

文章编号:1007-2780(2019)09-0928-07

基于正交频分复用技术的低压电力线通信系统模型

曹 婷*, 陈华敏

(南阳理工学院 电子与电气工程学院, 河南 南阳 473000)

摘要:针对目前低压电力线通信技术的传输复杂性及外部噪声失真等问题,本文基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制技术模型,建立了低压电力线信道的通信传输模型,并在 MATLAB 软件中仿真研究了低压电力线通信系统的传输特性及抗噪声效果。研究表明,OFDM 技术能够有效提升低压电力线通信系统的传输性能,并显著降低通信系统的噪声影响。该技术具有较好的市场应用前景及竞争力。

关键词:低压电力线;正交频分复用调制技术;通信传输;抗噪声

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193409.0928

Low voltage power line communication system model based on orthogonal frequency division multiplexing technology

CAO Ting*, CHEN Hua-min

(*Department of Electronics and Electrical Engineering,
Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China*)

Abstract: Aiming at the problems of transmission complexity and external noise distortion of low-voltage power line communication technology, based on the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation technology model, the transmission model of low-voltage power line channel is established. The low-voltage power line communication system is simulated and studied in MATLAB software. The results show that OFDM can effectively improve the performance of low-voltage power line communication system and significantly reduce the noise impact of communication system. The technology has good market application prospects and competitiveness.

Key words: low-voltage power line; orthogonal frequency division multiplexing modulation technology; communication transmission; anti-noise

收稿日期:2019-03-23;修订日期:2019-07-13.

基金项目:南阳理工学院转型发展本科专业核心课程改革专项研究(No.HXKC2016030, No.HXKC2016033)

Supported by Special Study on the Reform of Core Courses of Undergraduate Majors in Transitional Development(No.HXKC2016030, No.HXKC2016033)

* 通信联系人, E-mail: krr1hz@163.com

1 引言

OFDM 技术是目前国际上最具吸引力的宽带快速 PLT 技术,其使用 FFT 和 IFFT 进行调制和解调,能够更便捷地实现 DSP(数字信号处理)设备的保护间隔以及码间干扰,可有效降低信道的噪声,后期有望成为 PLT 的标准^[1]。

自 1997 年以来,国际高速电力线(PLT)通信被视为能解决“最后”的高速公路信息问题^[2]。与电力线载波传统(PLC)相比,PLT 在传输速度方面更具有优势,能达到兆比特/秒,而 PLC 传统上只有千比特/秒的速度。由于电力传输线和频带规定的特性限制^[3],目前应用于 PLT 的调制技术主要有 3 类,分别是单载波类、部署频谱类和 OFDM 调制技术(复用频率正交划分)^[4]。

电源线上的噪声来自各种电器,且并非加性高斯白噪声,其特点是在很短的时间内发生变化产生噪声,包括:50 Hz(或 60 Hz)相关的谐波噪声^[5]。另外,未连接到主电源的设备产生的部分噪声也来自于电力线中的射频耦合。目前的 PLT 信道主要由 5 个部分构成,第一部分是不同颜色为背景的噪声,第二部分是带宽较窄的窄带噪声,第三部分为常用的脉冲噪声,第四部分为具有周期性的周期脉冲噪声,最后一个部分为异步的脉冲噪声^[6]。

电力线中电源噪音具有时域和频率混合的特性^[7],在具体的试验测试中,平均噪声水平比最大噪声水平低约 20~30 dB,具备通信的基本要求^[8]。本文将基于 OFDM 调制技术的低功耗通信系统模型引入 500 kHz~20 MHz 频段,建立低压电力线信道,利用 Milton 噪声模型模拟噪声信道噪声,在 MATLAB 软件环境中实现低带宽仿真的全仿真,研究系统的抗噪声效果。

2 低压电力线通信模型

与其他电缆通道相比,电力线通道阻抗不能传递到收发器,可调节的幅度控制信号很难发送。并且,诸如无线信道之类的流线具有多径反射,会导致选择性衰落,且 ISI 效应随接入接触的时间和位置而变化,通信模型如图 1 所示,模拟参数如表 1 所示。

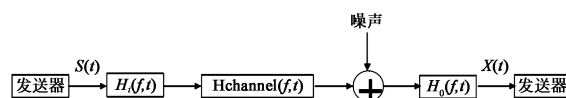


Fig.1 Model of low power line communication system

表 1 OFDM 试验测试结果数据

Tab.1 Data of OFDM test results

载波 频率/MHz	发送 信号/dB	接收 信号/dB	衰减 信号/dB
3	5	-2.3	4.3
5	5	-3.2	6.5
6	5	-3.4	7.6
7	5	-2.6	8.5
8	5	-4.3	6.5
9	5	-3.6	6.3
10	5	-3.2	5.6

高压信道的传输环境非常苛刻,其中大多数所需的频带衰减是可接受的,但是零电平是接近 80 dB 的低值^[9],难以应用在全频率通信模型中。尤其是在电力线传输模型中,如果阻抗水平极低,原始信号将不能恢复,处于短路状态。

3 低压电力线信号传输模型

低压线路通信的中间通信系统与其他传统通信介质不同,低压线路通信受多径效应影响,频率会出现选择性衰减,并受到噪声和其他因素的影响。

3.1 低压线路信号传输函数模型

基于 ABCD 矩阵建模方法分析低压线路信道传输功能模型,该方法能分析离线条件下各帧的原始基本传输特性,然后根据具体拓扑结构进行组合,可以通过高精度的数学运算获得传递函数模型参数,不需要复杂的线性识别,如黑盒模型参数。

在大多数的实际应用中,多数电动工具为单相或多相,因此,电力线模型的建立通常基于多导体传输线(MTL)理论^[10]。而根据 TL 理论,任何统一 TL 都可以成为双端口网络(2PN),由传输矩阵 T 表示,又称为 ABCD 矩阵。双端口网络结构

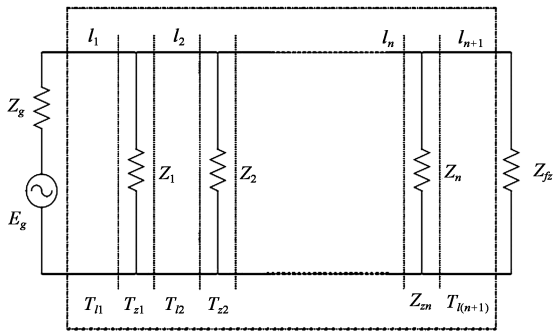


图 2 传输网络通讯模型

Fig.2 Model of transport network communication

如图 2 所示。

当长度为 0 或长度为 1 的序列出现在数字信号序列中时,很容易丢失信号并导致错误的代码出现。为了减少数据的冗余性、增加信号的抗噪声及干扰性能^[11]。基于公式(1),将线性移位寄存器生成白化系列,实现过程如图 3 所示。

$$S(x) = x^{10} + x^3 + 1.$$
 (1)

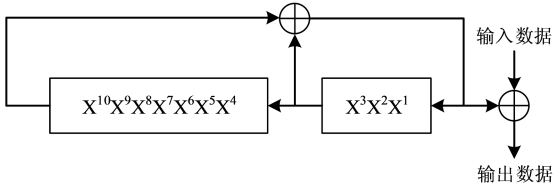


图 3 数据白化实现过程

Fig.3 Data whitening implementation process

3.2 Turbo 编码器

Turbo 编码器结构如图 4 所示。

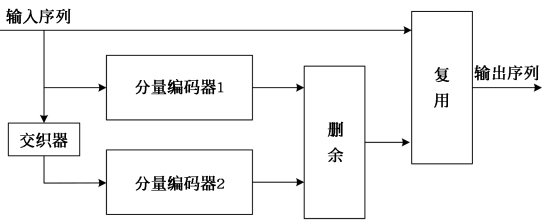


图 4 Turbo 编码器的组成

Fig.4 Composition of Turbo encoder

本文的 Turbo 编码采用二次反复结构,将第一次反复结束相对应的结束状态作为第二次反复的初始状态,再输入第二次反复编码的数据。这些数据是第 2 次重复编码输入数据,在第二次重复结束之前,输入第 2 次重复编码数据。可以直接进行第 2 次重复,然后再输入第 2 次重复编码

数据。

3.2.1 分量编码器模块

BMQ1 和 BMQ2 号编码结构如图 5,数据流量的前两部分在 U_1 和 U_2 ,并编成两个字母。在一种编码中,每对比特对应于输出奇偶校验比特。

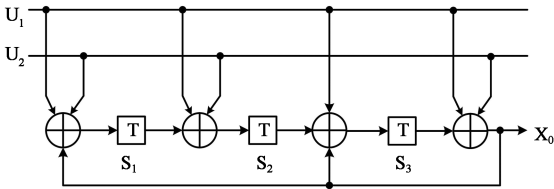


图 5 分量编码器架构

Fig.5 Component encoder architecture

具体的处理步骤为:

第 1 步:启动状态的调节,具有特定的启动状态参数 $R_0 = [R_{01}, R_{02}, R_{03}] = [0, 0, 0]$;

第 2 步:按顺序分列的数据地点数据, $RN = [R_{N1}, R_{N2}, R_{N3}]$;

第 3 步:令 $R_0 = RN \times M$, M 矩阵定义如下:物理块字节数为 520 和 16 时:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (2)

物理块字节数为 136 时:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$
 (3)

第 4 步:输入信息比特被重新发送到分量编码器,通过第三步骤计算初始状态 R_0' ,在一次编码之后,可以输出编码的奇偶校验比特。

3.3 Turbo 交织模块

原始数据在通过 Turbo 编码器之后传递给编码器 2。每两个比特都是一组用于截取的数据,不同的截面模式参数也不相同。表 2 列出了具体中断的参数,包括 3 种情况。

表 2 Turbo 交织的参数

Tab.2 Turbo interleaving parameters

物理块字节数	N 值	M 值	双比特交织长度 L
16	8	8	64
136	34	16	544
520	40	52	2 080

Turbo 交织的数学模型公式:

$$A(x) = \text{mod}((S(\text{mod}(x, N) + 1) - (fix((x)/N)) \times N + L), L), \quad (4)$$

式中: $S(\cdot)$ 是一个搜索表, 该表可以存储在 FCPGA 中的 ROM 中; 与 FCPGA 一起执行读取操作。

多样性复制技术用于帧控制字符, 对频率选择性衰落信道具有良好的效果。由于帧控制信息包括如调制信息、复制时间和有效载荷数据编码等的重要信息, 所以多样性复制技术可以提高传输的可靠性。

3.4 ROBO 交织

本文的 ROBO 交织模式由循环移位参数、反转变量值、所需的拷贝数和数据调制模式决定。为避免在同一子频道上发送相同的数据信息, 以前的 ROBO 交织模式选择循环移位, 为了规避参数不变, 性能差的缺点, 采取有效载荷数据的反向通道, 提高系统的稳定性。图 6 所示为 ROBO 交织原理图。

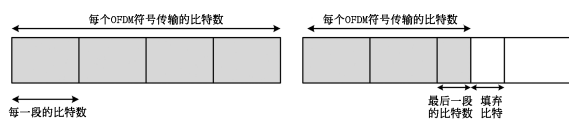


图 6 ROBO 交织原理

Fig.6 Principle diagram of ROBO interleaving

基于 ROBO 交织方式, 选择数据信道的类型, 根据复合信号类型进行 OFDM 调制。如果子载波未满载, 则需要填充最后一个 OFDM 符号, 具体流程如图 7 所示。

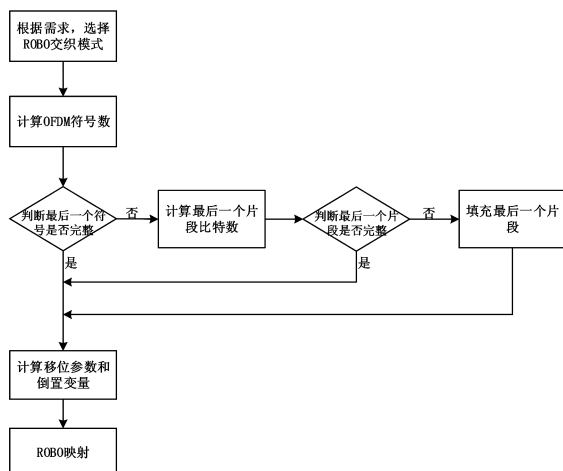


图 7 ROBO 交织流程图

Fig. Flow chart of ROBO interleaving

4 仿真分析

MATLAB 是一种科学的计算机语言, 具有数值计算、符号处理和图形处理功能, 可以直接处理矩阵或数组, 编程效率较高。Simulink 是 MATLAB 提供的工具包, 可用于建模、仿真和动态系统分析, 并且能提供用于显示输出信号的模块, 因此可以在模拟过程中随时观察模拟结果。

4.1 噪声特性分析

奈奎斯特滤波器使用单载波系统的带宽, 很少超过 80%, 而 OFDM 可以实现几乎 100% 的频谱效率。并且该性质也可以从时域得到证明。OFDM 子载波是独立且非相关的, 它们是指数增加, 而时域中的复合信号非常接近白噪声。

表 3 信道长度及载频

Tab.3 Channel length and carrier frequency

参数	数值
信道长度	200 m
载频(f)	500 kHz ~ 20 MHz

4.1.1 信号误比特率

Bernoulli 二进制信号发生器: 随机产生 0.1 个信号, 发生概率为 50%, 并指定二进制信号发生器产生帧格式的输出序列。FFT 和 IFFT 均为 64 点, 由 Unbuffer 模块实现, 转换信号的实数和虚数存储在 Goto 模块中, 示波器用于绘制图形。

如图 8 所示, 估计模块首先估计比较先驱传

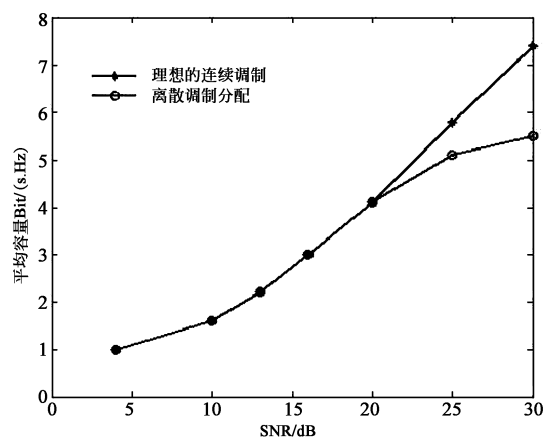


图 8 传输信号的误比特率

Fig.8 Bit error rate of transmission signal

输之前和之后的幅度和相位变化,接收信道响应,并获取信道反应响应,再将接收到的信号相乘以进行估计。

4.1.2 信号误码率

从图 9 中可以看到,OFDM 通过打开或关闭子载波来重新分配子信道,因此数据只被发送到对应的频率谱,维持适当的位误码率。

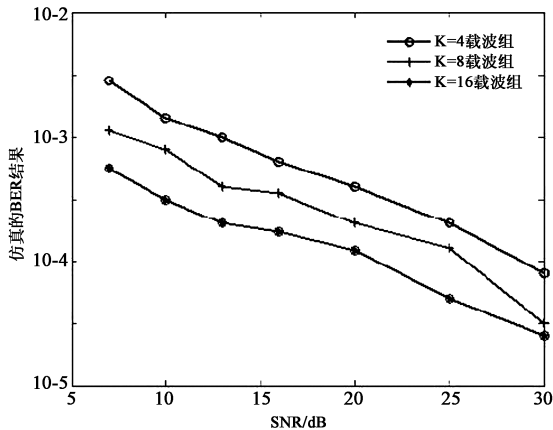


图 9 传输信号的误码率

Fig.9 Error rate of transmitted signal

4.2 信道传输特性分析

使用 Simulink 仿真模拟作为构建 OFDM 系统仿真模型的平台,同时转换并行模块到串联,进行信道估计及信道衰减补偿,其中信道衰减如图 10 所示。

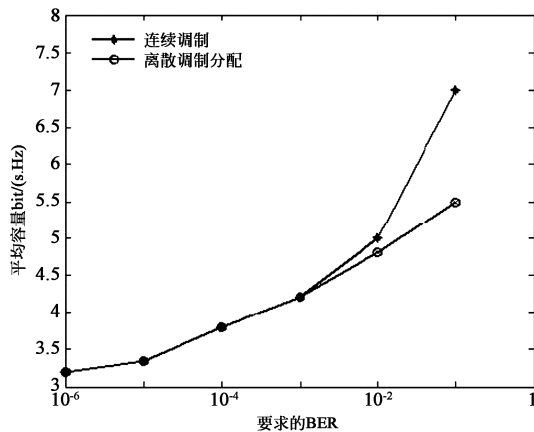


图 10 低压电力线的信道衰减

Fig.10 Attenuation curves of low power line channel

图 10 可以看出由电容和电感等因素引起的清晰的频率衰减。当支路负载恒定时,通道的弱点是电源线。当馈线长度增加到 10 m 时,30 Ω

支路负载的信道衰减大于 50 Ω 支路负载的信道衰减。当负载差异较大时,通道的下降增加,支路增加。另外根据计算,分支特征的阻抗约为 73 Ω 。

将已上参数代入通信系统模型中,并对比无 OFDM 技术以及带 OFDM 的信息载波通过率,见图 11 和图 12,其中噪声分类器参数为 $\tau = 0.01$ 和 $A = 1$ 。

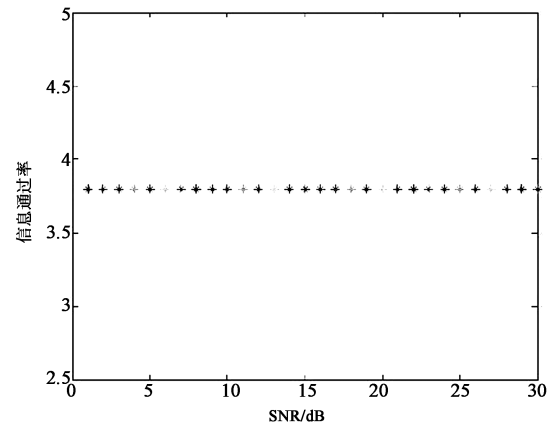


图 11 无 OFDM 技术的系统误比特率分析

Fig.11 System bit error rate analysis without OFDM technology

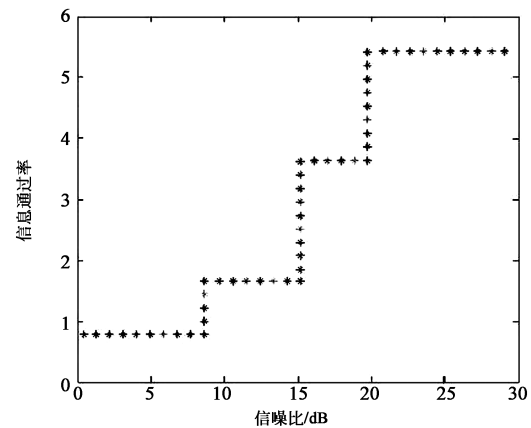


图 12 带 OFDM 技术的系统误比特率分析

Fig.12 System bit error rate analysis with OFDM technology

从图 11 和图 12 中的结果可以发现,相比无 OFDM 技术的信息载波通过率,带 OFDM 技术的信息载波通过率随信噪比的提升而提升。在穿过瑞利多径信道和附加的高斯白信道时,信号具有特定的衰减,这与实际情况较为一致,系统的信

号传输特性能较为真实地反映系统的结构。

5 结 论

OFDM 系统的显著优势之一是其强大的抗干扰性,因此它们主要用于无线移动通信领域、成熟的第三代移动通信技术和市场营销以及第四代移

动通信的研究和实验阶段。本文基于 OFDM 系统的基本模型,给出了基于 MATLAB 仿真平台的 OFDM 仿真系统,详细介绍了一部分主要的模块功能、模块参数设置和误码性能。研究结果表明,OFDM 技术能够有效提升低压电力线通信系统的传输性能,并显著降低通信系统的噪声影响,该技术具有较好的应用前景和竞争力。

参 考 文 献:

- [1] ZHAO X W, ZHANG H, LU W B, *et al.* Approach for modelling of broadband low-voltage PLC channels using graph theory [J]. *IET Communications*, 2018, 12(13): 1524-1530.
- [2] 胡旭东,张成文,刘玉涛,等.面向 OFDM 系统的高精度窄带干扰抑制算法[J].西安交通大学学报,2019,73(8):1-8.
HU X D, ZHANG C W, LIU Y T, *et al.* High precision narrowband interference suppression algorithm for OFDM systems [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 73(8): 1-8. (in Chinese)
- [3] 费洪涛,何雪云,梁彦.基于自适应压缩感知的 OFDM 稀疏信道估计研究[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2019,39(2):49-54.
FEI H T, HE X Y, LIANG Y. OFDM sparse channel estimation based on adaptive compressed sensing[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2019, 39(2): 49-54. (in Chinese)
- [4] 赵锦航,刘健均,周思源,等.基于 BIC 停止准则的改进 A * OMP 信道估计算法[J].计算机应用与软件,2019,36(5):69-74.
ZHAO J H, LIU J J, ZHOU S Y, *et al.* An improved A * OMP channel estimation algorithm based on BIC stopping criterion [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(5): 69-74. (in Chinese)
- [5] 袁迪喆,陈西宏,谢泽东,等.OFDM/OQAM 散射系统格状成形峰均比抑制方法[J].探测与控制学报,2019,41(2):104-109.
YUAN D Z, CHEN X H, XIE Z D, *et al.* Trellis shaping for reducing PAPR in OFDM/OQAM-based scattered system [J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(2): 104-109. (in Chinese)
- [6] 周杰,何明星,刘杨.基于 FRFT 的 OFDM 水声系统性能分析[J].光通信研究,2019,49(2):66-70.
ZHOU J, HE M X, LIU Y. Performance analysis of OFDM underwater acoustic system based on FRFT [J]. *Study on Optical Communications*, 2019, 49(2): 66-70. (in Chinese)
- [7] 袁建国,南蜀崇,张芳,等.基于人工蜂群算法的多用户 OFDM 自适应资源分配方案[J].吉林大学学报:工学版,2019,49(2):624-630.
YUAN J G, NAN S C, ZHANG F, *et al.* Adaptive resource allocation for multi-user OFDM based on Bee Colony algorithm [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2019, 49(2): 624-630. (in Chinese)
- [8] 刘勇,曹龙汉,朱捷.OFDM-MIMO 系统中零点消除算法的研究[J].云南大学学报:自然科学版,2019,41(2):278-284.
LIU Y, CAO L H, ZHU J. Research on zero-point elimination algorithm in OFDM-MIMO system [J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2019, 41(2): 278-284. (in Chinese)
- [9] 刘秀莲,刘彩霞.基于频率调制恒定包络的 ACO-OFDM 系统 PAPR 抑制方法[J].光学技术,2019,45(2):203-207.
LIU X L, LIU C X. Research on reducing peak to average power ratio of ACO-OFDM using frequency modulation constant envelope [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(2): 203-207. (in Chinese)
- [10] 薛候凯,高强,姚彦鑫.一种可靠的 OFDM 基带系统设计与 FPGA 实现[J].微电子学与计算机,2019,36(3):12-16.
XUE H K, GAO Q, YAO Y X. Design and implementation of a reliable OFDM baseband system based on FPGA [J]. *Microelectronics & Computer*, 2019, 36(3): 12-16. (in Chinese)

- [11] 魏明君,何世文,薛春林,等.UFMC-MIMO 波束成形传输方案设计[J].数据采集与处理,2019,34(2):262-273.
WEI M J, HE S W, XUE C L, *et al.* Beamforming transmission scheme design for UFMC-MIMO [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2019, 34(2): 262-273. (in Chinese)

作者简介:



曹 婷(1983—),女,河南南阳人,硕士,讲师,2010 年于西安科技大学获得硕士学位,主要从事显示技术、信号、信息处理方面的研究。E-mail: krr1hz@163.com