

高斯噪声信道下 CCK 性能分析的新方法

郇能建¹, 吴杰¹, 苟彦新¹, 刘旋², 郭建新¹

(1.空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2.空军第二飞行学院, 陕西 西安 710306)

摘要:为分析高斯噪声信道下补码键控(CCK)的性能,在总结CCK及M元双正交键控(MBOK)编码调制特点基础上,提出了M元四正交键控(MQOK)思想,给出了MQOK编码调制及相关解调原理图,分析了MQOK相对于MBOK具有解调结构简单、更适合高速数据传输等优点,并指出CCK编码调制是MQOK的一种具体实现方式。详细推导了高斯噪声信道下MQOK的基带性能公式,结合CCK编码特点,得到了CCK的性能公式。最后对比理论曲线与Monte Carlo仿真曲线,在确定的误符号率或误比特率条件下,理论结果与仿真结果所需的信噪比(SNR)相差不到0.5 dB,验证了基于MQOK分析CCK性能方法的可行性及其性能公式的简洁有效性。

关键词:CCK; MBOK; MQOK; 高斯噪声信道; 性能分析

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0075-05

补码键控调制解调(CCK)是用无线局域网标准IEEE 802.11b来实现高速率数据传输的一种技术。CCK码字是一种四相复补码,具有很好的相关性能^[1-2]。作为一种采用特殊编码的“软扩频”方式,CCK在多径干扰以及高斯噪声信道下具有更优的性能^[3-4]。然而,在分析CCK在高斯噪声信道下性能时,利用四相双正交信号(QMBOK)性能公式近似描述CCK的性能^[5],这与CCK本身的性能特性有区别;文献[6]给出了一种CCK性能推导的详细过程,但该公式比较复杂。本文给出了CCK在AWGN信道条件下性能分析的一种新方法,即通过M元四正交编码调制(MQOK)分析CCK编码调制的性能。

1 CCK 编码理论介绍

IEEE 802.11b在11 Mbit/s数据速率下采用的CCK调制解调技术,每次需要对8位比特的输入数据进行编码。其定义如下:

$$C = \{ e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4)}, -e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)}, -e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}, e^{j(\varphi_1)} \} \quad (1)$$

式中:为一个CCK码字符号,包含8个复码片。 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 为输入的8个数据比特产生的4个相位,对应关系见表1; φ_1 按DQPSK编码方式获得, φ_2 、 φ_3 、 φ_4 按QPSK编码方式获得(见表2)。

由于 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 都有4种相位状态,因此,码长为8的复码字共有256(4^4)个码字符号。通过定义式可以看出,各码片都有 $e^{j(\varphi_1)}$ 分量,从而 φ_1 确定了整个码字符号的相位。

表1 数据、相位对应关系表

Tab.1 Input data and phase mapping

$d_2 d_1$	$d_4 d_3$	$d_6 d_5$	$d_8 d_7$
φ_1	φ_2	φ_3	φ_4

表2 相位值选择($i=1,2,3,4$)

Tab.2 Phase encoding($i=1,2,3,4$)

$d_2 d_1$	$\Delta\varphi_i$	$d_{2i} d_{2i-1}$	φ_i
00	0	00	0
01	$\pi/2$	01	$\pi/2$
10	$-\pi/2$	01	$-\pi/2$
11	π	11	π

收稿日期:2007-04-16

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(9140c860302)

作者简介:郇能建(1983-),男,江苏连云港人,硕士生,主要从事军事通信系统抗干扰技术研究。

E-mail:tainengjian@yahoo.com.cn

CCK 编码调制原理如图 1 所示,在对串行数据进行分组以后,决定 $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 的 6 bits 数据产生准正交码,经过相位调整,产生准正交的复补码^[1],该码字集有 4^3 个码字符号;决定 φ_1 的 2 bits 数据通过差分编码确定复补码的相位。最后输出的是用于表示复补码的 I、Q 两路数据。

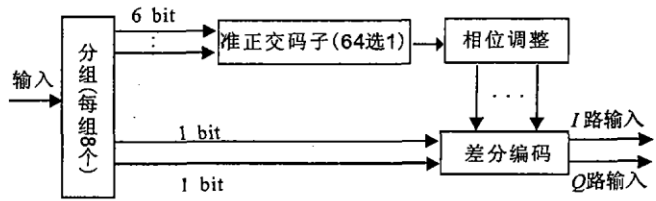


图 1 CCK 编码原理图

Fig.1 CCK modulation

2 MBOK 及 MQOK 原理

将一个信号传输时间(0, T)内,均分成 M/2 个时间段 2T/M,并对每个子区间指定两个幅度相反的矩形信号表示。这样在一个信号集合中,一半信号是正的,而另一半是负的。以这种方式构造出的信号称为 M 元双正交信号(MBOK),这 M 个信号的几何表示可用 M/2 维的信号点表示出^[7]。MBOK 实现原理图(M 取 2⁸)如图 2 所示,从图 2 中可以看出,在对数据进行分组以后,每组可以用 1 bit 来决定整个符号的相位,即选择 $s_i(t)$ 还是 $s_{i+M/2}(t)$,这两个信号点满足 $s_{i+M/2}(t) = -s_i(t)$ 关系。

$$\begin{aligned}
 s_1 &= (\sqrt{\epsilon_s}, 0, 0, \dots, 0) & s_{M/2+1} &= (-\sqrt{\epsilon_s}, 0, 0, \dots, 0) & s_1 &= (\sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_{M/4+1} &= (-j\sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_{M/2+1} &= (-\sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_{3M/4+1} &= (-j\sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) \\
 s_2 &= (0, \sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_{M/2+2} &= (0, -\sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_2 &= (0, \sqrt{\epsilon_s}, 0, \dots, 0) & s_{M/4+2} &= (0, j\sqrt{\epsilon_s}, \dots, 0) & s_{M/2+2} &= (0, -\sqrt{\epsilon_s}, \dots, 0) & s_{3M/4+2} &= (0, -j\sqrt{\epsilon_s}, \dots, 0) \\
 \vdots & & & & \vdots & & & & & & & \\
 s_{M/2} &= (0, 0, 0, \dots, \sqrt{\epsilon_s}) & s_M &= (0, 0, 0, \dots, -\sqrt{\epsilon_s}) & s_{M/4} &= (0, \dots, 0, \sqrt{\epsilon_s}) & s_{M/2} &= (0, \dots, 0, j\sqrt{\epsilon_s}) & s_{3M/4} &= (0, \dots, 0, -\sqrt{\epsilon_s}) & s_M &= (0, \dots, 0, -j\sqrt{\epsilon_s})
 \end{aligned}$$

其中: ϵ_s 为各符号能量。

在构成 MBOK 信号时,如果将一个信号传输时间(0, T),均分成 M/4 个时间段 4T/M,并对每个子区间指定 4 个幅度的矩形信号表示。以这种方式构造出的信号称为 M 元四正交信号(MQOK),这 M 个信号的几何表示可用 M/4 维的信号点表示出。MQOK 实现原理图(M 取 2⁸)如图 3 所示。

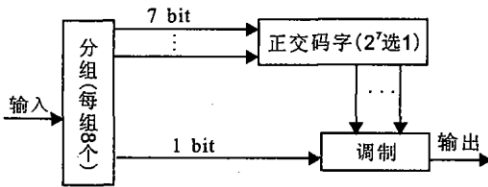


图 2 MBOK 实现原理图

Fig.2 MBOK modulation

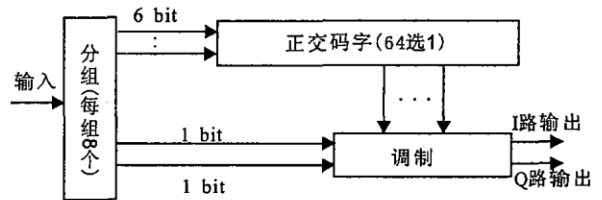


图 3 MQOK 实现原理图

Fig.3 MQOK modulation

比较图 1、图 3 可以看出, MQOK 的实现原理与 CCK 实现原理相同,不同在:首先, CCK 用的是四相准正交码集,并且通过相位调整使这种码字具有互补性,从而实现准正交互补特性。而 MQOK 所用的正交码集可以通过 Wash - Hadamard 编码产生的二进制正交码集,也可以是通过多进制编码方式产生的复正交码集。其次, CCK 对整个码片符号相位进行了 DQPSK 编码,而 MQOK 对整个码片符号相位进行了 QPSK 编码。因此,可以将 CCK 看作 MQOK 的一种具体实现方式,所以对 MQOK 性能的分析具有更一般意义。

3 MQOK 在 AWGN 信道条件下基带性能分析

3.1 相关解调器

结合 MQOK 的信号格式,采用相关接收方式对 MQOK 信号进行解调的最佳接收机结构见图 4。

图4中接收机的结构共需要使用 $M/4$ 个相关器,相对于 MBOK 的 $M/2$ 个相关器减少了一半。在对接收到的信号进行相关运算以后,需要先判定最大模值(判定用于产生正交码的数据比特),再判定最大模值所对应相关值的相位(判定用于决定相位的 2 bit 数据)。判决的结果按组串行输出。

3.2 性能分析

3.2.1 各相关器的输出

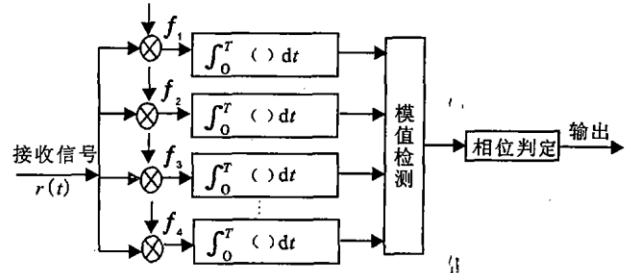


图4 MQOK 最佳接收机

Fig. 4 Optimum receiver for MQOK

为分析 CCK 性能,在 MQOK 性能分析时,假设:①发送端利用 M 个矩形信号波形 $\{s_m(t), m = 1, 2, \dots, M\}$ 发送数字信息;②接收端已实现同步解调;③不考虑相位模糊现象对性能的影响。经 AWGN 信道后,在传输时间 T 间隔内所接收到的信号可以表示为 $r(t) = s_m(t) + n(t), (0 \leq t \leq T)$, $n(t)$ 是均值为 0、双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的复高斯白噪声。若发送的波形信号向量为 $\{s_m, m = 1, 2, \dots, M\}$, 则接收向量为 γ_m , 经过与 $M/4$ 个正交基向量 $\{f_n, n = 1, 2, \dots, M/4\}$ 做相关后的输出模值记作 $C(r_m, f_n) = \left| \sum_{k=1}^{\log_2(M/4)} r_{m, k} f_{n, k} \right| (m = 1, 2, \dots, M)$ 。

不失一般性,假定 S_1 被发送,则与其匹配的相关器输出及非匹配的相关输出分别为 $r'_1 = C(r_1, f_1) / \sqrt{\epsilon_s} = \sqrt{\epsilon_s} + n_1, r'_i = C(r_1, f_i) / \sqrt{\epsilon_s} = n_i, (i = 2, 3, \dots, M/4)$ 。其中 n_1 又可以表示为 $n_c + jn_s$ (n_c, n_s 都为均值为 0、方差为 $N_0/4$ 的高斯随机变量)。将 r'_1 表示成 $Y_1 + jY_2$, 可有: $Y_1 = \sqrt{\epsilon_s} + n_c, Y_2 = n_s$, 从而 $Y_1 \sim N(\sqrt{\epsilon_s}, \sigma^2), Y_2 \sim N(0, \sigma^2)$ 。 r'_1 的模 R_1 服从赖斯分布^[8], 其概率密度为

$$f_{r'_1}(R_1) = \frac{R_1}{\sigma^2} e^{-(R_1^2 + s^2)/2\sigma^2} I_0\left[\frac{R_1 s}{\sigma^2}\right] = \frac{R_1}{\sigma^2} e^{-(R_1^2 + \epsilon_s)/2\sigma^2} I_0\left[\frac{R_1 \sqrt{\epsilon_s}}{\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中: $s^2 = (E(Y_1))^2 + (E(Y_2))^2 = \epsilon_s, R_1 = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}, I_0$ 是零阶 Bessel 函数: $I_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(x/2)^{2k}}{k! \Gamma(k+1)}, x \geq 0$ 。

对于其他相关器的输出 $r'_i (i = 2, 3, \dots, M/4)$, 有: $r'_i = n_i$, 实部虚部都服从均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯分布。这样,其模 R_i 服从瑞利分布^[8]:

$$f_{r'_i}(R_i) = \frac{R_i}{\sigma^2} e^{-R_i^2/2\sigma^2}, R_i \geq 0; i = 2, 3, \dots, M/4 \quad (3)$$

3.2.2 性能公式推导

在 S_1 被发送时,要实现正确判决,要求 $0 \leq R_1 \leq R_1$, 且 $Y_1 > |Y_2|$, 其数学表达形式为

$$P_c = \int_0^{\infty} P(Y_1 > |Y_2| \mid R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1, R_1) P(R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1 \mid R_1) f_{r'_1}(R_1) dR_1 \quad (4)$$

式中: $P(R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1 \mid R_1)$ 是第 1 次判决的正确概率,表示在 R_1 给定的条件下, $R_2, R_3, \dots, R_{M/4}$ 同时小于 R_1 的联合概率; $P(Y_1 > |Y_2| \mid R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1, R_1)$ 是第 2 次判决的正确概率,表示第 1 次正确判决后,对相位进行正确判决的概率。

由于 $\{R_i\}$ 统计独立,所以, $P(R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1 \mid R_1)$ 可表示为

$$P(R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1 \mid R_1) = [P(R_i < R_1 \mid R_1)]^{M/4-1} = \left[\int_0^{R_1} f_{r'_i}(R_i) dR_i \right]^{M/4-1} = [1 - e^{-R_1^2/2\sigma^2}]^{M/4-1} = \sum_{j=0}^{M/4-1} C_{M/4-1}^j (-1)^j e^{-jR_1^2/2\sigma^2} \quad (5)$$

对于第 2 次判决过程,实质上是对整个符号相位的 QPSK 解码过程。因此,正确判定的概率也是 QPSK 解码的符号正确概率^[9], 因而有

$$P(Y_1 > |Y_2| \mid R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{M/4} < R_1, R_1) \approx 1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{\epsilon_s}{N_0}}\right) \quad (6)$$

因此,将式(5)、式(6) 带入式(4), 且 $R_1 = \frac{1}{\sqrt{1+j}}x, u = R_1^2/2\sigma^2, r_s = \epsilon_s/N_0,$

$$P_c = [1 - 2Q(\sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_0}})] \sum_{j=0}^{M/4-1} C_{M/4-1}^j \frac{(-1)^j}{1+j} e^{-[x+\frac{\mathcal{E}_s}{1+j}]/2\sigma^2} \int_0^\infty \frac{x}{\sigma^2} e^{-[x+\frac{\mathcal{E}_s}{1+j}]/2\sigma^2} I_0\left[\frac{x\sqrt{\mathcal{E}_s}}{\sqrt{1+j}\sigma^2}\right] dx = [1 - 2Q(\sqrt{r_s})] \sum_{j=0}^{M/4-1} C_{M/4-1}^j \frac{(-1)^j}{1+j} e^{-\frac{2jr_s x}{1+j}} \quad (7)$$

则, MQOK 的一个符号差错概率可表示为 $P_s = 1 - P_c$ 。

通常情况下, 由 $k = \log_2(M)$, 有 $r_s = kr_b$ 。特殊地, 若 $M = 4$, $r_s = 2r_b$, 则 $P_s = 2Q(\sqrt{2r_b})$, 此为 QPSK 的误符号概率。由图 5 可见, 在 r_s 一定时, 误符号概率随着 M 的增大而减小。当 $M \rightarrow \infty$ 时, $P_s \rightarrow 0$, 此时达到任意小的错误概率所要求的最小 SNR(r_b) 为 0.693 (-1.6dB), 满足香农极限。

以上求出的也是符号差错平均概率。如果 MQOK 信号的所有符号都是等概的, 其发生的概率为 $P_s/(M-1)$ 若是一个符号包含 k 个比特位, 则 MQOK 的平均比特错误概率为^[7]

$$P_b = \frac{2^{k-1}}{M-1} P_s \quad (8)$$

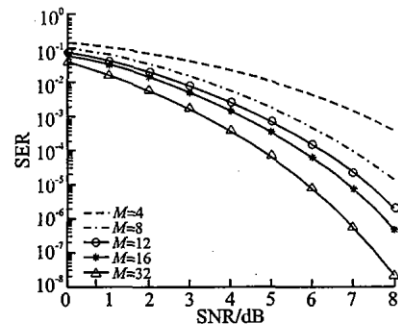


图 5 MQOK 符号差错概率曲线

Fig. 5 Symbol - error probability curve of MQOK

4 基于 MQOK 的 CCK 基带性能分析

通过原理分析知, 11 Mbps 采用的 CCK 编码调制是一种 256 元四正交编码调制。与一般 MQOK 不同的是, 为消除 QPSK 编码带来的相位模糊, CCK 对整个码片符号相位进行了 DQPSK 编码。因此, 需要对一般 MQOK 性能公式进行拓展, 根据文献[9]所述有下面 DQPSK 解码的符号正确概率: $P(Y_1 > |Y_2| | R_2 < R_1, R_3 < R_1, \dots, R_{64} < R_1, R_1) \approx 1 - 2Q(\sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{4\sqrt{2}})$, 由于 11 Mbps 的所采用的 CCK 编码一个符号包含 8 bit 数据, 因而 $r_s = 8r_b$, 则 CCK 符号错误概率为

$$P_s = 1 - P_c = 1 - [1 - 2Q(\sqrt{16r_b} \sin \frac{\pi}{4\sqrt{2}})] \sum_{j=0}^{63} C_{63}^j \frac{(-1)^j}{1+k} e^{-\frac{16r_b}{1+j}} \quad (9)$$

则由 MQOK 推导出的 CCK 的误比特率为 $P_b \approx 0.5P_s$ 。

5 仿真结果与结论

本文给出 CCK 编码调制的误符号率 (SER) 以及误比特率 (BER) 理论值曲线, 并且通过 MATLAB 工具, 利用 Monte Carlo 仿真思想, 对 AWGN 信道下 11 Mbps 采用的 CCK 编码调制基带性能进行仿真, 得到 SER 和 BER 的仿真值曲线。为分析性能的需要, 也仿真出了 DQPSK 的性能曲线 (见图 6)。

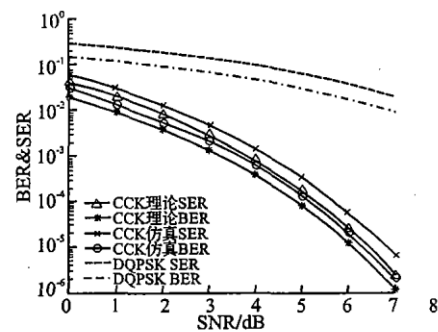


图 6 理论值与仿真结果比较图

Fig. 6 Comparison between numerical and simulation results

首先可以看出, CCK 性能优于 DQPSK, 原因在于 CCK 编码调制作为一种“软扩频”方式, 有处理增益 9 dB 与编码增益 3 dB。其次, 基于 MQOK 编码调制思想得出的理论值曲线与通过 Monte Carlo 仿真思想得出的仿真结果相近。对于 BER 曲线, 在 $BER = 10^{-5}$ 时, 文献[5]用 QMBOK 性能公式近似计算出来的 CCK 的 BER 理论值与仿真值, 所需的 SNR 相差大约 1.8 dB; 文献[6]给出的 BER 理论值与仿真值所需的 SNR 相差约 1 dB; 本处给出的 BER 理论值与仿真结果所需的 SNR 只相差 0.3 dB; 对于 SER 曲线, 在 $SER = 10^{-5}$ 时, 本处的理论值与仿真结果所需的 SNR 相差只有 0.5 dB。由此可见, 本公式在分析 CCK 编码调制的基带性能时更准确。而且, 本文给出的性能公式与文献[6]给出的公式相比, 更简洁且无需用数值计算的方法对公式求解。这为分析 CCK 在 AWGN 信道下的性能提供了很好的方法。在以后工作中, 将继续对 MQOK 编码调制进行深入

研究,探索其抗干扰性能。

参考文献:

- [1] Haitham Mohd Ata Issa. Overview of Wireless LANs, Design & Simulate the Physical Layer Of IEEE 802. 11b and Use SAW Filters in Wireless Communications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [2] Zhang Chao. Research On Complete Complementary Sequence and Modulation and Simulation Methods of Polyphase Orthogonal Sequence [D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2005.
- [3] Liu Shaobo, Huang Aiping, Zhang Zhaoyang, et al. Performance Analysis of CCK Modulation under Multipath Fading Channel; Proceedings of the 6th Nordic Signal Processing Symposium [C]. Espoo, Finland; [s. n.], 2004, 6. 9 - 11.
- [4] Kumar. V, Raja Kumar R V. Performance Analysis of An Finite Word Length Implemented CCK Modem with Rake Receiver for WLAN System [J]. The First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia, 2005, 26(29): 1 - 4.
- [5] Carl Andren, Mark Webster. CCK Modulation Delivers 11 Mbps for High Rate IEEE 802. 11 Extension [EB/OL]. (2003 - 05 - 20) [2007 - 04 - 16]. <http://www.intersil.com/data/wp/wp0535.pdf>.
- [6] LIU Shaobo, HUANG Aiping. Performance Analysis of CCK Modulation Under AWGN Channel [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2004, 38(10): 1256 - 1269.
- [7] John G. Proakis. Digital Communications [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [8] Stephen G Wison. Digital Modulation and Coding [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1998.
- [9] Bernard Sklar. Digital Communications Fundamentals and Applications [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006.
- [10] 吴晓丽, 葛建华, 岳安军. 基于多径瑞利衰落信道的非规则 LDPC 码分析性能 [J]. 空军工程大学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 47 - 51.
WU Xiaoli, GE Jianhua, YUE Anjun. Performance of Irregular LDPC Codes Based on Multi-path Fading Channel [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(4): 47 - 51. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

A New Approach to Analyzing CCK Performance under AWGN Channel

TAI Neng - jian¹, WU Jie¹, GOU Yan - xin¹, LIU Xuan², GUO Jian - xin¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Air Force Second Flight College, Xi'an 710306, China)

Abstract: In order to analyze Complementary Code Keying (CCK) performance on the additive white Gaussian noise (AWGN) channel, an idea of M-ary Quaternary Orthogonal Keying modulation (MQOK) is proposed in this paper, based on the analysis of the common traits of CCK and M-ary Bi-orthogonal Keying (MBOK). Again this paper analyzes that MQOK has the merits of simpler demodulation structure and more adaptable to higher data transfer than MBOK and points out that CCK coding modulation is considered a concrete way to realize MQOK. By analyzing the performance of MQOK on AWGN channel in detail, new closed-form formulae for CCK are gained with its own modulation feature. Comparison between the numerical result and the simulation result of Monte Carlo shows that the difference of the required signal-to-noise (SNR) between the numerical and simulation is less than 0.5 dB with any certain bit-error probability and symbol-error probability, which confirms that these formulae are more accurate and practical, and the approach to analyzing CCK performance by MQOK is available.

Keywords: CCK; MBOK; MQOK; AWGN channel; performance analysis