### 参考文献:

- [1] LIN Lanjin, CHENG Ziyang, HE Zishu. Analysis of effect of velocity compensation error on extended target detection in distributed high-speed moving platforms[C]// 14th IEEE International Conference on Signal Processing(ICSPI). Beijing:IEEE, 2018:893-897.
- [2] PANG Cunsuo, LIU Shengheng, HAN Yan. High-speed target detection algorithm based on sparse Fourier transform[J]. IEEE Access, 2018,6(1):37828-37836.
- [3] 徐丹,符吉祥,孙光才,等. 宽带弹道高速群目标运动精补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019,41(10):2205-2213. (XU Dan, FU Jixiang, SUN Guangcai, et al. Accurate wide band high velocity motion compensation for ballistic targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019,41(10):2205-2213.)
- [4] ZHOU Xinpeng, WEI Guohua, WANG Dawei, et al. ISAR imaging of high-speed moving targets in short-range using impulse radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015,26(5):964-972.
- [5] WANG Zhao, WANG Pengyi, SU Weimin, et al. Motion compensation method for high speed target based on space-time-frequency joint processing[C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Xiamen, China:IEEE, 2017:1-5.
- [6] 孙艳丽,陈小龙,柳叶. 雷达动目标变换域相参积累检测及性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):457-461. (SUN Yanli, CHEN Xiaolong, LIU Ye. Detection and performance analysis of radar coherent integration for moving target in transform domain[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):457-461.)
- [7] BALLERI A, FARINA A. Ambiguity function and accuracy of the hyperbolic chirp: comparison with the linear chirp[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2017,11(1):142-153.
- [8] SALMAN R T. Envelope modification of the hyperbolic frequency modulated signal with LC-filters in order to have a better range resolution in radar systems[C]// International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Chennai, India: [s.n.], 2018:105-108.
- [9] MURRAY J J. On the Doppler bias of hyperbolic frequency modulation matched filter time of arrival estimates[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018:1-5.
- [10] SONG Xiufeng, WILLETT P, ZHOU Shengli. Range bias modeling for hyperbolic-frequency modulated waveforms in target tracking[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012,37(4):670-679.
- [11] 周伟,叶春茂,金侃,等. 雷达目标双曲线调频回波生成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015,55(8):878-883. (ZHOU Wei, YE Chunmao, JIN Kan, et al. Radar echo generation for hyperbolic frequency modulation waveforms[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2015,55(8):878-883.)
- [12] ZHOU Wei, YE Chunmao, JIN Kan, et al. ISAR imaging based on the wideband hyperbolic frequency-modulation waveform[J]. Sensors, 2015(15):23188-23204.