

## 基于不同相位脉冲调制的 CPM 信号性能研究

王 鹏<sup>1</sup> 芮国胜<sup>2</sup> 张 洋<sup>2</sup> 刘林芳<sup>2</sup>

(1. 研究生管理大队 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

**摘要:** 针对现代数字通信系统下频谱资源日益紧缺的问题,研究了不同相位脉冲调制的 CPM 信号的频谱特性和误码性能。首先列出了矩形脉冲、升余弦脉冲以及高斯最小频移键控脉冲 3 种常用 CPM 相位脉冲函数的一般形式,并给出了对应调制信号的功率谱密度分布;在此基础上,基于最小欧氏距离研究了 3 种相位脉冲调制的 CPM 信号误码性能,并做了仿真对比。仿真结果表明:高斯最小频移键控脉冲调制的 CPM 信号具有优良的频谱特性,且误码性能较好,实际工程中可以根据客观要求选择不同的相位脉冲调制方式,使系统在有效性和可靠性之间取得合理折中。

**关键词:** 连续相位调制;相位脉冲;最小欧氏距离;频谱特性;误码性能

**中图分类号:** TN911.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Study on the performance of CPM based on different phase pulse

Wang Peng<sup>1</sup> Rui Guosheng<sup>2</sup> Zhang Yang<sup>2</sup> Liu Linfang<sup>2</sup>

(1. Graduate Students' Brigade of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Electronic and Information Engineering, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of increasingly scarce spectrum resources in the modern digital communication system, the spectrum characteristics and error performance of continuous phase modulation signals were discuss in this paper. First of all, the general form of CPM signal with three kinds of phase pulses is presented respectively, and the power spectrum density distribution of the modulated signal is obtained. And then, based on the minimum Euclidean distance, error performance of three kinds of CPM signals is studied. Simulation results show that: the CPM signal with Gauss's minimum frequency shift keying pulse has more prominence both on spectral characteristics and the error performance compared with the other types. In practical engineering, choose applicable phase pulse modulation method according to the objective requirement. Finally, the system can get a reasonable compromise between validity and reliability.

**Keywords:** continuous phase modulation; phase pulse; minimum Euclidean distance; spectral characteristics; error performance

## 0 引 言

连续相位调制(continue phase modulation, CPM)是一类包络严格恒(定的)调制方案,具有主瓣窄、旁瓣衰减快的优良功率谱特性,被广泛应用于卫星通信和对潜通信等领域,且在现代通信系统中占据越来越重要的地位<sup>[1]</sup>。

由于 CPM 信号具有无限长的记忆,对于最佳检测而言,接收机必须观察无限长的信号来选择使错误概率最小的序列,这可以用最大似然序列检测(maximum likelihood sequence detection, MLSD)实现,其误码性能主要由信号间的最小欧氏距离决定。Aulin 等人首先给出了利用相位网格路径计算最小欧氏距离的有效方法,得到了连续相位频

移键控(continuous-phase-frequency shift keying, CPFSK)的最小欧氏距离确切表达式<sup>[2-3]</sup>;Ekanayake 等人将 Aulin 等人的研究成果扩展到更多一般情况,并研究了不同字符数  $M$ 、调制指数  $h$  以及记忆长度  $L$  对最小欧氏距离的影响<sup>[4-5]</sup>。而近些年,国内外一些学者主要把精力集中在降低 CPM 接收机复杂度方面,对于不同相位脉冲调制的 CPM 信号频谱特性和误码性能比较的研究相对缺乏<sup>[6-11]</sup>。

针对上述现状,本文主要研究不同相位脉冲响应函数对 CPM 信号误码性能的影响。首先给出了 CPM 信号的一般表达式以及几种常用的相位脉冲响应函数,并得到了对应调制信号的功率谱密度;然后基于最小网格欧氏距离对比分析了不同相位脉冲调制的 CPM 信号误码性能,并

收稿日期:2017-07

\* 基金项目:国家自然科学基金(41606117, 41476089, 61671016)资助项目

探讨了字符数  $M$ 、调制指数  $h$  对检测性能的影响。

### 1 基于欧氏距离 CPM 解调性能分析

#### 1.1 CPM 信号描述

CPM 的传输信号可以定义为：

$$s(t, \mathbf{a}) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t + \phi(t, \mathbf{a})), \quad -\infty \leq t \leq \infty \quad (1)$$

式中： $T$  为符号间隔， $E$  为符号能量， $f_c$  为载波频率， $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots)$  为发送的  $M$  进制信息符号序列， $a_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}$ ， $\phi(t, \mathbf{a})$  为附加相位，可以表示为：

$$\phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q(t - kT) \quad (2)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau \quad (3)$$

式中： $h$  为调制指数， $q(t)$  为相位脉冲相应函数， $g(t)$  为频率脉冲相应函数。

3 种常用 CPM 相位脉冲响应函数如表 1 所示。其中  $LREC$  和  $LRC$  分别表示持续时间为  $LT$  的矩形脉冲和升余弦脉冲， $L$  为 CPM 信号的记忆长度； $GMSK$  称为具有带宽参数  $B$  的高斯最小频移键控脉冲， $B$  表示高斯脉冲的  $-3$  dB 带宽。

表 1 常用的相位脉冲响应函数

相位脉冲	函数
$LREC$	$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT}, & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$
$LRC$	$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{LT}\right), & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$
$GMSK$	$g(t) = \frac{Q\left(2\pi B\left(t - \frac{T}{2}\right)\right) - Q\left(2\pi B\left(t + \frac{T}{2}\right)\right)}{\sqrt{\ln(2)}}$

以上 3 种常用相位脉冲调制的 CPM 信号的功率谱密度分布如图 1 所示，其中仿真参数设置为： $L=1, BT=0.5, M=2, h=0.5$ 。

由图 1 可知，基于  $GMSK$  脉冲调制的 CPM 信号主瓣宽度最窄，带宽利用率最高；升余弦脉冲调制的 CPM 信号带宽利用率次之，而基于  $LREC$  脉冲调制的 CPM 信号占用带宽最大，拖尾现象严重。由于  $GMSK$  脉冲调制的 CPM 信号具有优良的频谱特性，因而其被广泛应用与现代通信系统中<sup>[12-13]</sup>。

#### 1.2 欧氏距离定义

在评估具有最大似然序列检测的 CPM 信号的性能时，必须确定通过网格路径的最小欧氏距离，这些路径在

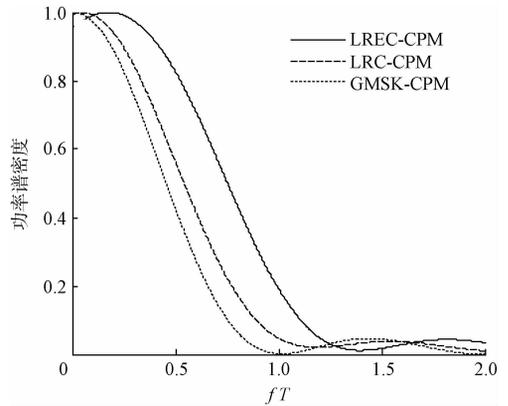


图 1 脉冲对应调制信号归一化功率谱密度

$t=0$  时刻的节点上分离，而后在下一时刻的同样节点上重新汇合。通过网格的两条路径之间的距离与相应的信号有关<sup>[14-15]</sup>。

假设有相应于两个相位轨迹  $\phi(t, \mathbf{a}_i)$  和  $\phi(t, \mathbf{a}_j)$  的两个信号  $s_i(t)$  和  $s_j(t)$ 。那么，在观测长度为  $NT$  的时间间隔上，两个信号之间的欧氏距离定义为<sup>[4]</sup>：

$$D_{ij}^2 = \int_0^{NT} [s_i(t) - s_j(t)]^2 dt = \frac{2E}{T} \int_0^{NT} \{1 - \cos[\phi(t, \mathbf{a}_i) - \phi(t, \mathbf{a}_j)]\} dt \quad (4)$$

其中： $\mathbf{a}_i$  和  $\mathbf{a}_j$  表示第  $i$  个和第  $j$  个数据序列， $E$  为符号能量。

为了比较不同的调制方案，应该基于相同的比特能量  $E_b$  来比较错误性能。由于  $E = E_b \log_2 M$ ，将欧氏距离对比特能量归一化得到：

$$d_{ij}^2 = \frac{\log_2 M}{T} \int_0^{NT} \{1 - \cos[\phi(t; \mathbf{a}_i) - \phi(t; \mathbf{a}_j)]\} dt \quad (5)$$

对于 CPM 相位  $\phi(t, \mathbf{a})$  而言，无论采用哪种相位脉冲，都有  $\phi(t, \mathbf{a}_i) - \phi(t, \mathbf{a}_j) = \phi(t, \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j)$ ，因此令  $\mathbf{a}_{ij} = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j$ ，则式可以改写为：

$$d_{ij}^2 = \frac{\log_2 M}{T} \int_0^{NT} \{1 - \cos[\phi(t; \mathbf{a}_{ij})]\} dt \quad (6)$$

式中：除  $\mathbf{a}_{00} \neq 0$  之外， $\mathbf{a}_{ij}$  的任何元素可取的值为  $0, \pm 2, \pm 4, \dots, \pm 2(M-1)$ 。式(6)说明，对于固定的相位路径对，欧氏距离  $d_{ij}^2$  是观测长度  $N$  的非递减函数。

#### 1.3 解调性能分析

对于等概率  $M$  进制 CPM 信号，在给定观察符号间隔上，其误码性能取决于网格路径的最小欧氏距离，它可以表示为：

$$P_e = K_{\min} Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} d_{\min}^2}\right) \quad (7)$$

式中： $K_{\min}$  为观察间隔内所有可能达到最小距离的路径数， $d_{\min}^2$  为网格最小欧氏距离，定义为：

$$d_{\min}^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \min_{i,j} d_{ij}^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \min_{i,j} \left\{ \frac{\log_2 M}{T} \int_0^{NT} [1 - \cos \phi(t, \mathbf{a}_{ij})] dt \right\} \quad (8)$$

$Q(\cdot)$  为  $Q$  函数, 定义为:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (9)$$

观察式(9)可知, 由于  $Q$  函数为单调递减函数, 因此信噪比一定时, 最小欧氏距离  $d_{\min}^2$  越大, 对应 CPM 的误码性能就越好。

## 2 仿真实验

### 2.1 最小欧氏距离仿真

为了比较不同 CPM 调制方案的误码性能, 图 2~4 分别示出了  $M=2, 4, 8, 16$  时具有不同相位响应脉冲的全响应 CPM 方案的最小欧氏距离  $d_{\min}^2$  与调制指数  $h$  的关系。

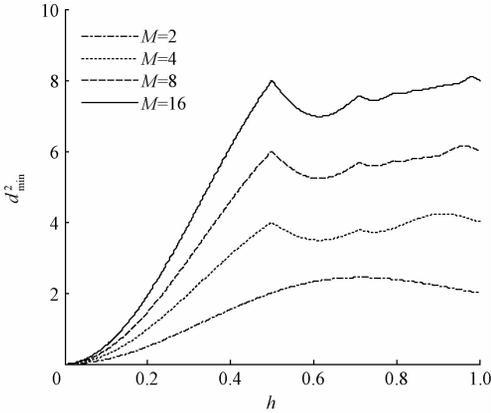


图 2 矩形脉冲下 CPM 的  $d_{\min}^2$  与  $h$  的关系

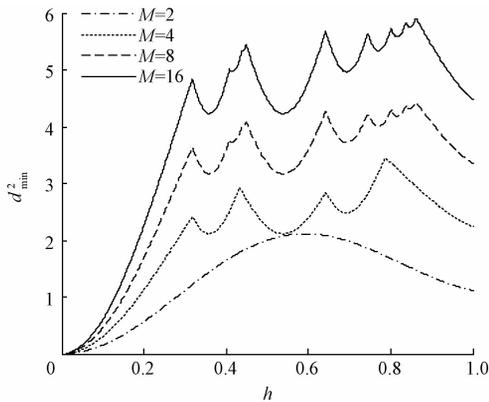


图 3 升余弦脉冲下 CPM 的  $d_{\min}^2$  与  $h$  的关系

由图 2~4 可知:

1) 对于同种相位脉冲响应函数, 随着符号数  $M$  的增加, 其最小欧氏距离是增加的, 即误码性能随着符号数  $M$  的增加而变好;

2) 最小欧氏距离  $d_{\min}^2$  随着调制指数  $h$  的变化而起伏波动, 因而实际中可以根据系统对误码率性能的要求, 选取合适的调制指数;

3) 对比图 2~4, 符号数  $M$  一定时, 其最小欧氏距离由

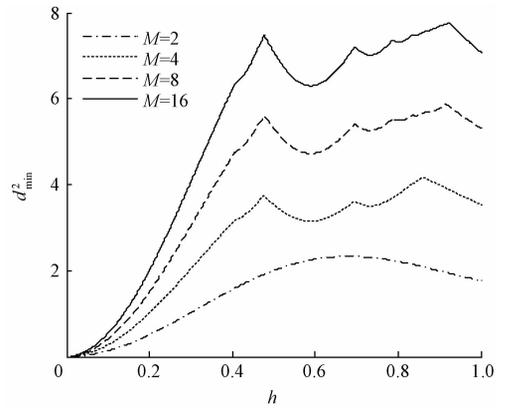


图 4 高斯脉冲下 CPM 的  $d_{\min}^2$  与  $h$  的关系

大至小依次为矩形脉冲、高斯脉冲和升余弦脉冲, 这也决定了它们性能由优变差的关系;

4) 图 2~4 中存在 1 个特例, 在调制指数为 0.5, 符号数  $M=2$  时, 3 种脉冲的 CPM 调制方案的最小欧氏距离都为 2;

5) 而对于调制指数为 0.5, 符号数  $M=4$  时, 3 种脉冲响应的 CPM 调制方案最小欧氏距离分别为 2.424 3、1.847 3、2.290 0;

6) 在调制指数为 0.75 时, 对于  $M=2$  和  $M=4$  两种情况, 3 种脉冲响应的 CPM 调制方案的最小欧氏距离分别为 4.000 0、2.239 8、3.543 3 和 3.717 5、2.897 2、3.529 0。

### 2.2 性能仿真

由图 2~4 可知, 对于不同的相位脉冲、调制指数以及符号数所形成的 CPM 信号, 其最小欧氏距离都是不一样的, 为了更直观的比较各种 CPM 方案的误码性能, 给出几种条件下 CPM 的误码性能仿真结果。

图 5 给出了  $M=2$ , 调制指数分别为 0.5 和 0.75 时不同相位脉冲调制 CPM 方案的误码性能比较。

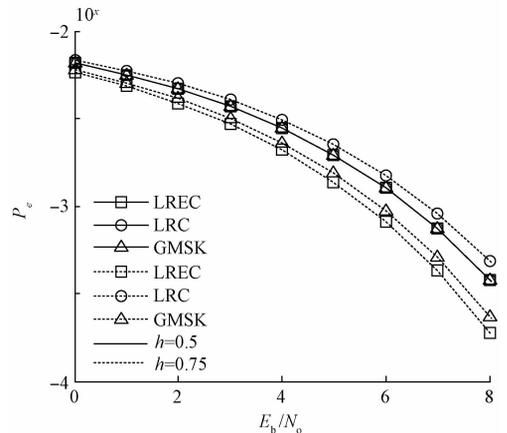


图 5  $M=2$  时不同相位脉冲的 CPM 误码性能

由图 5 可知, 1) 在调制指数为 0.5 时, 3 种相位脉冲调

制的 CPM 方案误码性能相当,基本没有区别,这与 2.1 节中对图 2~4 分析的第 4 点相对应;

2)在调制指数为 0.75 时,3 种不同相位脉冲调制的 CPM 方案中,具有矩形脉冲的 CPM 调制方案误码性能最好,高斯脉冲次之,升余弦脉冲最差,由 2.1 节中分析的第 5)点可知,不同相位脉冲调制的 CPM 信号之间的欧氏距离存在关系:矩形脉冲>高斯脉冲>升余弦脉冲,这也验证了图 5 和 6 的仿真结果;

3)对比调制指数为 0.5 和 0.75 的情况可知,调制指数为 0.5 时的误码性能介于具有高斯脉冲和升余弦脉冲的 CPM 信号之间,这是由于在调制指数为 0.5 时,3 种相位脉冲调制的 CPM 信号的最小欧氏距离都为 2,而调制指数为 0.75 时,其欧氏距离分别为 2.424 3、1.847 3、2.290 0,它们之间的关系也符合误码率性能的仿真结果。

图 6 给出了  $M=4$ , 调制指数分别为 0.5 和 0.75 时 3 种相位脉冲调制 CPM 方案的误码性能比较。

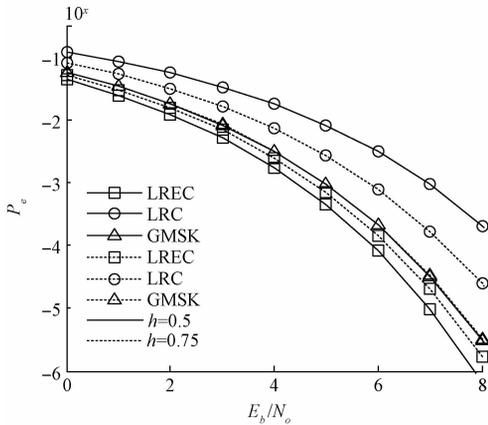


图 6  $M=4$  时不同相位脉冲的 CPM 误码性能

由图 6 可知:

1)对于调制指数为 0.5 和 0.75 两种情况,3 种相位脉冲的 CPM 误码性能中,具有矩形脉冲的 CPM 信号误码率性能最好,高斯脉冲次之,升余弦最差,这在 2.1 节中分析的第 5)和第 6)点可以得到很好的解释;

2)对于高斯脉冲调制的 CPM 信号,其误码性能在调制指数为 0.5 和 0.75 两种情况下非常接近,且介于具有矩形脉冲和升余弦脉冲调制的 CPM 信号之间;

3)对于矩形脉冲调制的 CPM 信号,其误码率在调制指数为 0.5 时优于调制指数为 0.75 时,当差别小于 0.5 dB;

4)对于升余弦脉冲调制的 CPM 信号,其误码率在调制指数为 0.5 时要比调制指数为 0.75 时差,在误码率为  $10^{-3}$  时,其性能差 1 dB 左右。

其中 2)~4)中的结论与 2.1 节中分析的第 6 点相对应。

### 3 结 论

本文研究了不同相位脉冲对 CPM 信号的误码性能影响,并且进行了仿真对比。首先描述了 CPM 信号的一般模型,列出了矩形脉冲、升余弦脉冲和高斯最小频移键控脉冲的一般形式,并给出了它们的波形及其对应的 CPM 调制信号功率谱密度;在此基础上研究 3 种相位脉冲调制的 CPM 信号,以及其欧氏距离与调制指数和符号数之间的关系;最后基于网格最小欧氏距离研究 3 种相位脉冲调制的 CPM 信号的误码率性能,并作了仿真验证。仿真结果表明:频谱利用率由高到低依次为高斯最小频移键控脉冲,升余弦脉冲,矩形脉冲;对于误码性能而言,矩形脉冲调制的 CPM 信号误码性能最好,高斯脉冲调制 CPM 信号的误码率性能次之,且接近矩形脉冲调制的 CPM 信号误码率,升余弦脉冲的最差。

综上所述,高斯最小频移键控脉冲调制的 CPM 信号具有优良的频谱特性,且误码性能较好,因而被广泛应用于现代通信系统中。实际中还可以根据系统对带宽和误码率的要求,选择不同的相位脉冲调制方式,使得系统在有效性和可靠性之间取得合理的折中。

### 参 考 文 献

- [1] 党小宇,李宝龙,王旭东. CCSDS 航天测控信号的简化非相干检测算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 94-98.
- [2] AULIN T, SUNDBERG C E. Continuous phase modulation-part I: Partial response signaling[J]. IEEE Transactions on Communication, 1981, 29(3): 210-225.
- [3] ANDERSON J, AULIN T, SUNDBERG C E. Digital Phase Modulation [M]. New York: Plenum Publishing Company, 1986.
- [4] RIMOLDI B. Exact formula for the minimum squared euclidean distance of CPFPSK[J]. IEEE Transactions on Comm, 1991, 39(9): 1280-1282.
- [5] EKANAYAKE N, LIYANAPATHIRANA R. On the exact formula for minimum squared distance of CPFPSK [J]. IEEE Transactions on Communication, 1994, 42(11): 2917-2918.
- [6] 童启森,杜欣军. 一种低复杂度的卷积编码 CPM 的非相干序列检测算法[J]. 电子器件, 2009, 32(4): 784-787.
- [7] 钟凯,葛临东,巩克现. 基于 Laurent 分解的多指数 CPM 低复杂度序列检测算法[J]. 信号处理, 2011, 27(5): 715-720.
- [8] CARIOLARO G. A system-theory approach to decompose CPM signals into PAM waveforms[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(1): 200-210.

- [9] 湛东,何林,陈树春,等.一种微弱光电信号调制解调电路设计研究[J].电子测量技术,2016,39(4):119-122.
- [10] 刘维倩.数字调制信号符号速率的测量[J].国外电子测量技术,2013,36(8):31-33.
- [11] 史革,文玉梅,李平,等.采用余弦调制滤波器组泄漏检信号处理研究[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2849-2856.
- [12] 张亦弛,黄见明,何昭.基于相位谱测量的脉冲调制信号频域测量方法[J].仪器仪表学报,2014,28(11):2508-2514.
- [13] 王彦朋,滑海,王晓君.一种基于 FPGA 的 OQPSK 调制电路的实现[J].电子测量技术,2017,40(2):101-104.
- [14] 力智,胡学龙.单载波与多载波调制系统中调制识别算法研究[J].国外电子测量技术,2016,35(11):73-75.
- [15] 孟祥利,侯孝民,廉昕.脉冲超宽带信号调制技术分析[J].电子测量技术,2016,39(9):40-44.

### 作者简介

王鹏,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为混沌弱信号检测。

E-mail:hopewp@qq.com

芮国胜,1968 年出生,教授,博士生导师,主要研究方向为现代通信系统、非线性滤波理论、小波理论与应用等。

张洋,1983 年出生,博士研究生,讲师,主要研究方向是现代通信系统、非线性滤波理论。

刘林芳,1990 年出生,博士研究生,主要研究方向为混沌弱信号检测。