

基于锁相环的滚转姿态测量仿真研究

董鑫鹏¹ 杨新民¹ 王胜红²

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210094;

2. 淮海工业集团 长治 046000)

摘要: 为实时监测高旋弹飞行过程中的滚转速率与相位,常规测量方法难以满足量程、精度上的工程需求,提出一种基于地磁传感器的锁相环跟踪环路测量方法。通过 SIMULINK 建立不同阶次锁相环的滚转测量模型,确定合适的环路滤波器阶次与积分清除时间,完成对滚转速率与相位的实时测量。仿真结果表明,2阶锁相环在对高旋弹滚转测量中,相位跟踪存在一定跟踪误差且跟踪较为缓慢;3阶及4阶锁相环可以对地磁传感器输入信号实现频率与相位的有效跟踪,从而精确解算出高旋弹滚转速率与滚转相位,具有较高的应用实现价值。

关键词: 高旋弹;地磁传感器;锁相环;积分清除器

中图分类号: TN911.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Simulation of rolling attitude measurement based on PLL

Dong Xinpeng¹ Yang Xinmin¹ Wang Shenghong²

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, NUST, Nanjing 210094, China;

2. Huaihai Industries Group Co., Ltd., Changzhi 046000, China)

Abstract: To real-time monitor the Rolling Rate and Phase of high spin projectile in fighting, general measurement method is difficult to meet the engineering requirements, this paper presents a geomagnetic sensor based phase-locked loop tracking loop measurement method. The rolling measurement model of PLL with different order is established by SIMULINK, determine the appropriate loop filter order and integral-dump time, complete the real-time measurement of the rolling rate and phase. Simulation results show, 2nd order phase PLL in high-spin roll measurement, there is a large tracking error and tracking more slowly in phase tracking; 3rd and 4th order phase PLL can tracking effectively to carry the frequency and phase of geomagnetic sensor signal, thereby calculating the high spin rolling speed and phase, it has a higher application value.

Keywords: high-spinning projectile; geomagnetic sensor; phase-locked loops; integrate and dump filter

0 引言

随着现代化军事的发展,精确制导炮弹成为各国军事领域研发的热点问题。而精确制导的前提条件需要实时监测炮弹飞行过程中的滚转角、偏航角、俯仰角以完成姿态信息的解算^[1-2],调整飞行参数实现弹道轨迹修正,大幅提升武器的命中精度。

目前国内外在高旋制导炮弹领域中,弹体转速的测量与控制存在一定技术难点,受目前技术水平限制,陀螺仪的精度与抗过载能力不能满足实际应用,且量程范围远远不能满足性能要求;加速度计等常规测量组合方法存在量程有限、解算算法过于复杂、存在零漂等问题,在实际应用中较为困难。

而磁阻传感器具有测量范围广、无零漂、稳定性高、成

本低等优点^[3-4],广泛应用于高旋滚转组合测姿系统中。由于磁阻传感器在弹丸飞行过程中测量到的地磁信号幅值较小,且存在较大噪声,如何从低信噪比的地磁信号提取有效的信息是进行姿态解算的重点。针对地磁信号在滚转运动中随弹体的滚转呈周期性的正弦波信号的特点,利用锁相环(PLL)跟踪算法完成对输入信号的相位与频率跟踪^[5],实现对低信噪比输入信号的转速与相位的精确测量,具有测量精度高、跟踪速度高的有点。

1 锁相环跟踪环路特性

相位锁定环路(phase-locked loops)是一种对低噪声输入信号的锁定跟踪实现算法,本文采用科斯塔斯锁相环实现环路跟踪^[6],如图1所示,地磁输入信号与本地NCO产生的两路正交信号混频,会产生高频成分与低频成分,利

用低通滤波器将高频成分滤除以提高信号载噪比,实现低频信号的载波分离,消除高频噪声对鉴相器与环路滤波器的影响^[7-8]。

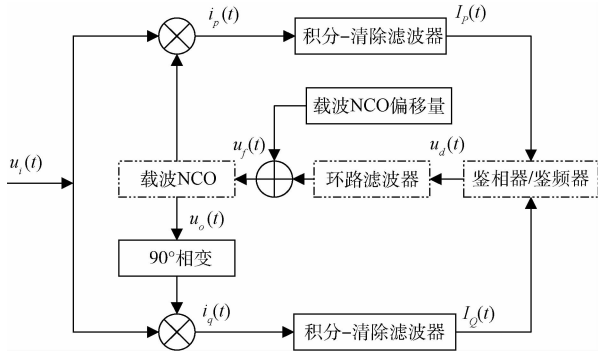


图 1 科斯塔斯锁相环 SIMULINK 跟踪模型

在数字电路中,积分清除滤波器对输入信号经一定时间的积分后输出积分结果,清除寄存器中的结果以进行下一段的积分,从而滤除混频产生的高频成分,起到低通滤波器的作用。滤波后 i_p 、 i_q 两路信号通过四象限反正切鉴相器输出鉴相误差至环路滤波器,调整本地 NCO 的中心频率偏移量使其完成对输入信号的相位与频率锁定。

2 锁相环跟踪环路阶数研究

2 阶、3 阶与 4 阶锁相环环路滤波器如图 2~4 所示^[9],

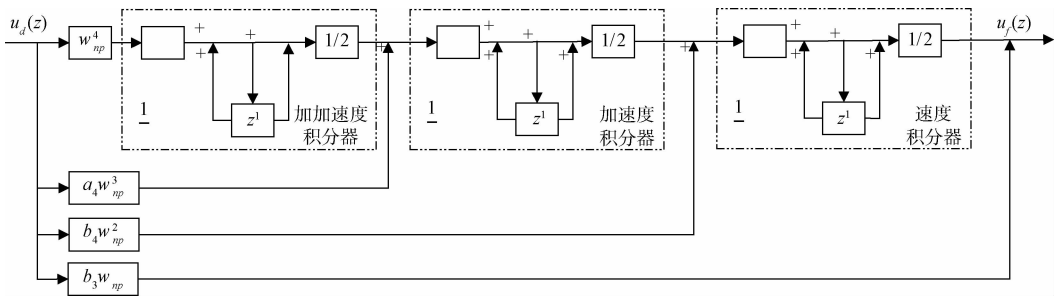


图 2 2 阶锁相环环路滤波器框图

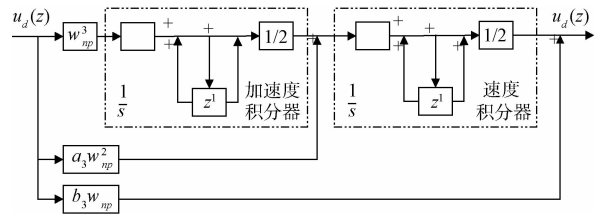


图 3 3 阶锁相环环路滤波器框图

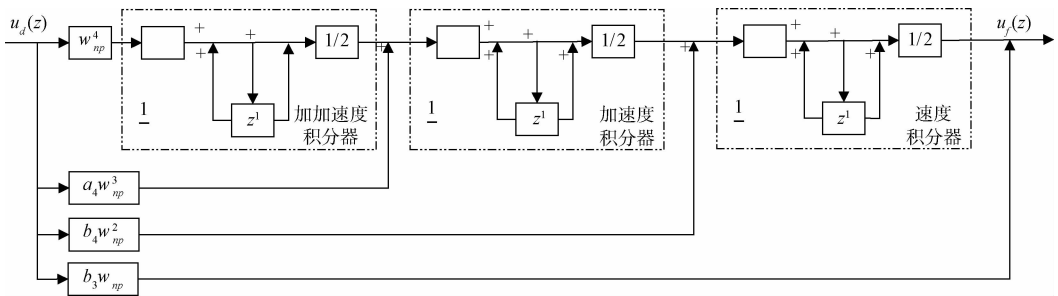


图 4 4 阶锁相环环路滤波器框图

根据文献[10-11]得出阶跃、速度、加速度和加加速度输入信号时,环路滤波器的阶次 N 从 1~4 阶时载波跟踪误差如表 1 总结所示。

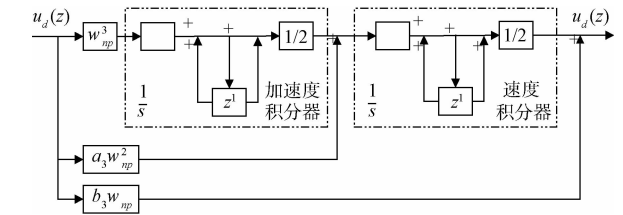
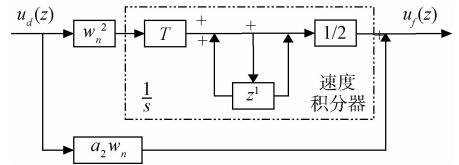
表 1 1~4 阶锁相环跟踪误差

$He(s)$ /阶数	1	2	3	4
$\Delta_\theta z / (z-1)$	0	0	0	0
$\Delta_\omega z / (z-1)^2$	$\frac{\Delta_\omega}{T_s b_0}$	0	0	0
$\frac{\Delta_\omega z (z+1)}{2(z-1)^3}$	∞	$\frac{\Delta_\omega / T_s}{(b_0 + b_1)}$	0	0
$\frac{\Delta_\omega z (z^2 + 4z + 1)}{6(z-1)^4}$	∞	∞	$\frac{\Delta_\omega / T_s}{(b_0 + b_1 + b_2)}$	0

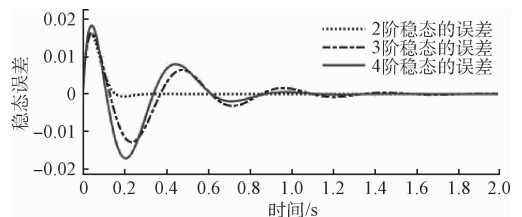
三阶环路滤波器在二阶的基础上增加一个加速度积分器,四阶环路滤波器增加一个加加速度积分器。根据框图得出环路滤波器的传递函数分别为式(1)和误差传递函数式(2) (N 代表环路滤波器的阶数)。

$$H_N(z) = \frac{\theta_o(z)}{\theta_i(z)} = \frac{T_s \sum_{n=0}^{N-1} b_n z^{-n}}{(1-z^{-1})^N + T_s \sum_{n=0}^{N-1} b_n z^{-n-1}} \quad (1)$$

$$H_e(z) = \frac{\theta_e(z)}{\theta_i(z)} = \frac{(1-z^{-1})^N}{(1-z^{-1})^N + T_s \sum_{n=0}^{N-1} b_n z^{-n-1}} \quad (2)$$



由图 5(a)可知 2~4 阶环路滤波器均可实现对一次斜升速度输入信号实现稳定跟踪,设环路带宽 $B_L = 15$, 下同。而由图 5(b)可知 3~4 阶环路滤波器可以实现对加速度输入信号的跟踪,尽管 2 阶系统可以实现信号的跟踪,



(a) 速度输入信号稳态误差对比

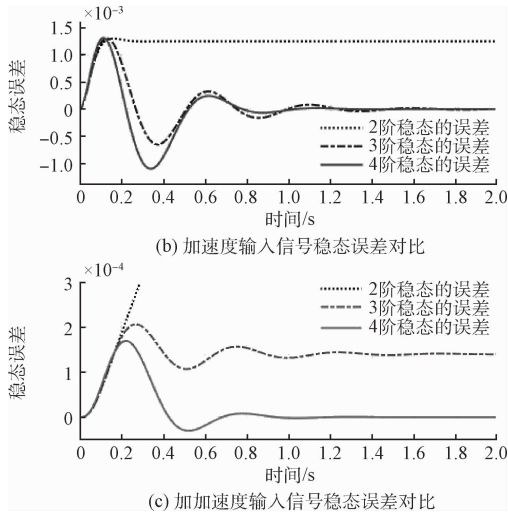


图5 环路滤波器阶数对稳态误差影响曲线

但是存在固定稳态跟踪误差。由图 5(c) 观察输入加加速度信号时,仅 4 阶锁相环可完成信号的稳定跟踪,2 阶、3 阶均不能满足跟踪精度要求。一般工程领域通常采用 2 阶或 3 阶锁相环完成对输入信号的环路跟踪,为避免锁相环设计出现不必要的复杂问题,一般不选取超过 4 阶锁相环。本文对 2 阶、3 阶和 4 阶锁相环展开仿真研究,验证其锁相环在高动态下的旋弹滚转信号跟踪下的可行性。

3 锁相环积分清除滤波器研究

设地磁输入信号为:

$$U_i(t) = A_1 \sin(\omega_i t + \theta_i) + B \quad (3)$$

载波 NCO 产生正余弦表达式为^[8]:

$$U_{osin}(t) = A_2 \sin(\omega_c t + \theta_o) \quad (4)$$

$$U_{ocos}(t) = A_2 \cos(\omega_c t + \theta_o) \quad (5)$$

式中: A_1 为信号幅值, A_2 为载波 NCO 信号幅值, B 为信号偏置,在计算中暂时忽略信号偏置。

混频后产生两路 $i_P i_Q$ 信号如下:

$$i_P = U_i(t) \cdot U_{osin}(t) \quad (6)$$

$$i_Q = U_i(t) \cdot U_{ocos}(t) \quad (7)$$

积分清除滤波器对 $i_P i_Q$ 进行 T_{coh} 时间长积分^[12-13],积分清除滤波器的积分时间 T_{coh} 决定了滤波器的性能。以 i_P 路为例,其积分结果如式(10),其中 ω_c 为输入信号与载波 NCO 信号之间的频差, ω 为二者之和,从式(8)可以看到 $\omega_c \cdot T_{coh} \ll \omega \cdot T_{coh}$,因此该式右边第 2 部分被积分清除。

$$i_{PI-D} = \frac{1}{T_{coh}} \int_t^{t+T_{coh}} [A_1 \sin(\omega_i t + \theta_i) + B] \cdot A_2 \sin(\omega_c t + \theta_o) =$$

$$\frac{A_1 \cdot A_2}{2\omega_c T_{coh}} \sin\left(\frac{1}{2}\omega_c T_{coh}\right) \cos[\omega_c(t + T_{coh}) + \theta_o] + \frac{A_1 \cdot A_2}{2\omega T_{coh}} \sin\left(\frac{1}{2}\omega T_{coh}\right) \cos[\omega(t + T_{coh}) + \theta] \quad (8)$$

对于上述锁相环跟踪环路参数的讨论中,预检积分 T_{coh}

的时间长度决定混频相关运算后的滤波的效果,由式(8)可以看到 $\frac{1}{\omega T_{coh}}$,其中 ω 为混频后高频成分频率,而 T_{coh} 时间越长使积分效果越明显,使其越趋向于 0,但过长的 T_{coh} 会造成系统响应变慢,会将有效信号成分滤除,导致跟踪速度下降。第 2 组仿真采取 $T_{coh} = 12 \text{ ms}$, $T_{coh} = 35 \text{ ms}$,跟踪环路采用 3 阶锁相环,环路滤波器参数设置同第 1 组。

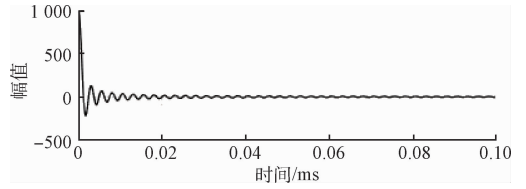


图6 高频成分随预检积分时间变化曲线

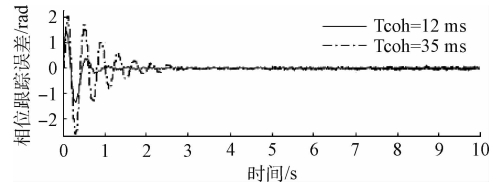


图7 积分时间对鉴相跟踪误差影响

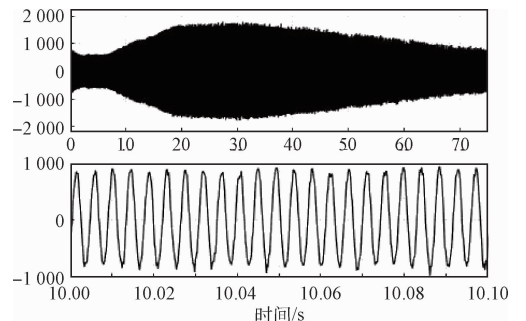
如图 6、7 所示,可以看到预检积分时间的增加会造成锁相环跟踪环路整体响应变慢,系统相位锁定时间由 1 s 拖慢至 3 s 完成跟踪相位的锁定,鉴相误差明显变小,验证上述理论分析对于预检积分时间的增加可使滤波效果明显,但会拖慢跟踪环路的锁定时间。

4 滚转仿真结果分析

针对如上所述的锁相环跟踪算法,利用某次高旋弹发射试验中采集的地磁滚转数据,其全程及局部转速曲线如图 8(a),完成对 2 阶锁相环与 3 阶、4 阶锁相环算法的验证。

验证 2 阶锁相环与 3 阶、4 阶锁相环跟踪特性,设置 3 组环路预检积分时间设置为 12 ms。根据文献^[14-15] 2 阶锁相环滤波器采用:

$$A_2 = 2 \cdot \xi = 1.414, B_L = 0.53 \omega_n = 4.$$



(a) 地磁滚转信号全程及局部曲线

4 阶锁相跟踪环路滤波器参数设置为:

$$A_1 = 2.613, b_1 = 3.414, c_1 = 2.613,$$

$$B_L = 0.7845 \omega_n = 4.$$

由上述理论分析表明,锁相环完成锁定时的相位差趋于 0,观察到图 8(b)可得混频后经积分清除滤波器输出的两路 IQ 信号,同相支路 I 所包含锁定输入信号和噪声信号,而正交支路 Q 仅包含在 0 附近的噪声信号,使得反正切鉴相器输出相位差在 0 附近。

通过对 3 组跟踪环路曲线图 8(c)与(d)对比发现 2 阶锁相环在高动态滚转运动下锁定过程较慢,且鉴相结果产生一定相差偏置;而 3 阶与 4 阶锁相环可以实现对高旋转速度与相位的实时跟踪,相位误差在允许范围。但由于 4 阶锁相环模型较为复杂,且跟踪速度较 3 阶相比略慢。由图 8(e)可知 3 种环路滤波器均可实现转速的有效跟踪,但在高动态环境下,2 阶锁相环转速跟踪相对误差较大,而 3 阶与 4 阶锁相环转速跟踪误差控制在 0.05 Hz 以内。

5 结 论

通过建立锁相环仿真模型与理论分析表明,在高旋弹滚转速率与相位的测量中,2 阶锁相环较 3 阶与 4 阶锁相环相比,在高动态环境下跟踪能力较差,锁定速度较慢且存在偏置相差,在高旋滚转模型中,尚不能实现精确相位跟踪;而 3 阶锁相环与 4 阶具有较高的跟踪精度,具有稳定跟踪加速度的性能,可有效跟踪高旋转运动的滚转速率与相位,对于理论转速跟踪其相位跟踪误差小于 0.017 rad (1°),转速跟踪误差小于 0.05 r/s;但受限于地磁采集信号的信噪比与采样频率问题,锁定状态相位跟踪误差小于 0.1 rad(5.73°),转速跟踪误差小于 0.5 r/s,验证了通过锁相环跟踪地磁滚转信号在高旋领域下的滚转姿态测量的可行性。尽管 4 阶锁相环可有效跟踪加速度的能力且跟踪精度较优,但环路跟踪性能增加不明显并且锁定时间过长,因此实际工程领域采用 3 阶锁相环较为理想。

通过不同预检积分时间的对比,载波输出信号与地磁输入信号混频后产生的高频成分会随着预检积分时间的增加而减小,但预检积分的增加使环路实时性变差,动态跟踪性能变弱,甚至会造成环路失锁。

参考文献

- [1] 李珂. 基于磁传感器组合的高旋弹横滚角测量方法[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(3): 320-324.
- [2] 施国兴, 杨树兴, 苏中. 地磁信息的旋转弹姿态算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 33-35.
- [3] 向超. 旋转弹体背景磁场模型和地磁姿态测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [4] 曹平军. 基于地磁场的飞行体滚转角测量技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.
- [5] 牟伟清, 刘荣科, 宋青平, 等. 基于宽带优化的载波跟

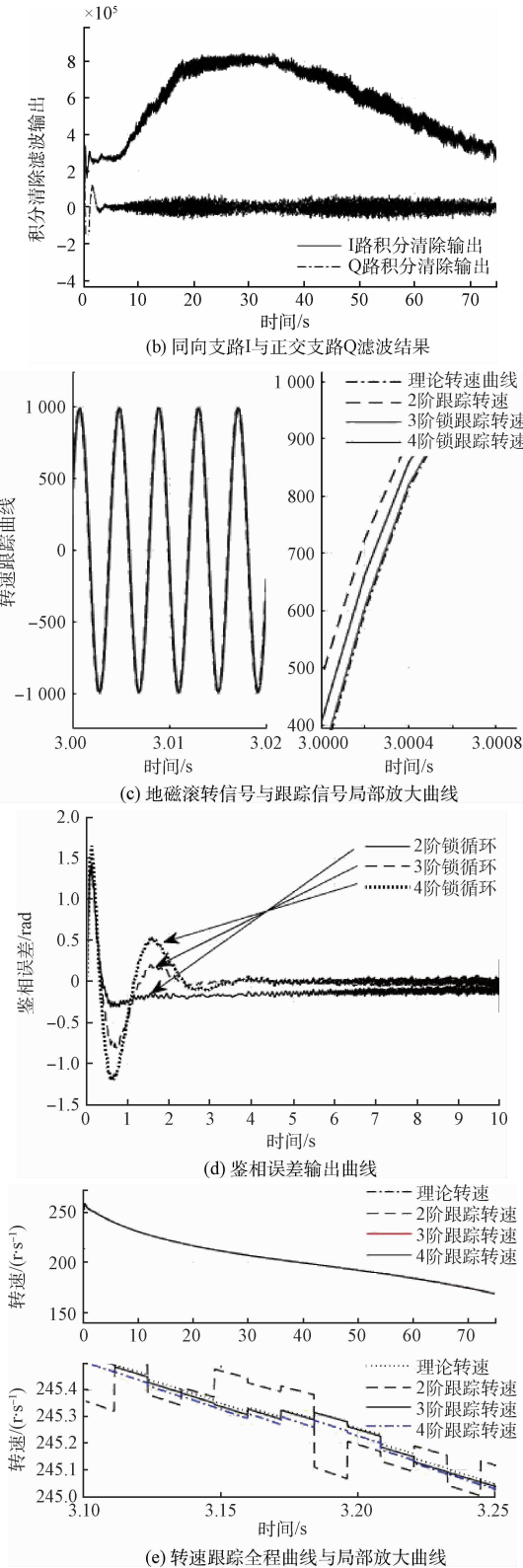


图 8 2~4 阶锁相环锁相跟踪结果

3 阶锁相环跟踪环路滤波器参数为:

$$A_3 = 1.1, b_3 = 2.4, B_L = 0.7845 \omega_n = 4.$$

- 踪算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(10): 1918-1924.
- [6] 易维勇, 董绪荣, 孟凡玉, 等. GNSS 单频软件接收机应用与编程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 203-210.
- [7] 黄俊奇. 基于 Simulink 的数字锁相环调频器研究与设计[J]. 聊城大学学报, 2014, 27(1): 46-49.
- [8] 黄保瑞. 基于 FPGA 的二阶全数字锁相环的设计[D]. 延安: 延安大学, 2015.
- [9] 王兰芳, 吴长奇, 高秀英. 基于 FLL 与 PLL 级联的高动态载波跟踪技术[J]. 电子测量技术, 2009, 32(3): 25-27.
- [10] 曾广裕. 非全向天线旋转条件下导航方法及滚转姿态检测技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [11] 许志鹏, 余剑. 锁相环中鉴相器的设计预防针[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 32-35.
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 266-302.
- [13] 李超. 基于 DSP_FPGA 的北斗卫星导航接收机的研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [14] 杨登红. 基于三阶锁相环的旋转弹滚转姿态测量方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(2): 261-265.
- [15] WANG Z, GAO F, GAO M. Roll angular velocity real-time tracking algorithm based on geomagnetic information with frequency locked loop [C]. International Conference on CMES, 2015.

作者简介

董鑫鹏, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要研究领域为弹载计算机、FPGA 信号处理。

E-mail: dxp89@126.com