

高速运动目标的瞬时距离-多普勒成像

张义安,尹治平,王东进,陈卫东

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,安徽合肥 230027)

摘要:首先建立高速运动目标宽带雷达回波模型,分析了高速运动对目标一维距离像的影响,针对其回波是调频斜率相同的多分量 LFM 信号的特点,提出利用自适应短时傅立叶变换的方法获得一维瞬时距离像,消除了高速运动目标距离压缩中的色散效应,经过运动补偿和横向分辨,最终获得目标清晰的二维像。和传统速度补偿方法相比,有效减小了运算量,仿真证明了该方法的有效性。

关键词:高速目标逆合成孔径雷达成像;瞬时距离像;短时傅立叶变换

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A

Instant range-Doppler imaging of high speed targets

ZHANG Yi-an, YIN Zhi-ping, WANG Dong-jin, CHEN Wei-dong

(Dept. of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A target echo model illuminated by wideband linear frequency modulated radar signal was established and the effect of high speed on the target echoes was analyzed. Regarding the characteristic of high speed target echo which consisted of multi-component LFM signal with the same chirp rates, a method based on instant range profile using adaptive STFT was presented. After motion compensation and Fourier analysis in the cross range, a two-dimensional (2D) image would be achieved finally. The proposed method solves the problem of range dispersion of the dechirped echo caused by high-speed and reduces the computation effectively, as demonstrated by computer simulation results.

Key words: ISAR imaging of high speed target; instant range profile; STFT

0 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)成像的基本方法是距离-多普勒法^[1],纵向距离分辨依靠宽带信号,横向分辨依靠回波的多普勒频率^[2]。传统 ISAR 目标回波分析一般基于“stop and go”模式,即假设目标在脉冲持续期间的运动相对于距离分辨单元可以被忽略,在此假设条件下,解线频调处理后信号散射点子回波近似为单频信号。随着 ISAR 分辨率的提高和被探测目标范围的扩展,近年来出现了对空间轨道

目标和弹道目标进行高分辨成像的需求^[3],这类目标的运动速度很高,它们在脉冲持续期间的径向运动距离与距离分辨单元大小可比拟,因此解线频调混频输出不再是单频分量,而是调频斜率相同的多分量 LFM 信号,此时在频域获得的距离像将产生畸变,进而引起 ISAR 二维图像的模糊。

针对上述情况,国内外一些文献提出了基于速度补偿思路的解决方法^[4,5],其中文献[4]提到了使用 RAT,RELAX 方法估计混频输出信号的调频斜率,文献[5]提出使用谱包络最小熵准则估计线性调

频信号参数,这些方法的共同点是:通过估计混频输出信号的调频斜率获得目标径向运动速度估计值,然后用该估计值构造补偿信号对输出信号进行补偿,以消除高速运动带来的影响,补偿后的信号等效为目标低速运动时的混频输出,此时使用经典解线频调处理就能够实现目标高分辨成像。

不同于以上方法,本文提出一种瞬时距离-多普勒(IRD)的思路:和距离-瞬时多普勒成像方法(RID)^[6]不同,这里用时频分析代替传统的傅立叶变换来对每次回波进行处理,取各次脉冲时频分布同一采样点时刻的切片,把这些切片排列在一起,得到目标各次回波的瞬时距离像,然后经过运动补偿,再对同一距离单元做横向多普勒分析,最终得到目标二维像。仿真实验表明,该方法消除了高速运动带来的距离色散效应,并有效降低了运算量。

1 高速运动目标回波模型

在 ISAR 成像中,普遍采用的是基于解线频调处理的线性调频信号波形。设发射宽带线性调频信号的中心频率为 f_c ,脉冲宽度为 T_p ,带宽为 B ,重复周期为 T_r ,则第 n 个发射脉冲可以写成

$$S_t(\hat{t}, t_n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2\right)\right). \quad (1)$$

式中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 0.5; \\ 0, & |u| > 0.5; \end{cases}$ \hat{t} 表示快时间, $t_n = nT_r$ 表示慢时间, $t = t_n + \hat{t}$ 为全时间, $\gamma = B/T_p$ 为发射信号的调频率。回波信号可以表示为

$$S_r(\hat{t}, t_n) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau) + \frac{1}{2}\gamma(t - \tau)^2\right)\right) + N(t). \quad (2)$$

式中, $\tau = 2R_n(\hat{t})/c$ (c 为光速) 为目标上某一散射点的时延, A 表示散射强度, $N(t)$ 是均值为零,方差为 σ^2 的高斯白噪声。解线频调是用一时间固定,而频率、调频率相同的 LFM 信号作为参考信号,用它和回波作混频处理。设第 n 次脉冲参考距离为 R_{ref} , $\tau_0 = 2R_{\text{ref}}/c$, 则参考信号为

$$S_{\text{ref}}(\hat{t}, t_n) = \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_0) + \frac{1}{2}\gamma(t - \tau_0)^2\right)\right). \quad (3)$$

回波信号与参考信号共轭相乘,即对回波信号作去斜处理,得

$$S_{if}(\hat{t}, t_n) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau}{T_p}\right) \exp(-j2\pi\Phi_n(t)) + N'(t). \quad (4)$$

式中,

$$\Phi_n(\hat{t}) = f_c(\tau - \tau_0) + \gamma(\tau - \tau_0) - \frac{1}{2}\gamma(\tau^2 - \tau_0^2). \quad (5)$$

当目标速度不高时,可以假设在脉冲持续时间内部目标到雷达的距离不变,但当目标是空间轨道或者弹道目标时,此时径向速度很高,假设就不再成立。假设径向速度为 V , $R_n(\hat{t}) = R_{n0} + V\hat{t}$, 式中, R_{n0} 表示起始时刻该散射点到雷达的距离。代入式(4)得

$$\begin{aligned} \Phi_n(\hat{t}) = & f_c \frac{2(R_{n0} - R_{\text{ref}})}{c} - \gamma \frac{2(R_{n0}^2 - R_{\text{ref}}^2)}{c^2} + \\ & \left(\frac{2V}{c}f_c + \gamma \frac{2(R_{n0} - R_{\text{ref}})}{c} - \frac{4\gamma R_{n0}V}{c^2}\right)\hat{t} + \\ & \left(\gamma \frac{2V}{c} - \frac{1}{2}\gamma \frac{4V^2}{c^2}\right)t^2, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau}{T_p}\right) = \text{rect}\left[\frac{\left(1 - \frac{2V}{c}\right)\hat{t} - \frac{2R_{n0}}{c}}{T_p}\right]. \quad (7)$$

可见,当目标以恒定的径向速度运动时,解线频调信号将产生尺度的变化和时延,在频域上表现为频谱搬移和扩展。解线频调后信号为多分量线性调频信号,由式(6),省略二次项,其调频斜率为

$$K = \frac{4\gamma V}{c}. \quad (8)$$

由于目标上各散射点的时延差别很小,因此在以后的分析中由于时延差别引起的信号包络的失配将被忽略,即公式中的 $\text{rect}(u)$ 都被省略。假设目标上有 p 个散射点,则总的混频输出信号可表示为

$$S_{ifn}(\hat{t}, t_n) = \left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^p A_i \exp(-j2\pi\Phi_{ni}(t)) + N'_i(t), \\ & -\frac{T_p}{2} \leq \hat{t} \leq \frac{T_p}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对回波以 f_s 采样率离散化,设 M 为总的采样点数,则离散化后的输出信号可表示为

$$S_{ifn}(m) = \left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^p A_i \exp(-j2\pi\Phi_{ni}(m)) + N'_i(m), \\ & m = 1, \dots, M. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中,

$$\Phi_{ni}(m) = f_c \frac{2(R_{n0} - R_{\text{ref}})}{c} - \gamma \frac{2(R_{n0}^2 - R_{\text{ref}}^2)}{c^2} +$$

$$\left(\frac{2V}{c}f_c + \gamma \frac{2(R_{n0} - R_{ref})}{c} - \frac{4\gamma R_{n0}V}{c^2}\right)m/f_s + \left(\gamma \frac{2V}{c} - \frac{1}{2}\gamma \frac{4V^2}{c^2}\right)m^2/f_s^2. \quad (11)$$

离散化后的调频斜率 k 与实际调频斜率 K 存在以下关系^[7]:

$$k = 2MK/f_s^2 = 8BV/cf_s. \quad (12)$$

可见,离散化以后线性调频信号的调频斜率与目标速度、采样率、信号带宽均有关系.目标速度越大,信号带宽越大,采样率越小,调频斜率越大.空间轨道目标的运动速度一般在 11 km/s 以下,利用后面仿真参数,可以粗略计算出,离散化后线性调频信号调频斜率 $k=0.0546$,可以认为此时的信号为一组斜率相同,倾角很小的多分量线性调频信号.

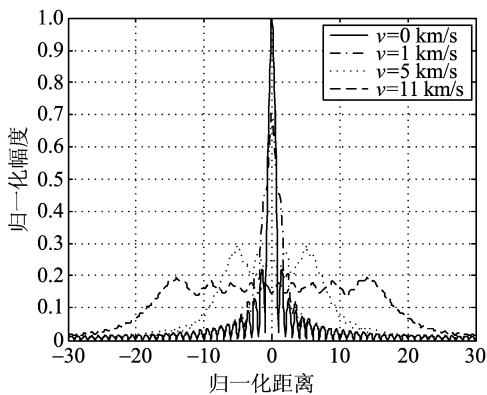


图 1 高速运动对距离像的影响

Fig. 1 Effect of high speed on range profile

在雷达带宽 $B=1.024$ GHz,脉冲宽度 $T_p=51.2 \mu\text{s}$ 条件下,点目标在不同运动速度时的距离色散现象如图 1 所示,图中纵坐标相对于静止点目标距离像幅度最大值归一化,横坐标相对于距离分辨单元 $c/2B$ 归一化.由图 1 可见,运动速度越大,距离色散现象越严重,距离分辨精度越差,这将引起 ISAR 图像的径向散焦;并且随着运动速度逐渐变大,距离像开始畸变,出现多个峰值,这将会使 ISAR 图像产生伪像;此外距离色散还会降低距离像峰值信噪比,给目标检测和运动补偿带来困难.因此距离色散将严重影响成像质量,在高速运动目标成像过程中必须予以消除.

2 瞬时距离像成像

由于目标高速径向运动将导致解线频调后信号的频谱产生搬移和扩展,由单频信号变为线性调频信号.传统的思路是进行速度补偿,消除高速带来的

影响,本文提出一种求瞬时距离像的方法,即对每次脉冲回波做时频分析,把各次脉冲回波的时频分布在同一采样时刻的切片排列在一起,再经过运动补偿,横向多普勒分析,最终得到目标的二维像.

传统的时频分析的方法分为线性和双线性两种,线性时频分布主要有短时傅立叶变换(STFT)、小波变换(WT)等;双线性变换有 Wigner-Ville 分布,模糊函数等.对每次脉冲进行时频分析时,双线性变换由于自项相乘,会导致目标回波相位信息的丢失,造成不能进行横向分辨,因此不适合做瞬时距离像分析.短时傅立叶变换是一种线性变换,它很好地保留了横向相位信息同时又不会受到交叉项的影响,对于空间轨道目标,径向高速运动带来一维距离像的搬移和扩展,但其斜率均相同,且很小,各分量的最佳窗长应该是相同的,即局域平稳长度相同,因此,找到其中一个分量的最佳窗,则整个信号的最佳窗也就确定了,这里可以采用最小熵判别方法自适应地获得每个脉冲内各分量的最佳窗长(即整个脉冲的最佳窗长),而且考虑到信号斜率很小,频率缓慢变化,其最佳窗较长,在窗内信号近似的平稳,这时可以达到很好的频率分辨率,所以本文采用短时傅立叶变换和最小熵准则求最佳窗宽的方法来得到目标的一维距离像.

当回波信号被接收到,可以建立一个二维回波矩阵 E_c ,表示如下

$$E_c = \begin{bmatrix} S_{if1}(1) & S_{if1}(2) & \cdots & S_{if1}(M) \\ S_{if2}(1) & S_{if2}(2) & \cdots & S_{if2}(M) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{ifN}(1) & S_{ifN}(2) & \cdots & S_{ifN}(M) \end{bmatrix}_{N \times M}. \quad (13)$$

式中,矩阵 E_c 的第 i 行表示第 i 个脉冲的采样值, M 是一次脉冲内的采样点数.

给定一个时间窗函数 $\gamma(t)$,令窗滑动,则信号 $S_{if}(t)$ 的短时傅立叶变换(STFT)定义为

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{if}(\tau)\gamma^*(\tau-t)]e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (14)$$

窗函数 $\gamma(t)$ 的时间移位和频率移位使短时 Fourier 变换具有了局域特性,可以用来做时频分析,对于一定的时刻 t ,STFT(t, f) 可视为该时刻的“局域频谱”.由于 Hamming 窗的旁瓣抑制特性,本文采用 Hamming 窗作为短时傅立叶变换的窗函数.

实际应用中,离散化的短时傅立叶变换可以表

示如下:

$$\text{STFT}(p, q) = \sum_{m=1}^M S_{ifn}(m) \gamma^*(m-p) \exp(-j2\pi qn). \quad (15)$$

式中, $\gamma(m)$ 是 Hamming 窗函数, $p, q = 1, \dots, M$, $\text{STFT}(p, q)$ 是一个 $M \times M$ 的二维方阵.

利用短时傅立叶变换对每个脉冲进行时频分析, 即对回波矩阵 \mathbf{E}_c 的每行实施短时傅立叶变换, 得到一个 $M \times M$ 的时频分布序列 $\mathbf{TF} = \{\mathbf{TF}_1, \mathbf{TF}_2, \dots, \mathbf{TF}_N\}$, 这里, \mathbf{TF}_i 定义为

$$\mathbf{TF}_i = \text{STFT}(\text{EXTR}_i[\mathbf{E}_c]). \quad (16)$$

式中, $i = 1, \dots, N$, 算子 $\text{EXTR}_i(\cdot)$ 表示抽取矩阵的第 i 行, \mathbf{TF}_i 表示第 i 个脉冲的时频分布. 然后, 通过以下公式重组时频分布序列 \mathbf{TF} :

$$\mathbf{IRP}_i = [\text{EXTC}_i(\mathbf{TF}_1), \text{EXTC}_i(\mathbf{TF}_2), \dots, \text{EXTC}_i(\mathbf{TF}_N)]_{M \times N}. \quad (17)$$

我们就可以得到 M 个瞬时距离像 (M 个切片) $\mathbf{IRP} = \{\mathbf{IRP}_1, \mathbf{IRP}_2, \dots, \mathbf{IRP}_M\}$, 这里, 算子 $\text{EXTC}_i(\cdot)$ 表示抽取矩阵的第 i 列, \mathbf{IRP}_i 表示采样时刻 t_i 的瞬时距离像.

众所周知, 在低速情况下 (假设脉冲期间内, 目标到雷达的距离不变), 对于接收到的脉冲回波做距离压缩, 即得到目标的一维距离像, 但高速情况下, 在脉冲持续期内, 目标到雷达的距离是随快时间 \hat{t} 变化的, 不过在某一确定的快时间 \hat{t}_0 时刻, 目标到雷达的距离是固定的, 因此可以通过时频分析获得此时刻目标散射点的瞬时多普勒, 从而得到目标在快时间 \hat{t}_0 的瞬时距离像. 图 2 和图 3 简单描述了如何通过 STFT 获得瞬时距离像. 图 2 表示利用 STFT 分析一个脉冲回波 (它包含 5 个距离单元), 在采样时刻 $t_0 = 128$ 时, 可以得到一个瞬时距离像

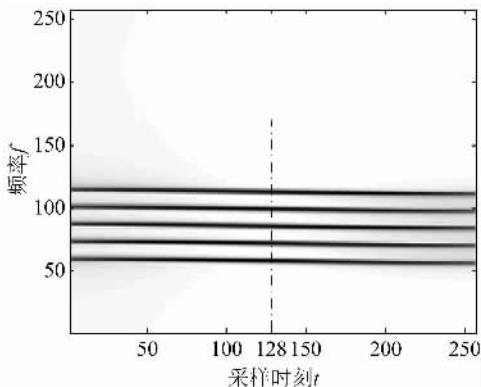


图 2 一个脉冲的时频分布

Fig. 2 Time-frequency distribution of one pulse

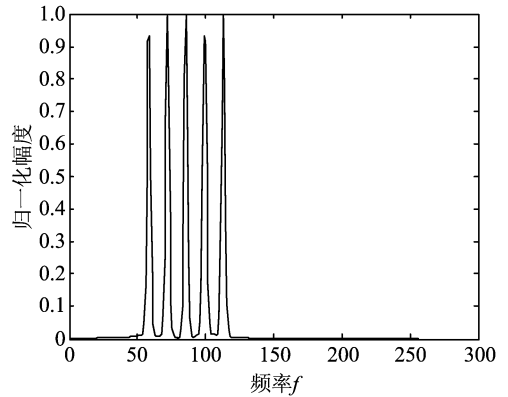


图 3 瞬时距离像 ($t_m = t_0$)

Fig. 3 Instant range profile ($t_m = t_0$)

切片如图 3 所示.

基于以上的分析, 如何选择最佳窗长是短时傅立叶变换 (STFT) 的关键问题. 这里, 我们选择最小熵准则来寻找整个信号的最佳窗长^[8]. 假设第 j 个脉冲在采样时刻 t_i 的瞬时距离像的离散幅度为 $\mathbf{IRP}_{ij}(1), \dots, \mathbf{IRP}_{ij}(M)$, 令

$$I_m = \mathbf{IRP}_{ij}(m) / \sum_{m=1}^M |\mathbf{IRP}_{ij}(m)|,$$

则信号的熵定义为

$$H(I_m) = \sum_{m=1}^M I_m \exp(1 - I_m). \quad (18)$$

$H(I_m)$ 反映了序列 $\mathbf{IRP}_{ij}(m)$ 中各分量的集聚度, 当目标距离像包络的锐化度越高, $\mathbf{IRP}_{ij}(m)$ 序列中可忽略的分量就越多, $H(I_m)$ 的值就越小, 反之, $H(I_m)$ 的值越大. 这里, 当 $H(I_m)$ 达到最小, 可以认为频谱的集聚度达到最佳, 这时的窗是最佳窗, 由此可以获得很好的频率分辨率.

3 算法处理流程

实际上为得到目标某一采样时刻的一维瞬时距离像, 不需要得到目标各次脉冲时频分布的全过程, 只需要有效地得到信号在该采样时刻的瞬时谱, 因此瞬时距离像的问题就转化成了对脉冲内任意采样时刻瞬时谱的估计问题. 这样可以避免计算所有采样时刻的瞬时谱, 有效地减小计算量, 本文取采样时刻 $t_0 = M/2$ (M 是采样总点数). 于是基于短时傅立叶变换的一维瞬时距离像成像步骤如下:

① 设 $i = 1$, 取第 i 次脉冲 (成像期间共积累 N 次脉冲).

② 估计第 i 次脉冲在采样时刻 t_0 的瞬时谱, 分别加长度 $1 \sim M$ 的 Hamming 窗, 利用短时傅立叶

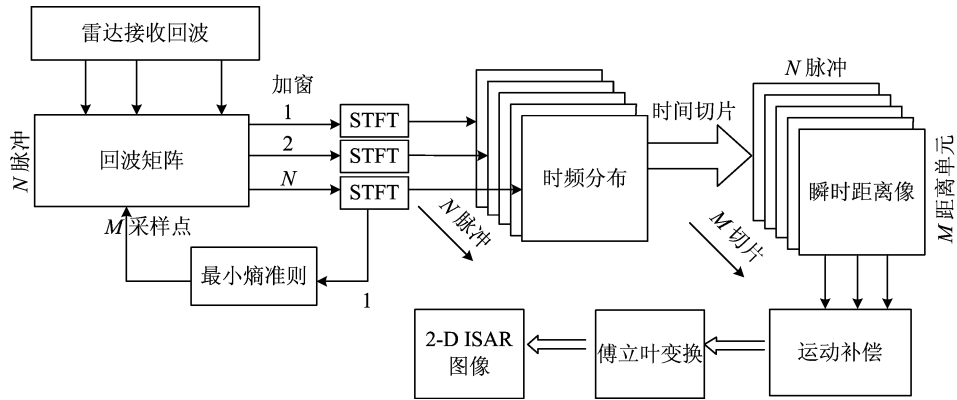


图 4 基于瞬时距离像的二维成像处理流程

Fig. 4 Processing flow of 2D imaging via instant range profile

变换,得到采样时刻 t_0 的不同 Hamming 窗下的瞬时谱.

③计算采样时刻 t_0 不同 Hamming 窗下瞬时谱的熵,利用最小熵判别准则,找到最佳窗长 L_{optimal} .

④计算采样时刻 t_0 最佳窗长 L_{optimal} 下的短时谱.

⑤ $i=i+1$,转入②,分别得到采样时刻 t_0 时各次脉冲在最佳窗下的短时谱.

将这些短时谱排列起来,得到目标的一维瞬时距离像(采样时刻 t_0).此时虽然消除了高速运动的影响,但平动分量依然存在,因此要经过包络对齐和相位校正,再进行横向多普勒分析,最终得到目标的二维像.整个实现过程用框图表示如图 4.

4 仿真结果

为了证明上述分析的正确性,本文使用了仿真数据进行了验证,最终获得了目标清晰的二维像.仿真参数选取如下:①运动参数:目标和雷达距离 $R_0=100$ km,观测起始时刻目标速度与雷达视线夹角 $\theta=60^\circ$,目标运动速度 $V=14.14$ km/s;目标与雷达的几何运动关系如图 5 所示.②系统参数:系统带宽 $B=1\ 024$ MHz,脉冲宽度 $T_p=51.2$ μs ,中心频率 $f_c=35$ GHz,脉冲内采样率 $f_s=5$ MHz.

假设目标模型为由 17 个散射点组成的交叉模型,其散射强度均归一化为 1;脉冲内采样点数 $M=256$ 个,横向积累脉冲数为 128 个.成像转角为 1.23° ,由 ISAR 基本理论可知,理论上横向和纵向分辨率均可达到 0.2 m.参考距离的跟踪误差满足均值为 0,方差为 2 的高斯分布,去斜后的输出信号信噪比为 $\text{SNR}=10$ dB.

由图 5 可知,在成像期间目标相对于雷达的径

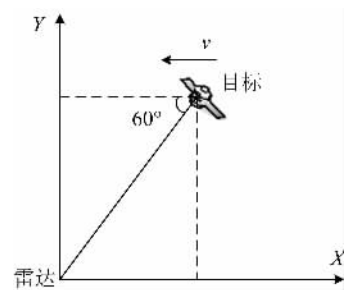


图 5 雷达与目标几何关系

Fig. 5 Geometrical relation between radar and target

向速度在脉冲期间缓慢减小,即各次脉冲对应的调频斜率缓慢减小,因此各次脉冲的最佳窗宽应缓慢增大,计算每次脉冲的 STFT,通过最小熵判别准则自适应地选取最佳窗长(信号长度为 M),仿真中通过最小二乘拟合,得到的各次脉冲最佳窗长变化情况如图 6 所示,与理论分析一致.由图 6 可知平均的最佳窗长应在 $L_{\text{optimal}}=210$ 左右,符合频率变化较缓信号所加窗宽应较大的原则,因此可以得到仿真中所能达到的分辨率约为 0.24 m 左右.该优化算法中,每个脉冲通过最小熵准则寻找到一个最佳窗长

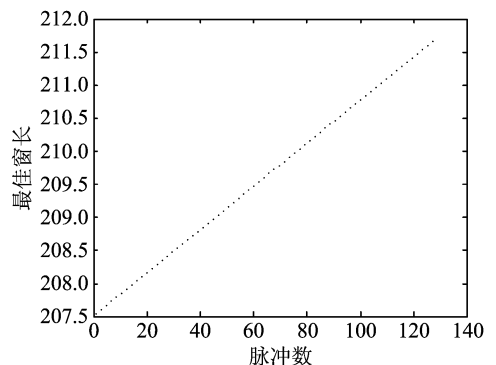


图 6 最佳窗长随脉冲数的变化情况

Fig. 6 Optimal window length variety via pulse numbers

需要 M 次 FFT 运算, N 个脉冲共需要 $M \times N$ 次 FFT 运算, 然后计算所有最佳窗长下的 STFT 需要 N 次 FFT 运算, 即整个瞬时距离像获取过程中只需要 $(M+1) \times N$ 次 FFT 运算, 相对于传统的速度补偿中需要复杂的二维搜索, 有效降低了运算量。

图 7~图 12 分别是采用传统解线调频处理由 FFT 和 STFT 变换得到的距离像、对齐后包络以及

二维成像结果. 从图中可以看出, 由于高速运动影响, 采用传统 FFT 距离压缩得到的目标距离像, 产生严重模糊和畸变, 未经过速度补偿, 直接采用运动补偿, FFT 横向压缩处理, 目标二维像聚焦性能急剧下降, 图像质量恶化. 而采用本文提出的基于 STFT 估计瞬时距离像的二维成像方法消除了径向高速运动带来的影响, 结合整体相关^[9]和多普勒中

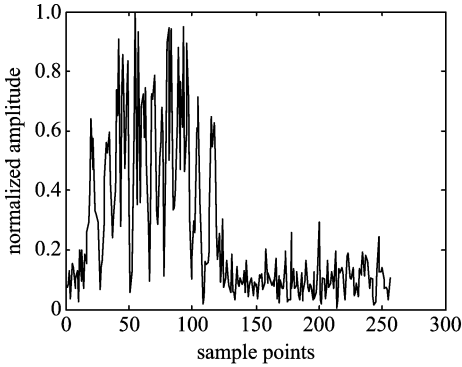


图 7 基于 FFT 的一维距离像
Fig. 7 1D range profile via FFT

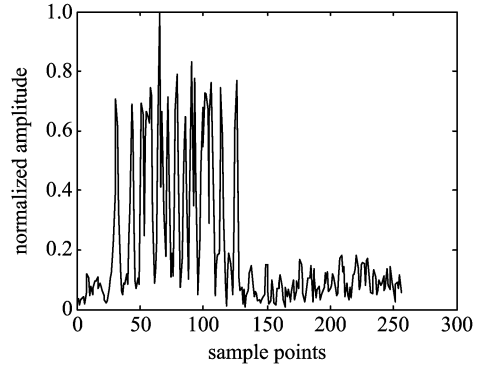


图 8 基于 STFT 的一维瞬时距离像
Fig. 8 1D range profile via STFT

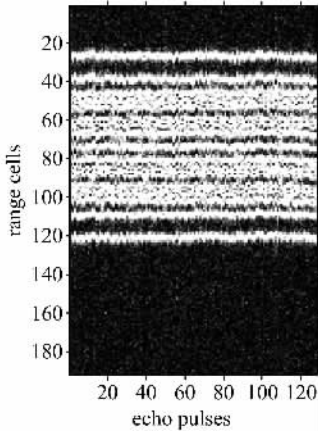


图 9 基于 FFT 的对齐包络
Fig. 9 Aligned envelope via FFT

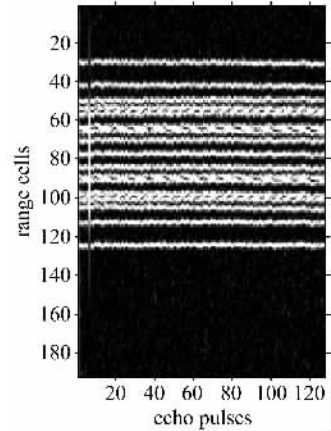


图 10 基于 STFT 的对齐包络
Fig. 10 Aligned envelope via STFT

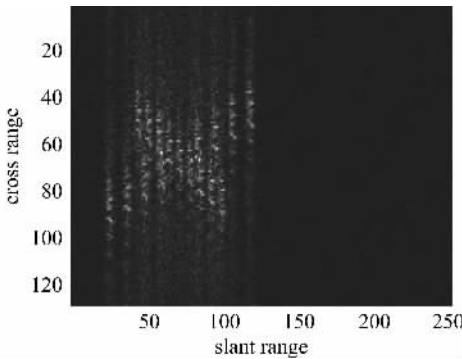


图 11 基于 FFT 的二维成像结果
Fig. 11 2D image via FFT

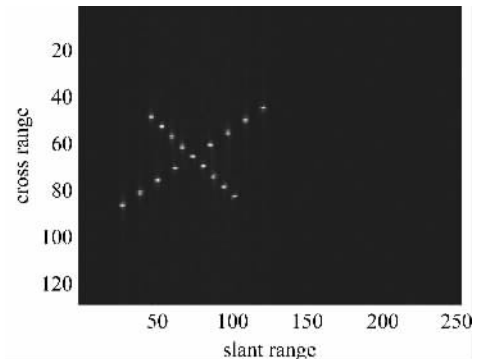


图 12 基于 STFT 的二维成像结果
Fig. 12 2D image via STFT

心跟踪^[10]的运动补偿方法、RD 重构算法,获得的图像质量明显提高。

5 结论

高速运动目标回波经过传统的 FFT 距离压缩后,会产生距离色散效应,进而造成二维像的模糊。文中提出了一种不同于以往速度补偿思路的解决方案,考虑到目标自身的特点,采用了基于最小熵准则的 STFT 时频分析方法获得目标的一维瞬时距离像,很好地消除了高速径向运动引起的模糊和散焦,不同于二次性时频分布,STFT 变换过程中完整地保留了横向信息,采用传统的平动补偿和横向 FFT 分辨方法能够实现目标二维成像,略去了搜索调频斜率的步骤,有效减小了运算量,提高了计算效率。仿真实验结果表明,对于高速运动目标,利用本文提出的方法相比于 FFT 方法成像质量显著提高,验证了该方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. IEEE Trans on AES, 1980, 16(1):2-14.
- [2] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, et al. Developments in radar imaging[J]. IEEE Trans on AES, 1984, 20(4):363-400.
- [3] Xing Meng-dao, Wu Ren-biao, Bao Zheng. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(2): 58-67.
- [4] Huang Xiao-hong, Qiu Zhao-kun, Wang Wei. Research on effect of wideband range profile imaging and compensating method for target moving with high velocity[J]. Signal Processing, 2002, 18(6):487-490. 黄小红,邱兆坤,王伟. 目标高速运动对宽带一维距离像的影响及补偿方法研究[J]. 信号处理, 2002, 18(6):487-490.
- [5] Liu Ai-fang, Zhu Xiao-hua, Lu Jin-hui, et al. The ISAR range profile compensation of fast-moving target using the dechirp method[C]// IEEE Int Conf Neural Networks and Signal Processing 2003. IEEE Press, 2003; 1 619-1 623.
- [6] Chen V C, Qian S. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging[J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34(2):486-499.
- [7] Liu Jian-cheng, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. Radial acceleration estimation based on Wigner-Hough transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12):2 235-2 238. 刘建成,王雪松,肖顺平,等. 基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计[J]. 电子学报, 2005, 33(12):2 235-2 238.
- [8] Lu Guang-yue, Bao Zheng. Realization of ISAR range-instantaneous-Doppler imaging of Man euvering target [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(7): 30-32. 卢光跃,保铮. 机动目标 ISAR 距离瞬时多普勒成像实现方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(7): 30-32.
- [9] Xing Meng-dao, Bao Zheng, Zheng Yi-ming. Range alignment using global optimization criterion in ISAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1 807-1 811. 邢孟道,保铮,郑义明. 用整体最优准则实现 ISAR 成像的包络对齐[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1 807-1 811.
- [10] Zhu Zhao-da, Qiu Xiao-hui, Yu Zhi-shun. ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(3): 65-69. 朱兆达,邱晓辉,余志舜. 用改进的多普勒中心跟踪法进行 ISAR 运动补偿[J]. 电子学报, 1997, 25(3): 65-69.