

基于Ransac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^① 高霞^{*①} 沙明辉^② 方文^① 李亚超^③ 邢孟道^③

^①(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

^②(北京无线电测量研究所 北京 100854)

^③(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: 在现代雷达电子战场中, 目标检测与其参数估计有着非常重要的意义。因此, 该文提出了一种基于随机抽样一致算法(Ransac)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的方法。首先, 在传统捷变频雷达的每个脉冲内同时发射多个频率随机跳变的窄带OFDM子载波。将单个脉冲内所有子载波的回波信号进行脉冲压缩后, 采用迭代自适应谱估计(IAA)算法合成目标的高分辨距离。然后, 分别对各个脉冲的回波进行脉冲压缩和迭代自适应谱估计, 得到不同脉冲时刻的高分辨距离, 构成观测数据集。再根据Ransac算法估计信号参数模型的步骤, 拟合多条时间-距离直线, 进而对高速运动的多个目标同时进行参数估计。最后, 分别分析了信噪比(SNR)对检测概率以及目标自身速度对其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: 参数估计; 高速多目标; 捷变频联合正交频分复用雷达; 迭代自适应谱估计算法; 随机抽样一致算法

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-1970-08

DOI: 10.11999/JEIT200529

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

QUAN Yinghui^① GAO Xia^① SHA Minghui^② FANG Wen^①

LI Yachao^③ XING Mengdao^③

^①(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

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

^③(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In modern radar electronic battlefield, target detection and parameter estimation have great significance. Therefore, a high-speed multi-target parameter estimation method for Frequency Agile-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (FA-OFDM) radar based on Random sampling consensus (Ransac) algorithm is proposed in this paper. Firstly, multiple narrowband OFDM subcarriers with random frequency hopping are simultaneously transmitted in each pulse of conventional frequency agile radar. The echo signals of all subcarriers in a single pulse are compressed, and then the high-resolution range of the target is synthesized by Iterative Adaptive Approach (IAA) algorithm. Furthermore, the echoes of each pulse are compressed and iterative adaptive spectrum estimated, and the high-resolution distance of different pulse time is obtained to form the observation data set. Then, according to the steps of the Ransac algorithm to estimate the signal parameter model, multiple time-distance lines are fitted, and then parameters of multiple high-speed moving targets are estimated at the same time. 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: Parameter estimation; High speed multi-target; Frequency Agility-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (FA-OFDM) radar; Iterative Adaptive Approach (IAA) algorithm; Random sampling consensus (Ransac) algorithm

收稿日期: 2020-06-29; 改回日期: 2020-12-06; 网络出版: 2020-12-15

*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

1 引言

随着现代电子技术的迅速发展,电磁环境日益复杂,雷达面临的威胁不断增多,目标检测和参数估计的能力受到严重影响。为了提高综合作战性能,许多新体制雷达应运而生^[1,2]。而广泛应用于通信领域的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术也被引入到雷达系统中,其易于实现频谱资源控制和无线环境下的高速传输的优势,吸引了大批学者的关注^[3,4]。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^[5]。文献^[6]将OFDM信号运用于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达,研究了雷达通信一体化信号的共享设计。文献^[7,8]在步进频雷达中采用了OFDM技术,采用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)技术合成目标的距离-速度2维像,但是该方法的前提是目标个数少并且速度相似,当观测场景内存在多个速度相差很大的目标时,这一方法不再适用。文献^[9]提出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,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。然而,对于FA-OFDM雷达而言,发射信号的频率随机跳变导致回波相位不连续,使得雷达难以对目标进行检测,其目标参数估计仍是一个亟待解决的问题。文献^[10]提出了步进频OFDM雷达实现距离高分辨的方法,但是该方法对速度敏感,只适用于低速目标。文献^[8]针对步进频OFDM雷达多目标参数估计问题,提出了一种改进的DFT信号处理方法,该方法以较低的A/D采样率在不增加计算量的同时获取目标距离-速度信息。文献^[11]针对FA-OFDM雷达通过合成不同载波的多个窄带信号来实现距离高分辨,但是该方法只适用于静止或低速目标。文献^[8]研究了频率捷变稀疏OFDM雷达目标参数估计的问题,通过对多个窄带子载波采用压缩感知技术处理,等效合成大带宽,获取目标高分辨距离-速度信息,但该方法只对低速目标进行了研究。文献^[12]针对OFDM雷达,提出了一种基于通道分离和最大似然原理相结合的运动参数估计方法,利用Keystone变换CLEAN技术对距离-多普勒2维谱进行谱峰搜索,获得各个目标的位置和速度参数估计量,但该方法采用牛顿迭代算法对似然函数进行优化,运算量过大。基于此,文献^[13]提出了一种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

多目标参数估计的方法,但是该方法只适用于信噪比较高的情况,当有大量噪声存在时该方法几乎完全失效。针对上述问题,本文提出一种基于随机抽样一致算法(Random sample consensus, Ransac)的FA-OFDM雷达高速多目标参数估计的方法。本方法不仅能够获得目标的高分辨距离信息,还可以在低信噪比情况下有效地对高速多目标的速度进行同时估计。

2 FA-OFDM雷达信号模型

OFDM雷达发射波形设计灵活,理论上可以进行任何形式的调制,最常见的有线性调频调制(Linear Frequency Modulation, LFM)和相位编码(Phase Coded, PC)调制。本文采用LFM调制,发射信号示意图如图1所示。FA-OFDM雷达发射脉冲间载频捷变的信号,并且每个脉冲宽度内同时发射多个频率随机跳变的子载波,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。

图1中, T_p 表示脉冲宽度, T_r 表示脉冲重复周期。FA-OFDM雷达的发射信号可以写为

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

其中, f_0 为发射信号的中心载频, N 为1个相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)内的脉冲数目。 $u(t)$ 为发射信号的复包络,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, $\text{rect}(\cdot)$ 为单位矩形窗函数, $\gamma = B_s/T_p$ 为线性调频率, B_s 为子载波的带宽。每个脉冲内的子载波数为 M ,总的跳频点数为 M_1 ,为了保证频率跳变的随机性需满足 $M_1 > M$ 。 $a(m) \in [0, 1, \dots, M_1 - 1]$ 是一个随机整数,它表示频率调制码字, Δf 为跳频间隔,则每个脉冲内第 m 个子载波的频率可以表示为

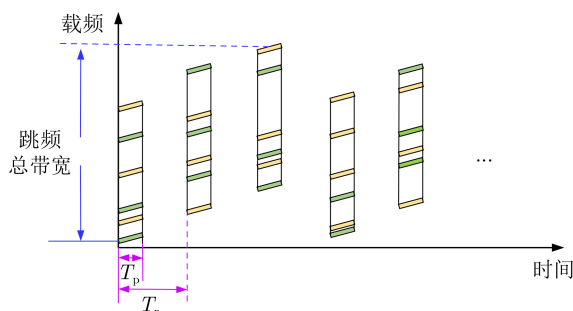


图1 FA-OFDM雷达发射信号示意图

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

为了保证子载波之间的正交性, 选取跳频间隔 $\Delta f = 1/T_p$, 在单个脉冲宽度内, 发射信号需满足

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

假设观测场景符合远场条件, 经过 G 个目标散射后雷达接收的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 个发射脉冲的时延, 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, $\beta(t)$ 表示系统噪声。

回波信号经过下变频处理后得到基带信号, 则第 n 个脉冲的信号可以表示为

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

3 基于IAA的目标高分辨距离合成方法

正如文献[13]所述, 由于载频捷变导致回波信号的多普勒相位不连续, 许多学者采用基于压缩感知(Compress Sensing, CS)的方法实现目标稀疏重构[14,15]。而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[13]。本文采用迭代自适应谱估计(Iterative Adaptive Approach, IAA)方法代替基于CS的稀疏重构方法来合成目标的高分辨距离[16]。

对第 n 个脉冲的回波而言, 匹配滤波输出为

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

与基于CS的稀疏重构方法类似, 当目标场景满足稀疏性时, IAA算法也可以用于目标的距离维谱估计。该算法是由Jensen等人在2009年提出

的[17-19], 它的基本思想是通过循环迭代, 利用上一次迭代的谱估计结果构建信号协方差矩阵, 并将其逆阵作为加权矩阵代入加权最小二乘中求解。

将目标场景沿距离向分为 K 个独立的细分单元, 则式(7)可以重写为

$$s_{\text{comp}}^n = \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K p_k(R_k) \cdot \mathbf{q}_k(m, R_k) + \beta \quad (8)$$

其中, $\mathbf{q}_k(m, R_k) = \exp(-j4\pi a(m)\Delta f R_k/c)$ 表示各个细分单元 R_k 对应的导向矢量, $p_k(R_k) = A' \cdot \exp(-j4\pi f_0 R_k/c)$ 表示导向矢量对应的幅值, $A' = A \cdot \text{sinc}(\pi B_s(t - \tau_n))$, β 为噪声向量。

则IAA所解决的优化问题为

$$\min_{p^i(R_k)} (s_{\text{comp}}^n - p^i(R_k)\mathbf{q}(m, R_k))^H \cdot \mathbf{W}^i (s_{\text{comp}}^n - p^i(R_k)\mathbf{q}(m, R_k)) \quad (9)$$

其中, 上标 i 表示第 i 次迭代, $p^i(R_k)$ 表示第 i 次迭代的细分距离谱估计结果, \mathbf{W}^i 表示第 i 次迭代的加权矩阵, 它是由第 $i-1$ 次迭代谱估计结果构建的信号协方差矩阵的逆阵

$$\begin{aligned} \mathbf{W}^i &= (\hat{\mathbf{R}}_x^i)^{-1} \\ &= \left(\sum_{k=1}^K |\hat{p}^{i-1}(R_k)|^2 \mathbf{q}(m, R_k) \mathbf{q}^H(m, R_k) \right)^{-1} \quad (10) \end{aligned}$$

优化问题式(9)的解为

$$\hat{p}^i(R_k) = \frac{\mathbf{q}^H(m, R_k) \mathbf{W}^i s_{\text{comp}}^n}{\mathbf{q}^H(m, R_k) \mathbf{W}^i \mathbf{q}^H(m, R_k)} \quad (11)$$

迭代次数一般设置为10~15, 取最后一次迭代的输出作为最终结果。则由第 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

$$y_g^n = \sum_{k=1}^K A_g' \cdot \delta(k\Delta r - R_g^n) \quad (12)$$

其中

$$\Delta r = \frac{c}{2M_1\Delta f} \quad (13)$$

表示细分距离单元, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数。

假设3个相邻目标位于第290个粗分辨单元, 细分距离单元的索引分别为[4, 13, 20]。FA-OFDM雷达系统在单个脉冲宽度内同时发射多个频率捷变的子载波, 合成大带宽, 提高了距离分辨率。对第1个脉冲中所有子载波的回波进行匹配滤波的输出如图2(a)所示, 可以看出结果中只有1个峰值, 无法正确检测目标个数。而采用IAA方法合成目标高分辨距离的结果如图2(b)所示, 3个相邻目标可以被准确区分。

4 基于Ransac算法的高速多目标速度估计

如第2节和第3节所述方法，通过对不同脉冲时刻的回波进行匹配滤波和迭代自适应谱估计，得到多个目标在不同时刻的距离高分辨信息。根据目标的时刻-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来拟合直线，但当存在多个目标时，最小二乘法不再适用。文献[13]提出了基于EM算法的多目标速度估计方法，这一方法虽然可以对高速运动的多目标进行有效的速度估计，但是对目标回波的信噪比要求比较高，当信噪比低于一定值时，谱估计的结果中出现很多无效的噪声点，它们会严重影响EM算法的性能，甚至可能导致直线拟合失败。为了解决这一问题，本文提出了一种基于Ransac算法的高速多目标速度估计方法。

4.1 Ransac算法

随机抽样一致算法(Ransac)，最早是由Fischler和Bolles提出用于解决位置确定问题(Location Determination Problem, LDP)的。Ransac算法采用迭代的方式从一组包含离群的观测数据中估算出数学模型的参数，广泛应用于直线拟合、平面拟合等方面^[20,21]。数据中包含正确数据记为“内点”和异常数据(或称为噪声)记为“外点”。Ransac算法是一种不确定算法，它只能在一定概率下产生结果，并且这个概率会随着迭代次数的增加而提高。

设内点在数据中所占的比例为 ρ ，迭代次数为 i ，则采用Ransac算法得到正确模型的概率为

$$P = 1 - (1 - \rho^\xi)^i \quad (14)$$

ξ 为求解模型所需的最小数据点数。通过式(14)可以求得

$$P = 1 - (1 - \rho^\xi)^i \quad (15)$$

4.2 基于Ransac算法的参数估计

本节针对多个目标的数据点构造多个直线模型，基于Ransac算法的直线拟合的步骤如下：

(1) 输入各采样时刻及其对应的高分辨距离，称为观测数据集；

根据式(12)可以得到 Y 个观测数据 $(t_y, \{R_y\})$ 。 $\{R_y\}$ 表示 t_y 时刻多个目标经过稀疏重构得到的高分辨距离，由于噪声点(外点)的存在， $\{R_y\}$ 是一个长度不确定的集合。实际观测数据的个数(内点个数+外点个数)通常会大于理论观测数据的个数(内点个数)，满足 $Y \geq G \times N$ 。

(2) 输入要拟合的直线数目(即目标个数) G ；

(3) 针对每条直线，确定适用于模型的最小数据点个数为2，两点确定一条直线；

从观测数据集中随机选取2个点，构造直线模型，记为最优直线 R_{best} 。第 g 个目标的直线模型可以表示为

$$R_{\text{best}} = \hat{v}_g t + \hat{R}_g \quad (16)$$

其中， \hat{v}_g 和 \hat{R}_g 分别表示第 g 条直线的斜率和纵轴截距，与第 g 个目标的速度和距离估计值一一对应。

(4) 设置阈值 σ ，计算各观测点到最优直线的距离 d_y ；

$$d_y = R_{\text{best}} - R_y = \hat{v}_g t + \hat{R}_g - R_y \quad (17)$$

遍历所有数据点，将距离小于阈值 σ 的点加入内点集 I_{in} ，否则加入外点集 I_{out} ，寻找尽可能多的符合当前最优直线模型的数据点个数 Y_{best} 。

(5) 计算内点集中各数据点距离当前最优直线的均方误差，记为最小均方误差 V_{min} ；

(6) 下一次迭代中，当符合模型的数据点数大于 Y_{best} 时，更新 Y_{best} ，并且如果当前均方误差小于最小均方误差 V_{min} ，则更新最小均方误差 V_{min} 和最优直线 R_{best} ；

(7) 重复步骤(3)—步骤(6)，同时拟合多条最优直线。

经过大量实验，本文将初始阈值设为 $\sigma = 5 \times 10^{-4}$ ，迭代次数设为 $i = 1000$ 。

综上，本文所提算法的信号处理流程图如图3所示。

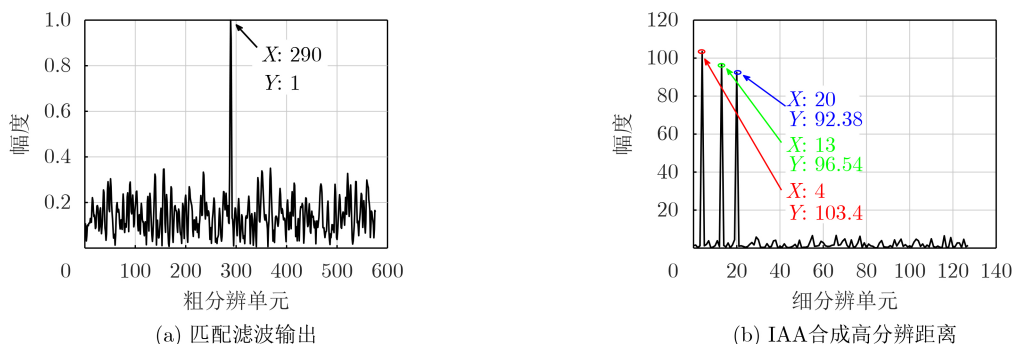


图2 3个相邻目标仿真结果图

5 仿真结果及分析

5.1 仿真结果

为了验证所提算法的有效性,本节分别对文献[13]和所提算法进行了仿真与分析。FA-OFDM雷达的发射信号如图1所示,实验参数如表1所示。

高信噪比情况:取输入信噪比为 -12 dB。如表1所示,在FA-OFDM雷达中1个CPI内有64个脉冲,每个脉冲宽度内发射64个频率随机跳变的子载波,合成大带宽,距离分辨率得以提高。远场观测场景内存在3个不同距离、不同速度的目标,经过目标散射后,雷达回波信号中包含了目标的时延和多普勒信息。首先对单个脉冲内的所有子载波回波信号进行脉冲压缩获得粗分辨率距离信息,如图4(a)所示,再通过IAA方法合成高分辨距离,结果如图4(b)所示。根据峰值所在的位置计算出3个目标的距离分别为 $[3993.9, 4002.4, 4005.7]$ m,与真实距离的误差均小于 0.1% 。进一步地,分别对64个脉冲回波采用IAA方法合成目标高分辨距离,得到时间-距离图,如图4(c)所示。将各个脉冲时刻及其对应的高分辨率距离信息构成观测数据集,按照4.2节所述步骤,采用Ransac算法同时拟合多条直线,结果如图4(e)所示。而按照文献[13]中所提的EM算法进行直线拟合的结果如图4(d)所示。对比图4(d)和图4(e),可以看出两种方法均可同时拟合3条直线,由此估计的目标速度误差均小于 0.9% ,当信噪比为 -12 dB时,两种算法都可以有效地对多目标的速度进行估计。

低信噪比情况:取输入信噪比为 -28 dB。与图4对比,图5(a)为3个目标的时间-距离图,可以看出当输入信噪比过低时,有大量噪声点出现,这会严重影响直线拟合的性能。作者在文献[13]中所提EM算法的直线拟合结果如图5(b)所示,尽管拟合出了3条直线,但其斜率对应的速度与真实目标速度相差甚远,无法对目标进行正确的参数估计,文献[13]所提算法几乎完全失效。而采用本文所提Ransac算法进行直线拟合的结果如图5(c)所示,可以看到3条直线被成功拟合,其直线斜率对应的速度分别为 $[614.19, 1195.79, 5918.56]$ m/s,相对误差分别为 $2.37\%, 1.98\%, 2.04\%$ 。在一定误差允许范围内,本文所提算法可以有效地同时对多目标的速度进行准确估计。

5.2 性能分析

为了进一步研究所提算法在不同条件下的性能,本节参照文献[13]分析了不同输入信噪比(接收回波的信噪比)情况下的检测概率以及同速度条件下的估计误差。

首先,研究了输入信噪比在 $-32\sim 20$ dB(对应输出信噪比为 $-4\sim 8$ dB)^[13]范围内变化时的检测概率,1000次蒙特卡罗仿真的结果如图6所示。当信噪比高于 7 dB时,两种算法的检测概率均为1,可以准确地对多个目标的速度进行估计;随着输入信噪比的降低,检测概率逐渐下降。当信噪比低于 2 dB时,文献[13]中算法的检测概率降至0,而采

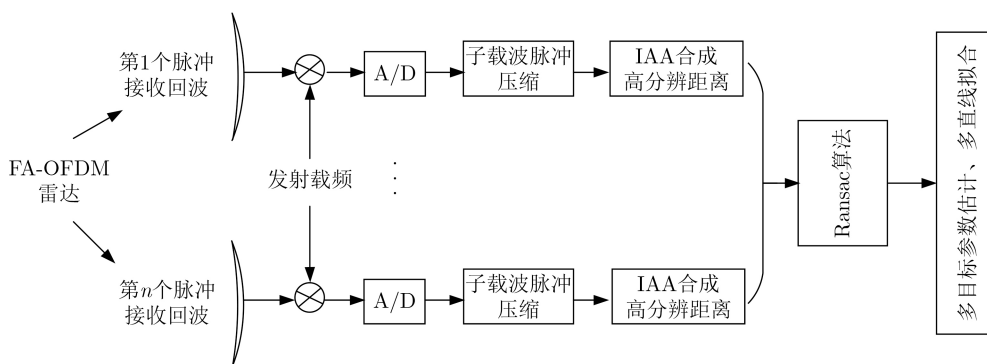


图3 基于Ransac算法的高速多目标参数估计方法的流程图

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
脉冲宽度	4 μ s	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	输入信噪比	-12 dB / -28 dB
目标距离	$[3994, 4001, 4006]$ m	目标速度	$[600, 1220, 5800]$ m/s

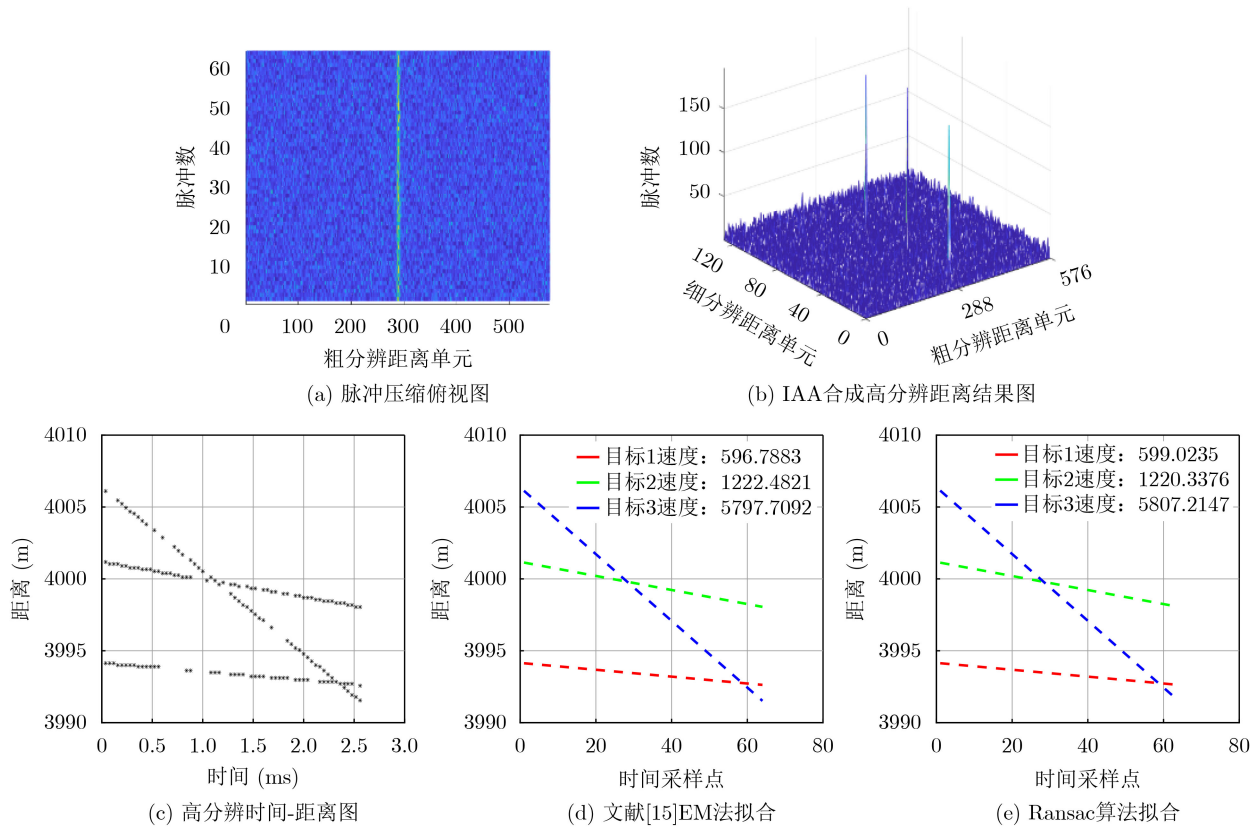


图4 信噪比为-12 dB时的仿真结果

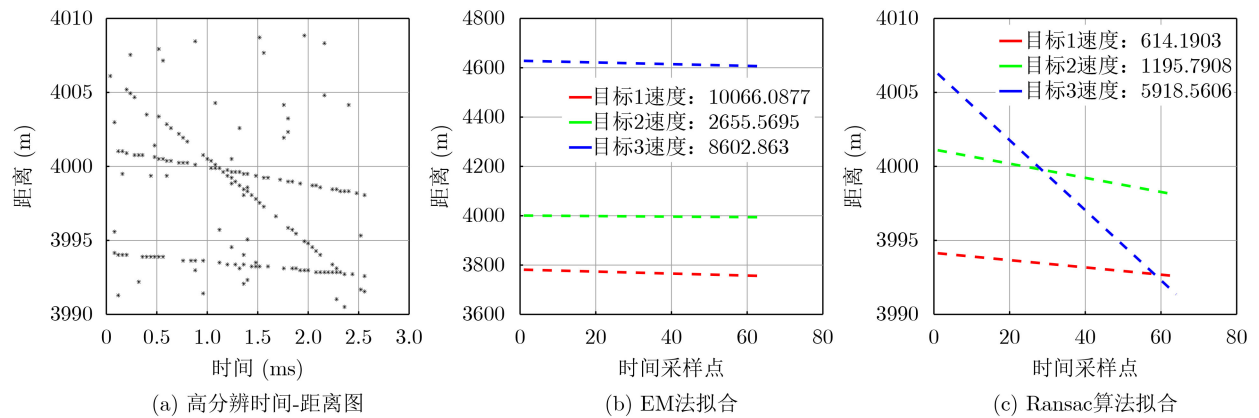


图5 信噪比为-28 dB时的仿真结果

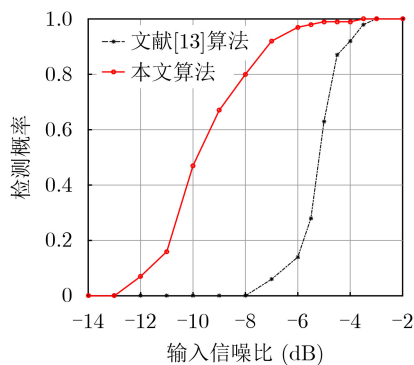


图6 信噪比对检测概率的影响

用本文算法的检测概率为0.8，仍然可以对目标进行参数估计；直至信噪比降低到-3 dB时，本文算法的检测概率也降为0，无法同时对多个目标速度进行估计。相比于文献[13]中的算法，本文所提算法对输入信噪比的要求降低了约5 dB，更有利于微弱目标的检测与参数估计。

此外，目标本身的速度也会影响其相对估计误差。设定输入信噪比为-26 dB(输出信噪比为2 dB)，分析不同速度下的相对估计误差，作1000次蒙特卡罗仿真，结果如图7所示。与文献[13]中所提算法类似，随着目标自身速度的增大，相对误差逐渐减小。

然而,对比两条曲线可以看出当目标速度相同时,本文算法的相对误差大于文献[13]算法。当目标速度大于1000 m/s时,文献[13]算法的相对误差小于0.1%,可以忽略不计;而同样要使相对误差小于0.1%,本文算法则要求目标速度大于4000 m/s。

通过本文所提算法对多个目标的速度进行估计,其均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)随输出信噪比的变化曲线如图8所示。可以看出与文献[12]相比,本文算法具有更好的估计精度,随着信噪比的增大,其RMSE越接近于Cramer-Rao下限。

综合图6—图8可以看出本文所提高速运动目标的参数估计算法更适用于低信噪比的情况,且估计误差更小。

6 结束语

针对现代电子战场中雷达对目标检测与参数估计的迫切需求,本文提出了一种基于Ransac算法的FA-OFDM雷达高速多目标参数估计的方法。依据FA-OFDM信号的大带宽特性,采用IAA方法合成各个脉冲时刻的目标高分辨距离,再采用Ransac算法进行多直线拟合,实现对高速运动的多目标进行同时参数估计。相比文献[13]所提算法,本文算法对输入信噪比的要求降低了约5 dB,并且当目标速度大于4000 m/s时,速度估计的相对误差小于

0.1%,更有利于对低信噪比条件下高速运动目标的参数估计。

参考文献

- [1] JANKIRAMAN M, WESSELS B J, and VAN GENDEREN P. Design of a multifrequency FMCW radar[C]. The 28th European Microwave Conference, Amsterdam, Netherlands, 1998: 548–589. doi: [10.1109/EUMA.1998.338053](https://doi.org/10.1109/EUMA.1998.338053).
- [2] JANKIRAMAN M, WESSELS B J, and VAN GENDEREN P. Pandora multifrequency FMCW/SFCW radar[C]. IEEE National Radar Conference, Alexandria, USA, 2000: 750–757. doi: [10.1109/RADAR.2000.851929](https://doi.org/10.1109/RADAR.2000.851929).
- [3] 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): 2776–2785. doi: [10.11999/JEIT150335](https://doi.org/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): 2776–2785. doi: [10.11999/JEIT150335](https://doi.org/10.11999/JEIT150335).
- [4] WANG Jun, ZHANG Bochen, and LEI Peng. Ambiguity function analysis for OFDM radar signals[C]. CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 10–13. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059592](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059592).
- [5] 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): 739–749. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/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): 739–749. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- [6] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11999/JEIT180547).
- [7] 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, Spanish, 2018: 26–28. doi: [10.23919/EuRAD.2018.8546621](https://doi.org/10.23919/EuRAD.2018.8546621).
- [8] 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](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2751463).
- [9] LELLOUCH G, TRAN P, PRIBIC R, et al. OFDM waveforms for frequency agility and opportunities for Doppler processing in radar[C]. IEEE Radar Conference,

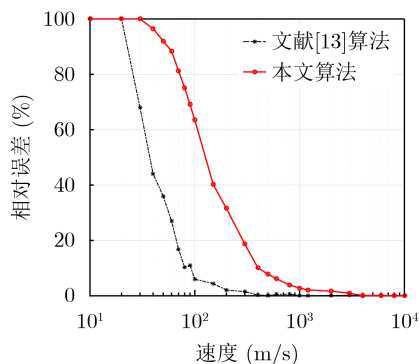


图7 目标速度对估计误差的影响

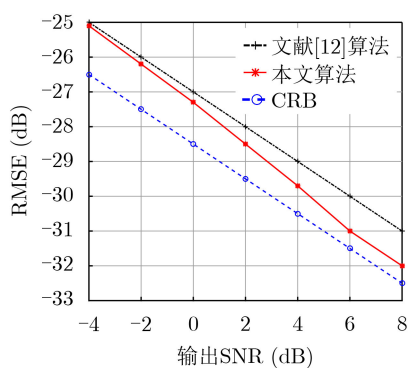


图8 输出SNR对RMSE的影响

- Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720798](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720798).
- [10] HUO Kai, DENG B, LIU Y, *et al.* The principle of synthesizing HRRP based on a new OFDM phase-coded stepped-frequency radar signal[C]. IEEE 10th International Conference On Signal Processing Proceedings, Beijing, China, 2010: 1994–1998. doi: [10.1109/ICOSP.2010.5655889](https://doi.org/10.1109/ICOSP.2010.5655889).
- [11] LELLOUCH G, PRIBIC R and VAN GENDEREN P. Frequency agile stepped OFDM waveform for HRR[C]. 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, USA, 2009: 90–93. doi: [10.1109/WDDC.2009.4800321](https://doi.org/10.1109/WDDC.2009.4800321).
- [12] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.12000/JR17116).
- [13] 全英汇, 高霞, 沙明辉, 等. 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[J]. 电子与信息学报, 2018, 7(4): 507–513. doi: [10.11999/JEIT190474](https://doi.org/10.11999/JEIT190474).
QUAN Yinghui, GAO Xia, SHA Minghui, *et al.* High Speed Multi-target Parameter Estimation for FA-OFDM Radar Based on Expectation Maximization Algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 7(4): 507–513. doi: [10.11999/JEIT190474](https://doi.org/10.11999/JEIT190474).
- [14] QUAN Yinghui, LI Yachao, WU Yaojun, *et al.* Moving target detection for frequency agility radar by sparse reconstruction[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2016, 87(9): 811–815. doi: [10.1049/el.2011.1293](https://doi.org/10.1049/el.2011.1293).
- [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](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0421).
- [16] 章平亮. 自适应迭代谱估计的统一分析与拓展[D]. 复旦大学, 2013: 9–20.
ZHANG Pingliang. Unified analysis and development of adaptive iterative spectrum estimation[D]. Fudan University. 2013: 9–20.
- [17] JENSEN J R, GLENTIS G O, CHRISTENSEN M G, *et al.* Computationally efficient IAA-based estimation of the fundamental frequency[C]. 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference(EUSIPCO), Bucharest, Romania, 2012.
- [18] GLENTIS G O and JAKOBSSON A. Efficient implementation of iterative adaptive approach spectral estimation techniques[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 4154–4167. doi: [10.1109/TSP.2011.2145376](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2145376).
- [19] XUE Ming, XU Luzhou, and LI Jian. IAA Spectral Estimation: Fast implementation using the Gohberg-Semencul factorization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3251–3261. doi: [10.1109/ICASSP.2011.5947305](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5947305).
- [20] ZHAO Mingfu, CHEN Haijun, SONG Tao, *et al.* Research on image matching based on improved RANSAC-SIFT algorithm[C]. 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, China, 2017: 1–3. doi: [10.1109/ICOON.2017.8121270](https://doi.org/10.1109/ICOON.2017.8121270).
- [21] RAZA M A, AWAIS REHMAN M, QURESHI I M, *et al.* Mahmood. A Simplified approach to Visual Odometry using Graph Cut RANSAC[C]. 2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC), Jamshoro, 2018: 1–7. doi: [10.1109/IMTIC.2018.8467263](https://doi.org/10.1109/IMTIC.2018.8467263).
- 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。
方文: 男, 1996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, 1975年生, 博士, 教授, 研究方向为SAR/ISAR成像、动目标检测等。

责任编辑: 余蓉