

## Low-Complexity Full-Digital Method of OQPSK Modulation Based on IEEE 802.15.4\*

LIU Shugang, LIU Hongli\*, ZHAN jie, ZHU Fan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** We deep researched on the adjacent phase characteristics of the OQPSK modulation signals by half-sine shape in IEEE 802.15.4 protocol. The baseband modulation algorithm was digitized in order to facilitate full digital hardware implement of modulation algorithm. At the same time, we proposed an effective method of cyclic shift and looking-up table, which could reduce the circuit complexity and greatly simplify the circuit. The hardware cost of modulator will be effectively reduced. The simulation and FPGA synthesis results show that the proposed method has the advantages for easy realization. Moreover, the cost is greatly reduced because the number of logic elements and memory bits was only 52 and 72, respectively. The method can effectively meet the requirements of lower cost in wireless sensor networks.

**Key words:** IEEE802.15.4; half-sine shaping function; offset quadrature phase-shift keying; full-digital modulation; wireless sensor network

**EEACC:** 1250

## 基于 IEEE 802.15.4 的低复杂度 OQPSK 全数字调制方法\*

刘述钢, 刘宏立\*, 詹杰, 朱凡

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 深入研究 IEEE 802.15.4 协议中经半正弦函数成型的 OQPSK 调制信号中相邻相位的变化特征, 为便于调制算法的全数字电路实现, 对基带调制算法进行了数字化处理。同时, 本文提出一种循环移位和查找表相结合的方法降低电路复杂度, 有效减小了调制器的实现成本。仿真及 FPGA 综合结果表明: 该方法简单易行, 逻辑单元数和存储器比特数仅分别为 52 和 72, 满足无线传感网络低成本的要求。

**关键词:** IEEE802.15.4; OQPSK; 半正弦成型函数; 全数字调制; 无线传感网络

**中图分类号:** TN92; TN47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2010)05-0691-05

IEEE 802.15.4 协议<sup>[1]</sup> 技术是一种短距离、低功耗、低成本的无线通信技术, 能够满足小型化、低成本设备的无线联网要求, 已成为新型的无线低速个域网——无线传感网络 (Wireless Sensor Networks: WSNs) 的 PHY 层和 MAC 层标准。WSNs 因应用前景广阔已得到各国政府、学术界和产业界的广泛重视, 成为信息领域的最新研究热点。WSNs 与传统的无线网络最大区别在于该网络着重在低成本、低功耗的议题上, 目前, 国内外的研究主要关注于低功耗的 MAC 层、路由层和应用层, 例如网络的优化部署、拓扑控制、移动控制和能量优化管理等问

题<sup>[2-5]</sup>, 而对物理层研究的关注度比较弱, 特别对物理层调制算法及实现的研究成果比较匮乏。在文献 [1] 的物理层协议中, 有 868/915 MHz 和 2.4 GHz 两种频段, 前一种频段为 BPSK 调制方式, 因其算法和实现简单本文只对 2.4 GHz 频段调制算法进行数字化分析和处理, 充分降低电路复杂度, 以满足低成本的应用需求。

在文献 [1] 中 2.4 GHz 频段采用 OQPSK 调制方式, OQPSK 是在 QPSK 基础上发展起来的一种高效率恒包络调制方式, 由于它具有良好的频谱效率和恒包络特性, 已在 CDMA<sup>[6]</sup>、卫星通信<sup>[7]</sup> 等大量

**项目来源:** 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目资助 (2007AA11A121); 湖南省科技厅计划项目资助 (2008FJ3114)

**收稿日期:** 2009-11-29

**修改日期:** 2010-01-26

实际系统中得到应用,本文参考文献[6-9]中 QPSK\OQPSK 算法和文献[10-11]中 GMSK\MSK 算法的设计过程,对 2.4 GHz 频段中的 OQPSK 经半正弦波成型后相邻相位变化对基带信号影响的特征进行分析,并对算法的硬件实现进行优化设计,简化调制器结构,有效实现满足协议要求的调制器,最后给出实际电路的验证结果并进行分析总结。

### 1 调制算法分析

与 QPSK 相比,OQPSK 的同相 I 与正交 Q 数据流在时间上相互错开了一个码元间隔,这使得 OQPSK 信号中,I、Q 两个数据流中每次只有一路可能发生极性变换,因此每当一个新 bit 输入时,输出的 OQPSK 基带信号只有 0°和 ±90°三种相位跳变,有效地避免了 180°相移跳变时的零包络现象,性能得到了改善。OQPSK 的时域表达式是:

$$S(t) = \sqrt{2E/T} \cos[2\pi f_c t + \phi(t, \bar{\alpha}) + \phi_0] \quad (1)$$

其中:

$$\phi(t, \bar{\alpha}) = 2\pi\lambda \int_{-\infty}^t \sum_{-\infty}^{+\infty} \alpha_i g(\tau - iT) d\tau \quad -\infty < t < +\infty$$

$f_c$  是载波频率; $\phi_0$  是初始相位; $T$  调制信号的周期;信息相位  $\phi(t, \bar{\alpha})$  是由三码元序列  $\alpha_i = -1, 0, 1$ 、频率脉冲  $g(t)$  和调制指数  $\lambda$  共同决定。

根据式(1),可得 OQPSK 时域基带信号的复数等效形式为:

$$s(t) = \frac{A}{\sqrt{2}} \left( \sum_{k=-\infty}^{\infty} m_I(k) h(t - kT) + j \sum_{k=-\infty}^{\infty} m_Q(k) h(t - kT - \frac{T}{2}) \right) \quad (2)$$

其中: $A$  为实数,表示调制信号的幅度修正因子; $k$  为信息序号; $h(t)$  为成型滤波器的冲激响应,选择成型滤波器的标准是有尽量好的带外抑制和尽量小的时钟偏移敏感度。文献[1]中采用半正弦脉冲成型函数,其表达式为:

$$p(t) = \begin{cases} \sin(\pi \frac{t}{2T}), & 0 \leq t \leq 2T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

经过式(3)整形后的调制信号为:

$$\tilde{s}(t) = s(t) \cdot p(t - kT) \quad (4)$$

同时,依据文献[6, 10],可得 MSK 调制的基带信号为:

$$S_{MSK}(t) = m_I(t) \cos \frac{\pi t}{2T} + m_Q(t) \sin \frac{\pi t}{2T} \quad (5)$$

其中:同相分量  $m_I(t) = \cos \phi_k$ ; 正交分量  $Q_k = -a_k \cos \phi_k, a_k = \pm 1$ 。分析式(4)和式(5),我们很容

易得出经过半正弦波成型的 OQPSK 调制与 MSK 调制很相似。OQPSK 的 I 和 Q 正交信号直接乘上半正弦波,而 MSK 信号的 I 路信号乘上正弦波 Q 路信号乘上余弦波。经过半正弦波成型的 OQPSK 与 OQPSK 的功率谱密度如图 1。

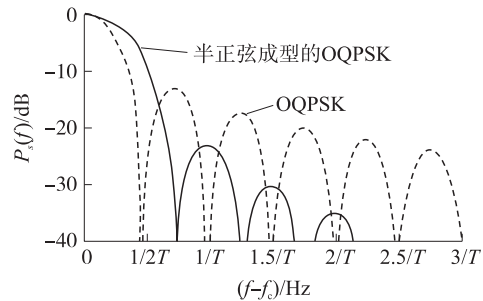


图 1 OQPSK 与半正弦波成型 OQPSK 的功率谱密度

从图 1 可以看出,经过成型后,信号的能量集中在频率较高处,且信号的功率谱密度更为集中,即其旁瓣下降得更快,因此它对于相邻频道的干扰较小。根据文献[11]中 MSK 基带信号的相位表示方法,半正弦成型后的 OQPSK 调制信号复数形式为:

$$\tilde{s}(t) = m_I(t) + j \cdot m_Q(t) = e^{j\theta(t)} = \cos\{\theta(t)\} + j \cdot \sin\{\theta(t)\} \quad (6)$$

其中: $\theta(t)$  为  $t$  时刻接收信号的相位; $m_I(t)$  和  $m_Q(t)$  用卷积的方式表示为:

$$m_I(t) = p(t) * a_I(t) = \sum_{n=\text{偶数}} a_I[k] \cdot p(t - kT) \quad (7)$$

$$m_Q(t) = p(t) * a_Q(t) = \sum_{n=\text{奇数}} a_Q[k] \cdot p(t - kT) \quad (8)$$

其中:“\*”为卷积; $a_I[t]$  和  $a_Q[t]$  是冲激响应,它们的表达式如下

$$\begin{cases} a_I(t) = \sum_{n=\text{偶数}} a_I[k] \cdot \delta(t - kT) \\ a_I[k] = \cos(\theta[k]) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_Q(t) = \sum_{n=\text{奇数}} a_Q[k] \cdot \delta(t - kT) \\ a_Q[k] = \sin(\theta[k]) \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\delta(t)$  为单位冲激函数,  $\theta[k] \in \{-\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}\}$ 。

简化式(4)基带信号的复数序列为:

$$I[k] = e^{j\theta[k]} = \cos(\theta[k]) + j \cdot \sin(\theta[k]) = a_I[k] + j \cdot a_Q[k] \quad (11)$$

基于式(11),经过半正弦波成型后的 OQPSK 基带信号序列可以表示为:

$$\tilde{s}(t, I) = p(t) * a(t) = \sum_k I[k] \cdot p(t - kT_c) \quad (12)$$

其中: $a(t) = \sum_k I[k] \cdot \delta(t - kT_c)$ 。

根据  $\theta[k] \in \{-\pi/2, 0, \pi/2\}$  的特征,当输入信

号变化时可引起  $I[k]$  实部和虚部的值发生变换,其映射递归表达式为:

$$I[k] = j \cdot |I[k-1]| \cdot a[k] \quad (13)$$

其中:  $\begin{cases} I[k] \in \{1, -1, j, -j\} \\ a[k] \in \{1, -1\} \end{cases}$

连续发送数据  $d(n)$  在调制前经过 DSSS 扩频处理,且因在信号输出前必须经过 D/A 转换,需对式(12)进行抽样处理。综上分析,得出满足 IEEE 802.15.4 要求的调制算法转换方法如图 2。

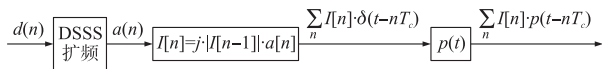


图 2 数字调制算法

## 2 调制器结构设计

分析文献[1]的物理层的调制算法,在调制前,数据信号进行映射处理,根据所发送连续的数据信息所选择的 chip (码片) 序列串接起来,并使用 OQPSK 调制方法将这些集合在一起的序列调制到载波上。整个过程包含以下 3 个步骤:

(1) 1bit 到 symbol(符号)的映射:每个字节按 4 个 bit 为单位进行分解,其划分方式为低 4 bit 位(LSB:  $b_0, b_1, b_2, b_3$ ) 映射成一个符号,而高 4 bit 位(MSB:  $b_4, b_5, b_6, b_7$ ) 则映射成另一个符号,依此类推,分成多个符号顺序连接。

(2) 符号到 chip 的映射:每一个符号数据映射成一个具有 32 bit 的伪随机序列(PN 序列) chip,且 PN 序列之间存在一定的关系,即前 8 组序列是由第一组序列以 4 bit 为单位,依序向右循环位移而得到,而末 8 组 PN 序列对第一组序列循环位移以外还将奇数位元取反。

(3) OQPSK 调制与整形处理:将 PN 序列的偶数位和奇数位分别调制到载波上的 I 相(复数信号的实部)与 Q 相(复数信号的虚部),再用半正弦脉冲成形得到 I、Q 两路最终发射的基带信号。

通过对调制过程与数字调制算法的分析,可得调制器结构框图(图 3)。



图 3 调制过程架构

## 3 低复杂度电路设计

WSNs 需求决定了其通信传输必须具有低复杂度、低功耗和低成本的特点,因此必须对调制器的电路进行最优化设计。结合以上完整的调制过程分析

并参考文献[12]中 QPSK 调制在 FPGA 中的实现方法,我们把调制电路主要分成码元映射和 OQPSK 调制与脉冲成型两个部分进行设计,这两部分的电路详细设计如下。

### 3.1 码元映射

因每 4 个连续的信息比特映射成一个符号,可得共有 16 个符号,而每个符号要映射成一个 32 bit 的 chip,如果用查表的方式来实现的话,共需要存储器 ROM 为  $16 \times 32 = 512$  bit。经过对映射关系的比较分析,我们发现 16 组码片序列通过循环移位或者相互结合(如奇数位取反)等相互关联,因此在硬件实现时可以利用第一组码片作为原始序列,采用循环移位方法得到其他 chip,其产生方法为:①当符号的  $b_3$  位为 1 时,chip 的奇数位都取反;②根据符号的  $b_0, b_1, b_2$  来决定每个 chip 的起始位地址;③通过一个 5 bit 宽度的计数器来计算目前输出的位,且通过输入符号的  $b_3$  来决定奇数位是否需要取反。符合这种设计方法的映射器电路如图 4,该方法只需单口 ROM 为 32 bit,大大减小了 ROM 存储比特数,这样能有效节约电路面积从而降低了实现成本。

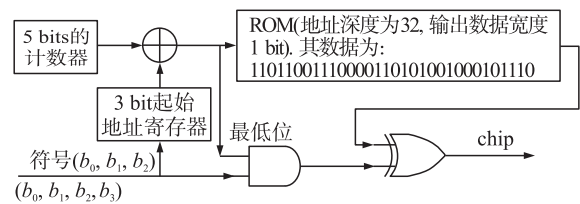


图 4 码元映射电路架构

### 3.2 调制与脉冲成型

输入 32 bit 的 chip 信息时,根据式(13),可知输出 16 bit 的 I 路信号和 16 bit 的 Q 路信号,为达到 I 相与 Q 相两者的偏移,Q 相的信号必须比 I 相的信号延迟一个比特周期,可以将位交错式的分别存入两个暂存器中,形成上述偏移现象,且每位维持的时间延长为 2 倍。接着将暂存器的值进行过采样处理。过采样即进行插值处理,设过采样率是码片比特速率的 4 倍,在此就是在每位后插入 7 个“0”,因此当送入一个 I 或 Q 路信号为 1 的时候,成型后输出波形见图 5。根据式(12),调制信号经过半正弦波成型,即为调制信号与成型函数的卷积,因此在相同 tap 的情况下共需 8 次乘法和 8 次加法,乘加器的硬件实现比较占资源,而且整个硬件的速度会显著下降。因输入滤波器的数据只有 1 和 -1,且成型函数的冲激响应为 8 个抽头(tap),所以我们可以用查表的方法来实现,即把 tap 系数的量化值保存在 ROM 中,从图 5 可以看出,

第1个 tap 与第7个 tap、第2 tap 与第6个 tap、第3个 tap 与第5个 tap 的值分别相等,为了节约成本,可以用双口 ROM 来实现,以便于 I、Q 共享查找表,其大小是  $5 \times 8 = 40$  bit。可将 Q 相信号输出时经过4个过采样时间的延迟单元以达到 Q 相的信号比 I 相的信号延迟一个码片比特的要求。经以上分析, OQPSK 调制与脉冲成型电路见图6,这种查找表方法可以去掉乘加器和多路选择器等逻辑单元,有效减小面积,节约硬件实现成本。

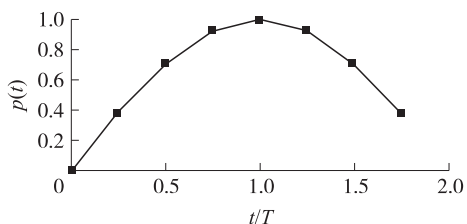


图5 半正弦成型函数的冲激响应

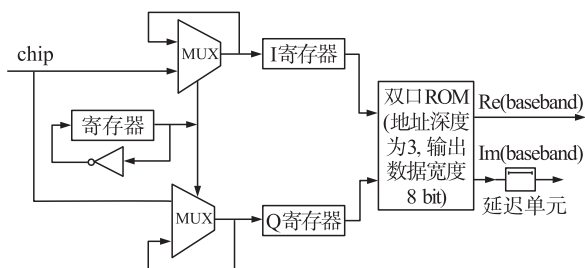


图6 调制与脉冲成型电路架构

## 4 仿真与性能分析

根据数字调制算法,在 Matlab 中对算法进行仿真,随机序列作为测试信号送入,通过解调器解调后测试是否符合我们设计的形式,图7是原始码片序列经调制的 I、Q 信号波形图,完全符合 IEEE802.15.4 中 2.4 GHz 频段的调制基带信号要求。

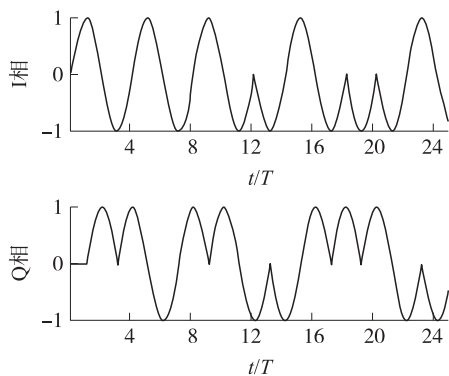


图7 调制器 I、Q 信号输出

同时采用硬件描述语言 Verilog 对调制器进行数字硬件实现,采用 Altera 公司的 Quartus II 进行综合,其中 FPGA 的型号为 cyclone 系列的 EP1C12F256C6。

分别用本文的循环移位与查找表结合方法(称为方法1)和查找表与 FIR 滤波器<sup>[11]</sup>结合方法(称为方法2)对满足 IEEE802.15.4 规定的调制器进行硬件实现,各自综合后的结果见表1。

表1 调制电路综合结果

|     | logic elements | memory bits | actual $f_{max}$ |
|-----|----------------|-------------|------------------|
| 方法1 | 52             | 72          | 256.02 MHz       |
| 方法2 | 126            | 552         | 163.13 MHz       |

分析表1数据,方法1占用的逻辑单元数为52,仅是方法2的41.3%;特别是存储器节约的成本更为明显,只为13%;就输入时钟的速度来说,方法1的工作时钟的频率最高可达256.02 MHz,比方法2提高将近1.6倍。从综合后的结果来看,本文提出的调制器设计方法能有效节约硬件面积,大大降低了成本,且能适用于高速的 OQPSK 调制。

## 5 结束语

本文对 IEEE802.15.4 中 2.4 GHz 频段的调制算法进行数字化处理,同时对调制器的实现方法进行深入分析,综合考虑映射、OQPSK 调制、过采样和成型等过程,采用循环移位与查找双口 ROM 的方法对电路优化设计,最后使用 Altera 公司的 FPGA 对设计方法加以验证,结果表明本文提出的方法能有效实现满足 IEEE802.15.4 要求且大大降低了实现成本。

## 参考文献:

- [1] IEEE 802 Working Group. Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S]. ANSI/IEEE 802.15.4, 2003.
- [2] Wang Xue, Wang Sheng. An Improved Coevolutionary Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Networks with Dynamic Deployment[J]. Sensors, 2007, 7(3): 354-370.
- [3] Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, Nicola Santoro. Self-Deployment of Mobile Sensors on Ring[J]. Theoretical Computer Science, 2008, 402(1): 67-80.
- [4] Huang Hui-feng. A Novel Access Control Protocol for Secure Sensor Networks[J]. Computer Standards & Interfaces, 2009, 31(2): 272-276.
- [5] LI Li, DONG Shu-song, WEN Xiang-ming. An Energy Efficient Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. The Journal of China Universities Posts and Telecommunications, 2006, 13(3): 71-75.
- [6] Arash Mirbagheri, Konstantinos N. Plataniotis, Subbarayan Pasupathy. An Enhanced Widely Linear CDMA Receiver with OQPSK Modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006,

- 54(2): 261–272.
- [7] 王诺,戴逸明. 用于卫星通信的一类 UQPSK 载波恢复算法及其性能的研究[J]. 电子学报,2004,32(7):1219–1222.
- [8] Paolo Zicari, Emanuele Sciajura, Stefania Perri. A Programmable Carrier Phase Independent Symbol Timing Circuit for QPSK/OQPSK Signals. *Microprocessors and Microsystems*[J]. 32(8): 437–446.
- [9] Roger Martinsen Koteng. Evaluation of SDR-Implementation of IEEE 802.15.4 Physical Layer[D]. Norwegian University of Science and Technology Department of Electronics and Telecommunications, 2006.
- [10] Liu Shugang, Liu Hongli. A Linear Approximation of GMSK Modulation for GSM/EDGE Mobile Communication[C]. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Digital Signal Processing, WICOM 2008. Oct. 2008: 1–4.
- [11] Arnaldo Spalvieri, Maurizio Magarini. Wiener's Loop Filter for PLL-Based Carrier Recovery with OQPSK and MSK[C]. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CNSDSP 2008. July, 2008: 525–529.
- [12] Li Fang, Ke Xizheng, Li Qiang. Design and Implement of OQPSK Modulator Based on FPGA[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2007. 3: 861–864.



刘述钢(1978–),男,湖南邵阳人,湖南大学博士生,主要研究方向为新型无线传感网络及 OFDM 新技术在智能电网中的应用研究;



刘宏立(1963–),男,湖南常德人,湖南大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信理论和无线传感网络新技术、移动通信系统与软件无线电。