



## MC-DCSK 中的子载波功率分配优化算法

代红英<sup>1</sup> 徐位凯<sup>2</sup>

(1. 重庆工程学院 电子信息学院 重庆 400056; 2. 厦门大学 通信工程系 福建 厦门 361005)

**摘要:** 研究了多载波差分混沌移位键控 (multi-carrier differential chaos shift keying, MC-DCSK) 调制中的子载波功率分配问题, 基于功率分配模型, 推导了 MC-DCSK 以子载波功率为参数的误比特率 (bit error rate, BER) 表达式, 基于该表达式, 建立了最小化误比特率的最优化问题, 并用凸优化方法获得了子载波最优功率的分配策略。通过仿真, 比较了最优功率分配与等功率分配情况下, MC-DCSK 在加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 和 Rayleigh 多径衰落信道下的性能, 仿真结果验证了最优功率分配策略对系统性能的重要改进, 尤其当子载波数较大时, 其性能增益更为明显。

**关键词:** 混沌通信; 多载波差分混沌移位键控 (MC-DCSK); 误比特率 (BER); 凸优化

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2015)02-0170-04

## Optimal sub-carriers power allocation in MC-DCSK communication system

DAI Hongying<sup>1</sup>, XU Weikai<sup>2</sup>

(1. Electronic Information School, Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056, P. R. China;

2. Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, power allocation strategy on sub-carriers of Multi-carrier Differential Chaos Shift Keying (MC-DCSK) is studied. At first, the MC-DCSK system model with power allocated reference and information sub-carriers is presented. Then bit error rate (BER) expression of sub-carriers power allocated MC-DCSK system is derived. Based on the BER expression, the optimal sub-carriers power allocation strategy is obtained by convex optimization. The BER performance of the sub-carriers power allocated MC-DCSK system is evaluated and compared with the conventional MC-DCSK system with equal power allocations under additive white Gaussian noise (AWGN) and Rayleigh multipath fading channels. Simulation results confirm the significant advantages of the optimal sub-carriers power allocation when the number of sub-carriers is large.

**Key words:** chaos communications; multi-carrier differential chaos shift keying (MC-DCSK); bit error rate (BER); convex optimization

## 0 引言

混沌调制是采用混沌信号作为载波的调制方法, 与常规的调制不同, 混沌信号具有非周期、宽带等特性, 使得混沌调制在多径衰落信道下具有优良的性能。差分混沌移位键控 (differential chaos shift keying, DCSK) 由于不需要混沌载波同步, 并且能够

保持良好的性能, 使其成为混沌调制中的研究热点<sup>[1-5]</sup>。近年来, 由于其简单的接收机结构, DCSK 已被视为一种短距离通信的优选方案<sup>[6-7]</sup>。

作为一种传输—参考传输方式, 基于频率调制的 DCSK 超宽带系统, 需要在接收端实现高宽带的延时电路, 无论是全数字接收还是基于模拟前端的混合接收方法, 延时电路的实现都非常困难, 尤其在低功耗

收稿日期: 2014-07-10 修订日期: 2014-12-06 通讯作者: 代红英 daihongyingcq@163.com

基金项目: 重庆工程学院校内自然科学基金 (2013xzky06)

Foundation Item: The Natural Science Fund of Chongqing Institute of Engineering (2013xzky06)

约束条件下的集成实现。因此, 研究者们开始关注不需要延时结构的混沌差分调制方案。文献 [8-9] 提出了一种基于正交 Walsh 码序列的混沌差分移位调制方法, 其基本思想是将 DCSK 中参考混沌载波和信息承载混沌载波分别用正交的 Walsh 码序列进行调制, 在接收端采用与发射端一样的 Walsh 码进行差分接收。基于类似的思想, 文献 [10] 提出了一种新的 DC-DCSK 调制方法, 即多载波差分混沌移位键控 (multi-carrier differential chaos shift keying, MC-DCSK), 将参考混沌载波和信息承载混沌载波分别调制到不同频率的载波上, 其同样消除了接收机中的延时电路, 同时还提升了系统的传输速率。

文献 [10] 中没有考虑在参考子载波和信息子载波之间的功率分配问题, 即参考子载波和信息子载波上分配的是相同的功率。本文研究发现, 在参考子载波和信息子载波之间进行合理的功率分配, 能够有效地提升 MC-DCSK 的误比特率性能, 尤其在子载波数较大的时候, 相对于所有子载波等功率分配算法, 最优的功率分配策略, 能够带来 2—4 dB 的性能增益。

## 1 系统模型

MC-DCSK 是一种 DCSK 调制的变体, 它通过在不同的频率上分别传输参考混沌载波和信息承载混沌载波, 实现不同子载波在频域的正交。假定  $X_k$  为离散混沌信号, 并且采用  $M$  个子载波进行传输, 则  $M-1$  个信息比特首先通过串/并转换得到并行的比特, 然后将  $M-1$  个比特分别调制到  $M-1$  个信息子载波上。假定扩展因子为  $\beta$ ,  $T_c$  为混沌信号的采样间隔,  $h(t)$  为平方根升余弦滤波器, 其滚降因子为  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), 其近似带宽为  $B_c = (1 + \alpha)/T_c$ , 则经过该成型滤波器的混沌载波信号可表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\beta} x_k h(t - kT_c) \quad (1)$$

在 MC-DCSK 中, 参考混沌载波被调制到频率  $f_r$  上传输,  $M-1$  个信息混沌载波分别被调制到频率为  $f_1, f_2, \dots, f_{M-1}$  上传输, 即

$$s_i(t) = x(t) \cos(2\pi f_r t + \phi_r) + \sum_{i=1}^{M-1} a_i x(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2)$$

(2) 式中:  $\phi_r$  和  $\phi_i$  分别表示在载波调制过程中引入的参考信号和第  $i$  个信息承载信号的初始相位;  $a_i$  为第  $i$  个信息符号。

本文假定所有的子载波上分配的功率是不一样的, 接下来, 将推导 MC-DCSK 的误比特率公式, 然后找到最优的功率分配策略, 假定参考载波上分配

的功率为  $P_0$ , 信息子载波上分配的功率分别为  $P_1, \dots, P_{M-1}$ , 则 (2) 式可改写为

$$s_i(t) = \sqrt{P_0} x(t) \cos(2\pi f_r t + \phi_r) + \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{P_i} a_i x(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (3)$$

## 2 性能分析

为了导出 BER 性能与子载波功率分配之间的关系, 首先基于高斯近似 (Gaussian approximation, GA) 方法推导 BER 表达式。在接收端, 首先进行射频解调, 然后对接收信号进行下采样, 设  $T_c$  为采样间隔,  $D_i$  为第  $i$  个信息比特的判决统计量, 则其表达式为

$$D_i = T_c \sum_{k=1}^{\beta} (x_{k-\tau} \sqrt{P_i} a_i + n_k^i) \times (\sqrt{P_0} x_{k-\tau} + n_k) \quad (4)$$

(4) 式中:  $\tau$  为系统时延;  $n_k$  和  $n_k^i$  分别为叠加在参考子载波和第  $i$  个信息子载波上的均值为 0, 双边功率谱密度为  $N_0$  的离散加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN)。为了简化分析, 假定混沌信号采样间隔  $T_c = 1$ , 则有

$$D_i \approx a_i \sum_{k=1}^{\beta} (x_{k-\tau}^2 \sqrt{P_i P_0}) + \sum_{k=1}^{\beta} x_{k-\tau} (\sqrt{P_i} a_i n_k + \sqrt{P_0} n_k^i) + \sum_{k=1}^{\beta} (n_k n_k^i) \quad (5)$$

MC-DCSK 的比特能量为

$$E_b = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-1} P_m \sum_{k=1}^{\beta} x_k^2 \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式有

$$D_i = \sqrt{P_0 P_i} a_i \frac{(M-1) E_b}{\sum_{m=0}^{M-1} P_m} + \sum_{k=1}^{\beta} x_{k-\tau} (\sqrt{P_i} a_i n_k + \sqrt{P_0} n_k^i) + \sum_{k=1}^{\beta} (n_k n_k^i) \quad (7)$$

不失一般性, 假定第  $i$  个信息子载波的时延  $\tau = 0$ , 则判决统计量  $D_i$  的均值为

$$E[D_i] = \sqrt{P_i P_0} \frac{(M-1) E_b}{\sum_{m=0}^{M-1} P_m} \quad (8)$$

方差为

$$\begin{aligned} \text{Var}[D_i] &= E\left[\left(\sum_{k=1}^{\beta} x_k \sqrt{P_i} a_i n_k\right)^2\right] + \\ &E\left[\left(\sum_{k=1}^{\beta} \sqrt{P_0} x_k n_k^i\right)^2\right] + E\left[\left(\sum_{k=1}^{\beta} n_k n_k^i\right)\right] = \\ &P_i \frac{(M-1) E_b N_0}{\sum_{m=0}^{M-1} P_m} + P_0 \frac{(M-1) E_b N_0}{\sum_{m=0}^{M-1} P_m} + \beta \frac{N_0^2}{4} \quad (9) \end{aligned}$$

假定传输比特 0 和 1 等概率, 根据 GA 算法, 则 BER 为

$$BER = \frac{1}{2}Pr(D_i < 0 \quad a_i = +1) + \frac{1}{2}Pr(D_i \geq 0 \quad a_i = -1) = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{E\{D_i \quad a_i = +1\}}{\sqrt{2Var\{D_i \quad a_i = +1\}}}\right) = \frac{1}{2}erfc\left(\left[\frac{(P_i + P_0) \sum_{m=0}^{M-1} P_m}{(M-1)P_iP_0\frac{E_b}{N_0}} + \frac{(\sum_{m=0}^{M-1} P_m)^2\beta}{2(M-1)^2P_iP_0\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^2}\right]^{-\frac{1}{2}}\right) \quad (10)$$

从 (10) 式可以看到, 不同的功率分配策略会导致不同的 BER, 为了保证所有信息子载波具有相同的性能, 将参考子载波的功率  $P_0$  归一化, 并令所有信息子载波的功率均为  $P$ , (10) 式中括号内部分定义为函数  $\Phi(P)$ , 则

$$\Phi(P) = \frac{(M-1)P + M + P^{-1}}{(M-1)\frac{E_b}{N_0}} + \frac{[(M-1)^2P + P^{-1} + 2(M-1)]\beta}{2(M-1)^2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^2} \quad (11)$$

当函数  $\Phi(P)$  最小时, 可以得到 BER 的最小值, 则优化问题可写为

$$\text{mini mize } \Phi(P) \text{ subject to } 0 < P \leq P_{\max} \quad (12)$$

函数  $\Phi(P)$  是一个正项式, 因此, (12) 式中的优化问题可以采用几何规划进行求解<sup>[11]</sup>, 例如, 通过采用 CVX 软件求解<sup>[12]</sup>, 当给定  $\beta = 40$ ,  $E_b/N_0 = 12$  dB,  $M = 4, 16, 64$  时, 函数  $\Phi(P)$  的最小值分别为 0.267 810, 0.128 941 和 0.090 774, 对应的信息子载波功率分别为 0.457 552, 0.178 754 和 0.084 606。

### 3 仿真结果

仿真参数如下, 根升余弦滤波器的滚降因子  $\alpha$  为 0.25, 给定载波数  $M$ , 符号持续时间  $T_b$  和系统总带宽  $B$ , 则扩展因子  $\beta = T_b B / [M(1 + \alpha)]$ 。例如, 当  $M = 64$ ,  $T_b = 400$  ns,  $B = 1$  MHz 时,  $\beta = 5$ 。

不同功率分配情况下的理论分析结果与仿真结果如图 1 所示, 理论分析结果由 (10) 式计算得到。从图 1 的 BER 曲线可以看出, 当分配给信息承载子载波的功率改变时, MC-DCSK 的 BER 性能也随之改变, 并且存在使得 BER 最小的最佳功率。随着  $M$  的增大, 最佳功率下的 BER 与等功率下 (即  $P = 1$ )

的 BER 差距变大, 例如,  $M = 64$  时, 最佳功率分配时的 BER 为  $10^{-5}$  左右, 但等功率分配时, BER 仅仅能降到  $10^{-3}$  水平。

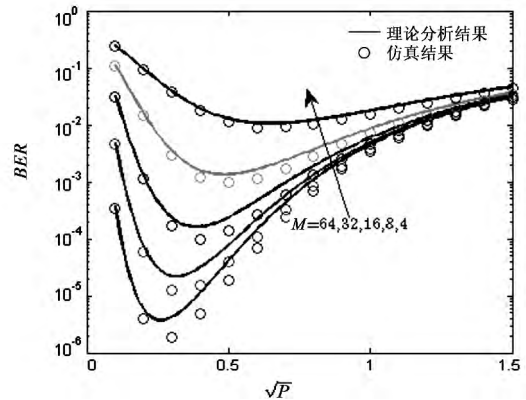


图 1 AWGN 信道下, 不同信息子载波分配下的 BER 性能,  $E_b/N_0 = 12$  dB,  $\beta = 80$

Fig. 1 Information bearing sub-carrier power versus BER over AWGN channel,  $E_b/N_0 = 12$  dB,  $\beta = 80$

最佳功率分配与等功率分配下, MC-DCSK 在 AWGN 信道下的 BER 性能对比如图 2 所示。图 2 中, “equ-pow” 表示信息子载波的功率与参考子载波的功率相等, “optimal” 表示参考子载波的功率归一化为 1, 信息子载波功率根据 (12) 式获得, 此时,  $M = 4, 16, 64$  对应的最优功率分配分别为 0.688 1, 0.268 8 和 0.127 2。

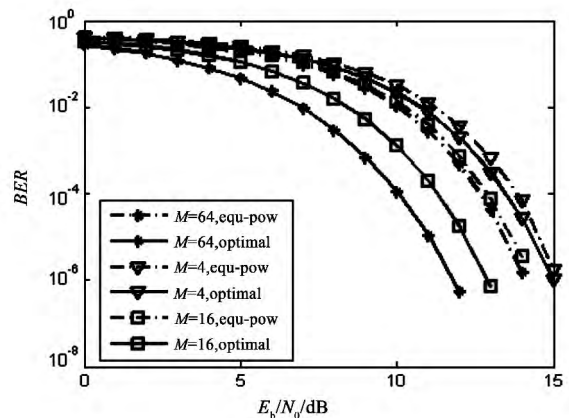


图 2 AWGN 信道下, 最优功率分配与等功率分配之间的 BER 性能比较

Fig. 2 BER performance comparison of equal power allocation versus optimal power allocation over AWGN channel

从图 2 可以看出, 最优功率分配策略大大地增强了 MC-DCSK 的 BER 性能, 尤其是当子载波数增加时, 所获得的性能增益更为明显, 例如, 当  $M = 64$  时, 在 BER 为  $10^{-6}$  时, 其性能增益大约为 2 dB。

在多径衰落信道下,最佳功率分配策略与等功率分配的 BER 性能比较如图 3 所示。多径信道假定为 3 径,即  $L = 3$ ,并且每一径信道增益相等,即  $E[h_1^2] = E[h_2^2] = E[h_3^2] = 1/3$ ,且满足 Rayleigh 分布,多径时延为  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 3T_c$ ,  $\tau_3 = 6T_c$ 。与 AWGN 信道下类似,最优功率分配策略相比于等功率分配具有明显的性能增益,并且这个增益随着子载波数  $M$  的增加而增加,当  $M = 64$  时,在  $\text{BER} = 10^{-3}$  水平上,其增益大约为 4 dB。

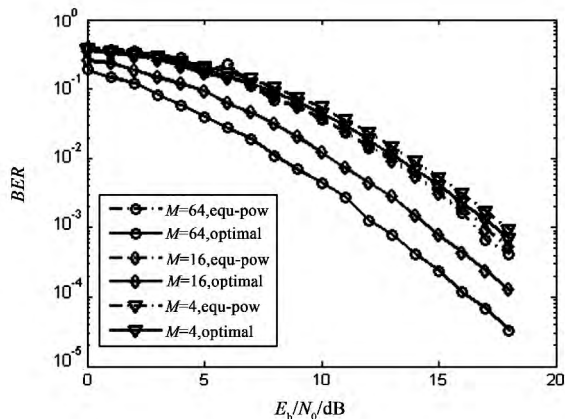


图 3 Rayleigh 多径衰落信道下,最优功率分配与等功率分配之间的 BER 性能比较

Fig. 3 BER performance comparison of equal power allocation versus optimal power allocation over Rayleigh multipath fading channel

综合以上仿真与分析结果,可以看到,通过优化参考子载波和信息子载波之间的功率分配关系,可以为 MC-DCSK 带来可观的性能增益,并且相对于参考子载波和信息子载波之间的等功率分配方法,最优功率分配策略降低了所需的发射功率。

## 4 结束语

本文研究了 MC-DCSK 中的子载波功率分配问题,在推导 MC-DCSK 误比特率的基础上,采用几何规划方法优化了 MC-DCSK 参考子载波和信息子载波之间的功率分配问题,给出了最优功率分配策略。通过仿真结果的分析与比较,发现最优功率分配策略能够为 MC-DCSK 系统带来可观的性能增益。

### 参考文献:

- [1] LAU F C M, TSE C K. Chaos-based Digital Communication Systems: Operating Principles, Analysis Methods and Performance Evaluation [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 45-56.
- [2] KOLUMBAN G. Theoretical noise performance of correlator-based chaotic communications schemes [J]. IEEE Trans Circuits Syst-I, 2000, 47 (12): 1692-1701.
- [3] YANG H, JIANG G P. High-efficiency differential-chaos-scheme for chaos-based noncoherent communication [J]. IEEE Trans Circuits Syst-II, 2012, 59(5): 312-316.
- [4] FANG Y, XU J, WANG L, et al. Performance of MIMO relay DCSK-CD systems over nakagami fading channels [J]. IEEE Trans Circuits and Syst-I, 2013, 60 (5): 757-767.
- [5] CHEN P, WANG L, LAU F C M. One analog STBC-DCSK transmission scheme not requiring channel state information [J]. IEEE Trans Circuits and Syst-I, 2007, 60(4): 1027-1037.
- [6] CHONG C C, YONG S K. UWB direct chaotic communication technology for low-rate WPAN applications [J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1527-1536.
- [7] MIN X, XU W, WANG L, et al. Promising performance of an FM-DCSK UWB system under indoor environments [J]. IET Commun, 2010, 4(2): 125-134.
- [8] XU W, WANG L, KOLUMBAN G. A novel differential chaos shift keying modulation scheme [J]. Int J Bifur Chaos, 2011, 21(3): 799-814.
- [9] XU W, WANG L, KOLUMBAN G. A New Data Rate Adaptation Communications Scheme for Code-Shifted Differential Chaos Shift Keying Modulation [J]. Int J Bifur Chaos, 2012, 22(8): 1-8.
- [10] KADDOUM G, RICHARDSON F, GAGNON F. Design and Analysis of a Multi-Carrier Differential Chaos Shift Keying Communication System [J]. IEEE Trans on Commun, 2013, 61(8): 3281-3291.
- [11] BOYD Stephen, VANDENBERGHE Lieven. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [12] BOYD Stephen. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming [EB/OL]. (2012-09-04) [2014-06-06]. <http://cvxr.com/cvx/>.

### 作者简介:



代红英(1977-),女,重庆人,讲师,硕士,研究方向为无线通信技术。E-mail: daihongyingcq@163.com。

(编辑:王敏琦)