

基于组合 Hough 变换的精密进场雷达航迹起始算法

王 啸, 赵修斌

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 针对三坐标雷达监测空间中航迹起始问题, 结合以往的算法, 提出一种基于组合 Hough 变换的三维航迹起始算法。首先将三维量测数据在 3 个投影平面上进行投影, 然后对 3 个投影平面内的点分别进行组合 Hough 变换, 对 3 个平面内组合 Hough 变换的结果进行比对, 当相同的点迹至少在 2 个平面内起始成功时, 即判断直线航迹起始成功。在数据处理过程中, 使用三步组合的方法以加大真实航迹起始概率, 并用飞机的运动速度对组合数量进行约束, 降低了运算量。针对精密进场雷达的数据特点进行仿真验证, 证明了算法的有效性。

关键词: 航迹起始; 组合 Hough 变换; 精密进场雷达

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0046-04

Precise Approaching Radar Track Initiation Algorithm Based on Combinatorial Hough Transform

WANG Xiao, ZHAO Xiu-bin

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A three-dimensional track initiation algorithm was proposed based on combinatorial Hough transform and traditional method to solve the problem about 3D radar track initiation. First, the measurement data was projected on three planes, then the combinatorial Hough transform was used to the points on three projection planes respectively. When the same point trail was initiated successfully in two projection planes at least after comparing the results on the three projection planes, the straight-line track initiation was judged successfully. In the data processing, the real track initiation probability was increased using the three-step combination method, and a plane kinematics speed was used to depress the combination number and reduce computational complexity greatly. Simulation in allusion to precise approaching radar data characteristic shows the effectiveness of this algorithm.

Key words: track initiation; combinatorial Hough transform; precise approaching radar

0 引言

在雷达航迹处理技术中, 首先要解决的是航迹起始问题。如何快速准确地对多目标航迹进行起始, 影响着航迹处理的性能。现有的雷达航迹起始方法主要有直观法、逻辑法、Hough 变换算法和改进的 Hough 变换算法^[1]。其中, 直观法和逻辑算法适用于低杂波条件下的航迹实时处理, Hough 变换方法和改进的 Hough 变换方法适用于高杂波环境下的航迹批处理。目前, 针对航迹起始方法的研究主要围绕在这几种方法的改进以及性能分析上, 且大部分都是二维平面下的航迹

起始, 对三维空间中的航迹起始问题见诸报道的还较少。针对三维 Hough 变换数据处理量大的问题, 文献[2]提出一种三维空间中基于 Hough 变换算法和逻辑的航迹起始算法, 该算法将三维空间中的点迹投影到所选的 2 个平面上, 并在 2 个投影平面上分别应用 Hough 变换, 通过对比 Hough 变换后的结果来排除杂波, 然后对筛选后的可信点用逻辑法进行航迹起始; 文献[3]则针对带有多普勒量测的数据, 提出一种两级 Hough 变换航迹起始算法, 即先对时间-斜距数据进行变换, 并利用多普勒数据作为约束减小错误积累, 然后对时间-方位角数据进行变换, 最终获得航迹起始。

精密进场雷达(Precise Approach Radar, PAR)是对机场终端区内准备着陆的飞机进行探测, 并对其偏离理想着陆航迹进行检测的三坐标雷达。在 PAR 数据

收稿日期: 2013-04-02

修回日期: 2013-06-03

作者简介: 王 啸(1989—), 男, 山西襄汾人, 硕士生, 研究方向为无线电导航、全球卫星导航系统。

处理过程中,能否对进入监视区域的飞机快速准确地进行航迹起始,对终端区飞行安全至关重要。本文针对 PAR 的航迹起始问题,提出一种三维空间航迹起始方法。该方法分为两步:第一步是建立三维坐标系,将所有量测点迹投影到 3 个坐标平面上;第二步是利用组合 Hough 变换算法来判断航迹起始,在数据处理过程中提出一种多步组合的方法以增大真实航迹起始概率,并用飞机运动速度压缩组合数量,降低了运算量,仿真验证了算法的有效性。

1 算法原理

1.1 基于投影的三维航迹起始

在处理三维空间中的直线航迹起始问题时,若使用三维 Hough 变换算法,处理会非常复杂,运算量也会非常大。根据三维空间中的直线在平面上的投影仍为直线,文献[2]将三维空间中的航迹检测问题转化为 2 个二维平面上的航迹检测问题。但是若某一条航迹的方向是垂直于所选的一个投影平面的,由于误差的存在,该航迹在该投影面上的投影将会是分布在一定区域的散点,对投影点进行 Hough 变换后的累积值很有可能不能满足判决条件,造成漏起始。

针对这一问题,本文借鉴上述算法的思想,将雷达所得点迹在 3 个相互垂直的平面上进行投影,可以保证至少有 2 个平面上的投影点是可用的。只要相同点迹在 2 个平面上投影的 Hough 变换的积累值满足检测门限,即判断航迹起始成功。

如图 1 所示,PAR 通常配置在跑道一侧,以雷达到跑道中心线的垂点为坐标原点,以水平面的垂线为 z 轴,以跑道中线指向着陆端的方向为 y 轴, x 轴、 y 轴、 z 轴成右手螺旋关系,在处理数据时以 3 个坐标平面为投影平面。雷达的探测范围为航向角范围 ρ ,俯仰角范围 φ ,在空间中呈一扇形区域。

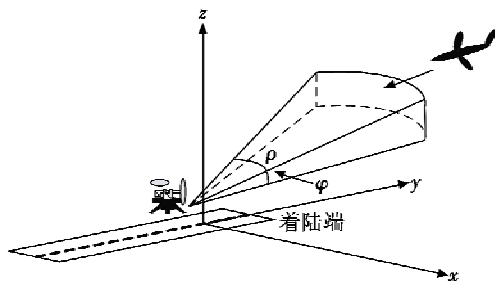


图 1 精密进场雷达配置及空间坐标

Fig. 1 Location and spatial coordinates of PAR

1.2 组合 Hough 变换算法

在二维平面上利用 Hough 变换起始航迹的本质,即是把雷达量测空间的一点 (x, y) 转换为参量空间的一条曲线^[4-5],即

$$d = x \sin \theta - y \cos \theta, \quad \theta \in [0, \pi] \quad (1)$$

由式(1)建立了一个从量测空间中的一个点到参量空间中一条曲线的映射。式中: d 代表量测空间中坐标原点与经过点 (x, y) 的一条直线的距离,可正可负; θ 代表坐标原点到这条直线的垂线与 x 轴的夹角。而具有相同特征的一组点,其对应的曲线在参量空间会相交。将参量空间以间隔 $(\Delta\theta, \Delta\rho)$ 划分成一个个的量化区间,通过检测不同量化区间内参量点的累积情况(数量或幅值),即可完成航迹起始的检测。

根据标准 Hough 变换的原理可知,在数据处理过程中,会对参量空间内每一量化间隔内曲线的取值进行计算,运算量会随着量测空间内杂点的增多和量化间隔的减小而变大,如若对 3 个投影平面同时进行 Hough 变换,则运算量是一个平面时的 3 倍。

BEN-ITZVI D 和 SANDLER M B 于 1990 年提出一种组合 Hough 变换方法,即 CHT (Combinatorial Hough Transform) 算法,可以大大地减小 Hough 变换的运算量^[6]。

在 Hough 变换中,量测空间中的一个点决定着参量空间中一条曲线,而反过来,量测空间中一条直线则是对应于参量空间中的一个点,CHT 算法就是利用了这个性质。由式(1)可知,对于量测空间中的两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,可以在参量空间中确定一个方程组。

$$\begin{cases} d = x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta \\ d = x_2 \sin \theta - y_2 \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

解方程组,即得这两点所形成的直线在参量空间所对应的点的坐标。

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \\ d = x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

这样,由式(3)同样建立起了量测空间中的两个点与参量空间中的一个点之间的映射。由 θ 与 d 所代表的意义可知,若是三点共线,则任意两点之间的组合 Hough 变换的映射值必然在参量空间重合。这便是组合 Hough 变换应用于航迹起始检测的基本原理。

如图 2 所示,假设虚线为虚线直线航迹在平面上的投影,圆点为对该航迹的量测点,这些点迹由于噪声的污染并不完全在一条直线上。将投影点按照时间顺序依次连成直线,并按式(3)将所得直线变换到参量空间中去。在这里,将这种依照量测所得时间顺序依次进行组合的形式称为一步组合。变换后的结果如图 3 所示。图 3 中,两条虚线的交点为“真实”航迹所对应的变换值,在这里把它称为“真实点”;同一航迹上的量测点的组合 Hough 变换,在参量空间上映射的点

聚集到了一个区域内。将参量空间划分成不同的区间,对不同区间内的积累情况进行判断,即可获得航迹起始。

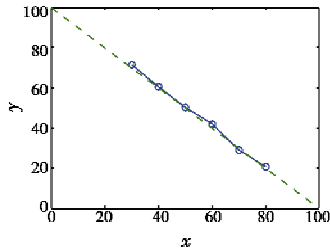


图2 量测空间的虚拟航迹

Fig. 2 Virtual track in measurement space

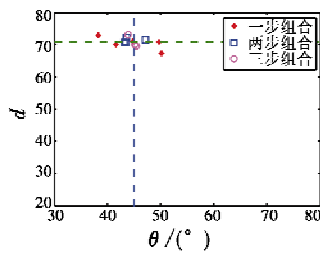


图3 组合 Hough 变换

Fig. 3 Combinatorial Hough transform

一步组合 Hough 变换后的映射点虽然聚集在了一个区域内,但是,由于各种误差的存在,其聚集效果并不明显,这将对量化间隔内的累计值检测造成困难。理论上讲,来自同一航迹上的所有点,都可以用来进行组合 Hough 变换,以加大量化间隔内的累积值。所以同时选取间隔 2 个量测周期和 3 个量测周期的量测值进行组合 Hough 变换,并称这一形式为两步组合和三步组合。

由图 3 可以看到,当加入两步组合和三步组合的变换值后,映射点在“真实点”周围的聚集情况得到明显改善,且三步组合的聚集情况最好。

1.3 量化间隔与约束条件

在标准 Hough 变换算法中,参量空间中量化间隔的选取是一个重要的部分,需要综合考虑量测值的误差及所期望的真实航迹起始概率和虚假航迹起始概率。一般来讲,随着量测误差的增大,为了获得较大的真实航迹起始概率,需要选择较大的量化间隔,但与此同时,量化间隔的增大也会增加杂波点的映射值落入真实量化区域的可能性,造成虚假航迹起始概率增大。而且,无论选择多大的量化间隔,都会存在某一航迹的映射点在参量空间中刚好分布在量化区间分界线的两侧,导致在两个量化区间的累积值都无法满足判断条件的情况。

针对这种情况,可以在已有量化空间 $\Delta\theta$ 的基础上,设置一个包含两个小量化间隔的大的量化间隔 $2\Delta\theta$ 进

行滑动,以 $2\Delta\theta$ 为间隔进行累积判断,在某一大空间上满足积累条件后,再在大的量化区间设定一个 $\Delta\theta$ 大小的滑窗以 $\Delta\theta/2$ 步进滑动,进行下一步判断。

假设得到相邻 n 个时刻的量测,某一时刻 t 的量测的点迹数量为 M_t ,式(4)所示为各个时刻所获得的量测数量所组成的向量。

$$\bar{M} = (M_1, M_2, \dots, M_n), \quad n = 4, 5, 6, \dots \quad (4)$$

设每一时刻得到量测数量相差不大,平均量测数量为 $m = (\sum_{i=1}^n M_i) / n$ 。

以式(1)的计算量为 p ,式(3)的计算量为 q ,显然 $p < q$ 。在 n 个时刻内,HT 和逻辑算法的计算量为

$$p \sum_{i=1}^n \frac{\pi M_i}{\Delta\theta}, \quad \text{每一时刻的平均运算量为 } \pi m p / \Delta\theta.$$

三步组合 CHT 算法的运算量为 $q \sum_{i=1}^{n-3} M_i (M_{i+1} + M_{i+2} + M_{i+3})$,基于前面的假设可做如下近似

$$M_{i+1} + M_{i+2} + M_{i+3} \approx 3m \quad (5)$$

则三步组合 CHT 算法每一时刻的平均运算量为 $3qm^2$ 。

对比两种算法的运算量可以看出,运用组合 Hough 变换算法并不会直接减少运算量,某些情况下甚至还会增大运算量,因为,随着雷达检测到的点迹的增加(无论是真实点还是杂波),不同点迹之间的组合数目会急剧增大,从而导致运算量急剧增大。

在此可以使用飞机的运动速度对点迹组合进行限制,因为若相邻两个时刻的某两个点迹距离很大,那么显然它们不可能属于同一飞机,对它们运用 CHT 算法是没有意义的。假设着陆雷达的扫描时间间隔为 T ,监控区域内飞机的飞行速度 v 的范围为

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad (6)$$

则两次量测之间的距离必然不会超过 $v_{\max} T$ 。同理,对于两步组合和三步组合也可以以 $2v_{\max} T$ 和 $3v_{\max} T$ 来作为距离约束。

这样,对于相邻的 n 个时刻的量测,对其按上述算法进行组合 Hough 变换,若在参量空间某一量化区域内的积累值大于 N ,则判断在该投影平面航迹起始成功,若相同的点在剩余两个平面中至少在一个平面内同样判断成功,则判定航迹起始成功。

2 仿真实验

假设在雷达监视区域内有 5 个目标进行匀速直线运动,5 个目标的初始状态量为 (x, y, z, v_x, v_y, v_z) 。采样间隔为 1 s,总共持续 4 s。目标的最大运动速度为 400 m/s,最小运动速度为 50 m/s。忽略目标的运动误差,只考虑量测误差,量测误差服从高斯分布。5 个虚

拟目标的初始状态量如表 1 所示。

表 1 目标初始状态量
Table 1 Initial states of targets

	x/m	y/m	z/m	$v_x/(m \cdot s^{-1})$	$v_y/(m \cdot s^{-1})$	$v_z/(m \cdot s^{-1})$
目标 1	0	30000	2500	0	-250	-20
目标 2	5000	25000	3000	-200	-200	0
目标 3	-5000	20000	3000	200	-200	0
目标 4	-6000	20000	3000	300	0	0
目标 5	1500	20000	3000	0	300	0

这 5 个目标的运动状态分别代表飞机沿预订航迹下滑,从监视区域远端进入监视区域,从监视区域侧面进入监视区域,飞行方向平行投影平面等几种运动状态。这 5 种目标覆盖了终端区飞机的大部分运行类型。

杂波在整个监测区域服从均匀分布,杂波个数服从泊松分布。选定泊松分布的参数 λ 后,每个观测周期内首先产生 $(0,1)$ 区间上服从均匀分布的随机数 r ,然后由式(7)确定该观测周期内的杂波数。

$$e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda^j}{j!} < r \leq e^{-\lambda} \sum_{j=0}^i \frac{\lambda^j}{j!}, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

PAR 监视范围较小,从一般机场配置情况来看,终端区干扰源也较少,所以在仿真时设置较低的杂波水平,选取 $\lambda = 20$ 。

量测噪声为高斯白噪声,其中,测距误差 $\sigma_r = 50$ m,航向角误差 $\sigma_p = 0.3^\circ$,俯仰角误差 $\sigma_e = 0.2^\circ$ 。

在仿真时以基于 Hough 变换与逻辑的方法作为对比,参数选择对照文献[2],对每一个目标进行 1000 次仿真,以得到真实航迹起始概率的统计信息,所得结果如表 2 所示。

表 2 真实航迹起始概率

Table 2 Probabilities of true track initiation

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
CHT/%	96.5	94.0	94.5	95.6	97.0
HT与逻辑/%	1	98.2	98.5	0	0

由表 2 中的仿真结果可以看出,当有目标的运动方向恰好垂直于所选投影平面时,基于 Hough 变换与逻辑的算法将完全失去作用,而本文所提出的算法仍然有较高的真实航迹起始概率。

但是对于目标 2 与目标 3 两种情况,基于 Hough 变换和逻辑的算法却又能达到比本文高的真实航迹起始概率。这是因为基于 Hough 变换和逻辑的算法依赖 Hough 变换来排除杂波,然后利用逻辑法来起始航迹。

从文献[2]仿真时所选取的参数可以看出,该方法的核心思想在于利用 Hough 变换时选取较大 $\Delta\theta$ 和 Δd 来排除杂波,在低杂波条件下,可认为其实质就是逻辑算法。由文献[7]所得出结论可知,随着量测误差的增大,Hough 变换算法的真实航迹起始概率比逻辑算法下降得更为迅速,这与本文的仿真结果是相一致的。

3 结论

本文提出一种基于组合 Hough 变换的三维航迹起始算法,用于着陆引导雷达的航迹处理。该算法将多步组合 Hough 变换算法引入航迹起始算法中,与基于 Hough 与逻辑的算法相比,降低了运算量,有更好的适用性。

参考文献

- [1] LEUNG H, HU Z, BLANCHETTE M. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environments [J]. IEEE Processings on Radar Sonar Naving, 1996, 143(4): 246-254.
- [2] 王国宏, 苏峰, 何友. 三维空间中基于 Hough 变换和逻辑的航迹起始[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2198-2200.
WANG G H, SU F, HE Y. Hough Transform (HT) and logic based track initiator in three dimensional space[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2198-2200.
- [3] 金术玲, 梁彦, 王增福, 等. 两级 Hough 变换航迹起始算法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 590-593.
JIN S L, LIANG Y, WANG Z F, et al. A two-hierarchy Hough wansform based track initiation algorithm[J]. AC-TA Electronica Sinica, 2008, 36(3): 590-593.
- [4] SMITH M C, WINTER E M. Feature space transform for multitarget detection [C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Albuquerque, NM, 1980: 835-836.
- [5] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communication of the AC, 1972, 15(7): 112-115.
- [6] BEN-TZVI D, SANDLER M B. A combinatorial Hough transform [J]. Pattern Recogniton Letters, 1990, 11(3): 167-174.
- [7] HU Z J, LEUNG H, BLANCHETTE M. Statistical performance analysis of track initiation techniques [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(2): 445-456.