

OFDM 技术在馈线自动化有线通信中的应用

王小平¹, 王彦芳², 陈东阳¹, 冯涛¹

(1. 石家庄铁道学院电气分院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道学院计算机系, 河北 石家庄 050043)

摘要: 馈线自动化对通信系统的要求是造价低、抗干扰能力强、可靠性高、实时性强。为此在馈线自动化系统中选择有线(双绞线)通信方式,采用 OFDM 技术实现数据传送,并用数字信号处理器(DSP)实现数据的调制与解调。设计了基于 DSP 实现 OFDM 信号的调制解调器,满足了通信系统的要求。

关键词: 馈线自动化; 调制解调器; OFDM; DSP

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)18-0057-04

0 引言

馈线自动化就是配电线路自动化,它是配电自动化的重要组成部分。馈线自动化的功能就是监视馈线的运行方式和负荷。当故障发生时,及时准确地确定故障区段,迅速隔离故障区段并恢复非故障区段的供电。

馈线自动化的故障检测、隔离和恢复正常区段供电的时间要求越短越好,这对通信实时性的要求很高。而正常运行情况下的数据和信息巡测,也希望巡测的周期尽可能短些。另外,馈线自动化的通信系统安装在户外,这意味着通信系统要长期经受不利的气候条件的考验。因此,馈线自动化的通信系统必须设计成为能够通过常规维护,就可以在野外恶劣环境下工作的系统。

馈线自动化的通信系统在较强的电磁干扰(EMI)下工作,这会对通信的可靠性产生很大的影响。电磁干扰有可能以工频的形式出现,如产生于变压器、谐波干扰等的电磁干扰,也会以射频的形式出现,如产生间隙放电、电晕等的电磁干扰。雷电和故障以及涌流还会造成瞬时的极强烈的电磁干扰。因此,馈线自动化的通信系统必须具有很强的抗干扰能力。

在馈线自动化系统中,通信系统投资巨大,直接影响到一些电力电业局能否投资建设此项目,这就要求通信系统的设计在满足需求的前提下尽量降低造价。根据馈线自动化系统的这些特点,综合考虑其可行性和经济性,采用有线(双绞线)中继通信方式是一种性价比较好的方式,由于投资省,系统可靠,很受电力企业欢迎。

有线通信采用正交频分复用技术(OFDM)可以在较窄的频带内传输较高的信息速率,通信距离可

达到 10 km,传信率大于 19.2 kbit/s,将 OFDM 传输技术和交织及纠错编码技术相结合可以极大地增强系统的抗干扰能力,实现电力系统在恶劣的电磁环境下可靠地通信。

1 OFDM 基本原理

在传统的数字通信系统中,符号序列调制在一个载波上进行串行传输,每个符号的频率可以占有信道的全部可用带宽。OFDM 是一种正交多载波调制技术,而且是一种并行数据传输系统,采用频率上等间隔的 N 个子载波 f_0, f_1, \dots, f_{N-1} 构成,它们分别调制一路独立的数据信息。把调制之后的 N 个子载波信号相加同时发送。所以,每个符号的频谱只占用信道全部带宽的一部分。通过选择载波间隔,使 N 个子载波在整个符号周期上保持频谱的正交特性,各子载波上的信号频谱互相重叠,从而提高了系统的频谱利用率^[1]。

设在调制端,要发送的串行二进制符号序列为 $(d_0, d_1, \dots, d_{N-1})$,每个符号 d_i 是经过基带调制后的复信号,其中 $d_i = a_i + jb_i$ 。串行二进制符号序列的码元速率为 f_s ,码元周期为 T 。串行符号序列的间隔为 $t = 1/f_s$ 。此复数序列经串并转换之后得到码元周期为 NT 的 N 路并行码(一帧),它们分别调制 N 个子载波 $(f_0, f_1, \dots, f_{N-1})$,各子载波频率之间的关系为:

$$f_k = f_0 + k \cdot f \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: $f = 1/T$ 为各子载波间的频率间隔; f_0 是最低的子载波频率,为 $1/T$ 的整数倍,各子载波相互正交。

合成的传输信号 $D(t)$ 可以用其低通复包络 $\tilde{D}(t)$ 表示

$$\tilde{D}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} (a_i + jb_i) \exp(j \omega_i t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j \omega_i t), 0 \leq t < T \quad (2)$$

其中: $\omega_i = 2\pi f_i = 2\pi \cdot f \cdot i$

在符号周期 $[0, T]$ 内, 实际输出的信号为:

$$D(t) = \text{Re}[\tilde{D}(t) \exp(j 2\pi f_c t)], 0 \leq t < T \quad (3)$$

在接收端, 利用子载波的正交性, 混频和积分就可以分离出各个子信道的信号, 即:

$$\tilde{d}(m) = \int_0^T \sum_{i=0}^{N-1} d(n) \cdot e^{j n t} \cdot e^{-j m t} dt = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \cdot \int_0^T e^{j(n-m)t} dt = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \cdot \int_0^T e^{j(n-m)t/T} dt = d(m)$$

其中 $d(m)$ 是接收机中第 m 路信道的输入信号。然后经并串转换和数据译码后就可以恢复与发送端相同的序列 $(d_0, d_1, \dots, d_{N-1})$ 。

上面介绍的 OFDM 系统当 N 很大时, 需要大量的正弦波发生器、滤波器、调制器和相干解调器, 因此在实际应用中很难实现。现在 OFDM 得到成功应用的一个重要原因是利用离散傅里叶反变换 (IDFT) 及其傅里叶变换 (DFT) 和 DSP 技术实现调制与解调过程。下面从频域的角度分析 OFDM 信号 $D(t)$ 的 DFT 实现。

由上述分析可知, OFDM 调制后的信号如式 (2) 所示, 若以符号传输速率 f_s 为采样速率对 $D(t)$ 进行采样, 在一个周期之内, 共有 N 个采样值。令 $t = m \cdot T/N$, 采样序列 $D(m)$ 可以用符号序列 $(d_0, d_1, \dots, d_{N-1})$ 的离散傅氏逆变换表示。即:

$$\tilde{D}(m) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j 2\pi i m / N) = \text{IDFT}(d_i) N \quad (4)$$

将序列经过 D/A 变换成模拟信号后发送出去。另外, 通过对 $[0, T]$ 内的 OFDM 模拟信号以 f_s 的速率进行采样得到 $d(n)$ 后, 再通过 DFT, 即可以实现该帧信号的解调。设接收序列为 $R(k)$, 经过 DFT 可得:

$$R(k) = \text{DFT}[D(m)] = \sum_{n=0}^{N-1} D(n) \exp(-j 2\pi nk / N) \quad (5)$$

将式 (4) 代入到式 (5) 可得: $R(k) = d(n)$, 即发送序列被正确还原出来。因此, OFDM 系统的调制和解调过程等效于离散傅氏逆变换和离散傅氏变换处理。若采用数字信号处理 (DSP) 技术和快速傅里叶算法 (FFT), 无需梳状滤波器组, 实现比较简单^[2]。

设计的主要参数为: 子载波数 32, 子载波间隔 250 Hz, 总的符号周期是 5 ms, 其中有 4 路导频符号。

2 通信网结构

馈线自动化通信网络结构示意图如图 1 所示, 系统中智能终端 FTU 和分站之间的通信是由线路收发器实现的。线路收发器和 FTU 之间通过 RS-232 接口通信。线路收发器由数字调制解调器、线路驱动器和旁路器 3 个主要部分组成。其中调制解调器的作用, 一方面把含有丰富直流分量的低通数字信号变为适合于线路传输的带通型正弦信号, 实现数字信号调制。另一方面, 把来自线路上的正弦信号解调为计算机系统能够识别的数字形式。线路驱动器的作用主要是对传输的信号进行功率放大, 以实现长距离传输。旁路器的设置, 是为了解决节点在掉电失效或设备维修过程中, 避免长时间通信中断的问题。

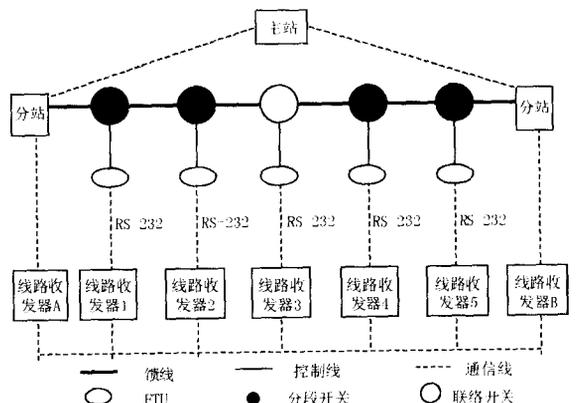


图 1 馈线自动化通信网络结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of feeder automation system communication net

在图 1 中, 定义其中一个分为主分站, 另一个为辅助分站。主要的通信业务有: 各个线路收发器的信息自报、站间联络、主分站发出的巡测、查寻业务等。信息传输的基本原理是: 由于各种信息的传输采用不同的地址, 所以在通信中能很好的析出和分路。但要尽量避免各个线路收发器自报之间的业务冲突, 禁忌自报和站间联络之间的业务冲突。一般要求自报过程要先检测后执行, 即要求各线路收发器在确认信道内确实没有其它自报信息时, 再发送自己的数据。如果自报出现碰撞时, 分站也能从撞碎的模糊自报信息中发现系统出现了故障, 据此立即进入故障查询状态。主分站可以根据需要随时

改变系统的运行状态,或者巡测、查寻,或者向辅助分站发送联络信息。而辅助分站在巡测过程中如果需要向主分站进行业务联络,必需首先申请,而且在探明信道内没有自报信息的前提下方可发送数据。

3 调制器的设计

调制器的组成结构图如图 2 所示,调制解调器和“智能终端”(FTU)同杆架设。各 FTU 分别采集相应柱上开关的运行情况,如负荷、电压、功率和开关当前位置等,并将上述信息以原始二进制数据通过 RS-232 接口送入调制器,输入的二进制串行数据经 BCH 纠错编码后再送入 16-QAM 数据编码器,编码后形成复数序列,此复数序列经串/并变换后同导频符号一起作为 64 点的 DFT 中的部分 $D(m)$,对 $D(m)$ 使用 DFT 的快速算法——快速傅里叶反变换(FFT)后得到 $d(n)$ 。为了最大限度的消除符号间干扰,实现收发同步,在每个 OFDM 符号之后插入保护间隔,在保护间隔内插入循环前缀 CP(Cyclic Prefix),循环前缀是 OFDM 码元后尾部分的复制,长度等于或大于信道的最大延时。然后再对 $d(n)$ 进行扩展及加窗处理,窗类型为升余弦函数,送入 D/A 变换器,经低通滤波器滤波后得到 OFDM 信号。

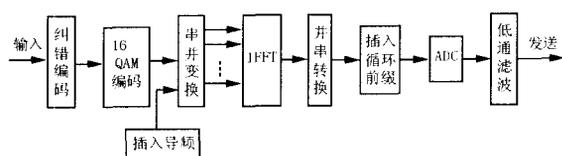


图 2 调制器的结构图

Fig 2 Structure of modulator

D/A 变换器以前的工作全部由 TMS320C5402 用软件编程实现,D/A 变换器的采样时钟也由 TMS320C5402 编程提供。D/A 变换器及模拟低通滤波器由 TLC32044 芯片实现。TLC32044 是 TI 公司生产的与 TMS320 系列配套的模拟接口芯片,片内包括 A/D、D/A 变换器及相关的开关电容滤波器,采样速率可通过编程实现,最高 19.2 kHz。

发送数据前,先检测信道,当确认没有其它信息传输时开始发送数据。程序首先执行初始化操作,初始化的主要工作是载入 FFT 算法的定点三角函数表和扩展加窗所用的窗函数表。接着清发送缓冲器,设置 D/A 变换器的采样速率为 16 kHz。之后允许串行口产生中断,当缓冲器中的所有数据发送完毕,TMS320C5402 内部将自动产生中断。程序从数据缓冲器读取一帧数据,经纠错编码,16-QAM 调

制后放入 IFFT 的工作区,插入 4 路导频,然后采用基 2 时域抽取 IFFT 算法,进行 64 点的 IFFT 运算;最后插入循环前缀,查窗函数表作加窗处理。当上一帧数据发送完毕,程序立即将已处理好的本帧数据送入缓冲器继续发送。

4 OFDM 的解调

对 OFDM 信号进行解调的原理框图如图 3 所示。

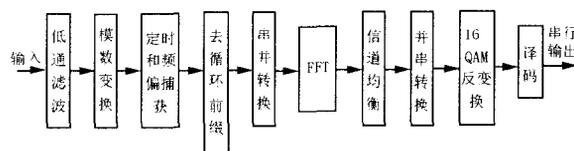


图 3 解调器的结构图

Fig 3 Structure of demodulator

接收到的信号送入 TLC32044 芯片中,由芯片内的开关电容低通滤波器滤除干扰和噪声,然后进行 A/D 转换。A/D 转换的精度为 14 位,其采样速率可通过软件调整,与调制器的采样速率一致,即 16 kHz。A/D 变换后的数据串行送入 TMS320C5402 进行解调。图 3 中 A/D 转换后的各框图的功能全部由软件编程实现。

数据解调时,TMS320C5402 首先进行初始化,即载入 IFFT 算法的定点三角函数表和扩展加窗所用的窗函数表。清接收缓冲器,设置 A/D 转换器的采样速率为 16 kHz。之后开串行口接收中断,以 16 kHz 的频率自动接收 ADC 的数据,并将其存入缓冲器中。解调过程分为同步捕获和解调两个阶段。同步技术是 OFDM 的关键技术之一。要实现精确的同步,OFDM 接收端的本地载波需要与发送端载波保持一致,采样时钟也要与发送时钟保持一致,并且需要确定 OFDM 帧头位置以及 OFDM 符号的起始位置,以便准确的除去 CP,实现正确的解调。

所以 OFDM 的同步误差主要包括频率偏差、定时偏差、抽样时钟频偏。OFDM 的同步需要进行定时估计和频偏估计。

本设计利用循环前缀进行定时估计。若利用循环前缀再进行频偏估计,其估计范围比较小,只能估计 $[-0.5, 0.5]$ 范围内的频偏^[2],如果还需要估计更大范围的频偏,需要采取其它方法。本文利用 OFDM 系统的 4 路导频载波进行频偏粗估计,可以估计更大范围内的频偏。TMS320C5402 每接收到一个新样点,程序使用傅里叶变换的递推算法解调出 4 路导频符号,并与参考导频进行相关运算,当 4

路导频中有 3 路以上出现峰值,就可以确认该点以前的样点是捕捉到的一帧信号,然后对捕捉到的帧信号进行解调。

解调时首先对捕捉到的帧信号进行实信号的 FFT 变换,之后利用 4 路导频计算出本地采样时钟的延时,由延时值调整下一帧采样时钟是提前或滞后一个时间量值。接着进行并串转换及 16 - QAM 解调、纠错译码。最后利用幅值门限判断是否有连续帧,当 4 路导频的平均幅值小于一个定值时,说明解调结束,否则继续进行。

5 结语

馈线自动化系统采用有线中继通信方式,并应用 OFDM 传输技术和 DSP 技术设计的调制解调器,

具有造价低,信息传输率高,抗干扰能力强等优点,完全能满足馈线自动化对通信系统的要求。

参考文献:

- [1] Orthogonal Frequency Division Multiplexing [P]. U. S Patent: 3 488 445, 1970-01-06
- [2] Li Z, Mammela A. An All Digital Frequency Synchronization Scheme for OFDM [A]. Proc IEEE Int Symp PM-RC '97. Helsinki (Finland): 1997. 327-331.

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-04-29

作者简介:

王小平 (1959 -),男,副教授,主要从事电气工程及通信技术的教学和科研工作。E-mail: wxp - xp@sohu.com

Using OFDM technology in the feeder automation based on wire communication

WANG Xiao-ping¹, WANG Yan-fang², CHEN Dong-yang¹, FENG Tao¹

(1. Department of Electric Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway, Shijiazhuang 050043, China;

2. Shijiazhuang Institute of Railway, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Feeder automation requires that the communication system has the characteristic of low cost, strong anti-interference, high reliability and much more real-time ability. Therefore, wire (twister-pair) communication manner is chosen in the feeder automation system. The proposed system uses OFDM technology to transfer data, and adopts DSP to modulate and demodulate the data. OFDM signal modem is designed based on the DSP, which can meet the need of the communication system.

Key words: feeder automation; modem; OFDM; DSP

(上接第 22 页 continued from page 22)

[6] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS - II[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.

Labrosse J J. Embedded Real-time Operating System uC/

OS - II[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.

作者简介:

谢玉冰 (1979 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xieyubing@sina.com

游大海 (1956 -),男,教授,研究方向为电力系统继电保护和稳定控制,电力市场等;

罗强 (1980 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

收稿日期: 2005-01-05; 修回日期: 2005-02-28

Embedded Ethernet based on uC/OS - II RTOS in protection devices

XIE Yu-bing, YOU Da-hai, LUO Qiang, JIN Ming-liang, LI Zheng-tian

(College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: More and more users demand the embedded Ethernet be provided in the protection devices. And the seamless communication of the power station automation system, which is issued by the IEC61850 system, is based on Ethernet technology. The real-time character and reliability of Ethernet communication are resolved with the development of the computer technology and network technology. The paper introduces embedded the Ethernet communication module, which bases on uC/OS-II real-time operating system. In the paper, the method to implement embedded Ethernet is expounded from hardware, hardware driver program and TCP/IP protocol. The proposed Ethernet communication module has been applied in the low-voltage protection devices.

Key words: embedded Ethernet; DSP; uC/OS - II; TCP/IP