

全数字电力线载波机中基带调制的实现

惠 毅¹,周志杰¹,胡祥光²,张文强¹

(1. 解放军理工大学 通信工程学院,江苏 南京 210007;

2. 南京军区通信网络技术管理中心,江苏 南京 210016)

摘要:全数字电力线载波通信是采用高压电力线进行通信的一种手段,而基带调制对全数字电力线载波机的整机性能有着非常重要的影响。提出了一种全数字电力线载波机中基带调制解调的实现方案。该方案采用基于正交幅度调制(QAM)方式的多维网格编码调制技术实现了联合的编码和调制,提高了系统容量;采用自适应信道均衡技术和非线性预编码技术,降低了系统误码率;采用数字信号处理(DSP)芯片对传统的电力线载波机进行数字化改造,增强了电力线载波通信的性能,减小了电力线载波机的体积。对方案的各个部分进行了详细的阐述,并提出了一种采用 Hilbert 变换法实现 QAM 解调的方法,给出了同步算法的软件实现思想。实际应用表明,该方案实现的载波机通信容量大,传输质量高。

关键词:全数字电力线载波通信;非线性预编码;多维网格编码调制;正交幅度调制;Viterbi 译码器;自适应信道均衡

中图分类号:TN 913.6

文献标识码:B

文章编号:1006-6047(2007)07-0098-04

0 引言

电力线载波(PLC)通信是电力系统特有的一种通信方式,用于电力系统的调度通信、生产指挥、行政业务通信及各种信息的传输。电力线载波作为最后 1 km 的解决方案也日趋成熟,电力线载波通信已经成为目前的研究热点^[1-2]。而采用当前先进的数字技术对传统的电力线通信进行改造具有经济上的实用性和性能上的可靠性,这也是电力线载波通信的另一个研究方向。

传统的电力线载波通信采用模拟调制体制,具有通信质量差、容量小、传输速率低等缺点。全数字电力线载波通信是新一代的电力线载波通信,可采用当前流行的语音压缩编码技术,如码本激励线性预测编码(CELP)技术、矢量和激励线性预测编码(VSELP)技术、多带激励(MBE)等,对语音信号经过压缩编码,降低输入信号的冗余提高了频带利用率;然后与数据信号进行数字复接。采用正交幅度调制(QAM)等调制方式进一步提高频谱利用率;采用自适应回波抵消技术可实现双向通信;采用自适应信道均衡技术减小信道对通信质量的影响,提高了可靠性。因此全数字电力线载波机具有容量大、频带利用率高和可靠性好等优点^[3-5]。

1 整体设计方案

全数字电力线载波机的主要作用是把输入信号

变成适合在电力线上传输的信号波形,使发送信号的频谱与电力线的频带相匹配,并提高信号在传输过程中的抗干扰能力和频谱的利用率。图 1 是全数字电力线载波机的整体框图,其中基带调制对全数字电力线载波机的整机性能有着重要影响。

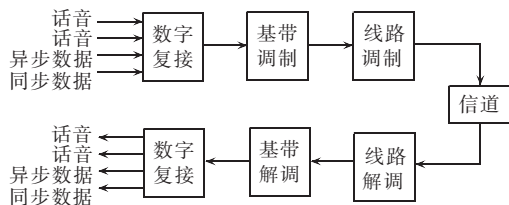


图 1 全数字电力线载波机框图

Fig.1 Block diagram of DPLC equipment

基带调制部分完成信号的信道编码和调制。语音信号经过多带激励(MBE)算法压缩编码后与数据信号进行数字复接,复接后的信号经过基带调制,完成扰码、映射、网络编码调制 TCM (Trellis Coded Modulation) 编码、脉冲成形、QAM 调制后进行线路调制,将信号频谱搬移到适合电力线传输的频带中。基带接收部分对接收信号采样,进行 QAM 解调、自适应均衡、Viterbi 译码以及解扰,送入分路器,得到数据信号和语音信号^[2]。基带调制解调部分的框图如图 2 所示。

多维网格编码调制是基带调制部分的核心,其中映射、预编码和接收部分的线路回波抵消、信道均衡和 Viterbi 译码是基带调制解调部分的关键。Ti 公司的数字信号处理(DSP)芯片内核提供零开销循环、多条件分支、延迟跳转、最大/最小搜索指令、循环缓冲器及专用于 Viterbi 译码的比较/选择/存

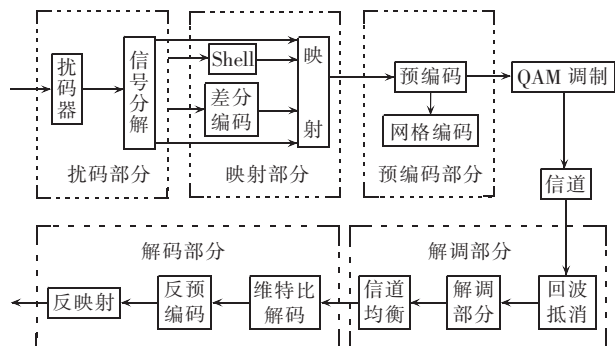


图 2 基带调制解调部分的设计方案

Fig.2 Block diagram of baseband modulation and demodulation

储单元 (CSSU) 等,非常适合于调制解调和编译码算法^[2,6]。

2 多维网格编码调制及译码

在频带受限的有扰信道中,如何提高信息传输的可靠性和有效性一直是值得关注的课题。一般而言,当发送信号的平均功率一定,传输信息的速率增加时,系统产生的误码率随之增加。在传统的数字通信系统中,纠错编码和调制是独立设计的。纠错编码增加了冗余度,编码增益通过降低信息传输速率获得。如果要保持整个系统信息传输速率不变,采用纠错编码就必须扩展通信系统的带宽;在带宽受限的情况下,就必须提高单位频带内的信息传输速率。因此,传统的纠错编码方法很难进一步提高通信系统的性能。

解决可靠性和有效性更有效的方法是将编码和调制技术有机结合,将冗余度映射至与频谱展宽不直接联系的调制信号参数扩展中,例如信号空间矢量点或信号星座大小的扩展中,这就是格状编码调制 (TCM) 思想的基本出发点^[7]。最佳的编码调制系统应按编码序列的欧氏距离为调制设计的量度,这就要求必须将编码器和调制器作为一个整体综合设计,使得编码器和调制器级联后产生的编码信息具有最大的欧氏距离。1982 年 Ungerboeck 提出了基于“集分割”原理的编码和调制相结合的 TCM 技术,通过扩展信号星座的大小,在不扩展带宽、不降低信息传输速率的条件下,可以获得 3~6 dB 的增益。因此,TCM 技术适用于较恶劣环境的电力线信道^[3]。

TCM 方案采用了一种特殊的信号映射^[7],即“集分割原理”。它是将调制信号星座的点集分割成子集,使子集内的信号空间点之间具有更大的欧氏距离。Ungerboeck 采用 $(k+1, k, m)$ 卷积码^[8], k 位的信息组进入编码器后,得到 $(k+1)$ 位,组成新的子码,每个子码与信号星座中的一个信号点相对应,因此信号空间星座共有 2^{k+1} 个信号点,比未经编码的信号空间星座点扩大了一倍。为保证发送信号序列之间的欧氏距离最大, Ungerboeck 将发送信号空间划分为若干

个子集,子集中信号点之间的最小欧氏距离随着划分次数的增加而增大。

TCM 提高了信号的抗干扰能力,但是扩大了信号星座的大小。如果要提高网格编码的性能,就必须采用更大的星座图;随着星座图的增大,编码增益提高很缓慢,编码误差增长却很快,这样付出的代价是二维 (2D) 星座图的大小比不经过编码的星座图增大了一倍,需要的存储量很大,但是带来的编码增益却有限。造成这种结果的根本原因是在每个 2D 信号间隔都加入了冗余信息位。当星座图较小时,加入的冗余信息位会带来调制性能的明显改善;但是当星座较大时,加入的冗余信息位还是有些过多。多维网格调制^[7-12]在多个 2D 信号间隔加入冗余信息位,因此,可在每个 2D 信号空间间隔传输分数个信息位,而且理论上多维信号的信噪比 (SNR) 性能更好。实际上多维网格编码调制是在 TCM 的基础上进一步通过维数的扩展获得冗余信息,减小信号空间。

多维网格编码整体框图如图 3 所示。信号空间星座的所有点被分成 M 个能量不同的环,输入信息中一部分位从 M 个环选择能量最小的环,一部分位在环中具体确定信号的映射点,还有一部分位输入到卷积编码器中进行 TCM 编码,对 2D 信号点进行旋转,将 2D 空间点扩展到多维空间。Shell 映射保证选择的 2D 信号点的功率尽量小,这样发射信号的平均功率就很小。这里采用四维网格编码。

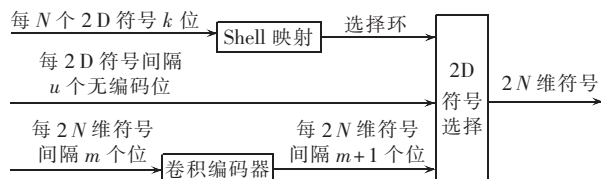


图 3 多维网格编码整体框图

Fig.3 Block diagram of TCM with multidimensional constellations

多维 TCM 译码通常采用软判决最大似然译码-Viterbi 译码。和一般 Viterbi 译码不同的是它要多计算一次四维误差,主要步骤如下:

- 寻找二维子集,计算二维信号误差;
- 计算四维信号误差,存储四维信号点;
- 计算支路误差;
- 计算累计误差、更新最小累计误差表、存储最小路径;
- 反向搜索,正确译码。

3 QAM 接收机

接收端对接收信号进行抽样、判决、解码,即执行与发送过程相反的处理。设 QAM 信号表示为

$$S_{\text{QAM}}(t) = x_k \cos w_c t + y_k \sin w_c t$$

式中 w_c 是调制载波; x_k, y_k 分别是被调制信号 $x(t)$ 的实部和虚部,即 $x_k = \text{Re}[x(t)], y_k = \text{Im}[x(t)]$ 。

一种解调方法是在接收端 QAM 解调器采用 2 个正交载波信号与 QAM 信号分别相乘,得到同相和正交 2 路信号,再通过低通滤波器滤除高频信号,就可恢复出需要的信息 x_k, y_k , 然后经过判决器判决就可恢复原来的数字信息。采用另外一种解调方法——Hilbert 变换法,把输入信号分成 2 路,一路信号相位保持不变,另一路信号相移 90° 后变成:

$$S'_{\text{QAM}}(t) = -x_k \sin w_c t + y_k \cos w_c t$$

利用下式就可解调出需要的信息:

$$S_{\text{QAM}}(t) \cos w_c t - S'_{\text{QAM}}(w_c t) \sin w_c t = x_k$$

$$S_{\text{QAM}}(t) \sin w_c t + S'_{\text{QAM}}(w_c t) \cos w_c t = y_k$$

但是,收发载波相位不可能完全同步,假设收/发载波相位的差异为 θ ,那么解调输出变为

$$\text{同相分量} \quad \text{mod } R: x_k \cos \theta + y_k \sin \theta$$

$$\text{正交分量} \quad \text{mod } I: -x_k \sin \theta + y_k \cos \theta$$

因此,收/发载波相位的不一致会引起同相分量和正交分量之间的相互干扰,相位误差越大,干扰越严重,所以 QAM 的解调对载波同步的要求很高。解调的整体框图如图 4 所示。

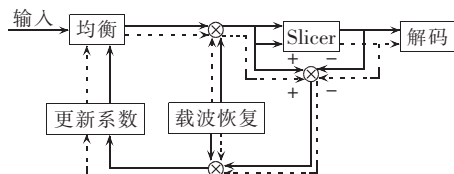


图 4 解调的整体框图

Fig.4 Block diagram of demodulation

全数字接收机的符号定时和载波相位同步尽量采用软件实现。QAM 的载波相位恢复方法有直接提取法和插入导频法 2 种。虽然插入导频法容易实现,但是要损失一部分信号的发射功率,因此,采用直接从同相分量和正交分量中提取载波相位误差,完成载波相位恢复。经过判决后的信号误差为

$$\text{同相分量误差} \quad \text{diff } R: x_k - \text{mod } R = x_k - x_k \cos \theta - y_k \sin \theta$$

$$\text{正交分量误差} \quad \text{diff } I: y_k - \text{mod } I = y_k - y_k \cos \theta + x_k \sin \theta$$

$$\text{于是可得: } \text{diff } I \cdot \text{mod } R - \text{diff } R \cdot \text{mod } I = (x_k^2 + y_k^2) \sin \theta$$

其中 $x_k^2 + y_k^2$ 是信号空间星座点到原点的平方欧氏距离,采用查表法将其消除。一般情况下误差 θ 很小,因此 $\sin \theta \approx \theta$,就可得到相位误差。

对于符号定时,文献[13]已经提出一种通过计算平均功率获取符号定时的思想。这种方法需要较高的采样率,增加了 DSP 的运算量,对 DSP 的运算速度要求很高。为了降低信号处理的运算量,提高处理速度,采用了变采样率技术。处理器工作在较低的采样率上,符号定时模块工作在较高的采样率上,通过采用内插的方法提高采样率。

4 自适应信道均衡和非线性预编码

由于电力线不是理想的传输媒介,信号经过电力线传输后,会存在严重的幅度、相位失真和时延,导

致发生码间串扰(ISI)。因此,有必要采用均衡技术对传输后的信号进行校正,这里采用判决反馈均衡器 DFE(Decision Feedback Equalizer)。DFE 是一种非线性均衡器,它的基本思想是一旦当前的符号得到判决,采用某种算法预测出它对下一时刻接收信号造成的码间串扰;然后从下一时刻的接收信号中减去这个预测值,消除已接收信号对下一时刻接收信号造成的影响^[13-16]。DFE 有前向横向有限冲击响应(FIR)滤波器和后向 FIR 滤波器 2 部分组成,如图 5 所示。

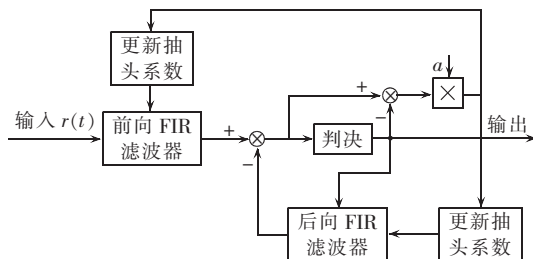


图 5 自适应均衡 DFE 框图

Fig.5 Principle diagram of DFE using adaptive equalization technology

如果直接采用 DFE 就会遇到 2 个问题:一是只有当前符号的判决十分准确时,DFE 的性能才能得到保证,判决误差对 DFE 性能的影响很大;为了消除判决误差对 DFE 性能的影响,可以把 Viterbi 译码的输出作为反馈均衡器的输入,这又带来第 2 个问题,即 Viterbi 译码会带来时延,时延越长,判决和译码越准确;但是时延对于即时消除 ISI 不利;要消除最近判决信号对下一时刻接收信号引起的 ISI,不应该有任何时延。因此,将 DFE 分发送端和接收端 2 部分实现,前向 FIR 滤波器在接收端实现,反向 FIR 滤波器在发送端实现,即图 2 中的非线性预编码。

非线性预编码相当于对发送信号进行预加重。在收/发双方开始通信的握手过程中,发送端发送探测信号对信道特性进行探测,接收端利用探测结果计算反馈均衡器的系数,然后把系数传给发送端;发送端收到均衡器的系数后,利用这个系数在发送信号进入信道传输遭受信道损害前对发送信号进行预加重。预加重对信道的可能损害进行预补偿,降低了产生误码的可能性,使接收端在解调后能够正确解码。

前向滤波器采用抽头间隔为 $2T/3$ 的分数抽头间隔的均衡器 FSE(Fractionally - Spaced Equalizer),消除均衡器对定时误差的敏感性。自适应算法采用规一化的最小均方 NLMS 算法。后向滤波器采用抽头间隔与符号间隔相等的 FIR 滤波器,它的系数在握手过程中确定后不再改变。

5 结语

电力线载波通信向数字化方向发展是必然趋势。采用 DSP 技术对传统的电力线载波机进行改造,大幅度提高了电力线载波通信的容量和质量。

随着理论研究的突破和数字技术的进一步应用,全数字电力线载波通信将会得到迅速发展和普及。

参考文献:

- [1] 张文强,周志杰. 电力线通信技术的发展[J]. 现代有线传输, 2003,1(2):19-22.
ZHANG Wen-qiang,ZHOU Zhi-jie. Development of the power line communication technology[J]. Modern Cable Transmission, 2003,1(2):19-22.
- [2] 王六玲,朱肇瑞,杨明华,等. 一种室内电力线载波 Modem 的实现[J]. 云南师范大学学报:自然科学版,1999,19(2):28-32.
WANG Liu-ling,ZHU Zhao-ru,YANG Ming-hua,et al. Realization of carrier Modem utilizing house power line[J]. Journal of Yunnan Normal University:Natural Sciences Edition,1999,19(2):28-32.
- [3] 邱玉春,徐平平. 低压电力线载波信道特性分析[J]. 电力系统通信,1999(6):48-49.
QIU Yu-chun,XU Ping-ping. The channels characters of low voltage power line analysis[J]. Telecommunication of Electric Power System,1999(6):48-49.
- [4] 王晖,余京兆. 10kV 电力线载波通信结合滤波器的改进方案[J]. 华北电力技术,2001(2):19-22.
WANG Hui,SHE Jing-zhao. Improved scheme of coupe filter in 10kV power line carrier communication[J]. North China Electric Power,2001(2):19-22.
- [5] 赵伟. 电力线载波通信系统指南[M]. 昆明:云南科技出版社,1995.
- [6] 张雄伟,陈亮,徐光辉. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 3 版. 北京:电力工业出版社,2003.
- [7] 叶梧,沈朝阳. 构造 TCM 好码的动态规划算法[J]. 通信学报,1999,20(10):63-68.
YE Wu,SHEN Zhao-yang. Dynamic programming algorithm for constructing trellis modulation optimum codes[J]. Journal of the China Institute of Communication,1999,20(10):63-68.
- [8] UNGEBOECK G. Channel coding with multilevel/phase signals[J]. IEEE Trans Inform Theory,1982,28(1):55-67.
- [9] WEI Lee-fang. Trellis-coded modulation with multidimensional constellations[J]. IEEE Inform Theory,1987,33(4):483-501.
- [10] WEI L F. Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space—part I:180 degrees[J]. IEEE SAC, 1984,2(5):659-671.
- [11] WEI L F. Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space—part II:nonlinear codes[J]. IEEE SAC,1984,2(5):672-686.
- [12] 徐伯庆. 通信原理中调制技术的四维思维空间[J]. 上海理工大学学报:社会科学版,2006(2):57-59.
XU Bo-qing. Four-dimensional thinking space for modulation in communication principles[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology:Social Science,2006(2):57-59.
- [13] 郑大春. 一种全数字 QAM 接收机序号定时和载波相位恢复方案[J]. 通信学报,1998,19(7):93-88.
ZHENG Da-chun. A symbol timing and carrier phase recovery scheme for all digital QAM receiver[J]. Journal of the China Institute of Communication,1998,19(7):93-88.
- [14] THEODORIDIS S,BELLANGER M G. Adaptive filters and acoustic echo control[J]. IEEE Signal Processing,1999(7):12-41.
- [15] 朱小刚,诸鸿文,戎蒙恬. 最小均方误差判决和自适应判决反馈均衡器的设计实现[J]. 上海交通大学学报,2001,35(6):897-901.
ZHU Xiao-gang,ZHU Hong-wen,RONG Meng-tian. Design realization of adaptive and blind adaptive decision feedback equalizer[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2001,35(6):897-901.
- [16] MADER A,PUDER H,SCHMIDT G V. Step-size control for acoustic echo cancellation filters—an overview[J]. Signal Processing,2000,80(9):1697-1719.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

惠 毅(1979-),男,湖北枣阳人,博士研究生,研究方向为数字信号处理(E-mail:huiyi_118@163.com);

周志杰(1966-),男,江苏苏州人,教授,博士研究生导师,主要研究语音压缩编码、语音识别、信道估计、多媒体通信、网络管理等;

胡祥光(1964-),男,江苏铜山人,高级工程师,主要研究网络管理等;

张文强(1977-),男,湖北枣阳人,讲师,主要研究 MIMO OFDM、自适应技术、纠错编码等。

Implementation of baseband modulation in DPLC

HUI Yi¹,ZHOU Zhi-jie¹,HU Xiang-guang²,ZHANG Wen-qiang¹

(1. Institute of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Communication Network Management Center of Nanjing Military Area, Nanjing 210016, China)

Abstract: DPLC(Digital Power Line Carrier) is a communication mean via high voltage power line, and the baseband modulation has important influence on its performance,for which an implementation scheme is presented. The trellis-coded modulation technology with multidimensional constellations based on QAM(Quadrature Amplitude Modulation) is used to increase system capacity,the non-linear precoding technology and the adaptive channel equalization technology are adopted to reduce bit error rate,and the DSP(Digital Signal Processor) is used to enhance the performance and reduce the size of DPLC equipment. All parts of the scheme are presented in detail,and the demodulation scheme for QAM using Hilbert transformation is provided. The synchronization is realized by software. Tests show that the equipment based on this DPLC scheme has high capacity and good performance.

Key words: digital power line carrier communication; nonlinear precoding; TCM with multidimensional constellations; QAM; Viterbi decoder; adaptive channel equalization