

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108698

基于无线传感网技术的智能图像传输系统*

林 阳 张雪凡 孙 苗 何理旭

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室 上海 200072)

摘要: 针对无4G信号、布线困难、无人值守的偏远山区输电线路监测,无线传输一直存在困难,对于数据量较大的图像数据更难。本文设计并实现了一种高压输电线路监测的智能无线图像传感器网络传输系统,运用嵌入式研发技术和无线传感网技术实现图像传输。在传统的无线传感网基础上,针对图像数据大,通信过程中容易引起干扰,设计了依据接收端信号强度RSSI值进行自适应数据分包协议;为了优化传输路由和增加传输系统的冗余性,设计了智能路由传输协议。实验测试和仿真结果表明,自适应数据分包协议能根据不同的误码率大小自适应调整分包数,减少重传的概率,从而提高传输效率;智能动态路由传输协议可以快速找到最近的4G信号节点,节省传输时间和能量损耗,其中的跳传功能在减少传输时间的同时,增加了传输系统的冗余性,达到设计目的。

关键词: 无线图像传输;线型传感网;信号场强RSSI;智能路由协议

中图分类号: TN929 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.50

Intelligent image transmission system based on wireless sensor network technology

Lin Yang Zhang Xuefan Sun Miao He Lixu

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Wireless transmission has always been difficult for unattended transmission line monitoring in remote mountainous areas without 4G signal wiring, and it is even more difficult for image data with large data volume. This paper designs and implements an intelligent wireless image sensor network transmission system for high voltage transmission line monitoring, using the research and development of embedded technology and wireless sensor network technology to realize image transmission. on the basis of the traditional wireless sensor network, aiming at the large image data and easy to cause interference in the communication process, an adaptive data subcontracting protocol is designed according to the RSSI value of the receiving end signal strength; In order to optimize the transmission routing and increase the redundancy of the transmission system, an intelligent routing transmission protocol is designed. Experimental test and simulation results show that the adaptive data subcontracting protocol can adjust the subcontracting number adaptively according to different bit error rates, which reduces the probability of retransmission and improves transmission efficiency; The intelligent dynamic routing transmission protocol can quickly find the nearest 4G signal node, saving transmission time and energy loss. The hopping function reduces the transmission time and increases the redundancy of the transmission system, so as to achieve the design purpose.

Keywords: wireless image transmission; linear sensor network; signal field strength RSSI; intelligent routing protocol

0 引 言

偏远山区地形复杂,环境恶劣,容易发生自然灾害,从而给偏远山区的输电线路带来损坏,因此,及时发现输电线路故障,实现对高压输电线路工作状况的监测显得至关重要^[1]。如果该区域有4G或者5G信号,对图像数据的传输

很容易实现,本文主要讨论无4G信号的几十公里路段的图像数据传输,设计了一种比较特殊的无线传感网来解决该问题。

传统的有线通信网络存在布线困难、复杂度高、功耗大等问题不适用于高压输电线路监测系统,而目前很多的无线图像传输系统采用蓝牙、WIFI、ZigBee等无线通信方

收稿日期:2021-12-27

* 基金项目:国家自然科学基金(61871261)项目资助

式^[2-5]。黄正睿等^[6]设计了集成 LoRa 与 BDS 的应急环境监测数据获取与传输技术,但该技术传输数据量少并且依赖于北斗卫星导航系统,不适合该应用场景。曹阳等^[7]设计了基于无人机光伏巡检的视频图像传输系统,但由于高压线路周围的强电磁环境对无人机遥控信号干扰较大,容易发生无人机飞行事故,进而造成输电线路安全运行的隐患。吴佳彬等^[8]设计了基于蓝牙的无线视频传输系统,该系统将蓝牙技术应用于军事上,能够短距离实时监控战场态势,对士兵瞬态感知力的提高具有重大意义,但蓝牙通信距离较短,网络规模小,易受干扰,不适合户外长距离传输。谭穗妍等^[9]设计了基于嵌入式机器视觉的水稻秧盘育秧图像无线传输系统,该系统旨在解决杂交稻机械化秧盘精密播种育秧过程中需要人工长时间户外实时监测的低效方式,通过无线 WIFI 局域网进行图像的传输,但 WIFI 功耗比较大,不适合偏远山区输电线路长时间监测的工作方式。黄凡等^[10]研究了基于 ZigBee 的无线图像传输技术,通过摄像头获取图像帧,利用 ZigBee 帧协议设计图像包格式,对图像数据进行分包组网传输,但 ZigBee 协议占带宽的开销量对信道带宽要求较高,而这反过来会影响通讯距离和环境适应性。

本文针对偏远山区输电线路监测的应用,结合传感器技术、嵌入式技术、无线传感网技术,设计并实现了一种高压输电线路监测的智能无线图像传输系统,实现了对无公网信号地区高压输电线路的监测。一般的无线传感网传输信息量小,不需要考虑到数据分包问题,而本文组建的无线传感网用于传输图像大数据,而且是接力多跳传输方式,其传输时错误概率会大大增加,无法保证数据的可靠传输。所以本文的特点有两个:1)路由的短包探测,寻找距离最近的 4G 信号节点,同时为了增加系统的冗余性,设计了智能动态路由传输协议,在能够快速找到 4G 信号节点的基础上增加跳传功能,不仅可以节省传输时间,同时避免某一节点的损坏而导致整个通信链路的瘫痪。2)由于传输数据包大,无线传感网易受环境影响。当通信质量好,可以通过大数据包进行传输,当出现雷雨天、大雾天,传输条件恶劣,误码率高时,通过小数据包进行传输,为了提高传输效率和减少数据包重传的概率设计了自适应数据分包协议。

1 整体方案和可行性分析

1.1 整体方案

基于高压输电线路分布的特点,系统组建的是线型无线传感器网络模型^[11]。本系统由远程服务器和图像采集节点模块两部分组成,图像采集节点不仅充当采集图像功能,还充当接力传输功能。首先每个节点通过摄像头间隔相同时间采集高压铁塔的图像信息,依据每个节点接收端信号强度 RSSI 值对图像信息进行数据包分包处理,再将分包后的数据包传输至下一节点,通过接力式传输至最近的 4G 信号节点,最后由 4G 信号节点将图像信息转发至远

程服务器端进行数据包组包,并恢复出原始图像信息。系统结构框架如图 1 所示。

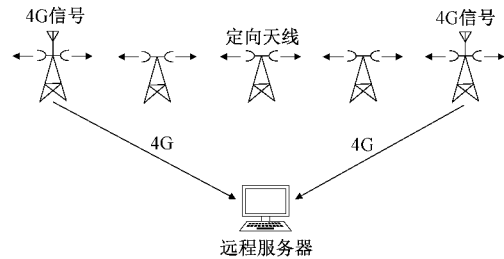


图 1 系统结构框图

由于图像数据量大,为了实现数据的有效传输,需要对图像数据进行分包处理。针对通信信道质量的好坏,设计了自适应数据分包协议,依据接收端信号强度 RSSI 值,进行数据分包,本方案设计了多档 RSSI 值,不同档位的 RSSI 值对应不同的数据分包数,进而来保证图像数据的可靠传输。

由于数据发送点和 4G 信号节点不是左右对称的,为了找到最近的 4G 信号节点,设计了智能路由协议。首先在图像数据包发送之前发送一个比较小的路由探包,记录其回传的最近 4G 信号节点编号,选择回传编号较小的方向作为传输的方向,另外考虑到节点损坏的情况以及为了节省传输时间,设计了跳传功能。两个协议的结合,更好地实现图像数据传输的有效性和可靠性。

1.2 数据包大小与信道噪声功率的关系

信噪比决定通信质量的好坏,文献[12]给出了信道容量和信噪比的关系式。

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

为了更好地判断信道噪声干扰的大小,这里首先分析信道误码率和信噪比关系。以双极性二进制数字基带传输系统为例^[13],在等概分布情况下二进制基带系统的总误码率为:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{A}{\sqrt{2} \sigma_n} \right) \quad (2)$$

信噪比反映了信道的可靠性,是衡量数字通信系统可靠性的重要指标^[14]。信噪比计算公式如下:

$$\operatorname{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (3)$$

其中, P_s 代表信号有效功率, P_n 代表噪声有效功率, 则 $\frac{P_s}{P_n} = 10^{\frac{\operatorname{SNR}}{10}}$, 而 $\frac{P_s}{P_n} = \frac{A^2}{2\sigma_n^2}$, 将其代入式(2)得到误码率和信噪比公式如下:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{10 \frac{\operatorname{SNR}}{10}} \right) \quad (4)$$

由式(4)可知,信噪比越大,在信道传输时,所产生的误码率越小。当发射功率一定时,依据接收端信号强度 RSSI 值能知道信道噪声功率大小,这也为依据接收端信号强度

RSSI 值自适应数据分包提供了理论基础。

为了分析方便,假设通信信道为均匀分布干扰脉冲,当干扰脉冲一定时,如果图像数据不进行分包或者分包数较少,即数据包信息量比较大,那么接收端可能接收不到正确的数据包,就需要数据包的重传,产生更大的时间开销,基于此,如果将图像数据分包数多一点,虽然重传包数会增加,但是重传的可能性变小,可以减少总体传输时间,具体如图 2 所示。

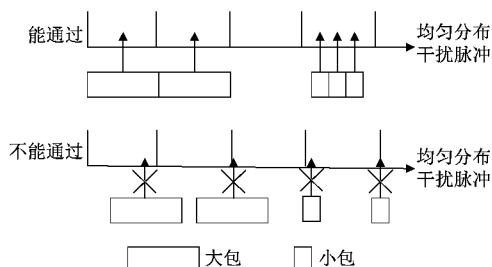


图 2 数据包大小和干扰脉冲密度关系图

由上述分析可知,当信道噪声干扰较大时,为减少重传概率,应该将数据包分得小一点,当信道噪声干扰较小时,可以适当增大数据包。

1.3 自由空间传输损耗

当电磁波在空中传播时,根据发射机和接收机之间的距离以及载波频率,结合文献[15]公式可以计算出信道传输损耗。

$$PL(dB) = -32.44 - 20\lg d - 20\lg f \quad (5)$$

其中, PL 代表传输损耗, d 代表无线收发机之间的距离, f 代表无线通信的载波频率。

由式(5)可知当传输距离 d 增大时,传输损耗也会相应增大,此时误码率也会增大,这为系统设计跳传功能提供了理论依据,在设计跳传功能时,应该考虑传输距离变远所带来的误码率增大问题,所以本文设计跳过的最大节点数为两个节点,不仅节省传输时间,增加系统冗余性,同时保证了数据的可靠传输。

2 系统工作原理

2.1 硬件组成

本系统应用在高压输电线路监测上,地域范围较大,且分布特点呈现线型分布,所以试验网络采用线型网络。本系统设计的图像采集节点主要由五部分组成:图像传感器、微控制器模块、无线通信模块、温湿度传感器和位置传感器,结构如图 3 所示。

由于本文主要介绍图像数据的传输,所以温湿度传感器和位置传感器在本文不作讨论。

图像传感器选择 CMOS 串口摄像头进行图像的采集,可以输出经压缩的 JPEG 图片,从而减少图像传输的数据量。

微控制器模块采用基于 ARM Cortex-M3 内核系列的

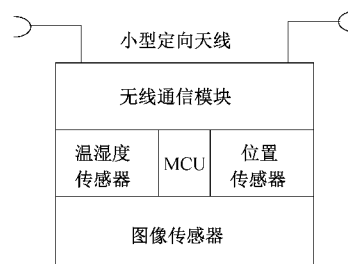


图 3 系统硬件结构图

32 位微控制器,用于与无线模块进行数据通信,可通过配置串行通信进行采集,控制和数据处理。

无线通信模块由无线射频芯片和基本外围电路组成,用于节点间的数据发送与接收,工作在 2.4 G 频段,具有低功耗,远距离传输,抗干扰强等特点,适合本系统的工作环境和要求。

节点的能量供应是从高压输电线上感应产生的电能为系统供电,通过高压互感器取能装置获得电源,这种供电方式适合偏远山区输电线路的监测,改善了人工频繁更换电源的缺点。

2.2 工作流程

无线图像传输系统主要包括 4 部分:1)图像采集:图像传感器收到 CPU 的图像采集指令开始工作,输出经压缩的 JPEG 照片。2)发起无线路由:通过发送小的路由探测包找到最近的 4G 信号节点,确定路由方向。3)发起通信场强检测:发送端依据接收端信号强度 RSSI 值确定分包数。4)图像传输开始:分包接力式传输至 4G 信号节点,通过 4G 再转发至远程服务器端,传输结束。

3 通信协议设计

3.1 依据场强 RSSI 值进行自适应数据分包

首先数据发送点发送场强探测包给下一接收节点,接收节点回传 RSSI 值,发送点依据信号强度 RSSI 值进行自适应数据分包。

自适应数据分包算法将 RSSI 值分为 4 个不同的档次,信号强度依次从强到弱,并依据 RSSI 强度值进行自适应数据分包。当 RSSI 值比较强,即信噪比较好时适合大数据包的传输,分包数少一点;反之当 RSSI 值比较弱,即信噪比较差时适合小数据包的传输,分包数多一点。自适应分包流程算法如图 4 所示, $P1 \sim P4$ 分包数依次按比例增加, $R1 \sim R4$ 信号强度依次减弱。

自适应分包流程算法的软件实现流程图如图 5 所示。

3.2 智能动态路由

本系统需要将采集到的图像数据利用无线模块接力传输至最近的 4G 信号节点,基于高压输电线路分布的特点,如图 1 所示其路由路线存在向左或向右两种传输方向,首先需要确定往哪个方向传输离 4G 信号节点更近,这样可以节省传输的时间。

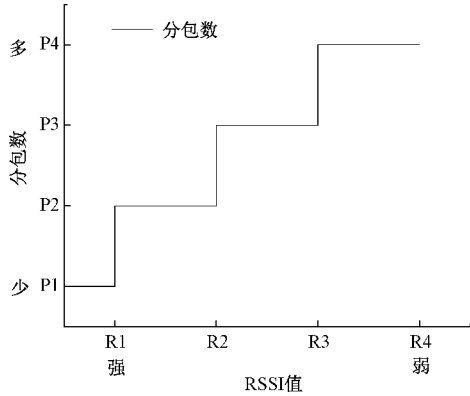


图 4 RSSI 值和分包数关系

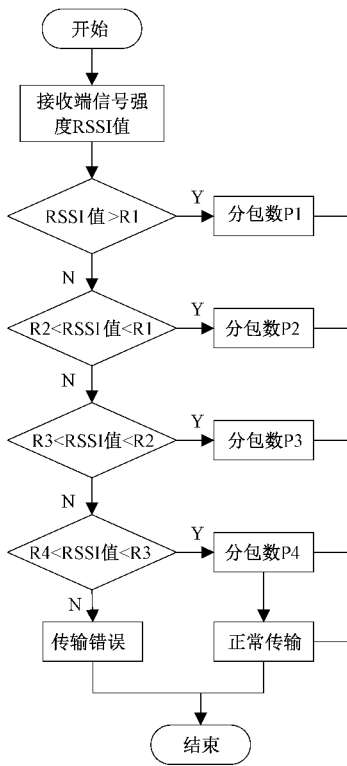


图 5 图像数据自适应分包流程

首先默认信息发送节点编号为 0, 然后对信息发送节点的左右各节点依次编号, 在发送图像数据之前, 设计一个小的数据包进行路由探寻, 当检测到某节点有 4G 信号时, 就将该节点编号依次回传到 0 号节点, 根据左右回传的 4G 节点编号大小判断哪个方向离 4G 信号节点更近, 从而选择该方向作为图像数据传输的方向, 具体流程图如图 6 所示。

通常情况下, 无线传感网中数据的接力式传输是一个节点接一个节点, 这是比较常规和理想的传输方式, 但是考虑到两个节点的距离和无线模块传输距离之间的关系, 通常情况无线模块的传输距离可达 2~4 个节点, 考虑到各节点工作在户外, 在实际传输过程中会出现节点损坏的情况,

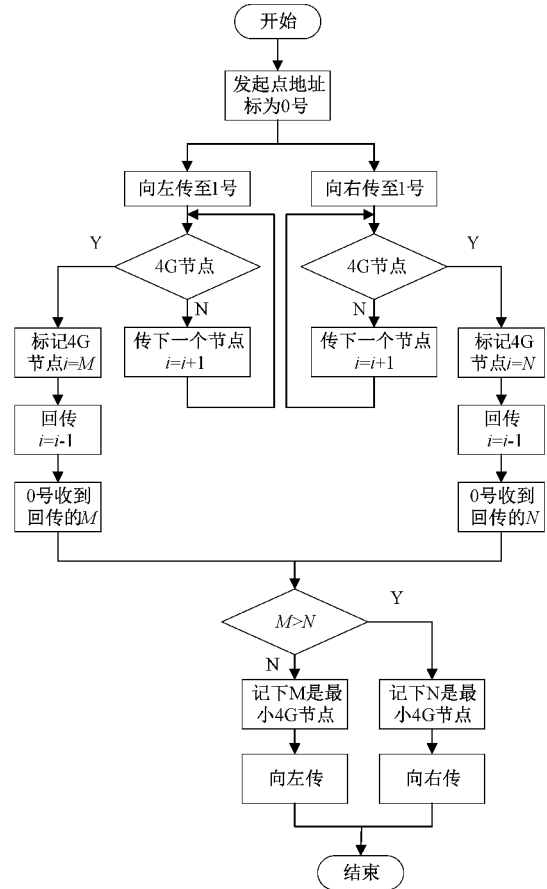


图 6 智能路由流程图

系统设计时要考虑一些特殊情况, 这样设计的系统才会更加稳定, 基于以上分析系统设计了跳传功能。

为了保证传输的可靠性, 本文设计可以跳过的最大节点数为 2 个, 因为如果设置跳过的节点数过多, 传输距离过长会增加误码率, 不利于后面图像数据的恢复。假设发送数据节点为 i 号节点, 对传输方向各节点从小到大依次编号, 为了节省传输的时间, 首先发送数据节点会选择最优路径进行传输, 向最远的 $i+3$ 节点发送探测包, 如果该节点在接收到探测包后向 i 节点返回 ACK 确认信息, 那么默认该节点正常工作, 并且能与 i 节点通信, 否则表明该节点损坏, 此时 i 节点会向 $i+2$ 节点发送探测包, 重复以上操作, 如果 i 节点与 $i+1$ 节点也不能通信, 则表明该传输链路损坏, 需要更换传输方向。系统会选择另一方向传输, 舍弃原来传输方向, 当左右两个方向都出现不能通信情况时, 接收端接收不到数据包, 系统会进行异常报错。通过这种传输协议不仅能节省传输的时间, 还能清楚知道损坏节点的具体位置, 进而进行故障的处理, 及时更换节点保证系统正常的工作, 具体流程图如图 7 所示。

4 系统测试与仿真分析

4.1 图像数据自适应分包测试

为验证本文所述观点的有效性, 实验中组建线型无线

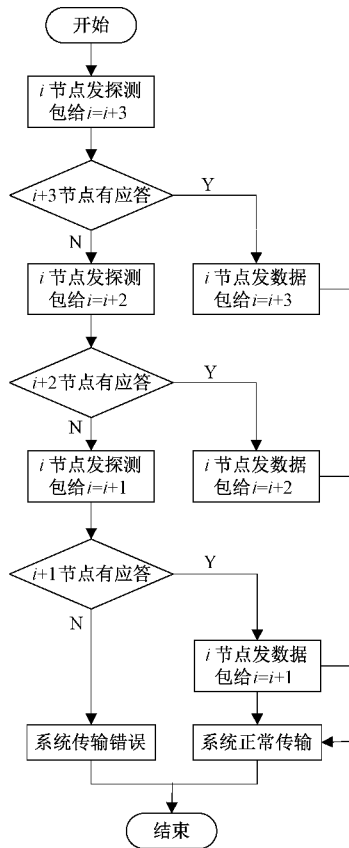


图 7 跳传功能流程图

传感网来实际测试,主要测试内容是不同误码率下,两个节点间一幅图片数据不同分包数传输时间对比,验证图像数据自适应分包功能,有如下的测试条件:

摄像头输出的 JPEG 照片大小为 1 MB,节点传输速率设置波特率为 500 kbps,发射功率为 16 dBm,定向天线增益为 6 dBi,设置传输节点数为 10 个,每个节点间隔 400 m 相同距离,测试环境为户外开阔地,温度 20 °C。

首先计算理想情况下两个节点间一幅图像数据传输的时间,即不分包也能正确传输,计算时间为 16.384 s。考虑到分包会产生重传的可能以及每包数据返回的 ACK 确认信息开销,不失一般性,本文设定包重传率为 3%,ACK 确认信息为 8 byte,依次计算出 10 包,100 包,1 000 包理论传输时间分别为 16.395 s,16.888 s,17.001 s。当信道存在噪声时,即有不同的传输误码率时,分别仿真出了误码率为 10^{-3} 和 10^{-5} 时的传输时间,如表 1 所示。

表 1 不同误码率下分包数和传输时间对比

分包数	理想情况/s	误码率 10^{-5} /s	误码率 10^{-3} /s
1	16.384	38.485	48.265
10	16.395	27.154	33.145
100	16.888	25.178	31.423
1 000	17.001	23.164	29.364

从表 1 可知,自适应分包能够明显减少传输时间,在有效分包数内传输时间随着分包数增加而逐渐减少,能够提高图像数据包传输效率。

4.2 智能动态路由协议测试

首先数据传输方向选择可以通过回传的节点编号大小确定,主要测试的内容是传输链路的跳传功能。实验中传输链路设计 10 个传输节点,默认数据发送节点为 0 号节点,第 10 号节点为 4G 信号节点,分别测试了几种不同跳传情况下传输时间。路由一:最优路径传输,跳过 2 个节点情况,即传输节点 3,6,9,10;路由二:跳过 1 个节点情况,即传输节点 2,4,6,8,10;路由三:没有跳过节点情况,即传输节点 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,测试结果如表 2 所示。

表 2 跳传测试时间对比

节点编号	路由一/s	路由二/s	路由三/s
1	—	—	17.624
2	—	19.457	35.165
3	20.21	—	52.869
4	—	38.147	70.354
5	—	—	88.021
6	41.389	56.548	105.628
7	—	—	122.657
8	—	75.984	139.847
9	62.682	—	157.154
10	80.923	96.547	175.684

从表 2 中,可知最优路径传输时间最少,跳传不仅减少传输时间,还能增加系统的冗余性,避免某一节点损坏而导致整个通信链路的瘫痪。

4.3 性能分析与对比

由上述测试结果,可知:1)图像数据自适应分包能够根据通信环境质量的好坏进行自适应数据分包,在通信质量差,误码率高时,分包数增多,能够明显减少数据包传输时间。在误码率为 10^{-3} 时,图像数据分包数为 1 时,两个节点间传输时间为 48.265 s。而把图像数据分包数为 10 时,传输时间为 33.145 s,明显减少了传输的时间,并且保证了图像数据的可靠传输,降低丢包率。所以,图像数据自适应分包特别适合野外通信质量多变的无线通信系统。2)智能动态路由协议首先能寻找最近的 4G 信号节点,避免错误的传输方向,特别适合高压铁塔等线型网络传输模型。另外,系统设计了跳传功能,如果系统中所有节点都是正常工作,数据传输时首选最优路径进行传输,从表 2 中,可知在 10 个节点传输时,路由一比路由二传输时间少 15.624 s,路由一比路由三传输时间更是少 94.761 s,平均多传输一个节点会增加 17 s 传输时间,传输时间区别非常大,对于野外多节点长距离传输环境,采用最优路径传输可以节省传输时间。此外,增加跳传功能可以避免某一节点的损坏而

导致整个通信链路的瘫痪,增加了通信系统的冗余性。所以,智能动态路由协议非常适合无 4G 信号偏远山区多节点长距离传输环境。

基于蓝牙的通信特点,可以看出蓝牙通信距离较短,网络规模小,不适合户外长距离图像传输。

基于 WiFi 的通信特点,可以看出 WiFi 功耗较大,适合标准协议,但不适合本文提出的路由分包私有协议。

ZigBee 的特点是组网功能强,适合短包信息,不适合户外高速的图像数据传输。具体的性能对比数据如表 3 所示。

表 3 性能对比表

网络类型	速率	距离	是否适用于无 4G 信号 偏远山区图像传输
蓝牙	低	近	适合短距离传输,不适合图像传输
WiFi	高	近	适合标准协议,不适合私有协议
ZigBee	较高	近	适合组网,不适合远距离传输
本文方案	高	远	适应性强,传输距离和速率兼顾,适合

本文所设计的基于无线传感网技术的智能图像传输系统很好的应用于无 4G 信号偏远山区输电线路的监测。针对户外环境复杂,通信质量多变的应用场景,设计了图像数据自适应分包来保证数据的有效和快速传输。另外,对于输电线路线型多节点长距离传输网络模型,设计了智能路由传输协议,不仅节省传输时间,同时也增加了系统的冗余性。

5 结 论

本文根据无线通信领域相关研究理论,针对无 4G 信号偏远山区输电线路的监测,设计了自适应数据分包协议和智能路由传输协议对图像大数据包进行传输。针对这两个协议,本文通过图像数据实际传输测试和仿真,得出自适应数据分包协议能很好的应用于无线传感网对图像大数据包的传输,在通信信道误码率小时,可以提高数据包传输效率,在误码率大时,可以减少数据包重传的概率;而智能动态路由传输协议在节约传输时间的同时,还增加了传输系统的冗余性,避免了某一节点的损坏而导致整个通信链路的瘫痪。本系统的协议很好地应用于无 4G 信号偏远山区输电线路的监测,为今后图像传输系统的应用研究提供了开发经验,也为无公网偏远山区远程监控提供了方案,具有很高的实际工程意义,达成设计目的。

参考文献

[1] 石振南. 高压输电线路运行环境在线监测系统设计[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[2] ABEELE F, HAXHIBEQIRI J, MOERMAN I, et al. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017,

PP(99):1-1.

[3] LI L, REN J, QIAN Z. On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System[C]. 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), IEEE, 2017, PP(22):77-80.

[4] HAXHIBEQIRI J, VAN F, MOERMAN I, et al. LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1193-1194.

[5] OJHA T, MISRA S, RAGHUWANSHI N S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 66-84.

[6] 黄正睿,潘森鑫,陈崇成. 集成 LoRa 与 BDS 的应急环境监测数据获取与传输技术[J]. 武汉大学学报, 2021, 46(4): 530-537.

[7] 曹阳,孟苗. 基于无人机光伏巡检的视频图像传输系统设计[J]. 计算机与网络, 2020, 46(15): 62-65.

[8] 吴佳彬. 基于蓝牙的嵌入式无线视频传输系统的设计与实现[D]. 南京:南京理工大学,2016.

[9] 谭穗妍,马旭,董文浩,等. 基于嵌入式机器视觉的水稻秧盘育秧图像无线传输系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 22-28.

[10] 黄凡. 基于 ZigBee 的无线图像传输技术的研究[D]. 青岛:青岛大学,2020.

[11] VARSHNEY S, KUMAR C, SWAROOP A. Lightning-based lion optimization algorithm for monitoring the pipelines using linear wireless sensor network [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 117(3): 2475-2494.

[12] 石荣,杜宇. 从香农公式再看直扩通信与通信干扰之间的博弈[J]. 通信技术, 2019, 52(4): 782-788.

[13] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理(第七版)[M]. 北京:国防工业出版社,2012, 11: 90-101.

[14] 罗忠涛,夏杭,詹燕梅,等. 相位噪声中弱信号检测的信噪比计算与分析[J]. 信号处理, 2021, 46(4): 1-11.

[15] MOHAMED I. Path-loss estimation for wireless cellular networks using okumura/hata model [J]. Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2018, 7(1): 20-20.

作者简介

- 林阳(通信作者),硕士,主要研究方向为无线通信。
E-mail: 1361555176@qq.com
- 张雪凡,博士,上海大学高级工程师,主要研究方向为无线通信。
E-mail: 10002461@shu.edu.cn
- 孙苗,硕士,主要研究方向为无线通信。
E-mail: 418771799@qq.com
- 何理旭,硕士,主要研究方向为无线通信。
E-mail: helixu0518@163.com