

一种新的 CMMB 系统 OFDM 调制技术 设计与实现方法^{*}

郝禄国, 陈蕉容, 刘立程
(广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

摘 要: 研究了 CMMB 标准第一部分 (STiMi 子系统) 中的 OFDM 调制技术, 提出了一种新的基于 FPGA 的 OFDM 调制技术设计与实现方法, 并改进了 OFDM 技术的核心算法 IFFT 的流水线结构, 大大降低了 FPGA 乘法器的数量, 节约了硬件资源。经 FPGA 实现与验证, 该方法能够正确、高效地实现 CMMB 系统的 OFDM 调制技术。

关键词: 正交频分复用; 快速傅里叶逆变换; 中国移动多媒体广播; STiMi

中图分类号: TP332.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0174-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.049

New design and implementation method of OFDM in CMMB system

HAO Lu-guo, CHEN Jiao-rong, LIU Li-cheng
(Dept. of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This article researched on OFDM modulation technique in the first part of CMMB standard which was called STiMi subsystem, and proposed a new method to design and implement OFDM modulation technique based on FPGA. Moreover, it improved the IFFT pipeline architecture, the core algorithm of OFDM technique. In this way, the number of the multiplier in FPGA could be reduced significantly, adding up to great hardware resources savings. Finally, it was verified by practice that the method can achieve accurate and high-efficient implementation of OFDM modulation technique of CMMB system.

Key words: OFDM; IFFT; CMMB (China mobile multimedia broadcasting); STiMi

1 CMMB 标准的 OFDM 调制技术

CMMB 标准是国家广播电影电视总局颁布的, 国内自主研发的第一套面向七寸屏以下的多种移动终端的系统。其中, OFDM 调制是 CMMB 标准的关键技术之一。

关于 CMMB 系统的 OFDM 调制子系统, 在文献[1]中规定插入导频并加扰后 OFDM 有效子载波 $Y_n(i)$ ($0 \leq i \leq N_s - 1$) 通过 IFT 映射为 OFDM 符号。映射方式如式(1):

$$S_n(t) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} Z_n(i) e^{j2\pi(\Delta f)_s(t - T_{cp})} \quad (1)$$

$0 \leq t \leq T_s, 0 \leq n \leq 52$

其中: $S_n(t)$ 表示时隙中第 n 个 OFDM 符号; N_s 则表示 OFDM 符号子载波数; $Z_n(i)$ 为第 n 个 OFDM 符号的 IFT 输入信号; $(\Delta f)_s$ 表示 OFDM 符号的子载波间隔, 取值为 2.441 406 25 kHz; T_{cp} 为 OFDM 符号循环前缀长度, 取值为 51.2 μ s; T_s 为 OFDM 符号长度, 取值为 460.8 μ s。

OFDM 符号子载波数 N_s 在不同物理层带宽下的取值如式(2):

$$N_s = \begin{cases} 4096 & B_f = 8 \text{ MHz} \\ 1024 & B_f = 2 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2)$$

IFT 输入信号 $Z_n(i)$ 是 OFDM 频域有效子载波 $Y_n(i)$ 经过映射处理得到的, 8M 和 2M 带宽的映射关系分别如式(3)(4)

所示。

$$B_f = 8 \text{ MHz:} \quad Z_n = \begin{cases} Y_n(i-1), & 1 \leq i \leq 1538 \\ Y_n(i-1020) & 2558 \leq i \leq 4095 \\ 0 & i = 0 \text{ 或 } 1539 \leq i \leq 2557 \end{cases} \quad (3)$$

$$B_f = 2 \text{ MHz:} \quad Z_n = \begin{cases} Y_n(i-1) & 1 \leq i \leq 314 \\ Y_n(i-396) & 710 \leq i \leq 1023 \\ 0 & i = 0 \text{ 或 } 315 \leq i \leq 709 \end{cases} \quad (4)$$

整个 CMMB 的 OFDM 调制过程可以总结如图 1 所示, 即在 STiMi (我国自主研发的移动多媒体广播传输技术标准简称, satellite-terrestrial interactive multi-service infrastructure) 信道编码中, OFDM 接收到的经过扰码的数据先插入虚拟子载波, 然后再进行 IFT 映射, 其中第二步的 IFT 映射还包括加循环前缀、加保护间隔和加窗处理三个过程。

2 OFDM 调制的设计实现

通过对 CMMB 标准的研究与分析可以知道, CMMB 中的 OFDM 调制是: a) 经过一个插入虚拟子载波即点数变换的过程, 8M 带宽下将 3 076 个数据点映射成 4 096 个数据点, 2M 带宽下将 628 个数据点映射成 1 024 个数据点; b) 将得到的数据进行相应点数的 IFFT 变换, 将数据从频域变换到时域; c) 在时

收稿日期: 2011-06-25; 修回日期: 2011-07-30 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11074054)

作者简介: 郝禄国(1968-), 男, 博士, 主要研究方向为多媒体通信、数字信号处理(haoluguo@hotmail.com); 陈蕉容(1988-), 男, 主要研究方向为 FPGA 软件设计、数字信号处理; 刘立程(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信、数字信号处理。

域上对数据进行加循环前缀、保护间隔以及加窗处理,如图 2 所示。

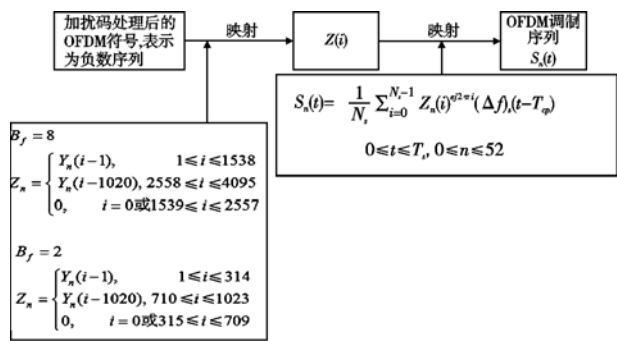


图1 CMMB的OFDM调制过程

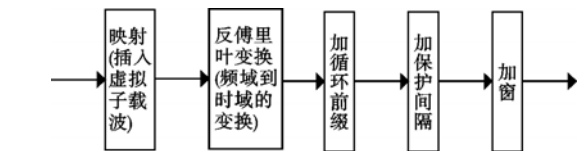


图2 OFDM调制模块的系统框图

2.1 映射模块设计

对于映射模块,主要是按式(3)或(4)对承接来自加扰模块加扰后的数据进行插“0”处理。这个过程可以通过一个 FIFO 缓存与多路选择器来实现,FIFO 缓存上一模块来的数据,多路选择器控制输出是缓存的数据还是“0”,并且多路选择在一个以计数器为驱动的控制单元的控制下切换,如图 3 所示。

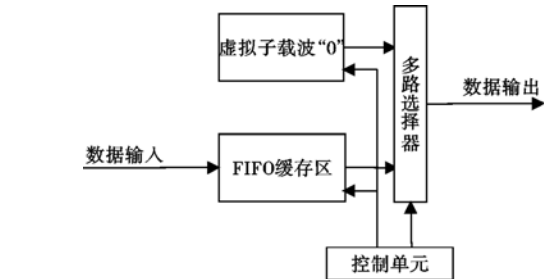


图3 映射模块功能逻辑框图

2.2 反傅里叶变换模块设计

IFFT 是整个 OFDM 调制的核心,它所选择的算法和实现结构的优劣直接影响着整个 OFDM 调制模块。在文献[2]中阐述了几种最基本的 FFT 算法,主要有基-2、基-4 以及基-2 和基-4 分裂基等几种。文献[4,5]又介绍了基-2 和基-8 相结合的分裂基,并对比了几种 FFT 算法,其中基-2 和基-8 相结合的分

裂基算法是最为高效的,因此本文的设计中采用基-2 和基-8 相结合的分裂基 FFT 算法,其表达式为

$$X_{2k} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (x_n + x_{n+\frac{N}{2}}) W_{\frac{N}{2}}^{nk}; k=0,1,\dots,\frac{N}{2}-1$$
$$X_{8k+1} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{8}-1} \{ [(x_n - x_{n+\frac{N}{2}}) - j(x_{n+\frac{N}{4}} - x_{n+\frac{3N}{4}})] + \frac{1}{\sqrt{2}} [(1-j)(x_{n+\frac{N}{8}} - x_{n+\frac{5N}{8}}) - (1+j)(x_{n+\frac{3N}{8}} - x_{n+\frac{7N}{8}})] \} W_N^{nk} W_{\frac{N}{8}}^{nk}; k=0,1,2,\dots,\frac{N}{8}-1$$
$$X_{8k+3} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{8}-1} \{ [(x_n - x_{n+\frac{N}{2}}) + j(x_{n+\frac{N}{4}} - x_{n+\frac{3N}{4}})] + \frac{1}{\sqrt{2}} [(1+j)(x_{n+\frac{N}{8}} - x_{n+\frac{5N}{8}}) - (1-j)(x_{n+\frac{3N}{8}} - x_{n+\frac{7N}{8}})] \} W_N^{3nk} W_{\frac{N}{8}}^{nk}; k=0,1,2,\dots,\frac{N}{8}-1$$

$$X_{8k+5} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{8}-1} \{ [(x_n - x_{n+\frac{N}{2}}) - j(x_{n+\frac{N}{4}} - x_{n+\frac{3N}{4}})] + \frac{1}{\sqrt{2}} [(1-j)(x_{n+\frac{N}{8}} - x_{n+\frac{5N}{8}}) - (1+j)(x_{n+\frac{3N}{8}} - x_{n+\frac{7N}{8}})] \} W_N^{5nk} W_{\frac{N}{8}}^{nk}; k=0,1,2,\dots,\frac{N}{8}-1$$
$$X_{8k+7} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{8}-1} \{ [(x_n - x_{n+\frac{N}{2}}) + j(x_{n+\frac{N}{4}} - x_{n+\frac{3N}{4}})] + \frac{1}{\sqrt{2}} [(1+j)(x_{n+\frac{N}{8}} - x_{n+\frac{5N}{8}}) - (1-j)(x_{n+\frac{3N}{8}} - x_{n+\frac{7N}{8}})] \} W_N^{7nk} W_{\frac{N}{8}}^{nk}; k=0,1,2,\dots,\frac{N}{8}-1$$

其对应的基本蝶形运算流程如图 4 所示。

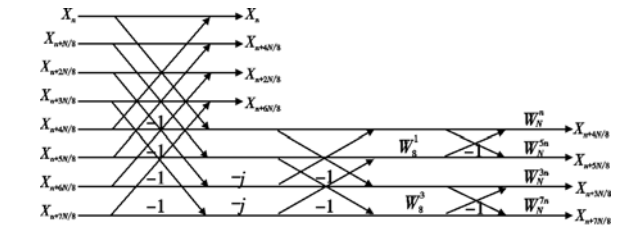


图4 Radix2/8FFT算法的一个基本蝶形运算

2.2.1 传统的 IFFT 流水线实现结构

基于 FPGA 的 FFT 实现结构目前主要有单内存、双内存、流水线以及并行结构几种。其中单内存结构与双内存结构占用的硬件资源较少,但数据吞吐量低,需要较高的时钟来达到相同的性能指标;而流水线结构与并行结构则通过串行和并行输入来增加运算处理单元,从而具有较高的运算速度。在文献[3]中论述了流水线结构的优越性以及各种流水线结构的特征,最终选择了单路径延迟反馈结构的流水线设计,在文献[6,7]也利用这一结构很好地实现了 FFT 算法。根据 CMMB 标准的要求,2M 带宽下 1 024 个数据点的单路径延迟反馈流水线结构如图 5 所示。

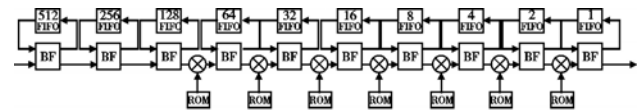


图5 1024点单路径延时反馈流水线结构

2.2.2 改进的 IFFT 流水线实现结构

CMMB 标准的信道编码物理带宽为 2M 的数据速率为 2.5 Mbps,物理带宽为 8M 的数据速率为 10 Mbps,这个相对于 FPGA 可处理的数据速率是很低的,因此可以考虑对乘法器进行时分复用,即将 1 024 点 IFFT 的乘法器处理时钟提高为数据速率的 7 倍,4 096 点 IFFT 的乘法器处理时钟提高为数据速率的 9 倍,然后分时地将数据与蝶形因子送入乘法器作相乘,得到的结果送入下一级。其结构如图 6 所示。如此在 CMMB 标准信道编码中的 IFFT 只需要一个复数乘法器即可实现,有效地减少了乘法器的数量。此外,由于 FPGA 内部存储器是以块为单位分配的,为了提高内部 RAM 的实际利用率,将存于 FIFO 的数据实部与虚部作为一个数据存储,高位为实部数据,低位为虚部数据,如此可以尽量减少分配不满一块而又无法分配给其他存储器所造成的浪费,以达到提高实际存储效率的目的。

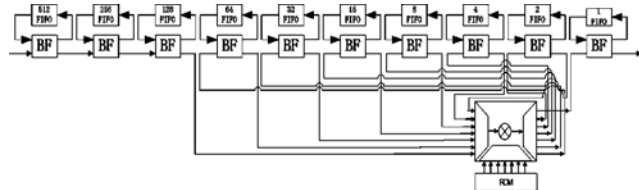


图6 1024点时分复用乘法器单一路径延时反馈流水线结构

2.3 后处理模块设计

对于加循环前缀、保护间隔以及加窗处理的三个模块,可以看成是一个模块来处理,这里暂且称为后处理模块,先将 IFFT 变换后的数据以 4k(8M 带宽)或 1k(2M 带宽)个数据点缓存起来,为了实现数据流的连续性,分成两块采用乒乓方式来实现,具体过程是通过一个地址产生控制模块来实现数据的输出。对于缓存区的输入,需要以倒位序的地址作为缓存输入地址,这可以用一个减法计算器来实现,以其最低位为缓存区地址的最高位,次低位为缓存区地址的次高位,以此类推。缓存数据的输出还需乘以 ROM 区的窗函数数据从而实现加窗处理,其逻辑框图如图 7 所示。

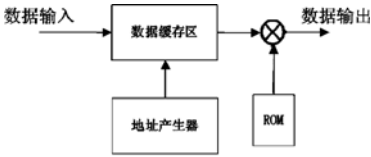


图7 后处理模块功能框图

3 OFDM 的 FPGA 实现与实验结果

3.1 Quartus II 平台的实现

根据前面所述,采用了自顶向下的设计思路,再自底而上地编写各个模块的代码,各模块采用 Verilog HDL 硬件描述语言在 Quartus II 软件环境下进行设计。CMMB 标准中 IFFT 采用流水线结构的情况下 8M 带宽的为 12 级,2M 带宽的为 10 级,主要设计出蝶形单元的控制端 BF_mode 并将其供给 FIFO 控制单元的 BF_mode 输入端,同时产生乘以何种蝶形因子的标志,还有乘以蝶形因子的地址输给复用模块。复用模块主要是实现乘法器的时分复用,由于 8M 带宽的 IFFT 有 9 级需要乘以蝶形因子,2M 带宽的 IFFT 有 7 级需要乘以蝶形因子,可以将 8M 带宽的 IFFT 实现 9 倍乘法器复用,2M 带宽的 IFFT 实现 7 倍乘法器复用,即在同时接收各级输出数据,在不同的时刻处理需乘以蝶形因子的数据,再同时输给相对应的下一级。这里以 8M 带宽的 IFFT 为例实现 CMMB 标准的 OFDM 调制,其关键的 IFFT 在 Quartus II 上设计所得的 RTL 截图如图 8 所示。

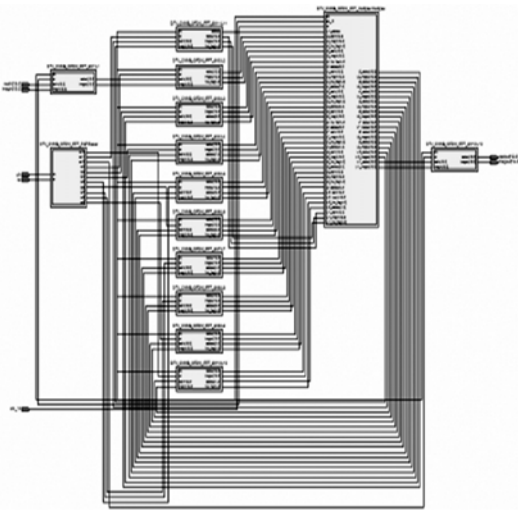


图8 IFFT RTL截图

将各个模块在 Quartus II 平台上的代码进行编写设计,并最终将各个模块串接起来组成整个 OFDM 调制,基于 CMMB 标准的 8M 带宽的 OFDM 调制在 Quartus II 上设计所得的 RTL

截图如图 9 所示。

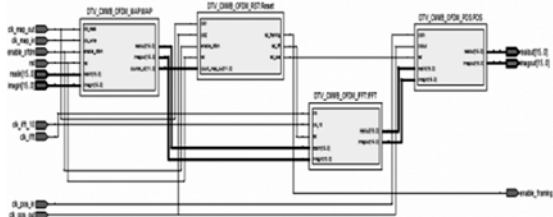


图9 OFDM调制 RTL截图

3.2 验证数据结果与分析

运用 Quartus II 自带的仿真功能根据 CMMB 标准中所要求的码率进行仿真,确定功能正确之后,将程序下载入 FPGA 利用 SignalTap II 进行板上调试,并将 Quartus II 的 SignalTap II 板上调试结果与 MATLAB 仿真两者的结果相对比。图 10 为 CMMB 标准中 8M 带宽 OFDM 的 Quartus II 的 SignalTap II 板上调试结果,图 11 为对应的 MATLAB 仿真结果。由于数据量太大,这里只截取了前面的几组数据进行对比,其中图 10 是实部和虚部分开的,上面的数据是实部,下面的数据是虚部,图 11 是实部和虚部组合的复数形式。虽然本设计采用的是定点小数的处理办法,但在 SignalTap II 中只能观察整数结果,所以 MATLAB 处理的数据扩大相应的倍数进行对比即可。

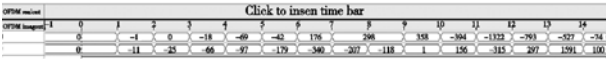


图10 8M带宽OFDM的SignalTap II 调试结果

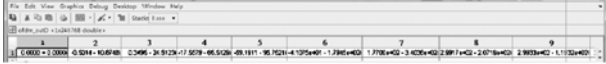


图11 8M带宽OFDM的MATLAB仿真结果

从图 10 和 11 的对比可以看出,两者的差别很小,本设计满足 STiMi 技术中 OFDM 调制的要求。两者的差别主要来源于以下两种情况:a)蝶形运算单元,主要来源于数据交叉相加或相减产生的误差;b)乘法器运算产生的截位误差。

为了进一步验证设计的正确性,将 SignalTap II 板上调试的结果数据导出成 tbl 格式文件,将该文件导入 MATLAB 软件中,再在 MATLAB 中利用画功率谱的函数 pwelch 画出 Signal-Tap II 板上调试的结果数据的功率谱,并与 MATLAB 仿真的 CMMB OFDM 调制的功率谱进行对比,如图 12 所示。可以看出,图 12 所示的两种平台下的功率谱整体上差别甚微,带内平坦度基本趋于一致,主要差别在于带外的平坦度。如图 13 所示可以看出,FPGA 上的实际实现相对于 MATLAB 上的“无误差”实现毛刺要多一些,但总体而言图 12 所示的两个功率谱均与 CMMB 第一部分标准中给出的标准功率谱是一致的,从而进一步证明了设计的正确性。

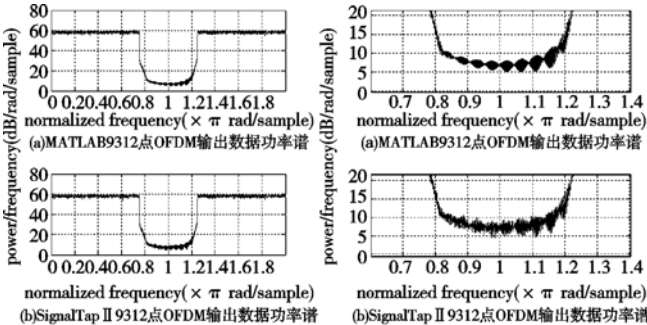


图12 MATLAB仿真与SignalTap II 板级调试OFDM输出数据功率谱对比

图13 MATLAB仿真与SignalTap II 板级调试OFDM输出数据带外功率谱对比

精度和 1.6 的表面粗糙度。其工艺要求限于以下几个概念属性:零件名称、材料要求、精度要求、工艺路线、工装选择和零件加工设备。

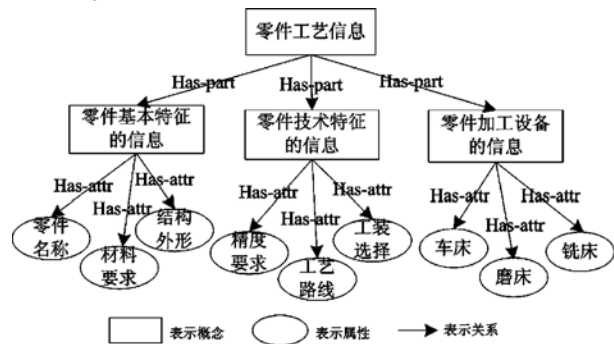


图3 零件工艺信息本体结构

在重用之前,工艺信息本体的概念、子概念、属性等元素需要进行预处理。预处理主要是包括分词、停用词删除、词干抽取和归一化处理等。工艺信息本体进行预处理可以提高概念相似度计算的精度。首先对零件基本特征的信息本体相似度进行计算,实现了零件基本特征的信息与零件库中实例零件基本特征的信息映射,在零件库中确定了材料为 45 号钢的动力输出轴系列为相似实例;然后计算零件技术特征的信息本体相似度,在动力输出轴系列中搜索到 8 级精度和 1.6 的表面粗糙度较为相似,达到工艺要求的精度要求的工艺路线(下料—热处理—车—半精车—磨—铣)相似度高,满足该工艺路线,所以需要的工装相似度也较高;最后进行零件加工设备信息的本体相似度计算,确定动力输出轴的加工设备为 CA6140、M1432A、X5030 三种机床。通过对零件工艺三部分信息本体的计算,在零件库中搜索出一个相似度很高的实例零件如图 4 所示。工艺人员调出该实例零件的机械加工工艺,根据经验并结合生产加工的实际要求,对该实例工艺进行局部修改即可得到新零件的机械加工工艺。

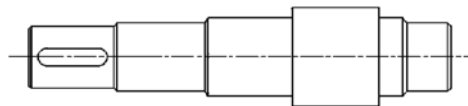


图4 实例零件

(上接第 176 页)

4 结束语

通过对设计进行 MATLAB 平台的仿真和 Quartus II 平台的板级调试,并对所得结果进行对比分析,验证了文中提出的设计实现方法在极大地降低了硬件资源的基础上,可以快速、高效地实现 CMMB 标准中的 OFDM 调制,所有模块均在标准要求的指标下通过功能仿真、时序分析以及板级调试。该方法对 CMMB 系统的 OFDM 调制设计与实现具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 杨庆华,陶涛,葛启宏,等. GY/T 220.1—2006 移动多媒体广播第 1 部分:广播信道帧结构、信道编码和调制[S]. 北京:国家广播电视总局,2006.

[2] 程佩青. 数字信号处理[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2009:

5 结束语

描述和检索是实现 CBR 工艺设计重用的内容。本文提出的基于本体映射的工艺实例重用方法,通过计算新零件工艺和零件库实例零件工艺概念相似度,使得检索的实例工艺与当前待加工的零件匹配度高,充分发挥了基于实例的检索系统的作用,有效地解决了实例重用过程中的各种问题,为实现基于 CBR 高效的工艺设计奠定了基础。

参考文献:

[1] 段建国,李爱平,徐立云,等. 箱体类零件变批量生产的分层工艺实例检索策略[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(8):1614-1621.

[2] 高伟,殷国富,戈鹏. 基于知识发现原理的制造工艺重用方法研究[J]. 中国机械工程,2003,19(10):1167-1170.

[3] 李双跃,龙红能,殷国富,等. 基于特征的制造工艺资源建模与检索方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(6):1061-1065.

[4] 赵刚,江平宇. 面向大规模定制的 e-制造工艺优化决策方法研究[J]. 中国机械工程,2007,9(5):1056-1059.

[5] 张太华,顾新建,刘海强,等. 企业协同中的零件本体映射[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(12):2287-2292.

[6] 郭剑锋,顾新建,祁国宁,等. 零件库中基于本体的智能搜索引擎的研究与实现[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(4):639-645.

[7] 李文杰,冯志勇,赵德新. 基于本体的零件描述模型研究[J]. 计算机工程,2007,33(8):250-252.

[8] 但斌,姚玲,经有国,等. 基于本体映射面向模糊客户需求的产品配置研究[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(2):225-232.

[9] 肖文芳. 基于相似度计算的本体映射研究与实现[D]. 长沙:中南大学,2007.

[10] 王宗江. 异构本体映射关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

[11] 刘紫玉,黄磊. 基于领域本体模型的概念语义相似度计算研究[J]. 铁道学报,2011,33(1):52-57.

[12] 朱文博,李爱平,刘雪梅. 基于本体的冲压工艺知识表示方法研究[J]. 中国机械工程,2006,17(6):616-620.

143-176.

[3] 陶金. OFDM 调制中的高效 FFT 处理器的设计与 FPGA 实现[D]. 上海:上海交通大学,2006.

[4] BOUGUEZEL S, AHMAD M O, SWAMY M N S. A new radix-2/8 FFT algorithm for length-q × 2m DFTs[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2004, 51(9):1723-1732.

[5] TAKAHASHI D. An extended split-radix FFT algorithm[J]. IEEE Signal Processing Lett, 2001, 8(5):145-147.

[6] MERLYN M. FPGA implementation of FFT processor with OFDM transceiver[C]//Proc of 2010 International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). [S. l.]: IEEE Computer Society, 2010: 483-489.

[7] LI S, XIAO H, CHEN Y. A low-power 4K point FFT processor for CMMB OFDM receiver system [C]//Proc of the 8th IEEE International Conference on ASIC. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2009: 517-520.