

# 基于自适应滤波的民航导航通信 干扰检测系统设计

任萍

(交通运输部北海第一救助飞行队, 山东 烟台 265600)

**摘要:** 针对目前使用的民航导航通信干扰检测系统受到背景噪声与电磁干扰信号重叠影响, 导致干扰检测结果不精准的问题, 提出了基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统设计; 使用多信道检测接收机, 将接收结果经过 PCI 接口传送给上位机; 使用测向天线阵, 捕获来自其他天线阵元的信号幅值、相位; 使用由 3 个垂直磁阻传感器组成的电子罗盘, 测量 X、Y、Z 方向的电磁干扰, 经过 A/D 转换器放大处理和主机检测后, 完成硬件结构设计; 计算系统输出结果, 结合自适应滤波处理技术, 整理自适应滤波的加权矢量, 彻底分离开噪声信号与电磁信号, 避免噪声干扰; 计算相位差, 并对其进行矢量化处理, 获取多组载波相位差, 确定干扰信号的数值和方向, 完成通信干扰检测; 由实验结果可知, 该系统在同频干扰、临频干扰情况下, 信号波动的  $-0.2 \sim -0.4$  和  $-0.8 \sim -0.7$  幅值均与实际干扰信号波动幅值一致, 具有精准检测结果。

**关键词:** 自适应滤波; 民航导航; 通信干扰; 背景噪声; 相位差

## Design of Civil Aviation Navigation Communication Interference Detection System Based on Adaptive Filtering

REN Ping

(Beihai First Rescue Flying Service of The Ministry of Transport, Yantai 265600, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the jamming detection system of civil aviation navigation communication is influenced by the overlapping of background noise and EMI signal, and resulting in inaccurate interference detection results, the design of civil aviation navigation communication jamming detection system based on adaptive filter is proposed. Using a multi-channel detection receiver, the received results are transmitted to the host through the PCI interface. Using the direction-finding antenna array, the amplitude and phase of the signal from other antenna elements are captured. Using an electronic compass composed of three vertical magnetoresistive sensors to measure the EMI in X, Y and Z directions, the hardware structure is designed after amplified by the A/D converter and tested by the host computer. The output of the system is calculated, and the weighting vector of the adaptive filter is sorted to separate the noise signal from the electromagnetic signal and avoid noise interference. The phase difference is calculated and vectorized. The carrier phase difference is obtained, the value and direction of the jamming signal are determined, and the communication jamming is detected. The experimental results show that the amplitude of the signal fluctuation from  $-0.2$  to  $-0.4$  and from  $-0.8$  to  $-0.7$ , which are consistent with that of the actual interference signal, and the system has the accurate detection results.

**Keywords:** adaptive filtering; civil aviation navigation; communication interference; background noise; phase difference

### 0 引言

民用航空工业是高风险、高科技产业, 目前, 航空飞行安全系统已取得了长足的发展, 但是, 航空事故仍然继续发生。经调查发现, 民航导航通信与导航频率的干扰是导致航天飞行事故的主要原因之一<sup>[1]</sup>。伴随着全球卫星导航系统的发展, 卫星导航在军事、民用等方面的应用日益广泛。但是, 民航导航通信系统中存在有意和无意的各种干扰, 影响了导航系统地面部分的测控、运行控制和用户正常工作, 这严重威胁到精确、易用的卫星导航连续性和完整性。民航导航通信干扰检测系统的设计, 能够为航天飞行和着陆提供稳定、可靠的检测结果。导航一旦失效,

对飞行安全和指挥控制构成风险, 造成重大损失和后果<sup>[2]</sup>。

为了探测和减轻民航导航通信系统的干扰, 开发具有工程应用价值的干扰监测定位设备是十分必要的。文献 [3] 提出基于 SCB 方差的 GNSS 欺骗式干扰检测算法, 在对中间欺骗攻击过程进行分析的基础上, 提出了欺骗信号的检测码跟踪环路, 利用过零 S 曲线, 改变偏差方差值来检测中间欺骗干扰; 文献 [4] 提出自适应双门限协同干扰检测算法, 该方法通过对各个节点信号环境分析, 同时结合信息融合算法, 及时调整两个门限之间距离, 由此进行干扰检测。

上述这两种方法在测试场地所产生背景噪声较大时,

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-03-04。

作者简介: 任萍 (1990-), 女, 安徽安庆人, 大学本科, 初级通导员, 主要从事民航通信导航方向的研究。

引用格式: 任萍. 基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 78-83.

背景噪声会与测试的电磁信号重叠，很难从测试结果中精准检测导航通信干扰。基于此，提出了基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统设计。

### 1 系统硬件结构设计

基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统其硬件结构见图 1，对监测测向天线所接收到的空间电磁波信号进行检测，实现民航导航卫星天线定位及导航授时，对监测测向主站接收的天线信号进行实时分析，完成对干扰信号的检测。

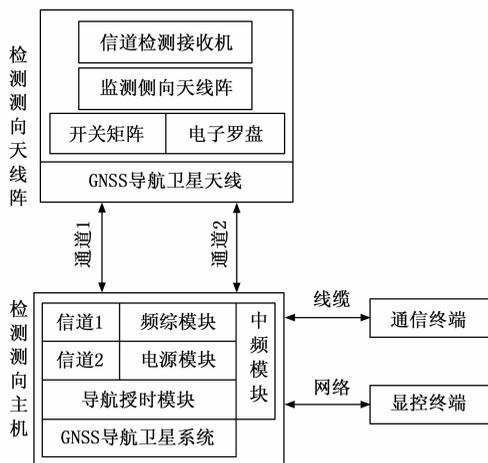


图 1 通信干扰检测系统硬件结构示意图

由图 1 可知，利用频谱分析和参数测量的方法，测量干扰源的入射波形，并根据测量结果确定干扰源；从而实现对导航频段的实时监测。在单一设备中，移动设备可以根据时间分配结果来定位多个点，在有多个设备的情况下，实现多个设备同时定位。

#### 1.1 多信道检测接收机

多信道检测接收机是系统的核心设备，能够实时记录测向天线阵发送的各种信息，这些信息中在保存基本信息外，也记录了干扰信息，具有实时回放、信息提取等功能。多信道检测接收机结构，如图 2 所示。

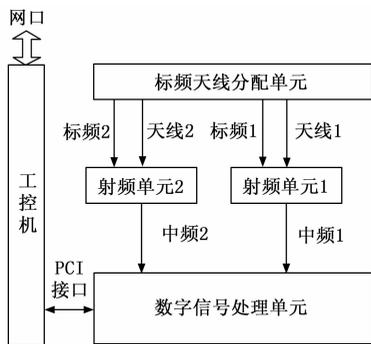


图 2 多信道检测接收机结构

由图 2 可知，该天线装置接收的信号经过自适应滤波放大处理后，能够对中频信号起到减弱作用，由此输出的

中频信号不会太强<sup>[5-7]</sup>。将中频信号传送到信号处理单元，经过处理后再由 PCI 接口传递给主机进行分析。天线分配单元是由检测模块和补偿模块组成的，包含了检测结果和补偿两部分数据。标准频带外部设置了时钟，该时钟存在一个外部标准频率输入接口，负责传输来自外部的参考频率源，而天线分配器负责将天线输入的信号分配给独立检测通道，以供检测<sup>[8-10]</sup>。

#### 1.2 测向天线阵

测向天线阵是一种空间信号采集装置，能够接收来自其他天线阵元的信号幅值、相位，天线接收的射频信号经过通道接收机变频处理后，转换为可采样的中频信号，该信号经过双通道采集后，再转换为基带数据，经过相关运算后得到出波方位<sup>[11]</sup>。

为了保证两个接收通道相位是一致的，接收机射频部分将配置一部校准信号装置，该装置每次在采集信号前，都需将校准源打开，并送入天线阵中，测出当前频率下两个接收通道的相位差。为了消除固有误差，需消除两个相位差，以确保实际测量结果中信号方位正确。

测向天线阵结构，如图 3 所示。

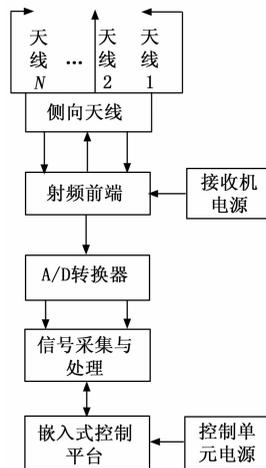


图 3 测向天线阵结构

由图 3 可知，一组天线可以采用任何形式，每一个阵元具有不同的特性。将每个单元设为全向天线阵元，使其在空间谱估计和测向中均匀分布在一条直线上。阵列天线单元的间距一般为工作波长的一半，这种阵列是均匀阵列<sup>[12-14]</sup>。每个阵列元素的模式应尽可能一致，每个阵列的元素也应尽量少耦合。例如，在  $N$  个阵元天线中，不同天线阵元的输出结果分别发送到各自的接收端，且接收结构相同<sup>[15-17]</sup>。将干扰信号经变频器放大、变频处理后，经 A/D 转换器频率转换后输出中频信号。A/D 转换器指的是将模拟信号转换为数字信号的元件，由于数字信号本身不具有实际意义，所以任意一个模数转换器都需要参考模拟量作为转换结果。在实际转换过程中，取样和保持过程是合并的，而量化和编码过程是需要转换的<sup>[18]</sup>。模数转换过程

需要经过采样、量化和编码 3 个步骤,其中采样指的是每隔一段时间,使用信号样值来代替原始连续信号,也就是将信号离散化;量化指的是将模拟信号的连续幅度值转变为有限幅度值;编码指的是按照二进制数字规律,将其转换为二值化数字信号流,由此得到的数字信号能够通过电缆进行数字线路传输;控制单元为工控平台提供电力,同时也为射频前端和测向天线提供电力<sup>[19-20]</sup>。当采样过程中,每个采样阵子的电平测量结果存在差异,那么需将每个采样阵子与参考阵子电平差同时存储在样本库中,由此能够获取全部电平相关测量结果。

### 1.3 电子罗盘

电子罗盘内设 3 个磁阻传感器,负责来自 X、Y、Z 三个不同方向的电磁干扰。同时还可在各方向实时调节传感器灵敏度,经 A/D 转换器放大处理后,再传送到单片机进行处理,得到目标方位角<sup>[21]</sup>。

三维电子罗盘结构示意图,如图 4 所示。

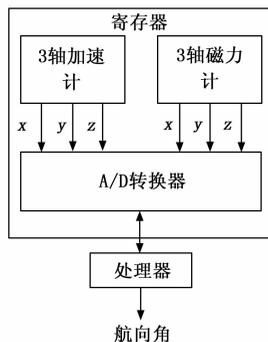


图 4 三维电子罗盘结构示意图

由图 4 可知,三维电子罗盘是由加速计和磁力计组成的,其中加速计是一种三轴加速计,分为 X 轴、Y 轴和 Z 轴,通过三轴组成的三维空间,可以对电子指南针的各项运动进行实时监控。在实际应用中,一般采用由两个轴线组成的角来求出电子指南针的转动角,然后再求出加速度。通过对某一方向上的惯性量的感知,可以得到有关的参数,并能实时地探测到三维空间中的重力和引力。如果加速表的返回值是 1.0,则电子罗盘的感应方向是 1 g;当电子罗盘处于静止状态且无工作状态时,地球的重力约为 1 g;如果纵向竖直持握时,电子罗盘在 Y 轴上施加的力是 1 g。如果某一行为被加速计检测到大于 1 g,则表示此行为为突发行为,也就是干扰行为。

磁力计可用于测量磁场强度和方向以及目标与东南西北 4 个方向的夹角,磁场感应是一种矢量,具有大小和方向特征。由于地球重力形式已知信息,所以当目标呈平稳运动状态时,完全依靠自身采集的信息推算目标除了航向以外的姿态信息。

将加速计和磁力计结合使用,能够实现多种情况下获取完整信息的目的。

在仪器倾斜的情况下,方位角精度会受到很大影响,

这种误差取决于仪器的位置和倾角。为减少这一误差的影响,采用 3 轴测角传感器测量纵摇角和横摇角,电子指南针将俯仰和横摇角的数据进行转换和计算,使磁力仪在 3 个轴上的矢量被“拉”回原位<sup>[22]</sup>。

### 1.4 检测主机

主机采用双信道方式,通过接收天线信道信号来检测天线输出的导航波段信号。该主机在局域和广域网之间运行,采用局域网技术,信号传输速度较高。为了确定双方传输路径和格式,必须建立专用物理线路,保证数据不会丢失且保持原来序列。通过分组交换可将不定长报文分组存储与转发,再进行报文重组,适合大量信号传输。以报文或分组为单位的信号传输形式,可将时钟调整到同一个频率上,此时数据接收方需要不停发送和接收同步的比特流,为多个用户共享提供信道。

在同一媒介上,将不同频带的数据传输到同一频带上的检测主机结构,如图 5 所示。

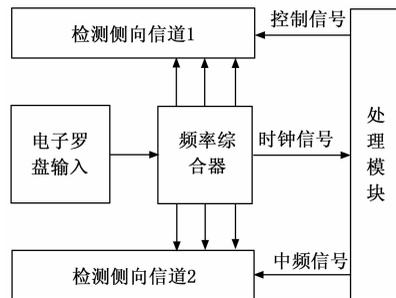


图 5 检测主机结构

由图 5 可知,检测主机是以频率综合器所产生的中频信号为基准,将其他信号均转换为中频信号形式加以分析。对采集到的中频信号进行频谱分析和相位差计算后,通过网络传输到计算机上,实现了数据的交互和共享。电子罗盘模块通过串口连接到时钟模块,并通过 SPI 口控制检测通道<sup>[23]</sup>。在数据链路层上,为了给网络提供可靠的传输服务,分别在无确认的连接服务、有确认的连接服务上,为网络层提供可靠传输信号,供主机检测。

### 1.5 GNSS 导航卫星系统

使用 GNSS 导航卫星系统,能够实现精准定位、导航和授时。该系统能够设置在地球表面任何地点,为用户提供精准的三维坐标和速度信息。GNSS 导航卫星系统主要是由地面控制结构、空间控制结构和用户装置 3 个部分组成的,其中地面控制结构是通过负责人管理主控站来控制整个地面工作内容的;空间控制结构是通过地面天线向卫星传送报文的,在主控站的控制下,向用户装置传递相关信息。空间控制结构是由多颗 GPS 卫星组成的,在任意地点都能精准观测到多颗卫星,每颗卫星上都是通过两个 L 载频传输信号的。每颗卫星都是在完全相同的载波频率下传输信号,其中一个载频承载了捕获码 C/A,另一个载频承载了精密码 P。将导航数据报文叠加在一起,形成一个码集

合,使两个L载承载相同的导航报文。

## 2 系统软件部分设计

### 2.1 基于自适应滤波的通信干扰信号分离处理

对通信干扰数据进行自适应滤波分离处理,可预先对系统背景噪声进行独立测量,测量的噪声信号与正常测试时混合信号中的噪声有关。如此,独立噪声信号可作为期望信号,方便信号分离。

基于自适应滤波的通信干扰信号分离处理原理,如图6所示。

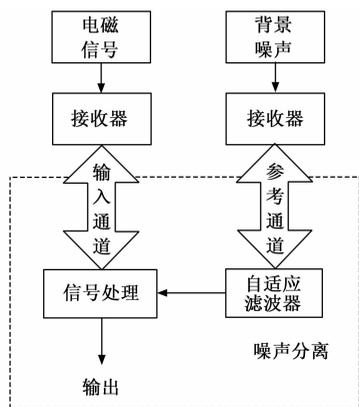


图6 基于自适应滤波的通信干扰数据分离处理原理

由图6可知,该处理过程存在两个处理通道,分别是输入通道和参考通道,其中输入通道接收来自信号源的有用信号和与信号毫不相关的电磁干扰信号<sup>[24]</sup>。参考通道接收来自背景噪声的信号,通过使用自适应滤波处理技术,调整信号,分离背景噪声信号及有效信号,使得该信号在最小均方意义下最接近主通道的干扰信号。如此,通过相减器就能将主通道的噪声信号与电磁信号分离开。

具体分离步骤,如下所示:设系统输出数据为 $y$ ,可表示为:

$$y = a + b - c \quad (1)$$

公式(1)中, $a$ 表示从信号源接收到的有用信号; $b$ 表示与信号不相关的干扰信号; $c$ 表示通过自适应滤波调整后的有效信号。

由于从信号源接收到的有用信号和与信号不相关的干扰信号无关,所以该信号的均方值可表示为信号的功率。如果输出的信号只包含了从信号源接收到的有用信号,或者计算的均方值达到最小,就可以求得原始有用信号均方值的最小值。由于有用信号不需要经过自适应滤波处理,所以调整自适应滤波的加权矢量,使有用信号均方值达到最小。这种调整方式,能够经过自适应滤波处理后,获取最接近输入通道的干扰信号分量,由此能够彻底分离开噪声信号与电磁信号。

### 2.2 通信干扰检测流程设计

在彻底分离开噪声信号与电磁信号后,设计通信干扰

检测流程,并在C++编程软件中实现软件流程的编译,选用Xcode开发环境,实现软件流程的编码、测试、调试。具体步骤如下所示。

#### 1) 计算相位差:

在多通道检测接收机中,利用两台具有相同本地码的接收机来接收相关信号,从而计算两路接收的相位差,然后在干扰测向结果中加入干涉的测量结果。利用一条天线通道控制另一条信道,从这个信道接收不同信号,实现对干扰信号方向的估计<sup>[25]</sup>。

#### 详细步骤为:

当系统中存在背景噪声信号时,需将接收到的信号表示为:

$$\begin{aligned} L_1(\lambda) &= Bd(n)\text{sinc}(\eta)\cos\varphi + \lambda_1 \\ L_2(\lambda) &= Bd(n)\text{sinc}(\eta)\cos\varphi + \lambda_2 \end{aligned} \quad (2)$$

公式(2)中, $B$ 表示信号波动的幅值; $\eta$ 表示接收的信号与本地信号之间的码位差; $\varphi$ 表示接收信号的频率和检测频率之间的差值; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别表示 $L_1$ 、 $L_2$ 两条道路的干扰信号。

将这两个信号叠合在一起,能够写成复数形式,复数中包含了复数向量幅值和相位角。复数包含了信号码位的相关信息,相位角包含了不同信号间的相位差。相位差的计算公式,如下所示:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \quad (3)$$

由公式(3)可知,当实际计算的相位差在 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 时,该系统能够保持正常工作状态,由此获取的信号方向即为干扰信号方向。

#### 2) 相位差矢量化处理:

假定两个信道同时接收两个相位,根据公式(3)计算两个信道的相位差,并选择不同的天线组合。对相位差进行了重新定义,获取相位差矢量结果。详细步骤为:

利用arctan软件,将相位差向量化,即把相位差向量变换成向量,然后在软件中增加一个数据键,以开启待向量的相位差;接着,对向量相位差进行编辑,并确定其分辨率参考值;在此基础上,将向量相位差的首个坐标点和与此坐标值相对应的标记量作为目前要处理的坐标值。判断当前待分辨率的标示量是否小于等于矢量相位差的分辨率参照值,如果小于等于,则将待处理结果添加到坐标点集合之中;反之,则继续处理,判断当前待处理坐标点是否为矢量相位差坐标点的最后一个坐标点。如果不是,则需继续执行下一步骤。否则,将坐标点集合矢量化处理后,获取处理结果;选取矢量相位差中的下一个坐标点作为当前待处理的坐标点,将坐标点对应的分辨率标示量作为当前的标示量,返回执行判断步骤后,判断是否获取全部分辨率标示量,如果是,则完成矢量化处理。

#### 3) 获取载波相位差:

当多通道检测接收机使用相应的本地编码能够跟踪并捕获噪声信号后,也使用公式(3)计算两个信道的相位

差。对相同信道的不同信号，可分析载波相位差，并对不同基线进行轮询，从而得到不同组基的载波相位差。

4) 干扰检测:

写一个 int fun 函数，假定有最大值和最小值，需要将最大值、最小值与阵列 arr 值进行比较，得到所要的结果。用这种方法可以得到阵列中最大元素的下标值，并将其存储在存储单元中，再找到最大的数值和元素的下标，可确定干扰信号的数值和方向，由此完成民航导航通信干扰检测。

3 实验

为了验证基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统设计的合理性，进行实验验证分析。分别使用欺骗式干扰检测算法、自适应双门限协同干扰检测算法和自适应滤波检测系统作为本文方法的对比方法，在 MATLAB 仿真平台中搭建民航导航通信干扰检测平台，测试本文系统的有效性。

3.1 实验装置

实验验证所使用的装置包括校准系统、无人机、地面站接收系统。

1) 校准系统:

校准系统是为了获取精准实验数据而搭建的，如图 7 所示。

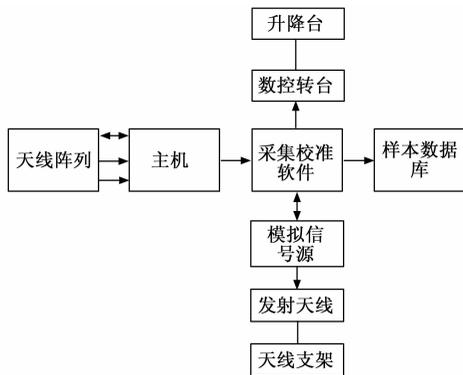


图 7 实验校准系统

由图 7 可知，使用该校准系统，能够精准的获取实验场地环境信息，通过调整天线角度，获取实验数据。

2) 无人机:

无人机选用大疆作为飞行装置，搭载无线电进行升空实验，无线电上配置了侧向天线和接收器，方便向地面站接收系统传送拍摄数据。

3) 地面站接收系统:

地面站接收系统主要用于对无人机拍摄的信息进行图传，方便地面观测。为此，选择了 ADS-B 型号接收系统，该系统内装有 1090ES 设备，能够向无人机发射 ADS-B 广播信号，为实验提供目标识别的 A 代码、S 地址码、经纬度、速度等信息。该系统的技术指标主要包括：探测距

离大于等于 150 海里，最大探测高度大于等于 1 500 米，处理容量大于等于 550 批/秒，处理延迟小于等于 25 毫秒，适用于多种数据传输。

3.2 实验结果与分析

基于上述实验装置，在同频干扰、临频干扰情况下，分别进行实验。

3.2.1 同频干扰

同频干扰是指对空间飞行有用信号具有相同频率的干扰信号，在该干扰环境下，分别使用欺骗式干扰检测算法、自适应双门限协同干扰检测算法和自适应滤波检测系统，对比分析信号幅值检测结果，如图 8 所示。

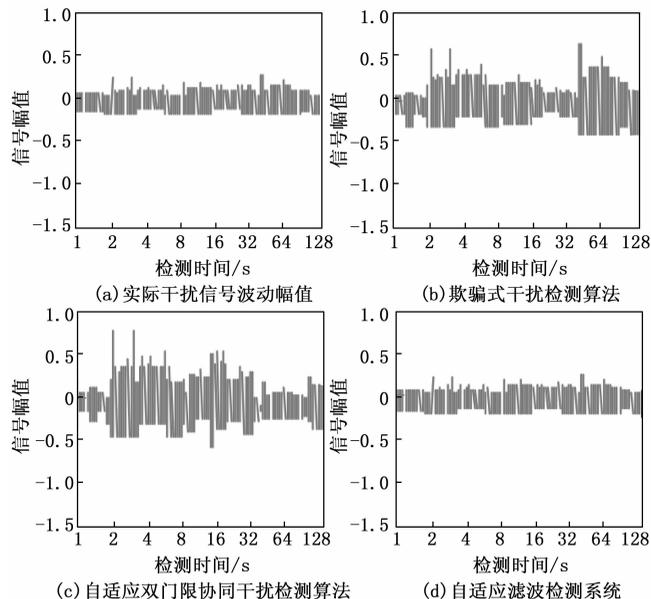


图 8 3 种方法同频干扰信号检测对比

由图 8 可知，使用欺骗式干扰检测算法检测到的同频干扰信号幅值波动范围为  $-0.4 \sim 0.7$ ，与实际  $-0.2 \sim 0.4$  不符；使用自适应双门限协同干扰检测算法检测到的同频干扰信号幅值波动范围为  $-0.6 \sim 0.8$ ，与实际信号幅值波动范围不符；使用自适应滤波检测系统检测到的同频干扰信号幅值波动范围为  $-0.2 \sim 0.4$ ，与实际信号幅值波动范围一致。

3.2.2 临频干扰

临频干扰是指由于使用邻近频率而引起的干扰，在该干扰环境下，分别使用 3 种方法，对比分析信号幅值检测结果，如图 9 所示。

由图 9 可知，使用欺骗式干扰检测算法检测到的临频干扰信号幅值波动范围为  $-1.3 \sim 1.0$ ，使用自适应双门限协同干扰检测算法检测到的临频干扰信号幅值波动范围为  $-1.5 \sim 1.0$ ，使用自适应滤波检测系统检测到的同频干扰信号幅值波动范围为  $-0.8 \sim 0.7$ ，只有使用自适应滤波检测系统与实际信号  $-0.8 \sim 0.7$  幅值波动范围一致。

上述实验结果表明，本文系统对同频干扰信号及临频

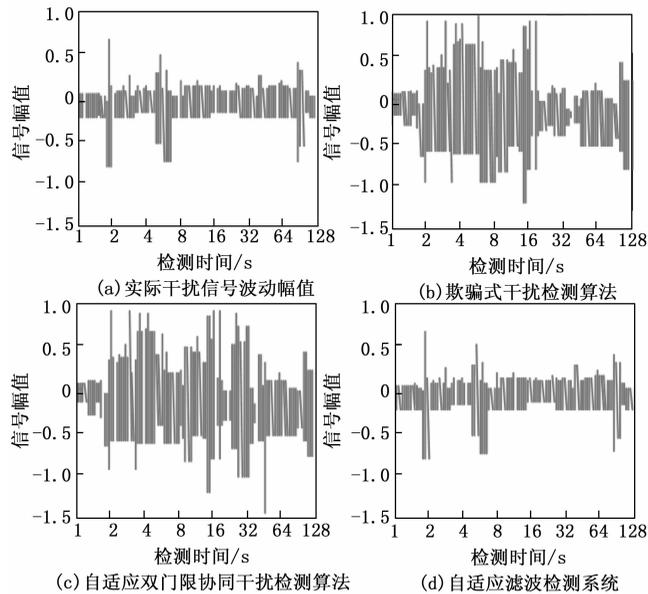


图 9 3 种方法临频干扰信号检测对比

干扰信号的检测结果准确率均较高, 本文系统应用自适应滤波处理技术, 对噪声信号与电磁信号进行分离处理, 因此能够有效避免噪声干扰。

#### 4 结束语

本文设计了一套基于自适应滤波的民航导航通信干扰检测系统, 实现了对卫星导航系统地面站干扰检测, 为排除和消除卫星导航干扰源提供了有效技术手段。本系统的设计不仅适用于微弱信号的检测, 而且适用于普通光信号的检测。该系统通过自适应滤波处理技术分离处理噪声信号与电磁信号, 有效避免了噪声干扰能够准确检测同频干扰信号及临频干扰, 具有一定的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 王文益, 龚 婧, 王金铭. 基于 SCB 方差的 GNSS 欺骗式干扰检测算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (8): 2254-2262.
- [2] 周 平, 周思远, 杨婷婷, 等. GNSS 自适应双门限协同干扰检测算法 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (23): 11-16.
- [3] 刘 洋, 李四海, 付强文, 等. 芯片级原子钟辅助的惯性/卫星组合导航系统欺骗检测方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27 (5): 654-660.
- [4] 褚金奎, 陈建华, 李金山, 等. 一种偏振光/双目视觉仿生组合导航方法 [J]. 光子学报, 2021, 50 (5): 192-201.
- [5] 卢 丹, 白天霖. 利用信号重构的全球导航卫星系统欺骗干扰抑制方法 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (5): 1268-1273.
- [6] 肖 洋, 李理敏, 常家超, 等. 基于北斗 Ka 星间链路的地面用户导航方法 [J]. 宇航学报, 2019, 40 (3): 320-326.

- [7] 刘 亮, 苏 盛, 曹一家, 等. 基于 Kalman 滤波的持续卫星时间同步攻击防护方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 044 (10): 119-126.
- [8] 张 坤, 姜秋喜, 欧阳晓凤, 等. 基于仪表的多样式导航干扰信号的实现 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (6): 128-131.
- [9] 李 豹, 朱银兵, 曹可劲, 等. 北斗导航信号欺骗干扰建模与测试 [J]. 海军工程大学学报, 2019, 31 (3): 23-27.
- [10] 刘 江, 蔡伯根, 王 剑, 等. 基于轮轴测速辅助的列车卫星定位压制干扰检测方法 [J]. 铁道学报, 2020, 42 (10): 76-86.
- [11] 俞 华, 季凯源, 蒋长辉. 多接收机欺骗干扰检测算法研究 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (4): 11-14.
- [12] 王文益, 王沛菡. 基于捕获结果的 GNSS 欺骗式干扰检测 [J]. 信号处理, 2021, 37 (8): 1460-1469.
- [13] 张庆龙, 程二威, 王玉明, 等. 无人机卫星导航系统的电磁干扰效应规律研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (12): 2684-2691.
- [14] 李群生, 赵 剡, 王进达. 一种适用于高动态强干扰环境的视觉辅助微机械捷联惯性导航系统/全球定位系统超紧组合导航系统 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (11): 2241-2249.
- [15] 李 牧, 付 康, 纪元法. 基于导航欺骗的无人机干扰技术研究与设计 [J]. 电视技术, 2019, 43 (2): 1-6, 18.
- [16] 罗文劼, 张曦月, 刘兴龙. 民航卫星导航干扰信号多径抑制算法仿真 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (3): 47-51.
- [17] 何小华. 航空器多链路通信故障中断点云检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 64-67, 78.
- [18] 许 华, 宋佰霖, 蒋 磊, 等. 一种通信对抗干扰资源分配智能决策算法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (11): 3086-3095.
- [19] 毛 虎, 吴德伟, 刘海波, 等. 对 GPS/INS 超紧耦合导航对抗的干扰源配置分析 [J]. 电子科技大学学报, 2020, 49 (2): 194-200.
- [20] 陈 夏, 黄 佳. 微纳卫星导航通信一体化系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (1): 5-8.
- [21] 姚元飞, 杨 巍, 陈立强. 民航地空通信自适应抗干扰系统设计与性能分析 [J]. 电讯技术, 2019, 59 (12): 1385-1390.
- [22] 李彦骁, 梅 强, 刘天华, 等. 天地一体化信息网络在我国民航的应用研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (2): 165-173.
- [23] 谢 凯, 代 康. 基于负载预测的通信网络入侵检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 62-66.
- [24] 张 坤, 姜秋喜, 欧阳晓凤, 等. 基于仪表的多样式导航干扰信号的实现 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (6): 128-131.
- [25] 张 坤, 曾芳玲, 欧阳晓凤, 等. 基于接收机通信和测距性能的 GPS 压制干扰效果分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39 (1): 147-150.