

微功率无线数据传输协议的研究及实现

孟焱毅¹, 陈 虹¹, 武广华¹, 龙希田², 杨 昆², 姜学平²

(1 清华大学 微电子学研究所, 北京 100084; 2 国家电网智能电网研究院, 北京 102209)

摘 要: 为了实现智能电网中无线自动抄表的应用, 国家电网公司在 Sub-GHz 频段上提出微功率无线数据传输协议. 通过研究微功率无线数据传输协议, 采用 VC 和 LabVIEW 协同设计的方法分层实现协议栈, 并在 PC 和 USRP 组成的验证平台上完成对协议栈功能如组网、数据收发、收集节点电能信息的验证. 该设计具有开发周期短, 便于移植等特点.

关键词: 微功率无线数据传输协议; 协议栈; USRP; LabVIEW

中图分类号: TN4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2016)12—0020—05

Research and Implementation of Micro-Power Wireless Data Transmission Protocol

MENG Yan-yi¹, CHEN Hong¹, WU Guang-hua¹, LONG Xi-tian²,
YANG Kun², JIANG Xue-ping²

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 State Grid Smart Grid Research Institute, Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to realize the application of wireless automatic meter reading in Smart Grid, the Micro-Power Wireless Data Transmission Protocol is proposed by state grid Corp. on the Sub-GHz band. Through the research of Micro-Power Wireless Data Transmission Protocol, the method of VC6.0 and labVIEW collaborative design is adopted to implement the protocol stack, and the function of this protocol stack, such as networking, data transmission and reception, collection of node power information are verified on the verification platform composed of PC and USRP. The design has the advantages of short development cycle, easy to transplant and so on.

Key words: micro-power wireless data transmission protocol; protocol stack; USRP; LabVIEW

1 引言

国家电网提出覆盖频段为 471~486 MHz 的微功率无线数据传输协议 Micro-Power Wireless Data Transmission Protocol (MPWDTP), 用于智能电网中的无线自动抄表的环境, 以实现统一标准下更大单点覆盖范围内的用户用电信息收集.

本文在研究 MPWDTP 协议的基础上, 采用软件无线电的方式实现 MPWDTP 协议. 该设计采用 VC6.0 和 LabVIEW 分层设计的方法实现协议栈功能, VC6.0 实现应用层, 网络层和介质访问控制

(MAC)层功能, LabVIEW 实现物理层调制解调功能.

VC6.0 和 LabVIEW 之间控制权的交互采用读写二进制文件的方法. 与射频前端相关部分按照协议内容配置通用软件无线电外设 (USRP) 即可. 该设计具有开发周期短, 便于验证, 可裁剪等优点.

2 MPWDTP 协议介绍

MPWDTP 协议规定了电力用户用电信息采集系统用微功率无线网络的组网功能、协议层次、空中帧结构、参数配置和必要算法等. 适用于用电信息采

集系统在本地通信采用微功率无线的组网方式情况下的集中器通信单元与电能表通信单元、采集器通信单元之间的数据交换。

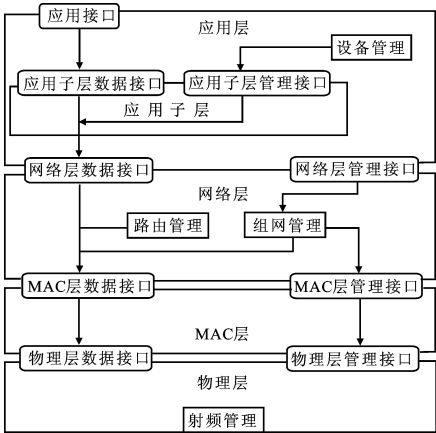


图 1 MPWDTP 协议结构图

2.1 MPWDTP 协议结构

如图 1 所示，MPWDTP 协议结构基于标准的开放式系统互联 (OSI) 七层模型，定义了物理层、MAC 层、网络层和应用层。每一层为上面的层执行一组特定的服务，其中数据实体提供了数据传输服务，管理实体提供所有其它服务。

2.2 MPWDTP 协议层

MPWDTP 协议通过各层之间协同作用实现。而每一层内部又按照各自的帧格式组解帧，维护本层的常量表与属性表。

应用层作为协议最上层，有三方面功能。首先，完成应用支持子层职责，包括配置命令，模块复位等，端到端数据确认等；其次，作为设备管理平台，定义网络中设备的角色以及配置信息。最后，作为协议栈与用户应用程序交互的接口，负责协议栈的初始化，指定用户发送数据以及后期功能的开发。网络层主要负责组网相关功能。主要包括组网管理，如中心节点组网，游离子节点加入网络等。组网的步骤一般分为选择信道并发起组网，确定组网信标参数，发送组网信标，配置子节点，完成组网等。MAC 层负责

信道接入控制，执行网络扫描，保证通信链路可靠，维护设备工作状态、地址信息等属性表信息。物理层主要负责打开和关闭无线收发器，对当前信道进行能量检测、空闲信道评估、信道频率选择、调制解调等功能。如表 1 所示，MPWDTP 协议物理层采用 471~486 MHz 频段，信道宽度为 100 kHz，采用 GFSK 的调制方式，数据率为 10 Kbps。

表 1 物理层参数表

参数	值
频宽/MHz	471~486
数据率/ Kbps	10
调制方式	GFSK
BT	0.5
频偏/kHz	25±5
调制系数	5±1
前导码	01010101...
前导码长度/Bytes	80
信道宽度/kHz	100
发射功率/mW	50

3 协议栈实现

3.1 协议栈整体架构

为避免硬件电路开发时间长，不易修改和调试的缺点，本文使用软件无线电编程的方式实现 MPWDTP 协议栈。如图 2 所示，该软件无线电平台由软硬件两部分组成。软件部分包含 VC6.0 和 LabVIEW。应用层，网络层和 MAC 层的功能采用 C 语言编写，在 VC6.0 上实现。LabVIEW 是国家仪器公司的一种图形化编程语言，它使用图标代替文本行创建应用程序^[1]来实现物理层功能。硬件部分是国家仪器公司的 USRP 设备，它是一种可通过 LabVIEW 程序快速配置，易于使用的射频前端平台，能够完成物理层通信，频谱检测等功能^[2]，协议栈中使用 USRP 设备充当射频前端。

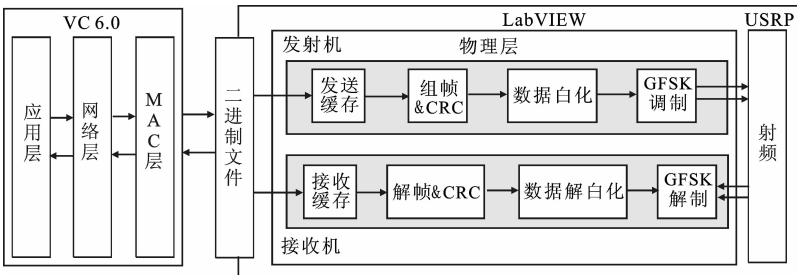


图 2 MPWDTP 协议栈架构图

VC6.0 部分主要基于状态机方式实现. 每一个 C 文件都维护一个状态机函数, 上层的状态机函数可以调用下层状态机函数, 下层的状态机在反馈变量或者接收帧的作用下也可返回上层状态机. 协议栈初始化之后, 进入 aps.c 文件内部的主函数, 接着调用网络层主状态机 nwkFSM(). 网络层任务执行完毕后, 通过状态信息 nwkState 判断是否继续调用下层状态机 macFSM(), 以此类推.

LabVIEW 部分基于组解帧的数据流顺序模块化执行. 物理层可以分为发射机和接收机两个模块. 发射机模块从发送缓存中取出 MAC 层帧后依次进行组帧及 CRC 校验, 数据白化, GFSK 调制后交给 USRP 发送. 接收机模块对于从 USRP 接收到的信号依次进行 GFSK 解调, 帧同步, 解白化, 解帧及 CRC 校验, 最后将处理完的帧存入接收缓存中.

3.2 应用层

应用层作为协议栈最上层, 是整个协议栈的入口. 首先依次调用函数 apsInit(), nwkInit(), macInit() 完成协议栈的初始化.

初始化完成后将网络层状态设置为 NWK_STATE_FORM_NETWORK_START 来启动整个协议栈的组网操作, 接下来网络层主状态机调用函数 nwkFSM(), 进入到网络层, 执行后续组网操作. 组网操作完成后, 需要执行数据收发操作. 函数 p2p_ack(), broadcom_ack() 分别用来验证需要响应帧的点对点数据收发和广播数据收发. 最后进行子节点电能信息采集验证, 调用函数 broadcom_power() 来收集所有在网子节点的电能信息.

3.3 网络层

网络层主要执行组网相关操作, MPWDTP 协议规定的组网流程如图 3 所示.

信道扫描: MPWDTP 协议将 471 MHz 到 486 MHz 划分成 66 个信道. 在组网之前, 首先要进行信道扫描, 确定组网所用的信道号. 按照协议规定, 调用函数 ED_SCAN() 在当前信道上, 在接收 8 个字节的时长内进行 12 次能量扫描(ED)采样, 去除最高与最低两个极值后进行取平均数处理得到 ED 值. 通过与协议规定的阈值比较, 得到信道是否可用的结果. 若判断信道忙, 信道号加一, 再进行判断.

确定组网信标参数: 根据协议规定的信标帧格式, 需要确定网络号, 网络规模, 组网信标标识, 场强门限等信标参数.

发送信标: 根据信标帧格式调用函数 FormatBeaconRequestPayload() 和 TxData() 组信标帧, 并

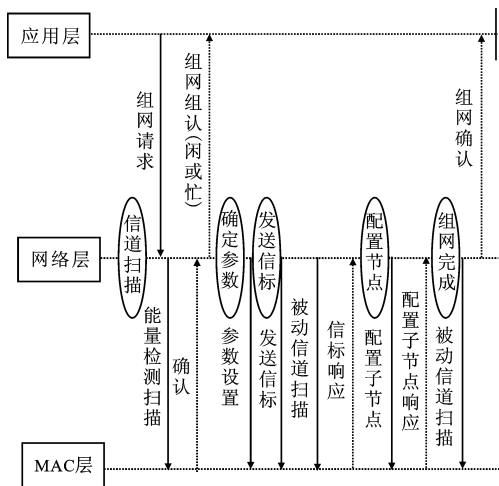


图3 MPWDTP 协议栈组网流程图

发送. 之后进入被动扫描状态, 直到定时器到时. 此时检测接收缓存 tmpRxBuff 内符合条件的信标响应帧个数, 并添加进中心节点的邻居表中.

配置子节点: 根据邻居表中的节点信息, 调用函数 nwkFormatConfigureSubnodePayload() 和 TxData() 组配置子节点帧并发送, 之后进入被动扫描状态等待配置子节点响应.

组网完成: 当邻居表中的所有子节点都配置完成之后, 组网完成.

3.4 MAC 层

MAC 层主要负责信道接入控制, 网络维护, 路径信息收集, 发送、接收和确认等操作.

MAC 层共有四种帧类型: 信标帧, 数据帧, 命令帧和确认帧. 信标帧用于组网操作. 数据帧将上层各种帧类型打包成 MAC 层数据. 命令帧用于对等 MAC 主体之间传送控制信息, 确认帧用于通告数据帧已被正确接收.

为了避免信道冲突, MPWDTP 协议规定在发送数据帧, 命令帧和信标帧之前, 使用带冲突避免的载波侦听多址接入(CSMACA)算法进行信道接入, 判断为闲的信道才可使用. 确认帧直接使用对应数据帧的信道, 无需 CSMACA 接入.

MAC 层从网络层接收到 MAC 层服务数据单元(MSDU), 对其进行组帧操作. 若网络层状态是 NWK_STATE_MLME_NETWORK_FORMATION_BECON_request(), MAC 层调用函数 macFormatBeaconRequestPayload 组信标帧. 若网络层状态是 NWK_STATE_MLME_data_frame_encapsulation 则组数据帧, 之后将组好的帧存入发送缓存 tmpTxBuff 中.

MAC 层从物理层接收到的帧存放在接收缓存 tmpRxBuff 中,调用函数 detect_rxbuff()来对帧类型进行判断,并结合当前等待状态 wait_status 的值,对接收到的帧进行相应操作.若 wait_status 值为 rx_wait_beacon,只对收到的信标帧组信标响应,对其他类型帧无操作.若为 rx_wait_ack,只对接收到的响应帧进行帧类型,帧序号和目的地址的判断,对其他类型帧无操作.若为 rx_wait_normal,则需要对接收到的任意类型的帧进行解帧.

3.5 物理层

物理层分为发射机和接收机.使用 LabVIEW 按照数据流序列分模块进行处理,模块划分见图 2.

发射机中的 GFSK 调制,采用的算法是连续相位频移键控,LabVIEW 的实现代码如图 4 所示.输入信号经过高斯滤波器进行滤波,之后经过由积分

器和正交频率合成器组成的频率生成器调制.高斯滤波器的 BT 值和调制系数参考表 1.高斯滤波器采用文献[3]中的实现方案.

接收机中最重要的模块是 GFSK 解调模块,采用零中频过零检测的算法实现这一模块^[4].LabVIEW 实现零中频过零检测解调器的程序框图如图 5 所示.从天线接收到的信号直接被下变频到零中频,之后被分解成同相信号 $i(t)$ 和正交信号 $q(t)$.相位轴生成器将 $i(t)$ 和 $q(t)$ 线性组合为 $i0, i1, q0$ 和 $q1$.模拟信号通过限幅器被处理为数字信号后,再分别经过过零检测器.过零检测器通过判断相位旋转是顺时针还是逆时针产生相应正负脉冲.在一个符号时间内,双向过零检测器对脉冲数目进行求和.符号同步脉冲根据求和的结果作出判决.

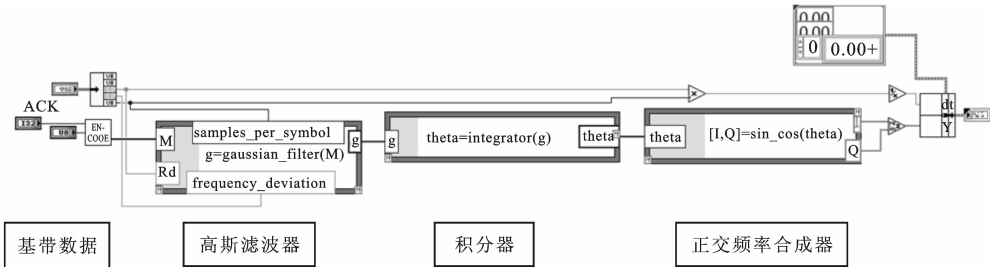


图 4 GFSK 调制器程序框图

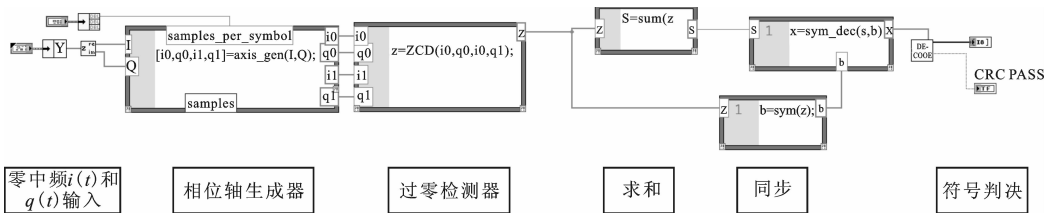


图 5 GFSK 解调器程序框图

4 验证平台及协议栈测试结果

4.1 软件无线电验证平台

软件无线电验证平台包含三台 USRP 和三台 PC. PC 上同时运行 VC6.0 和 LabVIEW 执行协议栈. USRP 关键参数如数据率,信道宽度等的设置参考表 1.每一台 USRP 与一台 PC 组合相当于协议中规定的一个节点.该平台包含一个中心节点,两个子节点.

4.2 协议栈验证过程

为了验证完整的协议栈功能,验证流程包括三部分,分别是组网过程,数据收发过程,电能信息收集过程,如图 6 所示.

组网过程中,中心节点和两个子节点首先都进行信道扫描,确定组网信道.中心节点确定好组网信

标参数之后,组信标帧并广播发送.两个子节点在接收到信标帧之后,将本节点的节点信息如节点地址等加入信标响应帧并传输给中心节点.中心节点在



图 6 协议栈验证流程图

定时器到时后,对接收缓存 tmpRxBuff 内的帧进行处理.对于符合条件的信标响应帧,提取其中的节点信息加入邻居表.接下来,对于邻居表内的节点,逐个组配置子节点帧,并发送.子节点收到中心节点发来的配置子节点帧后,将帧内部的配置信息取出,加入本节点各层维护的属性表中,并组配置子节点响应帧发送给中心节点.中心节点配置完邻居表内所有节点后,组网过程验证完毕.

在组网成功后,开始验证数据收发功能.中心节点的 aps.c 文件调用函数 broadcom_ack() 对邻居表内的每一个子节点逐个发送一个需要响应的数据帧.子节点在收到该数据帧后,将收到的数据通过 VC6.0 的控制台打印出来,并根据响应帧格式组帧并发送给中心节点.若某一次等待响应过程超时,中心节点将会启动超时重传机制.中心节点在收到所有节点的响应帧后,数据收发功能验证结束.

数据收发功能验证通过之后,模拟实际无线抄表应用中的集中器采集电表电能信息的环境,验证电能收集功能.首先中心节点的 aps.c 文件调用函

数 broadcom_power() 对邻居表内的每一个子节点逐个发送电能收集命令帧.子节点收到后将本节点电能信息写入电能收集响应帧,并传输给中心节点.中心节点对电能收集响应帧进行处理,将电能信息打印到 VC6.0 的控制台中.所有子节点的电能信息收集完毕后,电能收集功能验证完成.

4.3 验证结果

图 7 所示为组网过程中,中心节点组信标帧“0XCD400001FFFFFFFFFFFF000000000001”广播发送并被子节点 A 正确接收到的 LabVIEW 前面板波形图.组网完成后,中心节点对子节点 A 和子节点 B 分别发送数据负载为两字节的 0X0102 和四字节的 0X01020304 的数据帧,均成功收到子节点发送的响应帧.电能收集阶段,中心节点依次向子节点 A 和子节点 B 发送电能收集命令帧,收到的电能收集响应帧显示,短地址为 44 的子节点 A 的电量为 88,短地址为 55 的子节点 B 的电量为 99.

通过验证,协议栈完成 MPWDTP 协议的基本功能,未来可用于无线自动抄表环境中.

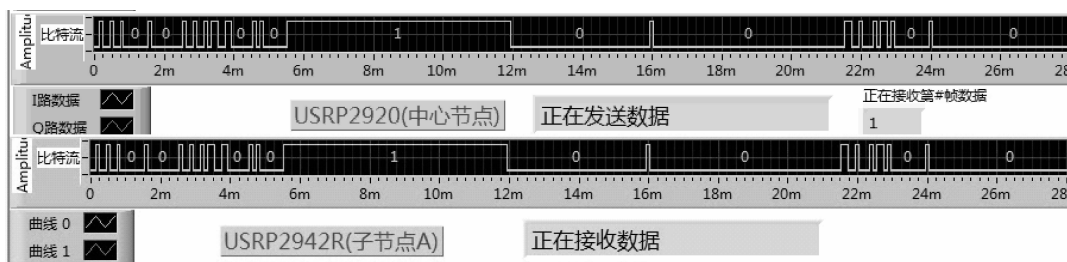


图 7 信标帧收发过程中,中心节点和子节点 A 的 LabVIEW 前面板波形图

5 结束语

本文通过深入研究 MPWDTP 协议的各层具体规范,确立了软件无线电的协议栈实现方案.通过对应用层,网络层,MAC 层,物理层协议栈的设计,采用 VC6.0 和 LabVIEW 协同设计的方法最终测试完成了组网,数据收发和电能收集功能,基本实现了协议功能,证实了方案可行性.下一步的工作集中在如何在协议栈中加入路由,安全规范等 MPWDTP 协议规定的可选功能.

参考文献:

- [1] National Instruments. Introduction to LabVIEW[EB/OL]. (2012-06-12). [2016-02-26]. http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvconcepts/introduction_to_labview/.
- [2] National Instruments. NI USRP information[EB/OL].

(2015-08-17). [2016-02-26]. <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-355>.

- [3] 沈维伦,杨雨佳,王方林,等.用于蓝牙芯片的高斯滤波移频键控[J].固体电子学研究进展,2006,25(3):325-329.
- [4] Kwon Hyuck M, Kwang Bok Lee. A novel digital FM receiver for mobile and personal communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(11): 1466-1476.

作者简介:

孟焱毅 男,(1991-),硕士研究生.研究方向为微功率无线数据传输协议栈的实现. E-mail:myy1019119418@126.com.
陈虹 女,(1974-),副研究员.研究方向为低功耗集成电路设计.
武广华 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为微功率无线数据传输协议基带电路的实现.