

5G 环境下基于压缩感知的风电场运行信号多路采集方法

樊志勇¹

FAN Zhiyong

摘要

风电场规模庞大, 每台风力发电机都需进行信号采集以监测其运行状态。尽管 5G 通信环境显著提升了网络性能, 但传统的单路信号采集方式依然效率低下。这种逐一处理风电场运行信号的方式容易受到环境干扰和信号衰减的影响, 导致采集到的信号质量不佳, 降低了信号的准确性和可靠性。为此, 提出一种基于压缩感知风电场运行信号多路采集方法。充分利用 5G 专网结合网关设备的优势, 将采集的风场信息实时、高速、低延迟地传回升压站, 确保了风场信息的实时性和准确性。在接收到风场图信息后, 采用测量矩阵对信号进行压缩, 通过压缩感知技术寻找最优稀疏系数, 分析信号最真实的表示方式, 降低噪声干扰, 并重建出与原始信号相近的高质量信号。经过压缩后的信号可能仍含有高频噪声或干扰, 使用低通滤波技术有效滤除这些高频噪声和干扰, 使输出信号更加纯净。最后, 运用多路选择技术和快速傅里叶变换 (FFT) 将采集到的时域信号转换成频域信息, 完成多路信号的精准采集。实验结果表明, 应用该方法后, 风电场运行信号波形与原信号波形高度一致, 采集召回率和数据覆盖率始终保持在较高水平, 为风电场的稳定运行和高效管理提供了有力支持。

关键词

5G 环境; 压缩感知; 风电场; 信号; 多路采集

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.06.031

0 引言

随着可再生能源的持续进步, 风电场已成为能源结构中的重要组成部分。风电场的运行安全和效率, 对于能源的可持续发展和经济效益具有重大意义^[1]。随着风电场规模的不断扩大和技术的快速进步, 对风电机组的实时监测、状态评估和运行管理的需求愈发迫切。风电场运行信号蕴含着大量的数据, 如何从这些数据中提炼出有价值的信息, 需要借助数据挖掘、机器学习和智能算法等技术^[2]。文献[3]和文献[4]中分别提出了基于改进强跟踪无迹卡尔曼滤波的电力信号采集跟踪方法、基于有限时间观测器的电力信号辨识采集方法。但这些传统方法往往采用单路采集方式, 对风电场运行信号进行逐一采集, 采集效率相对低下, 难以满足大规模风电场实时监控的需求。此外, 这些方法还容易受到环境干扰和信号衰减的影响, 导致采集到的信号准确度不高。

多路采集能够获取更多多样化和丰富的数据源, 为风电场运行数据的深入分析和智能管理提供了强有力的数据支撑。为了充分发挥这些优势, 本研究设计了基于压缩感知风电场运行信号多路采集方法, 并在 5G 环境下进行了实施。这一创新性的方法不仅突破了传统单路采集方式的局限, 显

著提高了采集效率, 而且在保证信号的准确性和可靠性方面也取得了显著成效。通过利用 5G 专网结合网关设备的优势, 可以全方位地监控风电场的运行状态, 及时发现潜在的问题, 保障风电场的稳定运行。

1 风电场运行信号多路采集

1.1 基于压缩感知法重构风电场运行信号

在风电场内部署 5G 专网, 5G 专网提供了高带宽和低延迟的网络连接, 结合网关设备, 可以有效地将风场设备采集的实时数据快速、准确地传输到升压站。测控装置通过与网关设备的连接, 将风电场内的各种运行信号进行采集和处理。通过接收 5G 专网信号, 能够进行低时延的数据传输, 确保了风电场运行信号的实时性。在这一过程中, 网关设备要求能够在出现故障时快速恢复数据传输, 保证风电场运行的稳定性。在此基础上, 通过压缩感知理论缩小采集成本。首先对信号进行稀疏表示, 根据表示情况进行压缩测量, 从而完成信号重构。

当风电场中的离散信号有非零元素时, 信号就具备稀疏性, 满足只含有 k 个非零元素特征。对采集的离散信号 i 进行变换, 从而保留原信号中的信息。设样本信号为 x , 在字典矩阵中选择一组向量与空间中的另一组向量正交, 且线性无关。将信号表示为正交基中的向量线性组合, 则信号 x 的

1. 北京京能清洁能源电力股份有限公司北京分公司 北京 100025

稀疏表示为:

$$x = \sum_{i=1}^N k \lambda_i \quad (1)$$

式中: λ 为稀疏系数。

在对信号 x 作正交基变换后, 通过压缩感知对信号矩阵进行线性测量。通过矩阵将原始信号投影为测量值, 使其长度小于原始信号的长度。通过矩阵进行压缩测量, 从而获得信号 x 的测量向量 $[y]=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。将测量向量通过投影获得更有用的信息, 获得数据的重构结果。当采集数据信号能够完整时, 要确保矩阵约束等距^[5]。

此外, 在信号重构过程中, 针对数据采集到的每一个节点构建观察矩阵。所有节点都会执行相同的压缩采集行为。重建覆盖 $L \times L$ 个目标的数据, 整合各个节点的测量矩阵。测量矩阵能够将信号从高维空间映射到低维空间, 通过寻找最优的稀疏系数, 能够更准确地描述信号的本质特征。这样不仅可以降低信号的存储和传输成本, 还能在压缩的过程中降低噪声的干扰, 提高信号的信噪比。最优稀疏系数计算公式为:

$$\begin{aligned} \theta' &= \arg \min \|\theta\| \\ \theta &= \frac{L^2 y}{J} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: J 为感知矩阵; θ 为最优稀疏系数。通过计算得到最优稀疏系数后, 重建出与原始信号最接近的信号为:

$$x' = y \times \theta' \quad (3)$$

通过重建与原始信号接近的信号, 能够更准确地获取风场的信息, 为风场的运行和管理提供有力支持。

1.2 混频重构信号滤波

在信号压缩过程中, 尽管已通过寻找最优稀疏系数降低了噪声干扰, 但压缩后的信号仍可能含有高频噪声。低通滤波器具有将高频信号部分削减的特性, 同时保留低频信号部分的特点。因此, 本研究提出采用低通滤波技术有效消除这些高频噪声和干扰。低通滤波器的应用, 能够精准地剔除高频成分, 保留信号的低频部分, 使输出信号更加纯净和稳定。这有助于提升信号质量, 从而实现更准确可靠的风场信息提取。

针对重构后的信号, 通过混频器与本地振荡器产生的信号进行混频。经过混频后的信号, 在频率轴的每一点都包含了目标信号的全局信息。为实现高速率采集, 使用低通滤波技术, 将信号中的高频部分滤除^[6]。得到的中频信号再通过滤波器进行滤波, 滤除不需要的噪声和干扰信号, 保留所需的信号成分, 从而得到更加纯净的输出信号。

设定低通滤波器的卷积函数为 h , 滤波器输出为 z , 则其表达式为:

$$z = \frac{a}{x'} \times \int_0^t h \times (p_\beta \times b_t) dt \quad (4)$$

式中: p 为极化点; a 为最大衰减系数; p_β 为截止频率。根据巴特沃斯滤波器的幅频特性, 确定滤波器的阶数。在确定滤波器的阶数时, 根据所需的过渡带宽和阻带衰减来选择适当的阶数。最后进行去归一化操作, 将归一化原型系统函数转换为实际参数和变量, 得到实际的滤波器系统函数。去归一化操作可以将系统函数的参数和变量从归一化值转换为实际值, 以获得滤波器的系统函数, 从而完成对混频重构信号的滤波, 获取更纯净的信号^[7]。

1.3 多路选择法采集运行信号

在多路信号采集过程中, 通常需要同时处理多个信号源。如果直接在时域中对这些信号进行分析和处理, 可能会因为信号之间的干扰和重叠而难以得到准确的结果。而通过在频域中进行分析, 可以更容易地分离和识别各个信号源的频率成分, 从而实现对多路信号的准确采集和处理。为此, 本研究运用多路选择技术, 通过快速傅里叶变换 (FFT) 将采集到的时域信号转换成频域信息, 完成多路信号采集。详细过程描述如下。

在单个 FPGA 上运用串并结合的方式, 在采集过程中能够满足精准要求, 可以对多路风电场运行信号进行合理采集。设定需要采集信号为 N 路, 每路信号的采集率为 p_F 。使用一个多路选择器来选择要采集的信号路数。在每个传感器输出的信号中, 设定两组可以反映传感器移动距离的信号。当 FPGA 发出 2 位控制信号时, 多路选择开关会根据信号的状态进行相应的操作。当 FPGA 的控制信号呈现为“00”时, 选择器将输出设定为 1 A, 此时 FPGA 所接收到的正是来自传感器 1 的信号。随着控制信号进入下一个状态, 输出切换至 2 A, 这时便开始了对传感器信号的采集过程, 从而实现了对传感器数据的精确获取^[8]。依此类推, 形成一个循环采集的过程, 减少单个信号源的负载, 避免因负载过大而导致的信号失真。

在采集过程中, 多路并行采集用状态机完成多路选择的控制, 及时地获取到各个信号源的状态变化。每次选择一路信号进行采集, 采集周期的计算公式为:

$$T = \frac{1}{p_F} \quad (5)$$

在一个采集周期内, 使用串并结合采集的方法, 将 m 位采集数据组合成一个数据包。在 FPGA 上, 使用一个 FIFO 缓冲区来存储每个数据包, 以便后续处理。当 FIFO 达到一定深度时, 通过 FFT 变换将采集到的时域信号转换成频域信息, 通过频谱分析后的结果进行输出, 完成多路选择技术的多路信号采集, 可以在单 FPGA 上实时采集和处理数据, 在同一时间内从多个信号源中选取信号, 从而提高了信号采集的效率。

2 实验测试与分析

为验证上述设计的 5G 环境下基于压缩感知风电场运行信号多路采集方法的实际应用性能,设计如下实验。

2.1 搭建实验环境

以 M 风电场为例,采用 2 MW 风力发电机组。通过 500 V/30 kV 升压变接入电网。运用升压变低压侧的电压互感器进行采集。信号传输线路采用带屏蔽的电缆,数据采集卡具有电压隔离的作用。根据现场实际情况,需要测量风机的不同路输入,最高采集频率可以达到 200 kB/s,并且各个通道可通过软件编程的方式选择不同的输入电压范围。风机的额定功率为 2 MW,在选择电流传感器时,其额定电流应该至少为 1250 A,且留有 10%~20% 的空余。当风机升压变处于额定电流运行时,实现现场信号与数据采集卡内部弱电电路的隔离的目的,需要对输出电压信号进行跟随,以增强信号驱动能力。实验现场如图 1 所示。实验过程中,网络多源数据采用 PDP MIS 系统有效上传数据,选择关系数据库 SQL 来对数据库中的信息数据进行查询等操作。



图 1 实验现场

设置三个测试小组,将本文方法作为实验组,文献 [3]、文献 [4] 中的方法分别作为对照 1、2 组。根据计算信号重构与原信号之间的误差,判断采集方法的精准性。

2.2 结果与分析

通过对硬件电路进行调试,并运用不同方法在整个系统上开始对风电场运行信号进行感知采集,得到三个小组重构输出的波形如图 2 所示。分析图 2 中的结果可知,实验组的风电场运行信号波形与原信号波形基本一致,说明实验组的信号重构误差最小,能够精准完成感知采集。这是因为本文方法利用压缩感知技术对信号进行压缩和重建。通过测量矩阵寻找最优稀疏系数并分析信号的最真实表示方式,能够降低噪声干扰并提高信号的准确性和可靠性。同时,在重建信号后,还采用低通滤波技术滤除高频噪声或干扰,保留信号的低频部分,使输出信号更加纯净。这些步骤的组合能够实现风电场运行信号的精准感知采集,从而确保实验组在信号重构过程中的误差达到最小。

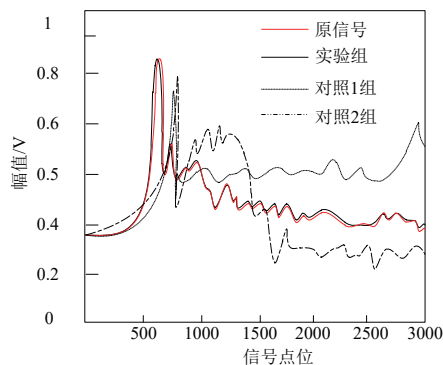


图 2 重构输出信号结果

在此基础上,分析不同方法的召回率(正确采集到的信号数量占实际信号数量的比例)、数据覆盖率(成功采集的数据量占总需求数据量的比例),统计结果分别如图 3、图 4 所示。

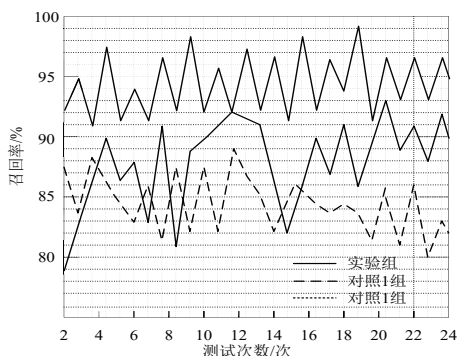


图 3 不同方法的召回率分析

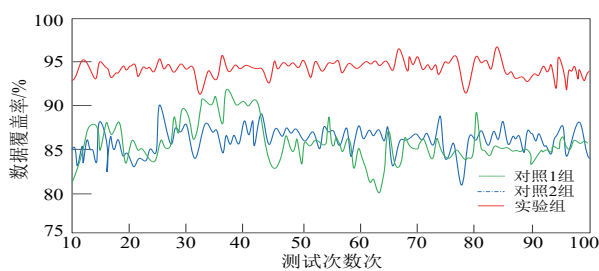


图 4 不同方法的数据覆盖率分析

分析图 3 和图 4 可知,在多次实验中,实验组的采集召回率和数据覆盖率始终保持在 90% 以上,明显高于两个对照组的采集效果,这是因为实验组方法利用 5G 专网结合网关设备,实现了高速、低延迟的数据传输,从而确保了风场信息的实时性和准确性。同时,采用测量矩阵对信号进行压缩,并通过压缩感知技术寻找最优稀疏系数,进一步提高了信号的准确性和可靠性。此外,实验组还使用了低通滤波技术,有效滤除了高频噪声或干扰,保留了信号的低频部分,使输出信号更加纯净。这一系列措施共同作用,提高了信号质量,减少了误判和漏判的可能性,从而使得实验组的采集召回率和数据覆盖率始终保持在较高水平。

3 结语

传统的单路信号采集方式效率低下,易受外界环境干扰。5G 通信环境提高了信号传输性能,但仍存在准确性和可靠性不高的问题。为此,本研究提出了一种基于压缩感知的风电场运行信号多路采集方法。实验结果表明,所提方法能够实现 对风电场运行信号的精准感知采集,采集召回率和数据覆盖率始终保持在较高水平。尽管该方法在风电场信号采集方面取得了显著成效,但仍存在一些不足之处。例如,风机安装测控装置的过程中可能会遇到安装位置选择、设备兼容性问题,这些都可能影响到信号采集的质量和稳定性。此外,数据采集的稳定性问题也是当前需要解决的关键问题之一,因为不稳定的采集过程可能导致数据丢失或失真,进而影响到后续的分析 and 决策。在今后的研究中,将根据风电场规模的不断扩大和运营需求的变化,对所提出的方法进行灵活的配置和升级,以确保其能够适应不同阶段的风电场运营需求,实现更高效、准确的信号采集与分析。

参考文献:

[1] 陈禹,高翔,徐建航,等.多源数据聚类下电力二次系统故障检测方法[J].自动化技术与应用,2023,42(9):45-48.
[2] 王海安,郭改枝,张鹏举.基于 ATmega128 的连续信号压缩感知实现方法[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2023,

54(2): 206-212.

[3] 何炜琨,张莹,王晓亮,等.基于 LRMO 及 MCA 的机载雷达风电场杂波抑制方法[J].信号处理,2022,38(4):759-769.
[4] 丁毅,王亚林,李文艺,等.基于 SHF 信号采集和下混频技术的方波下局部放电测试方法[J].高电压技术,2022,48(3): 1133-1141.
[5] 杨挺,杨风霞,叶芷杉,等.基于动态采集压缩感知的超谐波监测方法[J].中国电机工程学报,2023,43(16):6278-6288.
[6] 王艳茹,尹喜阳,欧清海,等.基于能量共享与交易协同的 5G 融合配电网基站储能调控方法[J].中国电力,2023,56(6): 61-70.
[7] 岳衡,张小飞,石莎.基于压缩感知平行因子分解的电力系统谐波与间谐波频率估计方法[J].数据采集与处理,2023,38(1):74-84.
[8] 郝金鹏,吴波,马云龙,等.基于数据挖掘的电力在线技术监督平台设计[J].电气自动化,2023,45(4):20-22.

【作者简介】

樊志勇(1982—),男,内蒙古呼和浩特人,本科,工程师,研究方向:电力工程。

(收稿日期:2024-03-29)

(上接第 141 页)

4 结语

航管一次雷达将飞机目标监视与气象探测功能集于一体,具备独立的气象通道用于气象检测。提供高数据率的飞行和气象信息,可以准确探测出各种危险天气,特别是对于影响航行的短时危险天气,能有效增加预警的时间。气象信息能反映暴雨、冰雹、风切变等多种天气过程及其发展趋势。航管一次雷达如何利用气象数据服务于各个机场的飞机起降和飞行训练,具有十分重要的意义,也是航管一次雷达未来需要重点研究的方向之一。

参考文献:

[1] 张辉.航管一次监视雷达—JY-21[J].现代电子,2000(3):14-19+29.
[2] 张尉,张兴敢.空管一次雷达[M].北京:国防工业出版社,2015.
[3] 陈忠先,王景嗣.JY-21 全固态航管一次监视雷达[J].现代电子,2002(3):10-16+32.
[4] 马晓艳.寄生于航管一次雷达中的气象检测系统[D].南京:南京理工大学,2008.

[5] 俞中良.3821 近程空管一次雷达产业化进展情况[J].空中交通管理,2010(8):10-12.
[6] 张辉.航管一次监视雷达中气象通道的设计[J].现代电子,2001(2): 5-9+24.
[7] 牛忠文,任翠锋,鞠金山,等.大口径高精度航管雷达天线结构设计与应用[J].雷达科学与技术,2015,13(1):103-108+112.
[8] 张焱.航管一次雷达接收/信号产生子系统[J].现代雷达,2011,33(6):83-86.
[9] 孙实泽.航管一次机场监视雷达信号处理设计[J].现代电子技术,2007(23):4-6.
[10] 颜波涛.远程航路监视一次雷达信号处理实现[J].雷达与对抗,2011,31(2):58-62.

【作者简介】

金毅仁(1978—),男,安徽合肥人,硕士研究生,工程师,研究方向:计算机控制技术。

张晓飞(1982—),男,安徽宿州人,本科,工程师,研究方向:雷达总体技术。

(收稿日期:2024-03-31)