

# 电力线 OFDM 通信处理器 INT51X1 及其应用开发

殷小贡, 杨玲君, 万波

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: INT51X1 是美国 Intellon 公司专为电力线 OFDM 通信推出的处理器, 论述了它的功能结构及技术特点, 并以该处理器为核心研究开发了中压配电网的 OFDM 电力通信系统。

关键词: INT51X1; 正交频分复用; 电力线通信

中图分类号: TM726; TM915 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)17-0052-04

## 0 引言

电力线通信 PLC (Power Line Communication) 技术是利用配电网中/ 低压线路传输高速数据、语音、图象等多媒体业务信号的一种通信方式。用于低压线路, 可为用户提供一种“无新线 (no new wire)”的宽带接入方案; 用于中压线路, 则可以为配电网自动化提供一个可靠的数据传输平台。研究开发此项技术, 对于充分发挥电力资源优势, 发展电力通信产业, 为电力企业提供进入电信公共服务的技术手段, 实现电话、数据、视频和电力的“四网合一”, 具有广阔的前景。进入 21 世纪以来, PLC 技术有所突破, 发展速度明显加快, 目前正朝着实用化方向发展。

电力线不同于普通的通信线路, 线路上接入了许多电力电器设备, 形成诸多不可预测的噪音和干扰源; 且这些设备随时都可以插入或断开、开机或关闭, 因而导致电力线的特性随时变化, 使得电力线信道具有时域上不恒定、不可控的特点。因此, 必须采取抗干扰、抗阻抗失配、抗多径衰落的有效技术手段, 并解决好信号冲突的问题, 才可能在电力线传输媒质上实现高速数据通信。多载波正交频分复用 (OFDM) 是解决这些问题的有效方法。该技术利用电力线的高频频谱资源, 以多个相互正交的载波对数据进行调制, 将串行数据流变换为并行处理; 其调制和解调过程利用傅里叶变换对 DFT/ IDFT 便可实现。Intellon 公司推出的 INT51X1 芯片是当前最完善的 OFDM 处理芯片, 符合 HomePlug 1.0.1 技术标准, 传输速率最高达 14 Mbps。而且, 它集成了 USB 1.1、以太网和 MII/ GPSI 接口、ADC、DAC 和 AGC 控制器, 使用比较方便。为 PLC 通信装置的研究开发, 提供了一款比较理想的处理器。

## 1 INT51X1 的功能结构及其主要特性

INT51X1 是专用于电力线的 MAC/ PHY 集成收发器 (结构如图 1), 它使用 Intellon 公司专有的电力数据包 (PowerPacket) 正交频分复用技术, 84 个子载波, 选择采用 ROBO/ DBPSK/ DQPSK 调制方法; 可根据收发端信噪比分配子载波, 以克服噪声及多径衰落的影响; 它在低信噪比信道中完成同步, 不需要导频。其内部结构由 I/O 模块、PowerPacket MAC 模块、PowerPacket PHY 模块以及 ADC/ DAC 模块组成。

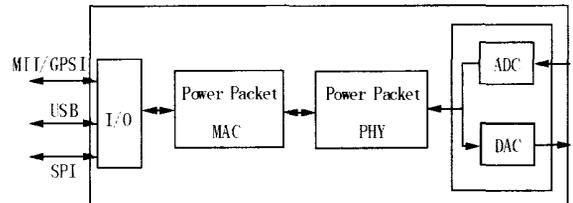


图 1 INT51X1 内部结构图

Fig. 1 Internal architecture of INT51X1

PowerPacket MAC 模块主要完成链路层功能, 是 INT51X1 的核心部分。本模块包括一个精简指令集 (RISC) 的处理器内核, 一个含有 OFDM 数据处理、加密/ 解密算法、信道优化算法等的程序存储器 (ROM), 还有一个链接序列、数据存储器 (RAM) 以及两个直接数据传送通道 (DMA)。从用户发往电力线网络或从物理层来的所有数据都在 MAC 模块中通过一定的算法进行信号处理。MAC 采用载波侦听多路存取/ 冲突避免 (CSMA / CA) 协议访问公共的电力线信道, 辅以自动重传请求 ARQ 和电力数据包的优先权机制, 确保传输的可靠性。而且, 由于电力数据包优先等级的灵活设定, 使 INT51X1 具有较强的突发业务处理能力, 允许电力线上的多帧传输, 极大

地减轻了对网络收端的要求,使网络吞吐量达到最大,同时保证了最短延迟时间和最优的信号稳定性。其内建的 QOS 特性为包括语音、数据、音频和视频信息的多媒体净荷提供了足够的带宽。由于采用自由竞争的介质访问方式,任一单节点都可以作为整个网络的控制器。此外,MAC 还具有流量控制功能。它的上述功能,确保在特性恶劣的电力线信道上也能为用户提供优良的服务品质。

PowerPacket PHY 模块实现物理层功能,主要提供建立、维持和拆除物理连接的电气手段,保证电力线上比特流的透明传输。本模块主要由一个物理层逻辑序列、一个与 MAC 子层 DMA 通道对应的先进先出(FIFO)堆栈以及一个前向模拟通道组成。此外,还集成有对外加运算放大器的自动增益控制(AGC)电路。一对高速的 10 位 A/D、D/A 转换器构成了前向模拟通道,其采样速率为 50 Mbps,参考电压独立于片内,低功耗操作。在其后接上运算放大器和滤波器,通过电力线耦合装置,便可与电力线连接。

I/O 模块中集成了 MAC 与主机、外围设备间的各种接口,功能丰富全面。与主机接口有 USB 接口、媒质独立接口 MII 或通用串行接口 GPSI(选用)、管理数据接口 MDI;与外设接口有 E<sup>2</sup>PROM 接口 SPI、仿真接口 JTAG 以及用于运行状态监视的 LED 接口。MII 是一种标准的工业接口,其发送/接收都以四位并行的形式进行,由 MAC 时钟同步,并带有 CSMA/CD 协议。通过 MII 接口,INT51X1 可与以太网 MAC 控制器直接相连。当主机通过 MII/GPSI 接口与 INT51X1 传输数据时,数据帧格式如下:

帧间间隔 前导码 定界符 data 帧校验序列

其前导码为 56 位“1”、“0”相间的数字序列,用于同步;1 字节定界符规定为 D5H;data 数据格式遵循 IEEE802.3 标准;最后的帧校验序列为 4 字节的 CRC 校验结果。

主机通过 MDI 可以方便地访问 INT51X1 内部的控制/状态寄存器,从而完成对 INT51X1 的设定及监视 INT51X1 的实时运行状态。INT51X1 的控制/状态寄存器均为 16 位的寄存器。状态寄存器实时反映链路状态、传输速率、前导码判决、自动协商、模糊检测等信息,控制寄存器的定义如图 2,由图可见通过控制寄存器可实现的丰富功能。

Bit 15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	.....	0
软复位	环回测试	速率选择	自动协商	休眠	高阻绝缘	重新协商	双工模式	冲突测试	保留		

图 2 控制寄存器定义

Fig.2 Definition of control register

上电后,INT51X1 的初始化由其通过 SPI 接口读取预先写入 E<sup>2</sup>PROM 的数据完成。

除以上描述的主要功能、特点以外,PowerPacket 的安全性能也非常完善,采用 DES 的 56 位密钥管理,除 INT51X1 设定的缺省密钥外,还可以由用户自定义密钥,确保电力线传输的可靠安全。

## 2 INT51X1 引脚说明

INT51X1 采用  $\mu$ BGA 封装,144 引脚,供电电压 3.3 V,芯片内核供电电压 1.5 V。

INT51X1 有 USB、PHY、HOST/DTE 3 种工作模式选择(Option),部分复用信号引脚因模式不同而功能定义不同。以 PHY 模式为例,其信号引脚定义如下:

MII 接口信号:MIF-RX0~MIF-RX3,接收数据线;MIF-RXCLK,接收时钟;MIF-RXDV,接收数据有效;MIF-RX-ER,接收错误;MIF-COL,冲突检测;MIF-TX0~MIF-TX3,发送数据线;MIF-TXCLK,发送时钟;MIF-TXEN,发送使能;MIF-CRS,载波侦听;MIF-TX-ER,发送错误。

MDI 接口信号:MIF-MDIO,管理数据输入输出;MIF-MDCLK,管理数据 I/O 时钟。

SPI 接口信号:SPF-DO,数据输出至 E<sup>2</sup>PROM;SPF-DI,数据从 E<sup>2</sup>PROM 读入;SPF-CLK,SPI 时钟;SPF-CS,E<sup>2</sup>PROM 选通。

其他的信号线在 3 种模式中都相同,有对模拟前端 AFE 的控制/数据线 26 条,主要是 ADC 输入、DAC 输出、运放的 AGC 控制等;有 LED(3 线),JTAG(5 线),时钟(2 线),测试(2 线),以及多条电源和地线;3 种模式的选择由 MODE0 和 MODE1 两个引脚的状态决定。限于篇幅,关于引脚的详细信息可查阅相关资料。

## 3 中压配电网 OFDM 通信系统的开发

INT51X1 以其突出的技术特点,能适应高频特性恶劣的电力线高速数据通信的需要。它高度集成了电力包的数据处理功能及对外的相关接口,使用比较方便。我们以 INT51X1 为核心,选取 16/32 位的嵌入式微控制器 W90N740 作为 MAC 主机,就中

压配电网 OFDM 通信系统的开发进行了比较深入的研究,本文对研究方案予以简要介绍。

### 3.1 INT51X1 工作模式选择

通过对引脚 MODE0 和 MODE1 的设置,可以使 INT51X1 选择 USB、PHY 和 HOST/DTE 3 种工作模式之一:

MODE1	MODE0	模式选择
0	0	保留
0	1	USB
1	0	PHY
1	1	HOST/DTE

在配电网 OFDM 通信系统的开发中,子站通信终端用于上传 FTU 等配电自动化设备的遥测遥信数据,下传配调中心的遥控、保护命令,由 W90N740 完成数据的转换和传送;主站终端则充当电力线网络和以太网之间的路由器,实现配调中心主机和电力线上各子站的通信。因此在本系统中 INT51X1 选择 PHY 工作模式,这时 INT51X1 等效于一个网络物理层设备 PHY 与 W90N740 微控制器连接。

### 3.2 通信终端设计

配电自动化装置配备在配电网沿线各处,其任务是采集配电线路和各种电力设备的运行参数,送往配电自动化主站;同时接收配电自动化主站的相关控制命令,对线路和电力设备执行控制。每条电力线路构成一个总线+树形拓扑的网络,配备多个子站终端和一个主站终端,图 3 是主站通信终端原理框图。

由图 3 可见,在 INT51X1 电力线侧,设计一个模拟前端模块 (AFE),内含增益可调的发送放大器和接收放大器,发送和接收支路分别串入一个 LC 带通滤波器。带通滤波器通频带为 4~21 MHz,系 OFDM 调制所占用的频段。耦合设备由隔离变压器  $T_1$  和耦合电容 C 共同组成,经此实现通信终端与 10 kV 电力线的耦合。对耦合设备的主要要求是实现通信终端与电力线间的阻抗匹配,以低的介入损耗通过高频信号,同时阻止电力线的工频电流进入通信终端。

在 INT51X1 用户侧,通过 MII 接口连接 W90N740。W90N740 的内核为 ARM7 RISC CPU,其最主要的片内资源有 8 kB I-cache/SRAM、2 kB D-cache/SRAM、2 个 Ethernet MAC 控制器 (MAC<sub>0</sub>, MAC<sub>1</sub>)、高速异步接口 UART、标准的 JTAG 仿真接口、通用的外部总线接口、定时器、中断控制器等。以其 MAC<sub>0</sub> 接 INT51X1,而 MAC<sub>1</sub> 连接另一个 Ethernet PHY,继而经 RJ-45 接口、网络交换机接入配调中心主机。上下行数据的处理、Ethernet IP 包和 Power-Packet 电力包间的相互转换、通信网络的管理等均由 W90N740 完成。为充分利用 W90N740 的片内资源,我们将其 8 kB F-cache/SRAM 用做数据 RAM,另外选用一个 Flash 存储器作为外部的程序存储器。

终端需要的工作电源品种比较多,有 +12 V、+5 V、+3.3 V、+1.8 V、+1.5 V,由整流和相应的 DC-DC 模块获得。

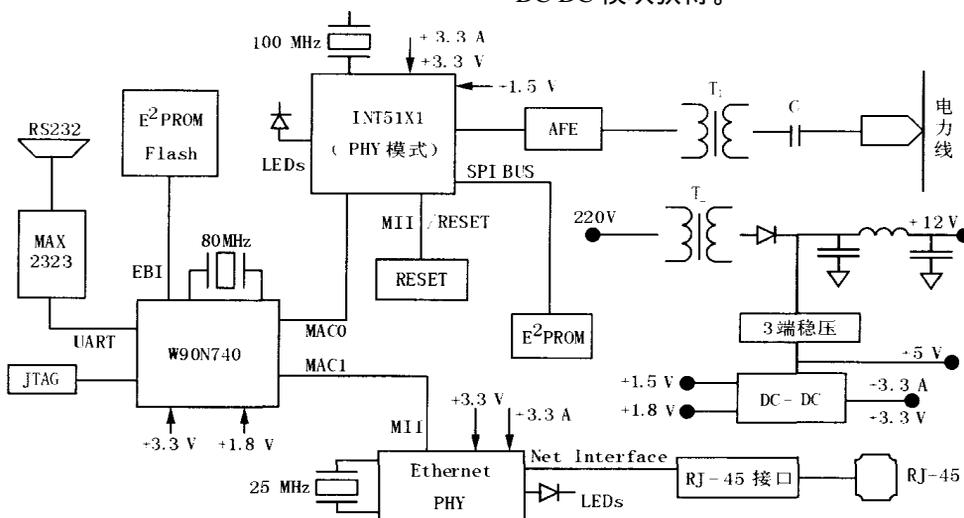


图 3 电力线通信主站终端原理框图

Fig. 3 Block diagram of main station terminal in powerline transmission

图3电路构成了一个典型的路由器。INT51X1从电力线接收到各子站发来的PowerPacket电力包数据,解包后转换成MII帧,经MII接口转送给W90N740,W90N740将其重新打包,以IP包的形式发给主机;主机的遥控和保护等命令则以相反的过程,由INT51X1送上电力线,最终到达相应的子站终端。

子站终端的结构与此类似,只是不需要Ethernet PHY和RJ-45接口,而是以RS-232接口与配电自动化装置相连。

#### 4 结束语

INT51X1是一种高度集成的单片电力线OFDM通信收发器,是INT5130+INT1000套片的换代产品,也是当前开发电力线OFDM通信的主流产品。其功能强大,使用灵活方便,其可靠性也很高。试验中发现,其传输速率在8Mbps左右,已完全能满足电力线通信应用需要。

#### 参考文献:

- [1] Intellon Corp. INT51X1 Integrated Powerline MAC/PHY Transceiver with USB and ETH Integrated Bridges[Z].
- [2] Winbond Electronics Corp. W90N740 Reference Manual[Z]. 2003.
- [3] 刘健,倪建立,邓永辉(LIU Jian, NI Jiannli, DENG Yonghui). 配电自动化系统(Automation of Power Distribution System)[M]. 北京:中国水利水电出版社(Beijing:China Hydraulic and Electric Power Press),2000.

收稿日期: 2003-12-22

#### 作者简介:

殷小贡(1945-),男,教授,博导,主要研究方向为信号处理,通信网络技术和电力线通信等;E-mail: xgyin@s1000e.wuhee.edu.cn

杨玲君(1978-),女,硕士,助教,主要研究方向为电力系统通信、光纤通信;

万波(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为信号处理和电力线通信。

### Development of processor INT51X1 and its application in OFDM powerline communication

YIN Xiaogong, YANG Lingjun, WAN Bo

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The INT51X1 is an OFDM processor developed by Intellon Corp for powerline communication. The paper dissertates its functional architecture and technical characteristics and makes researches on OFDM powerline communication system with the processor on power distribution network.

**Key words:** INT51X1; orthogonal frequency division multiplexing; powerline communication

(上接第51页 continued from page 51)

5) 可以在线整定保护系统的阈值,(如设定值)延时时间大小设定等。

#### 参考文献:

- [1] 王兆义(WANG Zhao-yi). 可编程控制器教程(Tutorial of PLC)[M]. 北京:机械工业出版社(Beijing:China Machine Press),1997.
- [2] 赵保经(ZHAO Bao-jing). 中国集成电路大全第十分册,

可编程序控制器(China Integrate Circuit, Program Logic Device)[M]. 北京:国防工业出版社(Beijing:Defense Industrial Press),1995.

收稿日期: 2004-04-01; 修回日期: 2004-05-22

#### 作者简介:

刘沛(1963-),男,副教授,研究方向为仪表及自动化装置,主要从事计算机控制技术,智能控制的教学与研究。E-mail: daant@163.net

### Realization of protection of electric network based on PLC

LIU Pei

(Dept of Electrical Engineering and Automation, Shaanxi Institute of Technology, Hanzhong 723003, China)

**Abstract:** For network of 35 kV and its below, this paper presents some methods to realize over-current protection based on PLC, and then gives the hardware and software of the protection. The results of experiment indicate that the methods are feasible, stable and have higher rate of price and performance. So they may be welcomed in engineering application.

**Key words:** programmable logic controller; over-current protection; A/D conversion; comparison; trip