

基于测距码信号设计的塔康测距精度提升方法

骆艳卜, 王永庆*, 李金良, 翟丁, 陈秋实, 杨伟业

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 塔康系统作为我军主用的战术空中导航系统,是能够实现点源定位,而且性能可靠的传统陆基无线电导航系统,在战术编队、航路导航及归航引导等方面发挥重要作用。在当前卫星导航系统应用存在抗干扰性差,抗毁能力弱的现实条件下,发展能够降级使用的备份无线电导航手段具有迫切性和现实性。而开发利用塔康系统作为备份的前提是使其具有较高的导航定位精度。设计了一种新型测距信号,利用其自相关特性提取关键的定时信息,实现塔康定位精度的提升。在信号格式、测距精度、对系统性能的影响等方面进行仿真分析,结果表明新的信号形式能够在理论上有效提升塔康测距精度。在新体制信号的基础上分析测距效果,进而提高塔康导航系统的战技性能,并为新一代测距技术提供借鉴。

关键词 塔康系统;码相关技术;信号设计;精度提升

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.013

中图分类号 V249;TN965 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-0089-06

A TACAN Range Accuracy Improvement Method Based on Code Correlation Ranging Signal Design

LUO Yanbo, WANG Yongqing*, LI Jinliang, ZHAI Ding, CHEN Qiushi, YANG Weiyue

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

Abstract Being the main radio short-range navigation system in our army, and enabling to realize the point source positioning with reliable performance, TACAN system, the only traditional land-based radio navigation system, plays an important role in route navigation and homing guidance. Under the current realistic conditions that anti-interference is poor and anti destruction ability is weak in the application of satellite navigation system, it is urgent and realistic to develop and make good use of TACAN system to improve its navigation and positioning accuracy and make it a radio navigation means with high positioning accuracy and wide coverage. Taking developing and utilizing the TACAN system as a premise to backup means that there is a quite good precision in navigating and positioning. By analyzing the ranging technology implementation ways and performance indexes of other navigation and positioning systems, the code related ranging methods and implementation technologies of TACAN system are studied, and the simulation analysis is carried out in the aspects of signal format, ranging accuracy and impact on system performance. The effect of ranging by using new coded signal is helpful to improve the tactical and technical performance of TACAN navigation system, and can also be used for the development demonstration of TACAN system equipment, and provide reference for the new generation of ranging technology.

收稿日期: 2022-09-12

作者简介: 骆艳卜(1980—),男,山西芮城人,讲师,研究方向为军用无线电导航。E-mail:lybobo0515@163.com

通信作者: 王永庆(1978—),男,江苏徐州人,副教授,研究方向为近程导航技术与装备应用。E-mail:54256590@qq.com

引用格式: 骆艳卜,王永庆,李金良,等.基于测距码信号设计的塔康测距精度提升方法[J].空军工程大学学报,2023,24(1):89-94. LUO Yanbo, WANG Yongqing, LI Jinliang, et al. A TACAN Range Accuracy Improvement Method Based on Code Correlation Ranging Signal Design[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 89-94.

Key words TACAN system; code correlation ranging; signal design; improve accuracy

塔康是 TACAN(TACTical air navigation)的音译,指战术空中导航系统,塔康研发设计兼具民航 DME(地美仪)的测距功能及 VOR(伏尔)的测位功能,能够实现单站的测距、测位和台识别^[1-2]。塔康系统采用询问-应答式脉冲测距,可与 DME 系统兼容工作,从而实现极坐标定位^[3]。可用于保障半径为 500 km 内飞机安全航行,是空中作战飞机主用的战术导航手段^[4-6]。塔康系统最初由美国联合其他国家研发,我国第一代塔康于 20 世纪 60 年代问世,目前我国主用的塔康信标为第三代产品^[7-11]。塔康测距的精度直接影响塔康系统的服务性能。现阶段塔康主要采用应答式脉冲测距,大量研究多集中在对测距精度的影响因素进行分析^[12],而测距精度的提升研究不多。张一等人提出了一种利用相关法将接收脉冲与参考脉冲匹配对准,运用求导加权提取钟形脉冲定时点,从而提高测距精度的方法^[13]。该方法能有效减小粗大误差、偶然误差以及随机噪声的影响,从接收端信号处理的角度减小测距误差,从而提高测距精度。何世彪等人运用先估计测量系统误差,再利用系统误差修正目标测距数据的方法来提测距精度^[14],该方法同样是在接收端进行处理,还有另一类方法利用发射信号的改进来提升测距精度。张松等人利用 QPSK 原理调制伪随机 M 序列作为测距介质,在无线电测距系统中扩大测距范围和抗干扰能力,从而使定位更准确^[15]。

本文在以上几种方法的基础上,从另一个角度出发,提出了一种新的测距码信号。根据塔康系统数理模型设计测距码信号格式,并根据信号格式设计相应的信号处理方法,分析码相关测距的优缺点及设计中存在的矛盾问题。仿真分析塔康信号波形及码相关测距流程,并与传统的钟型脉冲测距信号对比分析新型编码信号测距精度的提升效果。

1 塔康系统测距误差来源分析

塔康系统测距时,通过机载设备根据测量询问信号与应答信号时差测得飞机与信标台距离,测距公式如下:

$$R = \frac{1}{2}c(t - t_0) \quad (1)$$

式中: R 为所测得的距离; c 为电磁波传播速度; t 为测量时间差; t_0 为地面台固定延时(X 模式为 50 μs , Y 模式为 56 μs)。

为分析塔康系统误差,将测距公式全微分:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial c}dc + \frac{\partial R}{\partial t}dt + \frac{\partial R}{\partial t_0}dt_0 \quad (2)$$

用增量代替微分,得到误差为:

$$\Delta R = \frac{R}{c}\Delta c + \frac{c}{2}\Delta t - \frac{c}{2}\Delta t_0 \quad (3)$$

因此,塔康系统测距误差(ΔR)主要来源于电波传播误差(Δc)、固定延时误差(Δt_0)、时间测量误差(Δt)三部分。

电波传播误差通常将 c 的平均值作为常数进行运算,环境因素对 c 影响的变化在 10^{-5} 量级,这对常规测量可以忽略^[16]。

信标固定延时误差主要来源于半幅探测单元、延时单元及发射机通道,其中半幅探测单元和延时单元使用延时器控制固定延时,现行设计中大多采用数字延时技术,这会产生固定的步进时间。以塔康地面信标为例,其延时器最小延时步进为 1/16 μs ,从而产生延时误差,可通过提高延时器工作时钟减小此类误差为^[17]。

时间测量误差包含机载设备测量询问、应答信号时间误差,主要来源于计时时钟分辨率、噪声干扰、随机脉冲干扰等,其中计时时钟分辨率与延时误差类似。对于噪声干扰,在存在噪声条件下,钟形脉冲信号与干扰噪声同时进入接收机,叠加后的信号幅度偏差为 Δu ,其脉冲半幅点处斜率为 k ,则由噪声产生的计时误差为:

$$\Delta t = \frac{\Delta u}{k} \quad (4)$$

因此在信号功率一定时,可使用低噪声放大器提高信噪比或提高上升沿斜率提高计时精度。当噪声均方根 σ_n 已知,时间测量均方误差为:

$$\sigma_n = \frac{\tau_r}{\sqrt{2}q} \quad (5)$$

式中: τ_r 为钟形脉冲半幅值处斜率; q 为接收机输出端信噪比。

正常工作时,系统随机脉冲主要是多径信号,主要分为 2 类,第 1 类多径信号与原信号混叠,将信号峰值抬高,主要影响半幅探测单元输出;第 2 类多径信号滞后于原信号,通过接收机寂静时间控制可抑制此类多径干扰,即译码完成一个询问信号后 60 μs (X 模式)内不再接收询问信号,实现对此类多径信号的抑制。塔康系统可剔除大部分多径信号干扰,但多径干扰仍是不可忽视的误差来源。

由于以上 4 个误差为互不相关的随机变量,因此其测距误差的均方根值可表示为:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R^2}{c^2}\sigma_c^2 + \frac{c^2}{4}\sigma_T^2 + \frac{c^2}{4}\sigma_{T_0}^2} \quad (6)$$

综合以上误差的影响,现代脉冲信号体制的塔康系统测距精度在整个工作区内不超过 ± 370 m

2ASK 信号功率谱为相应基带信号功率谱平移至 $\pm f_c$ 处形成,因此其带宽为基带信号 2 倍,为保证信号的不失真接收,滤波器带宽设置为 4 MHz,同时为避免邻波道信号对本波道信号产生干扰,应保证相邻波道编码格式不同,且其互相关性不超过相关峰值的一半,并对载波频率稳定性提出要求。

机载测距询问在信号接收处理过程中,首先需确定为本波道询问信号且编码格式正确,后经相关运算提取定时点延时至 $50 \mu\text{s}$ 后,触发应答信号编码并进行调制、功率放大,在天线完成幅度调制后向空间辐射。

2.2.2 测距精度分析

新型信号采用的是码相关测距方法,精度除了受电波传播和大气折射引起的误差因素外,同样也受到噪声因素的影响。这种测距方式相当于进行了“相关时间长度”的脉冲测距,对图 2 所示的新型码序列的接收码 $S_r(t)$ 与本地参考码 $S_{\text{ref}}(t-\tau)$ 的相关最大值,得到基于码测量的时间延迟估计:

$$\tau = \max_{\tau} \int_0^T S_r(t) S_{\text{ref}}(t-\tau) dt \quad (12)$$

估计误差的方差为:

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{N_0}{\int_0^T [c_r(t)]^2 dt} \quad (13)$$

σ_{τ} 与积分时间有关,当 T 一定时,误差方差与噪声功率密度 N_0 成正比,与接收码序列的平方积分成反比。将式(13)代入式(4)得到最终的测距误差。

利用编码测距时,对载波信号进行 2ASK 调制相当于对点频的载波信号进行扩频处理,使得信号频谱展宽,其抗压制式干扰性能较钟形脉冲信号有所提升。对于相同信号格式及调制方式的欺骗信号,可利用伪码良好的自相关性对伪码序列进行区分,识别真正的询问信号,从而提高了系统测距功能的抗干扰性能。因此,新型码序列测距方法在精度、抗干扰等性能方面均优于脉冲式测距。

3 塔康系统测距精度对比仿真分析

3.1 新型塔康信标测距信号分析

编码测距过程首先产生 31 位码序列,并进行采样,使其满足信号采样率及长度要求,利用此码序列对载波进行 2ASK 调制,产生询问信号基本编码格式。使用随机函数控制其频率产生随机抖动进行询问信号编码,提取定时点位置并与载波混频作为测距询问信号。应答信号的信噪比假设为 20 dB,增加 200 km 信号传播延时作为接收信号,其信号处理流程与信标类似,最终完成信号译码。对信号的搜索过程首先产生 $10 \mu\text{s}$ 搜索门信号,并由计时起

点开始每次延时 $10 \mu\text{s}$ 与译码信号做与运算,搜索应答信号,只有搜索门内译码信号数超过 4 个时,判定为完成应答信号搜索,搜索门对应答信号分选后输出 6 组询问信号的距离信息。

由于测距信号频谱展宽,为保证地面信标接收机信号不产生失真,接收前端带通滤波器通带设置为 4 MHz,阻带为 4.5 MHz,输出信号送至 PLL 锁相环路提取相干载波解调得到携带直流分量的码信号,将其与本地码序列做相关运算解码,相关运算精度为 1/10 码元宽度,根据计算结果,其峰值大约为 1 500,其相关的副峰值约为 750,因此其峰值判决门限应大于 1 000,相关峰值位置即为测距信号的定时位置,将定时信息延时 $50 \mu\text{s}$ 产生应答触发信号。

随机填充脉冲利用循环得到了其触发信号,其优点是优先级控制更加便捷,只需对触发脉冲进行控制即可,不会出现信号波形的截断,信号编码首先根据触发信号不同,与相应编码信号做卷积运算,再将主辅群信号、填充信号和测距应答码信号相加即可得到信标发射信号的编码格式,避免使用循环叠加运算,极大减小运算量,完成信号调制即可作为发射信号送至天线。

飞机接收端信号搜索采用 $51 \mu\text{s}$ 搜索门信号及 $20 \mu\text{s}$ 的搜索门延时进行搜索,保证完整提取出应答信号,并通过信号在搜索门内占空比判断是否为应答信号,基准群信号在门内占空比最大约为 40%,测距信号占空比大于 60%,因此占空比判决值可设为 50%,接收处理过程与地面信标类似。

3.1.1 信号频谱及编码格式

由于测距信号采用编码调制,因此信号频谱相较于钟形脉冲有所展宽,信号接收过程中首先需考虑滤波器性能,保证数字信号滤波处理后失真较小,根据信号频谱调整滤波器参数,并最终确定滤波器通带宽度为 4 MHz、阻带宽度为 4.5 MHz。

为保证相邻波道信号不产生干扰,使用不同编码格式的序列对波道进行划分。在此规定,波道间隔为 1 MHz,收发差频间隔 63 MHz,不再区分 X、Y 模式,工作收发频率划分与原 X 模式下相同,地面信标的发射频率为 962~1 024 MHz、1 150~1 213 MHz,对应收频 1 025~1 150 MHz,共 126 个波道,选取 4 个码序列作为固定编码格式,依次对 1~126 波道进行编码,并选择合适的码型控制互相关峰值小于门限值,用以区分两波道信号避免邻波道干扰。

3.1.2 信号性能分析

针对相邻波道信号相互干扰,首先通过滤波器对其进行衰减,但由于信号频谱较宽,为保证本波道信号波形不失真,不能采用窄带滤波器滤除邻波道信号,因此需对相邻波道码序列互相关性进行分析,保证 4 个波道编码信号互相关峰值小于自相关峰值

的一半,从而避免邻波道干扰。为得到全部 31 位码序列,调用 MATLAB 的 Primpoly 函数得到全部 6 阶本原多项式,将其系数作为反馈移位寄存器的反馈输出,并对其进行模二加运算送至输入端,保留最后一位寄存器输出可得到完整的 4 个码序列。

$$f(x) = x^6 + x + 1$$

$$f(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$$

$$f(x) = x^6 + x^5 + 1$$

$$f(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$$

$$f(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$$

$$f(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$$

根据对 4 个码序列的互相关特性仿真,分别是序列 1(N1)与序列 2(N2)、序列 2(N2)与序列 3(N3)、序列 3(N3)与序列 4(N4)、序列 4(N4)与序列 1(N1),由仿真结果得到互相关值均保持在 10 以内,而其自相关峰值为 31、副峰值为 16,因此可以断定,相关运算时可通过设定判决门限对不同波道信号加以区分,新型码序列的相关性如图 3 所示。

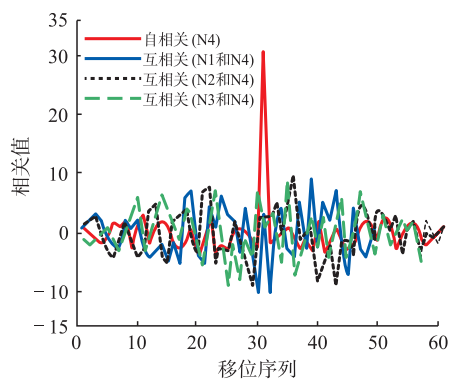


图 3 新型码序列的相关特性

3.2 测距精度对比分析

根据前文中对塔康系统测距精度的分析,不考虑电波传播误差,则其测距误差来源于信标固定延时误差和机载设备的时间测量误差,固定延时误差主要受延时器最小步进、时钟频率及电路工作环境影响,信标延时器最小步进为 $1/16 \mu\text{s}$,对应约 10 m 测距误差,时钟用于完成 $50 \mu\text{s}$ 时间延时,其频率影响延时精度,信标主要误差来源于电路延时的影响,无论是信号的处理还是由于环境因素造成电路性能的变化都会导致精度降低,一般要求塔康信标延时精度要达到 $\pm 1 \mu\text{s}$ (95%)。机载设备的测量误差主要受噪声影响,计算噪声相较于信号幅度每增加 10%,引起的的时间误差大约为 $0.3 \mu\text{s}$,信噪比设为 20 dB,计算得到其标准差 $\sigma_T = \pm 0.1 \mu\text{s}$ (95%),由于中频频率为 0.63 MHz,包络检波后其包络频率较低导致测距信号检波出现失真,造成定时点提取不准确,因此使用钟形脉冲测距精度相对较低。通常在 20 dB 信噪比条件下的测距误差大致为 200 m。

码相关测距方法中,针对信标固定延时误差,可运用导脉冲环技术对其进行修正,从而使得最终延时误差近似为延时器的最小步进,其误差大致为 10 m。在接收端的计时误差主要受相关运算器件性能影响,在相关运算鉴相精度为 $1/10$ 码元宽度时,测距误差约 30 m。其次码相关法测距精度还受锁相环及滤波器性能影响,无论是锁相环跟踪精度还是滤波器对数字信号高频分量的滤除,都会导致解调信号波形产生不同幅度的失真,影响相关运算精度。

以一次测距结果为例,当信噪比为 20 dB 时,分别利用钟型脉冲信号和新型编码信号作为发射信号测量距离,分别得到测距误差如图 4 所示。采用钟形脉冲信号测距误差范围为 $(-380, +400)$,采用新型编码信号测距误差范围为 $(-60, +60)$ 。

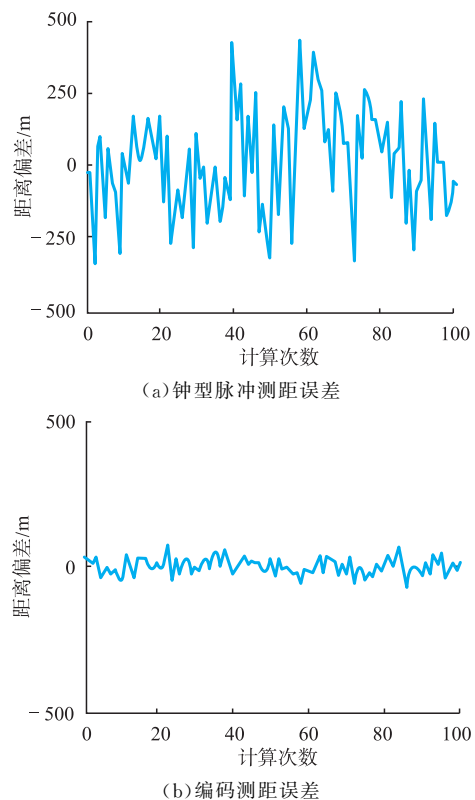
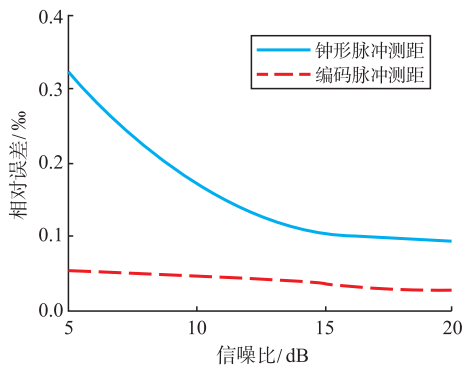


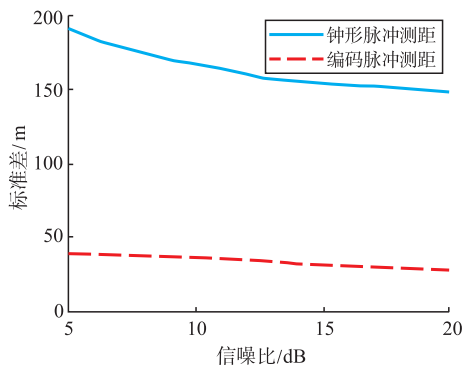
图 4 2 种信号体制的测距误差对比

为了直观反映出不同方法测距误差的特性,对 1 000 组蒙特卡洛仿真数据进行了统计分析,计算其误差均值和标准差。如图 5 所示,通过对统计数据的对比,反映精度提升效果。设置信噪比从 5 dB 到 20 dB,分别对不同信噪比条件下对 2 种方法的误差统计分析得到图 5 所示的对比结果。增加样本数后得到更精确的计算结果,当信噪比为 20 dB 时,计算出钟形脉冲测距误差峰值为 ± 426 m,误差均值为 18.56 m,相对误差为 0.093%,标准差为 148.8 m;而采用编码脉冲时测距误差峰值为 ± 64 m,均值为 5.4 m,相对误差为 0.027%,标准差为 28.23 m。因其相对误差的均值反映的是定时点提

取算法对系统精度的影响,标准差表示测距误差的统计特性。由图5仿真结果可得,相较于采用传统的钟形脉冲测距,本文提出的新型编码脉冲测距在相同信噪比情况下误差均值和标准差大大减小,因而测距精度更高,且在不同信噪比下新型编码脉冲测距稳健性更好。



(a) 钟形脉冲和编码脉冲的相对误差对比



(b) 钟形脉冲和编码脉冲测距误差的标准差对比

图5 2种测距方法的统计数据对比

综上,利用编码测距其精度相较于钟形脉冲有所提高,其本质为在相同信噪比条件下,利用钟形脉冲的测距方法对幅度变化较为敏感。而采用码测距的方法利用信号自相关性提取定时点,虽然信号整体幅值被噪声抬高,但噪声均值为零,对码自相关性影响较小,有效提升计时精度。同时采用导脉冲环技术动态补偿电路延时,减小系统误差。

4 结语

本文开展塔康系统码测距研究,设计新型测距编码信号格式,并对码测距的信号处理流程进行改进,分析测距过程中对信号频谱等参数性能的要求,并在调制可行性、频谱特性及邻波道信号互相关性3个方面进行技术可行性论证。对两种测距技术的测距结果进行仿真,对比测距精度。结果表明新提出的编码信号和码相关测距方法相比传统的钟形脉冲信号测距能够有效提高测距精度,受噪声影响较

小,具有更高的鲁棒性,但是本文只从理论进行分析验证,从理论到实际应用还存在一定的差距,需要根据系统实际运算和控制能力,以及环境等因素综合探讨其适用范围。新方法能够为下一代塔康系统的改进提供一个参考思路,具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 吴德伟. 航空无线电导航系统[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 张忠兴. 无线电导航理论与系统[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998:152-161.
- [3] 吴江. 中国民用航空 VOR/DME 导航系统概述[J]. 科技致富向导,2012(3):83-84.
- [4] 王丹. 塔康系统测位与测距技术的研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [5] 倪育德,卢丹. 导航原理与系统[M]. 北京:清华大学出版社,2015:213-216.
- [6] 丁永强. 塔康空空测距工作模式应用研究[J]. 西安航空学院学报,2020,38(5):9-12.
- [7] 王广水,高峰. 塔康空空测距测位功能探讨[J]. 现代导航,2016,7(1):17-23.
- [8] 李朝阳,张天伟,郑志聪. 软件化塔康信标模拟系统的设计[J]. 计算机测量与控制,2017,25(7):159-164.
- [9] 王鼎,栾宝宽,王传刚,等. 塔康系统数据传输技术方案设计与仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(1):172-177.
- [10] 孙博,冯永浩,卢虎,等. 一种塔康信标扩展数据广播功能的方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2015,16(4):84-87.
- [11] 冯永浩,李云,孙博. 塔康系统扩展数据通信功能技术途径[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2015,16(2):49-52.
- [12] 米正衡. TACAN 机载接收机谐波抑制对测距精度的影响研究[J]. 现代导航,2013,2(1):49-52.
- [13] 张一,张斌,来磊. 基于相关法的塔康钟形脉冲定时点提取方法[J]. 弹箭与制导学报,2019,39(6):17-20.
- [14] 何世彪,孙宝刚,张力. 一种提高无线电测距定位精度的有效方法[J]. 通信技术,2019,52(2):304-310.
- [15] 张松,张亚. 基于伪随机序列的无线电测距系统设计[J]. 航空兵器,2016(4):42-46.
- [16] 陈高平,邓勇. 航空无线电导航原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:58.
- [17] 吴德伟. 无线电导航系统[M]. 北京:电子工业出版社,2015:50.
- [18] 李跃. 导航与定位——信息化战争的北斗星[M]. 北京:国防工业出版社,2008:100-120.
- [19] 赵飞,韩卫杰. 基于 α 、 β 滤波的塔康距离跟踪算法[J]. 科技视界,2018(16):249-250.

(编辑:徐楠楠)