

一种机械式机动相控阵雷达目标跟踪算法研究

陈华中

(63726 部队 银川 750004)

摘要: 针对伺服延迟造成目标丢失的问题, 为了提高相控阵雷达的跟踪能力, 提出一种机械式机动相控阵雷达的目标跟踪算法, 并且给出了方法的处理流程和算法仿真。仿真结果表明, 提出的目标跟踪算法具有较高的跟踪精度和较快的收敛速度, 能够满足机动相控阵跟踪的实时性要求。

关键词: 相控阵; 跟踪滤波; 平滑处理; 坐标转换

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)05-0036-06

A research on target tracking method for mechanical mobile phased array

CHEN Huazhong

(63726 Units, Yinchuan 750004, China)

Abstract: In this paper, a target tracking method for mechanical mobile phased array is presented together with the algorithm process and simulation in order to tackle the problem of target lost caused by servo delay and improve radar tracking performance. The simulation result shows that this method qualifies for real-time tracking with relatively higher accuracy and faster convergence rate.

Key words: Phased array; Racking filter; Smoothing; Coordinate transformation

引 言

相控阵技术随着电子技术的发展获得了广泛应用, 它具有较高的数据速率和灵活的波束指向, 可进行无惯性快速扫描^[1]。波束控制系统根据天线波束所指向的目标空间位置, 获得每一个天线单元移相器需要的移相值来控制阵列天线的波束指向^[2], 克服了传统机械扫描的缺点, 特别是目标仰角较高时, 方位角速度、加速度变化较大, 传统的伺服跟踪方式反应速度慢, 控制复杂, 造成跟踪滞后; 而相控阵随着扫描角度的增加造成增益降低, 信号减弱。可见单纯采用机扫或相扫方式都难以完成目标的准确捕获和跟踪, 因此, 机械式相控阵雷达可以通过控制相控阵天线的波束指向来弥补伺服的机械转动延时, 使得波束准确指向目标, 从而帮助精确快速完成目标捕获和跟踪^[3]。机动相控阵雷达部署能力强, 但由于伺服延迟的影响, 机动状态下容易丢失目标, 从而限制了机动相控阵雷达的应用范围, 本文在此基础上提出一种运动平台下采用机械式相控阵进行目标跟踪(即动中测)的方法, 并通过仿真验证了算法的可行性。

1 跟踪流程

图 1 所示为目标跟踪流程。整个流程主要分为搜索捕获和滤波跟踪两个阶段。

搜索捕获阶段分为:

① 任务开始之前, 操作员控制伺服指向预定的空间位置, 进入搜索捕获模式, 等待目标出现。此时波束根据下发的目标搜索扫描范围、速率、方式, 在波束扫描范围内完成扫描, 并通过测角处理^[4]获得阵面坐标系下的方位角和俯仰角测量值;

② 由于测量值中有部分数据与原始值之间存在很大误差, 需要将对系统跟踪性能产生影响的噪声值剔除。系统转入平滑处理流程, 剔除虚假轨迹, 规避错锁目标。

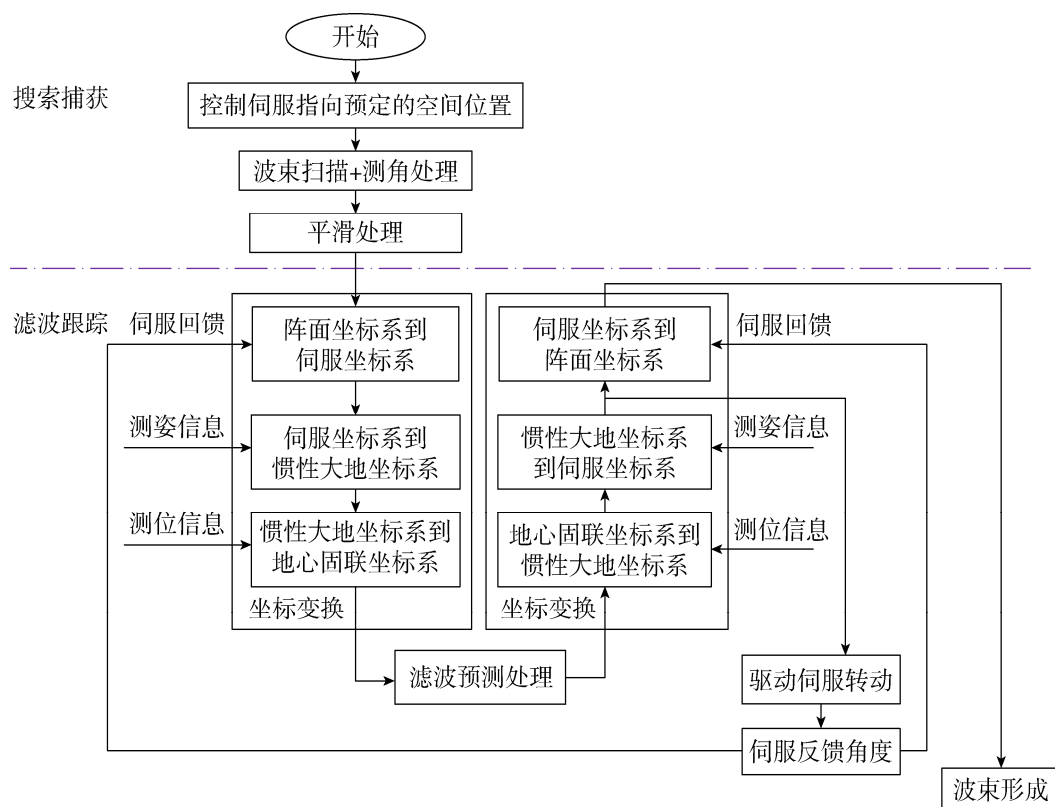


图 1 跟踪流程

Fig. 1 Tracking process

滤波跟踪阶段分为：

① 系统将平滑后的测量值送入坐标转换模块，该模块结合伺服此时的角度将阵面坐标系下的方位角和俯仰角依次经过伺服坐标系、惯性大地坐标系转化；运动平台下由于惯性大地坐标系是不断变化的，因此，结合测位信息将惯性大地坐标系转化到地心固联坐标系；

② 将地心固联坐标系下的测量值送入滤波处理模块，预测下一个周期的目标在地心固联坐标系下的方位角和俯仰角；

③ 经过坐标逆变换转化为阵面坐标下的方位角和俯仰角，同时发送波控码给波束形成单元形成实时波束完成一次目标跟踪；

④ 坐标逆变换过程中形成的伺服坐标系下的角度送入伺服以驱动伺服转动。伺服在转动过程中将伺服角度送入坐标变化模块完成阵面坐标系与伺服坐标系的转化；

⑤ 系统进入自跟踪阶段，经过测角、坐标变换、跟踪滤波等行为，循环进行，直至结束。

由滤波跟踪阶段步骤④可知，系统将驱动角度发送到伺服以后，伺服在一个滤波周期内应立刻转动到指定位置，但如果伺服转动速度较慢，比如目标过顶时，由于方位角速度及加速度变化较快，伺服来不及转到指定角度，造成目标丢失。这时根据伺服回馈的状态通过电扫方式对指向角度进行补偿，使电扫波束及时指向预定位置，很好地解决了伺服延迟造成的目标丢失问题。

2 平滑处理

由于接收机热噪声、目标运动时产生的气流摩擦及大气扰动、杂波等噪声数据存在^[5]，测角值通常是随机变化的。为保证测量值的平滑性，需要剔除异常值。采用五点三次平滑法^[6]对采集到的测量数据进行野值判断，在此基础上加以剔除和插补，流程如图 2 所示。

① 通过波束扫描和测角处理^[4]后获得第一个周期目标在阵面坐标系下的方位角和俯仰角测量值，

经过多轮测量后, 可以获得若干个周期的离散点序列 y_i ;

② 获得前五个周期的测角值 $[y_{-2}, y_{-1}, y_0, y_1, y_2]$, 计算该数组的标准差为 δ ;

③ 根据式 (1) 计算每一个测角周期的拟合值 $Y_{\text{拟合值}}$ 。当 $|Y_{\text{拟合值}} - Y_{\text{测量值}}| \leq \delta$ 时, 认为该值为正常值, 被接受; 如果 $|Y_{\text{拟合值}} - Y_{\text{测量值}}| > \delta$, 认为 $Y_{\text{测量值}}$ 为野值, 需要用拟合值代替该时刻的测量值;

④ 当系统获得新的周期的测角值后, 剔除第一个历史点, 结合最新的四个周期的测角值形成新的拟合序列, 采用步骤③进行野值剔除和插补。

经过平滑处理后的测量值送入坐标转化模块处理。

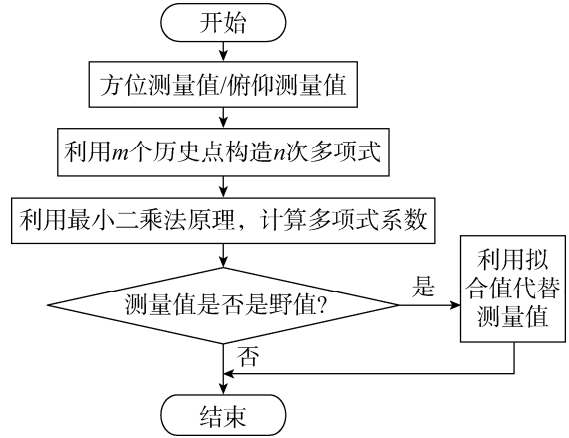


图 2 平滑处理及野值剔除流程

Fig. 2 Smoothing and outlier removal process

$$\begin{cases} y'_{-2} = \frac{1}{70}(69y_{-2} + 4y_{-1} - 6y_0 + 4y_1 - y_2) \\ y'_{-1} = \frac{1}{35}(2y_{-2} + 27y_{-1} + 12y_0 - 8y_1 + 2y_2) \\ y'_0 = \frac{1}{35}(-3y_{-2} + 12y_{-1} + 17y_0 + 12y_1 - 3y_2) \\ y'_1 = \frac{1}{35}(2y_{-2} - 8y_{-1} + 12y_0 + 27y_1 + 2y_2) \\ y'_2 = \frac{1}{70}(-y_{-2} + 4y_{-1} - 6y_0 + 4y_1 + 69y_2) \end{cases} \quad (1)$$

3 坐标转换

跟踪需要电扫来弥补机扫造成的延迟, 且运动平台自身姿态角不断变化, 需要控制波束实时指向目标位置, 即要预测当前时刻目标在阵面坐标下的角度。其中会涉及一系列坐标变换。初始时获得目标在阵面坐标系下的方位角和俯仰角测量值, 波束控制依据伺服反馈的方位和俯仰角, 将阵面坐标系下的目标测角结果转换到伺服坐标系中, 同时利用运动平台姿态角 (航向角、纵倾角和横倾角) 和位置 (经度、纬度和高程) 信息, 将结果依次进行惯性大地坐标系、地心固连坐标系的转换, 将转换后的结果进行滤波预测处理后, 再利用运动平台姿态角和位置信息, 将滤波预测结果经过坐标逆变化后转换到惯性大地坐标系、伺服坐标系中, 驱动伺服。

在驱动伺服的同时, 结合伺服反馈的方位角和俯仰角, 将滤波预测结果从伺服坐标系转换到阵面坐标系, 获得阵面坐标系下的方位角和俯仰角。利用该方位角和俯仰角重新计算波束形成系数, 并控制波束指向。至此, 完成一次闭环过程。

① 阵面坐标系和伺服坐标系的转化

在阵面坐标系下, 若时刻 k 时的波束指向为方位角 $\varphi(k)$ 和俯仰角 $\theta(k)$, 距离为 $\rho(k)$, 则由方位角和俯仰角确定的直角坐标 $[x_E(k), y_E(k), z_E(k)]$ 为

$$\begin{bmatrix} x_E(k) \\ y_E(k) \\ z_E(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho(k) \cos \theta(k) \sin \varphi(k) \\ \rho(k) \cos \theta(k) \cos \varphi(k) \\ \rho(k) \sin \theta(k) \end{bmatrix}$$

若伺服旋转方位角 $A(k)$ 和俯仰角 $E(k)$, 阵面坐标系到伺服坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_M(k) \\ y_M(k) \\ z_M(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha(k) & 0 & \sin \alpha(k) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha(k) & 0 & \cos \alpha(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta(k) & \sin \beta(k) & 0 \\ -\sin \beta(k) & \cos \beta(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_E(k) \\ y_E(k) \\ z_E(k) \end{bmatrix} = \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} x_E(k) \\ y_E(k) \\ z_E(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, 旋转角 $\beta(k) = \pi/2 - E(k)$, $\alpha(k) = -A(k)$ 。则伺服坐标系到阵面坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_E(k) \\ y_E(k) \\ z_E(k) \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_M(k) \\ y_M(k) \\ z_M(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

② 伺服坐标系和惯性大地坐标系的转化

若运动平台在时刻 k 的姿态角为 $[\gamma(k), \omega(k), \psi(k)]$ 表示航向角、纵倾角和横倾角, 则伺服坐标系到惯性大地坐标系转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_I(k) \\ y_I(k) \\ z_I(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi(k) & 0 & -\sin \psi(k) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi(k) & 0 & \cos \psi(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega(k) & \sin \omega(k) \\ 0 & -\sin \omega(k) & \cos \omega(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma(k) & -\sin \gamma(k) & 0 \\ \sin \gamma(k) & \cos \gamma(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} x_M(k) \\ y_M(k) \\ z_M(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

则惯性大地坐标系到伺服坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_M(k) \\ y_M(k) \\ z_M(k) \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_I(k) \\ y_I(k) \\ z_I(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

③ 惯性大地坐标系和地心固连坐标系的转换^[7]

若运动平台在时刻 k 的经度、纬度和高度为 $[l(k), \phi(k), h(k)]$, a 、 b 为地球长半轴和短半轴, 则其在地心固连坐标系的位置为

$$\begin{cases} x_o'(k) = (N(k) + H(k)) \cos l(k) \cos \phi(k) \\ y_o'(k) = (N(k) + H(k)) \sin l(k) \cos \phi(k) \\ z_o'(k) = [N(k)(1 - e^2) + H(k)] \sin \phi(k) \\ N(k) = a / \sqrt{1 - e^2 (\sin \phi(k))^2}, e^2 = (a^2 - b^2) / a^2 \end{cases} \quad (6)$$

则惯性大地坐标系到地心固连坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_o(k) \\ y_o(k) \\ z_o(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin l(k) & -\sin \phi(k) \cos l(k) & \cos \phi(k) \cos l(k) \\ \cos l(k) & -\sin \phi(k) \sin l(k) & \cos \phi(k) \sin l(k) \\ 0 & \cos \phi(k) & \sin \phi(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_I(k) \\ y_I(k) \\ z_I(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_o'(k) \\ y_o'(k) \\ z_o'(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{bmatrix} x_I(k) \\ y_I(k) \\ z_I(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_o'(k) \\ y_o'(k) \\ z_o'(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则地心固连坐标系到惯性大地坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_I(k) \\ y_I(k) \\ z_I(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_o(k) \\ y_o(k) \\ z_o(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_o'(k) \\ y_o'(k) \\ z_o'(k) \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

4 跟踪滤波

测角过程中的热噪声、目标机动、杂波干扰会带入跟踪滤波, 而且伺服的机械衰减、动态灵敏度、各种扰动加速度的残余、观测信号的传播路径等给系统带来不同的噪声。为有效去除各类噪声, 在搜索捕获阶段, 目标距离较远, 为保证快速捕获目标, 采用 α - β 滤波器^[8]。以方位角为例, 设 θ_m 为方位向测量值, θ_p 、 a_p 、 $\dot{a}_p$ 分别为方位向、方位向速度和方位向加速度预测值, θ_s 、 a_s 、 $\dot{a}_s$ 分别为方位向、方位向速度和方位向加速度滤波值, $\Delta\theta$ 为角度误差, T 为数据采样周期。

α - β 型二阶环路的运动和观测模型如下:

平滑方程:

$$\begin{cases} \Delta\theta(kT) = \theta_m(kT) - \theta_p(kT) \\ \theta_s(kT) = \theta_p(kT) + \alpha(k) \cdot \Delta\theta(kT) \\ a_s(kT) = a_p(kT) + \beta(k) \cdot \Delta\theta(kT)/T \end{cases} \quad (9)$$

预测方程:

$$\begin{cases} \theta_p((k+1)T) = \theta_s(kT) + a_s(kT) \cdot T \\ a_p((k+1)T) = a_s(kT) \end{cases} \quad (10)$$

目标捕获初始阶段, 首先获得前 2 次的量测数据 $\theta_m(T)$ 、 $\theta_m(2T)$, 以此初始化 $\theta_s(2T) = \theta_m(2T)$, $a_s(2T) = \frac{\theta_m(2T) - \theta_m(T)}{T}$ 。后续轮周期 ($k > 2$) 的测角值作为输入, 调用式 (9) 计算上轮周期的 θ_s 和 a_s , 再代入式 (10) 计算 θ_p 。俯仰向测量值处理同方位向。通过 α - β 滤波得到较好的预测值, 送入伺服控制伺服转动。当波束稳定捕获目标 (一般判定接收机稳定入锁), 系统进入目标跟踪阶段。这时为提高测角精度, 采取 α - β - γ 滤波器。其运动和观测模型如下:

平滑方程:

$$\begin{cases} \Delta\theta(kT) = \theta_m(kT) - \theta_p(kT) \\ \theta_s(kT) = \theta_p(kT) + \alpha \cdot \Delta\theta(kT) \\ a_s(kT) = a_p(kT) + \beta \cdot \Delta\theta(kT)/T \\ \dot{a}_s(kT) = \dot{a}_p(kT) + \gamma \cdot \Delta\theta(kT)/(2 \cdot T^2) \end{cases} \quad (11)$$

预测方程:

$$\begin{cases} \theta_p((k+1)T) = \theta_s(kT) + a_s(kT) \cdot T + T^2/2 \cdot \dot{a}_s(kT) \\ a_p((k+1)T) = a_s(kT) + \dot{a}_s(kT) \cdot T \\ \dot{a}_p((k+1)T) = \dot{a}_s(kT) \end{cases} \quad (12)$$

目标跟踪初始阶段, 首先获得前 3 次的量测数据 $\theta_m(T)$ 、 $\theta_m(2T)$ 、 $\theta_m(3T)$, 以此初始化 $\theta_s(3T) = \theta_m(3T)$, $a_s(3T) = \frac{\theta_m(3T) - \theta_m(2T)}{T}$, $\dot{a}_s(3T) = \frac{a_s(3T) - a_s(2T)}{T}$ 。后续轮周期 k 的测角值作为输入, 调用式 (11) 计算上轮周期的 θ_s 、 a_s 和 $\dot{a}_s$, 再代入式 (12) 计算 θ_p 。俯仰向测量值处理同方位向。通过 α - β - γ 滤波可以获得较好的机动检测效果^[9], 跟踪角精度更高^[10]。以 θ_p 驱动伺服转动, 再根据伺服回馈角度将 θ_p 转化到阵面坐标系下送入波束形成模块来实时指向目标。 α - β 滤波模型的 α 、 β 计算公式及 α - β - γ 滤波模型的 α 、 β 、 γ 计算公式见文献^[11]。

5 仿真验证

仿真验证分为两个部分: 第一部分针对五点三次平滑法剔除野值进行验证, 第二部分针对跟踪滤波的精度进行验证。以原始值加方位 0.1° , 俯仰 0.3° Gauss 噪声作为测量值。图 3 所示为平滑处理后仿真图, 可以看出, 采用五点三次平滑法可以看出拟合后的运动轨迹和原始运动轨迹基本一致, 说明算法很好地实时剔除不在门限范围内的噪声值, 保证了目标轨迹的平滑和稳定。图 4 显示目标的原始运动轨迹和滤波预测后的误差曲线。从结果可以看出, 方位角最大误差为 0.09° , 俯仰角最大误差为 0.29° , 收敛时间为 75ms 左右。说明采用 α - β 滤波器可以保证目标轨迹能以很快速度收敛, 目标能被准确快速捕获, 随着目标跟踪进行, α - β - γ 滤波器可以保证目标精确跟踪, 验证了算法的正确性和可行性。

6 结束语

本文给出了一种机械式机动相控阵的目标跟踪方法。算法根据初始所获得的测角信息采用五点三

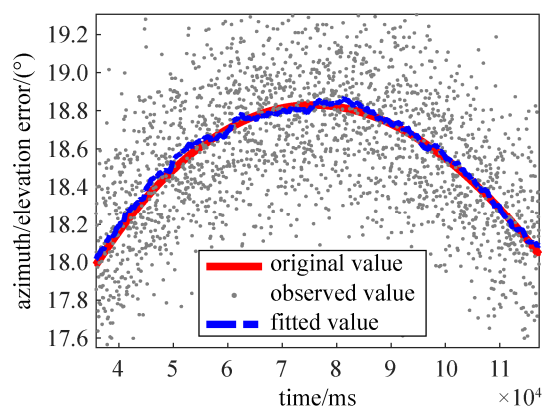


图 3 平滑处理

Fig. 3 Smoothing process

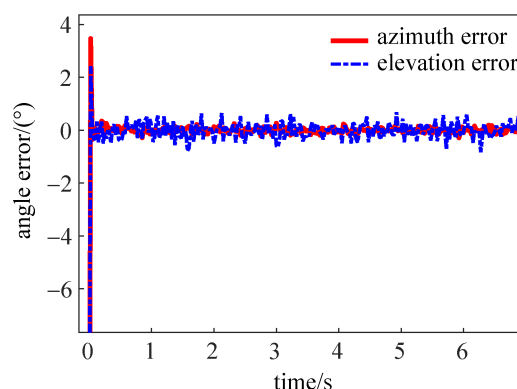


图 4 方位俯仰误差

Fig. 4 Error of azimuth and elevation

次法进行野值剔除, 获得一组平稳的阵面坐标系下的测量值, 结合测姿测位信息转化到地心固连坐标系后经过滤波再转化到伺服坐标系下的方位角和俯仰角用于控制伺服。仿真结果表明, 本文的算法能够保证较高的搜索捕获速度, 能计算出波束指向来准确跟踪目标, 避免了单纯依靠伺服进行目标跟踪的缺陷, 可用于机动相控阵雷达的目标跟踪。

参考文献

- [1] 王俊刚. 相控阵技术在舰载雷达中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2016(2): 37.
- [2] 王金元, 刘志惠. 一种小型圆口径相控阵天线的指向误差分析[J]. 现代雷达, 2020, 42(7): 65–69.
WANG Jinyuan, LIU Zhihui. Analysis of beam-steering error of phased array antenna with small & circular shape[J]. Modern Radar, 2020, 42(7): 65–69.
- [3] MENG Xianghao, AN Yongwang, LI Pengyong. Extraction method of wide-band phased array radar signals based on pulse amplitude characteristic[J]. The Journal of Engineering, 2019(20): 7174–7178.
- [4] 向晓萍, 李朝海, 黄宇声, 等. 相控阵卫星跟踪系统搜索/捕获仿真研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(5): 535–542.
XIANG Xiaoping, LI Chaohai, HUANG Yusheng, et al. Simulation research on search/capture process of phased array satellite tracking system[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(5): 535–542.
- [5] IRENE D, ANDREA B, LUCA F, et al. Analysis of sampling and noise error on the energy measurement of direct digitally acquired pulsed signals[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2020(984): 1–10.
- [6] 武伟, 陈标, 吴剑锋, 等. 基于五点三次平滑算法的入库流量反推研究[J]. 水利水电技术, 2013, 12(44): 100–102.
WU Wei, CHEN Biao, WU Jianfeng, et al. Study on reverse deduction of reservoir-inflow based on cubical smoothing algorithm with five-point approximation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 12(44): 100–102.
- [7] 金宏斌, 徐毓, 董峰. 雷达信息处理系统中的坐标变换问题研究[J]. 空军雷达学院学报, 2003, 17(3): 54–58.
JIN HongBin, XU Yu, DONG Feng. Research on coordinate transformation under radar information processing systems[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2003, 17(3): 54–58.
- [8] ZHANG Dong, JIANG Jianping. Radar target tracking algorithm based on alpha-beta filtering[A]. Proceedings of 2018 International Conference on Network, Communication, Computer Engineering (NCCE 2018), 2018(147): 1037–1042.
- [9] TENNE D. Optimal design of α - β - γ filters[J]. Proceedings of the American Control Conference, 2000(6): 4348–4352.
- [10] 张瑞, 谢敏, 雷瑛. 一种自适应目标机动的 α - β - γ 滤波算法[J]. 大众科技, 2015, 17(195): 12–19.
ZHANG rui, XIE min, LEI ying. Multiple model algorithm based on α - β - γ filter for tracking maneuvering targets[J]. Popular Science & Technology, 2015, 17(195): 12–19.
- [11] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[作者简介]

陈华中 1979 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控、实时软件。