

一种基于“相位距离”降低 CPM 解调复杂度的新算法

方继承¹ 于 全²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国电子设备系统工程公司, 北京 100039)

摘 要: 连续相位调制(CPM)是一种恒包络的高效调制方式, 由于其解调算法复杂度高, 其应用长期以来受到限制。传统的 CPM 解调算法基本上是基于幅度信息而未考虑相位信息, 因此复杂度较高。本文提出了一种依据 CPM 信号特征的相位距离的定义, 利用 2RC-4CPM 对该定义的有效性进行了验证, 并将其应用于降低最大似然序列检测算法的路径数, 从而大幅降低了最优接收机解调的复杂度。仿真表明, 在选取适当门限值的情况下, 基于“相位距离”的最大似然序列检测算法性能接近最优接收机。

关键词: CPM; 连续相位调制; 低复杂度; 相位距离

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)07-1117-04

A Novel Algorithm for Reducing MLSE Complexity of CPM Based on Phase Distance

FANG Ji-cheng¹ YU Quan²

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073;
2. China Electronics Equipment System Engineering Corporation, Beijing 100039)

Abstract: Continuous Phase Modulation (CPM) is an efficient modulation scheme with constant envelop, however its applications have been constrained due to high complexity of the demodulation algorithms. Traditional demodulation algorithms are based on amplitude information rather than phase information, which results in its high complexity. A conception called Phase Distance based on the inherent characteristic of CPM signal is defined and verified based on the 2RC-4CPM. And a novel algorithm used to reduce the path number of MLSE algorithm based on this conception is presented. This algorithm can reduce the computation complexity of the optimum receiver considerably. Simulation results show that the degradation in error performance compared to the optimum receiver is less than 1dB with a proper threshold.

Key words: CPM; Continuous Phase Modulation; Low Complexity; Phase Distance

1 引言

CPM 是一种相位调制方式, 信息完全承载于信号相位中, 信息序列的不同完全依靠相位轨迹的不同来体现。而大部分的线性调制方式, 包括 ASK、PSK、QAM 等, 都是靠信号幅度的不同来区别信息序列的 (PSK 在正交解调情况下事实上也是依靠幅度做判决), 因此对于这些调制方式而言, 基于幅度信息的检测算法就是最佳的。

传统的 CPM 检测算法大多是从线性调制方式演化而来, 基本上仍是基于幅度信息而没有考虑相位信息, 因此复杂度较高, 且性能不令人满意。如果能找到一种基于相位轨迹的检测算法就有可能达到更佳的检测性能和更低的复杂度。

由于直接从信号中提取相位轨迹比较困难, 因此本文引入“相位距离”PD (Phase Distance) 的概念。所谓相位距离, 就是在相同时间段内, 两个信号相位轨迹 PT (Phase Trajectory) 差异的某种度量。借助相位距离,

我们可以较直接的对信号的相位轨迹进行比较。

2 传统的最优 CPM 接收机结构

不论是相干解调还是非相干解调,最优 CPM 接收机一般由前端相关器组和后端最大似然序列检测器组成^{[1][2]},如图 1 所示。

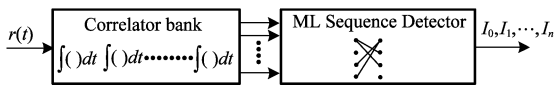


图 1 最优 CPM 接收机组成框图

Fig. 1 block diagram of optimum CPM receiver

相关器组完成接收信号与所有参考信号的相关运算,获取后端处理所需的度量值,最大似然序列检测器 (MLSD)采用 Viterbi 算法 (VA) 在状态网格中寻找最优路径,并做出判决。最优接收机可以在最大似然的意义上获得最佳判决结果,然而为获取更高的频谱利用率,CPM 调制通常都采用多进制和部分响应的方案,这就使得 VA 每单位时间需处理的状态和路径的数目成指数增长^[1]。如当进制数 $M=8$,部分响应脉冲长度 $L=3$,调制指数 $h=m/p=1/8$ 的情况下,状态数 $S=2pM^{L-1}=1024$,路径数 $P=2pM^L=8192$,这在以无线移动为应用背景的前提下几乎是无法实现的。

从 CPM 调制被提出开始,关于降低解调复杂度的研究已经取得很大进展,所提出的方法大都围绕减少相关器数目和降低状态数两种思路展开,由于破坏了最优接收机的内在结构,很难避免同时带来的性能损失。本文借助相位距离,在保留最优接收机内在结构的同时,通过合理的减少路径数,可以在性能几乎无损的前提下降低解调复杂度。信道条件假设为平坦衰落的高斯白噪声信道。

3 相位距离表达式

由于相位轨迹 PT 是一条随时间变化的曲线,对其差异的度量并不是显而易见的,因此相位距离的表达式并不唯一,本文定义的表达式如下:

$$D = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} \text{Re}[s_1(t) * s_2^*(t)] dt}{T} \quad (1)$$

其中 $s_1(t) = e^{j\phi_1(t)}$, $s_2(t) = e^{j\phi_2(t)}$, 均为归一化等效复基带信号, $\phi_1(t)$, $\phi_2(t)$ 分别为其相位轨迹, T 为截取时间长度, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部。由于 $|s_1(t)| \leq 1$, $|s_2(t)| \leq 1$, 从而 $\text{Re}[s_1(t) * s_2^*(t)] \leq 1$, 因此 D 的取值范围是: $[0, 2]$ 。

将 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 带入(1)式,有:

$$D = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} \cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)] dt}{T} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,(1)式的定义间接地反映了两

信号间的相位轨迹差异,差异越大, D 值越大,反之亦然,符合前述定义的要求。

为验证上述定义的有效性,我们先以 2RC-4CPM 为例,做出两个符号周期内所有可能出现的 PT 曲线 (共 $M=4^2=16$ 条),如图 2 所示。为便于比较,我们将所有 PT 的初相设为相同,每条曲线对应连续两个发送符号 (I_{n-1}, I_n) , 具体对应的符号序列按从上向下的顺序列于图的右侧。从图中可以直观地看到,两个符号序列越相似,对应的 PT 越接近,反之亦然。为了精确的描述这种关系,我们定义两个符号序列 (I_{n-1}, I_n) 与 (I'_{n-1}, I'_n) 之间的类汉明距离 D 如下:

$$D = |I_n - I_{n-1}| + |I'_n - I'_{n-1}| \quad (3)$$

从图 2 可以看出, D 值越大(两个符号序列差别越大),PT 差别越大,即相位距离越大。因此相位距离可以反映出两个符号序列间的差异程度,这样我们就将相位距离和符号判决联系起来,为利用信号的相位特征来简化解调算法提供了可能。

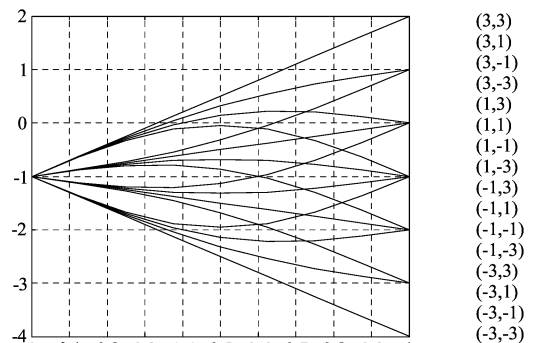


图 2 2RC-4CPM 在两个符号周期内的所有可能相位轨迹图

Fig. 2 all possible phase trajectory of 2RC-4CPM in two symbol periods

接下来我们再根据(1)式,做出这些 PT 之间的相位距离比较图,如图 3 所示。

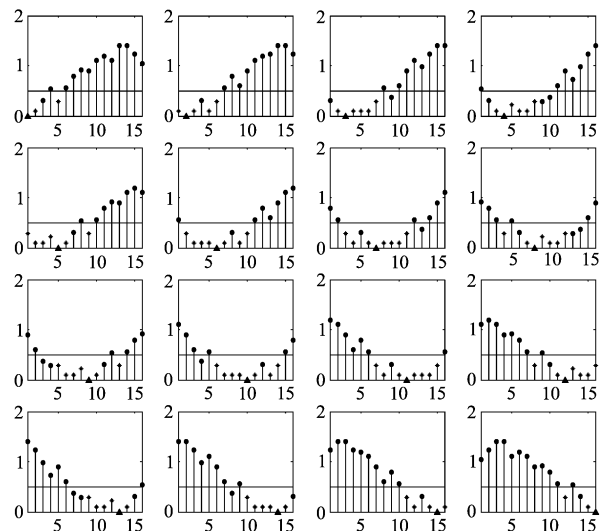


图 3 2RC-4CPM 所有相位轨迹间相位距离比较图

Fig. 3 comparison of all possible phase trajectory of 2RC-4CPM

图3中,左上角的小图表示符号序列(3,3)所对应PT与包括自身在内的所有十六种PT之间的相位距离,其中三角形标记表示与自身的相位距离,以星形做标记的竖线表示经观察得到的较接近的PT间的相位距离,以圆形做标记的竖线表示经观察得到的差别较大的PT间的相位距离。在其右边的一个小图表示符号序列(3,1)所对应PT与所有十六种PT之间的相位距离,以此类推,其它小图具有同样含义。

从图3可以看出,按照(1)式定义得出的相位距离较好的反映出了PT之间的差异程度,且计算简单,兼具有效性和实用性。

4 借助PD降低复杂度的方法

如前文所述,目前大部分降低CPM解调复杂度的研究大都围绕减少相关器数目和降低状态数两种思路展开,这样做不可避免地会带来性能上的损失。事实上我们不难看出,最大似然序列检测的计算量大部分来自于不同路径之间尺度的计算,比较,筛选和累加等,因此即使状态数很多,如果我们能够找到一种办法,可以在进行Viterbi算法之前根据信号特征筛选掉一部分路径的话,计算量就会得到显著的降低。并且如果这种筛选足够合理,则对性能的影响可以做到尽可能小。

对于CPM解调而言,最大似然检测的本质就是通过接收信号与参考信号间的相关运算,利用Viterbi算法找出与接收信号最相似的参考信号从而完成检测的过程。因此如果能找到一种机制,可以事先将明显与接收信号不相似的参考信号排除在外,不参加相关运算的话,则相关运算和VA两部分的计算量都会大大降低。

本文提出的相位距离正是描述CPM信号之间相似度的一种度量,相位距离越小,两信号相位轨迹越接近,从而两信号越相似,反之亦然。因此借助相位距离,我们就可以建立这样一种机制。具体做法是在每个运算周期内,先求出接收信号与所有参考信号间的相位距离,并设定一个门限值,高于此门限值的相位距离所代表的参考信号不参加后面的相关计算,低于门限值的则继续后面的过程。

门限值的设定非常关键,需要在减少计算量和损失性能间进行折衷。门限值太高,则进入后面运算的参考信号数目增加,需要处理的路径数增加,计算量不

会有明显降低;门限值太低,则有可能将正确的参考信号排除在外,从而影响检测性能。

由于与调制指数、符号进制数、相位响应波形等因素都有关,门限值的设定无法遵循统一的公式。实际中可根据信噪比的情况设定,当信噪比较高时,门限值可较低,因为这时因噪声的影响而导致相位距离出现偏差的概率很小。对常见的2RC-4CPM而言,通常可参照以下的经验公式对门限值进行设定:

$$\gamma = \frac{2.5}{E_b/N_0} \quad 2 \leq E_b/N_0 \leq 10 \quad (4)$$

其中信噪比 E_b/N_0 的单位是dB,当 E_b/N_0 取值超出以上范围时,则取相应临近边界值。仿真结果证明,大信噪比情况下,按照式(4)给出结果设置参与相关运算的参考信号的门限值,可以保证性能几乎没有损失的前提下计算量有明显的降低。

图4给出了在不同门限值下路径数相对于原始算法减少百分比比较图,很明显可以看出,门限值越小,参与运算的路径数就越少,计算量越小,但与此同时性能的损失也越明显。

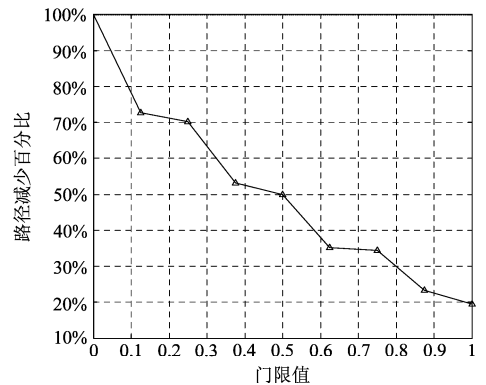


图4 不同门限值下路径数相对于原始算法减少百分比比较图
Fig. 4 comparison of decreased percentage relative to original algorithm

5 性能仿真

为研究上述方法对MLSE算法影响的程度,我们在门限值分别为0.5和0.25的情况下对2RC-4CPM进行了仿真,结果如图5所示。其中以圆形做标记的曲线表示原始算法,以方形做标记的曲线表示借助PD降低复杂度的MLSE算法,从图中可以看出门限值取0.5时,信噪比达到5dB时性能就已接近原始算法,而门限值取0.25时,在大信噪比条件下,两者的差别也小于1个dB。

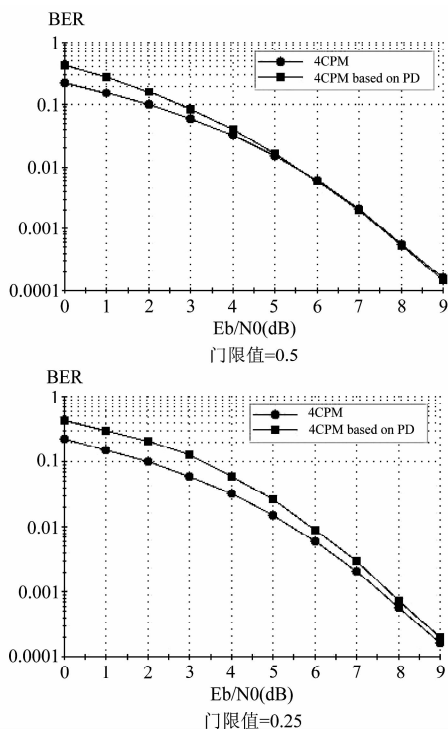


图5 借助PD降低复杂度的MLSE算法仿真曲线
Fig.5 simulation plots of low complexity MLSE algorithm
based on Phase Distance

6 结论

本文给出了一种利用CPM本身信号特征降低解调复杂度的新算法,即在相关运算之前计算接收信号与参考信号的相位距离,根据一个事先设定的门限值淘汰相位距离较大的参考信号,从而减少后续相关运算的个数以及Viterbi算法的计算量。仿真表明在门限值取0.25的情况下,路径数已减少到原始算法的25%,而性能损失小于1个dB。

本文给出的相位距离表达式仅仅是所有可能表达

式中的一种,基本满足了有效性和实用性的要求。如果表达式本身的计算比较复杂,则会抵消降低路径数所带来的好处,如果对相位轨迹差异的描述不够准确,则会严重影响性能,因此表达式的选择对整个算法的影响至关重要。对相位距离表达式的详细论述我们将在另文给出。

参考文献

- [1] John G. Proakis. "Digital Communications". McGraw-Hill, New York, 2nd edition, 1989.
- [2] J. B. Anderson, T. Aulin, and C-E. W. Sundberg, "Digital Phase Modulation". New York, NY: Plenum, 1986.
- [3] T. Svensson, A. Svensson; Reduced Complexity Detection of Bandwidth Efficient Partial Response CPM, IEEE Vehicular Technology Conference, May 1999.
- [4] A. Özgür Yilmaz, Wayne E. Stark; Turbo coded continuous phase modulation, Proc. IEEE MILCOM, 2001, pp. 1406-1410.
- [5] Giulio Colavolpe, Riccardo Raheli; Noncoherent Sequence Detection, IEEE Trans. Communications, 1999, vol. COM-47, pp. 1376-1385.
- [6] Lutz H. -J. Lampe, Robert Schober, Gerald Enzner, Johannes B. Huber; Noncoherent coded continuous phase modulation, Proc. IEEE ICC, 2001, pp. 2216-2220.

作者简介

方继承(1976-),男(汉族),河北宣化人,国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,研究方向为无线通信与高效调制解调技术。E-mail: china_fang@tom.com

于全(1965-),男(汉族),江西九江人,中国电子设备系统工程公司研究所研究员、博士生导师,研究方向为无线通信、软件无线电及军事通信网。