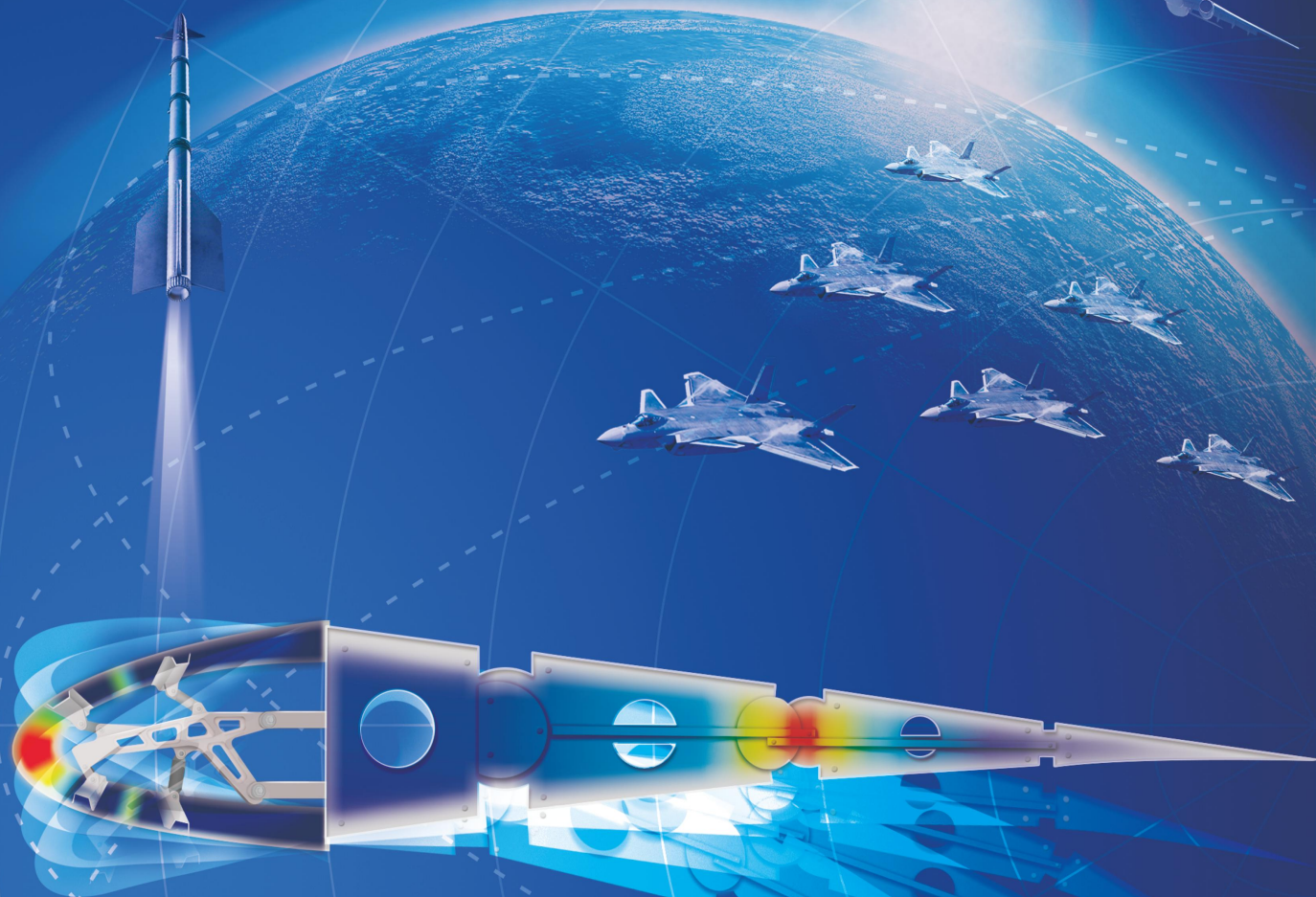


# 航空学报

1

2022 / Vol.43

HANGKONG XUEBAO



## 机翼变弯度技术研究进展

王彬文 杨宇 钱战森 王志刚 吕帅帅 孙侠生

## 目 次

激波/边界层干扰机理与控制专栏(执行主编:杨彦广,王刚;策划编辑:李明敏)

- 激波/湍流边界层干扰低频非定常性研究评述 ..... 范孝华,唐志共,王刚,杨彦广(625917)
- 激波/湍流边界层干扰的流动控制技术 ..... 时晓天,吕蒙,赵渊,陶善聪,郝乐,袁湘江(625929)
- 高频微秒脉冲放电控制激波/边界层干扰非定常性的实验研究.....  
..... 王宏宇,杨彦广,胡伟波,陈植,冯黎明,周游天(625905)
- 混合动理学通量 WENO 方法拓展 ..... 何康,李新亮,刘洪伟(625909)
- 压缩-膨胀湍流边界层平均摩阻分解 ..... 段俊亦,童福林,李新亮,刘洪伟(625915)
- 展向宽度对激波入射平板反射类型的影响 .....  
..... 张志刚,赵金山,王成鹏,罗万清,廖军好,肖雨,陈挺,粟斯尧(625927)
- 马赫 6 柱-裙构型激波/湍流边界层干扰摩阻统计特性 ..... 沈鹏飞,刘朋欣,孙东,袁先旭(626005)
- 受限流动中激波诱导分离的结构分析 ..... 谢祝轩,杨彦广,王刚(626042)
- 超声速湍流边界层与圆柱相互作用试验..... 冈敦殿,易仕和,米琦,牛海波(626104)
- 高分辨率激波/边界层干扰时间演化过程分析..... 陆小革,易仕和,何霖,全鹏程,冈敦殿(626147)

## 综 述

- 机翼变弯度技术研究进展 ..... 王彬文,杨宇,钱战森,王志刚,吕帅帅,孙侠生(024943)
- 大型复杂构件机器人加工稳定性研究进展 ..... 廖文和,郑侃,孙连军,董松,张磊(026061)
- 机场探鸟雷达技术发展与应用综述 ..... 陈唯实,黄毅峰,陈小龙,卢贤锋,张洁(024758)
- 面向目标分类识别的多任务学习算法综述 ..... 李红光,王菲,丁文锐(024889)

## 流体力学与飞行力学

- 基于真实道面模型的机轮滑水行为影响因素 ..... 杨洋,朱兴一,赵鸿铎(124813)
- 点火方式对空桶型旋转爆震燃烧室起爆特性的影响 .....  
..... 赵明皓,王可,王致程,朱亦圆,于潇栋,范玮(124870)
- 高温化学非平衡湍流边界层直接数值模拟 ..... 刘朋欣,袁先旭,孙东,傅亚陆,李辰(124877)
- 电动泵压式液氧煤油变推力火箭发动机动力学建模与仿真分析: Part I-单点工况分析 .....  
..... 崔朋,宋杰,李清廉,陈兰伟,梁涛,孙郡(124884)
- 高速自然层流翼型高效气动稳健优化设计方法 ..... 赵欢,高正红,夏露(124894)
- 广义 Burgers 方程声爆传播模型高阶格式离散 ..... 王迪,钱战森,冷岩(124916)
- 非对称超声速喷管内流动分离非定常特性 ..... 何成军,李建强,黄江涛,李耀华,陈宪(124930)
- 基于试验分岔分析的翼身融合飞行器纵向稳定性 .....  
..... 付军泉,史志伟,耿玺,朱佳晨,王力爽,吴大卫,潘立军(124931)
- 变转速下跨声速压气机的耦合扩稳方法..... 赵乐,王维,张乐福,王伟超,卢金玲,楚武利(124942)
- 基于气动力降阶的弹性飞机阵风响应仿真分析及验证..... 师妍,万志强,吴志刚,杨超(125474)

## 固体力学与飞行器总体设计

- 提高飞机壁板低频宽带隔声的层合声学超材料 ..... 顾金桃,王晓乐,汤又衡,周杰,黄震宇(224785)
- 安全带对航空座椅及乘员冲击响应的影响 .....  
..... 冯振宇,刘旭,林岚辉,杨永攀,解江,石膏鹏,肖培,李磊子,易朋飞,刘小川,白春玉(224808)
- 铝合金薄板冲击后疲劳试验与谱载寿命 ..... 张亦波,陈迪,成正强,沈培良,熊峻江(224811)
- 机动飞行环境下双转子系统主共振特性分析 ..... 陈毅,侯磊,林荣洲,杨洋,陈予恕(224841)
- 带翼展飞行器质量质心测量系统设计与误差分析 ..... 林闯,郑昱,广晨汉,王炎,杨洋(224893)

基于功能原理的颤振模态参与度分析方法 ..... 王昕江,刘子强,郭力,付志超,吕计男(224920)

### 电子电气工程与控制

基于合作博弈的组网雷达分布式功率分配方法 ..... 靳标,邝晓飞,彭宇,张贞凯(324776)

基于虚拟视角约束的机动目标拦截制导方法 ..... 王亚宁,王辉,林德福,袁亦方(324799)

腔体格栅的电磁屏蔽原理与方法 ..... 余龙舟,陈宪,黄江涛,钟世东,阙肖峰(324803)

一种基于攻击时间和角度控制的协同制导方法 ..... 唐杨,祝小平,周洲,严飞(324844)

机载导航卫星反射信号海面高度测量 ..... 王峰,杨东凯,张国栋,张波(324852)

无人机视觉引导对接过程中的协同目标检测 ..... 王辉,贾自凯,金忍,林德福,范军芳,徐超(324854)

复合材料飞机接地回流网络网内压降分析 ..... 杨占刚,隋政,张起浩,刘建英(324859)

改进的航空遥测信道探测 ..... 李赛,党小宇,郝崇正,李杰(324881)

能耗均衡的三维最优持久编队通信拓扑生成 ..... 罗贺,李晓多,王国强(324922)

基于 QoS 的卫星网络 k 端可靠性分析 ..... 蔡睿妍,刘艳红,魏德宾(326020)

### 材料工程与机械制造

惯性力平衡式二维燃油泵的设计与研究 ..... 王河缘,李胜,阮健(424696)

基于阻抗法的密封动力特性系数实验识别 ..... 张万福,王应飞,张晓斌,杨兴辰,李春(424719)

热障涂层二向应力状态分析与危险点预测 ..... 姚玉东,艾延廷,宋春,关鹏,田晶(424937)

基于碳纳米管薄膜的复合材料在线损伤监测 .....  
..... 曲抒旋,巩文斌,孙小珠,张东兴,梁志强,高丽敏,吕卫帮(424949)

# ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA

(Monthly)

Volume 43 Number 1

Jan. 2022

---

## CONTENTS

### Special Topic of Shock/Boundary Layer Interaction Mechanism and Control

(Guest Editors: YANG Yanguang, WANG Gang; Managing Editor: LI Mingmin)

- Review of low-frequency unsteadiness in shock wave/turbulent boundary layer interaction .....  
..... FAN Xiaohua, TANG Zhigong, WANG Gang, YANG Yanguang(625917)
- Flow control technique for shock wave/turbulent boundary layer interactions .....  
..... SHI Xiaotian, LYU Meng, ZHAO Yuan, TAO Shancong, HAO Le, YUAN Xiangjiang(625929)
- Experimental study on unsteadiness characteristics of shock wave/turbulent boundary layer interaction controlled by high-frequency microsecond pulse discharge .....  
..... WANG Hongyu, YANG Yanguang, HU Weibo, CHEN Zhi, FENG Liming, ZHOU Youtian(625905)
- An extension of hybrid kinetic WENO method ..... HE Kang, LI Xinliang, LIU Hongwei(625909)
- Decomposition of mean friction drag in compression-expansion turbulent boundary layer .....  
..... DUAN Junyi, TONG Fulin, LI Xinliang, LIU Hongwei(625915)
- Influence of spanwise width on reflection types of oblique shock wave incident plate ..... ZHANG Zhigang,  
ZHAO Jinshan, WANG Chengpeng, LUO Wanqing, LIAO Junhao, XIAO Yu, CHEN Ting, SU Siyao(625927)
- Statistical characteristics of skin friction of shock wave/turbulent boundary layer interaction in hollow cylinder-flare configuration at Mach 6 ..... SHEN Pengfei, LIU Pengxin, SUN Dong, YUAN Xianxu(626005)
- Structure of shock-induced separation in confined flow ..... XIE Zhuxuan, YANG Yanguang, WANG Gang(626042)
- Experiment on interaction between supersonic turbulent boundary layer and cylinder .....  
..... GANG Dundian, YI Shihe, MI Qi, NIU Haibo(626104)
- Time evolution process of high resolution shock wave/turbulent boundary layer interaction .....  
..... LU Xiaoge, YI Shihe, HE Lin, QUAN Pengcheng, GANG Dundian(626147)

### Reviews

- Technical development of variable camber wing; Review .....  
..... WANG Binwen, YANG Yu, QIAN Zhansen, WANG Zhigang, LYU Shuaishuai, SUN Xiasheng(024943)
- Review on chatter stability in robotic machining for large complex components .....  
..... LIAO Wenhe, ZHENG Kan, SUN Lianjun, DONG Song, ZHANG Lei(026061)
- Development and applications of airport avian radar; Review .....  
..... CHEN Weishi, HUANG Yifeng, CHEN Xiaolong, LU Xianfeng, ZHANG Jie(024758)

Survey on multi-task learning for object classification and recognition .....  
..... LI Hongguang, WANG Fei, DING Wenrui(024889)

### **Fluid Mechanics and Flight Mechanics**

Aircraft tire hydroplaning behavior based on real texture of surface runway model .....  
..... YANG Yang, ZHU Xingyi, ZHAO Hongduo(124813)

Effects of ignition on initiation characteristics of hollow rotating detonation combustor .....  
..... ZHAO Minghao, WANG Ke, WANG Zhicheng, ZHU Yiyuan, YU Xiaodong, FAN Wei(124870)

Direct numerical simulation of high-temperature turbulent boundary layer with chemical nonequilibrium .....  
..... LIU Pengxin, YUAN Xianxu, SUN Dong, FU Yalu, LI Chen(124877)

Dynamic modeling and simulation analysis of LOX/RP1 variable thrust engines using motor pump; Part I-single condition analysis .....  
..... CUI Peng, SONG Jie, LI Qinglian, CHEN Lanwei, LIANG Tao, SUN Jun(124884)

Efficient robust aerodynamic design optimization method for high-speed NLF airfoil .....  
..... ZHAO Huan, GAO Zhenghong, XIA Lu(124894)

High-order scheme discretization of sonic boom propagation model based on augmented Burgers equation .....  
..... WANG Di, QIAN Zhansen, LENG Yan(124916)

Unsteadiness of flow separation in an asymmetric supersonic nozzle .....  
..... HE Chengjun, LI Jianqiang, HUANG Jiangtao, LI Yaohua, CHEN Xian(124930)

Longitudinal stability of blended-wing-body aircraft based on experimental bifurcation analysis .....  
..... FU Junquan, SHI Zhiwei, GENG Xi, ZHU Jiachen, WANG Lishuang, WU Dawei, PAN Lijun(124931)

Coupling method for stability improvement for transonic compressor at variable speed .....  
..... ZHAO Le, WANG Wei, ZHANG Lefu, WANG Weichao, LU Jinling, CHU Wuli(124942)

Gust response analysis and verification of elastic aircraft based on nonlinear aerodynamic reduced-order model .....  
..... SHI Yan, WAN Zhiqiang, WU Zhigang, YANG Chao(125474)

### **Solid Mechanics and Vehicle Conceptual Design**

Laminated acoustic metamaterial for improving low-frequency broadband sound insulation of aircraft wall panels .....  
..... GU Jintao, WANG Xiaole, TANG Youheng, ZHOU Jie, HUANG Zhenyu(224785)

Impact of seatbelts on impact characteristics of aviation seats and occupants ... FENG Zhenyu, LIU Xu, LIN Lanhui,  
YANG Yongpan, XIE Jiang, SHI Xiaopeng, XIAO Pei, LI Leizi, YI Pengfei, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu(224808)

Fatigue experiments and lifetime for post-impact sheets of aluminum-alloys(AAs) under block spectrum loading .....  
..... ZHANG Yibo, CHEN Di, CHENG Zhengqiang, SHEN Peiliang, XIONG Junjiang(224811)

Analysis of primary resonance characteristics of dual-rotor system in maneuvering flight environment .....  
..... CHEN Yi, HOU Lei, LIN Rongzhou, YANG Yang, CHEN Yushu(224841)

Design implementation and error analysis of mass and centroid measurement of aircraft with wingspan .....  
 ..... LIN Chuang, ZHENG Yu, GUANG Chenhan, WANG Yan, YANG Yang(224893)

Analysis method for flutter mode indicator based on principle of work and power .....  
 ..... WANG Xinjiang, LIU Ziqiang, GUO Li, FU Zhichao, LYU Jinan(224920)

**Electronics and Electrical Engineering and Control**

Distributed power allocation method for netted radar based on cooperative game theory .....  
 ..... JIN Biao, KUANG Xiaofei, PENG Yu, ZHANG Zhenkai(324776)

Guidance method for maneuvering target interception based on virtual look angle constraint .....  
 ..... WANG Yaning, WANG Hui, LIN Defu, YUAN Yifang(324799)

Electromagnetic shielding principles and technologies of cavity grille .....  
 ..... YU Longzhou, CHEN Xian, HUANG Jiangtao, ZHONG Shidong, QUE Xiaofeng(324803)

Cooperative guidance method based on impact time and angle control .....  
 ..... TANG Yang, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, YAN Fei(324844)

Measurement of sea surface height using airborne global navigation satellites system reflectometry .....  
 ..... WANG Feng, YANG Dongkai, ZHANG Guodong, ZHANG Bo(324852)

Cooperative object detection in UAV-based vision-guided docking .....  
 ..... WANG Hui, JIA Zikai, JIN Ren, LIN Defu, FAN Junfang, XU Chao(324854)

Voltage drop in composite aircraft grounding and current return network .....  
 ..... YANG Zhangang, SUI Zheng, ZHANG Qihao, LIU Jianying(324859)

Improved aeronautical telemetry channel sounding ..... LI Sai, DANG Xiaoyu, HAO Chongzheng, LI Jie(324881)

Energy-balanced communication topology generation of three-dimensional optimally persistent formation .....  
 ..... LUO He, LI Xiaoduo, WANG Guoqiang(324922)

$k$ -terminal reliability analysis of satellite network based on QoS guarantee .....  
 ..... CAI Ruiyan, LIU Yanhong, WEI Debin(326020)

**Material Engineering and Mechanical Manufacturing**

Design and research of two-dimensional fuel pump with balanced inertia force .....  
 ..... WANG Heyuan, LI Sheng, RUAN Jian(424696)

Experimental identification for rotordynamic coefficients of labyrinth seal based on impedance method .....  
 ..... ZHANG Wanfu, WANG Yingfei, ZHANG Xiaobin, YANG Xingchen, LI Chun(424719)

Prediction of dangerous point of thermal barrier coating by biaxial stress state analysis .....  
 ..... YAO Yudong, AI Yanting, SONG Chun, GUAN Peng, TIAN Jing(424937)

On-line damage monitoring of composites based on carbon nanotube films ..... QU Shuxuan,  
 GONG Wenbin, SUN Xiaozhu, ZHANG Dongxing, LIANG Zhiqiang, GAO Limin, LYU Weibang(424949)

# 《航空学报》第十届编辑委员会

主任委员(主编):孙晓峰

(以下按音序排列)

副主任委员(副主编):蔡 斐 房建成 韩杰才 聂 宏 杨树兴 张 军 张卫红  
顾问编委:曹春晓 陈懋章 顾诵芬 胡海岩 李 明 林左鸣 魏炳波 吴一戎  
徐建中 朱 荻 朱自强  
编 委:蔡晋生 陈曾平 陈海昕 陈坚强 陈 谋 陈 正 崔海涛 崔乃刚  
邓小刚 丁希仑 高正红 桂幸民 郭洪波 何雅玲 何 友 黄 海  
黄攀峰 黄伟光 姜宗林 金栋平 康 锐 李贺军 李迎光 李应红  
李玉龙 廖桂生 刘 莉 刘战强 孟 光 苗 强 史忠科 宋征宇  
孙希明 孙玉文 唐长红 王彬文 王大轶 王海峰 王立新 王少萍  
吴光辉 吴启晖 吴子牛 夏元清 向锦武 谢里阳 邢誉峰 徐 兵  
徐国华 杨 超 杨智春 叶友达 余雄庆 袁慎芳 岳晓奎 詹 梅  
张定华 张靖周 张开富 张丽艳 张显程 郑日恒 周 荻  
ICHCHOU Mohamed(法国) LIU Jie(加拿大) PECHT Michael(美国)  
SHU Chang(新加坡) WANG Zhijian(美国) XU Kun(中国香港)  
YANG Vigor(美国) YANG Zhiying(英国) ZHANG Ketao(英国)  
ZHANG Rui(新加坡) ZHANG Youmin(加拿大) ZHANG Yu(美国)  
ZHU Zhenghong(加拿大)

社 长:刘德生 副社长:俞 敏

编辑部主任:蔡 斐 英文审核:孙洪丽,夏 历,郑 飞

编 辑:李 丹,李明敏,李世秋,苏 磊,王 娇,王小辰,张 晗,张丽辉

# 航 空 学 报

(月刊)

第 43 卷 第 1 期

2022 年 1 月 25 日 1965 年创刊

ACTA AERONAUTICA ET  
ASTRONAUTICA SINICA

(Monthly)

Vol. 43 No. 1

25 Jan. 2022 Started in 1965

主 管 中 国 科 学 技 术 协 会

主 办 中 国 航 空 学 会  
北 京 航 空 航 天 大 学

编辑出版 北 京 航 空 航 天 大 学  
航 空 知 识 杂 志 社  
北 京 海 淀 区 学 院 路 37 号,100083  
电 话:(010)82317058  
传 真:(010)82313502  
网 址: <http://hkxb.buaa.edu.cn>  
电 子 邮 件: [hkxb@buaa.edu.cn](mailto:hkxb@buaa.edu.cn)

主 编 孙 晓 峰

印 刷 北 京 科 信 印 刷 有 限 公 司

国内发行 北 京 报 刊 发 行 局

国外发行 中 国 国 际 图 书 贸 易 集 团 有 限 公 司  
北 京 399 信 箱,100020

Superintended by China Association for Science  
and Technology

Sponsored by Chinese Society of Aeronautics  
and Astronautics  
Beihang University

Edited and Published by Beihang University  
Aerospace Knowledge Press  
37 Xueyuan Road, Beijing 100083, China  
Tel: 86(10)-82317058  
Fax: 86(10)-82313502  
Website: <http://hkxb.buaa.edu.cn>  
E-mail: [hkxb@buaa.edu.cn](mailto:hkxb@buaa.edu.cn)

Chief Editor SUN Xiaofeng

Printed by Beijing Kexin Printing Co., LTD  
Distributors

Domestic: Beijing Bureau for Distribution of  
Newspapers and Journals

Abroad: China International Book Trading  
Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100020, China)

ISSN 1000-6893  
CN 11-1929/V

邮发代号:82-148 国外代号:BM427 国内定价:80.00元



**引用格式:** 李赛, 党小宇, 郝崇正, 等. 改进的航空遥测信道探测[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 324881. LI S, DANG X Y, HAO C Z, et al. Improved aeronautical telemetry channel sounding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 43(1): 324881 (in Chinese). doi:10.7527/S1000-6893.2020.24881

# 改进的航空遥测信道探测

李赛, 党小宇\*, 郝崇正, 李杰

南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 211106

**摘要:** 滑动相关器被广泛应用于信道特性的测量,但航空遥测信道的大延迟衰落会严重限制测量系统的测量性能,甚至测量无法完成。为了更加精确地测量航空遥测信道,本文提出一种基于 Zadoff-Chu(ZC)序列的滑动相关器,研究其在航空遥测信道测量系统中的信道测量能力。与传统分析方法不同,首先从频域给出测量系统中每个干扰分量的解析表达,然后给出多径环境下的平均动态范围,最后分别基于 ZC 序列根、归一化滑动因子、信噪比(SNR)和测量序列长度等干扰因素的仿真分析每个干扰分量对测量性能的影响。仿真结果表明:所提的滑动相关器会明显抑制由加性噪声产生的干扰,且在归一化滑动因子大于 2 和信噪比大于 10 dB 时,测量性能比传统滑动相关器至少提高 2 dB,因此所提滑动相关器的滑动相关峰会更加明显,能更利于航空遥测信道中每条多径分量的检测。

**关键词:** 滑动相关器; 信道探测; 航空遥测信道; 动态范围; ZC 序列

中图分类号: V217+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2022)01-324881-08

随着航空遥测通信业务的迅猛增长,已有频段业务趋于饱和,新的通信频段亟待开拓,这给航空遥测环境中信道特性的测量带来了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。未知频段信道特性的测量通常依赖专用的方法,比如单音脉冲、多音脉冲、周期脉冲、扫频以及脉冲压缩等<sup>[4]</sup>,其中 Cox<sup>[5]</sup>提出的基于脉冲压缩技术的滑动相关器最为流行,它不仅能测量更大带宽的信道特性,而且还适用于室内、室外等多种无线环境。

近年来,基于伪噪声(Pseudo Noise, PN)序列的滑动相关器被广泛用于信道测量<sup>[6-8]</sup>,但 PN 序列自相关函数的非零旁瓣会干扰信道测量系统中信道冲激响应的分辨<sup>[9]</sup>。为了消除 PN 序列非零旁瓣的干扰,文献<sup>[10]</sup>使用零相关区(Zero Correlation Zone, ZCZ)序列进行信道测量,且文献<sup>[11]</sup>对其和 PN 序列的测量性能进行了对比。

虽然前者获得了更好的测量性能,但并没被广泛应用,主要原因是 ZCZ 序列的生成方式复杂,零相关区短,最优 ZCZ 序列的搜索困难,不能灵活适应不同场景的测量需求。文献<sup>[12]</sup>使用线性调频信号(Chirp)进行信道测量,虽然能和 PN 序列取得相近的测量性能,但该方法具有较大的实现复杂度,因此也没被广泛应用。文献<sup>[13]</sup>使用成对互补二进制(Golay)序列进行信道测量,虽然获得了较好的测量性能,但相对于单序列而言, Golay 序列需要 2 倍的发送时间,损失了部分能效。根据文献<sup>[14]</sup>关于实测航空遥测数据的统计描述可知,来自粗糙反射面的延迟衰减增益为直接传播路径的 2%~8%,相对于直接传播路径来说,这个衰减增益非常严重,传统测量序列的测量性能可能受限,因此可以通过改进测量序列来提高航空遥测信道测量系统的测量性能。近年来,具

收稿日期: 2020-10-15; 退修日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-11-20; 网络出版时间: 2020-11-27 17:00

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20220138.html>

基金项目: 国家自然科学基金(62031017,61971221); 中央高校基本科研业务费(NP2020104)

\* 通信作者. E-mail: dang@nuaa.edu.cn

有理想自相关特性的 Zadoff-Chu(ZC)序列在地面通信系统中受到了重视<sup>[15-16]</sup>,比如用于生成长期演进(Long Term Evolution, LTE)标准中的主同步序列和随机接入前导<sup>[17-19]</sup>,但目前仍没有关于航空遥测信道测量方面的研究。此外,不同于 ZCZ 和 Golay 序列,ZC 序列有固定的数学表达,所以更易于生成,且相比于 Chrip 信号,ZC 序列的数学表达简单,因此也更易于实现。最重要的是,ZC 序列理想的自相关特性能使滑动相关峰更加明显,从而更利于多径分量的检测,所以本文考虑将 ZC 序列用于航空遥测信道的测量。

另外,为了能精确获得滑动相关器的测量性能,文献[20]首次完整给出了滑动相关器的数学描述。文献[21]不仅给出了用于反应滑动相关器测量性能的动态范围,还通过仿真得到了最优的滑动相关参数。文献[22]通过仿真量化了动态范围与测量序列长度、滑动因子等滑动相关参数之间的关系,为滑动相关参数的设计提供了必要的参考。文献[23]全面分析了动态范围和归一化滑动因子等滑动相关参数之间的关系,并主要研究了滑动相关自干扰对动态范围的影响,得到了测量性能和归一化滑动因子紧密相关的结论。但以上研究均以 PN 序列作为信道测量序列,且没有考虑信道特性的影响,即没有将滑动相关器应用于信道测量系统,所以并不能完全反应实际的测量性能,也不完全适用于其他测量序列。

考虑到已有研究均没考虑实际信道参数的影响,且传统测量序列的测量性能可能受限,首先以 ZC 序列作为信道测量序列,并将基于 ZC 序列的滑动相关器应用于航空遥测信道测量系统,然后得到所有可能产生的干扰分量和测量系统的动态范围,最后分析每个干扰分量对测量性能的影响。主要贡献如下:首先,提出基于 ZC 序列的滑动相关器,并基于航空遥测环境进行了系统分析;其次,不仅从频域给出了每个干扰分量的解析表达,还给出了多径环境下的平均动态范围;最后,通过仿真揭示了测量性能与 ZC 序列根号、归一化滑动因子、信噪比以及测量序列长度之间的关系,能为滑动相关参数的设计提供更为合理的参考。

本文的内容安排如下:第 1 节建立了基于滑动相关器的航空遥测信道测量系统模型,第 2 节给出了多径环境下基于 ZC 脉冲的滑动相关器,

第 3 节对第 2 节给出的滑动相关器进行了频域分析,第 4 节给出了仿真结果,第 5 节总结了全文。

## 1 航空遥测信道测量系统模型

基于滑动相关器的航空遥测信道测量系统主要包括发射端的测量脉冲发生器、航空遥测信道以及接收端的本地存储脉冲发生器、低通滤波器<sup>[17]</sup>。信号处理流程如下:测量脉冲发生器产生的测量脉冲首先经过航空遥测信道得到接收测量脉冲;其次,接收测量脉冲与本地存储脉冲发生器产生的本地脉冲通过直接相关构成了航空遥测信道测量系统中的滑动相关器;最后,滑动相关输出通过低通滤波器来消除干扰的影响。

在发射端,测量脉冲发生器产生的测量脉冲可表示为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \text{rect}(t/T_1 - n - 1/2) \quad (1)$$

式中: $N$ 为测量序列的长度或周期; $s_n$ 为测量序列的第 $n$ 项; $\text{rect}(t/T_1 - n - 1/2)$ 表示周期为 $T_1$ 的矩形成形脉冲。测量序列通常需要具有较好的自相关特性,以便于信道特征的获取。矩形成形脉冲可表示为

$$\text{rect}(t/T_1 - n - 1/2) = \begin{cases} 1 & nT_1 \leq t \leq (n+1)T_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

航空遥测信道的基带脉冲响应可表示为

$$g(t) = \delta(t) + \sum_{m=1}^M \Gamma_m \delta(t - \tau_m) \quad (3)$$

式中: $M$ 为多径传播路径的总数; $\Gamma_m$ 为第 $m$ 条多径传播路径的增益; $\tau_m$ 为第 $m$ 条多径传播路径的时延;直接传播路径的增益和时延分别有 $\Gamma_0 = 1$ 和 $\tau_0 = 0$ 。此外,多径传播路径的增益和时延均和反射面粗糙程度有关<sup>[24]</sup>,加性噪声 $w(t)$ 为服从均值为 0、方差为 $\sigma^2$ 的复高斯分布。

在接收端,接收测量脉冲可表示为

$$s_1(t) = s(t) * g(t) + w(t) \quad (4)$$

式中: $*$ 表示卷积操作。本地存储脉冲发生器产生的本地脉冲可表示为

$$s_2(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \text{rect}(t/T_2 - n - 1/2) \quad (5)$$

式中: $T_2$ 为成形脉冲的周期。测量脉冲和本地脉冲具有不同的时钟周期 $T_1$ 和 $T_2$ ,且其时钟频率

$f_1$  和  $f_2$  之间的关系可表示为

$$\gamma = f_1 / (f_1 - f_2) \quad (6)$$

式中： $\gamma$  为滑动或时间扩展因子，用来反映时间扩展或测量带宽压缩的程度。此外，测量脉冲和本地脉冲具有较大差异时的滑动因子较小，且给系统带来了更多干扰，不利于信道特性的测量。滑动相关输出可表示为

$$r(t) = s_1(t)s_2(t) \quad (7)$$

故相比于测量脉冲和本地脉冲，滑动相关输出具有更小的带宽和更大的时间分辨率，这为测量更大带宽的信道特性提供了可能。低滤波后的滑动相关输出可表示为

$$y(t) = r(t) * h(t) \quad (8)$$

式中： $h(t)$  为低通滤波器的时域响应。

## 2 多径环境下基于 ZC 脉冲的滑动相关器

ZC 序列表示一类具有理想循环移位特性序列的集合，可表示为

$$z_N^u = \left\{ z(n) = \exp\left(-\frac{j\pi un(n+1)}{N}\right) \right\} \quad (9)$$

式中： $z_N^u$  表示根为  $u$  和周期为  $N$  的 ZC 序列；根  $u \in [1, N-1]$ ，通常与序列周期互质<sup>[15]</sup>，那么基于矩形成形脉冲的 ZC 脉冲可表示为

$$z(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (z_N^u)_n \text{rect}(t/T_c - n - 1/2) \quad (10)$$

式中： $(z_N^u)_n$  表示 ZC 序列  $z_N^u$  的第  $n$  项； $T_c$  为成形脉冲的周期。根据式(3)、式(7)和式(10)得到的滑动相关输出可表示为

$$r(t) = \sum_{m=0}^M [\Gamma_m z_1(t - \tau_m) z_1(t) z_2'(t)] + w(t) z_2'(t) \quad (11)$$

式中： $z_1(t)$  表示测量脉冲发生器产生的 ZC 测量脉冲； $z_2'(t)$  表示本地 ZC 脉冲  $z_2(t)$  的共轭。由于时域乘积对应频域卷积，那么滑动相关输出的频域形式可表示为

$$R(f) = \sum_{m=0}^M [\Gamma_m Z_1(f) e^{-j2\pi f \tau_m} Z_1(f) * Z_2(f)] + W(f) * Z_2(f) \quad (12)$$

式中： $Z_1(f)$  为 ZC 测量脉冲  $z_1(t)$  的频谱； $Z_2(f)$  为本地 ZC 脉冲  $z_2'(t)$  的频谱； $W(f)$  为加性噪声  $w(t)$  的频谱。此外，通过傅里叶变换得到

的 ZC 测量脉冲频谱可表示为

$$Z_1(f) = \frac{1}{N} \sum_{k_1 \in \mathbf{Z}} \text{sinc}\left(\frac{k_1}{N}\right) \delta\left(f - \frac{f_1 k_1}{N}\right) \cdot e^{-\frac{j\pi k_1}{N} \sum_{n_1=0}^{N-1} (z_N^u)_{n_1} e^{-\frac{j2\pi k_1 n_1}{N}}} \quad (13)$$

式中： $\text{sinc}(\varphi) = \sin(\pi\varphi)/(\pi\varphi)$ ； $\delta(\xi)$  为狄拉克函数； $f_1$  为 ZC 测量脉冲的时钟频率； $(z_N^u)_{n_1}$  表示 ZC 序列  $z_N^u$  中的第  $n_1$  项<sup>[19]</sup>。本地 ZC 脉冲频谱可表示为

$$Z_2(f) = \frac{1}{N} \sum_{k_2 \in \mathbf{Z}} \text{sinc}\left(\frac{k_2}{N}\right) \delta\left(f - \frac{f_2 k_2}{N}\right) \cdot e^{-\frac{j\pi k_2}{N} \sum_{n_2=0}^{N-1} (z_N^u)'_{n_2} e^{-\frac{j2\pi k_2 n_2}{N}}} \quad (14)$$

式中： $f_2$  为本地 ZC 脉冲的时钟频率； $(z_N^u)'_{n_2}$  表示 ZC 序列  $z_N^u$  中第  $n_2$  项的共轭。

## 3 频域分析

### 3.1 干扰分量

根据 2 节中式(12)~式(14)得到的滑动相关输出频谱可表示为

$$R(f) = R_c(f) + R_{d1}(f) + R_{d2}(f) \quad (15)$$

式中： $R_c(f)$  为经时间扩展后 ZC 脉冲自相关函数  $r_c(t)$  的频谱，其中  $r_c(t)$  包含可用于信道状态信息检测和判断的滑动相关峰，故  $r_c(t)$  可称为滑动自相关函数， $R_c(f)$  可称为滑动自相关频谱； $R_{d1}(f)$  为由滑动相关本身引起干扰  $r_{d1}(t)$  的频谱，故  $r_{d1}(t)$  可称为滑动相关自干扰， $R_{d1}(f)$  可称为滑动相关自干扰频谱； $R_{d2}(f)$  为由加性噪声引起干扰  $r_{d2}(t)$  的频谱，故  $r_{d2}(t)$  可称为加性噪声干扰， $R_{d2}(f)$  可称为加性噪声干扰频谱。滑动自相关频谱可表示为

$$R_c(f) = \left(\frac{1}{N}\right)^2 \sum_{\substack{k_1 \in \mathbf{Z} \\ k_1 = -k_2}} \left\{ \delta\left[f - \left(\frac{f_1}{\gamma}\right)\frac{k_1}{N}\right] \text{sinc}^2\left(\frac{k_1}{N}\right) \times \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{m=0}^M \Gamma_m (z_N^u)_{n_1} e^{-\frac{j2\pi k_1}{N}(n_1 + \tau_m)} \times \sum_{n_2=0}^{N-1} (z_N^u)'_{n_2} e^{-\frac{j2\pi k_2 n_2}{N}} \right\} \quad (16)$$

滑动相关自干扰频谱可表示为

$$R_{d1}(f) = \left(\frac{1}{N}\right)^2 \sum_{\substack{k_1, k_2 \in \mathbf{Z} \\ k_1 \neq -k_2}} \left\{ \delta \left[ f - (f_1 - f_2) \cdot \frac{\gamma k_1 + (\gamma - 1)k_2}{N} \right] \times e^{-\frac{j\pi}{N}(k_1 + k_2)} \operatorname{sinc}\left(\frac{k_1}{N}\right) \times \operatorname{sinc}\left(\frac{k_2}{N}\right) \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{m=0}^M \Gamma_m(z_N^u)_{n_1} \times e^{-\frac{j2\pi k_1}{N}(n_1 + \tau_m)} \sum_{n_2=0}^{N-1} (z_N^u)'_{n_2} e^{-\frac{j2\pi k_2}{N}n_2} \right\} \quad (17)$$

式中： $\gamma/N$  为归一化滑动因子。图 1 表示了不同归一化滑动因子下的滑动自相关和滑动相关自干扰频谱，横轴表示归一化频率  $f/(f_1 - f_2)$ ，纵轴表示功率谱密度，W/Hz。由于滑动自相关频谱与归一化滑动因子无关，所以在图 1 中只对归一化滑动因子为一时的滑动自相关频谱做了标记。根据图 1 中 2 种不同归一化滑动因子下的滑动相关自干扰频谱可以得到：归一化滑动因子越小，滑动相关自干扰对滑动相关峰的干扰程度越大。

加性噪声干扰频谱可表示为

$$R_{d2}(f) = \left(\frac{1}{N}\right)^2 \sum_{k_1, k_2 \in \mathbf{Z}} \left\{ \delta \left[ f - (f_1 - f_2) \cdot \frac{\gamma k_1 + (\gamma - 1)k_2}{N} \right] \operatorname{sinc}\left(\frac{k_2}{N}\right) e^{-\frac{j\pi k_2}{N}} \cdot \sum_{n_1=0}^{N-1} \omega_{n_1} e^{-\frac{j2\pi k_1}{N}n_1} \sum_{n_2=0}^{N-1} (z_N^u)'_{n_2} e^{-\frac{j2\pi k_2}{N}n_2} \right\} \quad (18)$$

式中： $\omega_{n_1}$  为加性噪声  $\omega(t)$  中的第  $n_1$  项。图 2 表示了不同信噪比 SNR 下的滑动自相关和加性噪声干扰频谱。由于滑动自相关频谱与信噪比大小无关，所以在图 2 中只对信噪比为 10 dB 下的滑

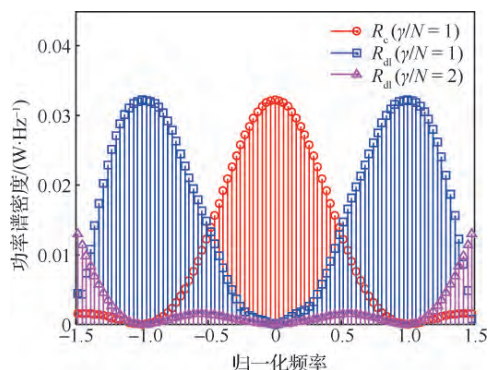


图 1 滑动相关自干扰对滑动自相关频谱的影响 ( $u = 1$ ,  $N = 31$ ,  $M = 0$ )

Fig. 1 Influence of sliding correlation self-interference on sliding autocorrelation spectrum ( $u = 1$ ,  $N = 31$ , and  $M = 0$ )

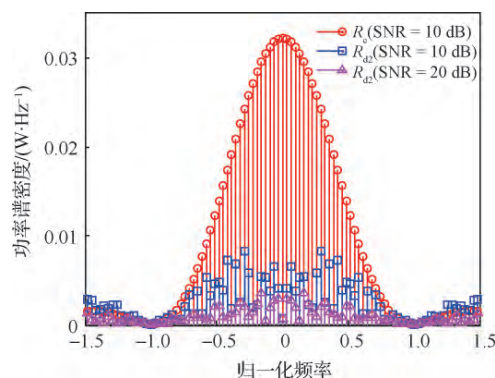


图 2 加性噪声干扰对滑动自相关频谱的影响 ( $u = 1$ ,  $N = 31$ ,  $M = 0$ )

Fig. 2 Influence of additive noise interference on sliding autocorrelation spectrum ( $u = 1$ ,  $N = 31$ , and  $M = 0$ )

动自相关频谱做了标记。根据图 2 中 2 种不同信噪比下的加性噪声干扰频谱可以得到：信噪比越小，加性噪声干扰对滑动相关峰的干扰程度越大。

根据式(16)和图 1 可知，滑动自相关频谱具有  $\operatorname{sinc}^2(k_1/N)$  的包络，即其能量主要集中在主瓣 ( $-|f_1/\gamma|, |f_1/\gamma|$ ) 内，那么为了尽可能消除滑动相关自干扰和加性噪声干扰对滑动相关峰的影响，低通滤波器的传输函数可表示为

$$H(f) = \epsilon(f + |f_1/\gamma|) - \epsilon(f - |f_1/\gamma|) \quad (19)$$

式中： $\epsilon(f)$  为阶跃函数。

### 3.2 平均动态范围

测量系统动态范围是用来衡量滑动相关器测量性能的重要指标，定义为滑动相关峰值与滑动相关最大干扰值的比<sup>[23]</sup>。根据第 2 节中式(10)，ZC 脉冲的自相关函数可表示为

$$R_z(t) = \left(1 + \frac{1}{N}\right) \left(1 - \frac{|t - nNT_c|}{T_c}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{t - nNT_c}{2T_c}\right) \quad (20)$$

式中： $R_z(t)$  表示周期为  $NT_c$  和宽度为  $2T_c$  的三角脉冲，不存在 PN 脉冲自相关函数的直流偏移，所以文献[21]中定义的 PN 序列滑动相关器动态范围不适用于 ZC 序列。

充分考虑 ZC 脉冲自相关特性和多径信道特性得到的平均动态范围可表示为

$$D_{ave} = \frac{\sum_{m=0}^M \operatorname{peak}_m |r_c(t) * h(t)|}{\max |r_{d1}(t) * h(t) + r_{d2}(t) * h(t)| (M+1)} \quad (21)$$

式中:  $\text{peak}_m |r_c(t) * h(t)|$  表示第  $m$  条多径传播路径的滑动相关峰的幅值,  $\max |r_{d1}(t) * h(t) + r_{d2}(t) * h(t)|$  表示经低通滤波后最大干扰的幅值, 且特别有  $\text{peak}_0 |r_c(t) * h(t)|$  表示直接传播路径的滑动相关峰的幅值。

#### 4 仿真结果

本节所有仿真中都有  $f \in (-3f_1, 3f_1)$ , 每条多径传播路径相对于直接传播路径时延已知, 即不考虑滑动相关峰的判断, 且信道参数在长度为  $N$  的测量脉冲块中不变。此外, 为了能更真实反应滑动相关器在航空遥测信道的测量性能, 依据文献[14]关于实测航空遥测信道的统计描述来设置信道参数, 具体设置如下: 多径传播路径总数  $M$  为 2, 且分别来自平坦反射面和粗糙反射面; 平坦反射面的第 1 条较大多径衰减增益  $\Gamma_1$  随机取值于 0.7 和 0.96 之间, 对应的较小时延  $\tau_1$  随  $\Gamma_1$  的变化取值于  $1/f_1$  和  $8/f_1$  之间; 粗糙反射面的第 2 条较小多径衰减增益  $\Gamma_2$  服从复高斯分布, 且实部和虚部是服从均值为 0、方差为  $1.6 \times 10^{-3}$  的高斯分布, 对应的较大时延  $\tau_2$  为服从  $U(12/f_1, 19/f_1)$  的均匀分布。

**仿真 1** 通过对 ZC 序列所有可取根进行遍历来分析基于 ZC 序列滑动相关器的测量性能。图 3 为 200 次蒙特卡洛仿真结果, 其中信噪比取 10 dB, 序列长度分别取 31、63 和 127, 实线条表示所有可取根中测量性能最差的, 虚线条表示所有可取根中测量性能最好的。从仿真结果可以看出, 在相同序列长度下, 最好和最差测量性能的最大差距约 0.2 dB, 即不同根对测量性能的影响不大, 可以忽略, 所以为了便于分析, 以下所有仿真中 ZC 序列的根均取 1。

**仿真 2** 从归一化滑动因子角度分析 PN 和 ZC 这 2 种序列在航空遥测信道测量系统中的测量性能。图 4 为 200 次蒙特卡洛仿真结果, 其中信噪比取 10 dB, 序列长度分别取 31、63 和 127。首先平均动态范围随归一化滑动因子的增加而增加, 说明滑动相关自干扰对滑动相关峰的干扰程度随归一化滑动因子的增加而减小。其次, 在较小归一化滑动因子时, 本文提出滑动相关器的平均动态范围较小, 且归一化滑动因子大于 2 时的

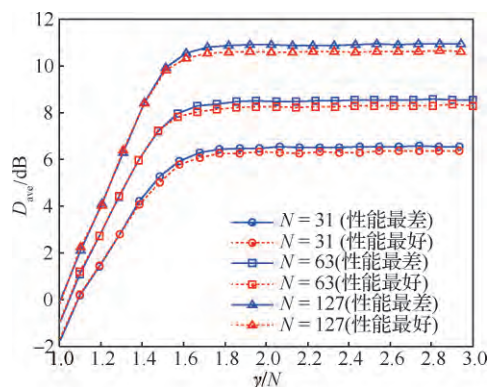


图 3 不同 ZC 序列根下的平均动态范围

Fig. 3 Average dynamic range with different ZC sequence roots

平均动态范围提高约 2 dB, 说明滑动相关峰在较小归一化滑动因子时的主要干扰因素是滑动相关自干扰, ZC 序列对滑动相关自干扰比较敏感。最后在归一化滑动因子大于 2 时, 平均动态范围基本不再发生改变, 说明此时滑动相关本身干扰可以忽略。

**仿真 3** 从信噪比角度分析 PN 和 ZC 2 种序列在航空遥测信道测量系统中的测量性能。图 5 为 200 次蒙特卡洛仿真结果, 其中归一化滑动因子分别取 1、2、3 和 4, 序列长度为 63。首先平均动态范围随信噪比的增加而增加, 说明加性噪声对滑动相关峰的干扰程度随信噪比的增加而减少。其次, 在较大归一化滑动因子时, 本文提出滑动相关器的平均动态范围较大, 且归一化滑动因子大于 2 时的平均动态范围至少提高 2 dB, 说明滑动相关峰在较大归一化滑动因子时的主要干扰因素是加性噪声干扰, ZC 序列对加性噪声干扰的抵抗能力更强。最后在对应该信噪比和归一化滑动因子大于 2 时, 平均动态范围基本不再发生改变, 可以认为此时只存在加性噪声干扰。

**仿真 4** 从序列长度角度分析 PN 和 ZC 2 种序列在航空遥测信道测量系统中的测量性能。图 6 为 200 次蒙特卡洛仿真结果, 其中归一化滑动因子分别取 1、2、3 和 4, 信噪比取 10 dB。首先平均动态范围随序列长度  $N$  的增加而增加, 说明滑动相关自干扰和加性噪声干扰对滑动相关峰的干扰程度随序列长度的增加而减少。其次, 在较大归一化滑动因子时, 本文提出滑动相关器的平均动态范围较大, 且归一化滑动因子大于 2 时的