

增强型调频差分混沌键控通信系统性能分析

赵 华, 殷奎喜, 邵建华

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 混沌通信具有硬件实现低复杂度、低功耗和抗多径等特性, 成为低速超宽带通信和无线传感网的候选方案. 在各种混沌通信方案中, 调频差分混沌键控因采用易于实现的非相干解调成为了研究的热点. 本文提出一种新的增强型调频差分混沌键控通信系统, 对每比特采样点数、每符号比特数和信号占空比对于系统性能的影响进行了分析, 通过仿真证明了理论分析的正确性.

[关键词] 混沌通信, 调频差分混沌键控, 参考信号传输系统, 超宽带通信

[中图分类号] TN911.25 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)01-0044-04

Performance Analysis of Enhanced Differential Chaos Shift Keying Frequency Modulation

Zhao Hua, Yin Kuixi, Shao Jianhua

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Due to the low complexity in hardware implementation, low power consumption and robust in multipath environment of chaotic communication, chaotic communication is one of the possible candidate signals applicable to both low rate Ultra Wide Band (UWB) systems and wireless sensor networks. Among the modulation schemes using the chaotic signal, Frequency Modulation Differential Chaos Shift Keying (FM-DCSK) is a robust non-coherent technique with respect to the implementation issue and much research effort has been devoted to the study of FM-DCSK. An enhanced FM-DCSK is proposed in the paper. The effects of three system characters such as the samples in one bit, the bits in one symbol and duty cycle are analyzed, and the theory is proved by simulation.

Key words chaos communication, FM-DCSK, transmitted reference system, UWB

混沌通信由于具有不需要载波和安全通信的特点, 近年来引起了通信领域的研究兴趣. 混沌通信还具有易于产生、低功耗和抗多径的宽频带等特性, 对于 802.15.4a 中的通信应用特别有意义, 文献 [1, 2] 研究了混沌通信在超宽带通信中的应用, 混沌通信也成为了 802.15.4a 的一种候选标准^[3]. 为了在通信系统中应用混沌通信的这些优点, 已经研究了许多混沌通信系统. 由于混沌信号具有初值敏感性, 若要通过经历了信道传输而畸变的信号驱动接收端实现混沌同步进行可靠通信, 现在仍存在很多困难, 因此更多的研究放在了非相干接收混沌通信系统上.

文献 [4] 讨论了混沌通断键控 COOK (Chaotic on/off Keying), 但是由于传输功率在 0 到 2 倍平均传输功率间动态变化, 导致最优判决门限取决于信噪比 SNR^[5]. 文献 [6] 提出的差分混沌键控 DCSK (Differential Chaos Shift Keying) 由于其判决门限始终为 0 与信噪比无关, 因此成为混沌通信的研究热点. 但是由于混沌序列非周期, 因此随着采样混沌序列的变化, DCSK 的能量并不守恒, 带来了额外的信噪比衰落, 因此文献 [7] 提出了 FM-DCSK, 通过在 DCSK 前加入 FM, 可以保持每比特能量恒定. 由于 FM-DCSK 的性能比传统的非相干 FSK 更差, 因此在文献 [8] 中提出了一种新的 FM-DCSK 方案, 可以有限地改善 FM-DCSK 系

收稿日期: 2009-01-17

基金项目: 国家 863 计划 - 视频 G 8 关键技术研究项目 (2007AA12Z238)、虚拟地理环境教育部重点实验室开放项目 (NS206005).

通讯联系人: 赵 华, 讲师, 研究方向: 通信技术. E-mail: zhao_hu@njnu.edu.cn

统的性能, 当采取噪声改善算法且合理选择参数, 可以获得介于相干和非相干接收 FSK 的性能. 为了改善无线通信中多径信道引起的符号间干扰 ISI 文献 [9] 提出了一种改善的 FM-DCSK 方案, 但需要良好的同步, 在该文中分析了同步对该系统的影响. 本文将基于文献 [8-9] 中提出的两种 FM-DCSK 改善方案, 提出一种具有其优点的新的增强型 FM-DCSK 方案, 并对该方案的性能进行理论分析和仿真验证.

文中第二部分将描述本文提出的增强型 DCSK 的系统结构并与文献 [7-9] 中比较; 第三部分为系统性能分析; 第四部分给出高斯环境下采取不同参数的性能比较; 最后一部分给出结论.

1 系统描述

图 1 中增强型 FM-DCSK 发送信号可表示为:

$$s_i = \begin{cases} x_i, & i = (N+1)(l-1)M + 1, \dots, (N+1)(l-1)M + PM \\ b_{l-1}x_{i-M}, & i = (N+1)(l-1)M + M + 1, \dots, (N+1)(l-1)M + M + PM \\ \dots & \\ b_{l-N}x_{i-NM}, & i = (N+1)(l-1)M + (N-1)M + 1, \dots, (N+1)(l-1)M + (N-1)M + PM \end{cases} \quad (1)$$

其中 x_i 为调频后的混沌序列, $b_{l,j} = \{+1, -1\}$ 为第 l 个码元的 j 数据比特, j 取值为 1 到 N ; N 为每码元比特数, 当 N 不为 1 时为每符号多比特增强型 FM-DCSK^[8]; M 为每比特采样点数, $(N+1)M$ 为一个码元中的采样数; P 为每比特中有效比特的比例, 称为占空比, 取值为 0 ~ 100%, 当取值为 50% 时为低占空比改善型 FM-DCSK^[9]. 当 P 取值为 100% 且 N 取值为 1 时为传统 FM-DCSK^[7], 当去除调频模块, 则成为传统 DCSK.

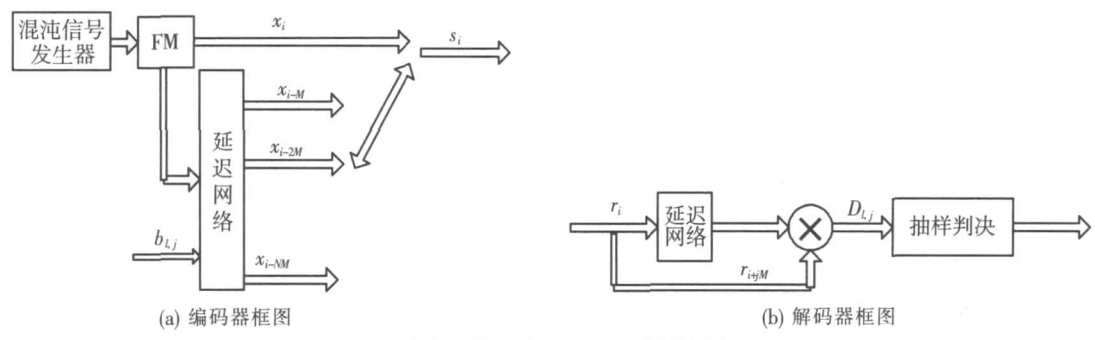


图 1 增强型 FM-DCSK 通信系统
Fig.1 Enhanced FM-DCSK communication system

2 系统性能分析

设信道为加性白高斯噪声信道, 且增益为 1, 则接收信号 r_i 可表示为 $r_i = s_i + w_i$, w_i 为具有零均值的独立高斯分布随机噪声采样. 令 $Nl = (N+1)(l-1)M$, 则相关器输出表示为:

$$D_{l,j} = \frac{1}{PM} \sum_{i=Nl+1}^{Nl+PM} (s_i + w_i) (s_{i+M} + w_{i+M}) = \frac{1}{PM} b_{l,j} \sum_{i=Nl+1}^{Nl+PM} x_i^2 + \frac{1}{PM} \sum_{i=Nl+1}^{Nl+PM} x_i w_{i+M} + \frac{1}{PM} b_{l,j} \sum_{i=Nl+1}^{Nl+PM} x_i w_i + \frac{1}{PM} \sum_{i=Nl+1}^{Nl+PM} w_i w_{i+M}, \quad (2)$$

则系统输出误码率可以表示为:

$$P_b = P(b_{l,j} = +1)P(D_{l,j} \leq 0 | b_{l,j} = +1) + P(b_{l,j} = -1)P(D_{l,j} \leq 0 | b_{l,j} = -1). \quad (3)$$

由中心极限定理, 当 PM 值很大时, (2) 的后 3 项可近似为高斯分布, 误比特率表示为:

$$P_b = P(b_{l,j} = +1) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{E(D_{l,j} | b_{l,j} = +1)}{\sqrt{\operatorname{var}(D_{l,j} | b_{l,j} = +1)}} \right] + P(b_{l,j} = -1) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{E(D_{l,j} | b_{l,j} = -1)}{\sqrt{\operatorname{var}(D_{l,j} | b_{l,j} = -1)}} \right], \quad (4)$$

其中 $\operatorname{erfc}()$ 为补误差函数, 定义为: $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2} dy$.

对于零均值加性白噪声信道, 利用混沌序列的独立性和噪声抽样值的独立性可得:

$$E(D_{l,j} | b_{l,j} = +1) = \frac{1}{PM} \frac{NE_b}{N+1},$$

(5)

其中 E_b 为比特能量, 同理可得:

$$E(D_{l,j} | b_{l,j} = -1) = \frac{1}{PM} \frac{-NE_b}{N+1}.$$

(6)

接收信号的方差为:

$$\operatorname{var}(D_{l,j} | b_{l,j} = +1) = \operatorname{var}(D_{l,j} | b_{l,j} = -1) = \frac{1}{(PM)^2} \left[\frac{2NE_b N_0}{N+1} + PM(N_0)^2 \right].$$

(7)

因此当信源等概率出现时, 可得:

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{2[(N+1)N](N_0/E_b) + PM(N_0/E_b)^2[(N+1)N]^2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

(8)

当 $N = P = 1$ 时为传统 FM-DCSK, 可得到与文献 [4] 相同的误比特率公式. 由式 (8) 可以看出, 增强型 FM-DCSK 系统的误码率性能随着 M 值和 P 值的减小而改善, P 值和 M 值对系统性能的影响一致; 当 N 值增大时, 系统的误码率性能也得到改善, 但在 N 值较大时, 改善程度变慢.

3 加性白高斯信道中系统性能仿真分析

1) 当取值为 $N = 1, P = 1$ 改变 M 值, 信噪比每 2 dB 步进:

由图 2 可以看出, 当误码率为 10^{-2} 时, $M = 16$ 比 $M = 32$ 改善约 1 dB, 而 $M = 32$ 比 $M = 64$ 改善约 1.2 dB. 即当 M 值增大时, 误码率随之增大, 且 M 值增大后理论值和仿真值的误差减小. 这是因为 FM-DCSK 系统中, $E_b N_0 = (N+1)PM \operatorname{SNR}$, 其中 SNR 为信道信噪比, 当 M 值增大时, 在一定 $E_b N_0$ 条件下, 相当于信道信噪比的减小, 导致误码率下降. 同时当 M 值较大时假设的高斯分布成立, 因此理论值逼近仿真值.

2) 当取值为 $N = 1, M = 64$ 改变 P 值, 信噪比每 2 dB 步进:

P 取值为 1 时得到文献 [7, 8] 中传统 FM-DCSK, P 取值为 0.5 时得到文献 [9] 中传统 FM-DCSK. 由图 3 可以看出, 当 P 值减小时, 误码率随之改善, 可以得到比文献 [7-9] 更好的误码率性能. 误码率性能的改善是因为在 FM-DCSK 系统中, $E_b N_0 = (N+1)PM \operatorname{SNR}$, 其中 SNR 为信道信噪比. 因此 P 值的增大和 M 值的增大是等效的, 分析与 1) 中一致. 但是 P 值的减小除了改善误码率外, 还可以改善 FM-DCSK 的多径性能, P 的减小相当于脉冲传输插入了更多的保护时间, 可以有效降低多径引起的 ISI^[9].

3) 当取值为 $P = 0.5, M = 64$ 时, 改变 N 值, 信噪比每 2 dB 步进:

N 取值为 1 时得到文献 [7, 9] 中传统 FM-DCSK. 由图 4 当误码率为 10^{-3} 时, $N = 3$ 比 $N = 2$ 信噪比改善约 0.4 dB, 而 $N = 2$ 比 $N = 1$ 改善约 1.2 dB. 当 N 值增大时, 误码率随之改善, 可以获得比文献 [7, 9] 更好的性能, 但随着 N 值的增大, 误码率下降速度降低. 误码率改善及速度降低是由表达式中的 $[(N+1)N](N_0/E_b)$ 项决定的. 同时 N 值的增加会降低混沌信号的非周期性, 即会在发射信号频谱中产生 $1/T_s$ 的频谱分量^[7].

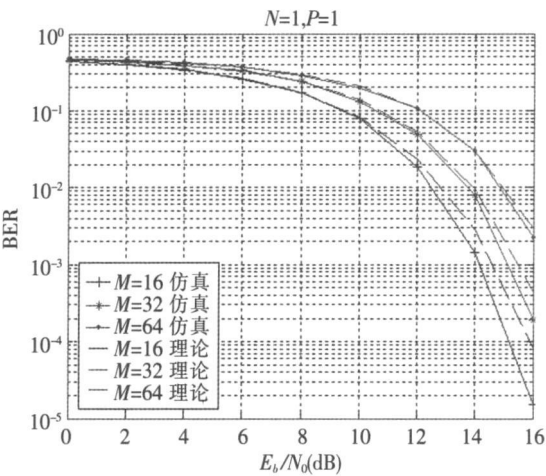
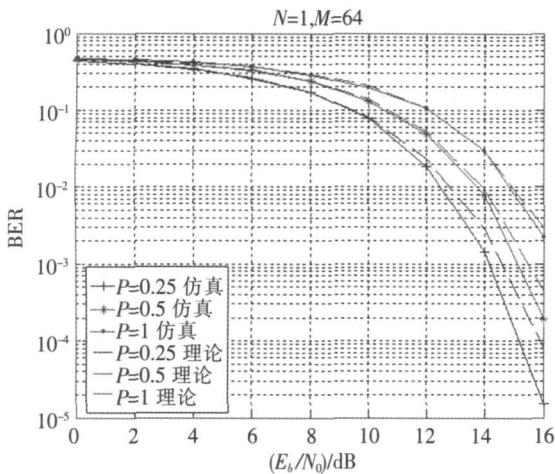
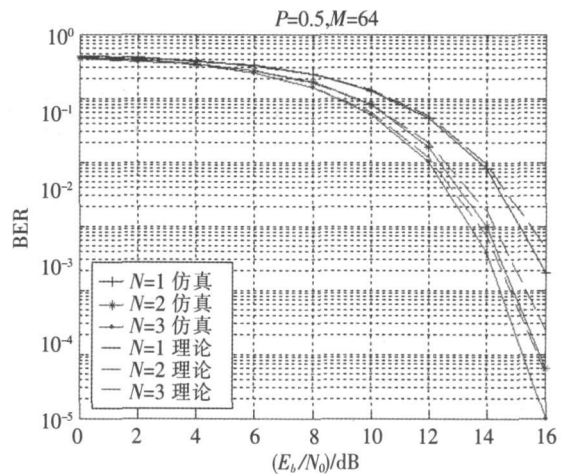


图 2 相同 N 值和 P 值下不同 M 值性能比较图
Fig.2 Comparison for different value M with the same N and P

图3 相同 N 值和 M 值下不同 P 值性能比较图Fig.3 Comparison of different P values with the same N and M 图4 相同 M 值和 P 值下不同 N 值性能比较图Fig.4 Comparison of different N values with the same M and P

4 结论

文中提出了一种增强型 FM-DCSK 通信系统, 分析了它在白高斯信道的性能. 通过理论分析和仿真验证, 可知增强型 FM-DCSK 系统的误码率随着占空比的下降和扩频增益的减少而改善; 同时 N 值的增加有利于改善该系统的误码率, 但是 N 值越大, 这种改善也越不明显. M 值的增大可以更好地满足高斯分布的假设, 因此仿真值更加接近于理论值. 通过合理调整这 3 个参数可以得到满足多种通信性能需求的混沌通信系统.

[参考文献]

- [1] Dmitriev A S, Panas A I, Starkov S O. Ultra-wide band communications using chaos[A]. Networking with Ultra Wide Band and Workshop on Ultra Wide Band for Sensor Network, 2005[C]. Piscataway: IEEE, 2005: 25-29.
- [2] Chong C C, Yong S K. UWB direct chaotic communications technology for low-rate WPAN applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1527-1536.
- [3] Chong C C. Samsung Electronics (SAIT) CFP Presentation for IEEE 802.15.4a Alternative PHY: UWB Direct Chaotic Communication System[S]. IEEE 802.15-05-0030-02-004a, Monterey, CA, USA, 2005.
- [4] Abel A, Schwarz W, Götz M. Noise performance of chaotic communication systems[J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems-I: Fundamental Theory and Application, 2000, 47(12): 1726-1732.
- [5] Kolmún G, Kennedy M P, Jákó Z, et al. Chaotic communications with correlator receiver: theory and performance limits[J]. The Proceedings of The IEEE, 2002, 90(5): 711-732.
- [6] Kolmún G. UWB technology: chaotic communication versus noncoherent impulse radio: circuit theory and design, 2005[A]. Proceedings of the 2005 European Conference[C]. Piscataway: IEEE, 2005.
- [7] Kolmún G, Kennedy M P, Jákó Z, et al. FM-DCSK: a novel method for chaotic communication[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Piscataway: IEEE, 1998, 4: 477-480.
- [8] Kolmún G, Jákó Z, Kennedy M P. Enhanced versions of DCSK and FM-DCSK data transmission systems[A]. Circuits and Systems Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium (ISCAS) [C]. Piscataway: IEEE, 1999, 4: 475-478.
- [9] Kim Y, Kim J, Kim J, et al. Comparison of DCSK Receiver and Enhanced DCSK Receiver with Synchronization Error[A]. Vehicular Technology Conference (VTC) [C]. Piscataway: IEEE, 2006, 2: 261-265.

[责任编辑: 顾晓天]