

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108083

## 基于脉冲星信号的自适应同步采样方法\*

唐思豪,姚文轩,邱伟,郑瑶

(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

**摘要:**基于传统 GPS/北斗信号的广域同步测量技术易受到恶意网络攻击,可靠性难以得到保障。为解决这一问题,本文利用脉冲星信号周期脉冲精度高、免疫于现有网络攻击的特性,提出一种新型自适应同步采样方法:首先对射电望远镜接收到的脉冲星信号进行多相滤波、消色散和周期折叠处理,得到脉冲轮廓;然后采用最小二乘法监测本地晶体振荡器频率,动态调整定时控制间隔实现自适应同步采样。为验证算法的有效性,本文采用脉冲星 J0437-4715 的观测数据生成同步信号,实现电网信号的同步测量,利用递归离散傅里叶变换算法计算采样数据的相角和频率,得到相角和频率平均测量误差分别为 $-9.75 \times 10^{-5}^\circ$ 和 $9.83 \times 10^{-7}$  Hz,验证了所提自适应同步采样方法的有效性。

**关键词:**脉冲星;自适应采样;晶振频率漂移;广域电网;同步测量;同步信号

中图分类号: TM930.115 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

## Adaptive synchronized sampling method based on pulsar signal

Tang Sihao, Yao Wenxuan, Qiu Wei, Zheng Yao

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The traditional wide-area synchronous measurement technology based on GPS/Beidou is vulnerable to hostile cyber-attacks, and its reliability is difficult to guarantee. In order to solve this problem, this paper utilizes the pulsar signal high accuracy characteristics of periodic pulse and immunity to existing cyber-attacks to establish a new adaptive synchronous sampling method. Firstly, polyphase filtering, de-dispersion and period folding are performed on the pulsar signal received by the radio telescope to obtain pulse profile. Then, the local crystal oscillator frequency is monitored with the least square method, and the time control interval is dynamically adjusted and controlled to realize adaptive synchronized sampling. To verify the effectiveness of the algorithm, this paper uses the observation data of the pulsar J0437-4715 to generate synchronization signals and realize the synchronized measurement of the power grid signal. The recursive discrete Fourier transform algorithm is applied to calculate the phase angle and frequency of the sampling data, and the obtained average errors of phase angle and frequency are  $-9.75 \times 10^{-5}^\circ$  and  $9.83 \times 10^{-7}$  Hz, respectively, which verifies the effectiveness of the proposed adaptive synchronized sampling method.

**Keywords:** pulsar; adaptive sampling; crystal oscillator frequency drift; wide-area grid; synchronized measurement; synchronization signal

## 0 引 言

广域测量系统(wide area measurement system, WAMS),是一种基于同步测量技术的新一代电网监控系统<sup>[1]</sup>,其利用同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)实时采集电网相量参数(幅值、相位和频率),

通过统一的时间标签对各 PMU 的测量结果进行比较、补充和融合,形成电网同步大数据,为电力系统动态监测、态势感知、故障定位、保护与控制提供了坚实基础数据支持<sup>[2-5]</sup>。

电网同步测量的一个关键因素是同步信号的稳定性。国外研制的 PMU 均通过全球定位系统(global position system, GPS)实现同步。然而,工业 GPS 信号属

收稿日期:2021-06-12 Received Date: 2021-06-12

\* 基金项目:国家自然科学基金(52177078)项目资助

于民用编码,基于GPS的同步测量技术易受到恶意网络攻击,其可靠性难以得到保障<sup>[6-7]</sup>。而GPS攻击导致的同步信号丢失将产生较大的测量误差并影响电网状态估计结果的准确性,因此,文献[8-9]提出了一种补偿算法,减小了同步信号丢失时的相角测量误差,然而当同步信号丢失时长超过30 min时,该算法相角补偿效果将大大降低。Fan等<sup>[10]</sup>采用状态估计法对受网络攻击的PMU数据进行校正,但当多台PMU被同时攻击时该算法将失效。Wang等<sup>[11]</sup>提出了一种分布式同步信号丢失检测算法,该算法可以有效检测并抵御协同攻击,然而实际相量测量会得到大量异常数据,该方法在实际应用中效果并不理想。Zhang等<sup>[12]</sup>通过监测时间抖动判断GPS信号是否受到攻击,并通过卫星信号加密方法提高同步信号的可靠性,但该方法无法处理时间抖动小、持续时间长的网络攻击类型。由此可见,现有方法一定程度上可减轻同步信号丢失的影响,但在实际应用中依然存在各种问题。因此,为避免同步信号丢失,本文利用脉冲星信号长期频率稳定度可与原子钟相媲美<sup>[13]</sup>且免疫于现有网络攻击的特点,提出了一种基于脉冲星信号的广域电网同步测量方法。

电网同步测量的另一个关键因素是ADC采样控制。开放式通用电网分析仪(open universal grid analyzer, Open-UGA)<sup>[14]</sup>通过秒脉冲信号(pulse per second, PPS)实现每秒采样控制,然而,晶振实际频率存在漂移,很难保证实际频率为采样频率的整数倍,从而引入采样时间误差<sup>[15]</sup>。为解决上述问题,Zhan等<sup>[16]</sup>提出了一种新的同步采样控制方法,利用变采样间隔控制方法对<sup>[15]</sup>采样时间误差进行补偿。然而,这两种方法都未能有效利用晶振频率的历史信息,在晶振频率波动较大时,晶振频率的实时监测效果较差。

综上所述,为减小网络攻击和采样误差对电网同步相量测量的影响,本文提出了一种基于脉冲星信号的自适应同步采样方法,利用从脉冲星观测数据中提取出的周期性信号作为采样同步信号。在变采样间隔法的基础上,通过最小二乘法预估本地晶振频率,减小频率漂移带来的不利影响,实现更精确的采样间隔控制。

## 1 采样误差分析

目前,PMU大都采用GPS/北斗秒脉冲作为同步信号实现同步采样,同步周期为1 s,误差可以控制在100 ns以内。然而,当GPS/北斗信号受到网络攻击时,秒脉冲精度将难以保证,甚至可能出现信号丢失的现象<sup>[6-7]</sup>。实际同步周期 $T$ 可写为:

$$T = 1 \pm \Delta t \quad (1)$$

式中: $\Delta t$ 表示因网络攻击导致的同步周期误差。在每个

同步周期 $P$ 内的采样受晶振控制,然而晶振频率并不能一直保持恒定,因此相邻两个采样点的采样时间误差可写为<sup>[17]</sup>:

$$e = \frac{1}{f_s} - \left\lfloor \frac{f_{osc} \pm \Delta f}{f_s} \right\rfloor \times \frac{1}{f_{osc} \pm \Delta f} \quad (2)$$

式中: $f_{osc}$ 为晶振标定频率; $f_s$ 为预设采样率; $\Delta f$ 为晶振频率偏移量; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整,其运算结果为计数器阈值 $N$ 。则由采样时间误差引起的相角测量误差为:

$$\varepsilon(t) = \left( \frac{t}{T} - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor \right) \times 360^\circ \times e \times f_0 \quad (3)$$

式中: $f_0$ 为电网频率; $t$ 为采样时刻; $T$ 为同步信号周期; $e$ 为相邻两个采样点的采样时间误差。

设标定晶振频率为200 MHz;预设采样率为1 200 Hz;电网频率为50 Hz;晶振频率偏移量为200 Hz;则由式(2)~(3)可知,当同步信号因网络攻击丢失后,最大累积时间误差和相角误差仅用16 s就将分别达到80  $\mu$ s和1.44°,此误差已超出电力系统同步相角测量的最大允许误差<sup>[18]</sup>。图1给出了相角测量误差在同步信号正常与丢失情况下的变化规律。由图可见,当同步信号丢失后,相角测量误差将随时间增大。

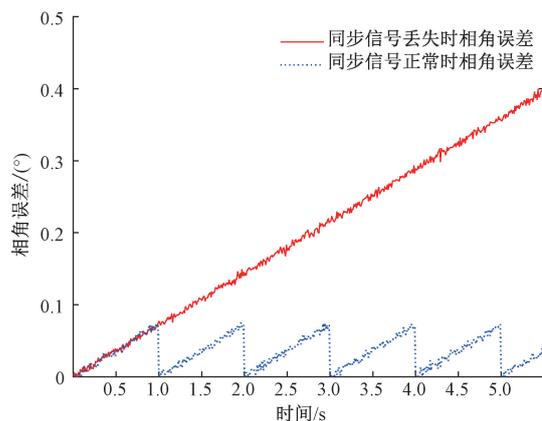


图1 采样数据相角误差

Fig. 1 Phase angle error of the sampled data

## 2 基于脉冲星信号的同步采样方法

脉冲星信号具有周期脉冲精度高、免疫于现有网络攻击等优点,可以有效补偿GPS/北斗信号的不足,因此,本文利用脉冲星信号建立一种自适应同步采样方法,减小网络攻击和采样误差对相量测量的不利影响,流程如图2所示,具体步骤如下。

首先,通过小型射电望远镜<sup>[19]</sup>(small radio telescope, SRT)、多相滤波器组、消色散和周期折叠将脉冲星信号生成更可靠的同步信号,防止因同步信号丢失造成的测量误差持续增加。

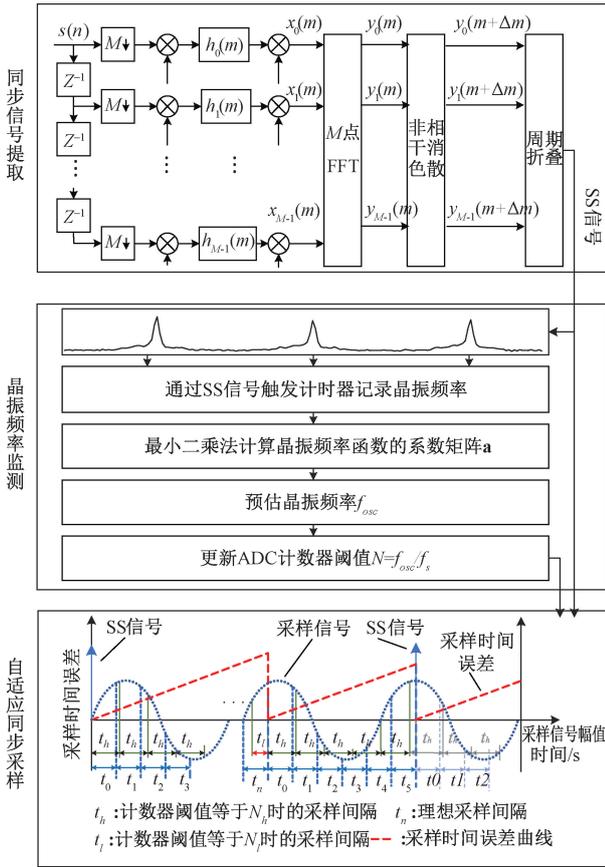


图 2 基于脉冲星信号的同步采样方法

Fig. 2 Synchronized sampling method based on pulsar signal

其次,利用生成的同步信号对晶振实际输出频率进行实时监测。

最后,通过生成的同步信号触发中断实现同步采样,并周期性地清除累积误差;同时利用得到的晶振频率监测值,动态调整计数器阈值  $N$ ,即通过交替地取上整数和下整数将采样误差抵消,实现自适应变间隔采样。详细理论及具体实现介绍如下。

### 2.1 同步信号提取方法

第一步,脉冲星信号采集。通过 SRT 将某些较明亮的脉冲星信号反射到接收器。接收器感应产生电压信号,经低噪声放大器放大,然后通过硬件滤波及混频器转换为较低的中频,以减小信号在线路上传输时的能量损失。最后经 ADC 采样,得到数字化输入信号  $s(n)$ 。

第二步,多相滤波。应用数字信道化算法将脉冲星采样信号在全频段内等间隔分割成  $M$  个带宽相同的频率通道,以便在每个通道上执行消色散。数字信道化的原理是将输入信号  $s(n)$  通过下变频移动至零中频,然后通过 FIR 低通滤波器组得到原信号各子带信号<sup>[20]</sup>。经过低通滤波器后,信号带宽被限制在  $2\pi/M$  以内,因此可以通过  $M$  倍抽取降低采样频率,以提高后续计算效

率,最终得到输出信号  $y_k(m)$ :

$$y_k(m) = \{ [s(n) e^{j\omega_k n}] * h(n) \}_{n=Mm} \quad (4)$$

式中:  $\omega_k$  为本振角频率;  $k$  表示信道序号,计算公式如下:

$$\omega_k = \left( k - \frac{2M-1}{4} \right) \frac{2\pi}{M}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

式中:  $h(n)$  为 FIR 低通滤波器脉冲响应,可用下式表示:

$$h(n) = \begin{cases} b_n, & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

但式(6)所述算法的抽取过程在滤波过程之后,即参与滤波运算的  $M-1$  个样值将被丢弃,计算效率很低。因此本文根据文献[21],将式(6)重构为:

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{M-1} x_p(m) \cdot (-1)^p \cdot e^{-j\frac{\pi}{M} p} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{M} k p} = \sum_{p=0}^{M-1} x'_p(m) e^{-j\frac{2\pi}{M} k p} = DFT(x'_p(m)) \quad (7)$$

式中:  $x_p(m)$  如下式所示:

$$x_p(m) = s(mM-p) (-1)^{(M-1)m} * h(mM+p) \quad (8)$$

式(7)等效于图 2 中同步信号提取模块内的多相滤波器组结构。由于该结构将抽取器置于滤波器之前,其与传统数字滤波器组信道化方法相比,运算量大大降低<sup>[20]</sup>。

第三步,消色散。应用非相干消色散算法校正脉冲星信号色散延迟。文献[22]研究发现脉冲星信号在星际介质中传播时,与途中带电粒子和自由电子相互作用,使信号中低频部分更晚到达观测点,即低频脉冲在相位上滞后于高频脉冲。因此,需要对信号进行消色散处理。非相干消色散<sup>[22]</sup>是一种简单直接的消色散方法,其原理是计算每个频道内的延迟时间并在该频道内实现相应的延迟补偿。通常,频道  $f_{chan}$  内的延迟  $\Delta t$  可以表示为:

$$\Delta t \approx 4.15 \times 10^6 \times (f_{ref}^{-2} - f_{chan}^{-2}) \times DM \quad (9)$$

式中:参考频率  $f_{ref}$  (MHz) 通常取观测频带的中心频率;色散量  $DM$  ( $\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 是指信号传播途径中的自由电子密度的积分,对于已发现的脉冲星,  $DM$  可以通过天文观测资料获得。

第四步,周期折叠。对消色散后的信号应用周期折叠处理。由于背景噪声的影响,消色散信号的单个脉冲仍然非常微弱,而且单个脉冲在辐射窗口中出现的位置是变化不定的,但由一定数量的单个脉冲序列数据按周期折叠所获得的平均脉冲,其轮廓形状保持不变,可以选择轮廓上某个点作为特征参考点(通常选择峰值点),最后根据脉冲星参考模型的预测结果结合原子钟给出时刻,确认这个特征点的到达时间。将非相干消色散的输出表示为  $S_d(n)$ ,折叠可以表示为:

$$S_j(n) = \sum_{i=0}^K S_d(n-i \times P) \quad (10)$$

式中:  $K$  表示叠加的脉冲数。折叠的次数由脉冲星的通量密度决定。一般来说,较亮的脉冲星或较大的射电望

望远镜需要较少的叠加。 $P$ 表示脉冲星信号的周期,对于已知脉冲星, $P$ 可以通过查询天文观测资料得到。最后提取出周期脉冲信号并按文献[23]所述方法计算脉冲到达时间,脉冲信号与时间标签发送至ADC采样模块用于同步采样。

## 2.2 晶振频率实时监测方法

首先假设在单个同步信号周期内晶振频率保持不变,通过同步信号触发计数器,记录多个时刻的晶振实际输出频率<sup>[17]</sup>,利用最小二乘法拟合晶振实际输出频率的变化曲线,最终预估当前晶振工作频率。本文假设晶振实际输出频率与采样点之间呈三次函数关系,如下式所示:

$$f(k) = a_0 + a_1k + a_2k^2 + a_3k^3 \quad (11)$$

式中: $k$ 为第 $k$ 次晶振频率监测值; $a_0, a_1, a_2, a_3$ 分别为多项式函数 $f(k)$ 的4个系数。因此对于长度为 $L$ 的计算窗口有:

$$\begin{aligned} f(1) &= a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 1^2 + a_3 \cdot 1^3 \\ f(2) &= a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 2^2 + a_3 \cdot 2^3 \\ &\vdots \\ f(L) &= a_0 + a_1 \cdot L + a_2 \cdot L^2 + a_3 \cdot L^3 \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2^2 & 2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & L & L^2 & L^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)可简化为下式:

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}\mathbf{a} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为范德蒙德矩阵;该矩阵方程的解可以写为:

$$\mathbf{a} = [\mathbf{X}^T\mathbf{X}]^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{f} \quad (15)$$

式中: $[\mathbf{X}^T\mathbf{X}]^{-1}\mathbf{X}^T$ 表示的增益矩阵可以离线求解。利用式(15)可求解得到的系数矩阵 $\mathbf{a}$ 。最终根据 $f(k)$ ,可得到下个同步周期内的晶振频率预估值 $f'_{osc}$ 。

## 2.3 自适应采样间隔控制方法

由式(2)可知,实际 $N$ 亦可设置为取上整数,这时相角测量误差的增加方向与取下整数相反,由此想到交替地选取上整数和下整数作为定时器控制参数使采样时间误差相互抵消。因此,第 $n$ 个采样点的计数器阈值可以通过式(16)确定。

$$N^n = \begin{cases} N_L & v_n/n \geq \frac{f'_{osc}}{f_s} - \left\lfloor \frac{f'_{osc}}{f_s} \right\rfloor \\ N_H & v_n/n < \frac{f'_{osc}}{f_s} - \left\lfloor \frac{f'_{osc}}{f_s} \right\rfloor \end{cases} \quad (16)$$

式中: $N_L$ 表示计数器阈值取下整; $N_H$ 表示计数器阈值取上整; $v_k$ 为采样控制参数选用 $N_h$ 的次数,在每个同步信号触发时归零。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 脉冲星信号生成

为验证所提算法的有效性,本文采用澳大利亚联邦科学与工业研究组织(The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)公开数据库中(<https://data.csiro.au/collections/domain/atnf/search>)编号为J0437-4715的脉冲星信号作为形态基准,搭建了脉冲星信号生成器如图3所示。该脉冲星相关参数如下:脉冲星赤经(right ascension, RA)为+04:37:15.8,赤纬(declination, DEC)为-47:15:08.6,观测时间为58 s,观测日期为2013年4月30日。观测频带为1 240.5~1 496.5 MHz,周期为5.757 451 936 ms、色散量为2.644 983 456 pc·cm<sup>3</sup>。

脉冲星信号生成器首先对脉冲星信号J0437-4715进行形态分析,采用ArbExpress软件将其转换成可由信号发生器读取的.tfw格式数据,然后导入信号发生器并输出相应脉冲信号。其次通过噪声源(BG7TBL RF)对脉冲信号进行噪声叠加。最后通过衰减器(ZX73-2500-S+)生成幅度、信噪比可控的脉冲。

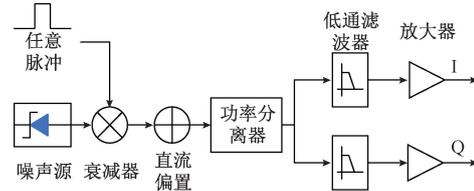


图3 脉冲星信号生成器

Fig. 3 Pulsar signal generator

### 3.2 同步信号提取

为验证多相滤波器、消色散方法的有效性,本文将脉冲星信号通经同轴电缆线进行传输。并利用软件无线电平台对信号进行相应处理。本文采用HackRF One终端作为实验平台进行测试,如图4所示。

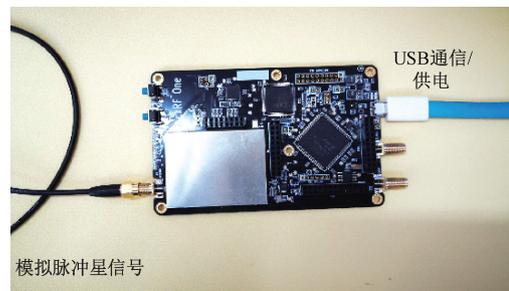


图4 HackRF One 开发板

Fig. 4 HackRF One development board

HackRF One 选用 MAX2837 芯片对信号进行上下变频,并通过宽带混频器 RF6C5072 提高频率变换范围,并搭载 MAX5864 数模/模数转换芯片,可实现 20 MHz 高速采样。PC 机端通过 GnuRadio Companion 辅助生成脉冲星信号处理程序,如图 5 所示。

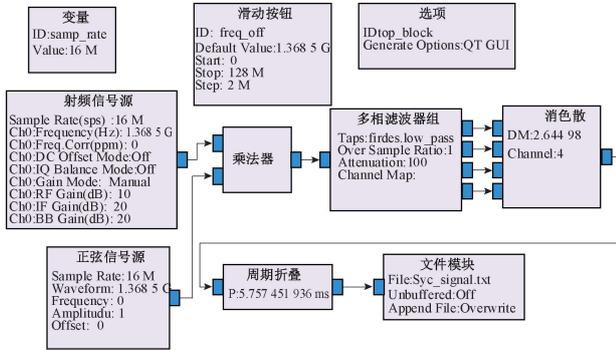


图 5 脉冲星同步信号生成程序

Fig. 5 Pulsar synchronization signal generation procedure

该程序功能包括多相滤波、消色散和周期叠加操作。其中, Osmocom Source 为脉冲星信号,通过设置输入信

号的中心频率为 1 368.5 MHz, HackRF 将以 1 368.5 MHz 作为基带频率进行混频并将混频后的信号输出到下一模块。PolyPhase Channelizer 为多相滤波器组构成的数字信道化模块,考虑到程序运行效率,本文仅取 16 MHz 带宽的脉冲星信号进行数字信道化,信道数取为 4 个。Dedispersion 为消色散模块, Folding 为周期折叠模块。最后,处理完成的脉冲信号通过 File Sink 模块以文本格式保存在计算机内,亦可切换 HackRF 的收发模式,将脉冲信号通过同轴电缆线发射到相关设备。

脉冲星信号经处理后结果如图 6 所示。其中,图 6(a) 为脉冲星信号经过数字信道化处理后的结果,由于星际介质对信号的色散效应,导致不同频段内的脉冲相位不一致,因此,直接对脉冲星信号进行周期折叠操作很难得到明显的脉冲信号。图 6(b) 为经消色散处理后的脉冲星信号,可以看出各个频段之间的相位差得到的有效修正。图 6(c) 和(d) 为信号按固定周期进行折叠得到的积分轮廓图,对比可以看出消色散和周期折叠处理能够有效的提高脉冲信号的信噪比,经过处理后的周期脉冲信号可作为同步信号通过同轴电缆线发送给相量测量单元实现同步采样。

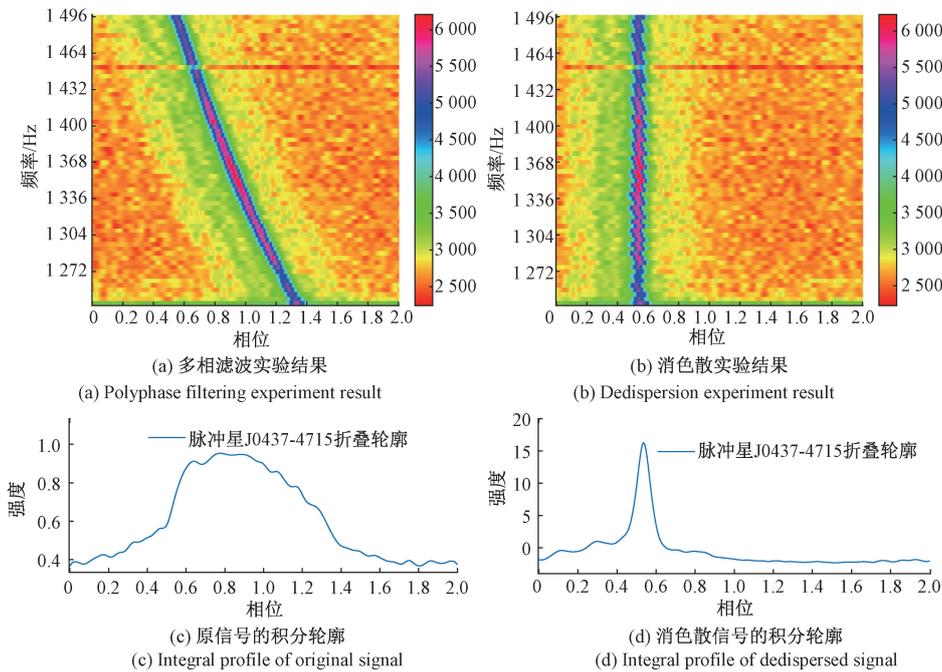


图 6 脉冲星信号分析

Fig. 6 Pulsar signal analysis

### 3.3 晶振频率监测与采样精度

为对比本文算法与文献 [15] 所提 AS (adaptive sampling) 算法的采样精度,通过频率计数器监测 20 MHz 晶振的频率,并在 500 s 内不断改变环境温度,获得如

图 7 中虚线所示的晶振频率观测值。

同时测试了动态振荡器频率监测 (dynamic oscillator frequency monitor, DOFM)、通用振荡器频率监测 (general oscillator frequency monitor, GOFM) 及本文算法的晶振频

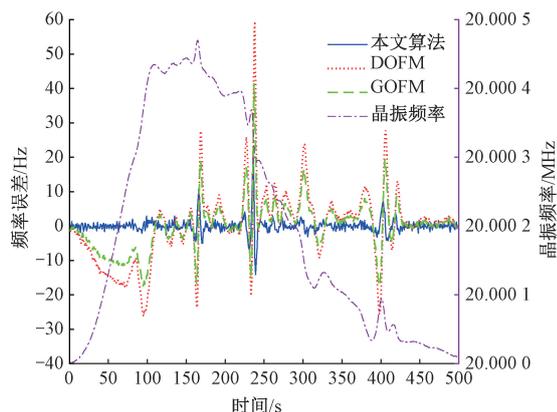


图7 不同算法振频率预测方法误差

Fig. 7 The errors of different crystal oscillator frequency prediction algorithms

率预测效果,实验结果如图7所示。从图7中可以看出,当晶振频率快速变化时,DOFM和GOFM的最大误差超过40 Hz。本文算法最大估计误差小于20 Hz,说明本文算法能更有效的预估晶振频率。

### 3.4 相角和频率测量实验

本文通过MATLAB生成初相角为 $0^\circ$ 、信号幅值存在10%的波动、含有60 dB白噪声的50 Hz正弦信号。设置晶振频率波动为 $100 \times 10^{-6}$ ,采用DOFM-AS、GOFM-AS和本文算法对仿真正弦信号进行采样。采样数据通过文献[15]所提递归DFT算法计算得到相应相角和频率,实验结果如图8和9所示。

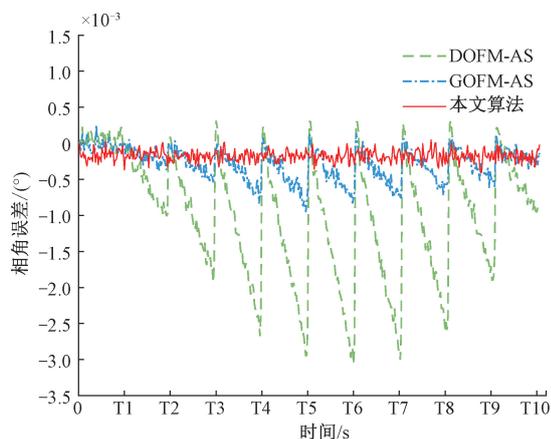


图8 晶振频率波动时相角误差对比

Fig. 8 Comparison of phase angle error for crystal oscillator frequency fluctuation

由图8可见,基于GOFM算法的采样数据计算得到的相角误差出现了明显的“锯齿状”,在单个同步信号周期内相角误差可累积达到 $3.0 \times 10^{-3}^\circ$ ,而本文算法得到的相角误差在整个实验阶段表现得都很平稳。因此,本文

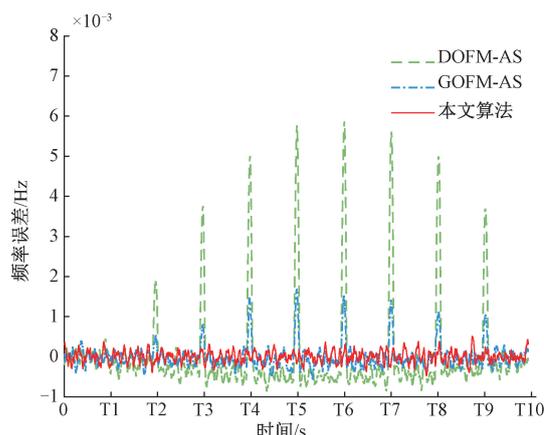


图9 晶振频率波动时频率误差对比

Fig. 9 Comparison of frequency errors for crystal oscillator frequency fluctuation

算法的采样数据能更精确的预估晶振频率,从而更高效地控制采样间隔。晶振频率波动时GOFM-AS、DOFM-AS及本文所提算法的平均误差如表1所示。由表1可知,在本地晶振频率波动较大时,基于本文算法计算得到的相角和频率平均测量误差分别为 $-9.75 \times 10^{-5}^\circ$ 和 $9.83 \times 10^{-7}$  Hz,小于DOFM-AS算法和GOFM-AS算法,说明本文所提算法采样精度更优。

表1 晶振频率波动时不同算法平均误差

Table 1 The average errors of different algorithms for crystal oscillator frequency fluctuation

误差	DOFM-AS	DOFM-AS	本文算法
相角/ $^\circ$	$-9.81 \times 10^{-4}$	$-2.87 \times 10^{-4}$	$-9.75 \times 10^{-5}$
频率/Hz	$-1.56 \times 10^{-5}$	$-3.23 \times 10^{-6}$	$-9.83 \times 10^{-7}$

最后,为验证本文所提算法在实际应用中的有效性,搭建了一套基于STM32F767的同步相角测量实验平台,如图10所示。分别在GPS同步信号正常、GPS同步信号丢失以及使用脉冲星同步信号的情况下进行实验,并对50 Hz交流信号的相角进行测量,实验结果如图11所示。

由实验结果可知,当GPS同步信号丢失后,采样数据的相角测量误差将在短时间快速累积,50 min累积相位误差 $>0.15^\circ$ ,相角测量将失效。由于目前PMU中没有GPS信号丢失等意外条件下的备用时钟同步机制<sup>[24]</sup>,在多数情况下,外部同步信号丢失后,数据集中器即将采集的同步测量数据丢弃,严重降低了广域同步数据的完整性。而在GPS同步信号正常时,两种方法的相角测量精度相近,基于脉冲星信号的相角测量结果的平均误差为 $0.022^\circ$ ,基于GPS的相角测量结果的平均误差为 $0.018^\circ$ 。

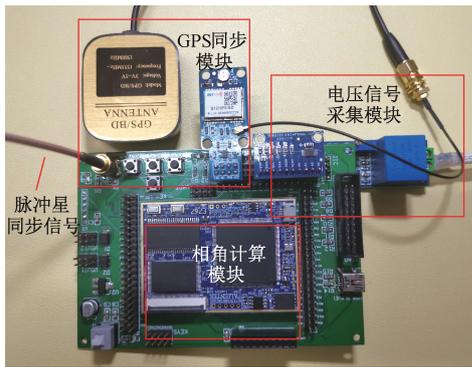


图 10 同步相角测量实验平台

Fig. 10 Experiment platform for synchronized phase angle measurement

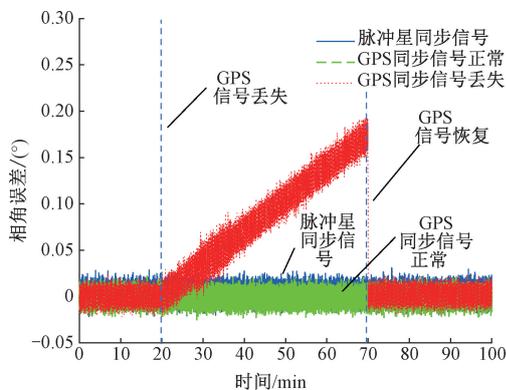


图 11 相角测量实验

Fig. 11 Phase angle measurement experiment

## 4 结 论

本文提出了一种基于脉冲星信号的自适应同步采样方法,该方法首先利用多相滤波器组、消色散和周期折叠从脉冲星信号中提取出周期脉冲轮廓并形成同步信号,然后结合最小二乘法监测本地晶振频率,最后通过同步信号和晶振监测频率动态调整采样间隔。为验证算法有效性,本文搭建了基于脉冲星信号的同步相角测试平台。利用脉冲星 J0437-4715 的观测数据模拟生成实际脉冲星信号,并基于 HackRF One 开发板从脉冲星信号中提取得到同步信号。测试并验证了本文算法的晶振频率监测性能优于 DOFM 和 GOFM。随后在 MATLAB 中仿真得到当晶振频率存在  $100 \times 10^{-6}$  Hz 波动时,本文算法的相角平均误差和频率平均误差分别为  $-9.75 \times 10^{-5}$ ° 和  $-9.83 \times 10^{-7}$  Hz,较传统 DOFM-AS 算法和 GOFM-AS 算法相比低一个数量级。最后,通过同步相角测量实验平台,对 50 Hz 交流信号的相角进行了测试,验证了新型自适应同步采样方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.  
DUAN G, YAN Y Q, XIE X D, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology [J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(1): 73-80.
- [2] 徐飞阳, 薛安成, 常乃超, 等. 电力系统同步相量异常数据检测与修复研究现状与展望 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2021: 1-18 [2021-08-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.202180>.  
XU F Y, XUE AN CH, CHANG N CH, et al. Research status and prospects of detection, correction and recovery for abnormal synchrophasor data in power system [J/OL]. Proceedings of the CSEE. 2021: 1-18 [2021-08-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.202180>.
- [3] 邓丰, 李鹏, 曾祥君, 等. 基于 D-PMU 的配电网故障选线和定位方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 160-167.  
DENG F, LI P, ZENG X J, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network [J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(19): 160-167.
- [4] 童晓阳, 张生鹏, 张广骁. 基于区域 PMU 和节点故障注入电流的广域后备保护算法 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 158-165.  
TONG X Y, ZHANG SH P, ZHANG G X. Wide-area backup protection algorithm based on regional phasor measurement unit and nodal fault-injection current [J]. Automation of Electric Power System, 2021, 45(15): 158-165.
- [5] 戴东阳. 电网实时动态监测技术研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.  
DAI D Y. Research on grid dynamic monitoring technology [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [6] CHAUHAN S V S, GAO G X. Synchrophasor data under GPS spoofing: Attack detection and mitigation using residuals [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4), 3415-3424.
- [7] BHAMIDIPATI S, KIM K J, SUN H, et al. GPS spoofing detection and mitigation in PMUs using distributed multiple directional antennas [C]. ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-7.
- [8] YAO W, ZHOU D, ZHAN L, et al. GPS signal loss in the wide area monitoring system: Prevalence, impact,

- and solution [J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 147: 254-62.
- [9] YAO W, LIU Y, ZHOU D, et al. Impact of GPS signal loss and its mitigation in power system synchronized measurement devices [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(2): 1141-1149.
- [10] FAN X, DU L, DUAN D. Synchrophasor data correction under GPS spoofing attack: A state estimation-based approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(5): 4538-4546.
- [11] WANG Y, HESPANHA J P. Distributed estimation of power system oscillation modes under attacks on GPS clocks [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(7): 1626-1637.
- [12] ZHANG H, PENG S, LIU L, et al. Review on GPS spoofing-based time synchronisation attack on power system [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(20): 4301-4309.
- [13] 张海龙, 张萌, 聂俊, 等. 脉冲星数字终端技术综述 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(9): 19-32.
- ZHANG H L, ZHANG M, NIE J. Pulsar digital backend technologies review [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(9): 19-32.
- [14] BHANDARI A, YIN H, LIU Y, et al. Real-time signal-to-noise ratio estimation by universal grid analyzer [C]. 2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA). IEEE, 2019: 1-6.
- [15] YAO W, ZHAN L, LIU Y, et al. A novel method for phasor measurement unit sampling time error compensation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(2): 1063-1072.
- [16] ZHAN L, ZHAO J, CULLISS J, et al. Universal grid analyzer design and development [C]. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015: 1-5.
- [17] 姚文轩. 基于广域同步测量的电能质量参数检测关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- YAO W X. Research on key technologies of power quality parameter detection based on wide area synchronized measurement [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [18] Power system relaying committee. C37. 118.1-2011: IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems [S]. IEEE Standard Association, 2011.
- [19] HANSON C, FERKINHOFF C, MOORE N, et al. HARDWARE. Astronomy; Repair and refurbishment of the small radio telescope [C]. American Astronomical Society Meeting Abstracts. 2020.
- [20] 孙培清. 基于 STFT 的雷达信号数字信道化侦收及实现方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- SUN P Q. Research on methods and implement of radar signal digital channelized reconnaissance based on STFT [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [21] 王宏伟. 基于傅立叶变换的数字信道化及相关技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- WANG H W. Digital channelized and correlative technology based on fourier transform [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [22] 汪丽. 毫秒脉冲星平均脉冲消色散和去噪方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- WANG L. Millisecond pulsars mean pulse dispelrsition-limiting and de-noising methods research [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [23] 倪广仁, 杨廷高, 柯熙政, 等. 毫秒脉冲星计时的方法和发展研究 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2000(6): 781-785.
- NI G R, YANG T G, KE X ZH, et al. A research on the timing method and the development of millisecond pulsars [J]. *Journal of Xidian University*, 2000(6): 781-785.
- [24] QIU W, YIN H, ZHANG L, et al. Pulsar based timing for grid synchronization [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3): 2067-2076.

### 作者简介



唐思豪, 2021 年于湖南大学获得硕士学位, 现为湖南大学博士研究生, 主要研究方向为智能检测与信号处理。

E-mail: tangsihao@hnu.edu.cn

**Tang Sihao** received his M. Sc. degree in 2021 from Hunan University. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Hunan University. His main research interest includes intelligent detection and information processing.



姚文轩 (通信作者), 2018 年于美国田纳西大学获得博士学位, 现为湖南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网、广域同步相量测量技术与应用、电能质量监控。

E-mail: wenxuan Yao@hnu.edu.cn

**Yao Wenxuan** (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2018 from The University of Tennessee, USA. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Hunan University. His main research interest includes smart grid, wide-area synchrophasor measurement technology and its application, and power quality monitoring.