

基于期望最大化算法的捷变频联合正交频分复用雷达高速多目标参数估计

全英汇 高 霞* 沙明辉 陈侠达 李亚超 邢孟道 岳超良

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 参数估计对雷达的目标检测和识别有着重要的意义。该文提出了一种基于期望最大化(EM)算法的捷变频联合正交频分复用(FA-OFDM)雷达高速多目标参数估计方法。首先,将窄带正交频分复用(OFDM)信号与传统捷变频雷达相结合,在每个脉冲宽度内同时发射多个载频随机跳变的子载波。然后,对单个脉冲内所有子载波的回波进行脉冲压缩和稀疏重构处理,得到1维高分辨距离。进一步地,将多个目标在不同脉冲时刻的高分辨距离信息构成观测数据,建立混合高斯模型。采用EM算法对模型参数和多个目标的距离、速度进行估计,并同时拟合多条时间-距离直线。直线斜率对应目标速度,直线纵轴截距对应目标初始距离。最终,分别分析了信噪比(SNR)对检测概率以及目标速度对相对估计误差的影响。仿真实验验证了所提算法的有效性。

关键词: 捷变频联合正交频分复用雷达; 参数估计; 高速多目标; EM算法

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1611-08

DOI: 10.11999/JEIT190474

High Speed Multi-target Parameter Estimation for FA-OFDM Radar Based on Expectation Maximization Algorithm

QUAN Yinghui GAO Xia SHA Minghui CHEN Xiada

LI Yachao XING Mengdao YUE Chaoliang

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Parameter estimation is very important for radar to detect and recognize targets. In this paper, a high speed multi-target parameter estimation method for Frequency Agility-Orthogonal Frequency Division Multiplexing(FA-OFDM) radar based on Expectation Maximization(EM) algorithm is proposed. Firstly, a promising idea is to combine narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals and frequency agility, multiple subcarriers that frequency hopping randomly are simultaneously transmitted within each pulse width. Then, all echoes of a single pulse are compressed and sparsely reconstructed to achieve 1-dimension high range resolution. Subsequently, the high resolution range of multiple targets at each pulse time are obtained to constitute the observation data, and Gauss mixture model is established. EM algorithm is applied to estimate the parameters of the model and the range and velocity of multiple targets. Also, multiple time-range lines are fitted at the same time, and the slope of the line corresponds to the velocity of the target, as well as, the vertical intercept of the line corresponds to the initial range of the target, separately. Finally, the influence of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) on detection probability and the target velocity on relative error of estimation are analyzed, respectively. Simulations are provided to verify the effectiveness of the proposal.

Key words: Frequency Agility-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (FA-OFDM) radar; Parameter estimation; High speed multi-target; Expectation Maximization (EM) algorithm

1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division

Multiplexing, OFDM)技术易于实现频谱资源控制和无线环境下的高速传输,因而被首先应用于通信领域。文献[1]将OFDM技术引入到雷达系统中,吸引了大批学者的关注。在雷达中,利用OFDM信号的大时宽带宽积特性进行脉冲压缩等处理,可以获得目标的距离和多普勒信息,因此,OFDM信号具备了雷达网间通信与目标探测的双重优势[2]。此外,OFDM信号广泛应用于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)、步进频和捷变频

收稿日期: 2019-06-27; 改回日期: 2020-03-17; 网络出版: 2020-04-17

*通信作者: 高霞 2636897970@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61303035, 61772397), 中央高校基本科研业务费专项资金, 西安电子科技大学研究生创新基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61303035, 61772397), The Foundation Research Funds for Central University, The Innovation Fund of Xidian University

等其他体制雷达[3-8]。其中文献[7]研究了MIMO-OFDM雷达,利用完整的信号带宽和阵列孔径,通过空、时2维处理实现了高分辨的距离测量和角度测量。但是该方法只对阵列雷达有效。文献[8]研究了两种捷变频联合正交频分复用(Frequency Agility-OFDM, FA-OFDM)雷达信号形式:随机组合式跳频和随机分布式跳频,并且分析了两种信号的模糊函数,为FA-OFDM雷达的回波信号处理提供了思路。基于此,本文将OFDM信号应用于捷变频雷达,在同1个脉冲时刻发射多个频率随机跳变的子载波,相邻脉冲之间的载频也是随机跳变的,并且各子载波之间两两正交。FA-OFDM雷达波形设计灵活,同时具备距离高分辨和多普勒高分辨特点,并且通过频率捷变有效对抗窄带瞄准压制式干扰,既保证了雷达的低截获性,又提高了雷达的抗干扰能力。然而,对于FA-OFDM雷达而言,目标参数估计仍然是一个亟待解决的难题。许多学者首先针对步进频OFDM雷达的参数估计作了相关研究。文献[9]针对步进频OFDM雷达提出了一种基于大射频带宽、小基带带宽和低A/D采样率的信号处理方法,同时获得高分辨的距离-速度剖面图。类似地,文献[10]将宽带OFDM信号与步进频雷达相结合,在不增加运算复杂度的基础上同时实现了距离高分辨和无模糊测速。但以上两种方法的前提都是频率有规律地变化,当频率随机跳变时,多普勒不连续,该方法失效。文献[11]研究了频率捷变稀疏OFDM雷达的参数估计问题,通过对多个窄带子载波的压缩感知处理等效合成宽带OFDM,同时实现了距离和速度的高分辨。但该方法只对低速目标进行了仿真分析。针对上述问题,本文提出了一种基于期望最大化(Expectation Maximization, EM)算法的FA-OFDM雷达高速多目标参数估计的方法。本方法不仅结合了OFDM信号和捷变频雷达的双重优势,并且能够对高速多目标的参数同时进行估计。

2 FA-OFDM雷达信号模型

在FA-OFDM雷达系统中,相邻发射脉冲之间的信号载频随机跳变,并且单个脉冲宽度内包含多个频率捷变的子载波,从而获得大的时宽带宽积,提高雷达分辨率,同时使得雷达能有效地规避窄带瞄准式干扰。本文发射线性调频(Liner Frequency Modulation, LFM)信号,示意图如图1所示。

图1中, T_p 为脉冲宽度, T_r 为脉冲重复周期。FA-OFDM雷达发射信号的数学表达式为

$$s_t(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} u(t - nT_r) \quad (1)$$

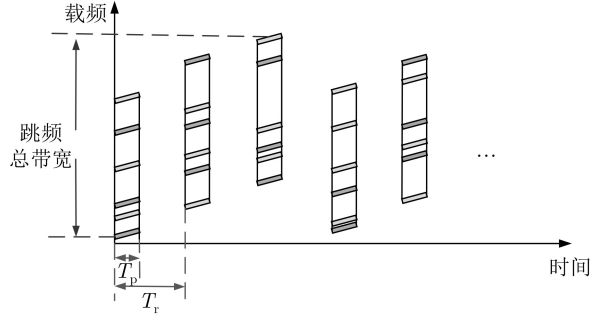


图1 FA-OFDM雷达发射信号示意图

其中, f_0 为中心载频, N 为1个相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)内的脉冲数。复包络 $u(t)$ 可以表示为

$$u(t) = \sum_{m=1}^M \text{rect}(t/T_p) \cdot \exp(j2\pi a(m)\Delta f t) \cdot \exp(j\pi\gamma t^2) \quad (2)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为单位矩形函数, $\gamma = B_s/T_p$ 为调频率, B_s 为子载波的带宽, T_p 为脉冲宽度。 M 为每个脉冲内的子载波数, M_1 为总的跳频点数, 并且满足 $M_1 > M$ 。 $a(m) \in [0, 1, \dots, M_1 - 1]$ 为随机频率调制码字, Δf 为跳频间隔。每个脉冲内第 m 个子载波的频率为

$$f_m = f_0 + a(m)\Delta f \quad (3)$$

为了保证子载波之间的正交性,选取跳频间隔 $\Delta f = 1/T_p$, 在1个脉冲宽度内,子载波满足

$$\int_0^{T_p} \exp(j2\pi f_m t) \cdot \exp(j2\pi f_n t) dt = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (4)$$

假设观测场景内有 G 个目标,回波信号可以表示为

$$s_r(t) = \sum_{g=1}^G \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=1}^M [A_g \cdot \text{rect}(t - nT_r - \tau_g^n/T_p) \cdot \exp(j2\pi f_m(t - nT_r - \tau_g^n)) \cdot \exp(j\pi\gamma(t - nT_r - \tau_g^n)^2)] + \beta(t) \quad (5)$$

其中, $\tau_g^n = 2R_g^n/c = 2(R_g - v_g(n-1)T_r)/c$ 为第 g 个目标回波相对于第 n 个脉冲的时延, c 为光速。 A_g , R_g 和 v_g 分别为第 g 个目标的回波幅度,初始距离和径向速度, $\beta(t)$ 为系统噪声。

第 n 个脉冲的回波信号经过下变频后可以得到基带信号为

$$s_{\text{base}}^n(t) = \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M [A_g \cdot \text{rect}(t - \tau_g^n/T_p) \cdot \exp(-j2\pi f_m \tau_g^n) \cdot \exp(j\pi\gamma(t - \tau_g^n)^2)] + \beta(t) \quad (6)$$

3 距离高分辨稀疏重构

传统的捷变频雷达在不同脉冲时刻发射多个载频随机跳变的脉冲信号, 各脉冲回波间的多普勒不连续, 无法直接通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)进行动目标检测(Moving Target Detection, MTD)。为了克服这一问题, 许多学者采用压缩感知(Compress Sensing, CS)方法实现稀疏重构, 以此代替传统MTD^[12-14], 进而得到目标的距离-多普勒2维高分辨信息。而本文考虑的FA-OFDM信号是在1个脉冲宽度内同时发射多个频率捷变的子载波。因此, 对单个脉冲的所有子载波回波信号先进行脉冲压缩, 再通过CS实现稀疏重构, 即可得到目标在该时刻的高分辨距离信息。对第 n 个脉冲回波而言, 匹配滤波的输出为

$$\begin{aligned} s_{\text{comp}}^n &= \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M [A_g \cdot \text{sinc}(\pi B_s(t - \tau_g^n)) \\ &\quad \cdot \exp(-j4\pi f_m R_g^n/c)] + \beta(t) \\ &= \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M [A_g \text{sinc}(\pi B_s(t - \tau_g^n)) \\ &\quad \cdot \exp(-j4\pi f_0 R_g^n/c) \\ &\quad \cdot \exp(-j4\pi a(m)\Delta f R_g^n/c)] + \beta(t) \end{aligned} \quad (7)$$

通常, 1个距离单元内的目标个数较少, 观测场景满足稀疏性, 可以通过CS进行高分辨场景重构^[15]。将目标场景沿距离向分为 K 个独立的细分单元, 则第 k 个单元的回波信号可以表示为

$$x_k(t) = \sum_{m=1}^M p_k \cdot q_k(m) + \beta(t) \quad (8)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} p_k &= A'_g \cdot \exp(-j4\pi f_0 R_k/c) \\ q_k(m) &= \exp(-j4\pi a(m)\Delta f R_k/c) \\ m &= 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, $A'_g = A_g \cdot \text{sinc}(\dots B_s(t - \tau_g^n))$ 表示第 g 个目标回波经过脉冲压缩之后的幅度, $p(k)$ 是待重构项, $q_k(m)$ 为距离相位项。

根据式(8)和式(9)构建感知矩阵为

$$\mathbf{E} = \left\{ \underbrace{\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_k \quad \mathbf{e}_K}_K \right\}_{M \times K} \quad (10)$$

$$\mathbf{e}_k = e^{-j4\pi f_m R_k/c} \quad (11)$$

则单个粗分辨距离单元的回波信号可以重写为

$$\mathbf{x} = \mathbf{E}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\beta} \quad (12)$$

式(12)中, $\boldsymbol{\beta}$ 为噪声向量。

目标参数估计问题可以转化为通过观测值 $\mathbf{x}$ 和

感知矩阵 $\mathbf{E}$ 重构未知向量 $\boldsymbol{\theta}$ (包含目标距离信息 R_g)的凸优化问题。通过求解 l_1 范数优化问题对目标参数进行估计, 即

$$\langle \hat{\boldsymbol{\theta}} \rangle = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} (\|\boldsymbol{\theta}\|_1), \quad \|\mathbf{x} - \mathbf{E}\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \varepsilon \quad (13)$$

其中, $\varepsilon = \|\boldsymbol{\beta}\|_2$ 表示噪声, $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 为 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值。本文采用CS方法实现场景重构, 利用单个脉冲的回波信号即可得到1维高分辨距离信息, 由第 n 个脉冲回波重构出的第 g 个目标的高分辨距离单元可以表示为

$$y_g^n = \sum_{i=1}^K A'_g \cdot \delta(i\Delta r - R_g^n) \quad (14)$$

其中, $\Delta r = c/2M_1\Delta f$ 为细分距离单元, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数。

4 基于EM算法的高速多目标速度估计

依据第3节所述的方法, 对每个脉冲的回波信号都进行脉冲压缩和稀疏重构处理, 可以得到多目标在不同时刻的高分辨距离信息。此时, 通常能够通过计算时刻-距离直线的斜率来估计目标的速度。当观测场景中只存在单个目标时, 可以采用最小二乘法拟合直线。但是, 当观测场景中存在多个目标时, 最小二乘法不再适用。本节中采用EM算法来估计多目标的速度并同时拟合多条时间-距离直线。首先, 根据多个目标在不同时刻的高分辨距离信息, 建立混合高斯模型(包括模型参数和目标距离、速度参数), 进一步地, 采用EM算法同时估计模型参数和多个目标的距离、速度信息, 并进行多直线拟合^[16,17]。

4.1 混合高斯模型

根据式(14)构建多个目标的时间-高分辨距离向量

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \left\{ \underbrace{[y_1^1 \dots y_g^1 \dots y_G^1]}_G \dots \underbrace{[y_1^N \dots y_g^N \dots y_G^N]}_G \right\}_{1 \times (G \times N)} \\ &= [y_1 \dots y_j \dots y_J]_{1 \times J}, \\ &\quad g = 1, 2, \dots, G, \quad j = 1, 2, \dots, G \times N \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{Y}$ 称为观测数据。由第 n 个脉冲回波重构出的第 g 个目标的距离估计误差可以表示为 $\xi_g^n = y_g^n - R_g^n = y_g^n - (R_g - v_g(n-1)T_r)$, 假设它服从参数为 $(0, \Sigma_g)$ 的高斯分布, 其分布密度函数为

$$\begin{aligned} \phi(y|\Sigma_g, R_g, v_g) \\ = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma_g) \cdot \exp(-(y - (R_g - v_g(n-1)T_r))^2/2\sigma_g^2) \end{aligned} \quad (16)$$

G 个目标对应的距离测量误差对应 G 个不同参数的高斯分布模型, 则混合高斯模型的概率分布为

$$P(y|\Sigma, R_g, v_g) = \sum_{g=1}^G \alpha \phi(y|\Sigma_g, R_g, v_g) \quad (17)$$

其中, $\alpha = 1/G$ 为混合系数, $\Sigma = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_G)$ 。本文可以用EM算法估计混合模型的参数 Σ 以及目标参数 R_g 和 v_g 。

4.2 EM算法参数估计

EM算法是由Dempester等人于1977年提出的一种迭代算法, 用于含有隐变量的概率模型参数的极大似然估计。EM算法的每次迭代由两步组成: E步: 求期望; M步: 求极大, 所以这一算法又称为期望极大算法^[17]。本文采用EM算法进行参数估计的具体步骤如下。

(1) 明确隐变量: 写出完全数据的对数似然函数

如4.1节所述, 观测数据 y_j 是已知的, 但反映观测数据 y_j 来自第 g 个分模型的数据是未知的, 用隐变量 ρ_{jg} 表示, 其定义为

$$\rho_{jg} = \begin{cases} 1, & y_j \text{ 来自第 } g \text{ 个分模型} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (18)$$

则完全数据表示为 $(y_j; \rho_{j1}, \rho_{j2}, \dots, \rho_{jG})$ 。那么, 完全数据的对数似然函数为

$$\begin{aligned} \lg P(y, \rho | \Sigma, R_g, v_g) &= \lg \prod_{j=1}^{G \times N} P(y_j; \rho_{j1}, \rho_{j2}, \dots, \rho_{jG} | \Sigma, R_g, v_g) \\ &= \sum_{g=1}^G \left\{ n_g \lg \alpha + \sum_{j=1}^{G \times N} \rho_{jg} [\lg(1/\sqrt{2\pi}) - \lg \sigma_g \right. \\ &\quad \left. - (y_j - (R_g - v_g(n-1)T_r))^2 / 2\sigma_g^2] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $n_g = \sum_{j=1}^{G \times N} \rho_{jg}$, $\sum_{g=1}^G n_g = G \times N$ 。

(2) EM算法的E步: 确定迭代函数 $Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)})$

$$\begin{aligned} Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)}) &= E[\lg P(y, \rho | \Sigma, R_g, v_g) | y, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)}] \\ &= \sum_{g=1}^G \left\{ n_g \lg \alpha + \sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg} [\lg(1/\sqrt{2\pi}) - \lg \sigma_g \right. \\ &\quad \left. - (y_j - (R_g - v_g(n-1)T_r))^2 / 2\sigma_g^2] \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, i 为迭代次数, $\hat{\rho}_{jg} = E[\rho_{jg}] = \alpha \phi(y_j | \Sigma_g, R_g, v_g) / \sum_{g=1}^G \alpha \phi(y_j | \Sigma_g, R_g, v_g)$ 。

(3) EM算法的M步: 求极大值

迭代的M步是求函数 $Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)})$ 分别关于待估计参数的极大值, 即求新一轮迭代的模型参数和目标参数

$$\left. \begin{aligned} \Sigma^{(i+1)} &= \arg \max_{\Sigma} Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)}) \\ R_g^{(i+1)} &= \arg \max_{R_g} Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)}) \\ v_g^{(i+1)} &= \arg \max_{v_g} Q(\Sigma, R_g, v_g, \Sigma^{(i)}, R_g^{(i)}, v_g^{(i)}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

求 $\hat{\Sigma}_g, R_g, \hat{v}_g$ 只需将式(21)分别对 $\hat{\Sigma}_g, R_g, \hat{v}_g$ 求偏导并令其为0, 即可得到。结果为

$$\hat{\Sigma}_g^{(i+1)} = \frac{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg} (y_j - (R_g^{(i)} - v_g^{(i)}(n-1)T_r))^2}{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg}} \quad (22)$$

$$\hat{R}_g^{(i+1)} = \frac{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg} (y_j - \hat{v}_g^{(i)}(n-1)T_r)}{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg}} \quad (23)$$

$$\hat{v}_g^{(i+1)} = \frac{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg} (y_j - \hat{R}_g^{(i)})((n-1)T_r)}{\sum_{j=1}^{G \times N} \hat{\rho}_{jg} ((n-1)T_r)^2} \quad (24)$$

取合适的初值开始迭代, 并且不断重复, 直至相邻两次估计值相差满足精度要求, 则停止迭代。

至此, 由式(22)–式(24)可以得到待估计的混合高斯模型参数和目标参数, 利用这些参数进行多直线拟合, $\hat{R}_g$ 和 $\hat{v}_g$ 分别为直线的纵轴截距和斜率。在本文考虑的问题中, $\hat{R}_g$ 和 $\hat{v}_g$ 分别对应了目标的初始距离和径向速度, 也即目标参数得以估计。

综上, 本文所提算法的信号处理流程图如图2所示。

5 仿真结果及分析

5.1 仿真结果

为了分析本文所提方法的有效性, 本节分别对单目标和多目标场景进行了仿真, 并且着重考虑目标的参数估计。FA-OFDM雷达将相互正交的窄带OFDM信号与捷变频技术相结合, 每个脉冲同时发射多个频率随机跳变的子载波, 其发射信号示意图如第2节中图1所示, 具体参数如表1所示。

单目标仿真: 单个目标的参数为表1中第3个目标的参数, 初始距离为4006 m, 径向速度为5800 m/s。由表1可见, FA-OFDM雷达在每个脉冲宽度内均同时发射64个频率捷变的子载波。首先对单个脉冲内所有子载波的回波进行脉冲压缩, 进而采用稀疏重构方法获得距离高分辨信息。图3(a)是第1个脉冲回波的脉冲压缩结果的俯视图, 目标

回波能量集中在1个粗分辨距离单元内。图3(b)是第1个脉冲回波的CS稀疏重构结果，可以得到目标的细分辨距离单元，根据峰值所在的位置计算出目标的初始距离为4006.1 m，与真实值之间的误差为0.02%。类似地，对每个脉冲的回波均进行脉冲压缩和稀疏重构处理，得到不同时刻的高分辨距离信

息，画出时间-距离图，如图3(c)所示。将不同时刻的高分辨距离信息作为观测数据，分别采用最小二乘法法和EM法进行参数估计，直线拟合的结果如图3(d)和图3(e)所示，直线的纵轴截距代表目标初始距离，斜率代表目标速度，可以看出采用两种方法估计出的速度均为5798.81 m/s，误差为0.02%。

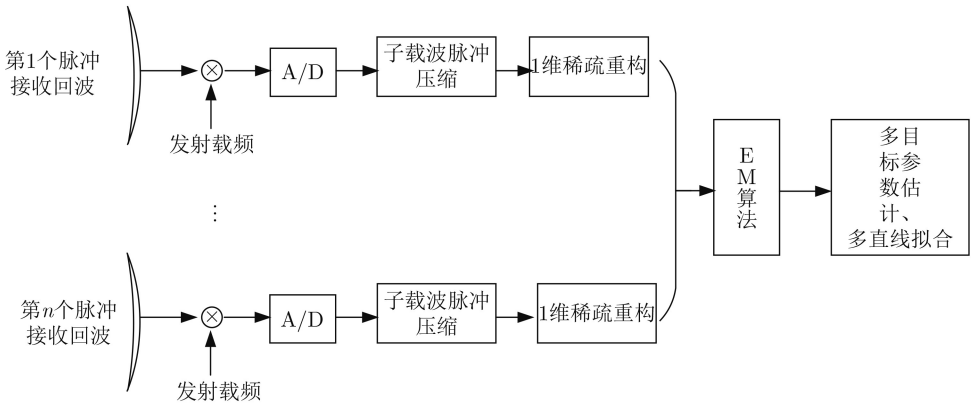


图 2 基于EM算法的高速多目标参数估计方法的流程图

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
脉冲宽度	4 μs	脉冲重复频率	25 kHz
信号带宽	24 MHz	采样频率	48 MHz
子载波个数	64	中心载频	14 GHz
跳频总数	128	跳频带宽	20 MHz
脉冲总数	64	信噪比	-12 dB
目标距离	[3994,4001,4006] m	目标速度	[600,1220,5800] m/s

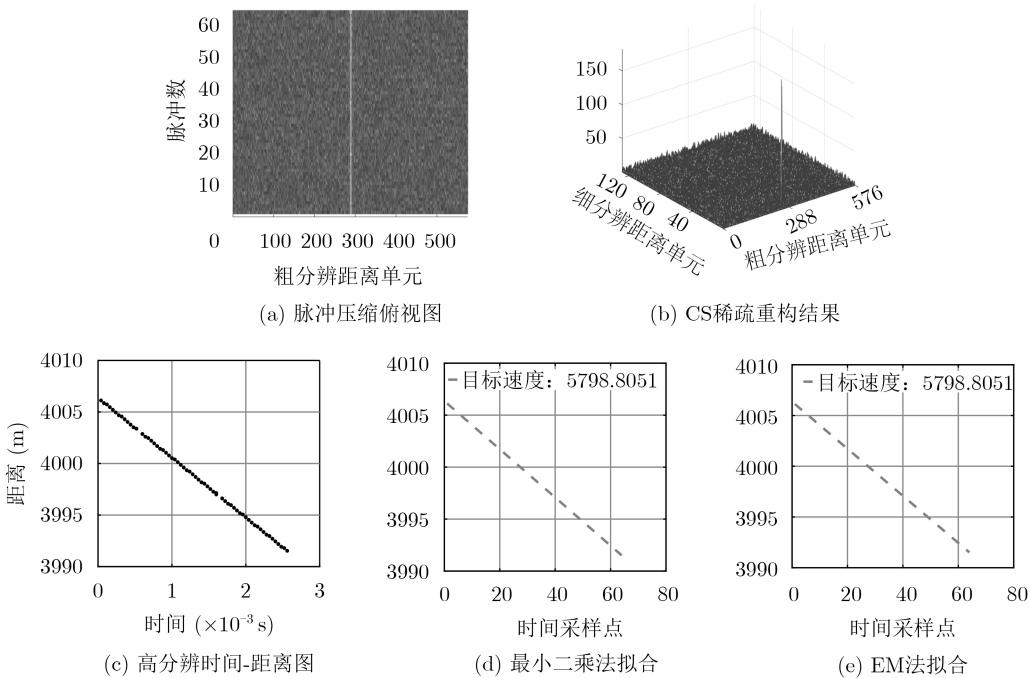


图 3 单目标仿真结果

图3的仿真结果表明对于单个目标而言,最小二乘法和EM法均可以对目标参数进行正确估计,并且由于两种算法在直线拟合时都采用了最小均方误差准则,因此,直线拟合的结果完全相同,直线斜率所表示的目标速度也完全一致。

多目标仿真:假设观测场景内存在3个恒速运动的目标,参数如表1所示,采用所提方法同时对3个目标的速度进行估计,仿真结果如图4所示。与图3类似,图4(a)是第1个脉冲回波进行脉冲压缩后的俯视图,图4(b)是第1个脉冲的稀疏重构结果,根据峰值所在的粗分辨单元和细分辨单元位置计算出3个目标的距离分别为[3994.1, 4006.1, 4001.2] m,与真实距离的误差均小于0.1%。进一步地,分别对64个脉冲回波进行稀疏重构,可以得到不同时刻的高分辨距离信息,画出时间-距离图,如图4(c)所示。最后分别采用最小二乘法和EM法对目标进行参数估计,结果如图4(d)和图4(e)所示。图4(d)中,拟合结果只有1条直线,它是将每个时刻多个目标的高分辨距离值先取平均,再进行直线拟合,由此拟合出的直线的斜率无法代表真实的目标速度。可以看出最小二乘法只适用于单目标的情况,不能用于多目标的速度估计。而EM算法可以同时拟合出多条直线,采用EM算法估计出的目标速度分别为[599.61, 1222.70, 5801.70] m/s,误差分别为0.07%, 0.22%, 0.03%。在一定误差允许范围内,本文所提算法可以有效地对多目标的速度同时进行估计。

5.2 性能分析

为了进一步研究本文所提算法在不同条件下的适用性,本节对不同信噪比条件下的检测概率和不同速度条件下的估计误差进行了分析。

首先,本节研究了当输入信噪比(雷达接收的原始回波的信号与噪声的功率之比)在-26~-18 dB范围内变化时的检测概率。由表1可以分别计算得到脉冲压缩和相参积累增益的理论值: $D_{\text{comp}} = 10 \lg(\sqrt{BT_p}) = 9.91 \text{ dB}$, $D_{\text{cs}} = 10 \lg(M) = 18.06 \text{ dB}$,则总的信噪比增益为 $D_{\text{comp}} + D_{\text{cs}} = 27.97 \text{ dB}$ 。此时稀疏重构的输出信噪比的范围为2~10 dB。500次蒙特卡洛仿真的结果如图5所示。这里的检测概率指的是,采用所提算法同时对多个目标的速度进行估计,误差均小于5%时,即看作是正确检测。从图5可以看出,当输出信噪比低于3 dB时,无法对目标进行正确的参数估计,所提算法几乎完全失效;随着信噪比的增大,检测概率逐渐提高;当输出信噪比大于7 dB时,检测概率为1,所提算法可以准确地同时对多个目标速度进行估计。

此外,目标本身的速度对所提算法的速度相对估计误差也有影响。设定信噪比为-12 dB,分析不同速度下的相对估计误差,作500次蒙特卡洛仿真,结果如图6所示。由表1所给参数可以计算出当目标速度小于25.43 m/s时,在1个CPI内目标没有跨越1个高分辨距离单元,速度估计值为0,相对误差为100%。当目标速度大于临界速度时,在1个CPI内目标能够跨越高分辨距离单元,可以近似认

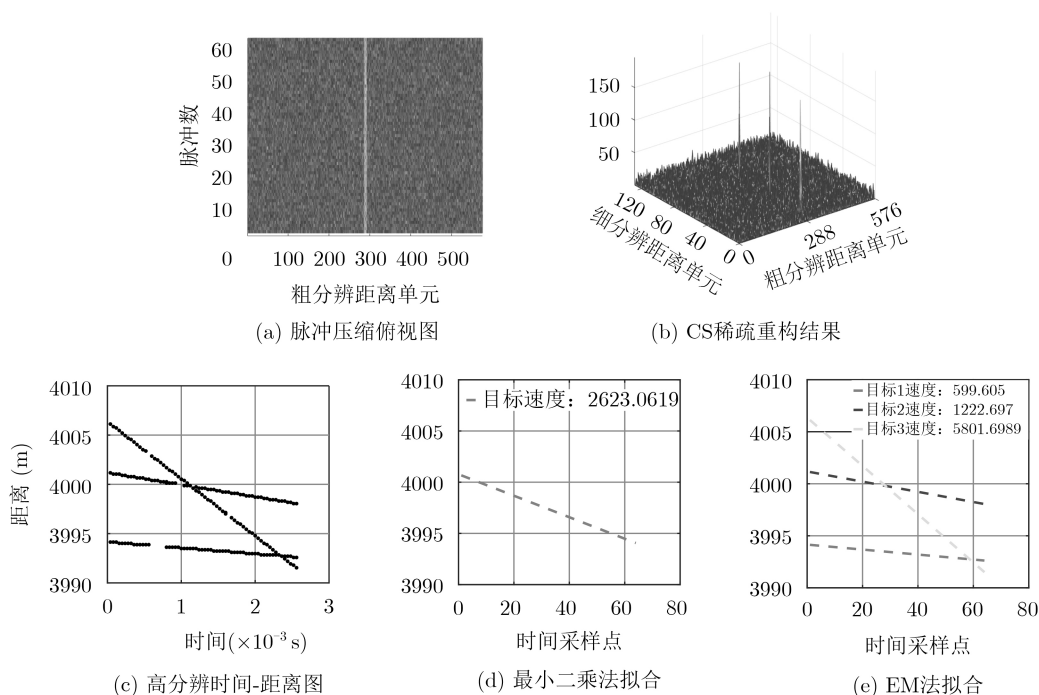


图4 多目标仿真结果

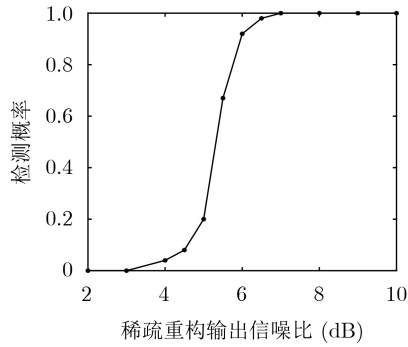


图5 信噪比对检测概率的影响

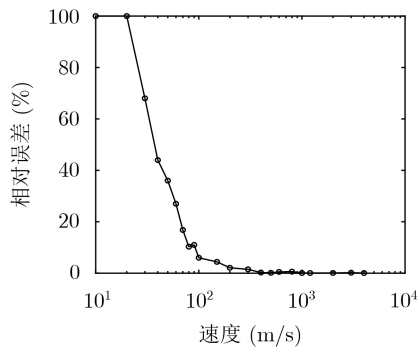


图6 目标速度对估计误差的影响

为由稀疏重构导致的目标高分辨距离测量误差为一定值。因此，绝对估计误差几乎不随着速度自身的变化而变化，当目标自身速度不断增大，相对误差逐渐降低。直至目标速度大于1000 m/s时，相对误差小于0.1%，可以忽略不计。

6 结束语

针对FA-OFDM雷达，本文提出了一种基于EM算法的参数估计的方法。将OFDM信号与传统捷变频雷达相结合，解决了高速多目标参数的同时估计的问题。通过稀疏重构得到了多个目标在不同脉冲时刻的高分辨距离，并且采用EM算法同时估计了多个目标的速度，进而拟合多条直线。同基于最小二乘法的直线拟合方法相比，本方法能够同时对多个目标进行参数估计；并且随着目标速度的增大，相对误差逐渐减小，本方法更适用于目标高速运动的情况。仿真实验验证了所提方法的有效性与正确性。

参考文献

[1] 霍凯, 赵晶晶. OFDM新体制雷达研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2776–2789. doi: [10.11999/JEIT150335](#).
HUO Kai and ZHAO Jingjing. The Development and prospect of the new OFDM radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2776–2789. doi:

[10.11999/JEIT150335](#).
[2] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](#).
XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](#).
[3] WANG Jun, ZHANG Bocheng, and LEI Peng. Ambiguity function analysis for OFDM radar signals[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059592](#).
[4] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于OFDM-LFM信号的MIMO雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](#).
LIU Bingfan and CHEN Baixiao. Integration of MIMO Radar and Communication with OFDM-LFM Signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](#).
[5] SCHWEIZER B, SCHINDLER D, KNILL C, *et al*. Expanding the unambiguous velocity limitation of the stepped-carrier OFDM radar scheme[C]. The 15th European Radar Conference, Madrid, Spain, 2018: 22–25. doi: [10.23919/EuRAD.2018.8546621](#).
[6] 黄瑞, 杜小勇, 胡卫东. OFDM雷达多目标运动参数的近似最大似然估计[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 507–513. doi: [10.12000/JR17116](#).
HUANG Rui, DU Xiaoyong, and HU Weidong. Approximate maximum likelihood estimator of multi-target motion parameters for orthogonal frequency division multiplexing radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 507–513. doi: [10.12000/JR17116](#).
[7] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059539](#).
[8] LELLOUCH G, TRAN P, PRIBIC R, *et al*. OFDM waveforms for frequency agility and opportunities for Doppler processing in radar[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720798](#).
[9] SCHWEIZER B, KNILL C, SCHINDLER D, *et al*. Stepped-Carrier OFDM-Radar processing scheme to retrieve high-resolution range-velocity profile at low sampling rate[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1610–1618. doi: [10.1109/TMTT.2017.2751463](#).
[10] LELLOUCH G, MISHRA A K, and INGGS M. Stepped OFDM radar technique to resolve range and Doppler

- simultaneously[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(2): 937–950. doi: [10.1109/TAES.2014.130753](#).
- [11] KNILL C, SCHWEIZER B, ROOS F, *et al.* High range and Doppler resolution by application of compressed sensing using low baseband bandwidth OFDM radar[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(7): 3535–3546. doi: [10.1109/TMTT.2018.2830389](#).
- [12] LI Hongtao, WANG Chaoyu, WANG Ke, *et al.* High resolution range profile of compressive sensing radar with low computational complexity[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(8): 984–990. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0454](#).
- [13] KNILL C, ROOS F, SCHWEIZER B, *et al.* Random multiplexing for an MIMO-OFDM radar with compressed sensing-based reconstruction[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(4): 300–302. doi: [10.1109/LMWC.2019.2901405](#).
- [14] QUAN Yinghui, LI Yachao, WU Yaojun, *et al.* Moving target detection for frequency agility radar by sparse reconstruction[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 094703. doi: [10.1063/1.4962700](#).
- [15] QUAN Yinghui, WU Yaojun, LI Yachao, *et al.* Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 348–352. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0421](#).
- [16] CHOI J. Sparse signal detection for space shift keying using the Monte Carlo EM algorithm[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(7): 974–978. doi: [10.1109/LSP.2016.2577707](#).
- [17] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 162–165.
- 全英汇: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达信号处理, 主动波形对抗.
- 高 霞: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 沙明辉: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为雷达抗干扰和信号处理.
- 陈侠达: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 李亚超: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达成像和实时信号处理.
- 邢孟道: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达成像和实时信号处理.
- 岳超良: 男, 1979年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理.

责任编辑: 余 蓉