

突发模式 OQPSK 接收机的一种快速同步算法¹

朱健军 姚庆栋

(浙江大学信息与电子工程系 杭州 310027)

摘 要 快速取得载波同步和位时钟同步是突发模式通信系统的基本要求, 该文提出了突发模式 OQPSK 接收机的一种快速同步算法, 该算法使用一个特定图案的前导字, 在前导字期间经过适当处理, 将待估计的载波相位和位时钟相位分开, 然后采用开环方法进行并行、独立地估计。理论分析和模拟结果表明, 该算法可快速建立载波同步和位时钟同步, 并可应用于卫星通信、移动通信等场合。

关键词 突发模式, OQPSK, 同步

中图分类号 TN929.5

1 引言

诸如卫星通信、移动通信^[1,2]等共享媒介的通信系统中, 采用突发传送模式支持随机多用户接入。使用突发传送模式和使用连续传送模式相比, 前者支持包通信模式工作, 因此可以获得更大的系统容量, 并且可以更有效地支持突发数据源的可变比特率业务。突发传送模式以数据包为单位传送数据, 发送侧通常在每个数据包前插入一个约十几到几十个符号的前导字, 接收端以它作为辅助数据来进行载波恢复和位时钟恢复, 载波和位时钟恢复算法的性能与前导字的图案有关。前导字作为系统开销, 其长度和系统吞吐量相关, 因此, 在设计突发调制解调器时, 总是要求前导字尽可能短, 即接收机应具有快速捕获能力, 同时误码率等性能指标保持在系统可以接受的水平。在突发传送模式下, 如果使用锁相环这种传统的方式来进行载波同步和位时钟同步, 那么往往需要上百个符号的前导字才能取得比较理想的性能^[3,4], 这会大大降低数据传送效率, 并且锁相环有 hang-up^[5]问题。

基于上述考虑, 本文提出了突发模式 OQPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) 接收机一种开环结构^[6,7]的快速同步算法。本算法基于一个特定图案的前导字, 在前导字期间经过适当处理, 可将待估计的同步参数分开, 从而并行、独立地估计各个参数。载波和位时钟恢复同时进行, 因此系统可以采用很短的前导字, 从而大大减少了捕获时间。本文首先介绍了采用该算法的接收机模型, 然后论述了所提出载波和位时钟快速同步算法, 最后分析了算法性能并展示了理论及模拟结果。

2 突发模式 OQPSK 接收机模型

图 1 给出了突发 OQPSK 接收机模型。突发信号由两部分组成: 第一部分前导字, 其基带信号是相邻两个判决点的交替信号, 本文以不经过差分编码的重复的“1110”序列为例; 第二部分数据包, 往往包含几百到数千个数据符号。接收机采用开环结构, 以两倍符号速率对接收信号采样。接收机对采样信号的处理分成两个阶段: 首先是前导字阶段, 即捕获阶段, 估计器并行独立地估计载波相位和位时钟相位; 捕获阶段结束后进入跟踪阶段, 以捕获阶段得到的估计值作为初始值, 跟踪载波相位和位时钟相位。根据估计值, 校正同步参数, 进行数据检测和解调。

3 载波和位时钟同步算法

3.1 载波恢复算法 前导字基带信号采用重复的“1110”序列, 当不存在载波相位误差时, 接收的等效基带信号是相邻两个判决点 $(\sqrt{E_s}/2, \sqrt{E_s}/2)$, $(\sqrt{E_s}/2, -\sqrt{E_s}/2)$ 的交替信号, E_s 是符号能量。那么, 对任意的基带成形滤波器滚降因子, 在前导字阶段, 接收信号可以表示为

$$y(t) = \sqrt{E_s/2}e^{j\theta(t)}[1 + j \cos(\omega(t - \tau(t)))] + N(t) \quad (1)$$

¹ 2000-04-06 收到, 2000-11-22 定稿
国家自然科学基金项目: 69972043

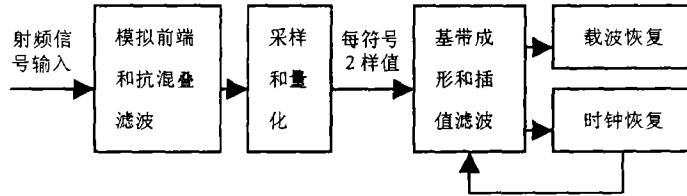


图 1 突发 OQPSK 接收机框图

其中, $\theta(t)$, $\tau(t)$ 分别是未知的非随机的载波相位和位时钟相位; $\omega = \pi/T$, T 是符号周期; $N(t) = N_1(t) + jN_2(t)$ 是复白高斯噪声, 且满足均值 $E[N(t)] = 0$, 方差 $\delta_N^2 = \delta_{N_1}^2 = \delta_{N_2}^2 = N_0/2$ 。实际应用中, $\theta(t)$, $\tau(t)$ 是慢时变的, 在前导字阶段可以假定 $\theta(t)$, $\tau(t)$ 是常数, 因此 (1) 式可以简化为

$$y(t) = \sqrt{E_s/2}e^{j\theta}[1 + j \cos(\omega(t - \tau))] + N(t) \quad (2)$$

图 2 给出了载波相位估计器模型框图。

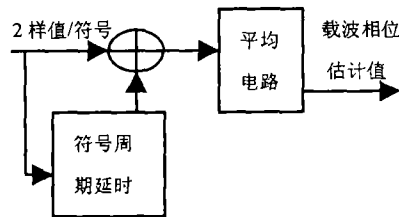


图 2 载波相位估计器

以两倍符号率采样, 得到

$$y(n) = \sqrt{E_s/2}e^{j\theta}[1 + j \cos(\omega(nT/2 - \tau))] + N(n) \quad (3)$$

该信号与延迟一个符号周期的信号相加, 得到

$$U(n) = y(n) + y(n-2) = \sqrt{2E_s}e^{j\theta} + \eta(n) \quad (4)$$

其中, $\eta(n) = N(n) + N(n-2)$ 是均值为 0, 方差为 N_0 的高斯随机变量。

(4) 式两边同除 $\sqrt{2E_s}$ 进行归一化得到

$$V(n) = U(n)/\sqrt{2E_s} = e^{j\theta} + \beta(n) \quad (5)$$

其中 $\beta(n) = \eta(n)/\sqrt{2E_s}$ 是均值为 0, 方差为 $N_0/(2E_s)$ 的高斯随机变量。在前导字期间, 对 $V(n)$ 求平均得到 $e^{j\theta}$ 的估计值

$$\hat{e}^{j\theta} = \sum_{n=0}^{2K_p-1} V(n)/(2K_p) = e^{j\theta} + \sum_{n=0}^{2K_p-1} \frac{N(n) + N(n-2)}{2K_p\sqrt{2E_s}} \quad (6)$$

其中 K_p 是前导字的长度, 即前导字中所包含的符号数。

实际应用中, 载波相位变化是缓慢的, 在较短的时间段内, $e^{j\theta}$ 具有很强的相关性, 因此可以利用 Kalman 滤波器, 根据前导字阶段已知的 $e^{j\theta}$ 估计值来预测下一个时间段内 $e^{j\theta}$ 的值,

并利用此预测值对下一个时间段内的信号进行相干检测, 从而载波相位估计器的计算速率可以降低。数据包阶段 $e^{j\theta}$ 估计的时间间隔可以根据具体情况调整。

直接估计载波复相位 $e^{j\theta}$, 可以同时得到 $\cos\theta$ 和 $\sin\theta$ 的值, 因此不存在相位区间跳变问题。而直接估计 θ 时, 只要利用角度来进行计算、估计 θ 值, 相位区间跳变问题就很难克服。全数字接收机进行相干解调时, 使用 $e^{j\theta}$ 而不是 θ , 因此, 寻找 $e^{j\theta}$ 的无偏估计量更具有实际意义。

由 (6) 式可以计算估计量的均值和方差

$$E(\hat{e}^{j\theta}) = E\left(e^{j\theta} + \sum_{n=0}^{2K_p-1} \frac{N(n) + N(n-2)}{2K_p\sqrt{2E_s}}\right) = E^{j\theta} \quad (7)$$

$$D(\hat{e}^{j\theta}) = D\left(e^{j\theta} + \sum_{n=0}^{2K_p-1} \frac{N(n) + N(n-2)}{2K_p\sqrt{2E_s}}\right) = \frac{2K_p-1}{4K_p^2E_s}N_0 = \frac{2K_p-1}{8K_p^2\text{SNRb}} \quad (8)$$

其中 $\text{SNRb} = E_b/N_0 = E_s/(2N_0)$ 是信噪比, E_b 是信号的比特能量。

由以上讨论可知, 我们得到的是载波复相位的无偏估计, 并且估计器是全线性的, 结构简单, 易于全数字实现。

3.2 位时钟恢复算法 采用类似文献 [8] 所论述的位时钟恢复算法, 根据其中的 (17)–(23) 式, 有

$$Z(n) = y(n)y(n-2)^+ \quad (9)$$

其中 y^+ 表示 y 的共轭。

在前导字阶段, 对 $Z(n)$ 的虚部作 DFT, 在 K_p 比较大时, 得到

$$R = \sum_{n=0}^{2K_p-1} \text{Im}(Z(n)) \cos(\omega nT/2) \approx E_s K_p \cos(\omega\tau) + \sqrt{\frac{E_s}{2}} \sum_{n=0}^{K_p-1} (N_2(2n) - N_2(2n-2)) \quad (10)$$

$$I = \sum_{n=0}^{2K_p-1} \text{Im}(Z(n)) \sin(\omega nT/2) \approx -E_s K_p \sin(\omega\tau) + \sqrt{\frac{E_s}{2}} \sum_{n=0}^{K_p-1} (N_2(2n+1) - N_2(2n-1)) \quad (11)$$

其中 $\text{Im}(Z)$ 表示 Z 的虚部。

从 (10), (11) 式得到位时钟相位的估计值:

$$\hat{\tau} = \frac{1}{\omega} \text{mod}_{2\pi} [2 \tan^{-1}(\frac{I}{R}) + m\pi] \quad (12)$$

其中 (R, I) 的符号组合分别为 $(+, -)$, $(-, -)$, $(-, +)$, $(+, +)$ 时, m 对应的分别取 1, 2, 3, 4。

根据文献 [9] 中 (5-2-50)–(5-2-55) 式可得归一化位时钟相位均方估计误差:

$$D(\hat{\tau}) = E\left[\left(\frac{\hat{\tau} - \tau}{T}\right)^2\right] = \frac{1}{\pi^2} \int_{-\pi}^{+\pi} \theta^2 p(\theta) d\theta \quad (13)$$

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi} e^{-2\gamma \sin^2(\theta)} \int_0^\infty v e^{-(v - \sqrt{4\gamma} \cos \theta)^2/2} dv \quad (14)$$

$$\gamma = E_s K_p / (2N_0) = \text{SNRb} \times K_p \quad (15)$$

该位时钟恢复算法采用开环结构, 因此不会有 hang-up^[5] 问题, 并且其基本工作时钟为两倍符号率, 适合于全数字实现。

4 性能仿真和分析

在 Gaussian 白噪声信道模型下, 使用计算机对所提出的算法性能进行了模拟仿真. 成形滤波器选为平方根升余弦滚降滤波器, 滚降系数 0.4, 突发信号中数据包部分长 1000 个符号, 解调采用逐符号判定方法, 整个系统没有采用纠错编码.

首先, 考虑了前导字长度 K_p 和不同的信噪比 (SNRb) 对载波相位和位时钟相位估计器性能的影响 (位时钟相位估计器性能参见文献 [8], 两个估计器有相类似的性能). 图 3 展示了 SNRb=4dB, 载波相位 $\theta = 180^\circ$, 归一化位时钟相位 $\tau/T = 0.5$ 时, 载波复相位均方估计误差与前导字长度 K_p 的关系曲线. 图 4 展示了载波复相位均方估计误差与 SNRb 之间的关系, 载波和位时钟相位取值同图 3. 图中的理论值是根据 (8) 式得到的. 从图中可以看出, 理论值和仿真结果非常吻合. 并且如图 3 所展示, 随前导字长度增加, 估计误差逐渐减少, 但减少的量按指数规律递减. 由此, 可以认为当前导字长度达到一定数值后, 再增加数十个符号不会显著改善误码率性能. 就如下文所证明, 数十个符号的前导字就可以获得满意的误码率性能. 由图 4 可见, 估计误差随信噪比增加而减少, 当 $K_p = 8$, SNRb=0dB 时, 载波复相位均方估计误差低于 0.18, 表明相位抖动小于 1.5° .

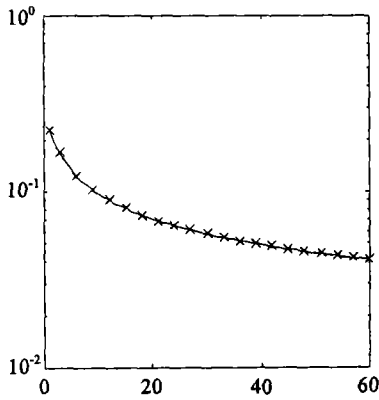


图 3 相位均方估计误差和 K_p 的关系曲线

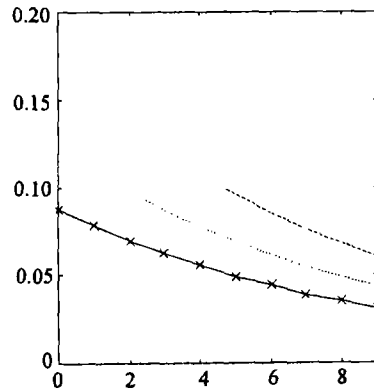


图 4 相位均方估计误差和 SNRb 的关系曲线

作为检测所提出算法性能的一种方法, 在不同的 SNRb、不同的前导字长度下, 利用蒙特卡罗方法进行了误码统计. 接收机采用文献 [8] 中的插值算法. 仿真时, 突发信号载波相位的初始值在 $(0, 2\pi)$ 上服从均匀分布, 时钟相位初始值 τ/T 在 $(0, 1)$ 上服从均匀分布. 图 5 和图 6 分别展示了在不同的信噪比及不同的前导字长度下的误码性能, 理论值是 OQPSK 理想相干接收

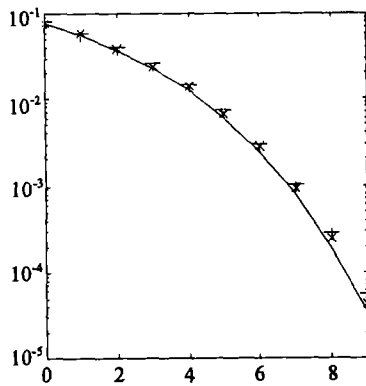


图 5 比特误码率和 SNRb 的关系曲线

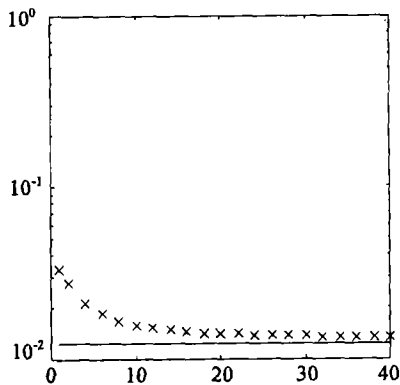


图 6 比特误码率和 K_p 的关系曲线

机的误码性能。从图 5 中可以看出,在误码率为 10^{-3} 处,当前导字为 32 个符号时,接收机误码率性能比理论值仅下降 0.1dB,前导字为 16 个符号时下降 0.2dB。值得注意的是,仅使用 8 个符号的前导字,误码率性能下降值小于 0.6dB,即使如此短的前导字也不会引起误码率性能的急剧下降,这是因为接收机采用开环结构,因此不会有 hang-up 和相位区间跳变问题。图 6 证实了图 3 的预测,即前导字长度达到一定数值后,再增加符号数不会显著改善误码率性能。根据以上讨论,可以说采用 30 个符号左右的前导字,系统就可以取得比较理想的性能。

5 结 论

本文提出了突发模式 OQPSK 接收机的一种快速同步算法。该算法使用一个特定图案的前导字,可以并行、独立地估计各个同步参数。理论分析和仿真结果表明,该 OQPSK 接收机具有快速捕获能力。再者,其基本工作时钟为两倍符号率,接收机结构适合全数字实现。该算法对移动通信、卫星通信等需要突发传送模式来支持随机多用户接入的场合具有普遍意义。

参 考 文 献

- [1] D. C. Cox, H. W. Arnold, P. T. Porter, Universal digital portable communications: A system perspective, IEEE J. on Select. Areas Comm., 1987, SAC-5(5), 764-773.
- [2] B. Kaplan, Hybrid Fiber-Coax(HFC) architecture overview, SPIE, vol. 2609, 1995, 34-38.
- [3] C. Heegard, J. A. Heller, A. J. Viterbi, A microprocessor-based PSK modem for packet transmission over satellite channels, IEEE Trans. on Comm., 1978, COM-26(5), 552-564.
- [4] S. Nakamura, T. Kamisaka, K. Yagi, Y. Takahashi, Advanced digitalized demodulator VLSIs with incoherent sampled detection, Globecom, Dallas, Texas, USA, 1989, 1093-1099.
- [5] F. M. Gardner, Hangup in phase-lock loops, IEEE Trans. on Comm., 1977, COM-19(5), 1210-1214.
- [6] G. Ascheid, M. Oerder, J. Stahl, H. Meyr, An all digital receiver architecture for bandwidth efficient transmission at high data rates, IEEE Trans. on Comm., 1989, 37(8), 804-812.
- [7] H. Meyr, M. Oerder, A. Polydoros, On sampling rate, analog prefiltering, and sufficient statistics for digital receivers, IEEE Trans. on Comm., 1994, 42(12), 3208-3213.
- [8] Y. Matsumoto, Offset QPSK simultaneous carrier and bit-timing recovery scheme-agile acquisition over satellite communication channels, IEICE Trans. on Comm., 1997, E80-B(1), 16-24.
- [9] J. G. Proakis, Digital Communications, Third Version, New York, McGraw-Hill, 1995, 269-272.

A NEW ALGORITHM FOR FAST SYNCHRONIZATION IN A BURST MODE OQPSK RECEIVER

Zhu Jianjun Yao Qingdong

(Dept. of Info. and Electron. Eng., Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Rapid carrier and bit-timing synchronization are essential in burst mode communication systems. A new algorithm for fast synchronization in a burst mode OQPSK receiver is proposed in this paper. The algorithm is based on a specific bit-pattern preamble, which allows total decoupling of the carrier phase and bit-timing phase and thus permits direct, simultaneous estimating of the reference parameters by open-loop approach. It is shown that the algorithm achieves a significantly agile carrier and bit-timing recovery. The algorithm is applicable to satellite communication systems, mobile communication systems etc.

Key words Burst-mode, OQPSK, Synchronization

朱建军: 男, 1974 年生, 博士生, 现主要从事全数字调制解调, 多址接入等方面的研究。

姚庆栋: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 现主要从事数字通信, 图像处理和编码, VLSI 方面的研究。