

DS-UWB 系统中利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步算法研究

齐丽娜 朱洪波

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: DS-UWB 系统是否能够获得快速可靠的信号同步是系统设计的一项重要指标。该文在最大值选择/过门限 (MAXimum selection/Threshold Comparison, MAX/TC) 准则 DS-UWB 系统同步捕获算法的基础上, 提出一种采用辅助序列的 MAX/TC 准则改进型同步捕获算法, 算法利用辅助序列信息判断本地伪随机序列发生器相位更新方向, 能够较大幅度降低系统伪随机序列同步捕获时间; 通过对改进算法进行较为详细的理论分析, 并且在超宽带室内信道环境中进行仿真实验, 结果表明, 采用该算法可以在保证系统同步捕获性能的同时有效缩短平均同步捕获时间。

关键字: 直接序列超宽带; 多区最大值选择和过门限; 伪随机序列; 辅助序列; 平均捕获时间

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2943-05

Study of MAX/TC Criterion Acquisition Algorithm Using Auxiliary Sequence for DS-UWB System

Qi Li-na Zhu Hong-bo

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The code acquisition is an important issue of DS-UWB system design. Because the MAXimum selection/Threshold Comparison (MAX/TC) criterion for code acquisition has good performance in DS-UWB system, in this paper, a MAX/TC criterion for code acquisition algorithm using the information of the auxiliary sequence, which can be used to reduce the acquisition time of the coarse Pseudo-Noise (PN) sequences, is presented. Then the theoretical analysis is given and simulation tests of proposed acquisition algorithm are carried out in UWB indoor channel environment. The simulation results show that with the proposed algorithm, the mean acquisition time can be reduced considerably while the acquisition performance is maintained.

Key words: Direct Sequence Ultra WideBand (DS-UWB); MAXimum selection/Threshold Comparison (MAX/TC); Pseudo-Noise (PN) sequence; Auxiliary sequence; Mean acquisition time

1 引言

在DS-UWB^[1]通信系统中, 由于信号脉冲持续时间极短, 占空比极小, 工作信噪比低, 同时系统主要应用于室内密集多径环境, 获得快速可靠的信号同步至关重要。常用的同步算法将伪随机序列码的搜索区间离散为多个单元, 对每个单元逐一进行滑动相关检测, 根据捕获准则的不同可以分为最大值选择 (Maximum Selection, MAX) 准则捕获^[2]和过门限 (Threshold Comparison, TC) 准则捕获^[3]两种: MAX 准则捕获选取检测变量在检测区间内最大时的位置作为信号的同步位置, 而 TC 准则捕获则是将检测变量首次超过预设门限的位置作为码的捕获位置。文献[4]详细比较了这两种算法的捕获概率和捕获时间性能, MAX 准则捕获具有更高的捕获概率, 但是捕获时间较长, TC 准则捕获算法需要预设门限,

而门限设定对同步性能具有很大影响。文献[5]提出一种最大值选择/过门限 (Maximum Selection/Threshold Comparison, MAX/TC) 准则同步捕获算法, 首先将整个伪随机序列 (Pseudo-Noise, PN) 码的搜索区间分成若干个子单元组, 在第一个子单元组中搜索最大值, 与预设门限比较, 如超过门限则认为已捕获成功, 否则进入下一个子单元组用相同的方法进行检测, 直到某个子单元组的最大值超过门限, 若整个区间搜索完毕仍未有子单元组最大值超过门限, 则将整个搜索区间的最大值位置作为同步捕获单元所在位置, 该算法将 MAX 准则和 TC 准则同步捕获算法的特点相结合, 能够一定程度上消除门限设定对系统同步捕获性能的影响。文献[6]将 MAX/TC 准则同步算法应用于 TH-UWB 系统, 采用全局最大值的 MAX/TC 准则来降低系统对于门限设定的依赖性, 并对其同步平均捕获时间进行了分析, 文献[7]对 MAX/TC 准则同步算法进行分析, 然后重点分析了在 DS-UWB 系统中的同步捕获性能。

2006-12-31 收到, 2007-08-06 改回

国家自然科学基金(60572024)和教育部博士点基金(20050293003)资助课题

PN序列的同步捕获算法还可以采用辅助序列^[8, 9]与滑动相关相结合的方法进行同步捕获。利用辅助序列的同步算法中利用PN序列特性设计辅助序列, 根据辅助序列与接收信号的相关信息, 对本地PN序列和接收信号中PN序列的相位差进行估计, 得到本地PN序列发生器相位更新方向, 从而降低同步捕获时间。文献[8]分析了在AWGN信道环境下利用辅助序列的同步捕获性能, 进行了理论推导和仿真, 与滑动相关同步算法相比, 利用辅助序列的同步算法的捕获速度至少提高一倍。

本文提出一种利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步算法, 利用辅助序列与接收信号的相关信息, 确定本地 PN 序列的相位更新方向, 进一步降低 MAX/TC 准则同步算法的平均捕获时间。对该同步算法的捕获性能以及平均捕获时间进行了较为详细的理论推导, 并在超宽带室内多径信道环境下, 对利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步算法进行计算机仿真, 仿真结果表明, 采用本文算法能够保证系统的同步捕获性能, 同时有效缩短系统 PN 序列的平均同步捕获时间。

2 DS-UWB 系统中采用辅助序列的 MAX/TC 准则同步捕获算法

PN序列自相关函数具有二值特性^[10], 对两个PN序列乘以不同的加权系数, 可以根据产生峰值的大小, 区分这两个峰值是由哪个序列产生的。将其推广到整个PN序列的周期, 若对每一个相位的PN序列乘以不同的加权系数后求和, 则和序列同PN序列的互相关函数的值与两者之间的相位差有一一对应的关系, 利用得到的辅助序列与接收序列运算信息, 能够对本地PN序列同接收信号中的PN序列相位差进行估计, 最终可以判断出相位移动的方向。将MAX/TC同步算法与利用辅助序列的同步算法相结合, 可以在保证算法同步捕获性能的同时, 较大程度上缩短同步时间。

利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步捕获算法主要过程如下:

步骤1 初始化阶段 将整个伪随机码搜索区间的 N 个单元分成 N_s 个子单元组 $G_i (1 \leq i \leq N_s)$, 每个子单元组分别包含 M 个单元 $S_{i,j} (1 \leq j \leq M) (N=M \times N_s)$, 初始化本地 PN 序列发生器和辅助序列发生器;

步骤2 同步判决阶段 当前检测子单元组为 $G_i (1 \leq i \leq N_s)$, 在 G_i 子单元组内并行计算每个单元 $S_{i,j} (1 \leq j \leq M)$ 的测试变量 $\zeta_{i,j}$, 得到其中的最大值 $\zeta_{i,j \text{ MAX}} = \max\{\zeta_{i,j}, 1 \leq j \leq M\}$, 并与门限 ξ 进行比较, 如果 $\zeta_{i,j \text{ MAX}} < \xi$, 则进行步骤3; 如果 $\zeta_{i,j \text{ MAX}} \geq \xi$, 则进行步骤5;

步骤3 相位更新阶段 利用 G_i 子单元组中 $S_{i,1}$, $S_{i, \lfloor M/2 \rfloor}$ 和 $S_{i,M}$ 单元的辅助序列信息确定下一个测试子单元组所在位置, 对本地 PN 序列发生器相位进行更新。利用辅助序列判决相位移动方向的功能模块结构如图1所示, 接收信号 $r(t)$ 与辅助序列发生器生成信号 $g(t) (g(t) = \alpha(t - T_c/2) - \alpha(t + T_c/2))$ 相乘, 然后通过一个相关滤波器 $H(f)$, 并进

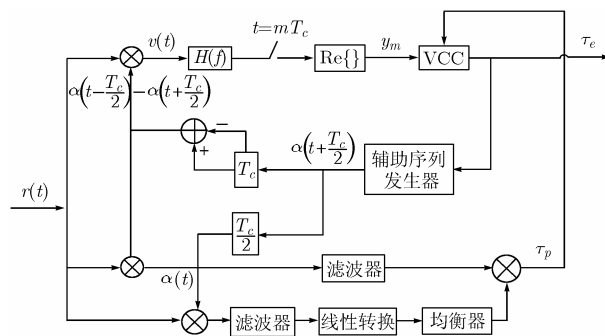


图1 辅助序列工作原理图

行抽样, 取实部得到 y_m , 通过 y_m 对 VCC(Voltage Control Clock) 进行控制, 得到 $t = mT_c$ 时刻的相位估计值 τ_e , 定义当前时刻相位误差为 $e_\tau = \tau_e - \tau$, VCC 的平均输入 \bar{y} 可以表示为

$$\bar{y} = T_c [R_{ca}(e_\tau + T_c/2) - R_{ca}(e_\tau - T_c/2)],$$

$$R_{ca}(\omega) = \begin{cases} \frac{(N-1)(N+3)}{4N} - \frac{N+1}{NT_c} |\omega|, & |\omega| \leq T_c \\ -\frac{(N-1)^2}{4N}, & T_c < |\omega| < \frac{NT_c}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $R_{ca}(\omega)$ 为发送信号 $s(t)$ 与辅助序列信号 $\alpha(t)$ 的互相关函数。

$$\alpha(t) = \sum_{m=-(N-3)/2}^{(N-3)/2} \left[\frac{N-1}{2} - |m| \right] s(t - mT_c) \quad (2)$$

图2为 \bar{y} 随相位误差变化曲线, 可以看出, 当 $0 < e_\tau \leq NT_c/2$ 时, VCC 的输入控制信号为负值, 当 $-NT_c/2 \leq e_\tau < 0$ 时, VCC 的输入控制信号为正值, 因此辅助序列与接收信号的相关信息可以得到本地 PN 序列相位更新方向。定义 G_i 子单元组的本地 PN 序列发生器相位更新判决变量为 γ_i , 测试单元的辅助序列信息变量定义为 $\gamma_{i,k} (1 \leq k \leq 3)$, G_i 子单元组中 $S_{i,1}$ 、 $S_{i, \lfloor M/2 \rfloor}$ 和 $S_{i,M}$ 单元的辅助序列信息变量如下:

$$\gamma_{i,k} = \begin{cases} -1, & 0 < e_\tau < NT_c/2 \\ 1, & NT_c/2 \leq e_\tau < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^3 \gamma_{i,k} \quad (4)$$

若 $\gamma_i > 0$, 则移动到 $G_{(i+1) \bmod N_s}$ 子单元组; 若 $\gamma_i < 0$, 则移动到 $G_{(i-1) \bmod N_s}$ 子单元组, 然后进行步骤2; 若整个伪随机序列码区间的子单元组已搜索完毕, 仍未有单元测试变量大于门限, 进行步骤4;

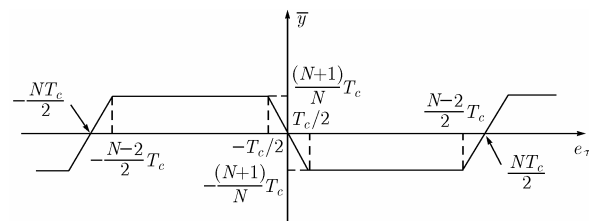


图2 VCC输入控制信号随相位误差变化曲线

步骤4 取 $\xi_{\text{MAX}} = \max\{\xi_{n,j}, 1 \leq i \leq N_s, 1 \leq j \leq M\}$ 所在单元作为同步单元, 然后进行步骤5;

步骤5 捕获验证及跟踪阶段 采用常规的多数逻辑规则进行同步捕获验证, 然后启动同步跟踪电路, 否则进行虚警补偿, 重新从步骤2开始进行同步捕获。

3 采用辅助序列的MAX/TC准则同步捕获算法性能分析

多用户DS-BPSK调制的UWB系统中, 第 u 个用户发送信号经过信道后的接收信号如式(5)所示:

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L \alpha_{k,l} \frac{1}{\sqrt{N_{\text{SF}}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^{N_{\text{SF}}} d_n c_m \cdot w(t - nT_f - mT_c - \tau_k - \tau_{k,l}) + n(t) \quad (5)$$

其中 $\{c_m \in \pm 1\}$, $m = 1, 2, \dots, N_{\text{SF}}$ 为第 u 个用户的扩频序列, N_{SF} 为扩频因子, d_n 为第 u 个用户发送的数据信号, T_f 为帧周期, T_c 为码片周期。 $\alpha_{k,l}$ 为第 k 簇第 l 条路径的衰落幅度, τ_k 是第 k 簇的时延, $\tau_{k,l}$ 为第 k 簇第 l 条路径相对于第 k 簇到达时间的时延, “*”表示卷积运算。

采用一组并行匹配滤波器进行接收, 设积分周期为 T_s , 延迟为 $\hat{\tau}_i$ 的接收机抽头输出为

$$y_i = \int_{\hat{\tau}_i + jT_s}^{\hat{\tau}_i + (j+1)T_s} r(t) \cdot c_m w(t - nT_f - mT_c - \hat{\tau}_i) dt = x_i + v_i + n_i \quad (6)$$

其中 x_i 为有用信息, v_i 为干扰, n_i 为加性高斯白噪声, 各种干扰分量都是统计独立的随机变量。设码片周期内信号能量为 E_c , v_i 是零均值高斯随机变量, 其方差可以表示为

$$\sigma_v^2 = T_s E_c G(\eta) / 4, G(\eta) = \begin{cases} \eta^2, & \text{正确捕获} \\ 1 - 2|\eta| + 2\eta^2, & \text{非正确捕获} \end{cases} \quad (7)$$

每个抽头上的非有用信息随机变量的方差:

$$\sigma^2 = \frac{T_s}{4} [1 + E_c G(\eta)] \quad (8)$$

利用辅助序列的MAX/TC准则的同步捕获算法的同步捕获概率表示为

$$P_d = \int_{\xi}^{\infty} P(v|S) \left[\int_{-\infty}^u P(x|\bar{S}) dx \right]^{M-1} dv = \frac{1}{2} \int_{\xi}^{\infty} e^{-\frac{v+\lambda}{2}} I_0(\sqrt{v\lambda}) \left(1 - e^{-\frac{v}{2}} \right)^{M-1} dv \quad (9)$$

其中 $P(v|S)$ 服从两个自由度的 χ^2 分布, ξ 为门限值, $I_0(\cdot)$ 为0阶修正Bessel函数。

$$\xi = \sigma^2 \alpha 4L_p \left[\text{SNR} + \left(\frac{2(K-1)}{3} + G(\eta) \right) \text{SNR}^2 \right] \quad (10)$$

其中 K 为用户数, L_p 为部分相关长度, α 为调节参数或门限因子, 信噪比 $\text{SNR} = E_c / N_0$ 。

采用数值分析与系统仿真相结合的方法对系统同步捕获概率进行实现, 仿真参数为: 用户数 $K=100$, $N_s=20$,

$L_p=200$, 采用长度分别为1023和2046的 m 序列, 脉冲宽度1ns的高斯一阶脉冲, 结果如图3所示, 可以看出, 理论

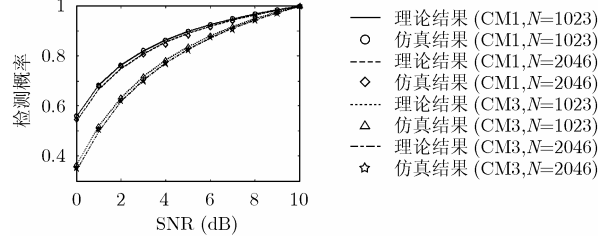


图3 利用辅助序列的MAX/TC捕获算法检测概率曲线

分析结果与系统仿真结果基本一致, 从而验证了本文算法的有效性; 同时, 可以看出, 随着序列长度的增加, 系统的同步检测概率略有降低, 但是降低不大。

状态流图^[11]进行平均同步捕获时间的分析方法由于具有简单、直观的特点, 被广泛采用。采用辅助序列的MAX/TC准则同步捕获算法的状态流图如图4所示, 状态A为PN序列确认捕获成功的状态, FA为虚警状态。

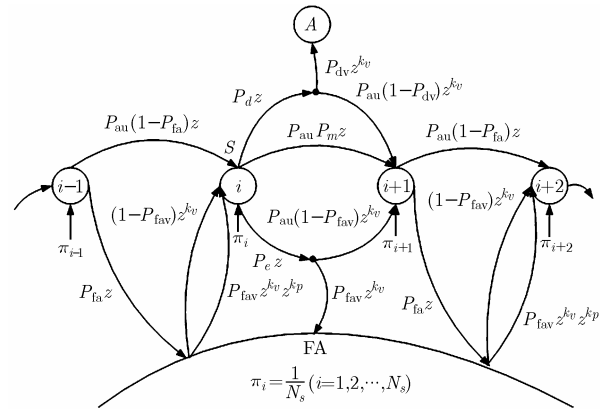


图4 利用辅助序列的MAX/TC捕获状态流图

定义 $H_0(z)$ 为从子单元组 G_i 到子单元组 G_j 的转移增益, $H_m(z)$ 为从同步单元所在的子单元组 G_s 到子单元组 G_j 的转移增益; $H_d(z)$ 为从子单元组 G_s 到确认捕获成功的转移增益; $H_e(z)$ 为从子单元组 G_s 到虚警状态的转移增益, 采用辅助序列的MAX/TC准则算法的同步捕获生成函数如式(11)所示:

$$P(z) = \frac{1}{N_s} \frac{H_d(z)(1 - H_0^{N_s-1}(z))}{(1 - (H_m(z) + H_e(z)z^{K_p}) \cdot H_0^{N_s-1}(z))(1 - H_0(z))} \quad (11)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} H_0(z) &= P_{\text{au}}(1 - P_{\text{fa}})z + P_{\text{fa}}P_{\text{fav}}z^{K_p+K_v} \\ &\quad + (1 - P_{\text{fav}})z^{K_v} \\ H_d(z) &= P_d P_{\text{dv}}z^{K_v+1} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} H_m(z) &= P_{au}(P_m z + P_d(1 - P_{dv})z^{K_v}) \\ &+ P_e(1 - P_{fav})z^{K_v} \\ H_e(z) &= P_e P_{fav} z^{K_v+1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

可以得到平均同步捕获时间 T_A 如下:

$$\begin{aligned} T_A &= \left| \frac{d}{dz} P(z) \right|_{z=1} T_c = \frac{T_c}{N_s} \frac{d}{dz} \left(\frac{H_d(z)(1 - H_0^{N_s-1}(z))}{(1 - (H_m(z) + H_e(z)z^{K_v}) \cdot H_0^{N_s-1}(z))(1 - H_0(z))} \right)_{z=1} \\ &= \frac{T_c}{N_s} \left[\frac{[P_D(K_v + 1)(1 - H^{N_s-1}) - (N_s - 1)H^{N_s-2}Q](1 + P_D)(1 - H)}{[(1 - P_{au}(1 - P_e - P_D + P_e P_{fav})H^{N_s-1})(1 - H)]^2} \right. \\ &+ \frac{[(1 + P_d(K_v - 1 - P_{dv}) + P_e(K_v + P_{fav} + K_p P_{fav} - 1))H + (N_s - 1)(1 - P_D)Q]P_D(1 - H^{N_s-1})(H^{N_s-2} - H^{N_s-1})}{[(1 - P_{au}(1 - P_e - P_D + P_e P_{fav})H^{N_s-1})(1 - H)]^2} \\ &\left. + \frac{[1 - (1 - P_D)H^{N_s-1}]Q}{[(1 - P_{au}(1 - P_e - P_D + P_e P_{fav})H^{N_s-1})(1 - H)]^2} \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

其中 $P_D = P_d P_{dv}$, $H = [P_{au}(1 - P_{fa}) + 1 - P_{fav} + P_{fa} P_{fav}]$, $Q = [P_{au}(1 - P_{fa}) + K_v(1 - P_{fav}) + (K_v + K_p)P_{fa} P_{fav}]$, P_{au} 为辅助序列正确判断子单元组更新方向的概率, 当 N_s 小于 3 时, P_{au} 等于 1, 在这种情况下利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步算法退化为 MAX/TC 同步算法, 因此本文规定 N_s 取值大于 3。

4 仿真结果与分析

对利用辅助序列的 MAX/TC 同步算法的同步捕获性能以及平均同步捕获时间进行计算机仿真, 采用的 DS-UWB 系统信道模型为 IEEE 802.15.3a 工作组采纳的 CM1-CM4^[12] 信道模型。采用的码序列长度为 1023, 码片量化因子为 0.5, 未知区域单元数为 2046, 采用并行搜索模式, 码片速率为 1Gchip/s, 检测模式停留时间为 1ms, 验证模式停留和虚警补偿时间均为 1.024μs, 判决门限因子等于 1.0。

图 5 比较了 $K=100$, $N=1023$, $N_s=20$ 的情况下, 两种算法的检测概率随 SNR 的性能曲线, 可以看出采用辅助序列的 MAX/TC 准则同步捕获算法的检测概率与 MAX/TC 准则同步捕获算法的检测概率性能相当。图 6 是利用辅助序列的 MAX/TC 准则同步捕获算法与 MAX/TC 准则同步捕获算法的平均捕获时间随 SNR 的变化曲线, 从实验结果可以看出, 本文算法能够有效缩短平均同步捕获时间, 因为在该算法中利用辅助序列与接收信号的相关信息能够确定本地 PN 序列相位的更新方向。

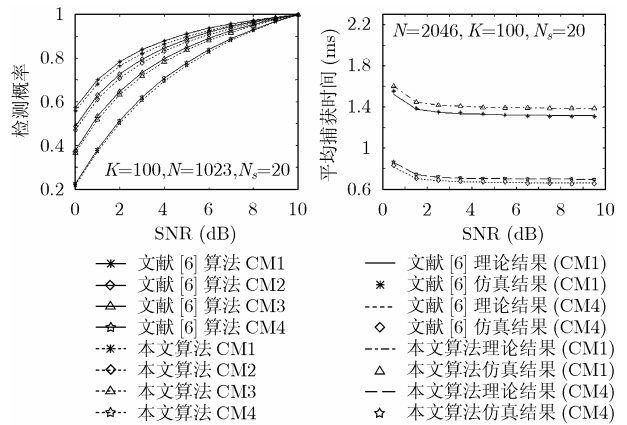


图 5 两种算法的检测概率比较

图 6 两种算法的平均捕获时间比较

图 7 为 $N_s=20$, 系统用户数 $K=100$, 不同 PN 序列长度情况下两种算法的平均捕获时间与信噪比的关系曲线, 可以看出, PN 序列长度越大, 本文算法的有效性越显著。与 MAX/TC 准则同步算法相比, 当 $N=2046$ 时, 本文算法同步捕获时间减少约 0.8ms, 当 $N=4095$ 时, 同步捕获时间减少约 1.3ms。图 8 为不同用户数情况下两种算法平均捕获时间的比较, 随着用户数从 90 增加到 110, MAX/TC 准则同步捕获算法的平均同步捕获时间约增加 1.6ms, 本文算法的平均捕获时间约增加 1ms, 可见用户数的变化对本文算法的影响较小。

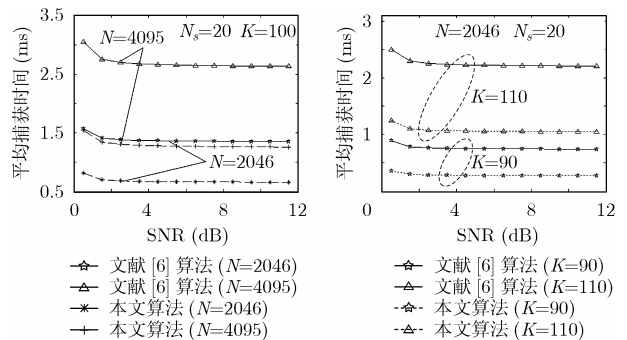


图7 不同PN序列长度下两种算法的平均捕获时间(CM2) 图8 不同用户数情况下两种算法平均捕获时间比较(CM2)

5 结束语

本文首先简要介绍了MAX/TC准则同步捕获原理,在此基础上,提出了一种利用辅助序列的MAX/TC准则同步捕获算法,然后对该算法的捕获性能和平均捕获时间进行了较为深入的理论分析,最后在超宽带信道环境下进行了仿真实验。理论分析和实验结果表明,利用辅助序列的MAX/TC准则同步捕获算法在基本不改变同步捕获性能的同时,较大程度上减少了PN序列同步捕获所需时间。

参 考 文 献

- [1] Son L T and Ahmed K M. Performance of coherent direct sequence ultra wideband receiver with iterative channel estimation and detection[A]. International Symposium on Communications and Information Technologies 2004 (ISCIT 2004)[C], Sapporo, Japan, October 26-29, 2004: 1218-1223.
- [2] Iinatti J. Comparison of two dwell code acquisition of DS signal using different threshold setting rules[C]. MILCOM 97 Proceedings, Monterey, California, 1997, 1: 296-301.
- [3] Ward P W. GPS receiver search techniques[A]. Proceedings of the IEEE 1996 Position Location and Navigation Symposium[C]. Piscataway, NJ, USA, IEEE, 1996: 604-611.
- [4] Iinatti J H J. On the threshold setting principles in code acquisition of DS-SS signals[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(1): 62-72.
- [5] Corazza G E. On the MAX/TC criterion for code acquisition and its application to DS-SSMA systems[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1996, 44(9): 1173-1182.
- [6] Ma Yao, Chin F, Kannan B, and Pasupathy S. Acquisition performance of an ultra wide-band communications system over multiple-access fading channel[A]. 2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies[C], Baltimore, MD, 2002: 99-103.
- [7] 王江, 毕光国, 张在琛. TC/MAX码捕获准则及其在超宽带系统中的应用[J]. *通信学报*. 2005, 26(10): 46-52.
Wang Jiang, Bi Guang-Guo, and Zhang Zai-Chen. On the TC/MAX criterion for code acquisition and its application to UWB systems[J]. *Journal on Communications*. 2005, 26(10): 46-52.
- [8] Salih M and Tantaratana S. A closed-loop coherent acquisition scheme for PN sequences using an auxiliary sequence [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(8): 1653-1659.
- [9] Delva J G R and Howitt I L. A coherent acquisition method for a PN sequence using binary search and an auxiliary sequence[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(12): 2432-2440.
- [10] Wang Jun, Yang Zhi-xing, and Pan Chang-yong. Iterative padding subtraction of the PN sequence for the TDS-OFDM over broadcast channels[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1148-1152.
- [11] Holmes J K and Chen C C. Acquisition time performance of PN spread-spectrum systems[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1977, 25(5): 778-784.
- [12] Foerster J and Li Q. UWB Channel Modeling Contribution from Intel[EB/OL]. http://www.ieee802.org/15/pub/2002/Nov02/02490r0P802-15_SG3a-Channel-Modeling-Subcommittee-Report-Final.zip, 2003.

齐丽娜: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为无线通信与电磁兼容、超宽带无线技术。

朱洪波: 男, 1956年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容。