

# 移动自组织网络中可变速率自适应同步捕获

李维英, 吕卓, 李建东, 汤伟良

(西安电子科技大学 信息科学研究所宽带无线通信实验室 陕西 西安 710071)

**摘要:** 基于多进制正交扩频通信的原理, 提出一种同步信道辅助的多进制正交扩频系统设计方案. 通过传输两个逻辑信道, 分别实现快速同步捕获和高速信息传输. 即传输多进制正交扩频的数据信息同时, 传输一路同步和控制逻辑信道, 来建立接收端的载波和码元同步. 采用具有尖锐单峰特性自相关函数的巴克(Barker)码做同步码组, 且利用巴克码的不同组合传递数据速率信息. 依据匹配滤波器的算法原理, 实现快速同步捕获. 并据移动通信信道的特点, 提出了自适应门限的思想, 设计实现了适合于移动自组织网络指标要求的应用系统, 证实了方案的有效性.

**关键词:** 扩频通信; 移动自组织网络; 匹配滤波器; 自适应门限

**中图分类号:** TN914.42    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2005)05-0737-05

## Variable-rate-supported adaptive synchronization in Ad-hoc network

LI Wei-ying, LÜ Zhuo, LI Jian-dong, TANG Wei-liang

(Broadband Wireless Communications Lab., Information Science Inst.,  
Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the principle of the M-ary orthogonal spread spectrum, we propose a fast variable-rate-supported synchronization method by an assistant logic channel. Data and synchronization information are transmitted in data and assistant channel respectively. Different combinations of Barker codes make up the synchronization codes to represent different rates. By the principle of the matched filter and the characteristic of mobile channels, an adaptive threshold algorithm is also proposed for Ad-hoc networks.

**Key Words:** spread spectrum; Ad-hoc networks; matched filter; adaptive threshold

移动自组织网络中各节点通过对网络拓扑的探测, 建立稳定的网络结构, 并且能够灵活地适应网络拓扑的变化, 进而完成多种用户业务(包括语音、数据和图像)的通信, 以及有线互联网络与无线数据通信网络的互联. 在移动通信环境中, 除了路径损耗外, 还常常要受到噪声、干扰、多径衰落、多普勒频移等影响, 信道条件恶劣<sup>[1]</sup>. 在选择数据传输的调制方式时, 必须考虑抗干扰能力强, 能适用于快衰落信道; 占用较小的带宽, 以提高频谱利用率; 并且带外辐射要小, 以减小对邻道的干扰等因素. 扩频通信具有较强的抗干扰、抗衰落、抗多径能力, 并具有隐蔽性<sup>[2,3]</sup>, 在军事通信中被广泛采用. 笔者将针对多进制正交扩频通信系统中关键技术——同步捕获进行讨论.

## 1 系统同步策略

在一般通信系统中的同步概念是载波同步、位同步、帧同步, 而扩频通信系统首先要解决的是解扩问题, 即扩频码片的解析. 而且扩频系统对同步的要求是精度高、建立时间快、同步保持时间长和失步概率小. 因

收稿日期 2004-10-18

基金项目: 国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 国家自然科学基金重大项目60496316第6子课题(新型载波系统和智能无线媒体接入技术); 国家863计划重大课题(2001AA123031)

作者简介: 李维英(1950-), 女, 教授.

此 结合扩频通信的特点 对同步方案采取必要的措施 方可有效获得扩频增益.

在多进制正交扩频的方法中 通常采用 Walsh 函数来实现正交扩频 而 Walsh 函数的正交性只有在完全码片同步的情况下方可保证 其部分相关、自相关函数的特性都比较差. 图 1 以序列  $W_{12}$  为例给出了一个长度为 32 的 Walsh 函数序列的自相关特性 从图中可看出 ,Walsh 函数序列在一个周期内出现了多个相关峰 不可能用于扩频信号的同步捕获. 因此 采用 Walsh 函数的多进制正交码扩频信号时 必须提供额外的同步信息才能正确解扩<sup>[4]</sup>. 结合多种军事扩频通信系统和商用 CDMA 通信网络的成功经验,下面提出一种同步信道辅助的多进制正交码扩频系统设计方案,即传输多进制正交码扩频的数据信息同时,传输一路同步和控制信道,来建立接收端的载波和码元同步. 图 2 给出了完整的多进制正交码扩频系统方案框图.

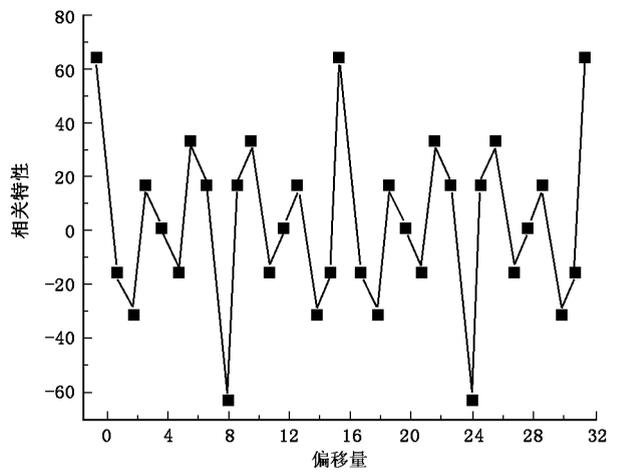


图 1  $W_{12}$  自相关特性

物理信道 I 主要传输同步信息、速率信息和自组织信息等控制信息,扩频码采用 63 位的 m 序列后面补 1 形成 64 位的伪随机序列,专供系统进行快速同步. 物理信道 Q 传输数据信息,采用常规的 Walsh 函数进行多进制正交码扩频,且信息速率是可变的.

帧同步通常利用在数字信息流中插入特殊的码组作为每帧的头尾标记. 在接收端产生与发射端相同的码组,并与接收到的信号进行相关运算,当相关值为最大时,就认为找到了帧的起始位置. 最佳帧同步的码组应具有尖锐单峰特性的局部自相关函数,而且识别器要尽量简单,巴克(Barker)码具有该特性. 且利用巴克码的不同组合传递信息速率的变化.

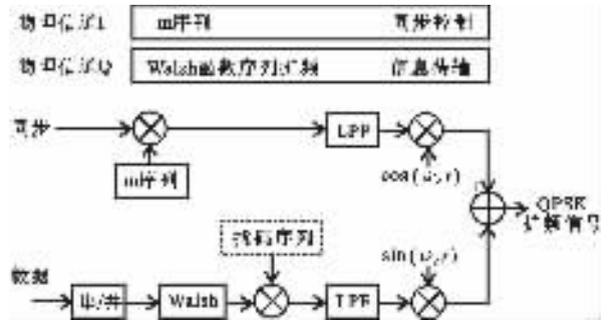


图 2 多进制正交扩频信号的产生

## 2 扩频序列的同步捕获

扩频序列的捕获是指接收机在开始接收扩频信号时调整 and 选择本地扩频序列的相位,使收发信机扩频序列的相位一致,所以捕获又叫扩频序列的初始同步或粗同步过程. 由于捕获过程通常在载波同步之前进行,载波的相位是未知的,所以大多数的捕获方法都是用非相干检测.

从理论上讲,匹配滤波方法是获得伪随机序列初始同步的最佳方案<sup>[5]</sup>,可在中频实现,也可在基带实现. 匹配滤波器的基带实现方法是直接对接收信号以码片速率采样,然后采用数字方式进行匹配,其实质是抽头延迟线再加累加器,是一种并行捕获方案,可对伪随机序列进行快速的捕获,大大缩短捕获时间. 但实现时需要多个并行的支路,故适用于短周期的 PN 序列的捕获. 图 3 给出了一种匹配滤波方法同步捕获原理框图.

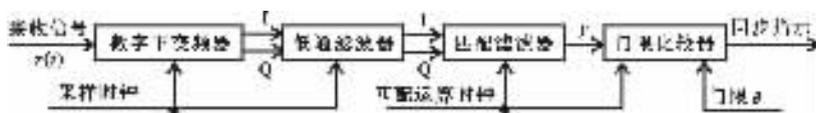


图 3 匹配滤波同步捕获器

该同步捕获器首先将接收信号下变频至基带,送入低通滤波器,再由匹配滤波器求相关值能量,然后由

门限比较器输出同步指示信号,即输出相关峰.假设长度为  $N$  的本地 PN 序列的定时与接收信号中 PN 序列的定时误差为  $\tau$  时,匹配滤波器输出信号为

$$y = y_1 + j y_Q = N E_c^{1/2} R(\tau) \exp(j\phi) + z \quad (1)$$

其中  $E_c$  是码片的能量,信号  $y$  的实部  $y_1$  和虚部  $y_Q$  为相互统计独立的高斯随机变量.其均值和方差分别为

$$E(y_1) = N E_c^{1/2} R(\tau) \cos \phi \quad (2)$$

$$E(y_Q) = N E_c^{1/2} R(\tau) \sin \phi \quad (3)$$

$$\text{Var}(y_1) = \text{Var}(y_Q) = NN_0/2 \quad (4)$$

可见匹配滤波器的输出是定时误差  $\tau$  的函数,同时捕获是基于匹配滤波器相关运算结果(即相关峰)与门限进行比较判断的结果.一旦高于门限则认为捕获到信号,因而检验正确与否是匹配滤波同步捕获器的关键性能指标.通常采用检测概率和虚警概率来评价匹配滤波同步捕获方案的性能.检验概率是当相关峰高于门限  $\theta$  正确时,检验获得通过的概率;虚警概率是指当相关峰高于门限但不正确时,检验获得通过的概率,即误告警概率.引起误警概率的原因主要是噪声和干扰的影响,因而固定门限是难以兼顾二者的要求,为设置合理的门限,笔者提出动态的自适应门限的思想和算法.

### 3 自适应门限控制和定时跟踪

(1) 自适应门限控制算法 在 AWGN 和瑞利衰落信道下,检验概率和虚警概率均是判决门限  $\theta$  的函数.对于特定的信道环境下,当  $\theta$  取较大数值时,虚警概率减小,检测概率也同时减小;当  $\theta$  取得过小时,检测概率和虚警概率同时增大.另一方面,检测概率和虚警概率与背景噪声  $V$  有关系<sup>[6]</sup>.因此在实际系统中,有必要根据当前背景噪声的强弱自适应地改变判决门限,以保持适当的检测概率和虚警概率.

考虑在 AWGN 信道情况,当给定虚警概率  $P'_F$  时,可求得判决门限为  $\theta = -V \ln P'_F = \alpha V$ ,其中  $\alpha$  为常数.因此在接收机中,若对背景噪声的功率进行估计,将判决门限设定为背景噪声功率的倍数,即  $\theta = \alpha V$ ,即可满足系统设计对虚警概率的要求.

根据前面的分析有

$$E(Y) = E(y_1^2 + y_Q^2) = E(y_1^2) + E(y_Q^2) = V \quad (5)$$

而对于所有假设中假设正确概率较小的情况,如 PN 序列的周期较长的情况,可将对所有假设检验的检验变量  $Y_k(k = 1, 2, \dots, M)$  构成的随机过程变量视为平稳过程,并且可得到

$$E(Y) = V = (1/M) \sum_{k=1}^M Y_k \quad (6)$$

因此,可求取检测变量序列的时间平均作为背景噪声功率  $V$  的估值.

图 4 是该系统使用的自适应门限控制算法的漏检概率(本应检测到相关峰,但是相关峰未超过门限的概率)和误警概率在 AWGN 信道下随信噪比的曲线.此处信噪比的定义是码片能量和高斯白噪声能量之比.可看到,在低信噪比的情况下,由于相关峰淹没在噪声当中,漏检概率几乎是 1,但是随着信噪比的增加,漏检概率急剧下降.由于使用自适应门限,在信噪比恶劣的情况下,相关峰几乎等同于噪声,系统工作的时候认为输入信号都是噪声干扰,此时很难有超过判决门限的情况,所以误警概率也很低,而随着信噪比的增加,误警概率逐渐变小.

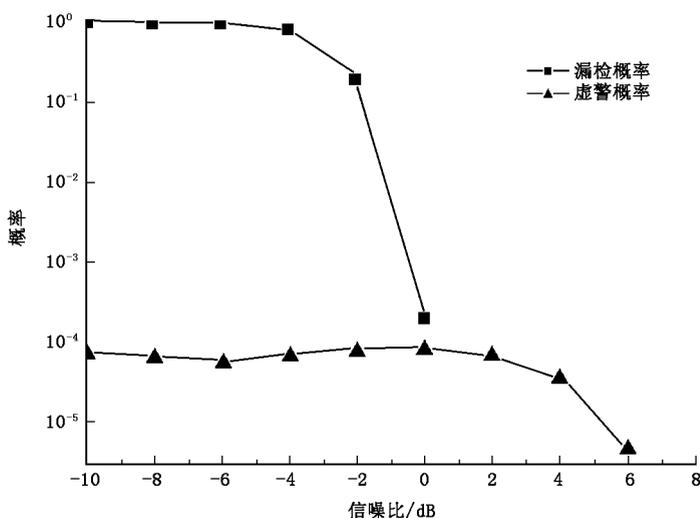


图 4 漏检概率和误警概率在 AWGN 信道下随信噪比的曲线

由于该系统为了实现方便所采用的是 63 位 m 序列后面补 1 而形成的 64 位伪随机序列,这样在一定程

度上就破坏了  $m$  序列优良的自相关特性,所以如果只使用  $m$  序列,其漏检概率和误警概率会更小.

(2) 定时跟踪 完成扩频序列的捕获以后,本地序列相位与接收信号的相位基本一致,通常误差在  $1/2$  码片时间内.由于收发时钟的不稳定性,收发信机之间的相对运动以及传播路径时延变化等因素,已同步的本地序列相位会出现抖动偏差.因此扩频通信系统为了保证准确、可靠的工作,除了要实现扩频序列的捕获,还需进行扩频序列的跟踪.跟踪过程又叫细同步过程,跟踪环路不断校正本地序列发生的时钟相位,使本地序列的相位变化与接收信号相位变化保持一致,实现对接收信号的相位锁定.跟踪的工作原理基于正确估计出本地序列与接收信号的相位差,并根据该相位差产生能减小该相位差的控制信号,保证本地序列相位变化与接收信号一致.

伪随机序列的定时跟踪通常可采用基于迟早门定时误差检测器的延迟锁定环(Delay-Locked Loop,简称 DLL),它是依据信道波形自相关函数的偶对称性(见图5)来设计的.下面分别介绍其工作原理.

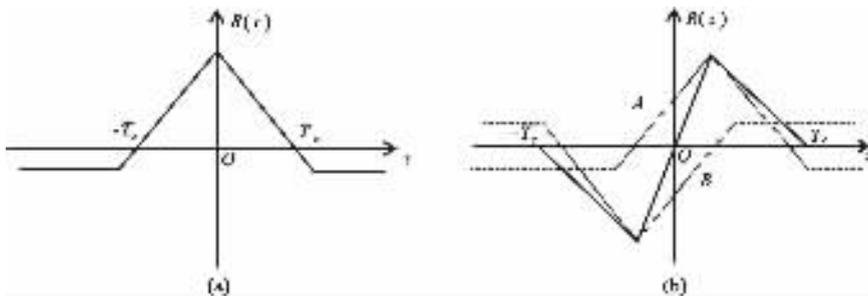


图5 扩频序列的相关特性

图5中的(a)是扩频序列的自相关函数  $R(\tau)$ ,可看出当  $\tau = 0$  时,相关值最大.(b)的虚线A是自相关  $R(\tau)$  移位  $T_c/2$  后的自相关函数  $R(\tau - T_c/2)$ ,虚线B为移位  $-T_c/2$  后的自相关函数  $R(\tau + T_c/2)$  取负值.两个移位的自相关函数  $R(\tau - T_c/2)$  和  $R(\tau + T_c/2)$  相加,得到扩频序列跟踪的鉴相曲线,即图5中(b)的实线.由此鉴相曲线可以看出,当两序列相位差  $\tau = 0$  时,鉴相器输出为0;当  $\tau \neq 0$  时(此时  $|\tau| \leq T_c/2$ ),鉴相器输出一个与  $\tau$  成正比的有极性信号.通过利用该信号控制本地序列的相位,减少  $\tau$ ,实现闭环控制.根据上述分析,定时误差估计的计算公式为

$$D(\tau) = R(\tau - T_c/2) - R(\tau + T_c/2) = \begin{cases} \frac{N+1}{N} \cdot \frac{\tau}{T_c/2}, & |\tau| \leq T_c/2, \\ -\frac{N+1}{N} \cdot \frac{\tau}{T_c} \left[ 1 - \frac{3T_c}{2|\tau|} \right], & \frac{T_c}{2} \leq |\tau| \leq \frac{3T_c}{2}, \\ 0, & \frac{3T_c}{2} \leq |\tau| \leq N - \frac{3T_c}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

式中  $N$  是扩频序列周期.

扩频序列的跟踪环路可以分成两大类:一类是利用接收信号相位信息的相干跟踪环路;另一类是非相干跟踪环路.实际的扩频通信系统通常都工作在较低的信噪比下,相干解调所需的载波相位不易得到,而非相干跟踪环路用平方律检波器(见图6)作能量检测,不受数据调制及载波相位的影响.

接收信号下变频至基带,经过低通滤波器后分别送到两个支路,与PN序列进行相关运算.这两路PN序列相对于本地序列分别超前和滞后  $T_c/2$ ,它们的相关器具有相同的相关特性,但两者的相关峰出现的时间相差  $T_c$ .相关器的输出经平方律检波器得到输出信号的能量,该两路能量相减作为定时误差信息,经环路滤波器后对数控振荡器(NCO)进行控制,向减小跟踪偏差的方向调整.

## 4 结束语

为提高通信系统的频带利用率,寻求高效的抗干扰能力强隐蔽性强的调制解调技术并在“DSP + FPGA”

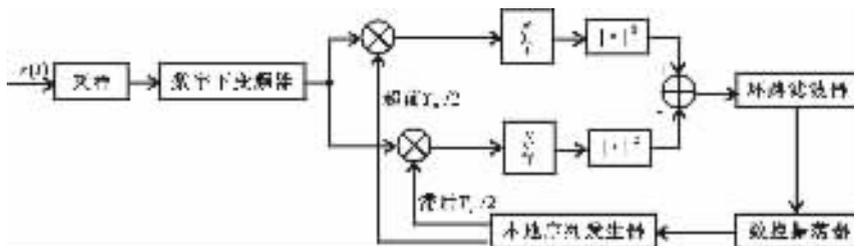


图6 非相干延迟锁相跟踪环路

的硬件平台实现了多进制正交扩频高速调制解调器,用FPGA实现了全部同步算法以及正交扩频编码和解码,并可自适应变速.系统结构简单,便于实现系统集成.试验结果,证明了方案的正确性.

## 参考文献:

- [1] 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信(修订本)[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.
- [2] Torrieri D J. Performance of Direct-sequence Systems with Long Pseudonoise Sequence[A]. IEEE JASC: Vol 10[C]. [s.l.]: IEEE, 1994. 770-781.
- [3] Viterbi A J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication[M]. [s.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [4] 陈育斌. 高速分组无线网关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2000.
- [5] 薛筱明, 李建东. 多进制正交码扩频系统的解扩和同步技术及其实现[J]. 电子学报, 1998, 26(1):105-110.
- [6] 谢斌, 李建东. 正交扩频系统的抗干扰性能分析[J]. 电子学报, 1994, 22(10):60-65.

(编辑:李维东)

(上接第736页)

## 参考文献:

- [1] Milstein L B. Interference Rejection Techniques in Spread Spectrum Communication[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(6):657-671.
- [2] Zhou Jianyong, Song Guoxiang. Signal Reconstruction Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(2):223-226.
- [3] Yang Weiming, Bi Guangguo. Adaptive Wavelet Packet Transform-based Narrowband Interference Canceller in DSSS Systems[J]. IEE Electronics Letters, 1997, 33(14):1189-1190.
- [4] Akansu A N, Liu Y. On-signal Decomposition Techniques[J]. Optical Engineering, 1991, 30(7):912-919.
- [5] Mehmet V T, Ali N A. Adaptive Subband Transforms in Time-Frequency Excisers for DSSS Communication Systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43(11):2776-2782.
- [6] 丁玉美, 阔永红, 高新波. 数字信号处理——时域离散随机信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.

(编辑:齐淑娟)

