

基于二维映射的 LFM UWB 雷达动目标速度估计

杨利民^{*①} 苏卫民^② 顾红^② 薄超^②

^①(中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥 230088)

^②(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘要: 针对线性调频超宽带雷达动目标存在的距离-多普勒耦合以及多普勒色散对测速的影响, 该文采用了频率-多普勒平面的 2 维映射方法。首先将接收的脉冲串回波, 通过快-慢时间的 2 维傅里叶变换获得相应的频率-多普勒 2 维平面。然后, 利用 2 维映射处理, 将超宽带信号映射为窄带信号, 实现多普勒域能量的聚焦。最后, 根据映射后的窄带信号对应的多普勒频率获得目标径向速度。该方法不但有效地解决了超宽带雷达多普勒色散对测速的影响, 而且规避了由于目标沿距离维的走动引起的慢时间域不能有效的能量积累。通过速度估计值, 进行运动补偿后可获得目标距离像。此外, 根据相关条件, 进一步推导了速度适应范围。仿真实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 超宽带雷达; 多普勒色散; 2 维映射; 速度估计

中图分类号: V243.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-0232-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20048

Velocity Estimation of Moving Target Based on Two-dimensional Projection for LFM UWB Radar

Yang Li-min^① Su Wei-min^② Gu Hong^② Bo Chao^②

^①(China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute, Hefei 230088, China)

^②(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Two-Dimensional (2D) projection in temporal-Doppler plan is utilized to solve the effects of range-Doppler coupling and Doppler dispersion on radial velocity estimation for Linear Frequency Modulation (LFM) Ultra-WideBand (UWB) radar. First, temporal-Doppler 2D plane is got via 2D Fourier transform in fast-slow time domain. Second, 2D projection is performed to obtain energy focusing in UWB Doppler domain through mapping the UWB signal into narrow signal. Finally, radial velocities of moving targets are obtained according to the Doppler frequencies of the narrow signal after the mapping. This method not only solves the negative impacts of UWB radar Doppler dispersion on velocity estimation, but also voids that energy can not be accumulated in slow time since targets move along range resolution bins. Range profile of targets can also be got via the corresponding compensation with the estimated velocities. Besides, the velocity restriction is further derived according to the corresponding requirements. The simulation results illustrate the effectiveness of this method.

Key words: Ultra-WideBand (UWB) radar; Doppler dispersion; Two-dimensional projection; Velocity estimation

1 引言

诸多雷达信号中, 由于线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 信号通常具有大带宽时宽积以及多普勒不敏感^[1], LFM 信号为超宽带 (Ultra-WideBand, UWB) 雷达中常见的信号形式之一^[2]。相比窄带雷达, 由于 LFM UWB 雷达信号带

宽通常较宽, 恒径向速度运动的目标多普勒频率随着信号频率变化而变化, 即所谓的多普勒色散现象更加显现。因此, 通过多普勒频率测速的适合常规窄带雷达的信号处理方法难以适合 UWB 雷达。对于 LFM 宽带雷达的目标距离及速度估计, 文献[3]及文献[4]分别讨论了最大熵 (Maximum Entropy, ME) 以及最大似然估计 (Maximum Likelihood Estimator, MLE) 方法。尽管文献[3]中讨论的 ME 方法的计算复杂度比文献[4]中 MLE 大, 但是当目标包含多个强度相当的强散射体时, 后者的测速性能快速下降。通过在快-慢时间维的 2 维快速傅里叶变换 (Two-

2012-08-24 收到, 2012-09-11 改回; 2012-09-17 网络优先出版

江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(编号: CXZZ11_0252)

资助课题

*通信作者: 杨利民 yamyang559@sohu.com

Dimensional Fast Fourier Transform, 2-D FFT)可分别获得动目标的距离及速度信息。但是, 由于动目标通常沿距离维移动若干个距离单元以及 LFM UWB 雷达的距离-多普勒耦合, 使得通过慢时间的能量积累时导致较大的速度估计误差。对于 UWB 雷达, 由于其信号带宽通常很宽, 因此, 当多普勒色散积 $BT(2v/c)$ (其中 B 和 T 分别为信号带宽及脉宽, v 和 c 分别为目标径向速度及光速) 大于 1, 目标回波的伸缩特性不可忽略^[5]。对该色散积大于 1 的 UWB 目标, 文献[6]采用了小波变换测量目标速度。

而针对多普勒色散积小于 1 的运动目标^[5], 文献[7]通过多维谱分析方法获得速度值。然而, 该方法具有较大的计算量, 而且测速的旁瓣较高。为此, 本文采用了称为 2 维映射的方法进行速度估计。首先, 对接收的 LFM UWB 脉冲信号于快-慢时间维进行 2 维 FFT 以得到 2 维平面, 根据多普勒频率的定义可知在该平面内不同径向速度的目标对应具有不同斜率的直线。其次, 借鉴应用于宽带波达角 (Direction-of-Arrival, DOA) 估计的 2 维离散傅里叶变换的思想^[8,9], 将 UWB 雷达回波信号映射为窄带信号, 从而实现 UWB 雷达多普勒频率域的能量聚焦, 并利用 2 维映射方法获得速度估计值。此外, 进行相应的运动补偿处理后, 可进一步获得目标距离像; 并根据多普勒色散积小于 1 及相关限制推导了适应上述方法的径向速度范围。该方法不但避免了目标跨距离单元走动和距离-多普勒耦合对测速的影响, 而且实现了多普勒频率域的能量聚焦, 从而可利用传统的 FFT 法测速。

本文组织结构为: 第 2 节简要介绍了 2 维 FFT 处理方法; 第 3 节分析了利用 2 维映射方法测速以及适合该方法的速度范围; 本文的相关数值仿真实验分析见第 4 节; 最后一节总结全文。

2 2 维 FFT 处理

对于 LFM UWB 雷达, 设发射 N 个 LFM UWB 脉冲信号为

$$S_T(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\pi k(t-nT_p)^2} e^{j2\pi f_c t} \quad (1)$$

其中 k , T_p 和 f_c 分别为 LFM 信号调频率、脉冲重复间隔和载频。

当动目标对应的多普勒色散积 $BT(2v/c)$ (其中 B 和 T 分别为信号带宽及脉宽, v 和 c 分别为目标径向速度及光速) 小于 1 时, 由式(1)可得 LFM UWB 雷达回波信号为^[5]

$$S_R(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\pi k(t-nT_p-\tau_d(t))^2} e^{j2\pi f_c(t-\tau_d(t))} \quad (2)$$

其中 $\tau_d(t) = 2(R_0 + vt)/c$ 为回波时延, R_0 为雷达和目标间的初始距离。

对如式(2)所示的回波信号进行脉冲压缩处理

$$S_0(t) = S_R(t) \cdot S_T(t)^* \triangleq \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\phi(t)} \quad (3)$$

其中 $(\cdot)^*$ 为 (\cdot) 的共轭运算, 则 $S_0(t)$ 信号对应的相位 $\phi(t)$ 可展开为

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \arg(S_0(t)) = \pi k \left(\frac{2(R_0 + vt)}{c} \right)^2 \\ &\quad - 2\pi(kt - knT_p + f_c) \left(\frac{2(R_0 + vt)}{c} \right) \\ &= 4\pi \cdot \left[k(v^2 - vc)t^2 + (2kR_0v - ckR_0 + ckvnT_p \right. \\ &\quad \left. - cf_c v)t + R_0(kR_0 + cknT_p - cf_c) \right] / c^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\arg(\cdot)$ 为 (\cdot) 的相位。假设 $t = nT_p + mT_s$, $T_p = MT_s$, 其中 T_s 为时间抽样间隔, M 为在 T_p 内的采样个数, 式(4)可离散表示为

$$\begin{aligned} \phi(n, m) &= 4\pi \cdot \left[k(v^2 - vc)(nT_p + mT_s)^2 + (2kR_0v \right. \\ &\quad \left. - ckR_0 - cf_c v + ckvT_p)(nT_p + mT_s) \right. \\ &\quad \left. + R_0(kR_0 - cf_c + ckT_p) \right] / c^2 \\ &= \frac{4\pi k v^2 T_p^2}{c^2} n^2 + \frac{4\pi v(2kR_0 - cf_c) T_p}{c^2} n \\ &\quad + \frac{4\pi k v(2v - c) T_p T_s}{c^2} mn + \frac{4\pi k v(v - c) T_s^2}{c^2} m^2 \\ &\quad + \frac{4\pi(2kR_0v - ckR_0 - cf_c v) T_s}{c^2} m \\ &\quad + \frac{4\pi R_0(kR_0 - cf_c)}{c^2} \\ &\triangleq c_1 n^2 + c_2 n + c_3 mn + c_4 m^2 + c_5 m + c_0, \\ &n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知其中的 6 项分别为: 第 1 项 $c_1 n^2$ 对应为多普勒色散项, 影响目标速度的估计; 第 2 项 $c_2 n$ 包含目标的多普勒信息; 第 3 项 $c_3 mn$ 对应为距离-多普勒耦合项; 第 4 项 $c_4 m^2$ 对应为距离扩展项, 影响距离像的高分辨估计; 第 5 项 $c_5 m$ 包含目标距离信息; 第 6 项 c_0 对应为常数项, 不影响距离及速度估计。

对式(5)中第 3 个等号右边的第 5 项, 沿快时间维进行 FFT 处理后获得的目标距离像为

$$\begin{aligned} \chi(l) &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{j c_3 m} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{M} ml} = e^{j\pi \left(\frac{2(2kR_0v - ckR_0 - cf_c v) T_s}{c^2} - \frac{l}{M} \right) (M-1)} \\ &\quad \cdot \frac{\sin \left[\pi \left(l - \frac{2(2kR_0v - ckR_0 - cf_c v) MT_s}{c^2} \right) \right]}{\sin \left[\pi \left(\frac{l}{M} - \frac{2(2kR_0v - ckR_0 - cf_c v) T_s}{c^2} \right) \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $l=0, 1, 2, \dots, M-1$ 。则由式(6)可得目标距离像所对应的距离分辨单元为

$$R_{\text{bin}} = \frac{2(2kR_0v - ckR_0 - cf_c v)MT_s}{c^2} = \underbrace{-\frac{2kR_0MT_s}{c}}_{\text{距离}} + \underbrace{\left(-\frac{2f_cMT_s v}{c} + \frac{4kR_0MT_s v}{c^2}\right)}_{\text{距离像移动}} \quad (7)$$

由式(7)可知, 目标距离像发生与径向速度 v 对应的移动, 因此影响慢时间维的能量积累。

同理, 对式(5)中第3个等号右边的第2项, 沿慢时间维进行 FFT 处理可得

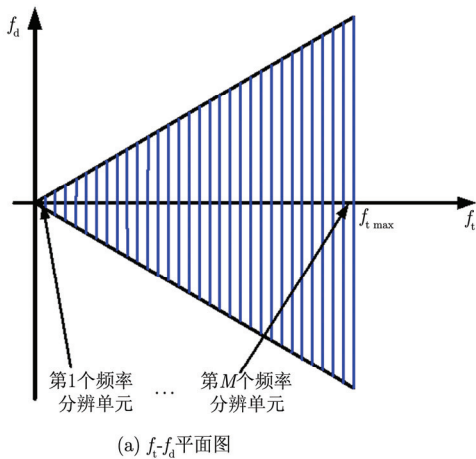
$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{jc_2 n} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nh} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi\left(\frac{2v(2kR_0 - cf_c)T_p}{c^2} - \frac{h}{N}\right)n} \\ &= e^{j\pi\left(\frac{2v(2kR_0 - cf_c)T_p}{c^2} - \frac{h}{N}\right)(N-1)} \\ &\quad \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(h - \frac{2v(2kR_0 - cf_c)NT_p}{c^2}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\frac{h}{N} - \frac{2v(2kR_0 - cf_c)T_p}{c^2}\right)\right]} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $h=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。则由式(8)可获得目标速度

$$v_{\text{bin}} = \frac{2v(2kR_0 - cf_c)NT_p}{c^2} = \underbrace{-\frac{2f_cNT_p v}{c}}_{\text{速度}} + \underbrace{\frac{4kR_0NT_p v}{c^2}}_{\text{速度峰值发生移动}} \quad (9)$$

从式(9)可知第2个等号右边的第1项为目标的径向速度信息, 而第2项为速度峰值发生与目标距离 R_0 相对应的移动。

结合式(7)和式(9)可知, 对于 LFM UWB 雷达, 通过如上的 2-D FFT 处理时目标距离及速度估计精度下降。从式(5)最后一个等号后边的第 1, 3 和 4 项



(a) f_t - f_d 平面图

可知估计的目标距离及速度值还存在相应的耦合以及沿对应维的扩展, 从而距离与速度的测量精度和分辨能力受到影响。

3 2 维映射离散傅里叶变换及速度补偿法

根据多普勒的定义 $f_d = 2vf_t/c$ ^[10], f_t 为信号频率, 则对应的 f_t - f_d 平面如图 1 所示。

从图 1 可看出, 多普勒频率随发射信号频率(带宽为 B_w)的变化而发生多普勒色散, 如线段 AB 对应的多普勒带宽。对于径向速度为 v 的目标, 在图 1 对应的平面中存在由速度 v 确定的斜率为 $2v/c$ 的斜线。利用 2 维 FFT 可将信号频率分成 M 个子带, 如图 2 (a)所示。

可对线段 AB 中的各点按图 2 (b)所示的 2 维映射方法将 UWB 信号映射到窄带信号, 而不改变径向速度值。因此, 就估计径向速度而言, 可以通过相关的映射方法将 UWB 信号转换到窄带信号, 使得目标径向速度信息依然得到保留, 这即为 2 维映射法的基本思想^[8,9]。

若式(2)对应的离散形式为 $S_R(n', m')$, 其中 $n' = 0, 1, \dots, N-1$ 和 $m' = 0, 1, \dots, M-1$ 分别对应慢时

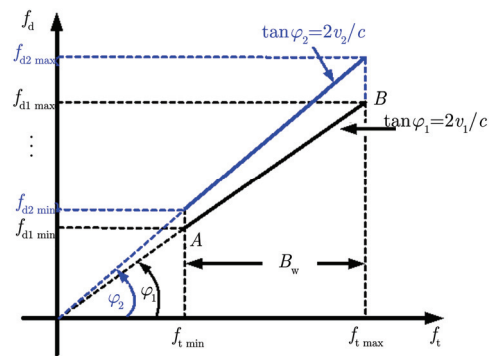
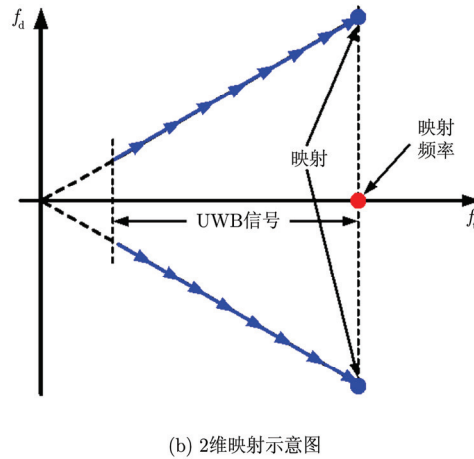


图 1 多普勒与信号频率关系示意图



(b) 2维映射示意图

图 2 于 f_t - f_d 平面图利用 2 维映射示意图

时间和快时间维的离散样本个数, 则对 $S_R(n', m')$ 进行 2 维离散傅里叶变换为

$$X(\kappa, q) = \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_{m'=0}^{M-1} S_R(n', m') e^{-j\frac{2\pi}{N}n'u} e^{-j\frac{2\pi}{M}m'\kappa},$$

$$\kappa = 0, 1, \dots, N' - 1; \quad q = 0, 1, \dots, M' - 1 \quad (10)$$

根据如式(10)所示的 2 维傅里叶变换结果, 进行如下所示的映射处理:

$$\zeta(\mu, q) = \bar{P}\{X(\kappa, q)\},$$

$$0 \leq \kappa \leq N' - 1; \quad 0 \leq q \leq M' - 1 \quad (11)$$

其中 N' 和 M' 分别为慢-快时间域利用 2 维 FFT 后对应的离散点个数, \bar{P} 为映射算符, 并使得 μ 满足

$$\mu = \text{round}\left(\frac{\kappa \cdot M'}{q}\right) \quad (12)$$

其中 $\text{round}(\cdot)$ 为取最近的整数。

由式(12)可知, 实现映射时存在由 $\text{round}(\cdot)$ 引入的误差, 影响映射结果。因此, 可通过在 2 维离散傅里叶变换时增加离散点个数^[8,9]以减少 $\text{round}(\cdot)$ 误差。

经过如式(12)所示的映射处理后, 实现了 UWB 信号映射到窄带频段上, 即

$$Y(\mu, M' - 1) = \sum_{q=0}^{M'-1} |\zeta(\mu, q)|, \quad \mu = 0, 1, \dots, N' - 1 \quad (13)$$

其中 $|\cdot|$ 为取模。根据式(13), 可得经映射后窄带对应的多普勒频率, 即对该式进行局部峰值搜索可获得目标径向速度估计值^[11]。

结合式(5), 利用如上方法获得的径向速度估计值 \tilde{v} 构造相应的补偿相位因子为

$$\psi(n, m)|_{\tilde{v}} = \frac{8\pi\tilde{v}kR_0T_p}{c^2}n + \frac{4\pi(2kR_0\tilde{v} - cf_c\tilde{v})T_s}{c^2}m$$

$$+ (c_1n^2 + c_3mn + c_4m^2)|_{\tilde{v}},$$

$$n = 0, 1, \dots, N - 1; \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (14)$$

利用式(14)所示的补偿相位因子, 对式(5)进行相应的运动补偿并沿快时间维进行 FFT 处理, 可获得目标距离像, 即

$$\xi(n, b) = \sum_{m=0}^{M-1} (e^{j\phi(n,m)} e^{-j\psi(n,m)|_{\tilde{v}}}) e^{-j\frac{2\pi}{M}mb},$$

$$n = 0, 1, \dots, N - 1; \quad b = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (15)$$

由通过式(13)进行相关处理后先获得目标速度值以及式(15)再获得目标距离像可知, 和第 2 节中讨论的 2-D FFT 法不同的是, 本节采用的 2 维映射法规避了 2-D FFT 中距离像移动及扩展对目标速度估计的影响。借鉴用于宽带 DOA 的 2 维映射方法, 实现多普勒域的能量聚焦, 从而较好解决了多普勒

色散对测速的影响。此外, 进行如式(15)所示的相关补偿后, 可进一步获得目标距离像。

下面讨论适合上述分析的目标径向速度范围。设 LFM UWB 雷达中相对径向速度 v' 是 v 的模糊速度, 且 $v' > v \geq 0$ 。则可得最大不模糊速度 $v_{u \max}$ 为^[12]

$$v_{u \max} = \frac{\lambda_Q}{2T_p} \quad (16)$$

其中 λ_Q 为映射频率 f_Q 对应的波长。除了径向速度需满足式(16)时, 也需遵守本节中多普勒色散积小于 1 的前提条件, 即

$$BT\left(\frac{2v_d}{c}\right) < 1 \Leftrightarrow v_d < \frac{c}{2BT} \quad (17)$$

因此, 结合式(16)及式(17), 可得径向速度 v 的适应范围为

$$v \leq \min(v_{u \max}, v_d) \quad (18)$$

4 仿真实验

假设 LFM UWB 信号频率 $f_i \in [1.25, 1.75]$ GHz, 则对应的雷达相对带宽为 33.3% 以及距离分辨率 ΔR 为 0.3 m。设 LFM UWB 雷达发射脉冲个数为 256, 脉冲宽度 τ 为 5 μs , 脉冲重复间隔 T_p 为 50 μs 。目标由 3 个散射体组成, 其散射中心分别为 $R_0 + 20\Delta R$, $R_0 + 26\Delta R$ 及 $R_0 + 32\Delta R$, 其中 R_0 为 6.5 km, 散射体对应的幅度值之比为 3:5:4。又设 LFM UWB 雷达接收信号中的加性噪声为 0 均值的复高斯过程, 对应的 SNR 为 10 dB。

为了分析速度变化对距离像的影响, 图 3 为径向速度分别为 10 m/s, 100 m/s, 250 m/s 及 400 m/s 时, 基于第 2 节中的 2-D FFT 法获得的距离像对比。

由图 3 可知, 当速度 v 为 10 m/s 时, 目标距离像能清晰可辨。但是随着速度继续增大, 主瓣展宽及峰值下降, 如当速度增大到 250 m/s 或者更高时, 目标距离像几乎无法分辨。

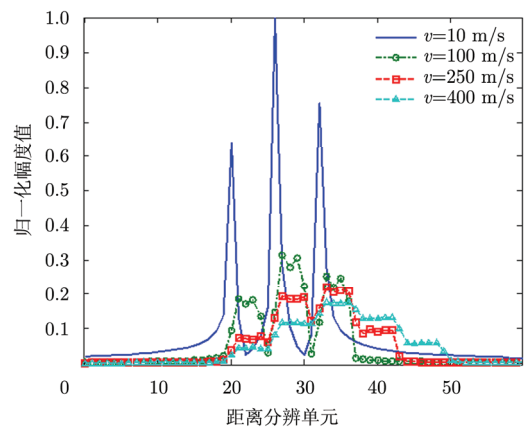


图 3 LFM UWB 雷达中速度变化时基于 2-D FFT 的距离像比较

对径向速度分别为 10 m/s, 100 m/s 及 250 m/s 的目标, 利用 2-D FFT 获得的速度估计值如图 4 所示。

由图 4 可看出, 随着速度增大, 利用 2-D FFT 法估计的速度值也发生类似图 3 中的偏离及展宽, 这是因为如图 3 所示的距离像的移动及展宽, 导致沿慢时间维进行 FFT 时能量不能有效积累。

下面分析利用 2 维映射法估计目标径向速度值。设动目标径向速度分别为 500 m/s 和 1200 m/s, 此时 SNR 为 0 dB。对 N 个发射脉冲对应的回波作 2 维 FFT 处理, 如图 5 所示。

从图 5 可知, 对 LFM UWB 雷达的 N 个发射脉冲对应的回波作 2 维 FFT 处理后, 可获两条具有不同斜率的线段, 对应具有不同径向速度的运动目标, 如图 5(b)所示。由此可知, 若沿相应的线段进行能量积累, 可保留目标径向速度信息, 这正是利用 2 维映射估计径向速度的基本思想。经 2 维映射处理可将 UWB 信号映射到窄带信号, 根据映射后窄带信号对应的多普勒频率可获得目标径向速度,

如图 6(a)所示。为了比较, 图 6(b)为采用多维谱分析法^[7]进行测速的仿真图。

从图 6(a)可知, 利用 2 维映射方法可有效积累多普勒域能量, 解决了 UWB 信号多普勒色散现象对测速的影响。图 4 中可看出当目标速度为 250

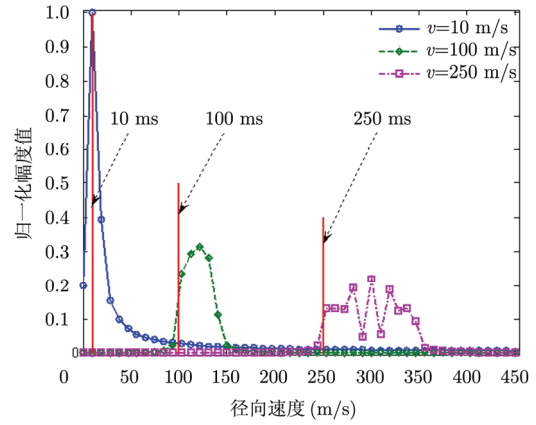
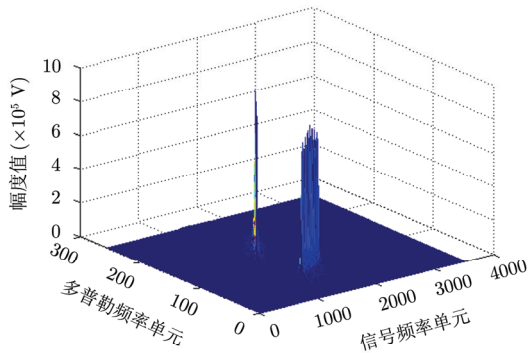
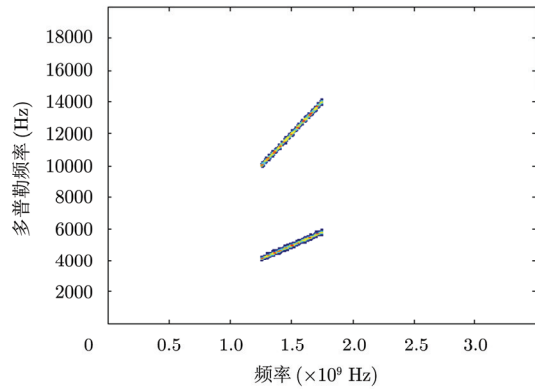


图 4 当径向速度变化时利用 2-D FFT 法估计速度值比较 (其中垂直线分别为对应的目标真实速度值)

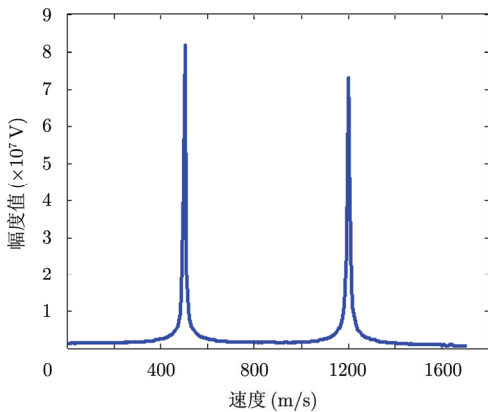


(a) 快-慢时间域 2 维 FFT 后的 3 维图

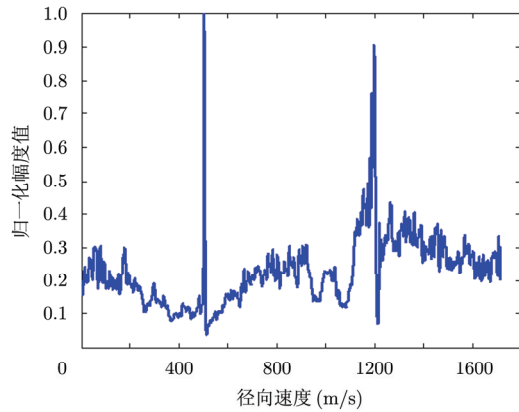


(b) 图 5(a) 的俯视图

图 5 对 LFM UWB 回波快-慢时间作 2 维 FFT 后 3 维图及其俯视图



(a) 2 维映射法测速



(b) 多维谱分析法测速

图 6 利用多维谱分析法^[7]及 2 维映射法获得目标径向速度(目标真实速度分别为 500 m/s 和 1200 m/s)

m/s 时, 利用 2-D FFT 法时产生较大的测速误差, 且速度增大时, 测速误差变大。然而, 图 6(a)可看出, 即使速度为 1200 m/s 时, 依然可获得较高精度的速度估计值。从图 6(b)可知, 相比图 6(a), 具有更窄的主瓣。然而, 图 6(b)中就有较高的旁瓣干扰。此外, 和图 4 相比, 利用 2 维映射方法测速时规避了距离-多普勒耦合以及目标跨距离单元走动等因素对测速的影响。这是因为 2-D FFT 法测速时是先测距后再测速, 因此易受到如上因素的影响; 相反, 2 维映射方法是先通过沿线段的能量积累后直接获得目标径向速度。此外, 由于该方法于频率-多普勒频率 2 维平面内是通过位于同一线段(对应同一径向速度)进行能力聚焦, 因此即使在 SNR 为 0 dB 情况下亦能具有较为稳健的测速性能。

由于利用 2 维映射方法可获得如图 6(a)所示的较高的测速精度, 利用该估计值进行相应的补偿后可进一步获得目标距离像。

5 结束语

针对 LFM UWB 雷达中多普勒色散积不超过 1 的运动目标, 采用了 2 维映射方法估计动目标径向速度, 并通过相应的运动补偿后可进一步获得目标距离像。该方法于频率-多普勒频率 2 维平面, 根据不同径向速度对应具有不同斜率的直线, 将不同线段的能量映射到窄带频率上, 目标速度信息得到保留, 从而实现了多普勒频率的能量聚焦。因此, 该方法较好地解决了多普勒色散对测速的影响。此外, 该方法避免了如 2-D FFT 中测速精度受距离像移动及扩展的负面影响。为了获得适应上述方法的限制条件, 根据多普勒色散积小于 1 的条件和最大不模糊速度, 进一步推导了 LFM UWB 雷达目标径向速度的适应范围。

参考文献

[1] Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. 1st Ed., New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2005: 43-45.

作者简介



杨利民(1981-), 男, 江西九江人, 2005 年获江西师范大学学士学位, 2008 年获南京航空航天大学硕士学位, 2012 年获南京理工大学博士学位。现工作于中国电子科技集团公司第三十八研究所, 研究方向为 UWB 雷达杂波建模与仿真、UWB 雷达信号处理。

E-mail: myang559@sohu.com

- [2] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 3rd Ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 2008, Section 8.2.
- [3] Bocker R P and Jones S H. ISAR motion compensation using the burst derivative measure as a focal quality indicator[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1992, 4(4): 285-297.
- [4] Zhang L P, Peng Y N, Wang X Q, et al. An iterative approach of parameter estimation for LFM signals[C]. Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, Chengdu, China, 2002, 2: 1054-1057.
- [5] Weiss L G. Wavelets and wideband correlation processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 11(1): 13-32.
- [6] Sibil L H and Weiss L G. A wideband wavelet based estimator correlator and its properties[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2002, 13: 157-186.
- [7] Lovstakken L, Torp H, and Jensen J A. Estimating 2-D vector velocities using multidimensional spectrum analysis[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(8): 1744-1754.
- [8] Allam M and Moghaddamjoo A. Two-dimensional DFT projection for wideband direction-of-arrival estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(7): 1728-1732.
- [9] Allam M and Moghaddamjoo A. Spatial-temporal DFT projection for wideband array processing[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1994, 1(2): 35-37.
- [10] Nouguier F, Guerin C A, and Soriano G. Analytical techniques for the Doppler signature of sea surfaces in the microwave regime-1: linear surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4856-4864.
- [11] Doukovska L. Alternative approaches for target velocity estimation using the Hough transform in MIMO radar systems[J]. *Cybernetics and Information Technologies*, 2011, 11(1): 45-63.
- [12] Yang L M, Su W M, Gu H, et al. Synthetic UWB range profile using SFPTs and class MUSIC for high-resolution velocity estimation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(1): 103-108.

苏卫民(1959-), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 从事工作有自适应信号处理, 随机信号雷达理论及其应用, 雷达成像和外辐射源雷达等。E-mail: suweimin@mail.njust.edu.cn

顾红(1967-), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 从事工作有噪声雷达, 新体制雷达, 雷达成像理论, 现代数字信号处理算法与实现等。E-mail: guhong@mail.njust.edu.cn

薄超(1983-), 男, 黑龙江人, 博士生, 研究方向为天波超视距雷达与 MIMO 新体制雷达。E-mail: bochao417@163.com