

地震资源勘探的无线数据传输

姚晨 周严

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要: 针对地震勘探现场环境复杂多变,利用传统有线或单一无线技术传输数据存在可靠性低、成本高、效率低的问题,通过对现有无线技术进行分析,提出一种基于4G蜂窝网络和WiFi网络的混合型无线数据传输方案,通过TCP Vegas和队列管理预防并解除拥塞状况。测试结果表明,提出的混合型无线数据传输方案在地震勘探系统中运行可靠稳定,数据传输速率高,可吸收短时间内的大量数据流并预防拥塞的发生,为野外地震勘探过程提供技术支持,具有一定的应用前景。

关键词: 资源勘探;无线传输;4G;WiFi;汇聚中继

中图分类号: TN925+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

Wireless data transmission for seismic resource exploration

Yao Chen Zhou Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the complicated and variable environment of seismic exploration field, using traditional wired or single wireless technology to transmit data has the problems of low reliability, high cost and low efficiency. By analyzing the existing wireless technology, a kind of hybrid wireless data transmission scheme based on 4G cellular network and WiFi network was proposed. The solution prevents and relieves congestion through TCP Vegas and queue management. The test results show that the proposed hybrid wireless data transmission scheme operates reliably and steadily in the seismic exploration system, has high speed of data transmission. It can absorb large amounts of data flow in a short time and prevent congestion, provides technical support for the field seismic exploration process and has certain application prospect.

Keywords: resource exploration; wireless transmission; 4G; WiFi; convergence relay

0 引言

现代地球资源勘探装备日益向大采集道、高密度方向发展,海量数据的高速可靠传输成为勘探高效、可靠的关键因素^[1]。传统的数据传输采用有线或有线+无线的方式,随着采集道数的不断增加,敷设的传输电缆量急剧增加,导致效率低下、可靠性下降。近年来,随着无线通信技术的发展,采用无线传输技术取代有线传输方式受到业界的高度关注^[2-4]。

地震资源勘探的数据传输要求高效、高速、长距离及可靠^[5],同时满足上述要求的是4G无线通信技术,直接将4G通信技术应用于地震采集节点的数据传输,设备成本及运行费用高,不适用于大采集道资源勘探装备的应用。如何在充分发挥4G通信技术优势的前提下大幅度降低地震资源勘探无线数据传输的设备及运行成本,实现低成本、高

效、可靠无线数据传输,是现代地震资源勘探装备亟待解决的关键核心技术之一。本文针对上述需求提出了4G与WiFi相结合的混合型无线数据传输方案,初步验证了方案的有效性、可行性。

1 混合型无线数据传输方案

混合型无线数据传输的基本思路是将采用4G无线通信技术从采集节点直传数据的网络架构,改为先将多个采集节点的数据通过WiFi技术传输至汇聚节点,再通过4G网络将汇聚节点的数据传输至地震工作站。基于该思路的网络架构如图1所示。

根据网络架构,采集节点与汇聚节点的距离较近,数据传输采用低成本的WiFi技术实现;汇聚节点与地震工作站的距离较远超过1 km,采用4G通信技术传输数据。

WiFi技术是低成本、高速、短距离无线通信技术^[6-7],

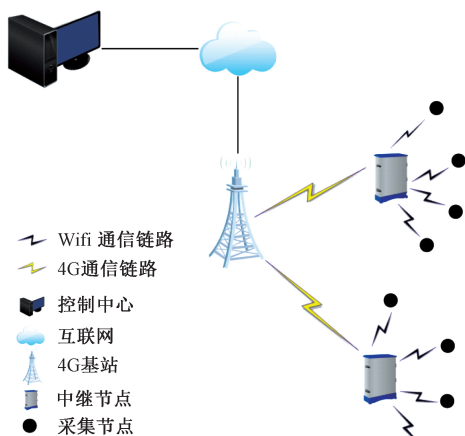


图 1 混合型无线数据传输的网络架构

近年来已被应用于地震勘探中,法国 Sercel 公司研制的 UNITE 无线地震勘探系统中使用了 WLAN 通信技术,并已应用于地震资源勘探,具有较高的可靠性^[8-9]。基于 IEEE802.11n 标准的 WiFi,其速率在信道带宽为 40 MHz 时可达 100 Mbps,实际传输速率受到主控 MCU 的主频、软件的效率及传输距离的影响,低于理论值,且传输距离与传输速率负相关^[10-11]。WiFi 的传输距离可达 200 m,但实际测试时,当传输距离小于 50 m 时,传输速率下降较小,大于 50 m 时,传输速率下降较大,由于地震勘探要求高速传输数据,本设计中采集节点到汇聚节点的传输距离不超过 50 m。

4G 无线终端通过基站可实现远距离、高速率的数据通信,其传输速率与 WiFi 相当,其优势是传输距离可达上百千米^[12-13],但由于设备成本及运行费用高,4G 无线终端不宜大量应用在地震勘探装备中。作为汇聚中继,将多个节点通过 WiFi 传输至汇聚中继的勘探数据,通过 4G 网络传输至远端的地震工作站,既满足远程传输的要求,又不降低传输速率,是比较合理的方案。韩晓泉等^[14]提出了一种利用 4G 移动通信技术构造无线专网的设想方案,并分析了地震勘探装备中模块化使用 4G-LTE 技术的可行性。

因此,采用 4G 蜂窝网络与 WiFi 相结合,可充分发挥两种技术的优势,弥补各自的不足,实现高速、远距离、低成本的勘探数据传输。而实现上述方案的关键在于汇聚中继。

2 汇聚中继器的设计

2.1 汇聚中继器的架构

中继节点负责接收多个采集节点的勘探数据并将数据传输至地震工作站,基于地震勘探装备中采用 4G 移动通信技术可行性分析^[14],设计了 WiFi+4G 多通信技术的中继节点架构,如图 2 所示。中继节点主要由 3 部分组成:WiFi 通信单元、4G 通信单元和 MCU 单元。

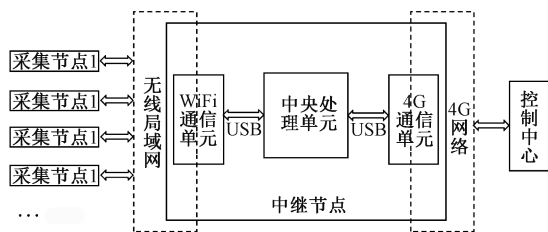


图 2 中继器架构设计方案

中央处理单元采用基于四核 Cortex-A9 的 Exynos4412 处理器,主频高达 1.5 GHz,提供丰富的接口,具有 WiFi、4G、GPS 的模块扩展能力。

嵌入式系统中,WiFi 模块大多以 USB 接口和 SDIO 接口接入,WiFi 模块选择主要以稳定可靠、低成本、低功耗为主要依据,同时 WiFi 模块应易于 MCU 控制、易于嵌入式系统驱动移植并支持无线 AP 模式。WiFi 模块采用基于 RT3070 芯片的无线网卡,RT3070 支持 150 Mbps 的传输速率,兼容 IEEE 802.11 b/g/n 标准,提供 USB2.0 信号输出,并支持 AP 接入与 Linux 操作系统,符合中继节点实际应用要求。

中继节点中,4G 模块主要负责与控制中心的通信任务,4G 模块的硬件设计应考虑到地震勘探的野外工作环境特点,选择工作温度范围大、功耗低、性能稳定的蜂窝网络通信芯片,并且选择加入覆盖面积广、通信速率大的蜂窝网络。采用华为 ME909 u-521 模块作为中继节点中的蜂窝网络通信单元,ME909 u-521 作为 LTE 工业级 M2M 无线模块,正常工作温度范围: $-30^{\circ}\text{C} \sim +75^{\circ}\text{C}$,支持下行 100 Mbps,上行 50 Mbps 的传输速率,可承担大数据传输的任务。

中央处理器与 WiFi 模块、4G 模块之间的连接电路如图 3 所示。USB3 503 A 通过高速片间 HSIC 连接到 4412 处理器,并扩展出 3 个下行 USB 接口,分别连接 RT3070 WiFi 模块和 ME909 u-521 4G 模块;将 REF_SEL0 和 REF_SEL0 引脚置高,选择外部 12 MHz 时钟输入。采用标准的 USB,每个数据包都以同步模式开始,以允许接收器时钟与输入数据的相位同步,然后根据同步模式对 D+/D-信号的差分符号进行采样。HSIC 使用单独的 STROBE 线告诉接收器何时采样传入数据。HSIC DATA 信号在 STROBE 信号的上升沿和下降沿被采样。

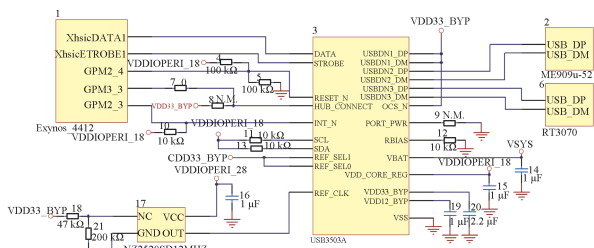


图 3 HSIC-USB 电路设计

在实际应用过程中将 RT3070 设为无线 AP 模式,构成以中继节点为中心、基于 WiFi 的星型无线局域网,实现中继节点与多个采集节点交互数据的功能。同时利用运营商的 SIM 卡进行 NDIS 拨号,选择移动的 CMNET 网络作为中继节点加入的蜂窝网络。

数据传输过程如图 4 所示,控制中心下发的指令报文通过 4G 蜂窝网络传输至中继节点的 4G 网卡(eth1),首先对报文进行目标地址转换(转换为 WLAN 网段下的 IP 地址),并将指令报文转发至 RT3070 WiFi 无线网卡,中继节点作为 WLAN 无线接入点,与附近多个采集节点构成基于 WiFi 的星型局域网,通过 WiFi 通信链路将指令传输至各采集节点。各采集节点收到控制中心下发的指令后,即执行相应的动作并做出响应。采集节点获取的地震勘探数据通过 WiFi 通信链路传输至对应中继节点的 WiFi 网卡,同样的,对数据报文进行目标地址转换(转换为控制中心的公网 IP 地址),并将报文转发至 ME909 u-521 4G 网卡,然后发送至具有公网 IP 的控制中心。

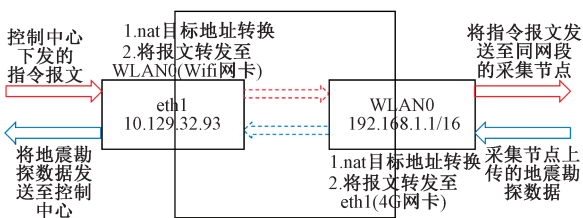


图4 数据传输过程

2.2 总体软件设计

总体软件流程如图 5 所示,首先搭建中继节点的 Linux 操作系统,包括源码修改、裁剪、编译及烧写内核。根据选用的 WiFi 通信模块与 4G 通信模块,修改源码驱动并裁剪内核,通过 make 编译内核并烧写至核心板。

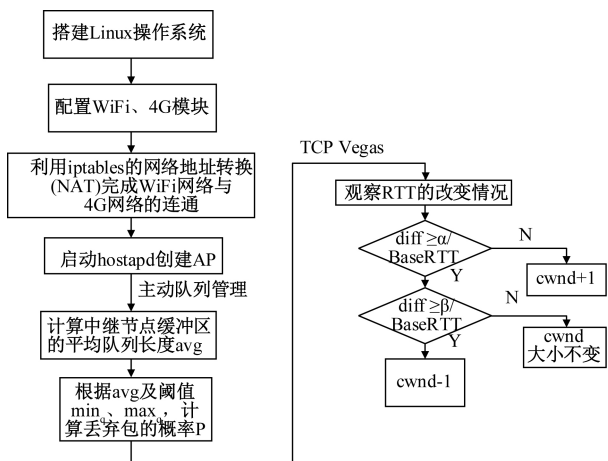


图5 总体软件流程

相连,通过 NDIS 拨号入网,利用 speedtest-cli 测试 4G 蜂窝网络状况,测试表明,4G 蜂窝网络的上行、下行传输速率高达 10 Mbit/s 以上,网络延时控制在 40~53 ms 范围内,网络状况良好。移植 WiFi 模块所需的 openssl 库、linbl 库、dnsmasq 以及 hostapd 软件。使用 dnsmasq 配置 DHCP,包括 dnsmasq 监听的接口,该接口的 IP、dhcp 地址的范围、租期长短、dns 等。

通过 Linux 内核集成的 IP 信息包过滤系统 iptables,将用户的设定执行到对应的安全框架 netfilter 中,中继节点主要用到网络地址转换(NAT)功能。当中继节点收到采集节点的响应信息和上传的地震数据时,会将其报文(原始目标地址、端口号是中继节点创建无线接入点的 IP 地址、端口号)的目标 IP 地址、端口号改为控制中心的公网 IP 地址、端口号;同样的,当中继节点收到控制中心下达的命令数据时,会将其报文的目标 IP 地址、端口号改为对应采集节点的 IP 地址、端口号。至此,便可通过 Linux 操作系统下的 iptables 实现数据流在 WiFi 网络与 4G 网络之间的连通。

创建 hostapd.conf 配置文件,包括接入点设备名称、无线驱动、802.11 协议、无线频道、加密类型及验证算法等。

通过队列管理和 TCP Vegas 预防并解除拥塞情况的发生。中继节点每隔 1 s 计算缓冲区的平均队列长度 avg ,平均队列长度计算公式如式(1)所示,使用一个指数加权滑动平均(EWMA)低通滤波器来计算平均队列长度(这个平均是指对时间的平均)。

$$avg(t + \Delta t) = (1 - W_q) \times avg(t) + W_q \times q \quad (1)$$

式中: W_q 为权值; q 为当前缓冲区的队列长度。根据 avg 、 P_{max} 以及阈值计算得到丢弃包的概率。同时,采集节点通过 TCP Vegas 策略观测期望吞吐量与实际吞吐量的差值,合理改变拥塞窗口的大小。

2.3 队列管理策略参数

中继节点缓冲区的设立是为了缓存瞬间出现的大量分组,并在随后的空余时间将缓存的大量数据发出^[15]。理论上希望中继节点有足够的内存空间作为缓冲区,以吸收某些时刻突然爆发的数据流。缓存空间的大小并不是期望的稳定状态下的队列长度,它反映的是期望中继节点能够吸收网络中“突发”业务的能力,同时,缓冲区的大小往往受限于中继节点的内存大小^[16]。如果每个分组到达中继节点时都计算平均队列长度及丢弃概率,开销会非常大。考虑到采集节点采用边采集边传输的方式,中继节点可以 1 s 计算一次平均队列长度以及丢弃概率。本方案中一个中继节点回收 4 个采集节点的地震勘探数据,采集节点采样率最大为 4 K,采样精度为 24 位,通过计算可得到 1 s 内达到中继节点的突发性数据流大小为 384 KB。因此将中继节点中队列下限阈值 min_q 设为 384 KB。对中继节点队列管理而言,吞吐量和排队延迟始终是一对矛盾,本例中,数据传输过程中吞吐量是更为重要的因素。一般来说, max_q 一

将华为 ME909 u-521 4G 模块与核心板通过 USB 接口

\min_q 应大于一个回路响应时间内平均队列长度的增加值,以避免由于中继节点丢弃过多的分组而造成该无线局域网下的全局同步现象。根据目前 Internet 上数据流的特点,可以将 \max_q 设为 \min_q 的两倍。

权值 W_q 会影响 avg 追踪瞬时队列占有率的迅速程度,如果 W_q 过大,将不能有效地过滤短暂的拥塞;如果 W_q 过小, avg 会对实际队列长度的变化反应过慢,不能合理地反映拥塞情况,在这种情况下,中继节点将无法有效地检测到早期拥塞。因此 W_q 的大小选择非常重要,使中继节点既能吸收瞬时突发数据流又能及时响应以减小长期拥塞的建立。长期拥塞的增长速度依赖于同时映射到一个队列的 TCP 流数量。本例中,在只有 4 个 TCP 流时,拥塞会相对慢地建立因此 W_q 应小。

中继节点通过检查平均队列长度的变化来感知对于丢弃分组是应更激进还是更保守,基于 avg 的滑动而动态地调节 P_{\max} : 当 avg 下降到 \min_q 或在 \min_q 附近振荡,那么拥塞控制就太激进了,需要计算一个更保守的 P_{\max} ; 如果 avg 升到大于 \max_q 或在 \max_q 附近振荡,那么拥塞控制就太保守了,则需要计算一个更积极的 P_{\max} 。

P_{\max} 的上限设为 0.5,可以从两个方面解释。1) 当分组的丢弃概率过大,就会发生类似于“全局同步”的问题。2) 以一种缓和的方式使用拥塞检测机制,希望当平均队列大小从 \min_q 变化到 \max_q 时,分组丢弃概率从 0 变化到 P_{\max} ; 当平均队列大小从 \max_q 变化到两倍的 \max_q 时,分组丢弃概率从 P_{\max} 变化到 1。因此,将 P_{\max} 的上限设为 0.5。 P_{\max} 的下限 0.01 是为了限制 P_{\max} 的范围而定的,而且当分组的丢弃概率很小的时候,用 0.01 来表示就已经足够了。

动态调节 P_{\max} 过程如下:

Every second;

If ($avg > \max_q$ and $P_{\max} \leq 0.5$)

Increase P_{\max}

$$P_{\max} = P_{\max} + \gamma$$

Else if ($avg < \min_q$ and $P_{\max} \geq 0.01$)

Decrease P_{\max}

$$P_{\max} = P_{\max} * \eta$$

其中, P_{\max} 为 \max_q 对应的丢弃概率; avg 为平均队列长度; γ 为增加因子,为 $\min(0.01, P_{\max}/4)$; η 为减小因子,一般为 0.9。注意到,至少需要 $0.49/\gamma$ 个时间间隔(s), P_{\max} 才能从 0.01 增大到 0.5。同样的,至少需要 $\log 0.02/\log \eta$ 个时间间隔(s), P_{\max} 才能从 0.5 降低到 0.01。通过调节参数 P_{\max} 从而保持平均队列长度在 \min_q 和 \max_q 之间。

3 实验测试

为测试数据传输方案中 WiFi+4G 通信链路大数据量传输性能与拥塞控制机制,共进行了 10 次实验,利用 1 个

中继节点同时对 4 个采集节点进行数据回收,每次实验各采集节点持续发送 81.36 Mb 数据,在短时间内 WiFi+4G 通信链路累计传输 325.44 Mb 数据。通过监测控制中心的公网 IP 与特定的端口号,测试实验过程中数据传输的通信速率。其中一次实验的数据传输速率如图 6 所示,横坐标是以秒为单位的时间轴,纵坐标表示数据传输的速率,单位是 bits/s,由图 6 分析可知,数据传输速率曲线基本稳定,无严重拥塞情况发生,控制中心在 200 s 内接受了 325.44 Mb 的数据,本次实验的平均传输速率为 1.627 Mb/s。通过比对控制中心实际接收的数据与采集节点发送的数据,可以计算得到本次实验的丢包率。

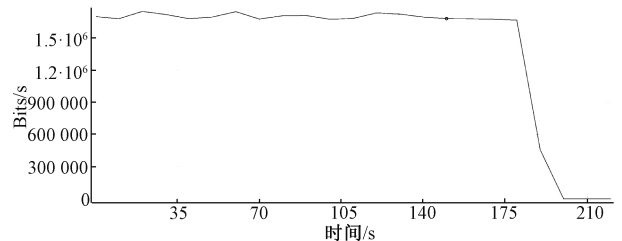


图 6 实时传输速率实验

10 次实验的结果如表 1 所示。数据分析表明,控制中心回收地震数据的速率在 1.37~1.63 Mb/s 范围内,平均速率为 1.49 Mb/s,丢包率为 0%。实验分析可知,WiFi+4G 通信链路的平均通信速率在 1.49 Mb/s 左右,TCP Vegas 和队列管理机制可以吸收短时间内的数据流并预防拥塞的发生。经测试一个中继节点可同时回收 4 个采集节点的地震数据且丢包率为 0%,满足地震勘探过程中对 WiFi+4G 通信链路速率与可靠性的要求。

表 1 实验结果

试验序号	平均传输速率/(MB/s)	丢包率/%
1	1.550	0
2	1.379	0
3	1.627	0
4	1.409	0
5	1.493	0
6	1.528	0
7	1.473	0
8	1.434	0
9	1.565	0
10	1.446	0
平均值	1.490	0

4 结 论

为保证地震勘探系统在复杂施工环境中稳定可靠地实施采集任务,设计了新的数据传输方法和队列管理机制。

采用 WiFi 与 4G 技术相结合的手段,实现对采集节点地震数据的远程回收;通过 TCP Vegas 和队列管理预防并解除拥塞情况。实验结果表明,该数据传输方法和拥塞控制机制在地震勘探系统中运行可靠稳定,数据传输速率高,使得野外地震勘探过程更具实用性,具有一定的应用前景。随着无线通信技术的发展,可选用 5G 技术作为大数据量传输的媒介,使得一个中继节点回收更多采集节点的地震勘探数据并提高中继节点的远程无线传输速率。同时,如何提高地震数据传输的效率和抗干扰能力、减少节点的能量消耗进而延长网络寿命,将是未来研究的热点、难点问题。

参考文献

- [1] 张平安,周严.履带拖曳式陆用地震勘探数据采集系统[J].电子测量技术,2014,37(5):116-120.
- [2] HUANG R, SONG W Z, XU M, et al. Real-world sensor network for long-term volcano monitoring: Design and findings[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(2): 321-329.
- [3] 宾康成,张晓普,佟训乾,等.基于 WSN 的分布式节点地震仪分层通信网络[J].地球物理学报,2017,60(11): 4313-4320.
- [4] BEFFA M, CRICE D, KLIGFIELD R. Very high speed ordered mesh network of seismic sensors for oil and gas exploration [C]. Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS 2007, IEEE International Conference, 2007:1-5.
- [5] 于连河,周严.拖曳式地震勘探系统数据传输技术研究[J].电子测量技术,2015,38(7):89-93.
- [6] 刘洛辛,孙建利.基于能效的 WLAN 室内定位系统模型设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (5):

1169-1178.

- [7] 张勇,徐小龙,徐科宇.基于加权质心法的 WLAN 室内定位系统[J].电子测量与仪器学报,2015,29(7): 1036-1041.
- [8] 韩晓泉,穆群英,易碧金.地震勘探仪器的现状及发展趋势[J].物探装备,2008,18(1):1-6.
- [9] 吴海超,林君,张林行.地震仪器中应用的网络通讯技术研究[J].地球物理学进展,2012,27(4):1822-1831.
- [10] 吴海超,林君,李哲,等.无缆存储式地震仪无线网络监控技术[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(5): 1296-1301.
- [11] 文晓哲.基于 WLAN 的节点地震仪数据传输系统设计[D].长春:吉林大学,2017.
- [12] 程腾飞.多带蜂窝网中 D2D 中继通信的中断性能研究[D].南京:南京邮电大学,2016.
- [13] 张正峰,陈炳贵,刘宁.WiFi AdHoc 与 4G 通信在无线地震数据采集站中的应用[J].地球物理学进展,2015, 30(5):2337-2341.
- [14] 韩晓泉,张晓莉,郭庆.地震勘探装备中采用 4G 移动通信技术的可行性分析[J].物探装备,2013,23(2): 71-77.
- [15] 武航星,慕德俊,潘文平,等.网络拥塞控制算法综述[J].计算机科学,2007,34(2):51-56.
- [16] 孔金生,任平英.TCP 网络拥塞控制研究[J].计算机技术与发展,2014,24(1):43-46.

作者简介

姚晨,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:1475106707@qq.com