

基于序列大数据增量式挖掘算法的多模态通信信号同步方法

杜婧子[†]

(国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心, 北京 100000)

摘要: 在多模态通信信号同步中, 由于信号特征较为复杂, 对后续的频偏估计过程造成了一定的干扰, 导致信号同步处理结果的 TIE 值比较高。为此, 提出了基于序列大数据增量式挖掘算法的多模态通信信号同步方法。通过建立多模态通信信号的信道模型, 采用序列大数据增量式挖掘算法对信号进行聚类处理, 由此提取出不同聚类簇的信号时序特征。结合该特征, 对信号执行 M 次方运算, 从而利用 FFT 变换的方法估计相应的信号频偏。在此基础上, 通过并行捕获的方法对信号频偏进行修正, 从而实现多模态通信信号的同步处理。经过实验测试可知, 该方法在时间间隔误差 (Time Interval Error, TIE) 指标方面表现出了较低的数值水平, 信号的同步效果更优, 在多模态通信领域中有着良好的应用前景。

关键词: 信号同步; 多模态通信信号; 增量式挖掘算法; 序列大数据; 通信信号; 信号处理

中图分类号: TM724

文献标识码: A

Multi Modal Communication Signal Synchronization Method Based on Incremental Mining Algorithm of Sequence Big Data

DU Jingzi[†]

(Patent Examination Cooperation(Beijing) Center of the Patent Office, CNIPA
(China National Intellectual Property Administration), Beijing 100000, China)

Abstract: In multimodal communication signal synchronization, due to the multiple modes of the signal, the characteristics of the signal are more complex, which causes certain interference to the subsequent frequency offset estimation process, resulting in a relatively high TIE value of the signal synchronization processing result. To alleviate this problem, a multimodal communication signal synchronization method based on incremental mining algorithm of sequence big data is proposed. By establishing a channel model for multimodal communication signals and using sequential big data incremental mining algorithms to cluster the signals, the signal temporal characteristics of different clustering clusters are extracted. Based on this feature, perform M operations on the signal to estimate the corresponding signal frequency offset using FFT transform method. On this basis, the signal frequency offset is corrected through parallel capture method to achieve synchronous processing of multimodal communication signals. Through experimental testing, it has been found that this method exhibits a relatively low numerical level in terms of TIE index, with better signal synchronization effect, and has good application prospects in the field of multimodal communication.

Key words: signal synchronization; multimodal communication signals; incremental mining algorithm; sequential big data; communication signals; signal processing

为了确保通信信息的准确性以及通信效率,对信号进行同步处理至关重要。在多模态通信中,不同模态的信号往往需要在时间上保持同步,以确保信息的准确传递。基于此,领域内很多专家及学者展开了研究,提出了许多信号的同步处理方法。

靖永志等提出了基于部分能量耦合线圈的信号同步方法^[1]。以部分能量耦合线圈为依托,建立信号传输的正反向耦合结构。通过抑制同侧信号载波的干扰,实现信号的同步处理。但该方法通常适用于近距离传输,传输距离过长可能会导致信号衰减和失真,影响同步效果。陈敬乔等提出了多普勒效应下的信号同步方法^[2]。通过解析信号传输过程中的多普勒效应影响,计算信号时钟频率的时钟相位。在此基础上,通过卡尔曼滤波处理,调整接收机的信号时钟,从而实现信号的同步。但在实际应用中,多普勒效应本身是基于信号源与接收器之间的相对运动而产生的频率变化现象。因此,在信号同步过程中,任何微小的运动变化都可能导致频率偏移,从而影响同步的准确性。夏晨阳等提出了基于谐波通信的信号同步方法^[3]。根据信号调制的基本原理建立等效数学模型。通过分析信号的互扰影响因素,确定模型的参数取值。结合调参后的模型,在谐波通信过程中进行信号的重制,从而实现信号的同步传输。但谐波通信在传输过程中,可能会受到电网中其他电子设备产生的谐波干扰,导致信号失真或同步误差。姚远翔等提出了基于空域滤波的信号同步方法^[4]。在有色干扰的通信环境下,采用奇异值分解的方法获取多段解调后的信号。结合雅克比旋转法的信号时钟参数处理,利用空域滤波的过程重构信号,从而实现信号的同步处理。但在实际应用中,由于阵列尺寸、费用和功率消耗等限制,阵元数量往往有限,这会影响空域滤波的抗干扰性能和信号同步的准确性。徐兴晨等提出了基于动态比对的信号同步方法^[5]。分析不同引入的信号同步角偏差,并通过延迟补偿的方法进行动态比对,从而对齐相同时刻的信号测量输出值。结合 FPGA 的构建,解算相应的角速率,从而实现信号的同步处理。但动态比对过程中,不同系统之间仍可能存在无法识别的延时差异,这会导致同步角偏差的分析出现误差,影响信号同步的准确性。

考虑到上述研究人员所提出的信号同步方法在实际应用中均存在一定的不足,难以实现多模态信号的同步处理,为此,本研究提出了一种基于序列大数据增量式挖掘算法的多模态通信信号同步方法。该方法对多模态通信信号进行聚类处理,以此进行频偏估计的分析,从而实现通信信号的同步

处理。

1 多模态通信信号同步方法设计

1.1 基于序列大数据增量式挖掘算法提取信号时序特征

不同模态的通信信号之间,在时间上往往具有一定的关联性,这种关联性可以反映通信信号在时间序列上的特征。基于此,本研究采用序列大数据增量式挖掘算法对多模态的通信信号进行分析与处理,提取出相应的信号时序特征。

考虑到多模态通信信号在信道传输过程中存在的衰落问题,采用多普勒谱的方法建立多模态通信信号的信道模型,如公式(1)所示^[6]。

$$S(f) = x_1 \frac{K}{K+1} \delta(f - \rho f_m) + J\left(\frac{x_1}{K+1} + 2x_2\right) \quad (1)$$

式中, S 表示多模态通信信号的信道模型, f 表示信号频率参数, x_1 和 x_2 分别表示两个不同模态的通信信号, K 表示莱斯因子, ρf_m 表示通信信号直射分量的频偏,其中, ρ 表示常数系数, J 表示功率归一化的 Jakes 谱。

在该表达式中,本研究将 ρ 值设置为 1。根据该信道模型,采用序列大数据增量式挖掘算法进行信号特征的分析^[7]。建立信道模型下的通信信号序列大数据表达式,如公式(2)所示。

$$F(x) = S(\omega \cdot \Phi(x) - \rho) \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 表示通信信号在某一模态下的序列大数据表达式, ω 表示角频率, $\Phi(x)$ 表示相位。

根据该表达式中的通信信号角频率及相位参数,采用算法对多模态信号进行增量式挖掘的聚类处理。建立增量式挖掘的关联规则,如公式(3)所示。

$$\begin{cases} R = X \Rightarrow Y \\ X = \omega(x) \otimes S(f) \\ Y = \Phi(x) \otimes S(f) \end{cases} \quad (3)$$

式中, R 表示关联规则, X 表示关联前缀, Y 表示关联后缀。

对多模态通信信号特征进行分析,能够挖掘出有效的关联规则,为算法设置支持度参数和可信度参数的最小值边界^[8]。在满足算法的支持度大于最小支持度的前提下,产生相应的频繁项集。在此基础上,对通信信号的序列大数据进行增量式挖掘处理。定义算法的多项调节参数,如下所示:

局部可达密度参数为:

$$L(x) = 1 / \left[\frac{\sum_{o \in N_k(x)} R(d(x, o))}{|N_k(x)|} \right] \quad (4)$$

式中, $L(x)$ 表示局部可达密度, o 表示最近邻居, d 表示信号与最近邻居之间的距离, $N_k(x)$ 表示 k 个最近邻居的集合。

局部孤立点因子参数为^[9]:

$$P_k(x) = \frac{\sum_{o \in N_k(x)} L(o)/L(x)}{|N_k(x)|} \quad (5)$$

式中, $P_k(x)$ 表示局部孤立点因子。

经过迭代运算后,分析得到算法在增量式挖掘后,得到的核心集合,其表达式如公式(6)所示。

$$G(x) = \frac{\sum_{o \in N_k(x)} \frac{\sigma_{\min}/L(x)}{\lambda_{\min}/P_k(x)}}{|N_k(x)|} \quad (6)$$

式中, $G(x)$ 表示算法输出的核心集合, $\sigma_{\min}$ 表示最小支持度, $\lambda_{\min}$ 表示最小可信度。

经过序列大数据增量式挖掘算法的迭代分析后,将多模态的通信信号以角频率及相位参数为基准进行聚类^[10]。基于此,提取出每个聚类簇的信号时序特征。这一步骤的表达式如公式(7)所示。

$$T(x) = \sum_{i=0}^{f_s} G(x)^p \quad (7)$$

式中, $T(x)$ 表示信号的时序特征, f_s 表示功率谱的最高频率参数, t 表示通信信号在信道中的传输时间, p 表示聚类簇的局部占比。

1.2 估计多模态通信信号频偏

根据提取得到的多模态通信信号的时序特征,本研究通过 FFT 变换的方法估计出信号时序特征相应的频偏,以此确定多模态通信信号的不同步量。

结合提取的时序特征,对信道模型中的多模态通信信号执行 M 次方运算,如公式(8)所示^[11]。

$$r^M(x) = s^M(x) \exp [M(\omega T + \Phi)] + D(x) \quad (8)$$

式中, $r^M(x)$ 表示运算得到的通信信号, $s^M(x)$ 表示执行运算后的基带信号, $D(x)$ 表示高斯白噪声。

在上述运算中, M 的取值由高斯白噪声的复数方差决定。通过上述运算得到去除了调制信息的多模态通信信号。在此基础上,对其进行 FFT 变换处理。假设通信信号仅存在相偏与频偏,以此对执行运算后的信号进行匹配滤波,输出得到如公式(9)所示的信号表达式^[12]。

$$z(x) = s(x) \exp [r^M(x) 2\pi \Delta f k T + \Phi - \theta] \quad (9)$$

式中, $z(x)$ 表示匹配滤波的通信信号, Δf 表示频率偏差, k 表示滤波系数, θ 表示相位偏差。

当通信信号中存在频偏时,信号相应的频谱峰值存在同等的偏移,以此确定通信信号的频偏方

向,并计算信号连续段的平均频谱,如公式(10)所示。

$$\bar{f} = \frac{1}{B} \sum_{k=0}^{B-1} z_x(f) \quad (10)$$

式中, $\bar{f}$ 表示通信信号的平均频谱, B 表示通信信号的某一连续段。

在此基础上,进行加窗处理,如公式(11)所示^[13]。

$$z_x(\bar{f}) = \frac{1}{l} \sum_{-l/2}^{l/2-1} z(x)(f-k) \quad (11)$$

式中, $z_x(\bar{f})$ 表示加窗平滑信号, l 表示加窗处理的窗口长度。

完成通信信号的加窗处理后,信号频谱峰值所对应的频率参数即分析得出的信号频偏。通过在信号频谱峰值建立两个索引点,量化多模态通信信号中存在的频偏,如公式(12)所示^[14]。

$$\Delta f_x = \frac{a_1 + a_2}{2l + b} \cdot f_c \quad (12)$$

式中, Δf_x 表示多模态通信信号的频偏, a_1 和 a_2 分别表示建立的两个索引点, b 表示表示 FFT 点数, f_c 表示多模态通信信号的采样率。

通过上述步骤,完成 FFT 变换分析和对多模态通信信号频偏的估计。

1.3 并行捕获下的多模态通信信号同步处理

针对估计的多模态通信信号的频偏,将该信号与接收端的本地载波进行正交解调,并根据信号周期的码长,对其进行并行捕获的同步处理。

采用 IFFT 的方法对多模态通信信号与本地信号载波进行正交解调,如公式(13)所示^[15]。

$$m(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(\Delta f_x) y(i-n) \quad (13)$$

式中, $m(x)$ 表示正交解调信号, n 表示周期性序列长度, i 表示信号的某段周期性序列, y 表示本地载波。

在此基础上,结合通信信号周期的码长,进行并行捕获和信号频偏问题的同步处理,如公式(14)所示。

$$X(x) = e^{j(\pi \Delta f_x (2nl-l+1)T+\Phi)} \frac{\sin \pi f_c l T}{A \cdot m(x) + \mu(t)} \quad (14)$$

式中, $X(x)$ 表示同步处理的通信信号, e 表示自然常数, A 表示多模态的基带信号幅值, $\mu(t)$ 表示伪码序列的码长。

通过并行捕获处理,对估计的多模态通信信号的频偏进行校正,从而得到同步的通信信号。由此完成基于序列大数据增量式挖掘算法的多模态通信信号同步方法的设计。

2 信号同步实践测试

2.1 多模态通信信号模拟

通信信号往往包含文字、音频、图像、视频等多个模态，基于实际生活中的应用需求，本次实验 PWM 控制器模拟了多模态的通信信号，以此作为本次实验的测试对象。

分别模拟不同模态下的通信信号波形，并利用 PWM 控制器进行复合调制，如图 1 所示。

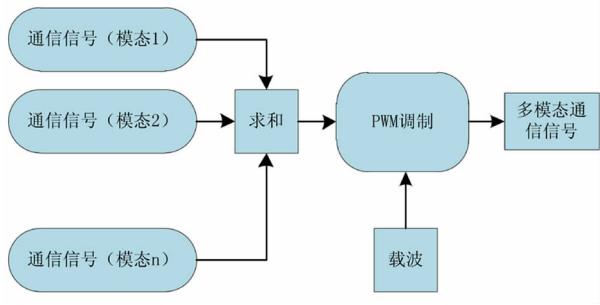


图 1 多模态通信信号的调制

如图 1 所示，通过在 PWM 控制器中加入本地载波，从而对多模态的 n 路通信信号波进行求和，从而输出本次测试的多模态通信信号。

在本次测试中，设置多模态通信信号模拟的本地载波如表 1 所示。

表 1 本地载波参数

参数项	设置值
初相	0.2 弧度
多普勒频率	100 Hz
符号速率	1 kHz
频率变化率	10 Hz/s
信噪比	20 dB
信号间隔	2 dB
载波中心频率	8.1345×10^6 MHz
采样频率	32 MHz
码元个数	100

按照上述参数，通过谐波分解模拟生成多组多模态的通信信号。

2.2 通信信号接收设备

为了验证信号的同步效果，本次实验选用高精度的接收机作为通信信号的目标终端。该设备的性能参数如表 2 所示。

通过统计该设备上接收到多模态通信信号的时间点，分析相应的信号同步性能。

2.3 多模态通信信号同步

在上述测试环境下，对本文所提出的多模态信号同步方法的应用性能进行测试分析。

采集某一时段的多模态通信信号，并采用序列大数据增量式挖掘算法对该信号进行聚类处理，结果如图 2 所示。

表 2 通信信号接收设备参数

性能指标	参数
频率范围	150 K–30 MHz
脉冲频率精度	100 ppm
脉冲宽度	6 ns
输出阻抗	50 Ω
脉冲电压幅度	26.3 V
脉冲重复频率	1–200 Hz
输出衰减器	0 ~ 50 dB

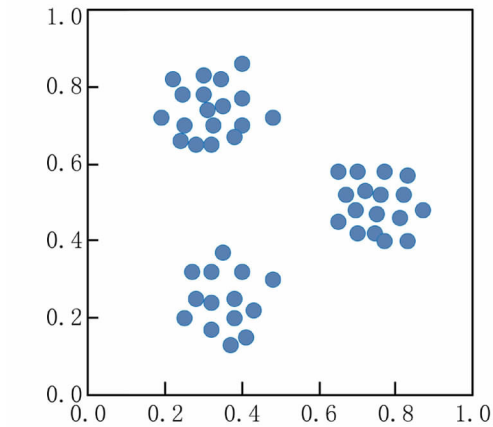


图 2 通信信号聚类

如图 2 所示，在序列大数据增量式挖掘算法的迭代处理下，多模态通信信号聚类成了三个聚类簇。这一结果说明本次测试所选取的通信信号主要包含三个模态。在此基础上，提取出每个聚类簇的通信信号时序特征，从而利用 FFT 变换的方法进行信号频偏的估计。在相同的窗长参数下，得到通信信号的频偏估计结果如表 3 所示。

表 3 多模态通信信号频偏估计

窗长	信号码长	信噪比/dB	估计载波频率/Hz	实际载波频率/Hz
26	200	∞	10000	10000
26	200	20	10000	10000
26	200	14	10000	10000
26	200	12	10000	10000
26	200	10	9991.1	10000
26	200	8.5	9980.8	10000
26	200	7.5	9967.2	10000

对表 3 中估计的通信信号频偏精度进行分析，结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，本文方法根据聚类的通信信号时序特征的频偏估计结果，表现出了较高的精度水平，均方误差曲线表现优良。通过对估计的信号

频偏进行并行捕获下的修正,从而实现信号的同步处理。

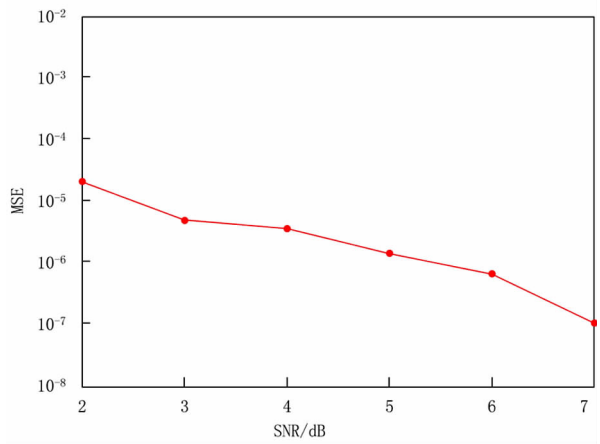


图 3 通信信号频偏估计精度

2.4 同步效果对比

针对多模态通信信号的应用需求,本次测试以 TIE 指标为参考,采用对比分析的过程验证本文方法的信号同步性能。

分别采用基于部分能量耦合线圈的信号同步方法、基于谐波通讯的信号同步方法、基于空域滤波的信号同步方法以及基于动态比对的信号同步方法作为本次实验的对比方法,测试得到如图 4 所示的信号同步结果。

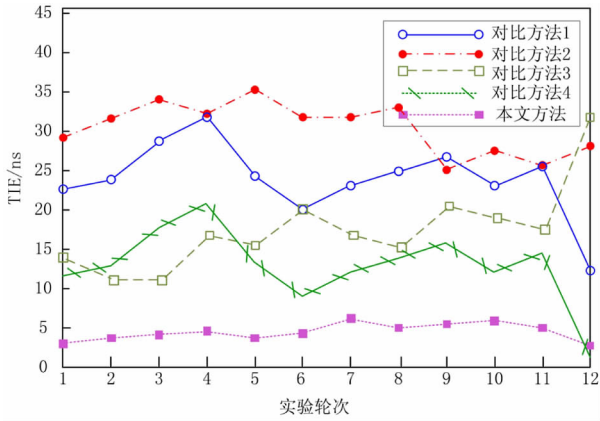


图 4 信号同步效果对比

本次实验共开展了 12 个轮次的对比测试,从图 4 所示的结果可以看出,在多种信号同步方法中,仅本文方法在各个实验轮次所表现出的 TIE 指标数值均比较低。这一结果说明本文方法的信号同步处理结果不仅较为稳定,且能够保持较低的 TIE 水平,信号的同步水平更高,时间间隔更小。由此可见,在多模态的通信信号同步实践中,本文方法表现出了更优的处理效果,有着更高的实践应用价值。

3 结 论

针对多模态信号在传输过程中存在的延迟问题,提出了基于序列大数据增量式挖掘算法的多模态通信信号同步方法。多模态通信信号具有多样性和复杂性,而增量式挖掘算法能够灵活应对这种多样性,通过深入挖掘数据之间的关联性和规律,更准确地识别多模态通信信号的特征,从而实现更精确的同步,在实践测试中表现出了优异的信号同步性能。在智能家居、物联网、车联网等依赖于同步通信的领域,本文方法的应用能够满足这些领域中的复杂通信需求,这对于用户来说意味着更流畅、更稳定的通信体验,有助于提升用户的满意度和忠诚度,从而进一步推动相关技术的快速发展和应用落地。

参考文献

[1] 靖永志, 譙柯, 付康, 等. 基于部分能量耦合线圈的无线能量与信号同步传输方法研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28 (7): 43—54.

[2] 陈敬乔, 汪颜, 张静涛. 多普勒效应下的跳频信号定时同步算法研究[J]. 无线电通信技术, 2024, 50 (4): 765—770.

[3] 夏晨阳, 鄢家安, 任刚, 等. 基于谐波通讯的无线电能与反向信号同步传输技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (13): 5297—5308.

[4] 姚远翔, 马文峰, 王聪, 等. 基于空域滤波的抗干扰信号同步算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2023, 43 (1): 38—43.

[5] 徐兴晨, 朱维斌, 黄垚, 等. 一种转台测角系统动态比对的信号同步方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (12): 112—119.

[6] 靖永志, 付康, 譙柯, 等. 基于积分解调的无线能量与信号同步传输方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39 (14): 4270—4281.

[7] 施志明, 董玮, 张军军, 等. 基于动态谱线插值的新能源场站同步基准信号检测方法[J]. 电网技术, 2024, 48 (1): 229—243.

[8] 靖永志, 鲁林海, 冯伟, 等. 基于 OFDM 的无线信号与电能反向同步传输方法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (8): 2856—2866.

[9] 靖永志, 冯伟, 王森, 等. 磁浮车空闲传感器无线供电与信号同步传输方法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58 (4): 965—974.

[10] 徐佳伟, 刘迢迢, 郑旭媛, 等. 工作记忆编码腹侧海马和内侧前额叶皮层局部场电位信号的相位同步分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (13): 5170—5175.

[11] 李汉宁, 李恒武, 高勇. 激光网络目标加密信号同步传输方法研究[J]. 激光杂志, 2022, 43 (3): 164—168.

[12] 何其恢, 朱立东. 一种基于双图案的卫星信号能量检测粗同步方法[J]. 电子学报, 2022, 50 (3): 524—532.

[13] 孙明杰, 周林, 刘永进, 等. Alpha 稳定噪声中频移键控信号的联合同步估计[J]. 探测与控制学报, 2021, 43 (6): 78—83.

[14] 徐砚天, 黄晓敏, 李浩明, 等. 多芯片小数分频锁相环输出信号相位同步设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55 (9): 1788—1794.

[15] 赵仕良, 谷婧, 张婕, 等. 任意占空比数字信号位同步时钟盲提取的数字实现[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50 (5): 710—719.