A-FC：一种用于改善未来校园应急通信的基于活动的容迟路由协议

Chengjun Jiang
计算机科学学院
诺丁汉大学
psxcj11@nottingham.ac.uk

Milena Radenkovic
计算机科学学院
诺丁汉大学
milena.radenkovic@nottingham.ac.uk

摘要

校园应急通信系统对于在台风等突发灾害期间保障学生安全至关重要，此类灾害往往会导致通信基础设施大范围瘫痪。传统的容迟网络（DTN）协议（如直接投递和首次接触）由于时延高、传递率低，难以在此类情境下维持可靠连接。本文提出了基于活动性的首次接触（A-FC）协议，这是一种创新的路由方案，通过强制将消息上传至高度活跃的“教职员工节点”，利用现实世界中的社会角色来克服网络分割。我们基于福州第一中学的拓扑构建了一个真实场景评估环境。仿真结果表明，A-FC协议显著优于基准协议，消息投递概率约为68%，平均延迟降至4311秒。该协议的平均跳数仅为1.68，为校园灾害响应建立了一种低成本、高可靠性的备用通信模型。

关键词：延迟容忍网络（***DTN***）、应急通信、基于活动性的首次接触（***A-FC***）、校园安全、灾害仿真。

1. 引言

1.1 背景

在人口密集的环境中，例如学校校园，通信基础设施是应急响应的生命线。如果发生台风等灾难性事件时，传统通信方式——例如移动蜂窝网络或 Wi-Fi——可能会陷入瘫痪，造成严重后果，包括延误救援工作、妨碍搜救行动。在中国沿海城市福州，强台风频繁来袭。台风登陆后，停电和网络中断十分常见，许多地区还会遭受水淹。这会造成重大经济损失，并威胁民众的生命安全。

[10] 描述 救援人员正在执行排水和疏散居民等任务。例如，如图1所示，台风杜苏芮于2023年对福州造成了严重破坏。



图 1 关于台风杜苏芮的新闻[10]

图2展示了遭受严重破坏的福州奥林匹克体育中心。



图 2 福州奥林匹克体育中心已受到灾害影响。[9]

图3展示了罗源县第一中学， [14]，暴雨由.....引发

t台风引发了山体滑坡。



图3 罗源县第一中学 [14] 公顷 s

受到了灾害的影响。

图4展示了台风杜苏芮过境后福州历史遗址“三坊七巷”遭受的破坏。[15]



图4 福州著名的历史街区“三坊

和七巷”[15] 受到了灾害的影响。

因此，研究 DTN [1] 网络协议在受灾环境中的运行情况并开发新协议具有现实意义。[1]认为，容迟网络（DTN） [1]架构专为此类“挑战性网络”而设计。它不依赖端到端实时连接，而是利用节点（例如携带智能通信设备的学生）的移动性，通过“存储-携带-转发”的方式传输信息。[1]

本文旨在评估现有协议的基本性能，并了解它们在灾害场景中的局限性。

本研究将测试标准 DTN 协议在地震或台风等自然灾害中的性能 [1] ，并将其与基于活动性的首次接触（A-FC）协议进行比较。

尽管直接传输和首次接触等基准协议[3] 已得到广泛认可，

但这些协议在校园环境中因灾害导致通信中断时的有效性仍有待验证。本文旨在通过对比分析，确定最可靠、最适用的校园应急通信策略，从而满足建立高度可靠的应急备用通信系统的需求。

2. DTN协议描述与新型基于活动性的首次接触协议

本节概述本文采用的三种协议，包括两种基准协议和所提出的基于活动性的首次接触（A-FC）协议。

直接投递 [3] 是延迟容忍网络（DTN） [1]中最基本的传输方式。其机制简单明了：源节点存储消息，直到进入目的节点的直接通信范围，此时无需使用任何中继节点即可完成投递 [3]。正如Spyropoulos等人所指出的，该协议可作为传输性能的基准 [3]。在源节点固定的校园应急场景中（例如应急指挥中心），该协议体现了多跳路由的必要性。

首次接触 [3] 是一种标准的单副本路由协议，利用节点移动性，同时将网络开销降至最低。“当前携带节点遇到另一个未持有该消息的节点时，会将消息转发给这个新节点，随后删除自己的副本，以确保网络中仅存在一个副本” [3]。尽管首次接触 [3] 能有效管理通信资源，但其转发策略本质上是“盲目”的[3]。由于该协议的机制无法感知

接收节点，它经常将消息发送到远离目的地的节点，导致时延较高。

2.1 基于活动性的首次接触（A-FC）

为解决首次接触机制存在的盲点，本文提出了基于活动性的首次接触（A-FC）机制。这一设计受到基于社交的路由协议（如 PROPHET [4] 和 BUBBLE Rap [5]）的启发，这些协议利用节点指标（例如转发可靠性或中心性）来做出转发决策。从概念上讲，A-FC 保留了初始接触时的单副本机制，以确保零开销，同时引入基于活动性的“激活式”转发策略。在此，节点被分为“低活跃度”（学生）和“高活跃度”（工作人员）两类，仅当接收节点的活动度高于当前携带节点时，才会激活消息转发。

3. 福州第一中学假设拓扑的构建

这一假设场景采用福州第一中学的实际地理布局，并对其进行了重建，以增强实验的真实性。



图5 福州第一中学校园风光 [12]



图6 福州第一中学的位置 [13]



图7 福州第一中学地图

[11]

图8为 ONE模拟器[2]中的地图。仿真区域设置为 4500m × 4500m，代表整个校园。

该地图定义了校园道路网络。为确保基于地图的移动模型正常运行，已对所有路径节点进行处理，以保证完全连通。通过这一配置，节点会沿实际校园道路移动，而不会穿越建筑物，从而模拟真实的疏散移动。

为在真实的灾害场景中评估所提出的 A-FC协议，我们基于福州第一中学的拓扑构建了一个 ONE模拟器环境 [2] 。仿真涉及 120 个移动节点，分为两个独立的组，以反映

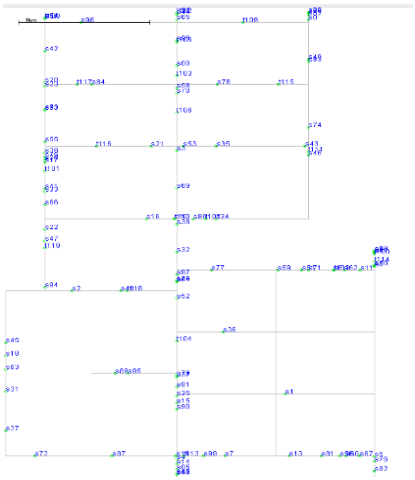

图8 福州第一中学地图

在ONE模拟器中的学校

校园环境：学生组（s，100个节点）和教职员工组（t，20个节点）。

移动模型采用“基于最短路径地图的移动模型”，确保节点沿实际道路移动，而不是穿过建筑物。教职员工节点设置为较高的移动速度（1.0 – 2.0 米/秒），用于模拟充当“数据中继”的安保人员或救援人员。学生节点则以较慢的步行速度移动（0.5 – 1.5 米/秒）。为模拟蜂窝网络中断的通信黑箱场景，所有节点均通过短距离“简单广播接口”（模拟蓝牙）进行通信，通信范围为 10 米，传输速率为 2 Mbps。

流量生成遵循高负载紧急模式：每隔25至35秒生成一条大小为500KB至1MB的消息（模拟疏散地图或语音指令），并将生存时间（TTL）设为300分钟，以确保消息在关键救援窗口期间始终有效。详细仿真参数见表1。

参数	值
模拟器	ONE仿真器
仿真区域	4500米 x 4500米
节点总数	120
节点组	学生（100），工作人员（20）
移动模型	基于最短路径地图的移动模型
速度	学生：0.5–1.5m/s 工作人员：1.0–2.0 m/s
接口	蓝牙（范围 10m，2 Mbps）
消息大小	500 kB – 1 MB
生成间隔	25 – 35 秒
生存时间（TTL）	300 分钟

表1 仿真参数

3.1 台风灾害后福州第一中学的假设场景设计与设置

为评估 A-FC协议在极端条件下的鲁棒性，本实验假设了一个具体的灾害场景：

危机事件：一场超强台风在福州登陆，导致福州第一中学的电力和网络基础设施遭到严重破坏校园。整个校园陷入“通信中断”状态。

紧急任务：位于西南角操场的临时救援指挥中心（由校园工作人员和安保人员组成）急需向被困在东南角宿舍区和北教学楼的学生传达“紧急疏散路线”和“指定集合点”。

通信挑战：台风导致基站无法运行，通信只能依赖学生和工作人员手机通过蓝牙（短距离、低功耗）建立的临时自组网络。关键挑战在于，在电池续航时间有限、移动受限的情况下，迅速且准确地将信息传达给校园内的每一位学生。

图 9 展示了紧急事件的初始状态。中央主干道左侧的两座体育馆因节点密度高、场地充足而被用作救援指挥中心，但仍有许多学生被困在外围区域。例如，学生S65位于右上象限（教学区），已与教学人员失去联系。由于台风造成能见度低、道路损毁，S65将彻底陷入孤立。

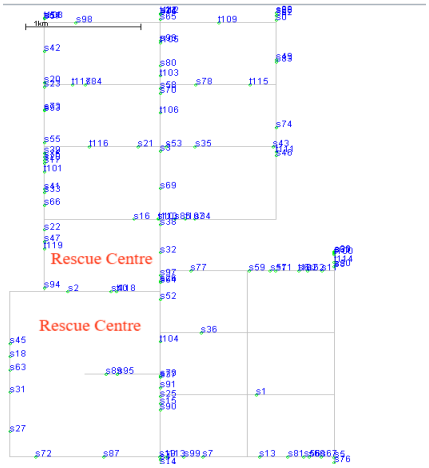

图 9 紧急事件。

图 10 显示，学生S65尝试在教学区内移动以寻求救援。然而，受蓝牙传输范围（10 米）限制，且

附近没有其他学生接收消息，S65仍处于断连状态。

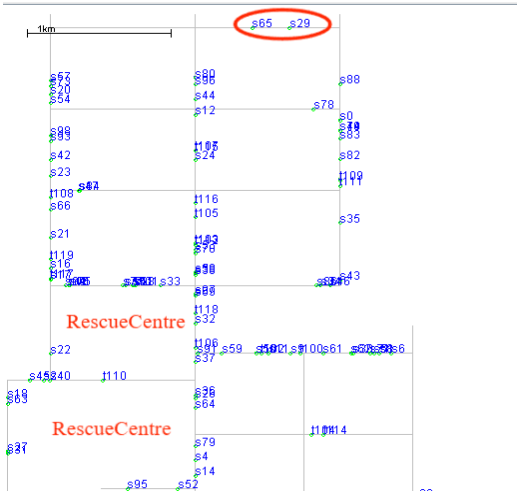

图 10 学生S65寻求帮助

图11展示了通过A-FC协议成功中继的过程。学生节点S65遇到了活跃度很高的教师节点t111。在A-FC协议下，消息成功上传至t111。随后，这位教师向学生S65传递疏散信息并规划路线。如果学生需要帮助，便提供援助；如果学生状况良好，则继续搜寻并传播疏散信息。

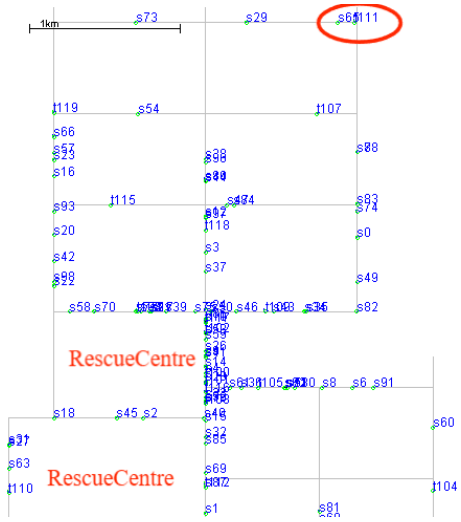

图11 学生S65接收信息

来自教师t111，并获得协助。

4. 多准则多维结果分析

4.1 性能指标与比较数据

我们将所提出的A-FC协议与两种协议进行了比较：直接投递 [3] 和首次接触 [3]。比较分析重点考察了三个关键指标：传递概率、平均延迟和跳数。仿真结果汇总于表2。

协议	投递概率	Avg. 时延	平均跳数数
A-FC	0.6797	4311.7	1.6813
直接投递	0.4743	6010.4	1.0000
首次接触	0.2433	4641.8 秒	18.8397

表2：三种路由协议关键性能指标比较

图12和表2表明，A-FC协议具有出色的可靠性，传递概率约为68%。这一性能优势源于协议的社会感知设计：它利用活动频繁的员工节点充当移动中继。这些“超级携带节点”能够有效穿越网络分区，将疏散指令传递给彼此隔离的学生群体。相比之下，首次接触协议 [3] 表现不佳，传递率最低（约为24%）。其盲目转发策略导致消息在人员密集区域（如宿舍楼）内循环，无法抵达救援中心。直接投递协议 [3]表现中等（约为47%），但由于依赖源—目的地直接相遇，无法覆盖更大的区域。

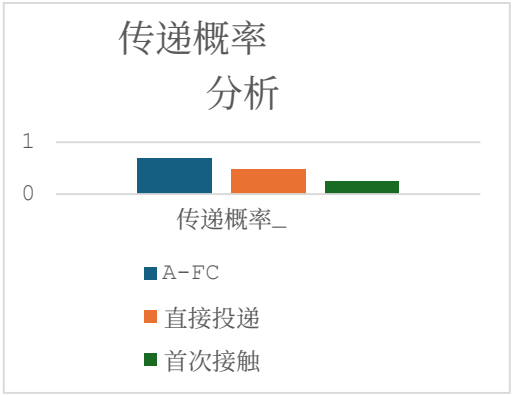

图12 传递概率分析

在救援行动的“黄金救援时间”内，速度至关重要。图13表明，A-FC的平均延迟最低，约为72分钟。通过将消息上传至移动速度更快的教职员工节点，A-FC显著缩短了消息在缓冲区中的停留时间。相比之下，直接投递协议 [3]由于学生节点移动速度较慢且通信范围有限，消息延迟超过约100分钟。

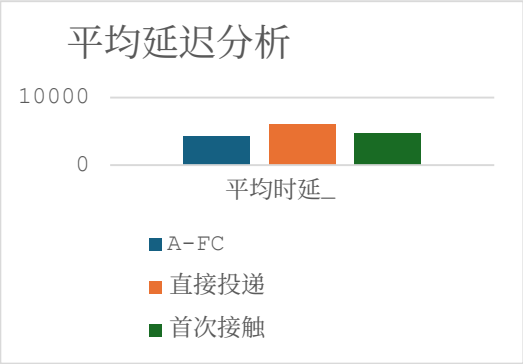

图13 平均延迟分析

在资源消耗方面，图14凸显了 A-FC 机制的高效性。A-FC 的平均跳数仅为 1.68，表明绝大多数消息都沿着优化后的“学生 →教职员工 → 目的地”路径传输。这与首次接触 [3], 形成鲜明对比，后者的平均跳数为 18.84。如此多的中继节点表明存在“烫手山芋”式转发行为，这不仅会导致网络拥塞，还会迅速耗尽移动设备的电池续航时间——这在灾害场景中是一个关键问题。

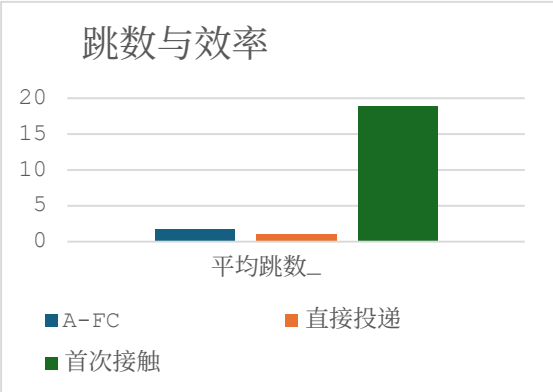

图14 跳数与效率

5. 结论与未来工作

本文探讨校园环境中的应急通信需求，尤其是在突发灾害期间（例如台风导致通信基础设施失效）。

本文提出的 A-FC协议引入了现实世界中的社会角色，要求将消息上传至活跃度较高的“工作人员节点”。实验结果表明，该策略显著提高了消息投递率，使其达到约 68%，同时将平均延迟降至 4311 秒。A-FC 的平均跳数仅为 1.68，成功构建了一种高效的应急信息传输模型。

本文证实，在发生通信中断的极端灾害中，利用学校校园内固有的社会角色来优化路由选择，效果尤为显著。

相比之下，依赖传统协议可能会错失关键的救援窗口。A-FC为学校校园构建低成本、高可靠性的备用应急通信系统提供了切实可行的解决方案。

尽管A-FC协议在本次实验（于福州第一中学进行的仿真）中表现良好，但仍有优化空间。未来的工作可结合重要文献中评估的先进协议，进一步完善该协议。

拥塞控制至关重要。未来可以整合CafRep[6] 机制；这一效用驱动框架会动态地将流量从拥塞节点转移至拥塞程度较低的区域，从而提升整体网络稳定性和吞吐量。

与此同时，也可以研究自适应缓存机制。CafRepCache[7]协议提出了一种协同认知缓存策略，通过预测节点和内容的重要性，优化存储资源利用率。

此外，借助CognitiveCache[8]， ，应急网络可采用多智能体深度强化学习（MADRL），在复杂的动态环境中自主学习并调整转发策略。

最后，将在未来仿真中纳入电池容量限制，以评估协议在现实能源限制下的协议耐久性能。

参考文献

[1] K. Fall，《面向受限互联网的容迟网络架构》，载于*ACM SIGCOMM 2003*年会议论文集，德国卡尔斯鲁厄，2003年8月，第27–34页。[2] A. Keränen、J. Ott 和 T. Kärkkäinen，《用于DTN协议评估的ONE模拟器》，载于第二届仿真工具与技术国际会议（*SIMUTools 2009*）论文集，意大利罗马，2009年3月，第1–10页。[3] T. Spyropoulos、K. Psounis 和 C. S. Raghavendra，《喷洒等待：一种适用于间歇连接移动网络的高效路由方案》，载于*ACM SIGCOMM*容迟网络研讨会（*WDTN 2005*）论文集，美国宾夕法尼亚州费城，2005年8月，第252–259页。[4] A. Lindgren、A. Doria 和 O. Schelén，《间歇连接网络中的概率路由》，*ACM SIGMOBILE*移动计算与通信评论，第7卷，第3期，第45–47页，2003年7月。[5] P. Hui、J. Crowcroft 和 E. Yoneki，《BUBBLE Rap：容延网络中的基于社交的转发》，载于第九届*ACM*移动自组网与计算国际研讨会（*MobiHoc 2008*）论文集，中国香港，2008年5月，第241–250页。[6] M. Radenkovic 和 A. Grundy，《容延机会网络中效用驱动拥塞控制框架》，载于第七届国际无线通信与移动计算会议（*IWCMC*）论文集，土耳其伊斯坦布尔，2011年7月，第448–454页。[7] M. Radenkovic 和 A. Grundy，《异构容延网络中的高效自适应拥塞控制》，*Ad Hoc Networks*，第10卷，第7期，第1322–1345页，2012年。[8] M. Radenkovic 和 V. S. H. Huynh，《面向移动社交社区网络边缘的认知缓存：一种多智能体深度强化学习方法》，*IEEE Access*，第8卷，第179561–179574页，2020年。[9] Google地图，“福州奥林匹克体育中心，福建省，中国”[10] W. Gong，《现场报道：“杜苏芮”致福州多地受灾；森林消防队开展排水和救援行动，》中国之声（中央人民广播电台），2023年7月29日[11] OpenStreetMap “福州第一中学”[12] 福州第一中学，校园风光[13] 必应地图，“福州第一中学”[14] Google地图，“罗源县第一中学”[15] Google地图，“中国福建省福州市鼓楼区东街口商业区南后街”，“三坊七巷”