

# 提高 OFDM 系统误码率性能的研究

张秀艳<sup>1</sup>, 李 卫<sup>1</sup>, 王海生<sup>2</sup>, 李繁荣<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 大庆新油田, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**正交频分复用(OFDM)技术在高速数据传输中得到了普遍的应用,尤其是在无线接入和移动通信中的应用前景十分广泛。常用的 CP-OFDM 系统由于在其中加入了循环前缀,则减少了系统信道的信息容量。文中研究了一种最新的实现 OFDM 的方法,就是 OFDM/OQAM,其系统的频谱比 CP-OFDM 系统更好地限制在系统带宽内部,所以能比常用的 OFDM 更好地消除各种干扰。在介绍了 OFDM/OQAM 的基本原理之后,利用 MATLAB 对 CP-OFDM 系统和 OFDM/OQAM 系统的性能进行了对比和分析。仿真结果表明,OFDM/OQAM 系统的性能优于传统的 OFDM 系统,并具有良好的误码性能。

**关键词:**CP-OFDM;OFDM/OQAM;仿真

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)04-0233-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.04.057

## Research on Improving BER Performance of OFDM System

ZHANG Xiu-yan<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Hai-sheng<sup>2</sup>, LI Fan-rong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Heilongjiang 163318, China;

2. The New Oil Deposit of Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** The technology of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been applied widely in the transmission of high-speed data, especially in wireless access and mobile communication, where OFDM has very wide perspectives. The commonly used CP-OFDM system decreases channel information capacity because of introducing the cyclic prefix. It studies a new method to implement OFDM, this is OFDM/OQAM, the spectrum of the system better limits in the system bandwidth internal than CP-OFDM system and it can resist various interference better than commonly used OFDM. The fundamental of OFDM/OQAM system was briefly introduced, from using MATLAB software, compare with and analyze the performance between CP-OFDM system and OFDM/OQAM system. At the same time the result of simulation is given. The results indicate that the performance of the OFDM/OQAM system is superior to the traditional OFDM system and has good BER performance.

**Key words:** CP-OFDM; OFDM/OQAM; simulation

## 0 引言

随着社会的不断发展,各个国家对研发出效率更高的通信技术一直不懈努力。在这种环境下,人们发现了正交频分复用<sup>[1]</sup>(OFDM)技术,并不断地完善这种多载波传输方案。在无线传输过程中,由于多径传播而造成的时间选择性衰落和频率选择性衰落,正交频分复用能有效对抗这两种衰落,所以它很适合应用在无线通信中。正交频分复用技术是一种不断发展的新型无线通信技术,越来越受到人们的关注,并成为第四代移动通信系统的支柱技术之一。

常用的 OFDM 系统是带有循环前缀的正交频分复用系统<sup>[2]</sup>(Orthogonal Frequency Division Multiplex with Cyclic Prefix, CP-OFDM),它是通过添加循环前缀(CP)来消除 ISI 干扰,但由于保护前缀的添加,降低了 CP-OFDM 系统的有效发送功率和频谱利用率。

为了抑制或减小具有 ISI 干扰和 ICI 干扰的时频双选择性信道条件下对 OFDM 系统的影响,有些学者通过选取不同的成形滤波器函数应用于 OFDM 系统,利用其时频聚焦特性来抑制衰落信道的各种影响。该函数是通过有效的正交变换使其不但有 Gaussian 函数的时频聚焦特性,而且可以保持滤波器之间严格的正交,但是正交变化函数<sup>[3]</sup>(Isotropic Orthogonal Transform Algorithm, IOTA)只满足在实数域的严格正交条件。为了能充分利用 IOTA 函数的优点,后来学者们提出

收稿日期:2012-07-20;修回日期:2012-10-23

基金项目:黑龙江省教育科学技术研究项目(11551026)

作者简介:张秀艳(1976-),女,副教授,研究方向为无线通信;李卫(1988-),男,硕士研究生,研究方向为现在通信技术。

了一种利用交错正交幅度调制方式 (Offset Quadrature Amplitude Modulation, OQAM) 将 IOTA 函数应用到正交频分复用系统中,即是基于交错正交幅度调制下正交频分复用系统<sup>[2,3]</sup> (Orthogonal Frequency Division Multiplex/Offset QAM, OFDM/OQAM)。由于 IOTA 函数具有良好的时域聚集特性,所以 OFDM/OQAM 系统在一定范围内能够有效地抑制 ISI 干扰。同理,由于 I-OTA 函数的频域聚焦特性,OFDM/OQAM 系统可以很好地抑制 ICI 干扰。

### 1 OFDM/OQAM 系统的基本原理

图 1 为 OFDM/OQAM 系统基本原理模型<sup>[3,4]</sup>。

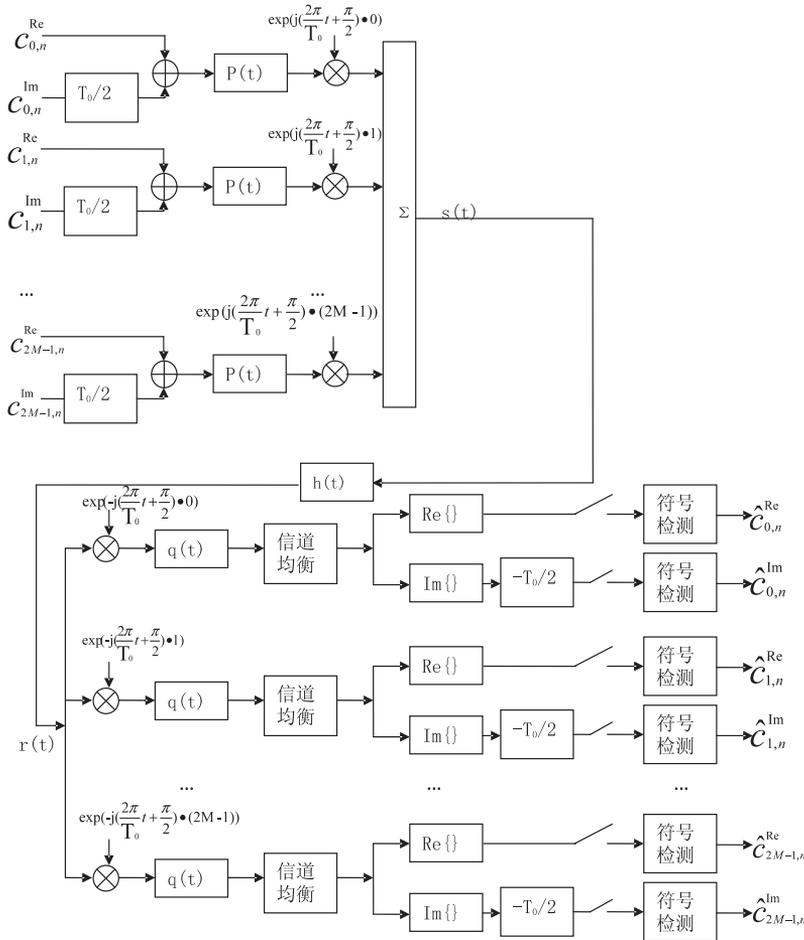


图 1 OFDM/OQAM 系统基本原理模型

在 OFDM/OQAM 系统内,其子载波的数量  $K$  应该为 2 的倍数,即  $K = 2M$ ,所以其在连续域中的基带传输信号  $s(t)$ <sup>[5]</sup> 为:

$$s(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \{ (C_{2m,n}^{\text{Re}} p(t - n T_0) + j C_{2m,n}^{\text{Im}} p(t - T_0/2 - n T_0) \exp(j 2 \pi (2m) F_0 t) + (j C_{2m+1,n}^{\text{Im}} p(t - n T_0) + C_{2m+1,n}^{\text{Re}} p(t - T_0/2 - n T_0) \exp(j 2 \pi (2m + 1) F_0 t) \}$$

其中,  $T_0$  为一个 OFDM 符号时间,  $F_0 = 1/T_0$  为载波频率间隔,  $p(t)$  是对称实值脉冲成形函数,待传输

信号  $c_{m,n}$  的虚部与实部分别为  $C_{m,n}^{\text{Im}}$  和  $C_{m,n}^{\text{Re}}$ 。

如果在理想信道条件下,系统接收端会利用信号自身的正交性,解调方式为:

$$\hat{c}_{2m,n}^{\text{Re}} = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - n T_0) \exp(-j 2 \pi (2m) F_0 t) s(t) dt \right\}$$

$$\hat{c}_{2m,n}^{\text{Im}} = \sqrt{2} \text{Im} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - T_0/2 - n T_0) \exp(-j 2 \pi (2m) F_0 t) s(t) dt \right\}$$

$$\hat{c}_{2m+1,n}^{\text{Im}} = \sqrt{2} \text{Im} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - n T_0) \exp(-j 2 \pi (2m + 1) F_0 t) s(t) dt \right\}$$

$$\hat{c}_{2m+1,n}^{\text{Re}} = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - T_0/2 - n T_0) \exp(-j 2 \pi (2m + 1) F_0 t) s(t) dt \right\}$$

为了简化上式,取:

$$a_{2m,2n} = c_{2m,2n}^{\text{Re}}, \quad a_{2m,2n+1} = c_{2m,2n+1}^{\text{Im}}, \\ a_{2m+1,2n} = c_{2m+1,2n}^{\text{Im}}, \quad a_{2m+1,2n+1} = c_{2m+1,2n+1}^{\text{Re}}, \\ \varphi_{2m,2n} = 0, \quad \varphi_{2m,2n+1} = \pi/2, \quad \varphi_{2m+1,2n} = \pi/2, \quad \varphi_{2m+1,2n+1} = 0$$

令  $\tau_0 = T_0/2$ , 则发送端和接收端分别可简化为:

$$s(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{2M-1} a_{m,n} p(t - n \tau_0) \exp(j \varphi_{m,n}) \exp(j 2 \pi m F_0 t)$$

$$\hat{a}_{m,n} = \sqrt{2} \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - n T_0) \exp(-j \varphi_{m,n}) \exp(-j 2 \pi m F_0 t) s(t) dt \right\}$$

通常,可以这样来表示等待传输信号  $s(t)$ , 即它是在基  $g_{m,n}(t)$  下使用系数为  $a_{m,n}$  的展开形式,即:  $s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{2M-1} a_{m,n} g_{m,n}(t)$ , 其中

$$g_{m,n}(t) = \sqrt{2} p(t - n \tau_0) \exp(j \varphi_{m,n}) \exp(j 2 \pi m F_0 t)$$

$$\varphi_{m,n} = (m + n) \pi/2$$

于是,接收端就可以写成一个内积的实部:

$$\hat{a}_{m,n} = \langle g_{m,n}, s \rangle_{L_2(R), R} = \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} g_{m,n}^*(t) s(t) dt \right\}$$

其中,  $L_2(R)$  是可平方求和的离散函数。

如果在信道中没有任何失真,若要得到准确的恢复传输信号,即  $\hat{a}_{m,n} = a_{m,n}$ , 则  $g_{m,n}$  一定是一组正交基, 即:

$$\langle g_{m,n}, g_{m',n'} \rangle_{L_2(R), R} = 2 \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} p(t - n \tau_0) p(t - n' \tau_0) \exp(j 2 \pi (m' - m) F_0 t) \exp(j(\varphi_{m',n'} - \varphi_{m,n})) dt \right\} = \delta(n - m') \delta(n - n')$$

### 2 系统仿真与分析

文中 OFDM 系统的仿真使用 matlab 实现,仿真中采用 IOTA 函数<sup>[6]</sup>来实现 OFDM/OQAM 系统的脉冲成形。图 2、图 3 和图 4 是 OFDM/OQAM 系统的符号时间及载波频率间隔的图形。IOTA 函数是利用 Schmidt 方法对高斯函数在时域和频域的正交化来实现。在频域上,可以看到此函数能很好地把系统能量集中在子载波中心频率附近。

图 5 是 OFDM/OQAM 和 CP-OFDM/QAM 在 QAM 调制<sup>[7-9]</sup>下性能比较,仿真中采用参数相同的 OFDM 系统,其系统带宽 BW = 10MHz,并采用 QAM 调制方式,采用的信道估计假设是在理想条件下,其子载波的数目是  $N = 1024$ ,其中 CP-OFDM/QAM 系统中的循环前缀长度为 1/8。

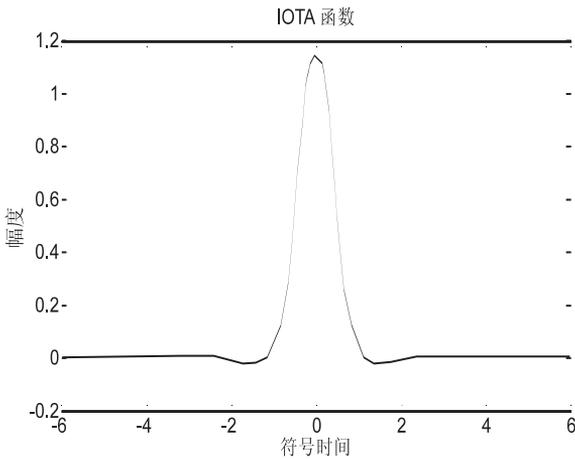


图 2 IOTA 函数的符号时间

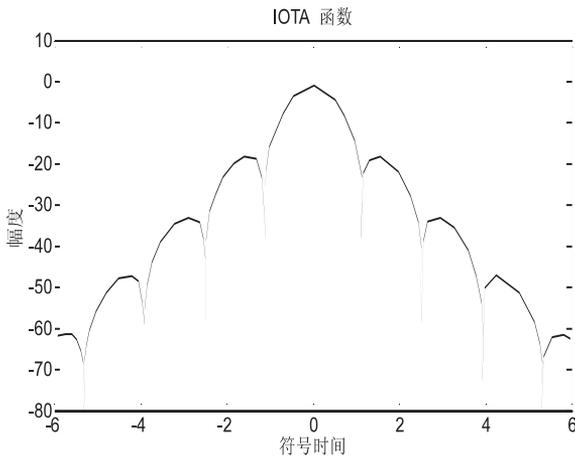


图 3 IOTA 函数的符号时间(对数)

从图中可以看出,OFDM/OQAM 系统性能优于 CP-OFDM/QAM 系统,这主要是由于循环前缀 CP 的作用,也就是说,OFDM/OQAM 系统在不需 CP 的条件下,可以在 QAM 调制的情下达达到与 CP-OFDM/QAM 系统等价的系统性能,说明 OFDM/OQAM 系统有效地节省了系统的频谱资源,且提高了系统频谱的有效利用率。

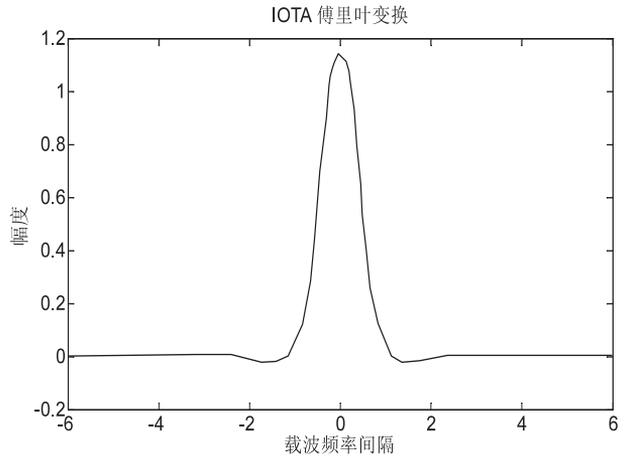


图 4 IOTA 函数的载波频率间隔

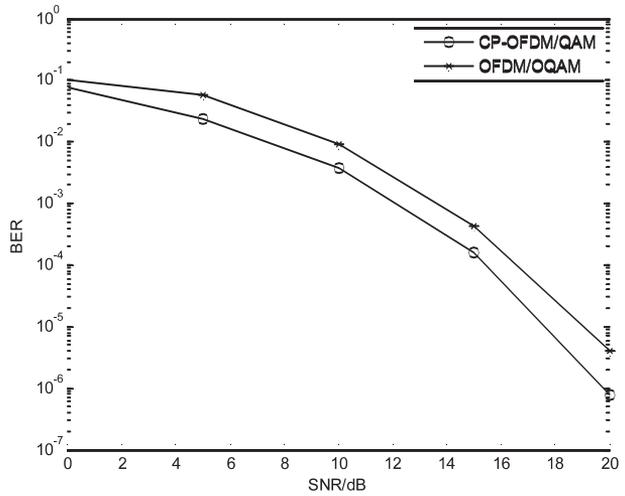


图 5 OFDM/OQAM 和 CP-OFDM/QAM 在 QAM 调制下性能比较

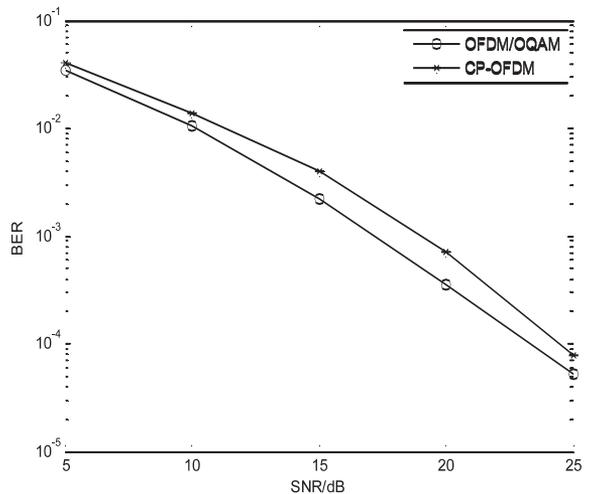


图 6 CP-OFDM 与 OFDM/OQAM 在 QPSK 调制条件下的性能比较

图 6 是 CP-OFDM 与 OFDM/OQAM 在 QPSK 调制<sup>[10,11]</sup>条件下的性能比较,仿真中采用的 OFDM 系统<sup>[12,13]</sup>仿真条件为:采样频率为 11.429MHz,系统带宽为 10MHz,载波频率为 2.4GHz,调制方式为 QPSK 调制,信道不采用任何编码,采用的信道估计假设是在

理想条件下,其子载波的数目是  $N = 1024$ ,其中 CP-OFDM 系统中的循环前缀长度为  $1/8$ 。

从图中可以看出,在采用相同的信道环境条件下,OFDM/OQAM 系统与 CP-OFDM 系统的误码率曲线近似相同。CP-OFDM 系统与 OFDM/OQAM 系统的误码率都随着信噪比的增加而降低,降低幅度近似相同,但在相同信噪比条件下 OFDM/OQAM 系统的误码率低于 CP-OFDM 系统的误码率,所以 OFDM/OQAM 系统的性能要略优于 CP-OFDM 系统。

通过以上仿真,可以看出 OFDM/OQAM 系统通过不添加循环前缀,从而降低了整个系统频谱利用率,在相同的条件下 OFDM/OQAM 系统与 CP-OFDM 系统性能比较相近,所以 OFDM/OQAM 系统的性能优于 CP-OFDM 系统。

### 3 结束语

传统 OFDM 系统是利用添加循环前缀(CP)可以很好地消除在多径信道中产生的 ISI,但是因为 CP 占用了系统的频谱资源,从而降低了整个 OFDM 系统的频谱利用率。而 OFDM/OQAM 系统,通过滤波器组来有效地消除在多径信道中引起的 ISI,既节省了 CP,又提高了整个系统的频谱利用率。

OFDM/OQAM 系统与传统 OFDM 系统都可以利用离散傅里叶变换(DFT)来实现,并且要满足各个子载波间的相互正交。在频率间隔相同的条件下,在 OFDM/OQAM 系统中发射信号不需要添加循环前缀,且不必考虑用矩形脉冲来消除干扰,所以它比传统的 OFDM 系统拥有更高的频谱利用率。文中有效地证明了,与传统的 OFDM 系统相比,基于 IOTA 函数的 OFDM/OQAM 系统具有明显的优势。

#### 参考文献:

[1] 陈良明,韩泽耀. OFDM-第四代移动通信的主流技术[J].

(上接第 232 页)

- [2] 郭渊博. ZigBee 技术与应用:CC2430 设计、开发与实践[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [3] Egan D. The emergence of zigbee in building automation and industrial control[J]. Computing & Control Engineering Journal,2005,16(2):14-19.
- [4] 原 羿. 基于 ZigBee 技术的无线网络应用研究[J]. 计算机应用与软件,2004,21(6):89-91.
- [5] 郭 涛,严家明. 基于 CC2430 的 ZigBee 无线数传模块设计[J]. 微机处理,2010(4):105-108.
- [6] Callaway E H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols[M]. New York:Auerbach Publications,2003.
- [7] 社区智能远程健康监护系统设计[EB/OL]. 2010. ht-

计算机技术与发展,2008,18(3):184-187.

- [2] Lele C, Siohan P, Legouable R. 2dB better than CP-OFDM with OFDM/OQAM for preamble based channel estimation [C]//IEEE International Conference on Communications. Beijing, China:[s. n.],2008:1302-1306.
- [3] 沈 嘉,全海洋. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [4] Boleskei H, Duhamel P, Hleiss R. Design of pulse shaping OFDM/OQAM systems for high data-rate transmission over wireless channels[C]//IEEE Int. Conf. on Comm. [s. l.]:[s. n.],1999:559-564.
- [5] Siohan P, Siclet C, Lacaille N. Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory[J]. IEEE Trans. on Signal Processing,2002,50(5):1170-1172.
- [6] Du J, Signell S. Classic OFDM Systems and Pulse Shaping OFDM/OQAM Systems[R]. [s. l.]:[s. n.],2007.
- [7] 李 晶,侯思祖. OFDM 误码率性能分析与研究[J]. 微机计算机信息,2006,22(3-1):261-264.
- [8] 刘晓明,姜荣庆. 降低 OFDM 系统 PAPR 的 PTS 算法研究与 FPGA 实现[J]. 计算机技术与发展,2010,20(11):64-66.
- [9] 秦雅娟,刘元安. OFDM 系统中的高阶调制性能比较[J]. 无线电工程,2004,34(2):1-2.
- [10] Lin Hao, Siohan P, Tanguy P. An analysis of the EIC method for OFDM/OQAM systems[J]. Journal of Communications, 2009,4(1):52-60.
- [11] 胡 苏,武 刚,肖 悦. OFDM/OQAM 系统中联合迭代信道估计和信号检测[J]. 电子与信息学报,2009,10(10):2332-2337.
- [12] Du Jinfeng, Signell S. Comparison of CP-OFDM and OFDM/OQAM in doubly dispersive channels[C]//FGCN-07. Washington, D C:IEEE Computer Society,2007:207-211.
- [13] Lacroix D, Goudard N, Alard M. OFDM with guard interval versus OFDM/OffsetQAM for high data rate UMTS downlink transmission [C]//IEEE VTC '01. Atlantic City, USA:[s. n.],2001:2682-2686.

tp://bbs. eeworld. com. cn/thread-107282-1-1. html.

- [8] 王陈海,吴太虎. 短距离无线通信技术发展及在医疗监护中的应用[J]. 医疗卫生装备,2008,29(1):30-34.
- [9] 结合 ZigBee 和 GPRS 的无线数据传输网络[EB/OL]. 2005. www. 51ZigBee. com.
- [10] 刘礼建,张光明. 基于 ZigBee 无线技术的智能家居管理系统设计[J]. 计算机技术与发展,2011,21(12):250-253.
- [11] Geer D. Survey: embedded linux ahead of the pack[J]. The IEEE Distributed Systems Online,2004,5(10):3-7.
- [12] 刘士兴,孟召晶. 基于嵌入式 Linux 的无线传感器网络汇聚节点[J]. 合肥工业大学学报,2012,35(4):499-502.