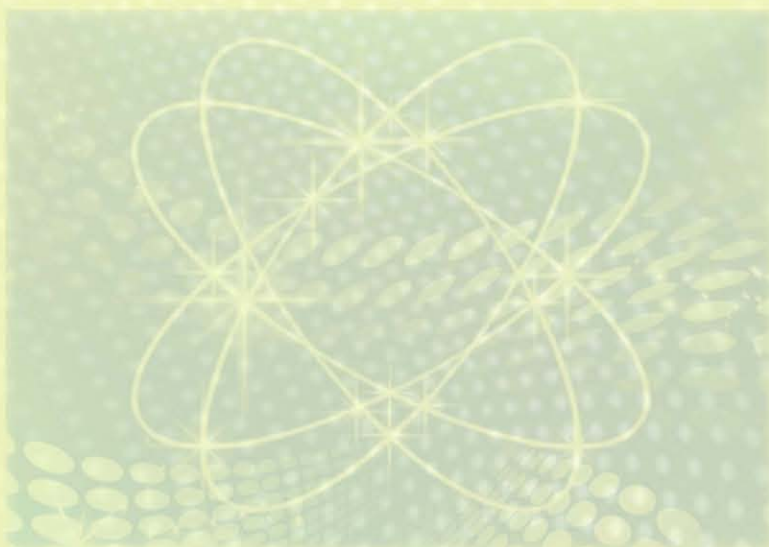


2014年全国博士生学术论坛 (信息与电子技术) 论文集

主编 胡程



北京理工大学出版社

2014 年全国博士生学术论坛 (信息与电子技术) 论文集

主 编 胡 程

副主编 费泽松 崔 嵬

大会组织机构

大会顾问

毛二可（北京理工大学） 中国工程院院士
张军（北京航空航天大学） 中国工程院院士
匡镜明（北京理工大学） 教授

大会主席

徐晓文（北京理工大学） 信息与电子学院副院长 教授

大会副主席

章正宇（中国电子学会青年工作委员会主任） 研究员
毋立芳（中国电子学会青年工作委员会秘书长） 教授
葛宁（清华大学） 教授

程序委员会

主 席
胡程（北京理工大学） 教授
副主席
崔崑（北京理工大学） 教授
桑新柱（北京邮电大学） 教授

组织委员会

主 席
费泽松（北京理工大学） 教授
副主席
杨小鹏（北京理工大学） 副教授

程序委员会成员

刘荣科（北京航空航天大学） 教授
郑铮（北京航空航天大学） 教授
解伟（国家广电总局广科院电视技术研究所） 教授级高工
王从思（西安电子科技大学） 教授
曾涛（北京理工大学） 教授
许稼（北京理工大学） 教授
关键（海军航空工程学院） 教授
王彦平（中科院电子所） 研究员

张莹（仪器仪表学报） 副总编辑
阮建强（北大方正集团技术管理部） 副总经理
万蕾（华为技术有限公司） 无线标准部部长
杨光（中国移动集团有限公司研究院） 无线所副所长
张海燕（国家天文台） 副研究员
殷云志（中国电子科技集团公司 54 所信息中心） 副研究员
汪林（总参某所） 高级工程师
刘继桥（中科院上海光机所） 副研究员
朱宇（航天五院总体部） 高级工程师

组织委员会成员

胡卫东（北京理工大学） 副教授
傅雄军（北京理工大学） 副教授
邢成文（北京理工大学） 副教授
武楠（北京理工大学） 副教授
金城（北京理工大学） 副教授
邓宸伟（北京理工大学） 副教授
桂小琰（北京理工大学） 副教授
刘墉（北京理工大学） 副教授
张峰（北京理工大学） 副教授
丁泽刚（北京理工大学） 副教授
刘泉华（北京理工大学） 讲师
张磊（北京理工大学） 讲师
刘飞峰（北京理工大学） 讲师
董锡超（北京理工大学） 博士后
田静（北京理工大学） 博士后

秘书组成员

哈楠
王润怡
李丁一
李梦源
郭大路
王晓宇

目 录

一种基于 FFT 的直扩信号频率域并行捕获算法	
地基成像雷达干涉相位滤波算法比较	
临近空间浮空器囊体温度监测与预测技术	
战场电磁态势可视化系统研究	
基于贝叶斯网络与理想点贴近度的雷达辐射源威胁等级判断方法	
一种改进的双门限窄带干扰抑制算法	
基于知识库的验证码在线识别的设计与实现	
基于 MIDAS 的机车配件检修管理系统的研究与实现	
一种基于四面体场景剖分的三维射线追踪算法	
采用小区范围扩张与干扰对齐的异构网络性能分析	
BOC(m, n) 信号中一种新型无模糊算法	
一种基于 Chirp Scaling 的改进 SPECAN 算法	
多频干涉 SAR 系统频点组合选择方法	
张量分解在音频分类中的应用	
G. 719 音频编码器的改进	
Joint Channel Estimation and LMMSE SISO Equalization via Variational Optimization Method	
基于波束形成的阵列成像及其性能分析	
基于 LFM 和 MSK 的一体化波形通信性能分析	
基于位置信息相关的高分辨雷达目标信号检测方法设计与实现	
低 SNR 下基于 MUSIC 的分布式全相参雷达相参参数估计方法	
Cooperative Outlier Detection for Location-aware Wireless Networks	
高分辨雷达扩展目标双极化检测分割方法	
机载侧视阵列 3D SAR 成像分析	
基于一发双收几何配置的 FSR 目标跟踪	
大量程低误差 CMOS 温度传感器电路设计	
RSSI 位置指纹定位特性与校正模型及匹配算法关系的研究	
基于 CS 的相控阵雷达低空风切变风速估计	
一种基于码环辅助的 GNSS 信号相位锁定环路	
一种基于最小残差的改进子空间追踪算法	
D2D 网络中基于合理资源复用的干扰协调方案研究	
Kalman 滤波在多系统兼容 GNSS 接收机中的设计与研究	
一种应用于 32 位通用处理器的低功耗 SAR ADC 设计	
GPS L1C 导航电文帧同步方法及性能研究	

Physical Layer Network Coding

机载振动对共形阵列天线电性能的影响

钎焊中空洞对微波信号传输性能的影响

OFDM Based Link Level Transmission Strategy for Mobile Satellite Communication

基于稀疏加权重构的互耦阵列方位估计算法

基于半实物平台的功率放大器预失真技术研究

基于多相位屏理论的电离层闪烁对 GEO SAR 成像影响分析

基于子图相干合成的地基 SAR 快速成像方法

基于高阶累积量与稀疏表示的双基地 MIMO 雷达 DOD 和 DOA 估计

采用并行架构的说话人识别系统

A Novel Two-branch Predistortion Linearizer of Ku-Band TWTA in Communication Applications

连续波相控阵雷达相位噪声测量与分析

Recipe Recommendation Based Weighted Integration of Ingredients

一种高增益低旁瓣毫米波微带天线阵设计

三种分布式协同估计算法的比较研究

换流站通信机房动力环境监控系统的设计与实现

基于稀疏时频分析—霍夫变换的编队架次识别

基于运动矢量和率失真值的快速 HEVC 算法

一种基于稀疏恢复的空时信号新模型

为地球同步轨道卫星提供服务的地面无线电导航系统

导引头基于改进 WHT 的多分量 LFM 信号检测

基于 CMOS 工艺的跨导—电容中频滤波器设计

2~14 GHz 四脊喇叭的研究

基于 CMOS 工艺的变压器匹配方法及其 MATLAB 实现

一种基于 TSMC 90 nm 工艺的栅氧反熔丝 OTP ROM 阵列

基于压缩感知的油井数据压缩与重构算法

交通领域的中文口语句子边界检测

基于 PGA 算法的电离层闪烁补偿技术

Analyze of Fishery VHF Channel in Multi-users and Complex Environment

卫星导航接收机双频载波相位差分定位算法的研究与仿真

基于毫米波雷达系统的昆虫 RCS 测量与迁飞监测

A Weak Target Detection Method Based on Space-based Passive Radar

一种新的高动态直扩信号跟踪算法

一种稀疏信号傅里叶变换的快速算法

基于双基地雷达的欺骗干扰能力分析

Air-ground Target Classification Method Based on Road Information and Target Track

宽带频率源通用显控工装设计及实现

基于 LabVIEW 的单通道温度监测系统的设计与实现

The Design and Implementation of UAT Mode Receiver for ADS-B System

基于 RF MEMS 技术的微波带通滤波器设计

Image Encryption Based on the Iterative Fractional Fourier Transform and the Pixel Scrambling Technique

基于随机分数变换的双图加密算法研究

Convolution and Correlation in Algebraic Signal Processing Theory

基于 P-M 去噪模型扩散系数的改进方法

基于 OFDM-LFM 的多通道雷达通信一体化信号性能分析

Eigen-Direction Alignment Design for Multi-Cell MIMO Systems under Uplink Transmission

QoE-Driven Iterative Resource Allocation for Multi-Applications in Perturbed Triangular Lattice

一种高动态 GPS 接收机失锁重捕快速定位的方法

基于包络粗对齐和截取 FFT 的长时间相参积累方法

雷达目标模拟器中的宽带射频接收系统研究

一种空间信息网体系结构及优化路由协议

导电聚合物阴极电解质钽电容器的失效分析

地球同步轨道合成孔径雷达干涉系统基线设计方法

电子商务环境下的农产品信任评价模型研究

基于子带加窗的调频步进频雷达波形设计方法研究

基于非均匀傅里叶变换的调频步进频匹配滤波成像方法

GEO SAR 电离层 TEC 反演及其对成像的影响

毫米波 SAR 子孔径成像算法分析

数据库安全检测评价方法综述

基于高斯近似的低密度格码译码算法研究

一种基于 DRFM 的多普勒信号生成方法

基于互相关的分布式全相参雷达相参效率估计方法

变极化雷达角闪烁抑制技术研究

辐射计自动化测试系统

共形相控阵天线方向图综合及优化设计

基于 LBIST 的 PCIE 2.0 物理层测试系统设计与实现

基于 RapidIO 流量控制和错误管理的 Buffer 层设计

基于软件实现的双频降水雷达波束匹配技术

气象雷达信号检测及其灵敏度分析方法

数字射频信号处理模块的设计与应用

星载雷达天线方向图自动化测试技术

一种 W 波段低剖反射面天线

一种增强 RRAM 可靠性的低功耗动态重编程方法

Design of Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Application

星载 SAR LBE_Mosaic 模式研究

基于 D-S 证据理论的组网雷达目标属性融合方法

雷达软件测试平台技术研究与工程实践

基于凸壳技术的目标轮廓构建及瞄准点选择

嵌入式实时数据库无损压缩算法的研究与设计

基于灰度图像引导滤波的图像快速去雾方法

基于结构森林的电力设施边缘检测方法

基于大数据的 IETM 用户检索行为研究

导引头陀螺零位漂移对末制导性能的影响研究

低温相机红外探测器及其测试技术

北斗与无线传感器网络融合技术在应急救援中的应用

未来移动通信

以客户体验为核心，提升和优化 4G 网络

Swarm Intelligence: Fundamental Principles and Optimization Approaches

Eigenanalysis-Based Adaptive Interference Suppression and Its Application in Acoustic Source Range Estimation

基于 MSER 准则的自适应 Reduced-Rank 波束成形接收机在大规模天线阵列系统中的应用

导航矢量接收技术及其在深空导航的应用前景

多载波 OFDM 系统物理层安全波形设计

目标探测与波束形成

一种波束域超低副瓣 ADBF 算法研究

基于主成分分析的窄带雷达信号噪声抑制算法

机载预警雷达空时自适应处理技术新进展

参数化稀疏表征及其在雷达探测中的应用

天波超视距 MIMO 雷达：信号模型与目标检测

Space-Frequency Processing in the Multiple Frequencies HFSWR

航天电子系统设计及关键技术

DS/FH 扩频测控信号同步方法研究

一种 MIMO 雷达正交波形多目标优化方法

硅基毫米波相控阵雷达前端集成芯片技术

基于全阵未知互耦补偿的波达方向估计算法

一种数字锁频环及其 Z 域稳态性能分析

基于神经网络联邦滤波融合的组合导航方法

Human-centric Multimedia Processing

视觉注意机制：原理以及应用

能量优化及其在视觉计算中的应用

压缩感知在天文观测数据成像处理中的应用

Data Mining for 3D Image Quality Assessment

显著性计算方法及问题初探

IP Watermarking Technique Based on Overflows

合成孔径雷达数据处理

人体表面微波成像安全检测技术研究

地球同步轨道合成孔径雷达卫星发展概况

Research on Angle Measurement Method of Monopulse SAR

高分辨机载 SAR 实时成像系统

一种基于星载雷达探测的定位新方法

基于块排序和联立稀疏表达的极化 SAR 图像滤波

Microwave Technologies and Computational Electromagnetics

A Polarized Reconfigurable Opening Annular Ring Slot Antenna

Adaptive Multi-Resolution Composite Array for Wide Angle High Resolution Digital Beamforming

Research on 3D Frequency Selective Resorber

Equivalent Circuit Models of a Lossy MIM Multiple Teeth-Shape Filter

Simultaneous Reconstruction of the PEC and Dielectric Scatterers via Inverse Scattering Method

基于匹配追踪 MUSIC 的高分辨 DOA 估计

面向感知增强的多媒体信号处理

虚拟现实中的三维音频技术

具有选择注意机制的语音拾取

一种用于韵律建模的长时基音频率参数提取方法

音频编码标准发展现状及趋势

多声道 3D 音频系统及多视点视频编码

60 GHz 芯片间无线互连通信机制研究

目标信息提取及前端系统

基于反射面天线的被动毫米波成像技术

雷达目标微多普勒特征提取

太赫兹雷达探测空间碎片技术研究

基于圆形 Eleven 馈源的超宽带低温射电望远镜前端系统

星载 SAR 滑动聚束模式方位模糊度研究

超宽带雷达三维成像技术研究

通信信号处理

Implementaion of a Low Cost MIMO RF Transceiver for LTE Femto Base Station

弹性波近似定向斗篷散射效应的 FRFT 分析

针对室内 TOA 人员定位的信道建模与性能评估

Performance Analysis for Cognitive Two-Way Relay Network

A Tractable Model for Device-to-Device Communication Underlying Multi-Cell Cellular Networks

Bi-Channel-Connected Topology Control in Cognitive Radio Networks

一种基于 FFT 的直扩信号频率域并行捕获算法

庄 婷 刘 俭 丁建松 崔 巍

北京理工大学信息与电子学院 北京 100081

摘要：信号捕获是实现无线电测距测速系统功能的关键技术。本文通过对低信噪比情况下直接序列扩频信号捕获算法的研究，分析与比较不同捕获算法的捕获性能，并给出了一种基于 FFT 的频率域并行捕获算法。本文对该算法的具体实现过程进行介绍，并对该算法的伪码相位预测精度、载波多普勒频率预测精度、检测概率与虚警概率进行分析。结果表明，该算法在虚警概率小于 10^{-6} ，载噪比为 38 dB-Hz 时对目标速度和距离的检测概率大于 80%。

关键词：捕获 直接序列扩频 伪码 多普勒 快速傅里叶变换 (FFT)

中图分类号：TP391

A FFT-based DS-SS Signal Parallel Acquisition Algorithm in Frequency Domain

Zhuang Ting Liu Jian Ding Jiansong Cui Wei

*School of Information and Electronics Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081*

Abstract: Signal acquisition is the key technology for radio ranging system. By the study of signal acquisition algorithm under low SNR, this paper will analyze and compare the performance of different signal acquisition algorithm, then propose the FFT-based parallel acquisition algorithm in frequency domain. Implementation process is given in this paper. And this paper analysis prediction accuracy of Pseudo-code phase, prediction accuracy of Carrier Doppler frequency, acquisition time, Detection probability and Probability of false alarm. The results show that the algorithm can achieve detection of the target's speed and distance when the carrier-to-noise ratio is 38 dB-Hz. Under the premise that the false alarm probability is less than 10^{-6} , the detection probability can reach more than 80%.

Key words: Acquisition Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) Pseudo-random code Doppler Fast Fourier Transform (FFT)

1 引言

随着我国航天工程技术的不断发展，高精度的无线电测距技术在卫星应用、载人航天、深空探测等领域的应用也越来越广泛，已经成为这些领域的重要技术手段。无线电测距通常采用直接序列扩频通信系统，在发射端用高速率的伪码与待传输的通信伪码相乘后，对载波进行调制，从而扩展载波信号的频谱，将调制后的信号进行射频调制后发送出去；而在接收端，再用相同的伪码序列去进行解扩，把展宽的扩频信号还原成原始的信息。

在直扩系统中，要正确进行解扩，必须进行伪码同步，即在接收端产生一个与发送端伪码同步的伪码序列，并能够同步跟随发送端伪码的变化而变化。由于发射端和接收端存在相对运动，会产生多普勒

频移, 因此, 为了完成对接收信号的解调, 还必须搜索到发送端所产生的多普勒频移, 该过程叫载波捕获。伪码同步和载波捕获是信号捕获的核心目的, 通过伪码相位可以获得目标距离的信息, 通过多普勒频率可以获得目标速度的信息。

直接序列扩频信号的捕获按其实现方式可分为串行捕获算法、并行捕获算法以及串-并结合的捕获算法。串行捕获算法实现简单但捕获时间长, 并行捕获算法捕获速度快却需要大量的硬件资源, 串-并结合捕获算法结合了二者的优缺点。滑动相关捕获法是串行搜索算法的一种。该算法连续地搜索所有可能的码相位和多普勒频率, 直到确认找到了正确的码相位和多普勒频率。伪码匹配滤波器捕获算法是在串行搜索捕获算法基础上, 用匹配滤波器来代替串行捕获算法中所使用的接收信号与本地伪码相乘再积分的结构。本文将提出一种基于 FFT 的频域并行捕获算法, 该算法可一次性完成全频率域搜索, 即使在多普勒频偏较大情况下也可快速完成直扩信号的捕获, 同时, 采用部分匹配滤波器 (PMF) 来完成伪码的部分并行捕获, 实现载波并行、伪码串行 (部分并行) 的直扩信号快速捕获。

2 基于 FFT 的频率域并行捕获算原理

基于 FFT 的频率域并行捕获算法的原理图见图 1。图 1 相当于中频信号接收机的前端处理部分, 经过按照该算法设计的电路可以实现对多普勒频率和伪码相位的快速估计。

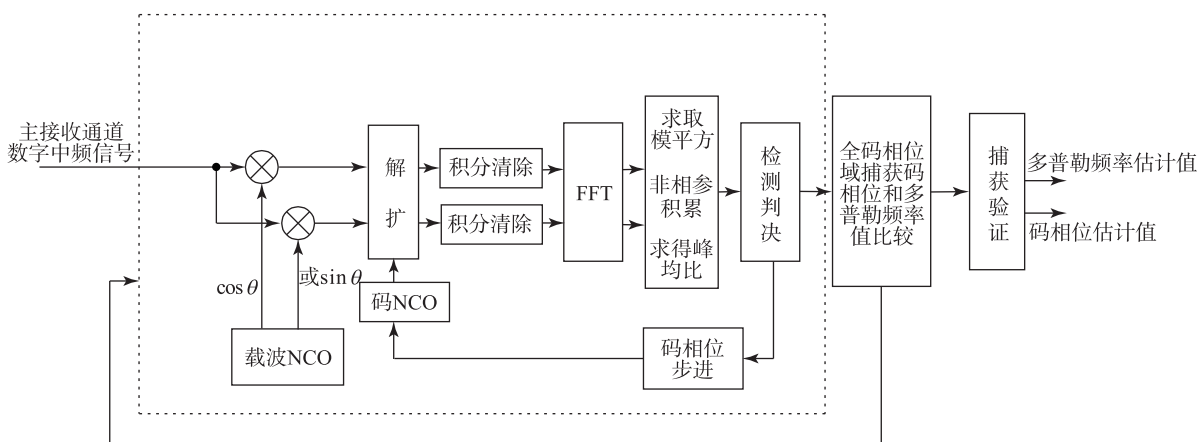


图 1 基于 FFT 的频率域并行捕获算法原理图

基于 FFT 的频率域并行捕获算法的原理简述如下:

设在采样时刻 t_k 的接收信号采样值为

$$s(k) = \sqrt{2P_s} d(t_k) PN(t_k + \tau) \cos(\omega_l t_k + \omega_d t_k + \varphi) + n(t_k) \quad (1)$$

其中, P_s 为接收信号功率; $t_k = k \cdot t_s$, t_s 为采样时间间隔; $d(t_k)$ 为调制数据; $PN(t_k + \tau)$ 为带有延时量 τ 的伪码; ω_l 为中频频率; ω_d 为载波多普勒频率; $n(t_k)$ 为噪声。

将预定积分时间 (1 ms) 内的数据分成 P 段, 每段 L 点数据, 经过下变频和 L 点部分相关, 得到 I 、 Q 两路信号为

$$\begin{aligned} I(n) &= \sum_{k=nL}^{(n+1)L-1} \frac{\sqrt{2P_s}}{2} d(t_k) PN(t_k + \tau) PN(t_k + \hat{\tau}) \cos(\omega_d t_k + \varphi) + n_I(t_k) \\ &= \frac{\sqrt{2P_s}}{2} d(t_n) \cdot R(\tau - \hat{\tau}) \cdot \frac{\sin(\pi f_d t_L)}{\sin(\pi f_d t_s)} \cdot \cos(\omega_d t_n + \varphi) + n_I(n) \\ &\quad (n = 0, 1, \dots, P-1) \\ Q(n) &= \sum_{k=nL}^{(n+1)L-1} \frac{\sqrt{2P_s}}{2} d(t_k) PN(t_k + \tau) PN(t_k + \hat{\tau}) \sin(\omega_d t_k + \varphi) + n_Q(t_k) \end{aligned} \quad (2)$$

$$= \frac{\sqrt{2P_s}}{2} d(t_n) \cdot R(\tau - \hat{\tau}) \cdot \frac{\sin(\pi f_d t_L)}{\sin(\pi f_d t_s)} \cdot \sin(\omega_d t_n + \varphi) + n_Q(n)$$

$$(n = 0, 1, \dots, P-1) \quad (3)$$

式中, $\hat{\tau}$ 为伪码延时估计; $R(\tau - \hat{\tau})$ 为伪码的部分相关结果; $t_n = n \cdot t_L$ 为总积分时间, $t_L = L \cdot t_s$ 为 L 点积分时间。

对 $z(n) = I(n) + jQ(n)$ 进行 $N(N \geq P)$ 点的 FFT 运算:

$$Z(k) = \text{FFT}\{z(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$$

$$= \frac{\sqrt{2P_s}}{2} \cdot R(\tau - \hat{\tau}) \cdot \frac{\sin(\pi f_d t_L)}{\sin(\pi f_d t_s)} \cdot e^{j\varphi} \cdot \frac{\sin(\pi f_d t_L P - k\pi P/N)}{\sin(\pi f_d t_L - k\pi/N)} \cdot D(k) + N(k)$$

$$(k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (4)$$

若不计调制数据频谱 $D(k)$ 及噪声 $N(k)$ 的影响, 由式 (4) 可知, 当本地伪码与接收伪码相位对齐, 即 $\tau = \hat{\tau}$ 时, $R(\tau - \hat{\tau})$ 最大, 此时若 $k = N t_L \cdot f_d$, $Z(k)$ 的模可取得最大值。因而, 可通过检测 FFT 频谱分析的峰值, 经过检测判决逻辑后, 得到多普勒频率估计值:

$$\hat{f}_d = \frac{k_{Z_{\max}}}{N t_L} \quad (5)$$

式中, $k_{Z_{\max}}$ 为 FFT 峰值对应的 k 值。从而得到了伪码相位估计值 $\hat{\tau}$ 和多普勒频率估计值 $\hat{f}_d$ 。

对 FFT 计算结果的模平方值进行非相参积累后进行恒虚警检测, 当判决有信号存在时, 记录此时峰均比及捕获结果, 进行码相位步进, 当判决无信号存在时, 同样进行码相位步进, 在下一个搜索码相位上重复上述过程, 直至全部码相位搜索完毕, 找出最大峰均比对应的搜索码相位及多普勒频率即为捕获结果。

以下是算法的工作过程:

①产生本地解扩伪码。

主接收通道数字中频信号中调制的测距伪码和通信伪码是码速率为 $f_c = 8.59 \times 10^6$ Hz, 码长 $N = 8191$, 周期为 1 ms 的 Gold 码。发射的射频信号的调制方式为 QPSK。

②产生调制了伪码的中频接收信号。

设计算法参数包括: 射频信号频率 f_0 , 采样频率 f_s , A/D 采样后的中频信号频率 f_{if} ; 设计仿真参数包括: 多普勒频率 f_d , 信号载噪比 CNR, 接收信号初始码相位, 高斯白噪声功率谱密度 n_0 (为后续仿真方便建议设为 1), 信号带宽 $2f_c$, 单次完整检测耗时 10 个单位周期时间。

③用本地载波对接收信号进行数字下变频处理。

④用多路具有不同码相位的本地码对接收信号进行并行解扩, 这是该算法实现伪码部分并行搜索的关键, 也是该算法的创新点之一。

⑤对积分清除结果进行 FFT 运算, 对结果的模平方进行非相参积累得到峰均比。设上一步设部分相关时间为 t_L , 码周期 $T = 1$ ms, 则 $M = T/t_L$ 。若 M 不是 2 的整数次幂, 对数据进行补零后做 FFT。对原始采样点进行补零处理还可有效减小 FFT 带来的栅栏效应对信号信噪比的损失。

⑥峰均比选大。重复以上完成全码相位域的搜索。

3 仿真分析

由 $f_d \times t \times \frac{1}{f_0 \times T_s} \times NCO$ 计算可得相邻两次捕获之间的码字差。多普勒频率精度为 1/2 的频率步进值,

码相位精度为 1/2 码片。仿真图如图 2 所示。

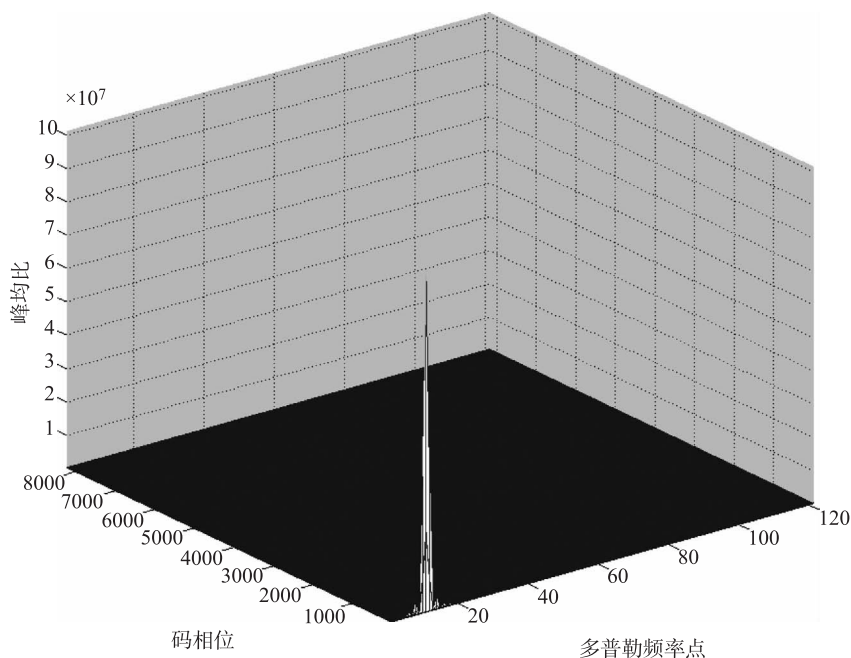


图2 捕获算法仿真图

按照第2节中的工作过程进行 MATLAB 仿真，定义捕获性能 = (总捕获次数/仿真次数) × 100%，得到的部分仿真结果如下。

仿真1： $f_d = 1\ 000\ \text{Hz}$ ，接收信号伪码相位 $\text{acq_code} = 10$ 采样点， $\text{CNR} = 38\ \text{dB} - \text{Hz}$ ，捕获结果见表1。捕获性能 100%，表中捕获多普勒频率单位为 Hz，捕获码相位和相邻两次捕获码相位单位为采样点。

表1 仿真1结果

捕获次数	峰均比最大值	捕获多普勒频率	捕获码相位	相邻两次捕获码相位差值
1	8.291 722	1 000	62 532	—
2	6.616 364	1 000	60	28
3	5.183 726	1 000	84	24
4	5.695 525	1 000	112	28
5	7.367 165	1 000	140	28
6	7.470 335	1 000	168	28
7	4.347 328	1 000	196	28
8	5.535 617	1 000	220	24
9	6.325 887	1 000	248	28
10	6.590 834	1 000	276	28

结论：理论上相邻两次捕获之间的码字差 ≈ 33.90 个采样点，捕获结果符合设计要求。

仿真2： $f_d = 29\ 750\ \text{Hz}$ ，接收信号伪码相位 $\text{acq_code} = 12$ 采样点， $\text{CNR} = 40\ \text{dB} - \text{Hz}$ ，捕获结果见表2。捕获性能 100%，表中捕获多普勒频率单位为 Hz，捕获码相位和相邻两次捕获码相位单位为采样点。

表 2 仿真 2 结果

捕获次数	峰均比最大值	捕获多普勒频率	捕获码相位	相邻两次捕获码相位差值
1	7.544 151	30 000	656	—
2	5.632 514	30 000	1 460	804
3	5.497 920	30 000	2 268	808
4	7.560 693	30 000	3 076	808
5	5.984 440	30 000	3 884	808
6	7.145 023	29 500	4 688	804
7	6.529 227	30 000	5 496	808
8	6.833 241	30 000	6 304	808
9	5.921 279	29 500	7 108	804
10	4.116 889	30 000	7 916	808

结论：理论上相邻两次捕获之间的码字差 ≈ 806.896 个采样点，804 和 808 均在误差范围内，故捕获结果符合设计要求。

4 检测判决方法

直扩信号捕获过程实际上是多普勒频率域上和码相位域上的二维搜索过程，等效于一个二元假设检验问题。根据门限确定方法，可以将直扩信号捕获过程检测方法分为固定门限检测和恒虚警检测两种。恒虚警检测通过动态调节检测门限来保证虚警概率恒定，可有效解决固定门限检测法无法适应信号动态变化的问题。本算法中将 FFT 模平方结果经过 8 次非相干积累后，选出最大值作为信号，而将除信号外的其他值作为噪声基底，从而求出此时的峰均比；在一定虚警概率下求出对应的门限，将峰均比与门限进行比较，从而实现恒虚警检测。

常见的直扩信号捕获判决策略有：单次判决、 M/N 判决， $(1 + M/N)$ 判决和 Tong 判决算法。本算法中采用唐判决算法进行判决，表 3 是对唐判决方法检测概率的仿真结果。

载噪比：38 dB - Hz，非相干积累次数：8 次，虚警概率： 10^{-6} ，每次仿真进行 10 000 次后进行统计。

表 3 唐判决下不同载噪比下的检测概率

载噪比/dB - Hz	检测概率 $P_d/\%$
39	100
38	100
37	90
36	50
35	24
34	20

经过多次仿真后发现，多普勒频率在（-30 KHz，30 KHz）范围内变化时，该算法均能实现对载波多普勒和伪码相位的快速、准确的捕获。采用唐判决检测方法可有效降低算法的捕获灵敏度。通过设置不同的检测门限和判决策略，可以得到多次仿真情况下的总的检测概率和虚警概率，发现该算法在虚警概率小于 10^{-6} ，载噪比为 38 dB - Hz 时对目标速度和距离的检测概率大于 80%。

5 结 束 语

本文提出了一种基于 FFT 的频率域并行捕获算法。该算法通过 FFT 可实现一次性完成全频率域搜索,即使在多普勒频偏较大情况下,也可快速完成直扩信号多普勒频率的捕获;同时,采用部分匹配滤波器(PMF)来实现对伪码的部分并行捕获,最终完成无线电测距系统中的直扩信号的快速捕获。该算法在信号载噪比为 38 dB-Hz 时性能良好,能够在虚警概率小于 10^{-6} 时使得信号检测概率达到 80% 以上。该算法对于雷达信号处理中接收机设计有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 刘焕淋,向劲松,代少升. 扩展频谱通信 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2008.
- [2] 田日才. 扩频通信 [M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 冯永新,刘芳,潘高峰. 直接序列扩频信号同步新机理 [M]. 北京:国防工业出版社,2011. 11.
- [4] 李俊生. 伪码测距算法研究与仿真 [D]. 安徽:国防科学技术大学. 2006.
- [5] 柏翰. 基于 CCSDS 的深空测控伪码同步技术与硬件实现 [D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [6] 王永庆,高磊,吴嗣亮. 大动态直扩信号的快速捕获方法 [J]. 北京理工大学学报,2010.
- [7] 董智红,吴嗣亮. 大多普勒频偏下直接序列扩频信号捕获新方法 [J]. 系统工程与电子技术,2008.
- [8] 王君,安建平,宋淑娟. 一种新的高动态直扩接收机快速码捕获方法 [J]. 北京理工大学学报,2004.

作 者 简 介

庄婷 (1992.5—),女,江苏,硕士研究生,主要研究方向为空间合作目标雷达探测与定位。电话:18610482916。E-mail: zhuangting53@126.com。

刘俭 (1989.12—),男,山东,硕士研究生,主要研究方向为空间合作目标雷达探测与定位。

崔巍 (1976.10—),男,内蒙古,教授,博士生导师,主要研究方向为空间合作/非合作目标雷达探测与定位、信号处理理论与应用。

地基成像雷达干涉相位滤波算法比较

黄增树¹ 谭维贤² 孙进平¹ 袁运能¹

1. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083

2. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190

摘要：地基雷达进行干涉测量过程中，为了获得较高的图像质量和满足相位解缠的需要，往往要对干涉相位进行滤波，以提高干涉相位图的信噪比，减少干涉相位图中的残差点，从而有助于更好地进行相位解缠，提高形变反演的精度与可行性。本文针对地基成像雷达图像分辨率空变等特性，对基于梯度的自适应干涉相位滤波和基于相关系数的 Goldstein 自适应干涉相位滤波算法进行了研究，并对地基成像雷达的真实干涉数据给出了四种滤波结果，以便对每种滤波算法进行比较评估。

关键词：地基雷达 干涉相位滤波 信噪比 相位解缠

中图分类号：TP75

Abstract: In the ground-based radar interferometric process, in order to obtain high image quality and satisfy the phase unwrapping needs, We always need to filter the interferometric phases so that we can improve the signal to noise ratio of the image and reduce the residuals of interferometric phases, which contributes to a better phase unwrapping, thereby improving the accuracy and feasibility of deformation inversion. For ground-based radar image resolution Spatial variation and other characteristics, we discussed the interferometric phase filtering algorithms: gradient-based adaptive interferometric phase filtering and Goldstein adaptive interferometric phase filtering based on correlation coefficients in this paper, and the four filtering results of the real ground-based radar interferometry data were given, so that we can compare and evaluate the various filtering algorithms.

Key words: Ground-based radar Interferometric phase filtering Signal to noise ratio Phase unwrapping

1 引言

自然地质作用引起的滑坡、泥石流等地质灾害以及人为因素引起的桥梁、大坝、建筑的形变严重危害着人们的人身安全和财产安全^[1]。地基成像雷达尤其是以地基 SAR 干涉技术为代表的微波遥感测量方式能够进行连续平面测量，通过雷达干涉相位图提取监测目标的形变值及总体形变特征，并且具有全天时、全天候工作，零基线测量等优点^[2]，在形变监测方面具有很好的应用前景。由于地基成像雷达原始干涉相位图中存在着大量的相位噪声，会严重影响相位解缠和形变反演的精度，因此，干涉相位滤波在形变反演数据处理过程中十分重要^[3]。

雷达干涉相位图的滤波方法有很多种，本文将分别对基于梯度的自适应滤波、基于相关系数的 Goldstein 自适应滤波进行讨论。并使用包括这两种滤波方法在内的几种雷达干涉相位滤波算法对实测的山体边坡干涉数据进行滤波处理，通过分析各种算法的滤波结果，计算经过各种滤波后的相位残差点个数、图像边缘保持指数，评估各种滤波方法的优劣。

2 干涉相位图滤波算法

2.1 基于梯度的自适应滤波

该算法的简要原理是通过计算二维信号的梯度，计算滤波窗口中心数据的权系数，信号梯度越大，则权系数越小。然后对窗口内元素进行加权平均，代替窗口中心点的数据。该算法实际上是均值滤波的一种改进，通过判断信号梯度，对干涉条纹边缘数据即梯度很大的数据进行小的加权，弱化干涉条纹边缘的滤波，从而有效地保留干涉条纹的边缘细节信息。该滤波算法基本步骤如下^[4,5]。

(1) 计算梯度 $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$

$$G_x(x, y) = \frac{1}{2} [f(x+1, y) - f(x, y)] \quad (1)$$

$$G_y(x, y) = \frac{1}{2} [f(x, y+1) - f(x, y)] \quad (2)$$

(2) 计算滤波窗口权系数

$$w(x, y) = \exp \left[-\frac{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}{2k^2} \right] \quad (3)$$

这里 k 的取值需要根据边缘梯度的大小来确定，为使得突变的边缘得以保存， k 不宜取得太大，可按梯度最大值的 $1/3 \sim 2/3$ 来取。

(3) 对信号进行加权平均

$$f^{(t+1)}(x, y) = \frac{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} f^{(t)}(x+i, y+j) w^{(t)}(x+i, y+j)}{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} w^{(t)}(x+i, y+j)} \quad (4)$$

该算法是一个迭代过程，根据上述步骤迭代 $3 \sim 5$ 次就能得到较好的滤波效果。使用该算法分别对地基雷达干涉复数据的实部与虚部进行自适应滤波，将滤波后的结果重新组合并取其相位可得滤波后的地基雷达干涉相位。

2.2 基于相关系数的 Goldstein 自适应滤波

Goldstein 滤波是经典的 InSAR 滤波算法。Goldstein 滤波采用频域滤波技术，利用快速傅里叶变换将含噪信号变换到频域，然后进行滤波。基于相关系数的 Goldstein 自适应滤波是一种频域加权的滤波方法，在 Goldstein 滤波的基础上，利用干涉相位图质量与复相关系数之间的关系，构造一种自适应的频域加权系数，实现自适应滤波。基本处理过程如下^[6]。

①将原始相位图 $I(x, y)$ 变换到矢量空间：

$$E(x, y) = \exp(I(x, y)) = \cos(I(x, y)) + j\sin(I(x, y)) \quad (5)$$

②在 $E(x, y)$ 中选取一定大小的滤波窗口 $E^w(x, y)$ 进行二维快速傅里叶变换 (FFT)，获取频谱数据 $|F^w(u, v)|$ 。

③用选好的核函数 K (本文选取高斯核函数) 对频谱幅值 $|F^w(u, v)|$ 进行平滑，得到 $|F_k^w(u, v)|$ 。

④以 $|F_k^w(u, v)|^\alpha$ 作为加权系数进行频域平滑

$$E^{(w)}(u, v) = F^{(w)}(u, v) \cdot |F_k^w(u, v)|^\alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (6)$$

接着对处理后的频谱数据进行傅里叶反变换，即可得到滤波后的结果 $E_0(x, y)$ ，对 $E_0(x, y)$ 取其相位值即为滤波后的干涉相位。式 (6) 中 α 值一般取经验值，具有很大的随意性。如果 α 值取得太小，滤波效果较差；如果值取得过大，滤波结果会使得干涉条纹变得模糊，相位分辨率也明显降低。实际处