

基于 TD-LTE 的多机协同导航通信系统研究

李世超¹ 曹如月¹ 魏爽² 季宇寒¹ 张漫¹ 李寒²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:为实现多个农机在农田环境中自主导航协同作业,设计了基于 TD-LTE 的多机协同导航通信系统。该系统由导航定位传感器、无线通信模块、车载控制终端和远程通信软件组成,其中:传感器包含 GNSS 接收机、惯性测量单元(IMU)和角度传感器,用于获取每台农机的地理位置、自身姿态和车辆转向角信息。无线通信模块采用 4G DTU 作为系统通信设备,与车载终端串口相连,实现 RS232 串口转 TD-LTE 网络功能。4G DTU 经配置软件配置好串口参数等信息后,连接目的服务器 IP 地址和端口号,将车载传感器采集的数据按设计好的通信协议经 TD-LTE 网络传输到远程服务器的通信软件中。车载控制终端采用工控机(IPC),实现农机自动导航控制与人机交互。远程通信软件应用 Socket 网络编程开发了数据接收显示与数据发送的功能模块。系统对每台农机的状态信息实时上传的同时也可以接收远程服务器端对多台农机的协同控制命令,对于软件界面中显示的在线农机,可以根据优先级有选择的进行通信。以 4 台雷沃欧豹拖拉机为试验平台,每台农机状态信息的发送频率为 5 Hz,进行了系统稳定性试验测试,丢包率均为 0.1%,且均无延迟,系统具有较高的可靠性与实时性。

关键词:多机;自主导航;协同作业;TD-LTE;Socket;远程通信

中图分类号:S232.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2017)S0-0045-07

Development of Multi-vehicle Cooperative Navigation Communication System Based on TD-LTE

LI Shichao¹ CAO Ruyue¹ WEI Shuang² JI Yuhan¹ ZHANG Man¹ LI Han²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the autonomous navigation collaboration of multiple agricultural machinery in farmland environment, the multi-machine cooperative navigation communication system was designed and developed based on TD-LTE network in this paper. The system consists of four parts: navigation positioning sensors, wireless communication module, vehicle control terminal and remote communication software. The navigation positioning sensors include the global navigation satellite system (GNSS) receiver, the inertial measurement unit (IMU), and the angle sensor, which are used to obtain the geographical position of each agricultural machinery, and their attitude and vehicle steering angle information. The wireless communication module uses 4G Data transfer unit (DTU) as the system communication equipment, which connects to the serial port of vehicle terminal, and realizes RS232 serial port conversion to TD-LTE network. After the serial port parameters and other information of 4G DTU was configured by configuration software, it connected the destination server IP address and port number. Then the sensor data collected from vehicle were transferred to the remote server communication software through the TD-LTE network, using the designed communication protocol. The vehicle control terminal is an industrial personal computer (IPC), which is used to achieve automatic control of

收稿日期:2017-07-13 修回日期:2017-11-21

基金项目:北京市科技计划项目(D161100001416002)、国家自然科学基金项目(31571570)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)和国家国际科技合作专项(2015DFG12280)

作者简介:李世超(1992—),男,硕士生,主要从事多机协同导航技术研究,E-mail:18332300241@163.com

通信作者:张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail:cauzm@cau.edu.cn

agricultural machinery and human-computer interaction. Through applying the socket network programming, the data receiving display and data transmission function module was developed. The system is able to upload the status information of each agricultural machine in real time, and also receive the remote server control commands. The communication can be selective and the online agricultural machine have higher priority. Four Levuo tractors were used as the experimental platform, and the frequency of communication was 5 Hz. The testing results showed that the packet loss rate is 0.1%, and there is no delay. Therefore, the system has a high reliability and real-time performance.

Key words: multi-machine; autonomous navigation; cooperative operation; TD-LTE; Socket; remote communication

引言

农业机械自动导航技术是实施精细农业的关键技术之一^[1-3]。多机协同导航可有效提高作业效率,降低人工成本,受到越来越多的关注。

NOGUCHI等^[4]研究了在主从多机器人系统中使用的两种基本的运动控制算法,即GOTO算法和FOLLOW算法。ZHANG等^[5]在给定的横向和纵向偏移下,让一个无人驾驶拖拉机跟随另一个存在操作人员且纵向距离领先的拖拉机。朱忠祥等^[6]为了提高田间作业效率,提出了拖拉机队列自动控制系。以上研究属于半自动系统,要实现真正的多机协同导航自主作业,车辆间的信息通信十分必要。王致情^[7]搭建了自主跟随车辆试验平台,通过无线传输模块UTC-1212组建通信系统实现两车之间状态信息的通讯。ZHANG等^[8]采用蓝牙作为主从导航系统中的通信模块,并进行了相邻路径试验和跳过相邻路径转弯试验。戴俊等^[9]利用模块化理念设计了ZigBee无线通信、电动机驱动、SD卡速度存储及速度显示等硬件模块,实现了多车间信息交互的通信协议等。申忠宇等^[10]采用ZigBee设计了多智能小车协作控制的车载自组织无线通信网络。以上研究采用蓝牙或ZigBee实现车辆间的通信,通信距离较短,无法远程管控。

无线自组织网络具有灵活方便的优势,也可用于主从多机器人系统中车辆间的通信。但完成自组织需要大量通信节点参与,较难满足大范围、大规模高速数据传输^[11-12]。多机协同作业过程,不仅需要根根据农机相互位置进行频繁的网络拓扑切换,还需要进行大量数据、图像甚至视频的传输^[13],因此,需要一种支持长距离、高速、可靠的网络。

基于以上问题,本研究面向多机协同自主导航作业,设计开发基于TD-LTE^[14-15](Time division duplexing-long term evolution)的通信系统,通过4G网络实现信息的无线传输,保障农机之间、农机与服务服务器间的实时、可靠通信。

1 系统设计

1.1 系统整体设计

多机协同导航系统^[16]由一个主机、多个从机构成,示意图如图1所示。主机进行自主导航作业,多个从机实时接收主机指令,在保证安全的前提下跟随主机完成作业任务。在此系统中,通讯的实时性和稳定性^[17]是保障系统正常工作的前提。

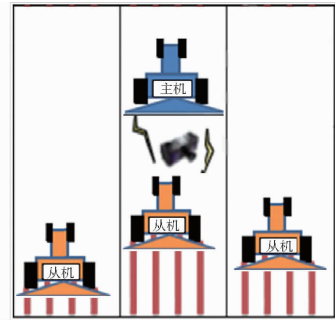


图1 多机协同导航系统示意图

Fig. 1 Multi-vehicle cooperative navigation system

1.1.1 多机协同导航系统结构设计

基于TD-LTE的多机协同导航系统总体框架如图2所示,每辆农机的自动导航控制系统相同,包含控制层、感知层和传输层。其中:控制层中的控制终端和可编程逻辑控制器为方向盘转向控制系统的核心部分,用于控制车辆导航过程中的自动转向等。感知层中的导航定位传感器主要用于采集农机自身状态信息,包括车辆转向角、姿态和位置信息,并可在车载终端实时显示。传输层主要由4G无线传输单元进行车载控制终端与远程服务端的数据信息交互。多机协同导航通信系统开发是本研究的重点,主要包括设计通信协议与通信优先级,实现车载终端串口通信与远程服务端Socket网络通信。

1.1.2 自动导航系统平台搭建

选择1台雷沃欧豹M904-D型拖拉机作为多机协同导航系统的主机,首先根据导航系统的技术要求,对车辆进行了改装,如图3所示。

在拖拉机上安装了双天线GNSS、惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)、前轮转角角度传

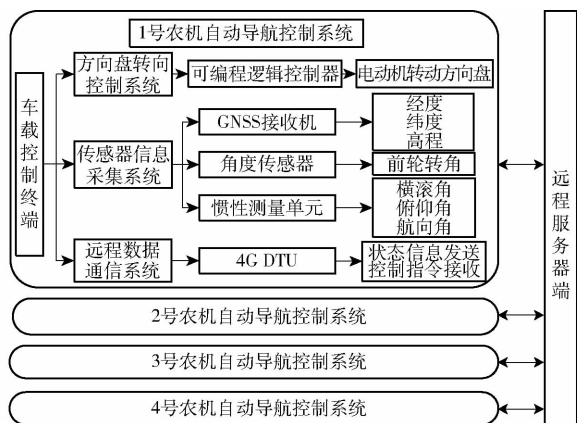


图2 多机协同导航系统总体框架

Fig. 2 General framework of multi-vehicle cooperative navigation system

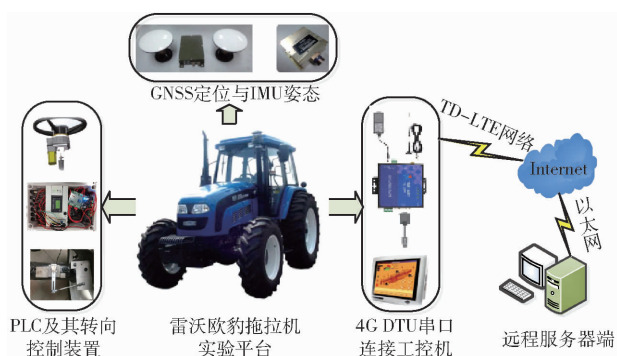


图3 农机导航系统实物图

Fig. 3 Physical map of tractor navigation system

感器,用于对农机参考中心的位置、速度、航向、横滚角、俯仰角以及农机的前轮转角进行实时检测。通过安装步进电动机与转台、电动机驱动器、可编程逻辑控制器(PLC),对方向盘的转动进行控制进而实现农机的自动转向。工控机作为车载控制终端,实现信息的采集和决策控制。通信模块采用济南有人物联网技术有限公司的4G-DTU(Data transfer unit),与工控机通过串口连接,实现农机自身状态信息的发送与远程协同控制指令的接收。

(1) 车辆定位部分

双天线GNSS接收机安装在车顶,与车体方向一致,可输出航向信息。IMU固定在车辆中心位置,用于对车辆的姿态进行矫正。

(2) 转向控制装置

车辆自动转向控制装置原理如图4所示。系统通过IMU和GNSS获取导航的位置偏差,由工控机计算控制量,生成导航控制的决策信息,发送给PLC控制器。PLC向控制方向盘转动的步进电动机输出PWM信号,并接收前轮转角的检测信息反馈到工控机,形成闭环控制。转向控制装置包括方向盘转动机械设计、前轮转角检测结构设计和PLC控制器设计。

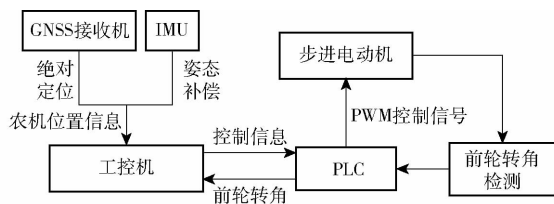


图4 自动转向控制系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of automatic steering control system

方向盘转动机械设计如图5所示。其中,转台底端由螺孔和托盘相固定,转台电动机组合通过套管托盘与车辆转向助力杆外壳固定。套管上设计3个紧定螺钉,三者间以 120° 均匀分布,可以通过调整3个紧定螺钉及卡箍固定托盘并保持转台与助力杆同心。导航作业时方向盘由上下压盘夹紧并与中空旋转转台相接,通过步进电动机带动转台旋转控制方向盘转动。

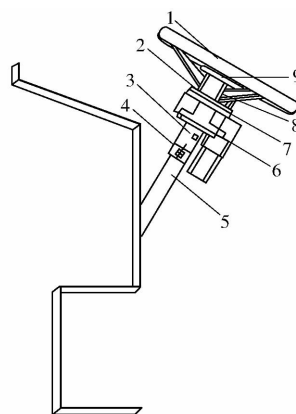


图5 方向盘转动控制机构图

Fig. 5 Structure of steering wheel rotation control

1. 方向盘 2. 下压盘 3. 套管托盘 4. 卡箍 5. 转向助力杆
6. 电动机转台组合 7. 转台传动环 8. 内六角螺钉 9. 上压盘

前轮转角检测机构如图6所示,利用平行四边形同位角,使角度传感器转动角度等价于轮胎方向角,即将轮胎转向中心(黄油嘴)理论上平移至角度传感器旋转轴。黄油嘴右侧2颗螺钉连线平行于轮胎方向,可在右摆臂上确定平行四边形另一顶点,使之与黄油嘴连线和左摆臂等长且平行于轮胎方向。

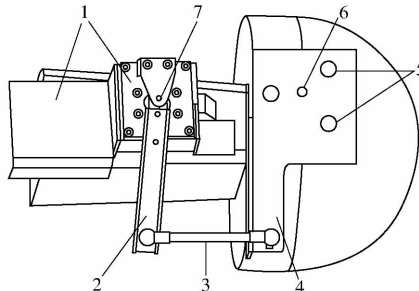


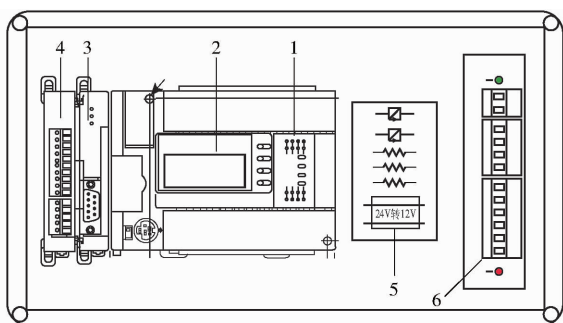
图6 前轮转角检测机构图

Fig. 6 Structure of steering angle detection

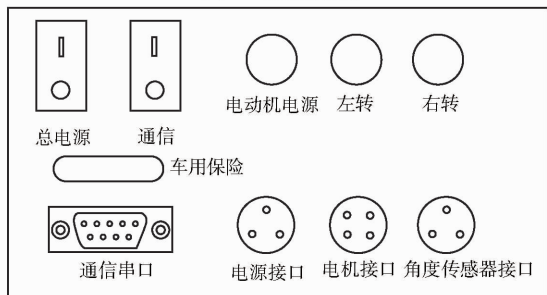
1. 传感器支架 2. 左摆臂 3. 圆形连杆 4. 右摆臂 5. 右侧螺钉
6. 黄油嘴 7. 角度传感器

调节圆形连杆,使黄油嘴和角度传感器转轴连线与之平行且等长,从而构成平行四边形,左摆臂即可代替轮胎方向。农机转向过程中,左摆臂带动角度传感器的轴心转动,进而检测前轮转向角。

PLC 控制器包括 PLC 主机、显示模块、AD 转换模块、串口通信模块、步进电动机驱动器和电路保护模块,如图 7 所示。AD 转换模块用于检测角度传感器的输出,串口通信模块负责 PLC 和工控机之间的通信,进行前轮转角信息的发送以及控制命令的接收。PLC 主机负责控制指令的执行,输出高频脉冲信号对步进电动机驱动器进行控制。主机上的显示模块用于查看主机状态,若有故障,可以显示相应的错误代码。



(a) PLC控制器组成



(b) PLC面板

图 7 PLC 控制器

Fig. 7 PLC controller

- 1. PLC 主机 2. 显示模块 3. 串口通信模块 4. AD 转换模块
- 5. 电路保护模块 6. 步进电动机驱动器

(3) 远程通信部分

通过 TD-LTE 网络,无线通信模块将农机状态信息上传至互联网,服务器通过以太网访问互联网获取 DTU 数据。同理实现车载终端对指令的接收,保证每台车辆与服务器之间实现双向通信。

1.2 通信协议设计

通信协议是指进行通信的双方之间必须遵守的准则,规定了信息的发送和接收顺序、通信双方之间的连接方式以及各个信息单元的含义和信息单元中的内容等^[18]。高效的通信协议可以节省双方之间进行通信和对数据进行解析所带来的消耗^[19]。

通信协议为进行网络中的数据交换(通信)而建立的规则、标准或约定(=语义+语法+时序)。远程服务器与车载控制终端的通信协议规定了它们之间的通信格式及其各字段所代表的含义,当车载终端向服务器发送消息时,服务器会按照通信协议中所规定的字段对消息进行解析和处理。

(1) 上传数据帧格式

上传数据帧采用以 string 定义的字符串数组方式,其每一个元素相当于一个字符串变量,并不要求具有相同的长度,即使对同一个元素而言,它的长度也是可以变化的,格式如图 8 所示。上传数据帧以 '\$' 符号起始,以 CRC 校验结束,使用 ',' 将数据分为 ID、时间、经度、纬度、高程、航向、俯仰、横滚、转角和错误码。

各个信息单元的具体含义如下:ID 即每台车载 DTU 分配的编号,是下发命令的重要依据。时间由 GNSS 获取,为当前数据帧发送时间。通过 GNSS 接收机采集的农机位置信息:经度、纬度和高程。通过 IMU 采集的农机姿态信息:航向角、俯仰角和横滚角。通过角度传感器采集前轮转向角。错误码为超时、校验失败和数据位不足时显示,无错误则不显示。CRC 校验与 Modbus 类似,从 '\$' 开始计算,接收程序只负责接收 DTU 传输过来的数据,CRC 校验通过之后就存储到原始信息表,给 DTU 反馈成功标识。未通过校验,则返回失败标识。

(2) 下发指令帧格式

多机协同导航作业有命令型和跟随型两种基本作业模式。命令型作业即希望农机去到与当前作业位置相距一定距离的特定位置,跟随型作业即以一种更加协调的方式引导一个或多个农机以预定的速度、相对距离和航向角度跟随主机完成田间作业。由此设计下发指令帧,格式如图 9 所示。

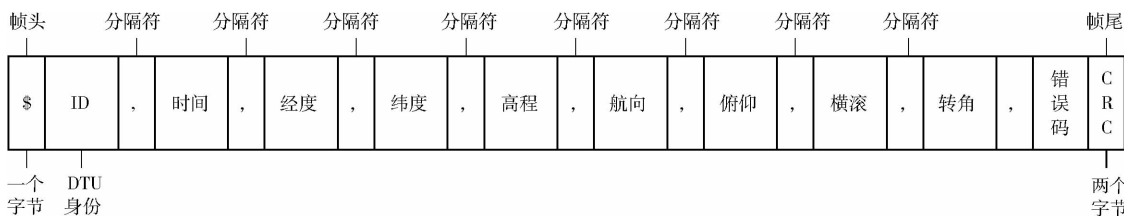


图 8 上传数据帧格式

Fig. 8 Format of upload data frame

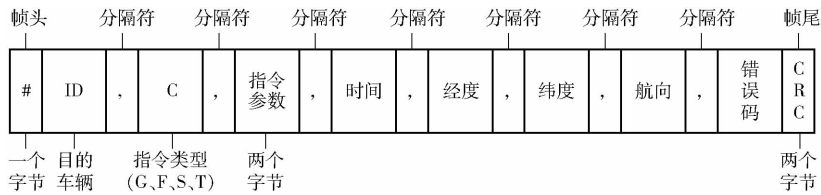


图9 下发指令帧格式

Fig. 9 Format of download command frame

下发指令帧以‘#’符号开始,同样以CRC校验位结束。指令包括目的车辆DTU编号,指令类型,指令参数,时间,预设路径目的位置信息,农机航向角度以及错误码。其中,DTU的ID编号指明了指令发送的目的农机。特别地,当ID号为‘00’时,表示将指令向网络中的所有在线农机广播。C代表指令类型,分为4类:去、跟、停、转(G、F、S、T)。G代表命令型,F代表跟随型。命令参数有两个字节,‘01’代表要目的农机行驶到某一位置(G);‘02’代表要目的农机以相对距离和航向角跟随另一农机(F);‘03’代表要目的农机减速或停止行驶(S);‘04’代表要目的农机转弯或绕行(T)。时间即指令发送时间,以经度和纬度提供目的农机位置信息,也是跟随型从机与主机相对距离的计算依据。

2 功能实现与试验结果分析

2.1 系统通信功能实现

系统通信软件设计包括车载终端串口通信设计和服务器端网络通信设计两部分。

2.1.1 车载终端软件系统设计

多线程串口通信设计部分用MFC/C++编程在车载终端完成,添加写入和读取DTU串口通信功能。通过调用Windows的API函数进行串口数据的接收和发送。采用API函数Create File打开指定的COM口并指定允许读写和同步方式;对相应的串口进行初始化配置工作,设定波特率、通信字节数、奇偶校验位、配置读写间隔的参数等;采用Read File和Write File函数读写串口;调用Close Handle函数关闭串口。

在多机协同导航过程中,需要同时对GNSS接收机、IMU、PLC、DTU进行串口通信,因此需要建立多线程编程,合理的配置多串口的数据读写。采用Create Thread进行线程的创建,通过对话框上串口连接和断开按钮进行每一个串口通信线程的开始和结束。同时,在自动导航的进程中,需要进行各项数据的分析和处理,因此将各个线程中接收到的数据设为类的公有成员变量,以此实现多个线程间的数据共享。

最终车载终端按设计好的通信协议将农机状态

信息写入DTU,并通过MFC的文件操作基本类CFile保存在农机状态信息文档;通过读取DTU函数接收远程监控指令信息。

2.1.2 远程服务器通信软件设计

网络通信部分,用C#语言在远程服务器端完成,开发服务器端多接入Socket网络通信软件,实时接收每台农机车载DTU上传的状态信息,并存储到SQL Server数据库中以供查询和远程监控调用。远程通信软件的功能结构框图如图10所示,包括数据接收与发送模块、数据处理模块。

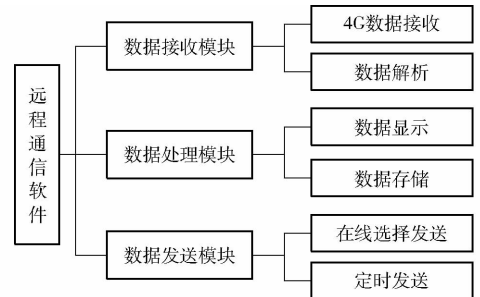


图10 远程通信软件功能结构

Fig. 10 Structure of telecommunication software function

(1) 数据接收与发送模块

4G数据的发送与接收通过Socket网络编程实现。Socket采用的是门面模式,只需调用Socket接口来实现发送和接收数据,不用关心其内部的TCP/IP协议族^[20]。

Socket之间的连接过程可分为3个步骤:服务器监听;客户端请求;连接确认。需要输入服务器的固定IP与可用端口号才能开启远程通信软件的数据服务。数据接收的程序流程如图11所示。服务开启之后,远程通信软件就处于监听状态,建立一个新的子线程来检测4G DTU的连接请求。连接成功后,远程通信软件在刚才建立的子线程中周期性查询Socket是否有数据,如果有数据传入,就进行有效性分析,对有效数据进行显示和存储等操作。设置监听队列长度为10,即同时能够处理10个连接请求。当车载终端需要向服务器端发送消息时,会申请一个随机分配的Socket,服务器端则有全局的Socket,可以接收多个终端的消息。同理,可对在线农机进行一台或多台的选择发送协同控制指令,也可以定时自动发送指令信息。Socket正是利用这种

通信方式解决了进程之间的通信问题。

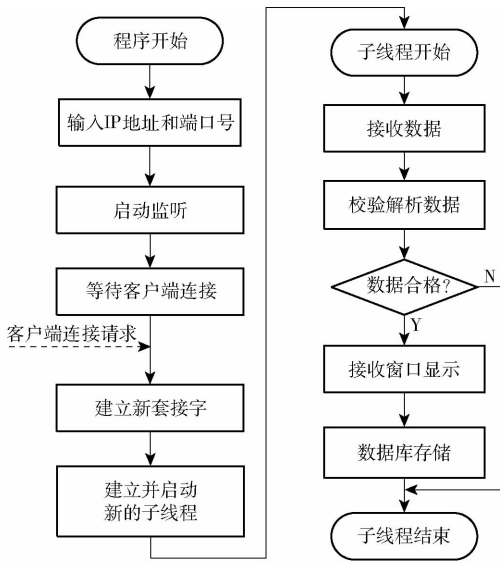


图 11 数据接收流程图

Fig. 11 Data receiving flow chart

(2) 数据处理模块

远程通信软件的数据收发界面包括网络设置窗口、数据接收窗口、指令发送窗口,以及接收区设置和发送区设置。网络设置端口用于连接目的 IP 地址和端口号。接收区设置可将接收到的每帧数据存储于数据库相应字段。发送区设置,可以设定指令定时自动发送的时间。

2.1.3 动态通信优先级设定

系统中每台农机自身状态信息的上传是实时的、不间断的,无需区分先后顺序。而服务器端远程监控多机协同导航作业,下发命令型、跟随型或任务调度等指令信息时,需要对在线农机进行选择通信,对目的车辆进行单独发送指令或断开某个农机的连接群发指令。即不同的作业模式下,下发指令存在一个动态的通信优先级。比如,一台收获机即将收满谷物时,上传自身状态至服务器。经决策分析,服务器端对作业区域地头的几辆运粮车进行位置上的判断,选择离收获机较近的一辆,发送指令,命令它行驶至目的位置装粮。通信选择流程图如图 12 所示。

通信优先级,即选择指定车辆优先通信,使系统以更高效的方式完成协同作业任务。可以通过远程服务端上的监控软件对多台农机进行注册、绑定操作。服务器端先进行农机选取指令的发送,使服务器选定主要监控的一台或多台车辆。此时,车载 DTU 的 SIM 卡号会作为数据和协议首部一起发送到服务器上。服务器端的界面可以手动或自动的选择单个或多个农机发送协同控制指令。

2.2 系统稳定性测试

系统稳定性测试包括可靠性测试、实时性测试等。

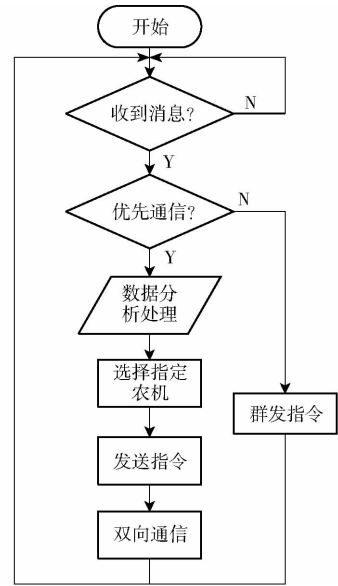


图 12 通信选择流程图

Fig. 12 Communication selection flow char

2.2.1 可靠性测试

自动上传时间是指车载 DTU 隔相同时间自动向服务器上传农机的位置和姿态等信息。以 GNSS 信息获取频率设置上传时间指令,在车载终端上设置农机自动上传自身状态信息间隔时间为 200 ms,即发送频率定为 5 Hz。同时连接 4 个 DTU,连续双向通信 50 s,即测试上传状态信息帧和下发指令消息各为 1 000 个,查看丢包数目。系统的丢包数和丢包率如表 1 所示,可见,多个并发用户连接的情况下,系统的丢包率仅为 0.1%,系统能够稳定可靠工作。

表 1 系统的丢包数和丢包率

Tab. 1 Packet loss number and rate of system

发送端	接收端	发送包 数/个	接收包 数/个	丢包 数/个	丢包 率/%
车载终端	远程服务器	1 000	999	1	0.1
远程服务器	车载终端	1 000	999	1	0.1

2.2.2 实时性测试

为进行实时性测试,在远程服务器通信软件添加自动获取时间函数,并将系统时间显示于网络数据接收窗口每帧数据之前。对比上传数据帧中信息开始发送的时间,与网络通信软件数据显示窗口当前接收时间,查看有无延迟,以验证通信实时性效果。

在实验室以 4 台计算机模拟 4 个车载终端均与 IMU、PLC 和 DTU 串口连接,并通过 GPSSim 仿真软件获取位置信息。将 4 个 DTU 编号为 01、02、03、04,模拟真实田间作业环境下的农机状态信息发送至远程服务器通信软件,服务器通信软件界面如图 13 所示。

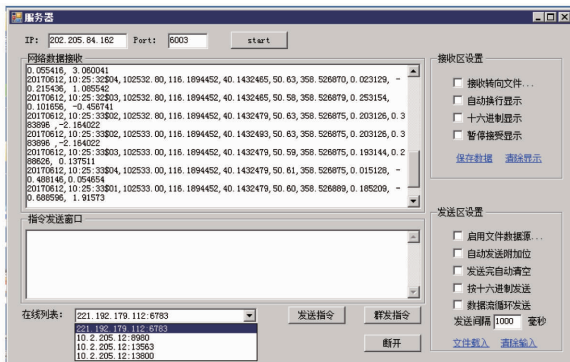


图 13 服务器网络通信界面

Fig. 13 Network communication interface of server

发送时间变化为 10:25:32—10:25:33, 发送频率为 5 Hz, 即 5 帧数据写入 DTU 理论接收时间为 1 s。通过观察服务器通信界面网络数据接收窗口, 实际显示的 5 帧数据接收时间, 从 2017 年 6 月 12 日

10:25:32—10:25:33, 累计也为 1 s。对比说明系统数据通信无延迟, 有很好的实时性, 可以满足多机协同导航作业通信需求。

3 结论

(1) 设计了一种基于 TD-LTE 的多机协同导航通信系统, 通过车载终端, 对每台农机的状态信息实时上传的同时也可接收远程服务器端对多台农机的协同控制命令。

(2) 设计开发了远程通信软件, 该软件采用 Socket、SQL Server 数据库等技术, 实现了远程通信及导航定位数据的保存、显示和删除等功能。

(3) 系统通信性能测试结果表明, 农机状态信息的发送频率为 5 Hz 时, 丢包率为 0.1%, 且数据显示通信无延迟, 验证了系统具有较好的可靠性和实时性。

参 考 文 献

- 汪懋华, 李民赞. 现代精细农业理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsamJI. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008.
- Ji Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)
- SCHIMMELPFENNIG D, EBEL R. On the doorstep of the information age: recent adoption of precision agriculture [J]. Economic Research Service, Paper No. EIB-80, 2011, 80:33.
- NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- ZHANG X, GEIMER M, NOACK P O, et al. A semi-autonomous tractor in an intelligent master-slave vehicle system [J]. Intel Serv Robotics, 2010(3): 263-269.
- 朱忠祥, 宋正河, 谢斌, 等. 拖拉机队列自动控制系统的[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 149-154.
ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, XIE Bin, et al. Automatic control system of tractors platooning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 149-154. (in Chinese)
- 王致情. 农业车辆自主跟随控制系统的设计与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
WANG Zhiqing. Design and realization on autonomous following control system of agricultural vehicles [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- ZHANG C, NOGUCHI N, YANG L. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 121: 269-281.
- 戴俊, 瞿成明, 郝玲玲, 等. 基于无线通信网络的多智能车速度一致性控制系统[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2015, 29(4): 107-112.
DAI Jun, JU Chengming, HAO Lingling, et al. Consistency control system of multi-agent car speed based on wireless communication network [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2015, 29(4): 107-112. (in Chinese)
- 申忠宇, 郑启文, 王川, 等. 无线通讯网络的多智能小车编队控制系统[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(增刊1): 18-21.
SHEN Zhongyu, ZHENG Qiwen, WANG Chuan, et al. Multi-smart car control system based on wireless communication network [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43 (Supp. 1): 18-21. (in Chinese)
- MULLER G, RITTENSCHOBBER T, SPRINGER A. A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery [J]. Elektrotechnik und Informationstechnik, 2010, 127(3): 39-46.
- 梁一鑫, 程光, 郭晓军, 等. 机载网络体系结构及其协议栈研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(1): 96-111.
LIANG Yixin, CHENG Guang, GUO Xiaojun, et al. Research progress on architecture and protocol stack of the airborne network [J]. Journal of Software, 2016, 27(1): 96-111. (in Chinese)

- 29-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s105&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.005.
- ZHAO Jinhui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Mechanical performance testing device for planter openers based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):29-34. (in Chinese)
- 26 胡军. 精密播种单体播深控制的理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Hu Jun. Theory and experimental research of sowing depth control for precision seeder unit[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 27 胡鸿烈, 孙福辉. 单体仿形压轮式播种单组的设计与试验研究[J]. 农业机械学报, 1996,27(增刊):57-61.
- HU Honglie, SUN Fuhui. Study on designing and testing of the drill unit with individual profiling press wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996,27(Supp.):57-61. (in Chinese)
- 28 李国梁, 杨然兵, 尚书旗. 2BY-6 型小区育种试验播种机仿形机构研究[J]. 农业工程, 2014,4(6):10-11.
- 29 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(4):1-8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001.
- HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):1-8. (in Chinese)
- 30 李玉环, 孟鹏祥, 耿端阳, 等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(增刊):62-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s010&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.010.
- LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):62-68. (in Chinese)
- 31 温丽萍. 基于 PLC 的精密播种机播种深度控制系统研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- WEN Liping. Research of sowing depth control system for precision seeder unit based on PLC[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 32 盛凯. 播种机仿形机构仿形轮配置的研究[J]. 吉林工学院学报, 1995,16(4):21-27.
- SHENG Kai. Studies on the arrangement of profiling wheel in the profiling mechanism of a planter[J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 1995,16(4):21-27. (in Chinese)
- 33 王林生, 马瑛, 汪小志, 等. 基于模糊控制的播种机精密单体播深控制仿真研究[J]. 农机化研究, 2016,38(1):86-89.
- WANG Linseng, MA Ying, WANG Xiaozhi, et al. Simulation on precision single sowing depth control of seeder based on fuzzy control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(1):86-89. (in Chinese)
- 34 陈蒋, 王淼森, 赵明, 等. 玉米播种机电液播深调节装置运动仿真与优化[J]. 农机化研究, 2017,39(10):128-132.
- CHEN Jiang, WANG Miaosen, ZHAO Ming, et al. Motion simulation and optimization design of electro-hydraulic sowing depth adjusting device for corn seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(10):128-132. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 51 页)

- 13 肖德琴, 黄顺彬, 殷建军, 等. 基于 3G 和 Wi-Fi 的高分辨率视觉传感器传输控制方案[J]. 农业工程学报, 2015,31(9):167-172.
- XIAO Deqin, HUANG Shunbin, YIN Jianjun, et al. High resolution vision sensor transmission control scheme based on 3G and Wi-Fi[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(9):167-172. (in Chinese)
- 14 张水军. TD-LTE 制式 4G 移动通信网络应用研究[J]. 信息通信, 2012(2):228-228
- 15 李红亮, 王雨, 梁涛. TD-LTE 网络架构及关键技术分析[J]. 黑龙江科技信息, 2012(24):108.
- 16 KOBAYASHI R, SUZUKI M, NAKANO K. Leader-following formation navigation with virtual trajectories for dynamic multi-agents[C]//Advances in Automotive Control, 2013:773-779.
- 17 王明星, 杨玮, 李民赞, 等. 集成 3S, ZigBee 和射频识别的土壤采样远程智能管理系统[J]. 农业工程学报, 2017,33(增刊 1):143-149.
- WANG Xingming, YANG Wei, LI Minzan, et al. Remote intelligent management system for soil sampling based on 3S, ZigBee and radio frequency identification[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1):143-149. (in Chinese)
- 18 张超. 车载通讯服务器的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- ZHANG Chao. The design and implementation of vehicular communication server[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- 19 李静林, 孙其博, 杨放春. 下一代网络通信协议分析[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010.
- 20 罗丽琴, 詹祖桥. Windows 网络编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011:182-234.