

基于航迹关联的 STLFMCW 雷达多目标配对

吴耀云, 罗飞腾, 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:首先分析了 STLFMCW 雷达估计目标径向运动速度的原理。针对利用频谱特征进行目标配对求取速度方法存在的缺陷, 将多目标跟踪技术应用于目标配对, 分别对上、下扫频段多目标回波起始“局部航迹”, 在“局部航迹”正确起始后, 利用同一目标上、下扫频段内“局部航迹”的相关性实现了多目标配对; 并通过配对确认矩阵的拆分减小了配对的多义性, 从而显著提高了目标正确配对的概率。仿真结果表明, 在复杂多目标与杂波环境下, 该方法能有效实现上、下扫频段目标回波的正确配对。

关键词:对称三角线性调频连续波; 径向速度估计; 多目标配对; 航迹关联

中图分类号: TN 953

文献标志码: A

Multi-target pairing for STLFMCW radar based on track correlation

WU Yao-yun, LUO Fei-teng, CHEN Wei-dong

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

Abstract: The principle of target radial velocity estimation in STLFMCW radar is analyzed. To overcome the defect of target pairing methods by matching spectrum characteristics, a multi-target tracking technique is adopted to initialize “local tracks”, and a novel multi-target pairing algorithm based on track correlation is proposed. Then, a ambiguity elimination pairing method by decomposition of the pairing indication matrix is presented to improve the pairing performance significantly. Finally, the validity and feasibility of this algorithm in multi-target circumstance is verified by simulation.

Keywords: STLFMCW; radial velocity estimation; multi-target pairing; track correlation

0 引言

宽带线性调频连续波(LFMCW)雷达具有低截获概率、高距离分辨和结构简单等优点, 因而在精确制导、汽车防撞等军事与民用领域得到广泛应用^[1]。对称三角波调频连续波(STLFMCW)是 LFMCW 雷达较常采用的调制波形, 它可以利用同一周期上、下扫频段回波的差拍信号直接提取目标的距离和径向速度信息, 实现目标距离-速度的去耦合。但是在复杂的多目标环境下, 如何实现上、下扫频段源于同一目标回波的正确配对是必须解决的关键问题。

文献[2]提出了一种利用上、下扫频段频谱谱峰面积特征进行配对的方法, 在此基础上文献[3]引入了动目标检测技术(MTD), 消除了固定回波(包括静止目标和杂波)对目标配对的影响, 改善了配对性能。但是基于频谱特征参数的配对方法, 仅利用了同一周期上、下扫频段源于同一目标回波频谱的相关性, 在实际应用存在以下问题: 当多个目标频谱特征较少(例如近似点目标)和相近时, 基于频谱特征

的目标配对存在难以消除的多义性; 当目标回波频谱出现重叠时, 此时频谱特征参数的提取已不能真实反映目标的特征, 导致目标配对的失败。

本文将多目标跟踪技术应用到目标配对场合, 分别对上、下扫频段的可分目标进行航迹起始, 并分别形成多目标“局部航迹”, 航迹正确起始后, 再利用上、下扫频段同一目标“局部航迹”的相关性进行配对, 并通过配对确认矩阵的拆分减小了配对的多义性。该算法不仅利用了上、下扫频段内同一目标的相关性, 而且利用“局部航迹”将多个周期同一目标的信息用于配对和关联, 从而克服了基于频谱特征配对存在的问题, 能够适应目标散射特征的剧烈变化和杂波的干扰, 消除了目标航迹交叉时频谱重叠对配对的影响。仿真结果表明该算法在杂波环境下的多目标跟踪场合能够取得较高的正确配对概率。

1 LFMCW 雷达运动参数估计

STLFMCW 信号发射及回波信号的时频关系如图 1 所

收稿日期:2007-07-01; 修回日期:2007-07-30。

作者简介: 吴耀云(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理, 多传感器多目标信息融合等。E-mail: wuyaoyun@mail. ustc.edu.cn

示。正、负调频段发射信号可表示为

$$\begin{cases} S_{up}(t) = A_{up} \cdot \exp[-j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}kt^2)], & t \in [0, T] \\ S_{dn}(t) = A_{dn} \cdot \exp[-j2\pi(f_0 t + 2kTt - \frac{1}{2}kt^2)], & t \in [T, 2T] \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_{up} 、 A_{dn} 分别为正、负调频段发射信号振幅; $2T$ 为一个扫频周期; f_0 为扫频信号中心频率; k 为调频斜率。

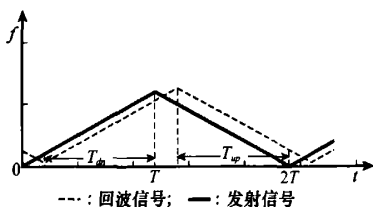


图 1 对称三角 LFM CW 波形时频图

目标回波经与发射信号相同的信号混频, 不计振幅且忽略相位中与 c^{-2} 有关的小项, 将上、下降时域采样信号按照发射频率由低到高排序 ($t_{dn} = 2T - t_{up}$), 可得正、负调频段差拍信号为

$$\begin{cases} y_{up}(n) = \exp\left\{-j4\pi\left[\frac{f_0 r}{c} + \left(\frac{kr}{c} - \frac{f_0 v}{c}\right)nT, -\frac{kv}{c}(nT)^2\right]\right\} \\ y_{dn}(n) = \exp\left\{-j4\pi\left[\left(\frac{kr}{c} + \frac{f_0 v}{c} - \frac{2kTv}{c}\right)nT, +\frac{kv}{c}(nT)^2 + \frac{f_0 r}{c} - \frac{2f_0 Tr}{c}\right]\right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中, r 为目标与雷达间距离, v 表示目标相对于雷达的径向运动速度, 其正方向为沿径向靠近雷达的方向, T 为采样周期, n 为采样点数。

图 2 为由于目标运动引起距离像偏移的示意图, 图中 $y_{up}(n)$ 和 $y_{dn}(n)$ 的距离像峰值位置 N_{up} 和 N_{dn} 分别为

$$\begin{cases} N_{up} = \frac{2krNT_s}{c} + \frac{2f_0 vNT_s}{c} \\ N_{dn} = -\frac{2krNT_s}{c} - \frac{2f_0 vNT_s}{c} + \frac{4kTvNT_s}{c} \end{cases} \quad (3)$$

由此可得到目标径向速度的估计值为

$$\hat{v} = \frac{c(N_{up} - N_{dn})}{4NT_s(f_0 - kT)} \quad (4)$$

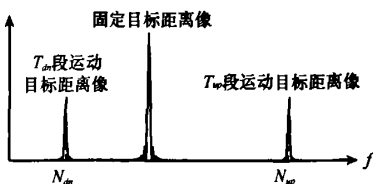


图 2 目标距离像偏移

2 基于“局部航迹”关联的目标配对方法

为了利用各观测时刻回波之间的相关性, 将跟踪技术与目标配对相结合, 对上、下扫频段距离观测值进航迹起始, 分别形成距离“局部航迹”, 利用“局部航迹”相关性进行目标配对。

设 $\Omega_1 = (1, 2, \dots, N_1)$, $\Omega_2 = (1, 2, \dots, N_2)$ 为上、下扫频段各自形成的航迹号集合, $X_i^1(l)$ 和 $X_j^2(l)$ 为 Ω_1 和 Ω_2 中编号为 i 和 j 的航迹在 l 时刻观测值, $X_i^1(l) = [R_i^1(l), V_i^1(l)]^T$, $X_j^2(l) = [R_j^2(l), V_j^2(l)]^T$ 。

由于速度观测值不能直接获得, 引入“伪速度”代替, $\hat{V}_q^1(l) = (R_q^1(l) - R_q^1(l-1))/2T$ ($q=1, 2$), 故 $X_i^1(l) = [R_i^1(l), \hat{V}_i^1(l)]^T$, $X_j^2(l) = [R_j^2(l), \hat{V}_j^2(l)]^T$ 。设 $\hat{X}_i^1(l)$ 和 $\hat{X}_j^2(l)$ 为该时刻 $X_i^1(l)$ 和 $X_j^2(l)$ 的滤波估值, $\hat{X}_i^1(l) = [\hat{R}_i^1(l), \hat{V}_i^1(l)]^T$, $\hat{X}_j^2(l) = [\hat{R}_j^2(l), \hat{V}_j^2(l)]^T$ 。

从(3)式可知, 在目标径向运动速度 v 未知的情况下, 由回波距离像峰值位置估值滤波得到的 $\hat{R}_i^1(l)$ 和 $\hat{R}_j^2(l)$ 是有偏的, 重新构造目标状态量

$$\begin{cases} \hat{X}_i^1(l) = [\hat{R}_i^1(l), \hat{V}_i^1(l)]^T = [\hat{R}_i^1(l) - f_0 \hat{V}_i^1(l)/k, \hat{V}_i^1(l)]^T \\ \hat{X}_j^2(l) = [\hat{R}_j^2(l), \hat{V}_j^2(l)]^T = [\hat{R}_j^2(l) + f_0 \hat{V}_j^2(l)/k - 2T \cdot \hat{V}_j^2(l), \hat{V}_j^2(l)]^T \end{cases} \quad (5)$$

假设 $\hat{X}_i^1(l)$ 和 $\hat{X}_j^2(l)$ 的估计误差独立, 则目标配对问题就转化为了以下的假设检验问题

$$\begin{cases} H_0: \hat{X}_i^1(l) \text{ 和 } \hat{X}_j^2(l) \text{ 是源于同一目标的状态估计, } i \in \Omega_1, j \in \Omega_2 \\ H_1: \hat{X}_i^1(l) \text{ 和 } \hat{X}_j^2(l) \text{ 是源于不同目标的状态估计} \end{cases}$$

这是一个典型的航迹关联问题^[4], 定义检测量 $t_{ij}(l) = \hat{X}_i^1(l) - \hat{X}_j^2(l)$, 则在 H_0 假设下, $t_{ij}(l)$ 的协方差为 $C_{ij}(l) = E[t_{ij}(l)t_{ij}^T(l)] = P_i^1(l) + P_j^2(l)$, $P_i^1(l)$ 和 $P_j^2(l)$ 为 $\hat{X}_i^1(l)$ 和 $\hat{X}_j^2(l)$ 的方差。此时, $t_{ij}(l)$ 的概率密度函数(pdf)为

$$f_0[t_{ij}(l) | H_0] = \frac{1}{\sqrt{2\pi C_{ij}(l)}} \exp\left[-\frac{1}{2}t_{ij}^T(l)C_{ij}^{-1}(l)t_{ij}(l)\right] \quad (6)$$

定义似然函数

$$L(t_{ij}(l)) = f_0[t_{ij}(l) | H_0] / f_1[t_{ij}(l) | H_1] \quad (7)$$

式中, $f_1[t_{ij}(l) | H_1]$ 为 H_1 假设下 $t_{ij}(l)$ 的 pdf。

由于 $f_1[t_{ij}(l) | H_1]$ 未知, 上式对应的对数似然比函数可写为

$$\ln L(t_{ij}(l)) = -\frac{1}{2}t_{ij}^T(l)C_{ij}^{-1}(l)t_{ij}(l) + \text{Constant} \quad (8)$$

根据高斯分布理论, $t_{ij}^T(l)C_{ij}^{-1}(l)t_{ij}(l)$ 服从自由度为 n_r 的 χ^2 分布, n_r 为状态估计量 $\hat{X}(l)$ 的维数。可得接受 H_0 的条件为

$$\lambda_{ij}(l) = t_{ij}^T(l)C_{ij}^{-1}(l)t_{ij}(l) \leq \delta(l) \quad (9)$$

若不满足式(9)则接受 H_1 , 式(9)中判决门限可由式(10)求得

$$P\{\lambda_{ij}(l) > \delta(l) | H_0\} = \alpha \quad (10)$$

式中, α 为置信度, 通常选为 0.05 或 0.01。

由于 $\hat{\mathbf{X}}_i^1(l)$ 和 $\hat{\mathbf{X}}_i^2(l)$ 中包含“伪速度”滤波估值, 即便采用高阶滤波器进行跟踪滤波, 速度滤波估值 $\hat{V}_i(l)$ 仍与目标真实运动速度 $V_i(l)$ 存在较大误差, 这将导致 $\mathbf{t}_{ij}(l)^T \mathbf{C}_{ij}(l)^{-1} \mathbf{t}_{ij}(l)$ 不严格服从 χ^2 分布, 检验性能下降。

分析式(5), 对于宽带 STLFMCW 雷达, 系数 f_0/k 和 $2T$ 通常是一个小量, 因 $\hat{V}_i(l)$ 误差引起的 $\hat{R}_i^1(l)$ 误差很小, 此时 $\hat{R}_i^1(l)$ 和 $\hat{R}_i^2(l)$ 仍可近似认为是对同一状态的两个观测。重新定义

$$\begin{cases} \mathbf{t}'_{ij}(l) = \hat{\mathbf{R}}_i^1(l) - \hat{\mathbf{R}}_i^2(l) = \\ \quad (\hat{\mathbf{R}}_i^1(l) - f_0 \hat{V}_i^1(l)/k) - \\ \quad (\hat{\mathbf{R}}_i^2(l) + f_0 \hat{V}_i^2(l)/k - 2T\hat{V}_i^2(l)) \\ \mathbf{C}_{ij}(l) = E[\mathbf{t}'_{ij}(l)\mathbf{t}'_{ij}(l)^T] = \mathbf{P}_{R_i}^1(l) + \mathbf{P}_{R_i}^2(l) \end{cases} \quad (11)$$

从而 $\mathbf{t}'_{ij}(l)^T \mathbf{C}_{ij}(l)^{-1} \mathbf{t}'_{ij}(l)$ 服从自由度为 $n_i = 1$ 的 χ^2 分布, 配对准则仍为式(9)和式(10)。

3 配对多义性的处理算法

在多目标多杂波的环境中, 当目标相隔很近或航迹交叉时会出现多个配对组合均满足式(9), 即出现多义性。

降低多义性的一个可行方法是采用序贯假设检验^[5], 令

$$\tau_{ij}(l) = \{\mathbf{t}'_{ij}(l-N), \mathbf{t}'_{ij}(l-N+1), \dots, \mathbf{t}'_{ij}(l)\} \quad (12)$$

则 $\lambda'_{ij}(l) = \tau_{ij}(l)^T \mathbf{C}'_{ij}(l)^{-1} \mathbf{t}'_{ij}(l)$ 服从自由度为 $N+1$ 的 χ^2 分布, 配对准则仍为式(9)和式(10)。

序贯检验在一定程度上可以降低多义性, 但不能完全避免, 下面给出一种基于配对确认矩阵拆分的减小多义性方法。

设 $\Omega^1(l) = (1, 2, \dots, N_l^1)$, $\Omega^2(l) = (1, 2, \dots, N_l^2)$ 分别为 l 时刻上、下扫频段所各自形成的航迹号集合, 定义配对确认矩阵

$$\Theta(l) = \{a_{ij}^l\}, \text{ 其中 } a_{ij}^l = \begin{cases} 0; H_1 \\ 1; H_0 \end{cases}, i \in \Omega^1(l), j \in \Omega^2(l) \quad (13)$$

考虑正确配对组合的唯一性和不同目标航迹之间的相互制约关系, 对确认矩阵进行拆分, $\Theta(l) \Rightarrow \sum_{n=1}^M \theta_n^l$, 其中 θ_n^l 满足以下条件

$$(1) \theta_n^l = \{b_{ij}^n\}, \text{ 其中 } b_{ij}^n = \begin{cases} 0; H_1 \\ 1; H_0 \end{cases}, i \in \Omega^1(l), j \in \Omega^2(l)$$

(2) 如果 $\Theta(l)$ 中第 k 行包含非零元素, 则 θ_n^l 中相应行必须含有非零元素;

(3) θ_n^l 任意一行或一列中只至多有一个 1, 其余均为 0。

例如

$$\Theta(l) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

经过矩阵拆分, $\Theta(l)$ 的多义性按照约束条件 2 和 3 得到了消除。如果得到的拆分矩阵 θ_n^l 不唯一, 如

$$\Theta(l) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则对应于每个拆分矩阵 θ_n^l 定义速度配对误差

$$e_n^l = \frac{1}{\text{rank}(\theta_n^l)} \sum_{n=1}^{\text{rank}(\theta_n^l)} |V_m^n - \hat{V}_m^1| + |V_m^n - \hat{V}_m^2| \quad (14)$$

式中, V_m^n 为对应于 θ_n^l 的配对关系, 按照式(4)得到的第 m 个目标的速度估值, \hat{V}_m^1 和 \hat{V}_m^2 为此时相应上、下扫频段局部航迹当前时刻的速度滤波估值。最终唯一配对的选取准则为

$$\theta_n^l = \min_{\theta_n^l \in \{\theta_n^l; n=1, \dots, M\}} \{e_1^l, e_2^l, \dots, e_M^l\} \quad (15)$$

在实际应用时, 当配对完成后, 得到配对的航迹从航迹号集合 $\Omega^1(l)$ 和 $\Omega^2(l)$ 中删除, 不再参与下次配对。

4 算法仿真

仿真环境选为典型的 STLFMCW 体制雷达系统, 具体参数为: 调频斜率 $k = 4 \times 10^{11}$ Hz/s, $f_0 = 20$ GHz, 扫描周期 $T = 1.2$ ms, 采样间隔 $T_s = 150$ ns, 扫描周期数为 $N = 500$, 用正确配对概率 P_c 、错误配对概率 P_e 和漏配对概率 P_f 三个指标来衡量配对算法的综合性能。

为了比较本文提出的目标配对算法与基于频谱特征参数比对的配对算法的性能, 在仿真中定义如下三种频谱特

征参数: ① 谱峰面积: $S_i = \sum_{l=n_i^s}^{n_i^e} y(l)$, $y(l)$ 为回波距离像, n_i^s 和 n_i^e 分别为第 i 个目标距离像谱峰的起始位置和结束位置; ② 谱峰宽度: $L_i = n_i^e - n_i^s$; ③ 散射重心位置: $P_i = \sum_{l=n_i^s}^{n_i^e} y(l) \cdot l / \sum_{l=n_i^s}^{n_i^e} y(l)$ 。

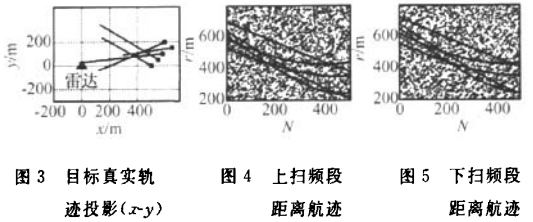
文献[2]中采用了谱峰面积来进行目标配对, 其配对准则为源于同一目标的回波频谱有最接近的谱峰面积。谱峰面积只是众多频谱特征参数之一, 不能全面的反映目标特征, 下面给出一种基于频谱综合相似度的特征参数配对准则: 源于同一目标的回波频谱有最大的频谱相似度。频谱

相似度定义为

$$Sim = SimL \cdot SimP \cdot SimF \tag{16}$$

式中： $SimL=1-|L_i-L_j|/(L_i+L_j)$ ，为频谱宽度相似度； $SimP=1-|P_i-P_j|/(P_i+P_j)$ ，为散射重心位置相似度； $SimF=2F_iF_j^T/(F_iF_i^T+F_jF_j^T)$ ，为频谱形状相似度， F_i 为第 i 个目标的距离像矢量，计算 $SimF$ 时需将 F_i 和 F_j 按散射重心对齐，并补零使得 F_i 和 F_j 长度相等。

仿真 1 考虑以下极端情况：目标编队飞行且相隔很近，航迹出现交叉。目标个数为 5，目标几何尺寸为： $L=[2.0\text{ m},3.0\text{ m},3.0\text{ m},2.0\text{ m},2.5\text{ m}]$ ，在目标回波生成时假定每个目标上存在 6 个固定的强散射中心，杂波个数在时间上服从 $\lambda=10$ 的泊松分布，杂波位置在观测空间内服从均匀分布。航迹起始算法选为基于逻辑规则的起始方式，观测与航迹的关联算法选为最近邻算法^[6]。目标轨迹和距离观测数据如图 3—图 5 所示。



从图 3—图 5 中可以看出，整个跟踪过程中上、下扫频段局部航迹数相同且无跟踪丢失情况出现。在实际情况中可能出现由于航迹交叉造成某一航迹跟踪丢失的情况，利用 JPDA 算法^[6]代替最近邻算法可以较好的解决这一问题。

在观测时刻从 61—500 的 440 个观测周期内连续对上、下扫频段航迹进行配对，此前的 60 个观测周期用于目标距离航迹的正确起始和检验量 $r'_i(L)$ 的协方差计算。基于航迹关联的配对算法结果如表 1 所示，计算可得： $P_r=98.91\%$ ， $P_s=1.09\%$ ， $P_i=0$ ；基于面积特征参数的配对算法结果如表 2 所示， $P_r=56.09\%$ ， $P_s=43.91\%$ ， $P_i=0$ ；基于频谱相似度的配对算法结果如表 3 所示， $P_r=70.55\%$ ， $P_s=29.45\%$ ， $P_i=0$ 。

从仿真结果可以看出，在目标间隔较近、航迹交叉情况下，基于航迹关联的配对算法性能明显优于基于特征参数比对的算法，基于频谱面积参数的配对算法在 3 种配对算法中性能最差，采用特征参数比对的配对算法的正确配对概率已不能满足实际要求。

分析各配对周期的配对结果发现，基于航迹关联的配对算法错误配对较多地出现在了航迹发生交叉的时刻，这说明式(15)准则存在一定的缺陷，这种错误配对在多目标短时间内航迹频繁发生交汇的情况下是很容易出现的，可以采用多周期积累和 M/N 判决的办法加以抑制。

表 1 航迹关联配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	434	3	2	1	0
No. 2	3	431	3	3	0
No. 3	2	3	427	0	8
No. 4	1	3	0	436	0
No. 5	0	0	8	0	432

表 2 频谱面积配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	288	67	15	35	35
No. 2	72	229	35	66	38
No. 3	45	25	195	75	100
No. 4	51	47	91	169	82
No. 5	16	8	34	29	353

表 3 频谱综合相似度配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	347	48	6	31	8
No. 2	48	280	26	81	5
No. 3	28	27	308	55	22
No. 4	31	54	111	239	5
No. 5	31	5	14	12	378

仿真 2 假定目标从不同方向来袭，目标个数为 5，系统参数和跟踪算法同仿真 1。目标轨迹和距离观测数据如图 6—图 8 所示。

在观测时刻从 61—500 的 440 个观测周期内连续对上、下扫频段航迹进行配对，基于航迹关联的配对算法结果如表 4 所示，计算可得： $P_r=100\%$ ， $P_s=0$ ， $P_i=0$ ；基于面积特征参数的配对算法结果如表 5 所示， $P_r=74.45\%$ ， $P_s=25.55\%$ ， $P_i=0$ ；基于频谱综合相似度的配对算法结果如表 6 所示， $P_r=80.09\%$ ， $P_s=19.91\%$ ， $P_i=0$ 。

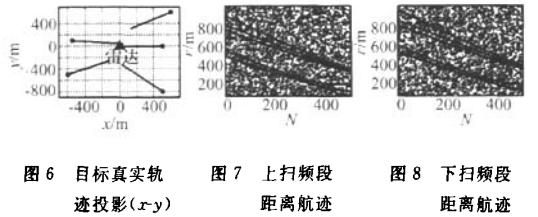


表 4 航迹关联配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	440	0	0	0	0
No. 2	0	440	0	0	0
No. 3	0	0	440	0	0
No. 4	0	0	0	440	0
No. 5	0	0	0	0	440

表5 频谱面积配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	285	118	36	1	0
No. 2	69	345	26	0	0
No. 3	56	39	339	5	1
No. 4	4	5	1	418	12
No. 5	0	0	2	63	375

表6 频谱综合相似度配对算法的性能

航迹	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
No. 1	303	82	51	4	0
No. 2	90	294	54	2	0
No. 3	56	81	294	9	0
No. 4	10	11	43	359	17
No. 5	0	0	2	50	388

与仿真1结果相比,仿真2中三种配对算法的性能都有所提高。基于航迹关联的配对算法性能明显优于基于特征参数比对的算法,基于频谱面积参数的配对算法性能最差。

在全部配对周期内,基于航迹关联的配对算法配对结果完全正确,这是由于各目标在三维空间中相隔较远,航迹差异比较明显。而此时基于特征参数比对的配对算法仍不能取得很好的正确配对概率。

仿真3 下面分别考虑跟踪5个和10个目标的情况,

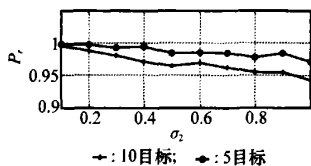


图9 正确配对概率随变化情况

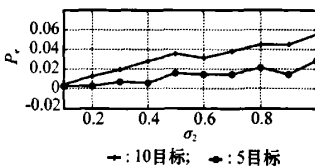


图10 错误配对概率随变化情况

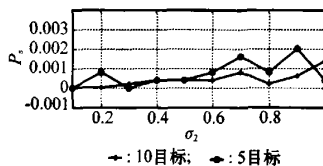


图11 漏配对概率随变化情况

5 结论

本文针对STLFMCW体制雷达,提出了一种利用距离“局部航迹”信息构造 χ^2 检验和配对矩阵阵降降低多义性的多目标配对算法,仿真结果表明该算法性能优于基于频谱特征参数比对的配对算法,特别适合于航迹交叉等复杂情况下的多目标跟踪。该算法将目标跟踪技术与目标配对相结合,配对完成后,目标径向速度精确估值可以用于高分辨距离像的运动补偿或是距离-速度解耦。在径向速度获得的同时,若将上、下扫频段源于同一目标的距离“局部航迹”合并,就可得到目标的真实距离、速度航迹,即实现了一个完整的基于距离、速度观测值的多目标跟踪过程。

为了讨论问题方便,假设目标局部航迹已经正确形成,航迹的产生规则为:

①目标初始位置在指定区域内按高斯分布产生:
 $-600 \text{ m} \leq x \leq 600 \text{ m}$, $-600 \text{ m} \leq y \leq 600 \text{ m}$, $200 \text{ m} \leq z \leq 250 \text{ m}$;

②目标初始速度和航向在 $400 \sim 600 \text{ m/s}$ 和 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布;

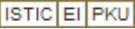
③局部距离航迹的跟踪误差服从零均值高斯分布,方差为 σ^2 ,速度观测值为“伪速度”。

选在 $N=50$ 时刻对上、下扫频段航迹进行配对,图9—图11给出了500次仿真时基于航迹关联的配对算法的 P_c 、 P_e 和 P_m 随跟踪误差方差 σ^2 的变化情况。

从图中可以看出,随着跟踪误差的增大,正确配对的概率逐渐减小,错误配对概率逐渐增大,而漏配对的概率 P_m 略有增大,但不明显,这是因为 P_c 的大小只与检验置信度 α 有关,在仿真中选取 $\alpha=0.01$,判决门限 δ 值较大, σ^2 带来的影响不足以导致漏配对的大量出现。而 P_e 和 P_m 除了与 α 有关外,主要受降低配对多义性的式(15)准则影响,当增大时,由距离跟踪误差引起“伪速度”误差迅速增大,导致式(15)准则带来的错配几率增加,算法性能下降,但仍能达到 $P_c > 93\%$, $P_e < 6\%$ 的水平。对于实际的宽带STLFMCW雷达系统,由于具有距离高分辨特性,跟踪误差通常能够满足 $\sigma^2 \leq 1 \text{ m}^2$ 的条件,故基于航迹关联的配对算法可以满足实际的需求。

参考文献:

- [1] Stove A G. Linear FMCW radar techniques[C]// IEE Proc-F: Radar and Signal Processing. 1992, 139(5): 343~340.
- [2] 史林,张琳. 调频连续波雷达频谱配对信号处理方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(4): 534~538.
- [3] 杨建宇,凌太兵,贺俊. LFMCW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(2): 169~173.
- [4] Bar-Shalom Y. On the track-to-track correlation problem[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1981, 26(2): 571~572.
- [5] 何友. 多传感器数据融合系统中两种新的航迹相关算法[J]. 电子学报, 1997, 25(9): 10~14.
- [6] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and data association [M]. Boston: Academic Press, 1988.

作者: 吴耀云, 罗飞腾, 陈卫东, WU Yao-yun, LUO Fei-teng, CHEN Wei-dong
作者单位: 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽, 合肥, 230027
刊名: 系统工程与电子技术 
英文刊名: SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS
年, 卷(期): 2008, 30(6)
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. Stove A G Linear FMCW radar techniques 1992(05)
2. 史林, 张琳 调频连续波雷达频谱配对信号处理方法[期刊论文]-西安电子科技大学学报(自然科学版) 2003(4)
3. 杨建宇, 凌太兵, 贺峻 LFCW雷达运动目标检测与距离速度去耦合[期刊论文]-电子与信息学报 2004(2)
4. Bar-Shalom Y On the track-to-track correlation problem 1981(02)
5. 何友 多传感器数据融合系统中两种新的航迹相关算法 1997(09)
6. Bar-Shalom Y;Fortmann T E Tracking and data association 1988

本文读者也读过(10条)

1. 张彦铎, 鲁统伟 基于航迹关联的足球机器人视觉系统的改进[期刊论文]-哈尔滨工业大学学报2004, 36(7)
2. 林长川, 陈朝阳, 洪爱助, 东昉 雷达与AIS目标航迹模糊关联与统计加权合并融合方法的探讨[期刊论文]-中国航海2003(4)
3. 王国宏, 毛士艺, 何友 雷达和红外航迹关联性能的评估[期刊论文]-电子与信息学报2002, 24(12)
4. 何友, 田宝国 基于神经网络的广义经典分配航迹关联算法[期刊论文]-航空学报2004, 25(3)
5. 田宝国, 何友, 杨日杰, Tian Bao-guo, He You, Yang Ri-jie 神经网络在航迹关联中的应用研究[期刊论文]-电子与信息学报2005, 27(2)
6. 杨林, 鄢茂林, 朱靖, YANG Lin, YAN Mao-lin, ZHU Jing 有限记忆ISODATA算法在航迹关联中的研究[期刊论文]-系统工程与电子技术2006, 28(1)
7. 吴雄斌, 吴世才, 文必洋, 陈化 从高频地波雷达回波谱中检测移动目标信息的初步研究[期刊论文]-武汉大学学报(理学版)2001, 47(5)
8. 刘城霞, 王宝树, 乔向东 红外传感器在点迹/航迹关联中的应用[期刊论文]-红外与激光工程2002, 31(3)
9. 杨强, 刘永坦, Yang Qiang, Liu Yongtan 高频地波雷达目标的识别检测方法[期刊论文]-高技术通讯2000, 10(8)
10. 李广强, 盛文, LI Guang-qiang, SHENG Wen 海杂波特性分析方法研究和比较[期刊论文]-中国电子科学研究院学报2006, 1(5)

引证文献(2条)

1. 吴耀云, 罗飞腾, 陈卫东 基于局部航迹关联的多基地雷达多目标跟踪快速算法[期刊论文]-中国科学技术大学学报 2010(02)
2. 韩真真 T/R-R高频地波雷达海杂波特性分析及目标配对研究[学位论文]硕士 2011

引用本文格式: 吴耀云, 罗飞腾, 陈卫东, WU Yao-yun, LUO Fei-teng, CHEN Wei-dong 基于航迹关联的STLFMCW雷达多目标配对[期刊论文]-系统工程与电子技术 2008(6)