doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.016

引用格式:庞岳峰,李春锋,牛攀峰,等. 基于理论弹道速度匹配的飞行器测控记忆跟踪算法[J]. 电讯技术,2016,56(4):443-447. [PANG Yuefeng, LI Chunfeng, NIU Panfeng, KONG Shangman. A memory tracking algorithm for spacecraft TT&C based on theoretical trajectory velocity matching[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(4):443-447.]

基于理论弹道速度匹配的飞行器测控记忆跟踪算法*

庞岳峰**,李春锋,牛攀峰,孔尚满

(酒泉卫星发射中心,甘肃 酒泉 732750)

摘 要:针对遥测设备现有记忆跟踪存在速度跳变和外推误差大的问题,提出了一种基于理论弹道 速度匹配的记忆跟踪算法。分析了遥测设备记忆跟踪算法原理与不足,对原记忆跟踪算法进行改进,同时将 Neville 算法用于记忆跟踪数据插值。仿真结果表明新算法外推 10 s、5 s 和 3 s 的均方根 误差比原算法平均减小 44.9%。新算法在设备应用的测试结果同样证明了其优越性。

关键词:遥测设备;记忆跟踪;速度匹配;Neville 插值算法

中图分类号:TN820.4 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)04-0443-05

A Memory Tracking Algorithm for Spacecraft TT&C Based on Theoretical Trajectory Velocity Matching

PANG Yuefeng, LI Chunfeng, NIU Panfeng, KONG Shangman

(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

Abstract: The memory tracking module in telemetry equipment is used for keeping antenna in tracking state. However, by analysis of actual data from many different missions, the memory tracking module has two problems, one is the velocity jumping, and the other is the big extrapolation error. Through analyzing original memory tracking algorithm, this paper proposes a new memory tracking algorithm based on velocity matching, which is an improvement on the original one. At the same time, Neville interpolation algorithm is used for the interpolation of memory tracking data. Simulation result shows the root mean square error (RMSE) of new algorithm is 44.9% smaller than that of the original one in the case of 10 s,5 s and 3 s extrapolation. Test results of new algorithm in telemetry equipment also proves its superiority. **Key words**; telemetry equipment; memory tracking; velocity matching; Neville interpolation algorithm

1 引 言

测控设备在跟踪目标过程中,信号受外界影响 会导致跟踪中断。为使跟踪中断后天线保持精准指 向目标并及时实现重新捕获和跟踪,同行在测控设 备跟踪精度提升方面已经进行了许多相关研 究^[1-3],例如:在光电经纬仪上采用切比雪夫多项式 对观测数据拟合与外推,精度高于传统的插值算法, 保证了较短时间(3 s 左右)的记忆跟踪精度^[1];在 脉冲多普勒雷达上给出了基于记忆方法的抗遮挡跟踪的系统框架,设计了记忆跟踪滤波器与正常跟踪 滤波器的切换机制^[2]。但是,对遥测设备记忆跟踪 精度提高方面的研究目前还较少。

遥测设备采用单通道单脉冲跟踪体制,在目标级间分离、进入黑障或起旋后跟踪接收机会失锁^[4],接收机失锁时自动转为记忆跟踪,目前遥测 设备在转记忆跟踪后存在速度跳变和外推误差大的

^{*} 收稿日期:2015-10-22;修回日期:2016-01-20 Received date:2015-10-22;Revised date:2016-01-20

^{**} 通信作者:pang_yuefeng@126.com Corresponding author:pang_yuefeng@126.com

问题。针对这一问题,本文提出了一种基于理论弹 道速度匹配的记忆跟踪算法,并采用 Neville 算 法^[5-6]对外推点进行插值,最后以最大角速度和最 大角加速度不同的9类弹道为仿真输入条件,分别 按俯仰上升期、过顶前和俯仰下降期设置失锁点进 行外推10s、5s和3s的记忆跟踪仿真。仿真结果 表明新记忆跟踪算法均方根误差比原算法平均减小 了44.9%。新算法在设备的测试结果证明其达到 了提高遥测设备记忆跟踪精度的目的。

2 现有遥测记忆跟踪原理分析

2.1 遥测设备记忆跟踪原理

遥测设备采用角误差电压驱动天线实现自跟 踪,在波束范围内天线偏离目标角度越大,则角误差 电压越大,天线对准目标时角误差电压为零,其跟踪 过程可视为方位、俯仰方向的变速运动。若目标分 离、起旋等因素导致接收机失锁,设备转入记忆跟 踪。设目标丢失瞬间跟踪的方位角为A_{x0}、方位角速 度为A_{v0}、方位角加速度为A_{a0},在等间隔h上进行测 量获得角度数据,则下一个点的方位角A_x可近似为

 $A_{x} = A_{x0} + h \times A_{v0} + 0.5h^{2} \times A_{a0} \circ$ (1)

若目标丢失后跟踪的方位角加速度保持不变,则目标丢失后 N 个点的方位角可表示为

 $A_{x} = A_{x0} + N \times h \times A_{v0} + 0.5 (N \times h)^{2} \times A_{a0} \circ (2)$

同理,设目标丢失瞬间跟踪的俯仰角为 E_{x0} ,俯仰角速度为 E_{x0} ,俯仰角加速度为 E_{a0} ,目标丢失后 N个点的俯仰角可表示为

 $E_{x} = E_{x0} + N \times h \times E_{v0} + 0.5 (N \times h)^{2} \times E_{a0 \circ}$ (3)

记忆跟踪原理是以外推的方位角 A_x和俯仰角 E_x为指令角,驱动天线运行,记忆跟踪误差主要来源 是 A_x和 E_x的外推误差。

2.2 现有记忆跟踪算法的不足

现有记忆跟踪算法存在两个问题:一是算法无 法对目标丢失后的角速度和角加速度进行预估,只 能假定跟踪中方位和俯仰近似匀加速运动,因此算 法引入的误差较大;二是A_{x0}、A_{a0}、E_{x0}和 E_{a0}为目标丢 失瞬间角速度和角加速度的采样值,此值与跟踪误 差电压线性相关,而失锁瞬间信号处于跟踪门限,解 调出的跟踪误差电压失真,所以现有记忆跟踪算法 会造成目标失锁瞬间天线方位、俯仰方向的振荡,如 图1和图2所示。如果失锁时天线角速度较大,则 极难重捕目标,而且会造成天线损伤。



Fig. 1 The velocity change of azimuth in a mission (part)



Fig. 2 The velocity change of elevation in a mission(part)

3 基于弹道速度匹配的记忆跟踪算法

3.1 算法的主要思路

原算法的主要不足在于失锁瞬间速度、加速度 失真和不能准确预估下外推点的速度。本文针对这 一问题设计新算法,用理论弹道与正常跟踪数据进 行匹配判决,匹配成功后从理论弹道中提取与当前 跟踪状态对应的速度和加速度值进行记忆外推,匹 配失败后继续采用原算法。

跟踪数据与理论弹道从方位比较有3种可能: 一是跟踪数据与理论弹道一致;二是跟踪数据比理 论弹道有所提前或滞后,但弹道趋势一致;三是跟踪 数据与理论弹道相差较大,在时间上和趋势上都无 法建立关联。方位速度匹配的记忆跟踪算法流程如 图3所示,具体步骤如下:

(1) **跟踪及理论数据提取** 在自跟踪状态下提 取跟踪数据,判断理论弹道合法性,存入各自缓存;

(2)**判决参数确定**通过自跟踪的角度和速度 信息并结合工程实际确定方位判别门限δ_a和搜索区 间长度 N_a;

(3) **遍历查找** 设当前时间为 T,对先进先出队 列中的 T– N_a 到 T+ N_a 的数据进行遍历,依据 δ_a 判断

· 444 ·

跟踪数据与理论弹道匹配关系,然后调用外推算法;

(4)**外推算法** 在匹配中可能出现匹配成功和 匹配失败两种结果,针对匹配结果分别进行外推 处理。



图 3 弹道速度匹配的方位记忆跟踪算法流程图 Fig. 3 The flow chart of memory tracking algorithm in azimuth based on trajectory velocity matching

图 3 中,跟踪及理论数据采样间隔为 1 s,匹配 判决过程与跟踪过程同步进行,所以判定耗时小于 1 s。俯仰记忆跟踪算法流程除参数外与图 3 一致, 不再另述。

3.2 跟踪角度与理论弹道的匹配判决

以方位为例,跟踪角度与该时刻的理论角度求差,然后识别差值是否超过门限 δ_a 。通常取3点连续正常跟踪的数据进行匹配计算,设跟踪数据为 a_{xi} ,理论角度为 a_{xi} ,则有

$$|a_{x_i} - a_{x'_i}| \leq \delta_a, 1 \leq i \leq 3 \quad (4)$$

假如式(4)成立,则认为跟踪数据与弹道匹配成功,否则认为匹配失败。实现时以起飞时刻的相对时T为时间基准,采用先进先出队列循环读取 $T-N_a$ 到 $T+N_a$ 的理论跟踪角度数据,并从 $T-N_a$ 开始搜索直至 $T+N_a$,如找到满足式(4)并最接近T的点的时间 T_a ,认为方位跟踪与弹道匹配成功,否则认为匹配失败。

同理设俯仰判别门限 δ_{e} ,假设俯仰跟踪数据记为 e_{x_i} ,俯仰理论角度数据记为 e_{x_i} ,则有

$$|e_{x_i} - e_{x'_i}| \leq \delta_e, 1 \leq i \leq 3 \quad (5)$$

 $δ_a 和 δ_e 反映匹配时跟踪角度与理论弹道的相近$ 度,设跟踪中采集的方位、俯仰上的角速度分别为 $<math>A_v 和 E_v, 则 δ_a 、 \delta_e 应与 A_v 、 E_v 相关。 N_a 和 N_e 反映跟$ 踪角度与理论弹道在时间上超前或滞后的程度。通 过对以往多次任务跟踪数据分析,结合工程实际实现效率方面的考虑,取值 $\delta_a = 0.8A_v \ \delta_e = 0.8E_v \ N_a = 10 \ N_e = 10$ 较为合理。

3.3 匹配判决后的外推

如匹配成功,则 T_a 是满足式(4)并最接近目标 丢失时相对时 T 的时间, $M_a = T - T_a$, 目标丢失前跟 踪的方位角为 Ax_T , 匹配后的理论弹道点角速度为 Av_{T_a} , 方位角加速度为 Aa_{T_a} , 以后 h 秒的匹配后的理 论弹道点角速度为 $Av_{T_{a+1}}$, $Av_{T_{a+2}}$, …, $Av_{T_{a+h}}$, 角加速度 为 $Aa_{T_{a+1}}$, $Aa_{T_{a+2}}$, …, $Aa_{T_{a+h}}$, 方 位 角 依 次 为 Ax_{T+1} , Ax_{T+2} , …, Ax_{T+h} , 用下式递推计算:

$$Ax_{n+1} = Ax_n + Av_{n-M_n} + 0.5 \times Aa_{n-M_n} \circ$$
 (6)

同理,目标丢失以后h个点的俯仰角依次为 $Ex_{T+1}, Ex_{T+2}, \dots, Ex_{T+h},$ 用下式递推计算:

$$Ex_{n+1} = Ex_n + Ev_{n-M_n} + 0.5 \times Ea_{n-M_n} \circ$$
(7)

特别地,当弹道匹配且时间完全对齐时, $M_a=0$,则有

$$Ax_{n+1} = Ax_n + Av_n + 0.5 \times Aa_n$$
, (8)

$$Ex_{n+1} = Ex_n + Ev_n + 0.5 \times Ea_{n\circ}$$
 (9)

式中: $T \leq n \leq T + h - 1_{\circ}$

通过多次任务跟踪数据分析,结果表明由于目标实际飞行弹道与理论弹道相差大而导致不能匹配 成功的概率非常小,在匹配失败的情形下继续采用 设备原记忆跟踪算法。

3.4 外推点的 Neville 插值

记忆跟踪外推后的数据为每秒1点,工程中还 需要进行插值。在众多的数值分析论著中,同时给 出了 Aitken 逐次线性插值公式和 Neville 算法以及 Newton 插值公式,其插值结果基本一致^[5]。Neville 插值模型简单、计算量小,没有龙格现象,易于增加 和减少节点而不降低程序的效率,在内插区间的两 端不会出现数据的跳跃和振荡^[6],所以选择 Neville 算法进行外推点插值。

已知被插值的函数 f(t) 互异的节点 $(t_i, f(t_i))$, t_i 代表插值节点的时间, $f(t_i)$ 代表角度值, Neville 插 值计算多项式递推关系如下, 其递推公式见式 (10),这种插值方法记为 Neville 插值^[7]。

 $t_0 \quad f(t_0)$ $t_1 \quad f(t_1)$ $P_{0,1}(t)$ $P_{0,1,2}(t)$ $t_2 \quad f(t_2)$ $P_{1,2}(t)$ $t_3 \quad f(t_3)$ $P_{2,3}(t)$ $P_{1,2,3}(t) = P_{0,1,2,3}(t)$: ÷ : ÷ ÷ $t_n \quad f(t_n) \quad P_{n-1,n}(t) \quad P_{n-2,\dots,n}(t) \quad P_{n-3,\dots,n}(t) \quad \cdots \quad P_{0,\dots,n}(t)$ Neville 方法用递推的方法填写表中的数据,从

左到右每次一列,递推公式为

· 445 ·

$$P_{i,(i+1),\dots,(i+m)}(t) = \frac{(t-t_{i+m})P_{i,(i+1),\dots,(i+m-1)}(t)}{(t_i-t_{i+m})} + \frac{(t_i-t)P_{i+1,\dots,(i+m)}(t)}{(t_i-t_{i+m})} \circ$$
(10)

式中: $i=0,1,\dots,n;m=0,1,\dots,n-i_{\circ}$

4 仿真实验与分析

4.1 仿真条件及结果判定标准

选择的软件仿真环境是 Windows xp+Visual C+ +6.0(SP6)。采用最大角速度和最大角加速度不同 的9类弹道(见表1)对记忆跟踪算法进行仿真,以 检验在不同跟踪角速度和角加速度下新记忆跟踪算 法的准确性。为对仿真效果进行定量比较,以均方 根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为判断标 准,定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (g_i - f_i)^2} \quad . \tag{11}$$

式中: f_i 为外推后角度; g_i 为理论角度。

表1 仿真所用弹道的最大角速和最大角加速

Tab. 1 The max angular velocity and acceleration used in the memory tracking simulation

弹道编号	最大角速度/(°/s)	最大角加速/(°/s)
1	2.93	0.28
2	1.61	0.11
3	1.94	0.58
4	2.45	0.32
5	1.45	0.10
6	3.06	0.18
7	4.10	0.20
8	4.80	0.26
9	14.50	2.39

4.2 仿真结果分析

仿真时首先根据不同弹道和不同布站点站址算 出理论的跟踪方位、俯仰,将理论跟踪方位、俯仰在 时间上进行不同程度的平移并叠加随机量,分别在 每条弹道的俯仰上升期,过顶前和俯仰下降期随机 选择失锁点,形成 27 组数据,用原算法与新算法分 别进行 10 s、5 s和3 s外推的仿真,最后对两种算法 均方根误差进行统计,表2 给出了其均值。

表 2 原算法与新算法均方根误差仿真结果均值 Tab. 2 The simulation results of RMSE in

original algorithm and new algorithm

original algorithm and new algorithm						
	RMSE 均值					
算法	10 s	10 s	5 s	5 s	3 s	3 s
	方位	俯仰	方位	俯仰	方位	俯仰
原算法	0.46	0.35	0.26	0.25	0.18	0.18
新算法	0.28	0.21	0.14	0.14	0.10	0.08

对表 2 中方位、俯仰外推 10 s、5 s 和 3 s 情形下的均方根误差取均值,绘直方图如图 4 所示。



图 4 原算法与新算法 RMSE 均值比较 Fig. 4 The comparison of RMSE between the new algorithm and the original one

从表 2 和图 4 可以看出,新算法比原算法均方 根误差明显小。通过表 2 数据计算,方位、俯仰外推 10 s、5 s和3 s情形下新算法均方根误差的均值分别 减小了 39.1%、40%、46.2%、44%、44.4%和 55.6%,平均减小了 44.9%。

5 算法应用效果测试

遥测设备在每次跟踪过程中出现记忆跟踪的时 机和保持时长不可能相同。为对原算法和新算法在 同等条件下比较,检验新算法在设备的应用效果,采 用遥测设备角跟踪信号模拟器结合设备伺服分系 统、解调分系统完成测试。角跟踪信号模拟器是自 研的遥测信号及角误差信号模拟设备,对遥测跟踪 接收机和天线控制单元来说,其处理模拟信号与处 理真实目标信号的过程完全一致。采用角跟踪信号 模拟器可实现在模拟跟踪过程中任意时刻信号失 锁,使天线由自跟踪转入记忆跟踪,信号失锁时长可 根据测试需要设置,而且这种模拟过程可重复,保证 测试条件相同^[4]。

采用信号模拟器时,在自跟踪状态下天线角度 与模拟器装订角度一致。以模拟器装订角度为真 值,对 10 s 记忆跟踪的均方根误差进行统计,共测 试 3 组原算法和新算法记忆跟踪均方根误差,测试 数据见表 3。

Ŷ
Ś

Tab. 3 The comparison of RMSE between the new algorithm and the original on telemetry equipment

and the original on telemetry equipment							
算法	方位 RMSE		俯仰 RMSE				
	1组	2 组	3组	1组	2 组	3组	
原算法	0.66	0.71	0.52	0.33	0.39	0.29	
新算法	0.38	0.41	0.27	0.21	0.23	0.21	

从表3可看出相同测试条件下新记忆跟踪算法 均方根误差比原算法明显小。为便于直观比较,将 第三组方位记忆跟踪角度绘图如图5和图6所示。 由图5可知原算法在转入记忆跟踪时,因为角速度 和角加速度值已失真,导致记忆跟踪角度与真值相 比发生较大变化。由图6可知新算法不存在角度突 变,且记忆跟踪过程整体误差小。



图 5 原记忆跟踪算法方位效果

Fig. 5 The original algorithm effect on azimuth



图 6 新记忆算法方位效果 Fig. 6 The new algorithm effect on azimuth

6 结束语

针对目前遥测设备在转记忆跟踪后存在速度跳 变和外推误差大的问题,本文提出了一种基于理论弹 道速度匹配的记忆跟踪算法。新算法有效提高了记 忆跟踪精度,但其前提是目标飞行弹道与理论弹道偏 差不大,能成功提取与当前跟踪相匹配的速度和加速 度值。由于我国运载火箭和导弹技术已较为成熟,实 际应用中目标严重偏离理论弹道的概率很小,在匹配 失败时仍采用原算法实现记忆跟踪。后续将对匹配 失败时记忆跟踪精度的提高进一步研究。

参考文献:

[1] 李强,崔岩. 切比雪夫多项式在单台经纬仪记忆跟踪中的应用[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(4):169-173.
 LI Qiang, CUI Yan. Application of chebyshev polynomial in

memory tracking with single theodolite[J]. Laser & Opto-Electronics Progress, 2013, 50(4):169–173. (in Chinese)

- [2] 王宗友,徐智勇.单台光电经纬仪对目标稳定跟踪的研究[J].光电工程,2003,30(2):11-14.
 WANG Zongyou, XU Zhiyong. Study on stable tracking single target with single photoelectric theodolite[J]. Opto-Electronic Engineering,2003,30(2):11-14. (in Chinese)
- [3] 陈付彬,孙洪忠,张军. 记忆跟踪在 HPRF-PD 雷达中抗 距离遮挡的应用[J]. 制导与引信,2008,29(3):42-27.
 CHEN Fubin, SUN Hongzhong, ZHANG Jun. Application of memory-tracking in HPRF-PD radar with range-eclipsing
 [J]. Guidance & Fuze,2008,29(3):42-27. (in Chinese)
- [4] 庞岳峰,褚福勇,张凯. 遥测接收站角跟踪信号模拟器的设计与实现[J]. 电子科技,2015,28(2):181-184. PANG Yuefeng, CHU Fuyong, ZHANG Kai. Design and implementation of angle tracking signal simulator on telemetry receiving station[J]. Electronic Science & Technology,2015,28(2):181-184. (in Chinese)
- [5] 田德宇,叶留青. Aitken-Neville-Newton 插值法计算过 程的等价性[J].河南科学,2007,25(6):885-887.
 TIAN Deyu, YE Liuqing. Eqllivalence of Aitken-Neville-Newton insert calculating progresses[J]. Henan Science, 2007,25(6):885-887. (in Chinese)
- [6] 邱蕾,廖远琴,花向红. 基于 IGS 精密星历的卫星坐标 插值[J]. 测绘工程报,2008,17(4):15-18.
 QIU Lei, LIAO Yuanqin, HUA Xianghong. Interpolation methods for precision ephemeris based on IGS[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2008,17(4):15-18. (in Chinese)
- [7] 周文全,杨天奇.基于 Neville 型插值的过程神经网络
 [J].计算机工程与设计,2012,33(7):2788-2791.
 ZHOU Wenquan, YANG Tianqi. Process neural network based on Neville-type interpolation[J]. Computer Engineering & Design,2012,33(7):2788-2791. (in Chinese)

作者简介:



庞岳峰(1980—),男,甘肃会宁人,2002 年于重庆大学获学士学位,现为工程师,主要 研究方向为无线电测控技术;

PANG Yuefeng was born in Huining, Gansu Province, in 1980. He received the B. S. degree from Chongqing University in 2002. He is now an engineer. His research concerns radio TT&C. Email;pang_yuefeng@126. com

李春锋(1964—),男,陕西乾县人,1986年于军械工程 学院获学士学位,现为研究员,主要从事航天测控总体技术 方面的研究;

LI Chunfeng was born in Qianxian, Shaanxi Province, in 1964. He received the B.S. degree from Ordnance Engineering College in 1986. He is now a senior engineer of professor. His research concerns space TT&C communication system.

牛攀峰(1986—),男,山西晋城人,2012年于南开大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为信号与信息处理;

NIU Panfeng was born in Jingcheng, Shanxi Province, in 1986. He received the M. S. degree from Nankai University in 2012. He is now an engineer. His research direction is signal and information processing.

孔尚满(1989—),男,青海湟中人,2011年于天津大学 获学士学位,现为工程师,主要研究方向为无线电测控技术。

KONG Shangman was born in Huangzhong, Qinghai Province, in 1989. He received the B. S. degree from Tianjing University in 2011. He is now an engineer. His research concerns radio TT&C.