

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.017

引用格式:王忆蒙,张剑,束锋.低信噪比下突发通信的同步检测[J].电讯技术,2015,55(8):926-930.[WANG Yimeng,ZHANG Jian,SHU Feng. Synchronization Detection at Low SNR in Burst Communication System[J].Telecommunication Engineering,2015,55(8):926-930.]

低信噪比下突发通信的同步检测\*

王忆蒙<sup>1,\*\*</sup>,张 剑<sup>1</sup>,束 锋<sup>2</sup>

(1.中国西南电子技术研究所,成都 610036;2.南京理工大学,南京 210094)

**摘 要:**针对低信噪比下突发通信系统的同步检测问题,提出了一种利用接收信号平均信噪比和瞬时信噪比设置动态检测门限的同步方法,实现了信号检测门限的设置与信号脉冲出现时刻噪声能量的自适应匹配,提高了低信噪比下同步检测概率。计算机仿真表明在同步序列长度为 63 时,信号的有效检测工作信噪比可以降低到-5 dB。该方法适合于低信噪比下运动平台间的突发通信系统。

**关键词:**突发通信;同步检测;匹配滤波;低信噪比

**中图分类号:**TN911.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2015)08-0926-05

Synchronization Detection at Low SNR in Burst Communication System

WANG Yimeng<sup>1</sup>,ZHANG Jian<sup>1</sup>,SHU Feng<sup>2</sup>

(1.Southwest China Institute of Electronic Technology,Chengdu 610036,China;  
2.Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

**Abstract:**In order to deal with the problem of synchronization detection in burst communication system at low signal-to-noise ratio(SNR),a synchronization method is proposed which uses the average SNR and instantaneous SNR of the received signal to set the detection threshold dynamically. The method achieves an adaptive matching for the setting of the signal detection threshold with the noise energy at the pilot signal location,and improves the synchronization detection probability at low SNR. The simulations show that the required SNR of effective signal detection can be reduced to -5 dB when using a 63-length pilot sequence. The method can be applied in burst communication between moving platforms at low SNR.

**Key words:**burst communication;synchronization detection;match filter;low signal-to-noise ratio

1 引 言

在通信系统中,信号的同步捕获是通信信号接收的首要环节,同步性能的优劣直接决定了信号能否准确地解调、信息能否完整地还原。在一般通信系统中,位同步和载波恢复通常采用以锁相环为基础的递归反馈式结构。由于锁相环路存在拖拽效应<sup>[1]</sup>,同步捕获和保持往往需要数百个前导字符号才能取得理想的性能,而突发通信中的脉冲长度一般只有几十到上千个符号,采用传统的锁相环技术

将导致非信息传输开销过大,降低通信效率。因此,在突发通信中一般采用数据辅助同步技术,设计为前向开环结构,可以实现信号的快速同步捕获。文献[2]提出了一种突发模式下相移键控(Phase Shift Keying,PSK)信号的快速载波估计和位时钟恢复算法,采用匹配滤波直接获取频差和位同步信息,算法结构简单,但系统的同步捕获需要较高的信噪比。文献[3]通过对同步头做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT),可以同时进行信号检测和

\* 收稿日期:2014-11-04;修回日期:2015-05-14      Received date:2014-11-04;Revised date:2015-05-14

\*\* 通讯作者:wangyimeng1990@yeah.net      Corresponding author:wangyimeng1990@yeah.net

• 926 •

频偏估计,能够在较大载波频偏和较大的信号动态范围内工作,但同样需要较高的信噪比。对于低信噪比通信环境,同步捕获使用了较长的导频序列,并且为了消除收发间的多普勒频移及本振频差对导频序列相关特性的影响,文献[4-5]提出了频差与时间同步联合估计的方法。此外,文献[6]提出了一种快速数字捕获和 FFT 辅助的 Costas 载波跟踪算法的载波同步实现方法,满足了有限长度导频序列内,在低信噪比和高动态条件下完成短时猝发信号捕获和载波跟踪的要求。但是,这些算法的结构显得过于复杂而难以实用。对于频差较小的场合,文献[7]提出了频差与码同步联合并行捕获的方法,由于每个频差对应了一组相关检测处理,该算法的实现也需要较高的运算量。文献[8]设计了特殊的多导频序列组合,可以实现低信噪比下的同步捕获,但其导频开销过大,严重降低了系统的通信效率。此外,在突发通信的同步检测中,除了设计优良的判决统计量外,判决门限的设置对检测性能的优劣同样影响很大。传统检测方法中一般使用固定门限,虽然实现简单,但受信号强度变化影响较大。针对这一问题,文献[9-10]提出了自适应门限的方法,使检测性能在信号强度变化较大范围时仍然保持稳定,但这些自适应门限的方法在负信噪比通信环境下的检测性能并不理想。

针对上述问题,本文提出了一种新的突发位同步捕获方法。该方法在导频序列的相关幅度运算后引入匹配滤波处理降低噪声对同步定位的影响,并且在同步检测中根据两级信噪比参数估计值动态调整检测门限,使检测门限随信号平均信噪比及导频序列位置瞬时信噪比变化,改善了低信噪比下的同步检测能力。仿真分析表明,采用长度为 63 的导频序列可以在信噪比为-5 dB时达到 99% 的同步捕获概率。该方法降低了相同导频序列长度上同步捕获的信噪比门限,因此在相同信噪比门限上可以使用更短的导频序列,而短的导频序列可以有效降低多普勒频偏对序列相关性能的影响,降低同步开销的比例,提高系统的通信效率。

2 系统模型

低信噪比下的突发通信系统一般应用于应急通信和军事通信领域,通信系统需要在发送功率有限的条件下实现最大的通信距离,为了充分利用发射

功率,突发通信信号大多采用相位连续的恒包络调制信号<sup>[11]</sup>。突发通信系统中信号的帧格式如图 1(a)所示,突发帧前端包含了  $K$  组相同的导频序列用于信号的位同步、载波同步、初始相位估计等功能实现,后面为编码后的信息符号序列。接收端,突发同步的处理流程如图 1(b)所示,图中离散采样后的基带接收信号表示为

$$r(k)=\exp(j2\pi h\sum_{n=-\infty}^{\infty}a_nq(kT_0-nT_b-\varepsilon T_b)+\\(j2\pi\Delta f kT_0+\theta_0))+N(kT_0)。$$

(1)

式中,  $a_n$  为取值为  $\pm 1$  的导频序列,  $h$  为调制系数,  $T_0$  为采样间隔,  $T_b$  为符号周期,  $\varepsilon$  为从发射机到接收机的时延参数,  $\Delta f$  为收发端载波频偏,  $\theta_0$  为载波随机相位,  $N(kT_0)$  为零均值高斯白噪声,  $q(t)$  为调制器的相位响应函数。

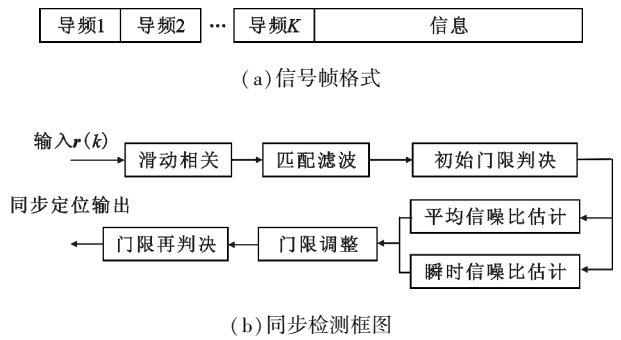


图 1 信号格式与同步检测处理流程图  
Fig. 1 Signal frame and synchronization scheme

在突发信号的捕获中,基带接收信号  $r(k)$  首先与已知的本地导频序列进行逐采样点的相关运算,得到对应于每个采样点的实数序列;用无噪声、无频偏、理想条件下的归一化相关峰值作为滤波器的参数,对滑动相关后的实数序列进行匹配滤波,降低噪声导致的相关峰波动;然后进行初始门限判决,对超过门限值处的采样数据序列进行平均信噪比和瞬时信噪比估计,并根据估计值对门限进行调整;再次对过初始门限的相关序列点进行门限判决,如果仍然超过门限则定位同步输出。

3 同步算法

数字采样后的脉冲基带复数信号记为  $r(k)$ ,  $k=1, 2, \dots$ , 本地已知的相位编码序列  $C=[c(1), c(2), \dots, c(N)]$ , 序列长度为  $N$ 。如图 1 所示,图中接收信号同步处理中的滑动相关由下式实现:

$$z(k) = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N r(k-iK_s+K_s) c^*(i))^2. \tag{2}$$

式中,  $K_s$  为采样率相对于信号符号率的倍数。对滑动相关处理后的信号相关值进行匹配滤波处理得到

$$z'(k) = \sum_{n=-K_s}^{K_s} z(k-n) \text{fac}(n). \tag{3}$$

式中,  $\text{fac}(n)$  为滤波器系数, 且  $n = -K_s \sim K_s$ , 该系数由在无噪声无频偏理想条件下对同步发送信号的相关运算得到:

$$\text{fac}(n) = \frac{1}{K_s} | \sum_{i=1}^N s(n-iK_s+K_s) c^*(i) |. \tag{4}$$

式中,  $s(n)$  为同步序列对应调制信号的基带离散采样。对匹配滤波后的相关序列  $z'(k)$  进行初始门限  $\text{TH}_1$  比较, 当检测到序列  $z'(k)$  有大于门限的样本时, 计算当前接收信号的平均信噪比估计值  $\text{SNR}$  和样本对应位置信号的瞬时信噪比估计值  $\text{SNR}_t$ , 其中平均信噪比的估计算法采用文献[12]提出的通用高阶矩估计方法, 其各阶矩的计算如下列各式所示:

$$M_2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K r(k_x-i) r(k_x-i)^*, \tag{5}$$

$$M_4 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |r(k_x-i)|^4, \tag{6}$$

$$M_6 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |r(k_x-i)|^6. \tag{7}$$

式中,  $K$  为估计算法所使用的数据长度,  $k_x$  为相关序列  $z'(k)$  超过初始门限的样本序号, 则噪声能量和对应的信噪比估计如下式所示:

$$N_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{M_4}{M_2} - \sqrt{\left( \frac{M_4}{M_2} \right)^2 + \left( \frac{M_2 M_4 - M_6}{M_4} \right)} \right), \tag{8}$$

$$\text{SNR} = \frac{M_2 - N_0}{N_0}. \tag{9}$$

对于过门限处信号的瞬时信噪比的计算, 利用已知同步序列的信息进行相关运算, 信号及噪声的等效能量可以由下式计算:

$$M_0 = \frac{1}{N} | \sum_{i=1}^N r(k_x-iK_s+K_s) c(i)^* |, \tag{10}$$

$$M_3 = \frac{1}{N} | \sum_{i=1}^N |r(k_x-iK_s+K_s)|^2 - | \sum_{i=1}^N r(k_x-iK_s+K_s) c(i)^* |^2 |, \tag{11}$$

$$\text{SNR}_t = \sigma \frac{M_0}{M_3}. \tag{12}$$

瞬时信噪比由  $\text{SNR}_t$  表示, 其中  $\sigma$  为估计修正因子且

$$\sigma = \left( \frac{3}{2\sqrt{M_3} + M_0} \right). \tag{13}$$

通过平均信噪比和瞬时信噪比的估计分别对  $k_x$  处初始门限  $\text{TH}_1$  进行调整, 调整公式如下:

$$\text{TH}_2 = \begin{cases} \text{TH}_1, & \text{SNR} \leq 2 \\ \text{TH}_1 + \text{SNR}, & 2 < \text{SNR} \leq 5, \\ \text{TH}_1 + 6, & \text{SNR} > 5 \end{cases} \tag{14}$$

$$\text{TH}_3 = \begin{cases} \text{TH}_2, & \text{SNR}_t \leq 0.3 \\ \text{TH}_2 + 3.5 \text{SNR}_t, & \text{SNR}_t > 0.3 \end{cases}. \tag{15}$$

将  $z'(k)$  与调整后的门限  $\text{TH}_3$  进行比较, 如果相关值仍然大于更新后的门限值则确认同步信号的到达。在  $\text{TH}_3$  的动态调整中为了避免门限在高信噪比下的波动, 当  $\text{TH}_3$  超过某一设定最大值后就设置该值为  $\text{TH}_3$  的当前值。公式(14)、(15)中参数的设置和通信系统中同步序列长度、信号调制方式有关, 这些参数的选择由通信系统设计要求的信道环境决定。

4 性能仿真分析

对同步算法进行性能评估的计算机仿真中, 通信信道为高斯白噪声信道, 相关序列  $C(i)$  采用长度为 63 的 m 序列, 信号调制采用文献[11]的连续相位调制, 仿真中初始门限  $\text{TH}_1$  设置为 8, 信号采样率为符号率的 8 倍, 平均信噪比估计中使用了  $K=512$  个采样样本。图 2 中给出了在不同信噪比下门限  $\text{TH}_3$  的变化情况, 仿真中设定门限最大值为 22。图中  $x$  轴表示基带信号的信噪比,  $y$  轴表示该信噪比下  $\text{TH}_3$  的统计平均值。由仿真分析可以看出, 当信噪比由 -5 dB 变化到 +10 dB 时, 检测门限由 8 上升到最大值 22, 基本符合线性变化的趋势。

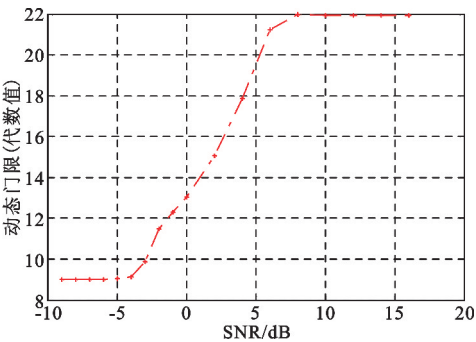


图 2 检测门限随信噪比变化关系  
Fig. 2 Detection threshold versus SNR

图 3 为本文所提出的同步方法与设置固定门限检测算法及文献[9-10]提出的自适应门限同步方法的仿真对比, 仿真中固定门限分别设置为 8、11、

14、17。图 4 为图 3 中概率接近 1 附近的局部放大。由图中的仿真结果可以看出,当检测门限设置为 8、11 时,在信噪比为 $-5 \sim -1$  dB段时,可以达到较高的同步概率,但随着信噪比的提高,同步检测性能逐渐恶化。当检测门限设置为 14、17 时,要求信噪比分别大于 $-1$  dB、 $1$  dB后才能实现较高的同步检测概率。这是因为在低信噪比时,同步相关脉冲幅度值较低,降低检测门限值才能达到较高的检测概率,而当信噪比增加后,同步相关脉冲幅度值增加的同时,非同步符号位置的相关检测运算的幅度计算值也会增加,如果仍然采用较低的检测门限会导致大量误同步的产生,导致无法正确定位同步位置,降低了同步检测概率。自适应同步检测算法的检测概率随着信噪比的增加而逐渐增大,但是在采用同样的长度为 63 的 m 序列的条件下,当信噪比大于 0 时才能实现较高的同步检测概率。对比本文提出的同步检测方法可以看出,由于检测门限同时考察了信号的平均信噪比和同步脉冲位置的瞬时信噪比,使门限的设置与信号脉冲出现时刻的噪声能量相匹配,提高了信号检测的概率,实现信噪比大于 $-5$  dB时检测概率大于 99.4% 的性能。

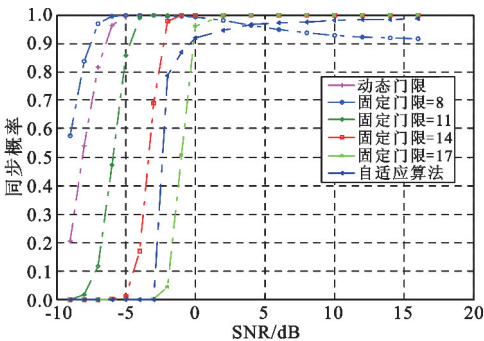


图 3 不同门限设置下的同步检测性能对比  
Fig.3 Synchronization performance comparison in different detection thresholds

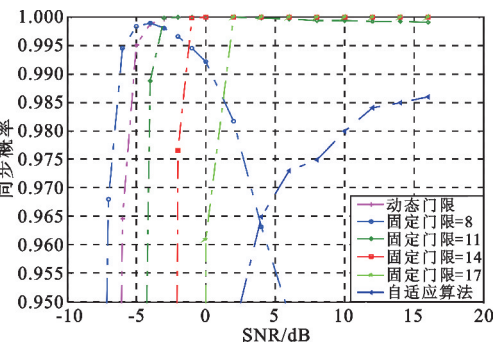


图 4 图 3 的局部放大图  
Fig. 4 Partial enlarged view of Fig. 3

5 结束语

本文针对低信噪比下的突发通信系统提出了一种同步检测方法,该方法利用对信号的平均信噪比估计和同步脉冲位置的瞬时信噪比估计动态调整同步检测的门限,实现了检测门限对高低信噪比通信环境下的自适应设置。计算机仿真表明,当同步序列长度为 63 个符号时,达到了在信噪比为 $-5$  dB时的较高同步检测概率。此外,算法实现中设计了两级门限比较结构,只有当信号相关幅度值到达某一最低门限后才会启动信噪比估计算法运算和动态的门限调整,有效降低了算法实现的运算量。由于本算法的提出降低了相同长度同步符号下,接收机的信号检测工作信噪比,比较适合应用于低信噪比下运动平台间的突发通信环境中。

参考文献:

[1] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.  
ZHANG Juesheng, ZHENG Jiyu, WAN Xinping. Phase-Lock Technique [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. (in Chinese)

[2] 邓洁. 突发模式下 PSK 信号的载波估计和位同步技术[J]. 电讯技术,2007,47(3):94-97.  
DENG Jie. Carrier-Estimation and Symbol-Synchronization in Burst Mode PSK Transmission[J]. Telecommunication Engineering,2007,47(3):94-97. (in Chinese)

[3] 姚国义,李鑫,兰瑞田. 一种突发通信信号检测与频偏估计算法[J]. 无线电通信技术,2014,40(4):22-23.  
YAO Guoyi, LI Xin, LAN Ruitian. An Algorithm of Signal Detection and Frequency Offset Estimation in Burst Communication [J]. Radio Communications Technology, 2014,40(4):22-23. (in Chinese)

[4] Glisic S G, Poutanen T J, Wu W, et al. New PN code acquisition scheme for CDMA networks with low signal-to-noise ratios [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999,47(2):300-310.

[5] 史治平,唐发建,晏辉,等. 极低信噪比下的导频联合编码辅助载波同步算法[J]. 电子与信息学报,2011,33(10):2506-2510.  
SHI Zhiping, TANG Fajian, YAN Hui, et al. Joint Assisted Carrier Synchronization Algorithm by Pilot and Code at Extremely Low SNR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011,33(10):2506-2510. (in Chinese)

[6] 王杰英,张永鑫,李军. 猝发信号载波同步技术研究及实现[J]. 舰船电子工程,2014,34(4):181-183.  
WANG Jieying, ZHANG Yongxin, LI Jun. Research and

- Implementation of Carrier Synchronization for burst signals [J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34 (4): 181 - 183. (in Chinese)
- [7] 王呈贵, 阚春荣. DSSS 信号在低 SNR 下的同步捕获算法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 972-974.  
WANG Chenggui, KAN Chunrong. Synchronization Acquisition Algorithm for DSSS in Low SNR [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 972-974. (in Chinese)
- [8] 罗仁泽, 蒋涛, 敬龙江, 等. 一种低信噪比 SMCC+系统快速同步算法[J]. 信号处理, 2005, 21(3): 236-239.  
LUO Renze, JIANG Tao, JING Longjiang, et al. Fast Synchronization Scheme for SMCC+ System with Lower SNR [J]. Signal Processing, 2005, 21(3): 236-239. (in Chinese)
- [9] 吴玉成, 陈宁, 高珊. 突发通信中的自适应门限信号检测方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2896-2898.  
WU Yucheng, CHEN Ning, GAO Shan. Adaptive Threshold Signal Detection Method for Burst Communication [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12): 2896-2898. (in Chinese)
- [10] 吴玉成, 陈婷婷. 在滑动窗口中判决的自适应门限检测方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2770-2773.  
WU Yucheng, CHEN Tingting. Adaptive Threshold Detection Scheme in Gliding Window [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2770-2773. (in Chinese)
- [11] 周兴建, 张剑, 卢建川. 一种四进制连续相位调制新方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(4): 442-446.  
ZHOU Xingjian, ZHANG Jian, LU Jianchuan. A New Method of Quad-system Continuous Phase Modulation [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4): 442-446. (in Chinese)

- [12] Bakkali M, Stephenne A, Affes S. Generalized Moment-Based Method for SNR Estimation [C]//Proceedings of 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon: IEEE, 2007: 2226-2230.

## 作者简介:



王忆蒙(1990—),女,四川汶川人,2015年于南京理工大学获硕士学位,主要研究方向为频谱感知技术;

WANG Yimeng was born in Wenchuan, Sichuan Province, in 1990. She received the M. S. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2015. Her research concerns spectrum sensing technology.

Email: wangyimeng1990@yeah. net

张 剑(1977—),男,四川眉山人,2008年于电子科技大学获博士学位,现为高级工程师,主要研究方向为无线通信技术及其信号处理;

ZHANG Jian was born in Meishan, Sichuan Province, in 1977. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now a senior engineer. His research interests include wireless communications and signal processing.

束 锋(1973—),男,安徽桐城人,2002年于东南大学获博士学位,现为研究员、博士生导师,主要研究方向为无线通信系统基本理论和关键技术、雷达信号处理、无线定位。

SHU Feng was born in Tongcheng, Anhui Province, in 1973. He received the Ph. D. degree from Southeast University in 2002. He is now a senior engineer of professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns basic theory and key technology of wireless communication system, radar signal processing and wireless location.