

文章编号: 2095-4980(2023)08-0997-06

一种基于 MPLS 的电力线载波通信可区分故障恢复机制

李 飞, 申洪涛, 史 轮, 王鸿玺, 高 波

(国网河北省电力有限公司 营销服务中心, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 电力线载波通信面向广泛的设备对设备的数据交互和通信应用, 具有免于部署, 易于直连通信的优势, 成为一种有效快捷的新型通信方式。但在使用中经常由于通信拥塞或电力干扰, 造成各种通信故障, 故需要高效的恢复机制保证数据可靠传输。本文引入多标记交换协议(MPLS)技术, 设计了一种新型的电力线载波通信可区分故障恢复算法 Diff_RECV, 在考虑不同生存性服务质量(QoS)要求的同时, 将保护恢复机制和重路径恢复机制结合, 实现了区分流量保护与恢复。通过实验验证, 所提出的 Diff_RECV 算法能够全部恢复故障业务流量, 并且比扩散法有更高的恢复速度。

关键词: 电力线载波通信; 故障恢复; 服务质量; 自相似性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021250

A differentiated fault recovery mechanism for power line carrier communication based on Multi-Protocol Label Switching

LI Fei, SHEN Hongtao, SHI Lun, WANG Hongxi, GAO Bo

(Marketing Service Center of State Grid Hebei Electric Power Co. Ltd., Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: Power line carrier communication is a new effective communication method for a wide range of Device to Device(D2D) data exchange and communication applications, which bears the advantages of free deployment and easy direct connection. However, due to the communication congestion or electric power interference, different kinds of failures are often caused in the actual system. An efficient recovery mechanism is necessary to ensure reliable data transmission. By introducing Multi-Protocol Label Switching(MPLS) technology, a novel power line carrier communication distinguishable fault recovery algorithm, Diff-RECV, is proposed. While considering different survivability Quality of Service(QoS) requirements, by combining protection and recovery mechanism with multipath recovery mechanism, differentiated traffic protection and recovery are realized. The proposed Diff-RECV algorithm is verified by experiments. The results show that it can not only recover 100% traffic, but also has higher recovery speed than spread method.

Keywords: power line carrier communication; fault recovery; Quality of Service; self similarity

电力线载波通信作为一种新兴的局域网通信方式, 具有免于部署, 易于设备与设备(D2D)直连通信的优势^[1]。正常情况下, 网络通过边缘计算网关设备或集中器进行业务流量控制以维护整个网络的性能, 避免拥塞形成。但由于载波信道质量问题, 网络中仍然会存在传输故障, 就需要有效的故障恢复机制, 以快速恢复中断流量的传输。在以太网或 IP 网络中, 开放系统互连(Open Systems Interconnection, OSI)体系中多层协议上都设置了故障恢复功能, 保证可靠连接和端到端服务质量(QoS)^[2]。例如, 媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层保护恢复机制实现 20~50 ms 的恢复时间内链路故障恢复, 但是它仅发起与故障链路上的修复; 网络层重路由机制是建立在三层协议基础上的一种恢复机制, 其通过重新计算出一条信源-信宿间路由路径, 由新的路径来传送业务, 实现通信恢复。由于其突破了单一链路的局限, 而是全网路由配置, 因此具更强的灵活性和适配性。但其缺陷是重路由计算速度慢, 导致恢复时间长, 通常需要 50~500 ms。故并不适用于高优先级时延敏感性业务。而在更简

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-16

基金项目: 国家电网河北省电力公司科技资助项目(kj2020-058)

洁的电力线载波通信网络中,重路由保护机制更加匮乏,造成通信质量比设计更加恶劣,亟需研究针对电力线载波通信的高效故障恢复机制。

而 MPLS 是一种介于 MAC 层和网络层之间的 2.5 层技术,其具有 MAC 层的快速性,同时又继承了网络层恢复机制的全网路由灵活配置优势^[3-4]。本文将引入电力线载波通信网络中,设计了一种新型的基于多标记交换协议的电力线载波通信可区分故障恢复算法 Diff_RECV,该算法基于不同业务的通信 QoS 需求,融合 2 种 MPLS 恢复机制以实现区分业务的传输保护与通信恢复,并有效提升恢复速度。

1 基于 MPLS 的故障恢复模型

MPLS 协议包含保护转换模型和重路由模型两类恢复机制。

保护转换模型: MPLS 对所需传输业务同时计算 2 条不相交的信源-信宿路径标记交换路径(Label Switching Path, LSP)形成主备保护。采用工作路径 $Path_{ma}$ 传输流量,当工作路径上出现故障,则流量立刻倒换至备用路径上 $Path_{st}$,保证毫秒级切换恢复。

重路由模型: 与保护转换模型不同,在 MPLS 的重路由模型中,并不为每一条工作 LSP 建立相对应的恢复路径。而是在故障发生时,根据当前业务的路由信息和通信 QoS 需求,使用重路由算法建立恢复路径^[5]。其有两种方法:一种是实时路由计算备用路径 $Path_{st}$,依据全网拓扑信息计算路由;另一种是当得到非全部路由信息时,恢复节点通过扩散法在网络中扩散通告消息,直到消息到达另一恢复节点,恢复节点从中选择一条路径执行恢复操作。

分析可知,两种恢复机制各有优缺点。首先,保护切换机制具有毫秒级快速恢复优势,但它需要备用路径的资源预留,即空闲通信资源给备份路径,且在正常情况下不被使用,则对于通信资源相对稀缺的电力线载波通信则很难为其备份空置链路资源。重路由机制存在路径重新计算过程,故恢复时间较长,但其优势在于无需事先资源预留,且可以在不完全知道路由信息的情况下通过扩散法寻路运行。两种机制的性能比较如表 1 所示。

在当前多服务应用环境中,如 D2D 的不同类型、不同属性的数据交互,以及不同上层应用,业务或数据流都被分成多种级别区别对待,但在故障发生时,现有的恢复机制并不区分业务或数据的优先级别和通信 QoS 要求,采用统一的无区分保护策略进行恢复。在网络中资源不充足时,尤其是针对电力线载波通信,则很难保证有较高 QoS 要求的应用得到更快的恢复。

表 1 MPLS 恢复机制的比较

	protection conversion	rerouting
resource efficiency	low	high
control overhead	high	low
recovery control	simple	complexity
recovery rate	fast	slow
number of messages	less	more

2 电力线载波通信流量分析

从数据类型的角度分析,电力线载波通信承载数据可以分为由时间驱动的确定性数据和由事件驱动的非确定性数据^[6]。确定性数据的数据包的大小为固定值,而与之相反,非确定性数据是一种无规则的流量行为,其传输时间与通信量大小不固定^[7]。虽然这类数据在网络中所占比重不大,但其往往是控制类核心数据,具有对面向对象的重要性。

时间驱动型确定性流量多是周期性数据,即数据包按预定周期定时触发,数据包长度也为定长。时间驱动型确定性流可用如下数学模型表示:

$$F=(L, T, D) \quad (1)$$

式中: L 为数据报文长度; T 为预设周期时间间隔; D 为数据包从产生至到达目的节点所允许的最大时延。

非确定性流量属于事件驱动型数据,虽然业务的突发行为不尽相同,无法确定其数据包长度和通信数据量大小,但其传输前后时刻上却是明显相关的,使得不确定性流量表现出明显的自相似与多重分形特征^[8]。

1) 自相似性是指局部结构和整体结构有一定程度的一致性,结构包括时空两个维度。而正是由于流量的自相似性,则在时间尺度上呈现流量突发性,即短时间内较大流量突发^[9]。判定一个流量序列是否具有自相似性常用 Hurst 系数 H 判断,当 $H < 0.5$,则判定不具有自相似性; $H > 0.5$,具有自相似特征,且 H 值越大表明流量序列的自相似性越强,短期突发性也越高, $H \in [0, 1]$ 。

2) 分形性是指网络流量分布不均。上述衡量自相似性的 Hurst 指数仅是描述时序的单分形特性。然而实际的网络流量在不同的长短时间尺度上具有不同的流量统计特征，因此电力线载波通信系统不仅仅表现出自相似这样的单分形特性，而是一个更为复杂的分形过程，即非确定性流量在不同时间尺度上的多重分形特性^[10]。

进一步将非确定性流量表述为随机型数据流。其在任意选取的观测时段，数据报文前后到达情况无任何相关性，即任何两个互斥时间段内到达的统计数据包数目是相互独立的。随机型数据流可用泊松过程来近似表示，即在时间段 $[s, s+t]$ 内，有 k 个随机型数据包到达的概率服从：

$$P\{A(t+s)-A(s)=k\}=\frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (2)$$

式中： λ 为数据包的平均到达率； $A(t)$ 为数据包到达量。

借助随机网络演算理论可对非确定性自相似数据流进行建模：

$$A_{\text{LFNS}}(t, x) \sim_{\text{vb}} \langle f(x), \alpha(t) \rangle \quad (3)$$

式中 $f(x) = \min(1, C_M x^{-\gamma(1-H)})$,

$$C_M = c_1^\gamma \int_R \sup_{t \in \mathbb{N}} \left[\frac{(t-x)_+^{H-\frac{1}{\gamma}} - (-x)_+^{H-\frac{1}{\gamma}}}{1+(\rho-c_2)t} \right]^\gamma dx \quad (4)$$

式中： γ 是特征指数，表示通信数据量的随机突发程度， $\gamma \in (0, 2)$ ； c_1 为尺度参数，描述统计分布的偏差程度； c_2 为流量均值。

3 基于 MPLS 的可区分多优先级综合控制恢复机制

在本文所研究的电力线载波通信系统中，不同交互数据需求所形成的业务流量的 QoS 需求是通过基于流量工程扩展的资源预留协议(Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering, RSVP-TE)或基于路由受限标签分发协议(Constraint-based Routing Label Distribution Protocol, CR-LDP)所定义和获取的。本文将数据区分为 4 类：SC1 级最高优先应用、SC2 级次高优先应用、SC3 级中优先应用和 SC4 级低优先应用。针对上述 4 种级别，本文提出的可区分故障恢复机制如下所述。

最高优先级—SC1 级，根据数据传输 QoS 需求和感知当前网络状态，同时计算工作路径 $Path_{\text{ma}}$ 和备份路径 $Path_{\text{st}}$ ，两条路径无链路或节点的相交，即 $\{Path_{\text{ma}}\} \cap \{Path_{\text{st}}\} = \emptyset$ 。而且为两路径都预留带宽，保证 SC1 级应用的毫秒级切换恢复。

次高优先级—SC2 级，计算出满足 QoS 要求的工作路径 $Path_{\text{ma}}$ 和互不相交的备份路径 $Path_{\text{st}}$ ，但只为工作路径上预留资源。当网络出现故障，信源节点沿着备份路径出发探索预留带宽资源。若成功预留并到达信宿节点，则立刻返回成功消息 SUCC 通知中间中继节点和信源节点，保留预留资源。随即转换备份路径为工作路径传送数据。否则，返回撤销消息 CL，上报“故障未恢复”。

中优先级—SC3 级，在传输伊始，仅计算出满足 QoS 传输需求的工作路径 $Path_{\text{ma}}$ ，并资源预留；当发生故障时，在保证 SC1 和 SC2 应用恢复所用资源前提下，使用扩散法尽力恢复 SC3 级应用，探寻备用路径 $Path_{\text{st}}$ ，若成功则恢复传输，否则，上报“故障未恢复”。

低优先级—SC4 级，若发生故障，则首先保证 SC1、SC2 和 SC3 应用恢复所用资源前提下，进行本优先级应用恢复，在此期间，存在高级别应用的资源预留对 SC4 的资源抢占。

图 1 表述上述 4 类连接请求恢复机制。

4 可区分故障恢复机制仿真

4.1 仿真环境及评价指标

采用如下电力通信网模型图，是一类典型的设备对设备采用载波通信网络，它有 11 个设备，每个设备上部署载波通信模块，设备间逻辑连接链路 23 条，如图 2 所示。

系统中数据交互流量 500 项，带宽需求在 1~10 Mbps 间，分属在四类优先级占比为 2:3:3:2。对算法的性能评价采用如下 3 个指标：

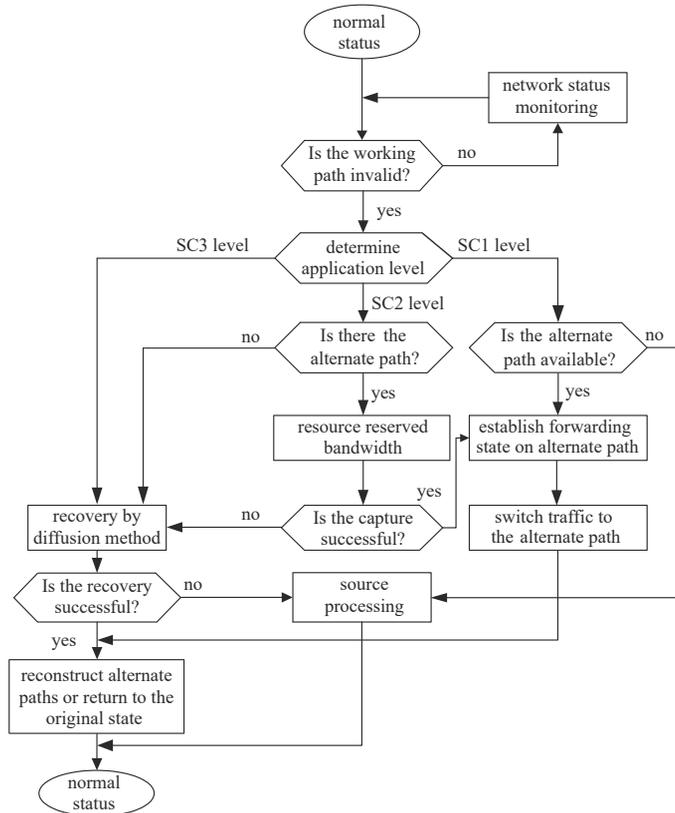


Fig.1 An integrated multi-priority restoration mechanism
图1 可区分多优先级综合控制恢复机制

1) 业务故障恢复率 R 用以度量有多少故障流量得到恢复；以被恢复的流量 RC_i 与总故障流量 FC_i 的比值为恢复率 R 值。如式(5)所示：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M RC_i}{\sum_{i=1}^M FC_i} \quad (5)$$

2) 故障恢复时长 ΔT 用以度量流量被故障中断到恢复过程所用时间；

3) 网络为恢复机制提供的后备资源 RC 用以度量不同恢复机制执行所占用的系统资源。

仿真中选择全备用路径机制(Backup Path, BAKPAH)和全扩散机制(Sufficient Path Diffusion, SPD)作为对比算法，评测本文所提出的可区分故障恢复机制 Diff_RECV 性能。

4.2 仿真结果及分析

图3给出本文算法和对比算法对相同网络服务情况的恢复性能比较。

从图可知，BAKPAH算法因为每条业务都配置了备用路径，则可实现小于13ms以内完成恢复，速度最快。但由于网络不能完全满足所有的不相交备用路径与工作路径 $Path_{ma}$ 及备用路径 $Path_{st}$ 的同时部署和资源预留，导致故障数据流恢复数量有限，因此图中反映即是一段被恢复的数据标示点。而全扩散机制SPD算法和可区分故障恢复机制 Diff_RECV 算法可实现100%业务恢复。并且 Diff_RECV 算法比 SPD 算法所用恢复时间 ΔT 更少，在达到相同的恢复率情况下，Diff_RECV 算法恢复耗时仅是 SPD 算法的52%。其原因在于：全扩散 SPD 算法需要为每条流计算备用路径，导致传输延时增加，而可区分故障恢复机制 Diff_RECV 算法仅为低优先级非时间敏感业务进行备用路径搜索。在保证有效节省网络的同时，执行信源-信宿的后备路径保护恢复速率提升。

分析分属各类优先级的传输业务恢复时间。仍由图3可知，全扩散机制 SPD 算法无法实现 SC1 和 SC2 级别的

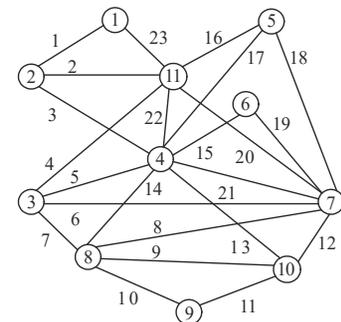


Fig.2 Network topology used in simulation
图2 仿真所用拓扑图

应用在 50 ms 内恢复。而由图 4 可知，本文所提出的可区分故障恢复机制 Diff_RECV 算法则能够在 50 ms 内快速恢复 SC1 和 SC2 级别业务，而且能 100% 地恢复 SC3 级别的应用。

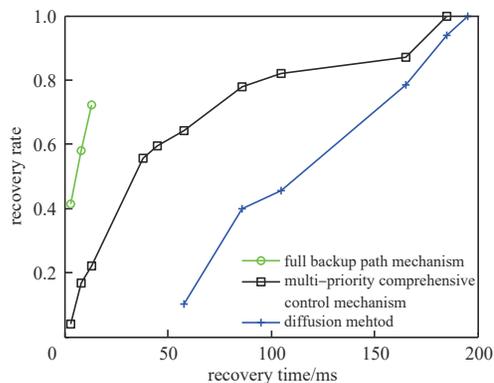


Fig.3 Comparison of the restoration ratio among different algorithms

图 3 不同恢复算法的流量恢复率

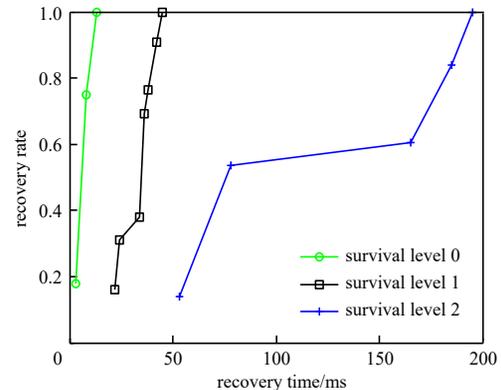


Fig.4 Comparison of the restoration ratio with different traffics in Diff_RECV algorithm

图 4 Diff_RECV 算法恢复各优先级业务的性能对比

5 结论

面向广泛的设备对设备的数据交互和业务应用需求，电力线载波通信成为一种有效快捷的连接数据传输方式。面对由于各种通信故障而需要的恢复机制，本文引入 MPLS 多协议标记交换协议技术，设计了一种新型的电力线载波通信可区分故障恢复算法 Diff_RECV，在考虑不同生存性 QoS 要求的同时，将保护恢复机制和重路径恢复机制结合，实现了区分流量保护与恢复，通过实验验证，所提出的 Diff_RECV 算法有更高的恢复率，更短的恢复时间，并且所占用的网络资源更少。

参考文献：

- [1] 吕剑,李森. 电力线载波通信技术的发展及特点[J]. 通信电源技术, 2020,37(12):144-146. (LYU Jian,LI Sen. Development and characteristics of power line carrier communication technology[J]. Telecom Power Technology, 2020,37(12):144-146.)
- [2] 杨挺,王林林,黄志勇,等. 基于极小连通支配集的电力线载波路由算法[J]. 天津大学学报, 2017,50(12):1235-1240. (YANG Ting,WANG Linlin,HUANG Zhiyong,et al. Power line carrier routing algorithm based on minimum connected dominating set[J]. Journal of Tianjin University, 2017,50(12):1235-1240.)
- [3] ZABALLA E O,FRANCO D,THOMSEN S E,et al. Towards monitoring hybrid next-generation software-defined and service provider MPLS networks[J]. Computer Networks, 2021(6):107960.
- [4] TORRES E S,REALE R F,SAMPAIO L N,et al. A SDN/OpenFlow framework for dynamic resource allocation based on bandwidth allocation model[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020,18(5):853-860.
- [5] BUDIMAN A,SUCIPTO A,DIAN A R. Analysis quality of service routing MPLS OSPF terhadap Gangguan link failure[J]. TechnoCom, 2021,20(1):28-37.
- [6] 杨玲,张涛. 基于负载均衡的电力通信流量分析和预测方法研究[J]. 中国新通信, 2016,18(24):49-53. (YANG Ling,ZHANG Tao. Research on power communication flow analysis and forecast method based on load balancing[J]. China New Communications, 2016,18(24):49-53.)
- [7] 宋仁平,段世刚,尚为良,等. 中压电力线载波通信技术在配电自动化系统的应用[J]. 集成电路应用, 2020,37(2):88-89. (SONG Renping,DUAN Shigang,SHANG Weiliang,et al. Carrier communication technology of medium voltage power line in distribution automation system[J]. Integrated Circuit Application, 2020,37(2):88-89.)
- [8] 孟广雨,于洁潇,杨挺. 基于随机网络演算的分布式能源调控系统时延上界计算[J]. 电工技术学报, 2020,35(11):82-93. (MENG Guangyu,YU Jiexiao,YANG Ting. Upper bound calculation of delay of distributed energy resource coordinated-control system based on stochastic network calculus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(11):82-93.)

(下转第 1042 页)