

HPM 天线外引导数据处理方法研究

孙孟林¹ 张希¹ 许海深¹

SUN Menglin ZHANG Xi XU Haishen

摘要

HPM 天线通常采用外引导方式进行目标捕获和跟踪, 搜索雷达提供 1 Hz 的粗引导数据, 因雷达测角、测距精度限制, 引导数据噪声较大, HPM 天线在捕获目标时需将外引导数据进行处理, 滤除噪声并插值为驱动天线转台连续转动的方位角、俯仰角, 提出了一种快速的外引导数据实时处理方法。首先应用坐标变换算法将外引导数据转化至 HPM 天线大地直角坐标系下, 其次将数据分别在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴应用跟踪微分器进行滤波处理并得到各轴向速度分量, 然后采用滑窗式多项式最小二乘拟合法进行数据拟合、预估和插值计算, 最后将直角坐标数据转换成 HPM 天线的指向角。实验证明, 外引导数据通过此方法处理后, 精度满足 HPM 天线捕获要求, 能够有效辅助天线快速捕获目标并跟踪。

关键词

跟踪微分器; 引导数据; 坐标变换; 最小二乘; 曲线拟合

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.010

0 引言

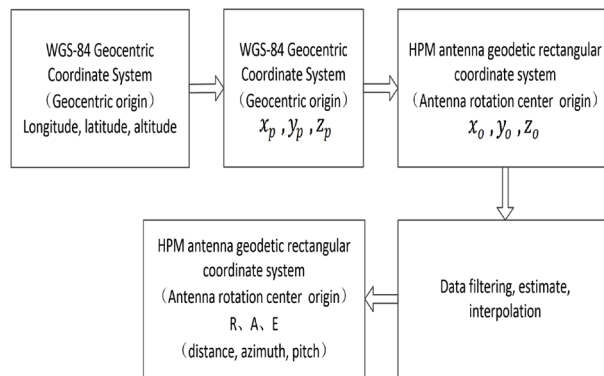
HPM (high power microwave, HPM) 天线是一种辐射强大微波能量用于攻击具有危险性的空中飞行目标、静止目标、地面移动或静止目标的天线, 并使对方的电子控制、通信系统功能减弱或失效。HPM 天线通常仅有微波发射功能, 无法自主探测目标, 在系统工作时需由外部雷达实时提供目标引导数据, 引导天线指向目标, 待捕获目标后转入光电跟踪模式, 并适时打击目标。

由于引导雷达测角、测距精度有限, 所以其提供的引导数据具有一定的随机误差, 在搜索目标时只能提供最快 1 Hz 的引导数据。因此需要对引导数据进行滤波、预估和插值处理, 再将处理后的引导数据作为 HPM 天线伺服系统真正的引导数据, 驱动天线运转。文献 [1] 对引导数据进行了误差分析, 通过分析误差调整数据处理中参数, 从而达到稳定引导跟踪目标。文献 [2] 介绍了尼威尔算法“四点插值”对引导数据的实时处理方法。本文提出了一种实时快速引导数据处理方法, 应用非线性跟踪微分器对引导数据进行滤波并获得目标的速度信息, 有利于伺服系统进行前馈复合控制; 同时采用多项式最小二乘算法进行数据的拟合、预估、插值, 能够快速、准确地引导 HPM 天线捕获目标, 实验证明此方法可以有效提高目标捕获的精度和速度。

1 雷达引导数据坐标转换

搜索雷达探测目标时在雷达极坐标上进行的, 对目标进

行测角、测距, 并结合雷达自身站址输出目标在 WGS-84 坐标系中的经度、纬度、高度, HPM 天线接收到目标经纬高数据后, 需结合自身站址将目标数据转换为驱动天线转动方位、俯仰指向数据。在本文中首先将目标的经纬高坐标变换为地心直角坐标系坐标, 再转换为以 HPM 天线旋转中心为原点的大地直角坐标, 也就是东北天坐标, 在大地直角坐标系中对引导数据进行滤波、预估、插值处理; 最后将大地直角坐标系数据转换到天线极坐标系, 获得天线的方位、俯仰指向角。坐标转换流程如图 1 所示。



1.1 经纬高坐标转换为 WGS-84 直角坐标系坐标

如图 2 所示, 以 O 为原点的坐标系 $\{X, Y, Z\}$ 为地心坐标系, 以 O' 为原点的坐标系 $\{x, y, z\}$ 为 HPM 天线大地直角坐标系。设 HPM 天线旋转中心 O' 在 WGS-84 坐标系中纬度、经度、高度分别为 L_o 、 B_o 、 H_o , 在地心直角坐标系中的坐标为 (x_o, y_o, z_o) 。

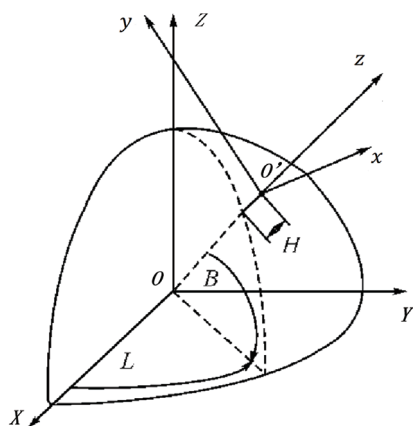


图2 地心坐标系与大地坐标系示意图

$$\begin{cases} x_o = (N + H_o)\cos B_o\cos L_o \\ y_o = (N + H_o)\cos B_o\sin L_o \\ z_o = [N(1 - e^2) + H_o]\sin B_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ 为第一偏心率, $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$; a 为长半轴, b 为短半轴, 采用 WGS-84 坐标系时, $a = 6\,378\,137\text{ m}$, $b = 6\,356\,752\text{ m}$ 。

同样, 设目标在 WGS-84 坐标系中纬度、经度、高度为 L_p 、 B_p 、 H_p , 可计算出其在地心直角坐标系中的值为 (x_p, y_p, z_p) 。

1.2 WGS-84 直角坐标系坐标转换为大地坐标系坐标

对于地心直角坐标系下目标 $P(x_p, y_p, z_p)$, 若转换到以 HPM 天线旋转中心 O' 为原点的大地直角坐标系下, 则需要经过平移和坐标轴旋转两个步骤。第一步, 平移: 将坐标系原点从地心 O 移动到 HPM 天线旋转中心 $O'(x_o, y_o, z_o)$ 。第二步, 坐标轴旋转: 首先将坐标系 Y 轴旋转 -90° , 再绕 X 轴旋转 $-(90 - L_o)^\circ$ 。第三步绕 Z 轴旋转 $-B_o^\circ$, 得到目标 P 在以 HPM 天线旋转中心 O' 为原点的大地直角坐标系的坐标 (x_{po}, y_{po}, z_{po}) 。

$$\begin{bmatrix} x_{po} \\ y_{po} \\ z_{po} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos L_o \sin B_o & -\sin L_o \sin B_o & \cos B_o \\ \cos L_o \cos B_o & \sin L_o \cos B_o & \sin B_o \\ -\sin L_o & \cos L_o & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_p - x_o \\ y_p - y_o \\ z_p - z_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 大地坐标系坐标转换为天线极坐标系坐标

在计算得到目标在大地坐标系坐标 (x_{po}, y_{po}, z_{po}) 后, 需对坐标数据进行滤波、预估、插值后得到 $(x_{po,f}, y_{po,f}, z_{po,f})$, 再将插值后坐标转换为天线极坐标系的坐标距离、方位角、俯仰角 (R, A, E) , 用以驱动天线转动。其中 R 表示目标距离天线的斜距, A 、 E 分别为天线的目标指向方位角、俯仰角。

$$\begin{cases} R = \sqrt{x_{po,f}^2 + y_{po,f}^2 + z_{po,f}^2} \\ A = \arccos \frac{x_{po,f}}{\sqrt{x_{po,f}^2 + y_{po,f}^2}} \\ E = \arcsin \frac{z_{po,f}}{\sqrt{x_{po,f}^2 + y_{po,f}^2 + z_{po,f}^2}} \end{cases} \quad (3)$$

2 非线性跟踪微分器滤波原理

在求取到目标大地系坐标后, 由于雷达精度的限制, 引导数据具有一定的噪声, 很容易引起天线剧烈抖动, 既影响对目标的捕获跟踪, 对天线结构也有一定的损害^[3]。根据目标的实际运动特性, 分为水平运动和垂直运动, 本文提出在天线大地直角坐标系对坐标值中 X 、 Y 、 Z 轴分量分别进行数据滤波、拟合、预估和插值处理, 然后再根据最终插值结果计算天线的目标指向角。

学者韩京清利用最速开关系统构造了跟踪不连续信号并提取其近似微分信号的非线性跟踪微分器, 提出的目的是为了较好地解决在实际工程问题中, 由连续或带随机噪声的量测信号合理提取连续信号及微分信号的问题^[4]。非线性跟踪微分器既可以对输入信号进行滤波, 又能提取该信号的微分, 兼顾了快速性和准确性, 具有良好的动态响应。它求取微分信号的方法同常规有限差分法相比, 能有效抑制高频噪声, 避免将其带入系统。

2.1 信号滤波及微分

非线性跟踪微分器的离散形式^[5]为:

$$\begin{cases} fh = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r_0, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf h \end{cases} \quad (4)$$

式中: v 为输入信号, v_1 为滤波器估计的输出, v_2 是跟踪微分器的微分输出, r_0 是跟踪微分器的“速度因子”, 值越大滤波器带宽越大, h 是跟踪微分器的积分步长即采样周期, h_0 是跟踪微分器的“滤波因子”, 值越大滤波效果越好。选取适当的 r_0 和 h_0 , 可以获得很好的滤波效果。

函数 $fhan(x_1, x_2, r_0, h_0)$ 的定义为:

$$\begin{cases} d = r_0 h_0^2 \\ a_0 = h_0 x_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(8 + |y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = [\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)]/2 \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \\ s_a = [\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)]/2 \\ fhan = -r_0[a/d - \text{sign}(a)]s_a - r_0 \text{sign}(a) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 相位延迟处理

在式(4)中 v_1 跟踪 v , v_2 近似为 v 的微分, 即目标运动的速度。采用非线性跟踪微分器对信号进行滤波时会产生一定的相位延迟, 滤波效果越强而延迟越大。针对非线性跟踪微分器产生的延迟现象可以采用“预报”的方法进行补偿, 将滤波后得到的信号加上微分信号与预报步长的乘积作为原始信号的逼近, 再对加上预报的信号进行微分, 即“先预报、后微分”方法进行相位补偿。可将式(4)变为式(6)^[6]所示, 其中 n_1 为预报的步数。

$$\begin{cases} v_0(k) = v(k) + n_1 h v_2(k) \\ fh = fhan(v_1(k) - v_0(k), v_2(k), r_0, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + h v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h f h \end{cases} \quad (6)$$

3 滑窗式最小二乘法预估、插值原理

外部引导雷达在搜索目标时，方位轴机械转台连续转动，俯仰方向采用相控阵天线进行电子波束扫描，方位轴每旋转一圈完成对整个空域的一次扫描，并提供一次目标的大地坐标信息。由于机械系统的限制，方位轴最快每秒转动一圈，相应的引导数据更新速率最快为 1 Hz。

搜索雷达提供的引导数据为 1 Hz 更新，而 HPM 天线进行闭环控制的频率为 100 Hz 或更高，因此需将引导数据进行插值。而且搜索雷达仅提供当前时刻的目标坐标数据，下次更新数据之前天线需要根据已有数据预测目标位置，因此在插值前需要将引导数据进行曲线拟合并预估，估计出下一秒时的目标坐标。

本文采用滑窗式最小二乘法对引导数据进行多项式曲线拟合，并根据拟合的曲线表达式进行预测估计并插值为 100 Hz 数据。最小二乘法就是选择合适的基函数对采样数据进行多项式拟合^[7]，并使得拟合的估值和观测值之差的平方和最小^[8-11]。搜索雷达提供的目标坐标观测值为时间的函数，选择 $(1, t, \dots, t^m)$ 为基函数，于是多项式拟合曲线对应于时间的表达式为： $f(t_i) = b_0 + b_1 t_i + \dots + b_m t_i^m (i=1, 2, \dots, n)$ 。其中 m 为多项式的次数， n 为用于拟合的数据点数，即滑窗的宽度。

令 $Q = \sum_{i=1}^n (f(t_i) - X_i)^2$ ， X_i 为 t_i 时刻雷达提供的某坐标轴方向的引导值，为使 Q 取最小值，令 $\frac{\partial Q}{\partial b_j} = 0 (j=0, 1, \dots, m)$ ，于是得到：

$$\frac{\partial Q}{\partial b_j} = 2 \sum_{i=0}^n (b_0 + b_1 t_i + \dots + b_m t_i^m - X_i) t_i^j = 0 \quad (7)$$

$(j=0, 1, \dots, m)$

式 (7) 变形得：

$$\sum_{i=0}^n (b_0 + b_1 t_i + \dots + b_m t_i^m) = \sum_{i=0}^n X_i t_i^j \quad (8)$$

$(j=0, 1, \dots, m)$

式 (8) 是一个关于 $b_0, b_1, \dots, b_m$ 的线性方程组，若使该线性方程组有且仅有唯一解，需要满足 $m \leq n$ 。求解式 (8) 即可得出最小二乘拟合函数 $f(t)$ 。

在实际工程实现时，考虑飞行目标的运动特性，选择多项式阶数为 2 阶或 1 阶，为实现动态实时拟合预测，采用滑窗式最小二乘法，即对采样数据依据 FIFO（先入先出）原则逐步滑动，引导数据每更新一次，窗口滑动一个数据并进行最小二乘拟合解算。解算完成后，根据程序运行的当前时间确定 t_k ，带入拟合的多项式表达式得到预测的当前时刻位置，完成数据预估和插值。

4 仿真实验

为验证本方法的有效性，对某 HPM 天线系统在捕获无人机的过程进行仿真，假设无人机在一定的空域内仅螺旋上升飞行，在参考的轨迹上数据加上 5 ~ 20 m 的搜索雷达测量误差噪声，以测试本方法的滤波效果和预估插值的准确性。

在大地直角坐标上对 X、Y、Z 轴坐标分别进行滤波和预估插值处理，仿真结果如图 3 所示。可见，应用非线性跟踪微分器有效滤除了误差噪声，但是存在一定的相位滞后，采用“先预报、后微分”方法，有效降低了相位延迟。

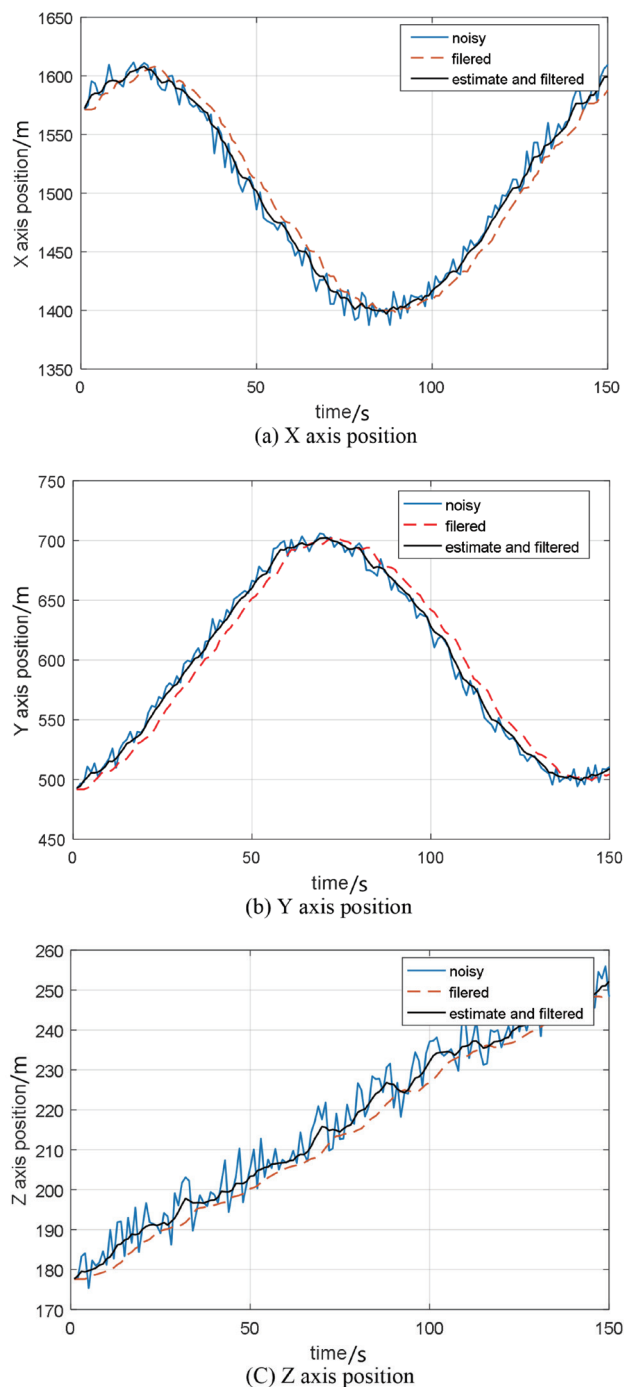


图 3 大地直角坐标下滤波及预估插值结果图

在应用非线性跟踪微分器滤波后,在天线大地直角坐标系中对数据进行滑窗式最小二乘多项式拟合,并预估和插值,插值结果在三维空间的轨迹曲线如图4所示。将插值的目标坐标再转换为天线的指向角,结果如图5所示。由图可见本文提出的方法可以有效滤除噪声,为HPM产生连续的100 Hz 引导数据。

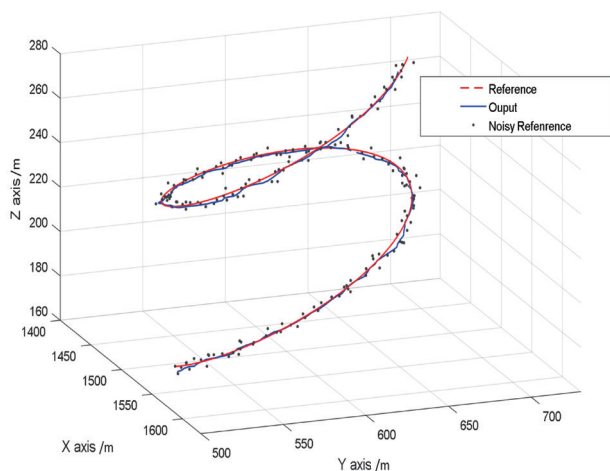
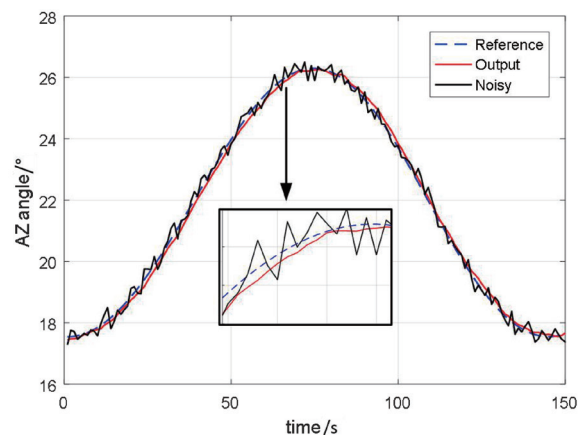
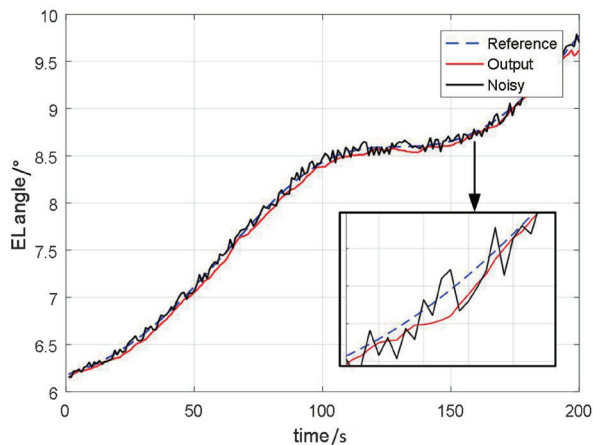


图4 三维空间滤波及预估插值结果图



(a) AZ angle



(b) EL angle

图5 HPM 天线指向角结果图

5 结论

本文中,针对HPM 天线外引导数据具有一定噪声且数据更新慢的问题,采用非线性跟踪微分器的方法对HPM 天线外引导数据在HPM 天线旋转中心为原点的大地直角坐标系对数据进行滤波处理,再采用滑窗式最小二乘多项式拟合算法进行数据预估和插值,提高了引导数据的频率。通过仿真实验,验证了本方法的有效性,有助于改善HPM 天线使用外引导数据捕获目标的速度和效率。

参考文献:

- [1] 杨辉,吴钦章.光测设备引导数据的误差分析[J].电光与控制,2010(7):83-86.
- [2] 顾保国,余有才.程序引导数据插值算法优化[J].装备指挥技术学院学报,2009,20(2):119-122.
- [3] 张勇强,张辉,张静宏,等.雷达引导数据插值算法改进[J].通信与信息处理,2014,33(2):25-29.
- [4] 王琦,黄茹雪,崔巍.进场雷达引导数据的数据拟合研究[J].火力与指挥控制,2015,40(9):62-64.
- [5] 韩京清.自抗扰控制技术-估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [6] 韩京清.跟踪微分器的离散形式[M].北京:系统科学与数学,1999.
- [7] 戴勤奋.地理信息系统的坐标系定义[J].海洋地质,2002,18(6):24-27.
- [8] 李大成,赵宏斌.基于坐标变换的视轴稳瞄算法[J].光电技术应用,2011,26(2):5-8.
- [9] UENO K. A study on a satellite antenna pointing measurement system[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway:IEEE,1994:282-285.
- [10] HUA Z F, NING T, WANG Y B, et al. Haile, nonlinear bayesian estimation: from Kalman filtering to a broader horizon[J]. Automatica sinica, 2018,5(2): 401-417.
- [11] SUDIPTA C, SUVENDU C, ABHIK M. Performance evaluation of particle filter resampling techniques for improved estimation of misalignment and trajectory deviation[J]. Multidimensional systems and signal processing, 2018, 29(3): 821-838.

【作者简介】

孙孟林(1989—),男,硕士,工程师,研究方向:天线伺服控制研究。

(收稿日期:2023-10-24)