

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0038- 05

## 机动目标一维距离像 RAT 法线性化补偿\*

李文臣, 王雪松, 王国玉

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**研究了机动目标宽带线性调频脉冲回波全去斜率信号模型, 根据速度和加速度的调频频谱展宽特点, 提出了机动目标宽带一维距离像线性化调频回波模型, 给出了 Radon 模糊图转换(RAT)法线性参数估计与运动补偿方法, 并进一步分析了测速和测距误差。仿真实验验证了 RAT 法一维距离像线性化参数估计与补偿, 表明该方法很好地解决了运动参数未知情况下机动目标的一维距离像频谱展宽问题。

**关键词:** 机动目标; 一维距离像; 线性化补偿; Radon 模糊图转换(RAT)

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A

## Linear Compensation of Range Profile of Maneuvering Target via Radon-ambiguity Transform (RAT)

LI Wen-chen, WANG Xue-song, WANG Guo-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The wide-band LFM pulse de-chirp return signals model of maneuvering target is studied. Based on the spectral expansion characteristics of the velocity and acceleration's frequency modulation, a novel linear frequency modulation (FM) return signals model of wide-band range profile of maneuvering target is proposed. Linear parameter estimation and compensation of range profile via Radon-ambiguity transform (RAT) is presented, and the measurement errors of range and velocity are analyzed. The simulation results validate linear compensation model via RAT, indicating that this method can resolve the range profile spectral expansion of maneuvering target unknown motion parameters.

**Key words:** maneuvering target; range profile; linear compensation; radon-ambiguity transform (RAT)

目标一维距离像受目标运动影响有展宽效应, 目标速度是影响一维距离像性能的重要因素之一, 通过速度补偿可以改善目标匀速运动引起的频谱展宽<sup>[1-3]</sup>。对于大加速度的机动目标, 如果发射信号为大时宽信号, 只有速度补偿很难很好地改善一维距离像的成像效果, 例如美国导弹防御系统中带宽高达 1GHz 的 X 波段雷达<sup>[4]</sup>, 其主要作战对象为远程高速弹道目标, 弹道目标本身有速度和加速度, 另外高速弹道目标也可能采用变轨机动, 在很短时间内其变轨机动加速度可达  $200\text{m/s}^2$ , 当采用大时宽信号时, 加速度会影响目标的精确成像。另外大加速度机动目标的速度是时变的, 不同脉冲时刻对应的目标速度变化相对比较大, 用传统窄带测量跟踪滤波的方法很难在很短时间内得到准确的速度和加速度参数, 在运动参数未知情况下, 如何补偿速度加速度频谱展宽需要深入研究。文献[5]对空间加速机动目标距离像补偿进行了研究, 基于单个信号多项式模型进行运动参数估计, 由于宽带成像雷达回波是多个散射点回波信号合成, 因此信号参数估计模型不匹配, 方法不稳健。本文提出了机动目标宽带一维距离像回波线性化模型, 给出了 Radon 模糊图转换(RAT)法一维距离像回波线性化参数估计与运动补偿方法, 并进行了仿真验证。

### 1 机动目标宽带线性调频脉冲回波全去斜率信号模型

设发射信号为线性调频(LFM)信号:

\* 收稿日期: 2008- 01- 16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672033); 国家部委资助项目(51309060305)

作者简介: 李文臣(1972-), 男, 博士生。

$$s_i(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{T}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right] \quad (1)$$

式中,  $\text{rect}(t) = 1 (|t| \leq 1/2)$ , 其他为零,  $f_0$  为载波频率,  $T$  为脉冲宽度,  $k = B/T$  为调频斜率,  $B$  为带宽。

设第  $i$  个散射点与雷达的距离为  $R_i$ , 在短时间内可把机动目标的复杂运动简化为目标与雷达站相对速度为  $v_0$  (目标面临雷达站方向为正)、加速度为  $a$  的匀加速平动。在速度、加速度和距离影响下, 回波信号延迟为  $t_i$ , 在很短时间内可认为目标匀速运动, 脉冲中心时延  $t_{i0} = \frac{2R_i}{c+v_0}$ , 回波信号表示为

$$s_r(t) = \text{rect}\left[\frac{t-t_{i0}}{T}\right] \exp\left\{j2\pi\left[f_0(t-t_i) + \frac{1}{2}k(t-t_i)^2\right]\right\} \quad (2)$$

由相对运动理论可知, 延迟时间  $t_i \approx \frac{2R_i - 2v_0 t - at^2}{c-v_0}$ , 发射信号延时  $\tau_0$  作为参考本振, 并与回波信号

$s_r(t)$  混频 (相乘), 通常参考本振脉宽大于发射信号脉宽, 不考虑窗口失配, 忽略四次项得到中频信号为

$$s_{iF}(t) = \text{rect}\left[\frac{t-t_{i0}}{T}\right] \exp\left[j2\pi\left(a_{i,0} + a_{i,1}t + a_{i,2}t^2 + a_{i,3}t^3\right)\right] \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_{i,0} = f_0 \left( \tau_0 - \frac{2R_i}{c-v_0} \right) - \frac{1}{2}k\tau_0^2 + 2k \left( \frac{R_i}{c-v_0} \right)^2 \\ a_{i,1} = k\tau_0 + \frac{2v_0 f_0}{c-v_0} - \frac{2kR_i(c+v_0)}{(c-v_0)^2} \\ a_{i,2} = \left( \frac{2kv_0 c}{(c-v_0)^2} \right) + \frac{a}{c-v_0} \left( f_0 - \frac{2kR_i}{c-v_0} \right) \\ a_{i,3} = ak \left( \frac{c+v_0}{c-v_0} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $a_{i,0}$  为固定相位项, 频率项因子  $a_{i,1}$  决定了目标一维距离像的分布, 线性调制因子  $a_{i,2}$  包括速度调频项  $a_{i,2}(v) = \left( \frac{2kv_0 c}{(c-v_0)^2} \right)$  和加速度调频项  $a_{i,2}(a) = \frac{a}{c-v_0} \left( f_0 - \frac{2kR_i}{c-v_0} \right)$ ,  $a_{i,3}$  为加速度引起的非线性调制因子。

## 2 机动目标宽带一维距离像线性化调频回波模型

对(3)式中相位求导并除去  $2\pi$ , 得到信号频率为

$$f(t) = \frac{d\varphi(t)}{2\pi dt} = f_v(t) + f_a(t) = a_{i,1} + 2a_{i,2}t + 3a_{i,3}t^2 \quad (5)$$

其中包括速度调频项  $f_v(t) = a_{i,1} + 2a_{i,2}(v)t$  和加速度频率调制项  $f_a(t) = 2a_{i,2}(a)t + 3a_{i,3}t^2$ ,  $t$  的取值范围为  $-0.5T + t_{i0} \leq t \leq 0.5T + t_{i0}$ 。速度引起固定频率和线性调频项变化, 加速度将引起线性和非线性调频项变化。在  $T$  内非线性调频可近似为线性化频率调制, 得到  $t = t_{i0}$  时刻信号中心频率和线性化调频斜率:

$$f_L = a_{i,1} + 2a_{i,2}t_{i0} + 3a_{i,3}t_{i0}^2 \quad (6)$$

$$K_L = \left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=t_{i0}} = 2a_{i,2} + 6a_{i,3}t_{i0} = 2b_{i,2} \quad (7)$$

其中  $b_{i,2} = a_{i,2} + 3a_{i,3}t_{i0}$  可认为是线性化调频参数估计, 频率调制的近似表达式为

$$f(t) = 2b_{i,2} \left( t - t_{i0} \right) + f_L = a_{i,1} - 3a_{i,3}t_{i0}^2 + 2b_{i,2}t \quad (8)$$

于是(3)式中频信号可以线性化表示为

$$s_{iF}(t) = \text{rect}\left[\frac{t-t_{i0}}{T}\right] \exp\left\{j2\pi\left[ a_{i,0} + \left( a_{i,1} - 3a_{i,3}t_{i0}^2 \right) t + b_{i,2}t^2 + \int_{-0.5T+t_{i0}}^t \Delta f(t) dt \right]\right\} \quad (9)$$

其中  $\Delta f(t) = f(t) - f_L = 3a_{i,3}t^2 - 6a_{i,3}t_{i0}t + 3a_{i,3}t_{i0}^2$ , 为非线性调频线性化处理的调频剩余。

高分辨雷达得到的目标是很多强散射点的叠加,由(9)式线性化模型,忽略 $\Delta f(t)$ ,并带入 $t_{i0} = 2R_i/(c+v_0)$ ,整理得到 $M$ 个散射点去斜后的中频信号为

$$s_{IF}(t) = \text{rect}\left[\frac{t-\tau_0}{T_{rf}}\right] \sum_{i=1}^M \text{rect}\left[\frac{t-t_{i0}}{T}\right] A_i \exp\left[j2\pi\left(b_{i,0} + b_{i,1}t + b_{i,2}t^2\right)\right] \quad (10)$$

$$\begin{cases} b_{i,0} = a_{i,0} = f_0 \left[ \tau_0 - \frac{2R_i}{c-v_0} \right] - \frac{1}{2}k\tau_0^2 + 2k \left[ \frac{R_i^2}{(c-v_0)^2} \right] \\ b_{i,1} = a_{i,1} - 3a_{i,3}t_{i0}^2 = k\tau_0 + \frac{2v_0f_0}{c-v_0} - \frac{k(c+v_0)}{(c-v_0)^2} (2R_i + 3at_{i0}^2) \\ b_{i,2} = a_{i,2} + 3a_{i,3}t_{i0} = \left[ \frac{2kw_0c}{(c-v_0)^2} + \frac{a}{c-v_0}f_0 + \left[ \frac{ak}{(c-v_0)^2} \right] 4R_i \right. \end{cases} \quad (11)$$

其中 $T_{rf}$ 为参考本振脉宽, $A_i$ 为各散射点回波幅度, $b_{i,1}$ 是形成一维距离像的基础,对于不同散射点是不同的,问题的关键是 $b_{i,2}t^2$ 线性调频项的参数估计。在快拍短时间内,目标各散射点用匀加速平动描述,目标自身微运动只表现在固定相位变化上,因此各散射点 $a_{i,3} = a_3$ ;由于目标各散射点距雷达 $R_i$ 相差小,可认为 $a_{i,2} = a_2$ ,因此 $b_{i,2}$ 对于各散射点相同,用常数 $b_2$ 表示,(10)式简化为

$$s_{IF}(t) = \text{rect}\left[\frac{t-\tau_0}{T_{rf}}\right] \exp\left[j2\pi b_2 t^2\right] \sum_{i=1}^M \text{rect}\left[\frac{t-t_{i0}}{T}\right] A_i \exp\left[j2\pi\left(b_{i,0} + b_{i,1}t\right)\right] \quad (12)$$

可见去斜率机动目标回波信号是具有固定调频斜率,不同载波频率的多分量信号组合。

### 3 机动目标一维距离像回波 RAT 法线性化调频参数估计与运动补偿

#### 3.1 RAT 法线性化参数估计

研究 LFM 信号参数估计的方法很多,有最大似然函数法<sup>[6]</sup>、多项式相位参数估计<sup>[7]</sup>、Radon-wigner 变换法<sup>[8]</sup>和 RAT 方法<sup>[9]</sup>等。本文采用 RAT 法对相同调频斜率的多分量信号进行参数估计。根据雷达信号理论,雷达回波 $x(t)$ 的模糊函数为:

$$AF(\tau, v) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left[t + \frac{\tau}{2}\right] x^*\left[t - \frac{\tau}{2}\right] \exp(-jv\tau) dt \quad (13)$$

其中 $\tau$ 为距离时间延迟, $v$ 为多普勒频偏。如果 $x(t)$ 为线性调频信号, $AF(\tau, v)$ 输出为过 $\tau-v$ 平面原点的直线,不同调频斜率得到不同模糊图直线,按照过原点仰角 $\alpha$ 的直线积分模糊图 $|AF(\tau, v)|$ 得到

$$RAT(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} |AF(\tau, \tau \tan \alpha)| d\tau \quad (14)$$

其中 $RAT(\alpha)$ 的最大数值点对应的模糊图斜线是某调频斜率的 LFM 信号所特有的,可以通过 Newton 迭代法或多尺度分析,并结合抛物线插值求解 $b_2$ 的最佳参数估计。当存在噪声时,理想线性化调频参数 $b_2$ 的估计值 $\hat{b}_2$ 存在误差,估计偏差 $\Delta b_2 = \hat{b}_2 - b_2$ ,估计偏差将影响速度加速度补偿,当调频参数的最低均方根误差(RMSE)接近 CRB(Cramer-Rao bound)时,由文献[6]可知, $b_2$ 的 RMSE 为

$$\text{RMSE}(b_2) = \frac{1}{2\pi T^2} \sqrt{\frac{90}{NSNR}} \quad (15)$$

#### 3.2 机动目标的速度加速度线性化补偿

由线性化调频参数 $b_2$ 得非线性调频线性化补偿信号为

$$s_v(t) = \text{rect}\left[\frac{t-\tau_0}{T_{rf}}\right] \exp\left[-j2\pi b_2 t^2\right] s_{IF}(t) \quad (16)$$

补偿后进行傅立叶变换,得到第 $i$ 个散射点的频率为

$$f_{LC}(R_i) = b_{i,1} = k\tau_0 + \frac{2v_0f_0}{c-v_0} - \frac{k(c+v_0)}{(c-v_0)^2} (2R_i + 3at_{i0}^2) \quad (17)$$

由信号延时 $\tau_0$ 、频率 $f_{LC}(R_i)$ 和目标速度 $v_0$ 、加速度 $a$ 等参数得到准确距离测量值 $R_i$ 。在 $v_0$ 和 $a$ 未知

情况下,根据目标匀速运动模型  $a = 0$ ,由(17)式直接得到线性化补偿的测距表达式为

$$R_i(v_0) = \frac{\left(\frac{c-v_0}{c+v_0}\right)^2}{2k} \left[ k\tau_0 + \frac{2v_0 f_0}{c-v_0} - f_{LC}(R_i) \right] \quad (18)$$

匀速运动模型的调频参数表达式为  $a_{i,2} = \left(\frac{2kv_0 c}{c-v_0}\right)^2$ ,代入线性化调频参数  $b_2$  就可以得到速度  $v_0$  的估计值  $\hat{v}_0$ ,然后得到目标距离  $R_i(\hat{v}_0)$ 。经线性化处理后的速度估计为

$$\hat{v}_0 \approx \frac{b_2}{2k + 2b_2 c} \quad (19)$$

设定  $b_2$  为理想估计参数,用线性化后的匀速运动模型来估计匀加速运动带来的测速和测距误差为

$$\Delta v_0 = \hat{v}_0 - v_0 \approx \frac{f_0}{2k} + \frac{at_0}{2} \quad (20)$$

$$\Delta R_i = R_i(\hat{v}_0) - R_i \approx \frac{a}{2} \left(\frac{f_0}{k}\right)^2 + a \frac{f_0}{k} t_{i0} + \frac{3a}{2} t_{i0}^2 \quad (21)$$

### 3.3 RAT 法参数估计误差对测速测距影响分析

由机动目标的信号调制线性化处理带来的测速和测距误差均很小,实际应用中速度和距离测量误差主要来源于调频参数估计。由(19)式,得到由调频参数估计误差引起的速度估计误差  $d\hat{v}_0$  为

$$d\hat{v}_0 = \frac{c}{2} \left(\frac{k}{k+b_2}\right)^2 db_2 = \frac{2k v_0^2}{cb_2^2} db_2 \quad (22)$$

其中  $db_2$  为调频参数估计误差,由(18)式,得到由速度估计误差引起的测距误差为

$$dR_i(\hat{v}_0) \approx \left[ f_0 \left(1 - \frac{4v_0}{c}\right) - \frac{3k\tau_0}{2} \right] \frac{2v_0^2}{cb_2^2} db_2 \quad (23)$$

因此测距误差和测速误差均与  $b_2$  参数估计有关,测量误差统计结果最终由(15)式  $RMSE(b_2)$  决定。

## 4 仿真结果

### 4.1 机动目标线性化展宽补偿仿真

设置雷达频率 10GHz,带宽 1GHz,目标速度 2000m/s,加速度  $150m/s^2$ ,目标距离 3000km,分析不同脉冲宽度情况下线性化补偿效果,以验证该线性化模型,得到如图 1,线性化补偿、速度补偿和速度与加速度补偿比较,其中(a)为脉宽 20ms,(b)为脉宽 1ms,幅度均归一化,可见脉冲宽度越宽,越需要加速度补偿,只有速度补偿不能满足成像需要,在脉宽小于 1ms 时,可不用考虑加速度影响;线性化补偿和速度与加速度补偿均能很好地补偿加速机动目标一维像展宽,其中线性化补偿模型可以不用关心脉宽和加速度的影响。

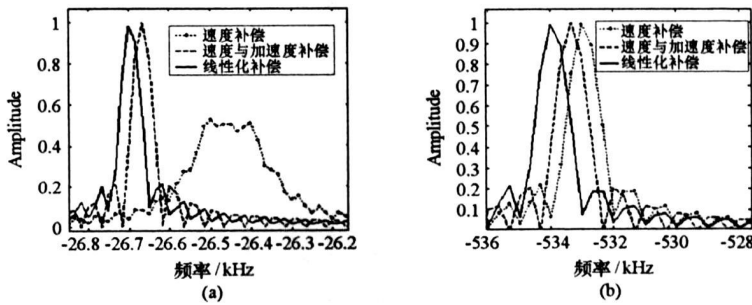


图 1 线性化补偿与速度加速度补偿对比图

Fig. 1 Linear compensation-velocity and acceleration compensation diagram

### 4.2 RAT 法线性化参数估计

雷达参数同上,脉宽分别为 1ms 和 0.1ms。设置间隔 3 个距离单元的 3 个散射点,幅度相同,速度 2000km/s,加速度  $100m/s^2$ ,距离 500km,信噪比(SNR)为 10dB 和无噪,采样点数 4000,由(11)式解得  $a_2$  和

$a_3$ , 由RAT法得到线性化调频参数  $b_2$  的估计, 由蒙特卡罗仿真 50 次得到最优估计  $\hat{b}_2$  及均值  $\text{mean}(\hat{b}_2)$ , 如表 1。在无噪情况下, 在给定精度范围内不同脉冲宽度调频参数估计等于其线性化调频参数, 在有噪声情况下, 参数估计存在偏差, 但其均值仍接近线性化调频参数, 因此 RAT 法线性化调频参数估计是正确的。

表 1 RAT 法线性化调频参数估计

Tab. 1 RAT linear estimation of frequency modulation parameter

$T/\text{ms}$	SNR/dB	$a_2(\times 10^4)$	$a_3(\times 10^4)$	$b_2(\times 10^4)$	$\text{mean}(\hat{b}_2)(\times 10^4)$
1	$\infty$	1333.6	33.3	1333.9	1333.9
1	10	1333.6	33.3	1333.9	1334.0
0.1	$\infty$	13333	333	13336	13336
0.1	10	13333	333	13336	13337

雷达参数同上, 信号脉宽为 0.1ms, 弹头目标由 16 个连续散射点组成, 长约 2.4m, 速度 5km/s, 加速度  $100\text{m/s}^2$ , 最强散射点的信噪比为 10dB, 距离雷达站 500km, 去斜处理后信号采样点数 2000, 仿真结果如图 2, (a) 为采样信号; (b) 为 RAT 法参数检测曲线; (c) 为补偿前的目标一维距离像, 补偿前一维像严重失真; (d) 为 RAT 参数估计线性补偿、速度加速度补偿和真实目标一维距离像的对比图。仿真表明基于 RAT 法的线性化参数估计与补偿能够很好地补偿机动目标一维距离像展宽。

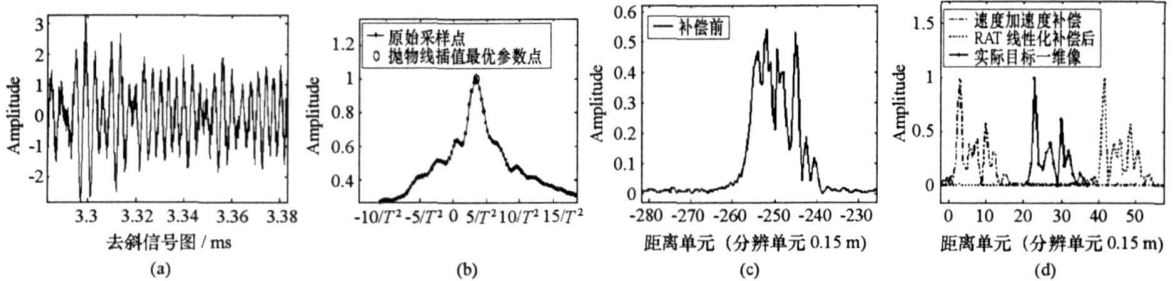


图 2 一维距离像回波 RAT 法线性化参数估计补偿

Fig. 2 RAT linear parameter estimation and compensation of range profile echo

## 5 结束语

机动目标运动使宽带成像雷达一维距离像展宽, 速度和加速度的共同作用使一维距离像的精确补偿更加困难。本文研究了在运动参数未知情况下如何补偿机动目标的频谱展宽, 提出了机动目标宽带一维距离像回波线性化模型, 给出了 RAT 法一维距离像回波线性化参数估计与运动补偿方法, 并进行了仿真验证。通过仿真可知, 对于宽脉冲需要考虑加速度对脉冲的调制影响, 而对于窄脉冲可不考虑加速度影响, 但由于加速度的影响, 脉冲序列各脉冲发射时刻的目标速度是变化的, 用固定的速度补偿会产生一维距离像剩余展宽, 因此需要采用本文的线性化参数估计方法对运动参数进行估计。虽然本文以机动目标运动为研究对象, 但目标加速度设置为零, 即为匀速运动目标的一维距离像运动参数估计与补偿。

## 参考文献:

- [1] Rihaczek A W, Hershowitz S J. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. Artech House, U.S.A., 2000.
- [2] 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.
- [3] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于单个宽带脉冲的空间目标测距和测速方法[J]. 信号处理, 2006, 22(1): 73-77.
- [4] 文树梁, 袁起, 秦忠宇. 宽带相控阵雷达的设计准则与发展方向[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6): 1007-1011.
- [5] 黄小红, 陈曾平, 庄钊文, 等. 空间目标高分辨距离像运动参数估计[J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 269-272.
- [6] Peleg S, Porat B. Linear FM Signal Parameter Estimation from Discrete-time Observations[J]. IEEE Trans. on AES, 1991, 27(4): 607-615.
- [7] Peleg S, Porat B. Estimation and Classification of Polynomial-phase Signals[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1991, 37(2): 423-430.
- [8] Wood J C, Barry D T. Radon Transformation of Time-frequency Distributions for Analysis of Multi-component Signals[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(11): 3166-3177.
- [9] Wang M S, Chan A K, Chui C K. Linear Frequency Modulated Signal Detection Using Radon-ambiguity Transform[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, 46(3): 571-586.