

# 交织和BCH编码对蓝牙2.0数据传输性能的提高

牛玉峰, 庄奕琪, 徐 飞

(西安电子科技大学微电子学院 西安 710071)

**【摘要】** 蓝牙2.0+EDR规范新增DH分组没有有效的纠错机制, 其抗干扰能力差。通过在新规范中加入BCH编码和交织编码, 以改善蓝牙的数据传输吞吐量及抗干扰能力。对于新增的数据分组, 根据蓝牙标准协议, 推导了相应的分组特性; 建立了GE信道下数据传输速率与信道突发错误水平的关系模型; 获得了在不同信道突发错误水平下的数据传输吞吐量。结果表明, 在蓝牙2.0+EDR新规范中加入BCH编码和交织编码, 在较高突发错误水平的信道中, 其数据传输吞吐量提高了一倍以上, 明显改善了数据传输的抗干扰能力。

**关键词** BCH编码; 蓝牙; 突发错误; GE信道; 交织编码

中图分类号 TN914

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.011

## Improved Bluetooth 2.0 Data Throughput by Using Interleaving and BCH Codes

NIU Yu-feng, ZHUANG Yi-qi, and XU Fei

(School of Microelectronics, Xidian University Xi'an 710071)

**Abstract** The new DHx packets are adopted in Bluetooth 2.0+EDR specification. Without any error correction coding mechanism, it has poor anti-interference ability in the burst errors channel. To enhance the data transmission throughput and anti-interference ability efficiently, a method by introducing new packets with BCH codes and interleaving to the Bluetooth 2.0+EDR specification is proposed. The packet properties of new packets are deduced based on the packet definition of Bluetooth specification. An analytical model of the throughput in different burst error cases is presented under the Gillbert-Elliott(GE) channel, the throughput of different packets in different burst error cases are obtained. The simulation result shows that adding new packets with BCH codes and interleaving to Bluetooth 2.0+EDR specification can improve the anti-interference ability and the data transmission throughput increases more than 100% in the higher burst errors channel.

**Key words** BCH codes; Bluetooth; burst errors; Gillbert-Elliott channel; interleaving

蓝牙特别兴趣小组(SIG)发布了新的蓝牙核心规范<sup>[1]</sup>——Version2.0+EDR(增强数据速率), 提高了蓝牙的数据传输速率并降低了功耗。蓝牙2.0+EDR新规范增加了6种新的异步无连接(asynchronous connectionless link, ACL)分组格式, 新增的分组格式均提供了循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)机制, 但是, 并没有提供载荷的前向纠错(forward error correction, CRC)机制。在信道状态不佳的情况下, 新增数据分组载荷中的任何一位出现错误都会导致接收失败, 从而要求重传, 降低了系统的吞吐量。另外, 在实际的无线信道中, 其错误有时是突发性的, 会出现连续的多位错误。所以, 有必要采用一定的纠错编解码机制, 使接收端译码器不仅能够纠正一些随机错误, 而且能够纠正一些突发错误, 增强数据传输的抗干扰能力, 提高数据

传输吞吐量。

文献[2]研究了针对不同无线链路质量, 选择不同的数据分组提高蓝牙数据传输的吞吐量。文献[3]研究了加性高斯白噪声(additional white Gaussian noise, AWGN)与瑞利(Rayleigh)准静态衰落信道下分组重传概率与蓝牙链路吞吐量之间的关系。文献[4]研究了不同蓝牙数据分组的传输性能。文献[5]研究了不同载荷长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响。但是, 目前对突发错误信道下蓝牙的数据传输吞吐量的研究还较少。针对蓝牙2.0+EDR新规范中ACL分组只有DH数据分组格式的情况, 本文提出了在新规范ACL分组中加入具有BCH编码和交织编码机制的I-BCH(2I-BCH和3I-BCH)数据分组格式(以下对仅有BCH编码的数据分组称为BCH分组, 对同时采用BCH和交织编码的分组称为I-BCH分组), 以增强蓝牙

收稿日期: 2008-08-29; 修回日期: 2009-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(60276028)

作者简介: 牛玉峰(1976-), 男, 博士生, 主要从事短距离无线通信系统芯片设计方面的研究。

的抗突发错误的能力, 增加蓝牙在受干扰信道下数据传输吞吐量; 针对突发性错误的蓝牙无线信道, 利用Gillbert-Elliott信道模型, 推导出I-BCH数据分组在不同错误突发水平时蓝牙的数据传输性能, 并且给出了实验仿真的结果。

### 1 采用交织编码和BCH编码的数据分组特性

蓝牙1.2协议中, ACL链路总共定义了7种数据分组格式<sup>[6]</sup>。DH类型分组的载荷不受任何纠错编码机制保护, 而DM类型分组的载荷由于采用了2/3比例的FEC纠错编码机制, 所以在有干扰的信道条件下, 能够改善蓝牙数据传输的性能。类似DM分组类型, 在蓝牙2.0+EDR规范中增加BCH编码和交织编码的新分组也采用2/3比例前向纠错机制。

BCH码是一类重要的循环码, 能纠正多个随机错误, 由于它具有纠错能力强、构造方便、编码简单、译码也较易实现等一系列优点而被广泛采用。关于 BCH 码的生成多项式已编写成相应的表, 在工程使用中只需查阅即可。根据查表可知与(15,10)汉明码编码效率较接近的为本原BCH 码(63,39), 可纠正4个错误。

交织编码是一种很实用而且常用的构造码的方法, 它能把比较长的突发错误或多个突发错误离散成随机错误, 然后再用纠正随机错误的码纠错, 则能取得明显的纠错效果<sup>[7]</sup>。I-BCH数据分组将交织编码和BCH编码结合起来, 在蓝牙的发射端将数据用BCH编码后再交织, 在接收端将接收到的数据解交织后再BCH解码, 大大增强了蓝牙抗干扰的能力。在蓝牙I-BCH数据分组模式中, 一个长度为 $n$ 的数据分组, 分为63个编码块, 每一个编码块的长度为 $n/63$ 位, 先将每一块的第一位数据利用BCH编码为一个编码字, 再对每一块的第二位数据利用BCH编码为另一个编码字, 依此类推, 总共有 $n/63$ 个BCH编码字。I-BCH数据分组继承了BCH数据分组的4位纠错能力, 且由于其每个编码字中的63个数据位不连续, 在突发错误信道中I-BCH数据分组的鲁棒性优于BCH数据分组。

采用交织和BCH编码的新分组, 经过编码以后的最大数据包的长度与对应的DH分组的数据包长度是一样的, 根据2-DH、3-DH数据分组特性, 可以推导出所有增加的2I-BCH、3I-BCH数据分组的分组特性, 如表1所示。

表1 蓝牙2.0+EDR规范加入的BCH分组特性

类型	用户载荷 /byte·s <sup>-1</sup>	FEC	CRC	非对称最大速率 /kb·s <sup>-1</sup>	
				前向	反向
2I-BCH1	0-35	2/3	有	224	224
2I-BCH3	0-244	2/3	有	780.8	112
2I-BCH5	0-452	2/3	有	968.3	74.7
3I-BCH1	0-54	2/3	有	345.6	345.6
3I-BCH3	0-367	2/3	有	1174.4	172.8
3I-BCH5	0-680	2/3	有	1450.7	115.2

### 2 Gillbert-Elliott无线信道模型中的编码字(codeword)错误概率

Gillbert-Elliott信道是一阶、离散时间、静态马尔可夫链, 具有Good和Bad两个状态。如图1所示, 其中 $P_{gb}$ 为信道从Good状态转变到Bad状态的概率;  $P_{bg}$ 为信道从Bad状态转变到Good状态的概率;  $P_{bb}$ 和 $P_{gg}$ 分别表示信道保持在Bad状态和Good状态的概率,  $P_{gb}+P_{gg}=1$ ,  $P_{bb}+P_{bg}=1$ ,  $P_{bb}$ 反映了信道的突发错误水平。GE信道状态的改变速度依赖于 $P_{gb}$ 和 $P_{bg}$ ,  $P_{gb}$ 和 $P_{bg}$ 越大, 则信道状态改变越快。显然, 信道的平均位错率(BER) $P_b=P_{gb}/(P_{bg}+P_{gb})$ <sup>[8]</sup>, 而 $P_g=P_{bg}/(P_{bg}+P_{gb})$ 。

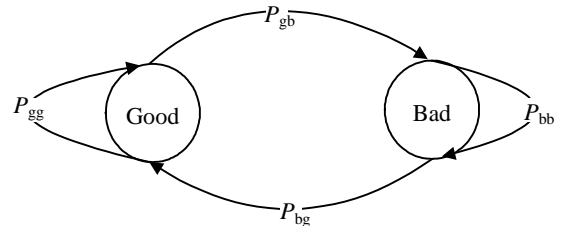


图1 Gillbert-Elliott信道模型

对长度为 $n$ , 可以纠正 $t$ 个随机错误的编码字 $[n,t]$ , 在连续的 $n$ 个状态中有 $d$ 个错误的概率为<sup>[9]</sup>:

$$P_n(d) = \begin{cases} P_g(1 - P_{gb})^{n-1} & d = 0 \\ P_g(P_n(d | GG) + P_n(d | GB)) + P_b(P_n(d | BG) + P_n(d | BB)) & 1 \leq d < n \\ P_b(1 - P_{bg})^{n-1} & d = n \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_n(d | GG) = \sum_{i=2}^{\min(d+1, n-d)} \binom{n-d-1}{i-1} \binom{d-1}{i-2} \times (1 - P_{gb})^{n-d-i} P_{gb}^{i-1} (1 - P_{bg})^{d-i+1} P_{bg}^{i-1} \quad (2)$$

$$P_n(d | GB) = \sum_{i=1}^{\min(d, n-d)} \binom{n-d-1}{i-1} \binom{d-1}{i-1} \times (1 - P_{gb})^{n-d-i} P_{gb}^i (1 - P_{bg})^{d-i} P_{bg}^{i-1} \quad (3)$$

$$P_n(d | BG) = \sum_{i=1}^{\min(d, n-d)} \binom{n-d-1}{i-1} \binom{d-1}{i-1} \times (1 - P_{gb})^{n-d-i} P_{gb}^{i-1} (1 - P_{bg})^{d-i} P_{bg}^i \quad (4)$$

$$P_n(d|BB) = \sum_{i=2}^{\min(d, n-d+1)} \binom{n-d-1}{i-2} \binom{d-1}{i-1} \times (1-P_{gb})^{n-d-i+1} P_{gb}^{i-1} (1-P_{bg})^{d-i} P_{bg}^{i-1} \quad (5)$$

此处的 $P_n(d/GG)$ 是指在信道的初始和结束状态均为

$$P_{cw} = \sum_{d=0}^n P_n(d) \left[ \sum_{e_b=0}^d \binom{d}{e_b} P_e(B)^{e_b} (1-P_e(B))^{d-e_b} \sum_{e_g=\max(0, t+1-e_b)}^{n-d} \binom{n-d}{e_g} P_e(G)^{e_g} (1-P_e(G))^{n-d-e_g} \right] \quad (6)$$

式中  $P_e(B)$ 和 $P_e(G)$ 分别为信道处于Bad态和Good态时的误码率, 显然 $P_e(B) \gg P_e(G)$ 。当采用交织深度为 $m$ 的交织编码时, 其信道状态转换概率为:

$$P'_{gb} = P_{gb} (1 - (1 - P_{gb} - P_{bg})^m) / (P_{gb} + P_{bg}) \quad (7)$$

$$P'_{bg} = P_{bg} (1 - (1 - P_{gb} - P_{bg})^m) / (P_{gb} + P_{bg}) \quad (8)$$

将 $P'_{gb}$ 和 $P'_{bg}$ 分别替换式(1)中的 $P_{gb}$ 和 $P_{bg}$ , 即可得到采用交织深度为 $m$ 的 $[n, t]$ 编码字的误码率。

### 3 蓝牙数据分组重传概率分析

本文在分析蓝牙2.0+EDR新规范中增加BCH数据分组格式和I-BCH分组格式对蓝牙数据传输抗干扰性能的改善时, 探讨的是一对主从蓝牙设备链接的情况, 分析主对从单向的最大数据传输速率, 即只有主设备向从设备发送数据, 从设备只返回确认信息, 若某分组发送后没有收到发送成功的确认信息(ACK), 则ARQ机制将重复发送该分组, 直到发送成功为止。分析假设在一个数据分组发送过程中信道的状态变化概率和在不同状态下的误码率是恒定值, 并且CRC校验总是能够检测出数据载荷传送过程中出现的错误。

如果知道了数据的编码错误概率, 就可以求出数据分组重传概率。当出现以下5种情况之一便会引起分组重传<sup>[10]</sup>。

- (1) 事件A: 发送分组的接入码同步错误。
- (2) 事件B: 发送分组的分组头经1/3比例FEC校验错误。
- (3) 事件C: 发送分组载荷经过CRC校验错误。
- (4) 事件D: 返回分组接入码同步错误。
- (5) 事件E: 返回分组的分组头错误。

数据分组的重传概率分析表达式为:

$$P = 1 - (1 - P[A])(1 - P[B]) \times (1 - P[C])(1 - P[D])(1 - P[E]) \quad (9)$$

在GE信道中, 对接入码来说, 其误码率相当于 $n=72$ ,  $t=72-T$ 的编码字错误率(在此 $T$ 取值为65), 记为 $P_{cw}(AC)$ 。由于返回分组也同样使用72位的接入

Good时,  $n$ 个连续的瞬间状态中有 $d$ 个瞬态处于Bad状态的条件概率, 其他的 $P_n(d/GB)$ 、 $P_n(d/BG)$ 、 $P_n(d/BB)$ 的定义均参照 $P_n(d/GG)$ 的定义, 则 $[n, t]$ 编码字的错误概率为:

码, 所以事件 $D$ 有和事件 $A$ 类似的概率。

前向分组头经1/3比例FEC检测错误导致事件 $B$ 和 $E$ 发生, (3,1)编码可以纠正一个错误, 因此:

$$P[B] = 1 - (1 - P_{cw}(HE))^{18} \quad (10)$$

$P_{cw}(HE)$ 为 $n=3$ ,  $t=1$ 时的GE信道模型中的编码字错误概率。对于 $P[E]$ 也有同样的表达式。

事件 $C$ 最容易发生。由于假设CRC解码可以检测出所有错误, BCH类型分组的载荷受(63,39)汉明码保护, 可纠正4位错误, 所以在GE信道中其误码率为当 $n=63$ ,  $t=4$ ,  $m=1$ 时的编码字错误概率, 记为 $P_{cw}(BCH)$ , 则有:

$$P[C] = 1 - (1 - P_{cw}(BCH))^{N_c} \quad (11)$$

式中  $N_c$ 为BCH数据包的编码块数量。

对于经过交织编码的BCH分组(即I-BCH分组), 其编码字错误概率 $P_{cw}(I-BCH)$ 和 $P_{cw}(BCH)$ 的区别在于交织深度 $m=N_c$ , 并且I-BCH分组和BCH分组的 $N_c$ 一样, 则有:

$$P[C] = 1 - (1 - P_{cw}(I-BCH))^{N_c} \quad (12)$$

对于DH分组类型, 由于其没有纠错能力, 只要载荷的任何一位发生错误即可导致事件 $C$ 发生, 所以GE信道的编码错误率和BCH分组的区别仅仅在于其纠错数 $t=0$ 。

### 4 增加BCH和I-BCH分组蓝牙数据吞吐量分析

对于任何类型的分组, 平均吞吐量 $R$ 为平均重传次数 $\bar{N}$ 的函数<sup>[11]</sup>:

$$R = \frac{\text{净荷长度}}{\text{分组传输时间}} = \frac{K}{D\bar{N}625 \times 10^{-6}} = \frac{K(1-\bar{P})}{0.000625D} \quad (13)$$

式中  $D$ 为包括返回分组的每次传输所占用的时隙数;  $K$ 为分组中数据位的大小。

在GE信道中, 蓝牙数据传输吞吐量是信道状态变化概率的函数, 要分析计算平均吞吐量 $R$ 的值, 必须求出平均 $\bar{P}$ 的值。在此考察的是不同的信道状态变化概率时的蓝牙数据传输吞吐量, 其瞬时信道变

化概率等于平均信道变化概率, 而且有  $\bar{P} = P$ 。为了仿真计算的方便, 本文令  $P_e(B)=1.0$ ,  $P_e(G)=0.005$ , 令  $P_{gb}$  分别为0.000 5和0.005, 改变  $P_{bb}$  使信道处于不同的突发错误水平, 得到不同蓝牙数据分组的数据传输吞吐量。

在  $P_{gb} = 0.005$  时, 蓝牙2DH、2BCH和2I-BCH分组数据传输吞吐量与信道状态变化概率的关系如图2所示。在  $P_{gb}$  为0.000 5或0.005时, 蓝牙3DH、3BCH和3I-BCH分组数据传输吞吐量与信道状态变化概率的关系分别如图3和图4所示。

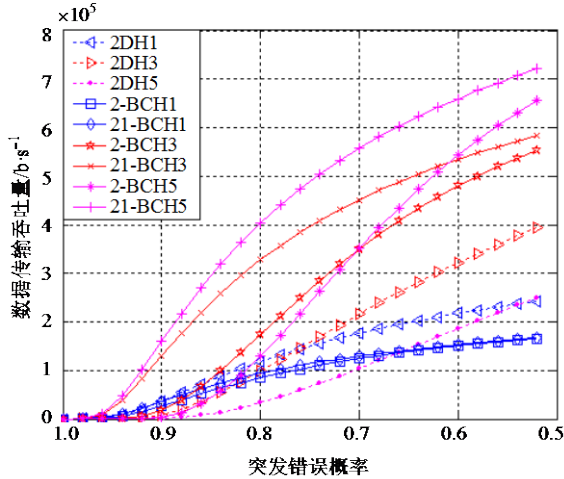


图2 2DH、2BCH、2I-BCH分组数据传输速率( $P_{gb}=0.005$ )

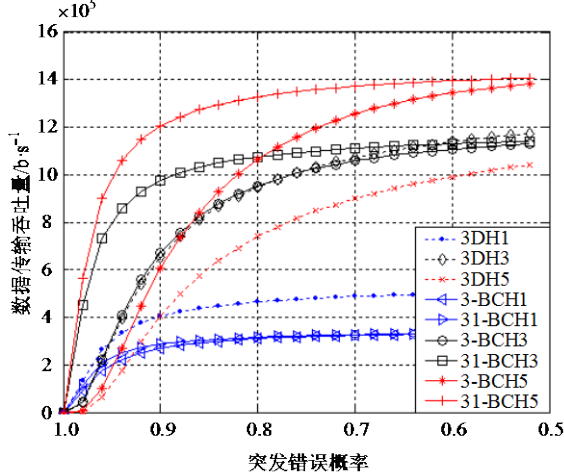


图3 3DH、3BCH、3I-BCH分组数据传输速率( $P_{gb}=0.000 5$ )

从图2和图4可以看出, 当信道状态变差时( $P_{gb}=0.005$ ), 无论是5时隙还是3时隙的数据分组, 其传输速率比较关系都是I-BCH>BCH>DH, 而且随着突发错误水平的增加, 其数据传输速率成倍地提高。因此该情况下引入交织编码和BCH编码对蓝牙数据传输吞吐量的改善也最显著。从图3可以明显地看出, 5时隙的I-BCH和BCH分组的传输速率都明显高于原有的DH分组。而对于3时隙分组, 3I-BCH3分组

的传输速率大于3DH3; 而BCH分组和DH分组的数据传输速率差别不大。这是因为在信道质量较好( $P_{gb}=0.000 5$ )时, 数据分组最长的5时隙受到的干扰最大, 对没有任何纠错能力的DH分组的传输速率影响也最大, 此时采用加入交织和BCH编码的办法可以起到明显的纠错效果。对于3时隙分组, 只有在突发错误较多时, 新加的纠错编码机制才起到明显的效果。值得注意的是, 随着突发错误的降低(即  $P_{bb}$  降低时), 所有分组的数据传输吞吐量均变大, 所以干扰较小时引入交织编码和BCH编码的作用不大。基于上述讨论, 在干扰较强、信道中突发错误较多时, 增加交织编码和BCH编码, 可以明显改善蓝牙数据传输能力, 弥补蓝牙2.0+EDR原有DH分组没有纠错能力的缺陷。

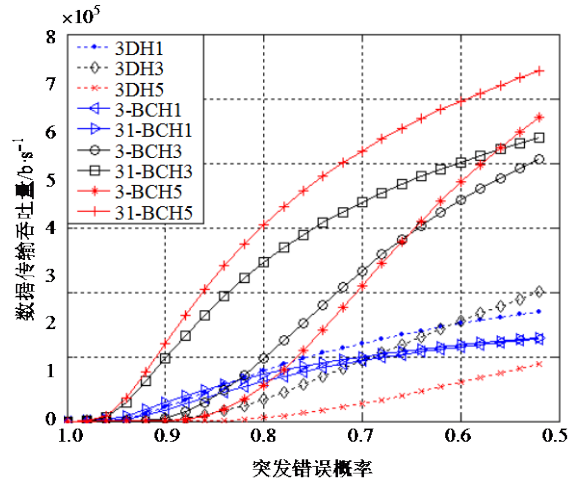


图4 3DH、3BCH、3I-BCH分组数据传输速率( $P_{gb}=0.005$ )

### 5 结论

本文以GE信道为信道模型, 提出了在蓝牙2.0+EDR新规范中加入BCH编码和交织编码, 以提高蓝牙在突发错误信道中数据传输的抗干扰能力和数据传输能力; 推导出了新增数据分组的分组特性; 分析了蓝牙在GE信道中编码字的错误概率, 进而求出原有的2-DH、3-DH数据分组形式以及新增的2-BCH、3-BCH、2I-BCH和3I-BCH数据分组形式在不同突发错误水平下的数据传输速率。仿真结果表明, 在蓝牙2.0+EDR新规范中加入BCH编码和交织编码, 能够有效地改善蓝牙的抗干扰性能, 提高蓝牙在突发错误信道中的数据传输吞吐量。

### 参 考 文 献

[1] BLUETOOTH SIG. Specification of the Bluetooth system, version 2.0+EDR[S/OL]. [2007-05-18]. <http://www.>

- bluetooth.com.
- [2] CHEN L JYH, KAPOOR R, SANADIDI M Y, et al. Enhancing Bluetooth TCP throughput via link layer packet adaptation[C]//2004 IEEE International Conference on Communications. Paris, France: IEEE Press, 2004: 4012-4016.
- [3] MATTHEW C. On the throughput of Bluetooth data transmissions[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, Florida: IEEE, 2002: 119-123.
- [4] 杨帆, 王珂, 钱志鸿. 蓝牙分组传输性能分析与自适应分组选择策略[J]. 通信学报, 2005, 26(9): 97-102.  
YANG Fan, WANG Ke, QIAN Zhi-hong. Performance analysis of Bluetooth packet transmission and adaptive packet selection strategy[J]. Journal on Communications, 2005, 26(9): 97-102.
- [5] 徐飞, 庄奕琪, 郭锋. 载荷长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 39-42.  
XU Fei, ZHUANG Yi-qi, GUO Feng. Payload length effect on Bluetooth data transmission throughput[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 39-42.
- [6] BLUETOOTH SIG. Specification of the Bluetooth system, version 1.2[S/OL]. [2007-06-06]. <http://www.bluetooth.com>
- [7] CAI J, CHEN CW. FEC-based video streaming over packet loss networks with pre-interleaving[C]//International Conference on Information Technology: Coding and Computing. Las Vegas: IEEE Computer Society, 2001: 10-14.
- [8] ZORZI M, RAO R. On the statistics of Block errors in bursty channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(6): 660-667.
- [9] LEIF W, LAURENCE B. M. On the effect of imperfect interleaving for the Gilbert-Elliott channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(5): 681-688.
- [10] KLEINSCHMIDT J H, PELLENZ M E, JAMHOUR E. Bluetooth network performance in Nakagami-m fading channels[C]//Proceedings of International Symposium on Computers and Communications. USA: IEEE, 2004: 639-644.
- [11] MATTHEW C. On the throughput of Bluetooth data transmissions[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Orlando: IEEE, 2002: 119-123.

编辑 张俊

(上接第199页)

- [6] MIYAMOTO T, NOGUCHI S, YAMASHITA H. Selection of an optimal solution for multiobjective electromagnetic apparatus desing based on game theory[J]. IEEE Trans On Magnetics, 2008, 44(6): 1026-1029.
- [7] SIMON M K, OMURA J K, SCHOLTZ R A, et al. Spread spectrum communications handbook[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 2002.
- [8] LUIS F, ANTONIO P, GARETH P. Evaluating distributed time-varying generation through a multiobjective index[J]. IEEE Trans on Power delivery, 2008, 23(2):1132-1138.
- [9] MIGUEL D, MANUEL P, MARIA C. Multiobjective hybrid optimization and training of recurrent neural networks[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2008, 38(2): 381-403.
- [10] 李秀红. 基于灰色关联度的多目标决策模型与应用[J]. 山东大学学报, 2007, 42(12): 33-36.  
Li Xiu-hong. A model based on the grey relation grade for multi-objective decision-making and its application[J]. Journal of Shandong University, 2007, 42(12): 33-36.
- [11] MOMOH J, JIZHONG Z. Optimal generation scheduling based on AHP/ANP[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2003, 33(3): 531-535.
- [12] MINGHAI J, JIAFU T, JINPENG X. Evaluation of supplier reliability based on the association rule and AHP method[C]//Control and Decision Conference. Yantai, China: Northeastern University Press, 2008: 2266-2270.
- [13] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
XU Zhe-sui. Uncertain multiple attribute decision making methods and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [14] LING Qi, LI Tong-tong. Modeling and detection of hostile jamming in spread spectrum systems[C]//IEEE Signal Processing Society SAFE 2007: Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics. Washington: IEEE Press, 2007: 1-5.

编辑 张俊