

基于遗传算法的 UWB 信号非相干捕获方法

杨志华,张钦宇,张乃通

(哈尔滨工业大学深圳研究生院通信工程研究中心,广东深圳 518055)

摘 要: 本文针对动态信噪比环境超宽带(UWB, Ultra WideBand)信号的非相干捕获,提出了一种基于遗传算法的信号捕获方案.以遗传算法结合在线估计接收信噪比,搜索积分窗口长度与定时位置的参数组合,实现系统要求的比特错误概率.该方法解决了传统捕获方案在未知信噪比条件下积分长度无法择优选取以及捕获门限难于设定的问题.仿真结果表明,基于遗传算法的二维参数捕获方法与传统 Look and Jump by K steps 算法相比有效的提高了未知信噪比条件下的系统捕获性能,拓展了 UWB 非相干系统的应用范围.

关键词: 超宽带;非相干;信号捕获;遗传算法;参数组合

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1568-06

A Non-Coherent Method of UWB Signal Acquisition Based on Genetic Algorithm

YANG Zhi-hua, ZHANG Qin-yu, ZHANG Nai-tong

(Communication Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: Focusing on ultra wideband (UWB) signal acquisition conditional on the uncertain signals to noise ratio (SNR), a non-coherent scheme is proposed in this article based on genetic algorithm, which combines online SNR estimation with genetic algorithm to search the parameters pair of integral length and timing alignment. Contrast with general schemes, the scheme proposed is suitable for the uncertain SNR conditions where integral length is unavailable and dynamic detection threshold is hard to be set. The results show that, compared with Look and Jump by K steps algorithm, the proposed scheme improved significantly the acquisition performances on uncertain SNRs.

Key words: ultra wideband(UWB); non-coherent; signal acquisition; genetic algorithm; parameters pair

1 引言

UWB 脉冲技术以其小尺寸、低功率谱密度、高时间分辨率等优点在较高和中低数据速率应用,如无线个域网、无线人体域网、工业控制系统等领域日益受到关注^[1].考虑到系统的性价比,基于非相干方式的能量检测系统,由于不需要模板和信道估计而直接提取多径信号能量,大大减少了接收机复杂度,同时对同步误差的精度要求比较低,相比于相干系统和非相干发射参考系统(Transmitted Reference, TR),实现简单且成本较低,对于某些应用具有较高参考价值,为 UWB 脉冲技术的推广带来了方便.在能量检测系统中,UWB 信号的捕获与相干系统以及发射参考系统都有所不同.相干接收机利用若干支路合并(RAKE)多径能量的方式来提高捕获性能,但前后支路间因多径分量呈现相位随机翻转而导致

能量抵消,性能提高受到影响^[2,3].发射参考系统中接收机利用具有相似信道特性的相邻信号进行相关积分来提取能量,受信道衰落速度和噪声与噪声乘积项影响^[4].而能量检测系统采用平方律检波器和积分器,合并多径能量块进行捕获,避免了上述问题的同时系统可实现性较高.

目前大多数关于 UWB 信号捕获的研究分别针对搜索策略^[5-7]和检测方案^[8-10].其中文献[5]与[6]从理论上证明了在命中集元素连续的条件下最佳搜索策略为 Jump by K steps 算法,文献[7]则给出了基于 Markov 链模型的采用上述搜索策略平均捕获时间的计算方法.文献[8]基于导频序列辅助提出了基于广义似然比检验的信号定时参数估计方法,避免了定时相位的搜索过程.文献[9]从理论上证明了任意信噪比条件下,基于门限判决的 UWB 信号检测方法在多径衰落信道下检测性能具

有一定的下界,无论门限如何设定.文献[10]则给出了基于两阶段搜索的微分发射参考系统(Differential Transmitted Reference, DTR)捕获方案,其中粗捕阶段采用较大的积分窗口以加速捕获过程,再用较小的窗口搜索粗捕获到的相位周围的相位以提高捕获精度和捕获后误码率性能.其中,分别对平均性能指标求解中的检测概率平均和捕获时间平均两种方式进行了深入的分析并给出相应实验结果.文献[11]中针对 DS-UWB 系统的脉冲同步捕获给出了基于随机训练序列结合自适应均衡的快速同步算法,该算法以训练序列与判决输出之间的误差最小值为准则,通过可变步长来搜索能量最大区间实现同步.文献[12]则针对脉冲级和符号级同步精度水平下 TR 和 DTR 系统误码率性能给出了自适应的同步捕获方案,以二分法减小搜索步长和积分窗口长度搜索信号能量区域,逐渐减少区域中噪声含量.

针对 UWB 能量检测系统信号捕获的研究主要有[13~15].文献[13]中基于已知的信道功率延迟剖面,利用积分窗口的能量与之相比较进行定时相位的捕获,该捕获方法的均方误差与窗口内的能量成正比,由于需要存储功率延迟剖面值和实时大数据量计算,复杂度较高.文献[14]中利用求取若干能量块区域的最大值方法获得定时相位,捕获目标相位唯一使得算法相对简单,但仍只能给出性能指标的近似解.文献[15]则对单相关器和能量检测器两种方案下的 UWB 信号捕获性能进行了对比分析,证明在一定虚警概率下能量检测器在平均捕获时间指标上优于单相关积分的检测方案,原因在于单相关器检测的是多径分量,而能量检测器可以利用积分窗口合并多径能量以提高性能.

上述 UWB 信号捕获的研究尽管比较深入和全面,但都有这样一个假定条件:接收端的输入信噪比已知且给定捕获命中集,以此设计信号捕获方案 and 进行理论分析.而在 UWB 技术的多数应用中,通信距离与信道环境的时变性导致接收端的信噪比是动态未知的^[16],此条件下的信号捕获问题多数研究中未有考虑.由于信噪比的未知性和不确定性,给 UWB 信号的捕获尤其是能量检测方式的捕获,带来了以下两点困难:一是积分窗口的选择,不同信噪比下能量积分窗口的选择会影响捕获命中集的结构,进而影响捕获性能,信噪比未知和不确定将导致捕获算法性能不稳定,易出现较大的波动;二是检测门限的设定,不同信噪比条件下信号门限的设定对信号的检测性能具有较大的影响^[17],需要设计自适应门限,给系统带来较高的复杂度和额外开销.本文针对上述问题,提出了一种能够适应动态信噪比环境的 UWB 信号捕获算法.该算法通过导频序列实时估计信噪比,同时以遗传算法(Genetic Algorithm, GA)搜索定时相位和积分窗口长度两个参数,直

接实现系统误码率指标,从而避免了信道环境对捕获门限设定的影响.结合平均捕获时间和一定时间内捕获概率两项指标给出该方法的性能分析,从结果上看该方法有效的提高了捕获性能并具有一定的鲁棒性.

2 系统模型及理论分析

本文基于以下假定条件:(a)针对室内短距离应用,采用 IEEE 802.15.3a 信道模型,不考虑路径损耗和大尺度衰落,(b)采用二进制 On-Off Keying(OOK)调制.系统采用能量积分检测多径信号,接收信号依次经过带宽为 B 的带通滤波器、平方律检波器和积分器,输出经过门限判决进行数据解调.在定时相位 θ 上(以第一条多径分量到达时间为时间零点),接收端第 i 比特信号的判决统计量可以表示为:

$$Z_i = \int_0^{T+\tau} \sum_{j=1+\lfloor \theta-B \rfloor}^{2M+\lfloor \theta-B \rfloor} ((s_j + n_j) \varphi_j(t))^2 dt = \sum_{j=1+\lfloor \theta-B \rfloor}^{2M+\lfloor \theta-B \rfloor} (s_j + n_j)^2 \quad (1)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算, s_j 为发射信号的采样,如式(2)所示. n_j 为零均值加性高斯白噪声的采样,功率谱密度为 $N_0/2$. $\varphi_j(t)$ 为波形宽度内的标准正交函数. $2M$ 为积分时间 T 内的采样点数(为简便起见,假定为偶数且后文称 M 为积分长度), $2M = B \cdot T + 1$.

$$s_j = s_i(t_j) = \sum_{l=1}^k x_l b_i \sqrt{E_b} \omega_l(t_j - \tau_l - iT_j) \quad (2)$$

其中, k 为到达接收端的多径数量. x_l 、 τ_l 和 $\omega_l(t)$ 分别为第 l 条多径分量的幅度、相位和波形函数,其中 x_l 服从对数正态分布. b_i 为第 i 比特数据, E_b 为 OOK 调制下每比特能量. T_j 为符号宽度.

在采样点 $2M$ 较大时,统计量 Z_i 可以认为近似服从高斯分布,其均值和方差如下:

$$\begin{cases} \mu_i | 0 = MN_0 & , b_i = 0 \\ \sigma_i | 0 = MN_0^2 & , b_i = 0 \\ \mu_i | 1 = MN_0 + E_{\text{eff}} & , b_i = 1 \\ \sigma_i | 1 = MN_0^2 + 2E_{\text{eff}}N_0 & , b_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\frac{E_{\text{eff}}}{N_0} = \sum_{j=1+\lfloor \theta-B \rfloor}^{2M+\lfloor \theta-B \rfloor} \left(\frac{s_j}{\sqrt{N_0/2}} \right)^2$ 定义为积分窗口内的有效信噪比.则在特定信道样本 \bar{n} 下,系统的条件比特错误概率可以表示为^[18]:

$$P_e(\theta, M | \bar{n}) = Q(q) \quad (4)$$

其中,

$$q = \frac{\sqrt{M + 2E_{\text{eff}}/N_0} - \sqrt{M}}{2} \quad (5)$$

$Q(x) = \int_x^{+\infty} (1/\sqrt{2\pi}) e^{-y^2/2} dy$. 给定信道样本 \bar{n} 的概率密度 $p(\bar{n})$, 统计平均比特错误概率为:

$$P_E(\theta, M) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_e(\theta, M | \bar{h}) p(\bar{h}) d\bar{h} \quad (6)$$

根据 UWB 信号捕获命中集的定义,对于能量检测来说,在某个定时位置估计 $\hat{\theta}$,以某个积分长度 \hat{M} ,能够实现一定发射功率条件下期望的非编码比特错误概率性能(Uncoded Bit Error Probability, UBEP),此时的参数组合 $(\hat{\theta}, \hat{M})$ 就符合捕获的要求. 这些参数组合构成了 UWB 能量检测系统的捕获命中集

$$S_H = \{(\hat{\theta}, \hat{M}) : P_E(\hat{\theta}, \hat{M}) \leq \delta\} \quad (7)$$

其中, δ 为系统的 UBEP 要求. 从式(7)可以看出,该命中集的特点在于元素为二维参数组合,所以捕获过程实质上是对此二维参数组合的搜索,满足特定门限 δ 即实现信号捕获. 本文给出 CM1 信道下的命中集结构,如图 1 所示. 基于命中集 S_H ,捕获算法需要分别解决检测方案和搜索策略两个问题.

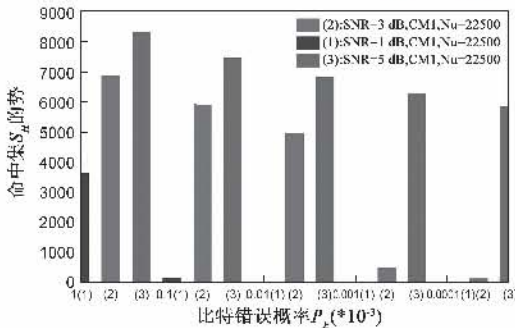


图1 CM1信道命中集元素数量与比特错误概率的关系. 横坐标上括号内数字分别对应三种信噪比条件, Nu待搜索相位数量.

从式(4)和(5)可以看出,给定信道样本 \bar{h} ,系统的条件比特错误概率与待估计参数 $(\hat{\theta}, \hat{M})$ 呈非线性函数关系,遍历搜索 $(\hat{\theta}, \hat{M})$ 计算式(5),可以找到实现系统指标 δ 的参数组合实现信号捕获,从而避免了传统捕获方法在积分窗口 $2M$ 的选择和门限设定上的困难. 在实时计算式(5)时,由于信道样本 \bar{h} 受噪声影响,无法准确获取窗口内有效信噪比 E_{eff}/N_0 ,本文采用发送导频序列实时估计窗口内有效信噪比 E_{eff}/N_0 ,导频格式如图 2 所示.

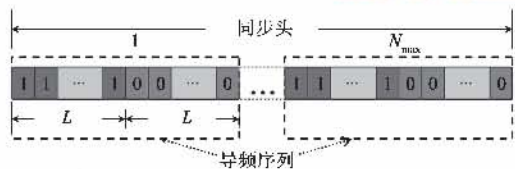


图2 同步头数据格式. 本文采用单积分器串行搜索方案.

定义变量 κ :

$$\kappa = \mu_i |1| / \mu_i |0| = 1 + E_{eff} / MN_0 \quad (8)$$

则

$$E_{eff} / N_0 = M(\kappa - 1) \quad (9)$$

所以通过发送连续“1”和“0”导频序列来估计积分窗口

长度 $2M$ 内有效信噪比. 估计性能如图 3 所示.

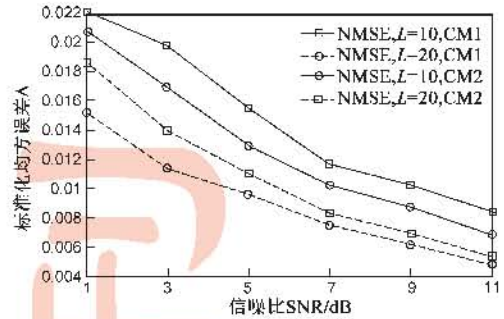


图3 本文中估计算法的归一化均方差性能. 其中L分别为10和20,信道模型为CM1和CM2.

3 算法模型及性能指标

由于遍历搜索参数组合 $(\hat{\theta}, \hat{M})$ 需要较长时间,本文采用具有随机搜索特性的遗传算法来搜索参数组合,利用遗传算法的选择、交叉和变异算子较快的搜索参数,提高捕获性能. 结合前文提出的信噪比估计算法,图 4 给出了整个捕获系统的结构框图. 对应图 4 中的虚线框部分,遗传算法的具体步骤如下:

Step I 随机初始化种群(规模为 pop),调用适应度函数模块 Funfit 计算种群中每个个体的适应度函数值,保存最优父代个体,转 Step II.

Step II 调用适应度函数模块 Funfit,产生锦标赛模型(联赛规模为 $tour$)策略,选择参与交叉的父代个体;利用交叉(交叉概率为 P_c)和变异算子(变异概率为 P_m)模型产生新的子代,转入 Step III.

Step III 调用适应度函数模块 Funfit,输出最好的个体,判断是否满足系统性能指标 δ . 如满足,捕获结束,输出个体代表的参数组合 $(\hat{\theta}_{opt}, \hat{M}_{opt})$;不满足,则保存 Step I 中的最优父代个体并更新种群,转入 Step II.

Funfit 给定待估计参数 \hat{M} ,利用长度为 $2L$ 的导频序列实时估计相位 $\hat{\theta}$ 上的有效信噪比 E_{eff}/N_0 ,并计算适应度函数(5).

一般评价 UWB 捕获系统性能的指标主要有平均捕获时间和一定时间内的捕获概率^[9]. 本文采用具有最大长度为 N_p 比特的同步头,以串行搜索方式捕获信号,同步头由 N_{sync} 组导频序列组成,每组导频序列由 L 个“1”和 L 个“0”比特构成,如图 2 所示. 针对上述算法,本文给出这两项指标的计算表达式:

捕获时间:

$$T_{acq} = 2L * (pop + tour) * N_I * T_e \quad (10)$$

信道样本 \bar{h} 下条件平均捕获时间:

$$E(T_{acq} | \bar{h}) = 2L * (pop + tour) * E(N_I | \bar{h}) * T_e \quad (11)$$

信道样本 \bar{h} 下一定时间内条件捕获概率:

$$P_{\text{acq}}\{T_{\text{acq}} \leq T_{\text{max}} | \bar{h}\} = P_{\text{acq}}\{N_{\text{acq}} \leq N_{\text{max}} | \bar{h}\} \quad (12)$$

统计平均捕获时间:

$$E(T_{\text{acq}}) = \int_{-\infty}^{\infty} E(T_{\text{acq}} | \bar{h}) p(\bar{h}) d\bar{h} \quad (13)$$

统计平均捕获概率:

$$P_{\text{acq}}\{T_{\text{acq}} \leq T_{\text{max}}\} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{acq}}\{N_{\text{acq}} \leq N_{\text{max}} | \bar{h}\} p(\bar{h}) d\bar{h} \quad (14)$$

其中, N_l 为算法迭代次数, $N_{\text{acq}} = (\text{pop} + \text{tour}) * N_l$, $\text{pop} + \text{tour}$ 为单步驻留时间, $T_{\text{max}} = N_{\text{max}} * 2L * T_s$ 为系统最长信号捕获时间, $p(\bar{h})$ 为信道样本的概率密度函数, 本文采用多次信道样本下取均值求取统计平均。

从上述一系列指标可以看出, 导频长度 L , 单次驻留时间 $\text{pop} + \text{tour}$ 和算法迭代次数 N_l , 都对性能具有重要影响, 其中单次驻留时间 $\text{pop} + \text{tour}$ 更是既影响迭代次数又影响单步驻留时间的关键变量。

遗传算法实现的核心在于以一定概率进行的运算, 其在硬件(如常用的现场可编程逻辑阵列, Field-Programmable Gate Array, FPGA)上一般以产生随机数实现, 目前大多采用伪随机数近似, 算法中其他运算如计算适应度函数的除法运算目前也可以解决。由于考虑的是串行搜索模式, FPGA 需要在一个符号期间内进行一次遗传算法的基本操作, 所以其能实现的在线信息速率为 UWB 系统的符号传输速率。

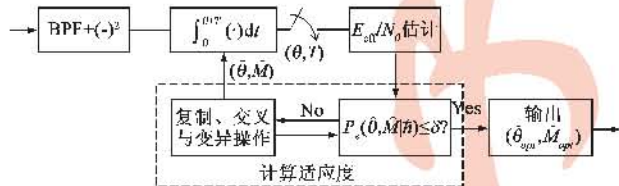


图4 本文提出的GA捕获算法框图

4 实验及结果讨论

针对本文提出的基于遗传算法的捕获方案, 基于 IEEE 802.15.3a 信道模型, 采用 Monte Carlo 方法随机抽取 5 组信道样本求取平均性能指标, 与具有代表性的传统算法 Look and Jump by K steps 方法^[5-7] 进行比较, 为便于理论分析和实验设计, 本文暂不考虑符号间干扰 (Inter-Symbol Interference) 的影响, 具体实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

信道	信号带宽 B (MHz)	符号间隔 T_s (ns)	搜索步长 T_{step} (ns)	噪声虚警概率 P_f
CM1	1500	100	0.6667	0.0001
CM2	1500	100	0.6667	0.0001

Case I 不同信道下本文算法与 LJ 算法性能比较在信噪比未知的条件下, 传统的 UWB 能量检测系

统的信号捕获只能随机选择积分窗口长度, 同时无法进行门限的自适应设置, 本文选择随机选择积分长度和噪声恒虚警门限作为传统算法的门限水平。如图 5 和图 6 中结果表明, 在两组信道下本文提出的方法都有效的提高了捕获性能, 无论是从平均捕获时间还是一定时间内的捕获概率指标。其中对于较低信噪比条件下 (图 5(a) 中的 1 dB 和 3 dB, 图 6(a) 中的 3 dB 和 5 dB) 的平均捕获时间指标下 LJ 算法好于本文算法是由于本文 LJ 实验的最大截止时间为 500 比特, 实际上 LJ 算法并没有捕获到信号。此外, 相同的 BEP 指标提高幅度 (10^{-5} 到 10^{-7}) 下, GA 算法的性能差别比 LJ 算法大, 主要原因是二维参数组成的命中集合数量相对于原来一维参数时要多, 形成捕获性能提高较大。

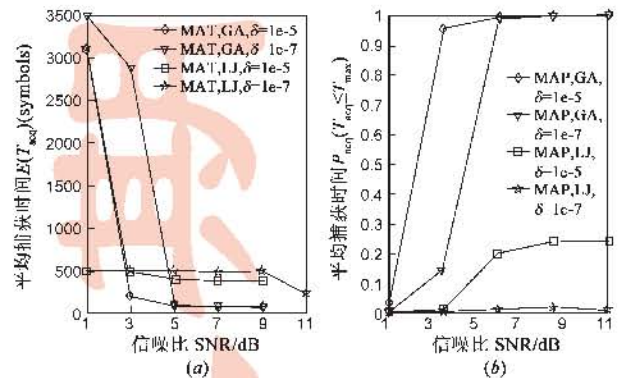


图5 CM1信道本文算法与传统捕获算法性能对比。其中 $L=10$, $P_c=0.7$, $P_m=0.2$, $\text{pop}+\text{tour}=10$, $N_{\text{max}}=100$ GA 为本文提出算法, LJ 为 Look and Jump by K steps 搜索算法

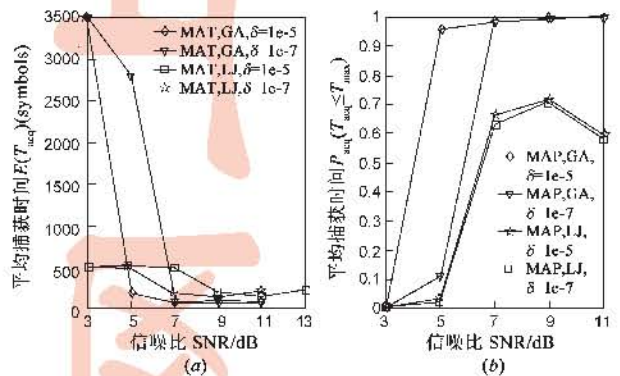


图6 CM2信道本文算法与传统捕获算法性能对比。其中 $L=10$, $P_c=0.7$, $P_m=0.2$, $\text{pop}+\text{tour}=10$, $N_{\text{max}}=100$ GA 为本文提出算法, LJ 为 Look and Jump by K steps 搜索算法

从实验结果可以看出, 本文提出的算法在不同的信道环境下对信噪比具有较好的适应性, 性能随着信噪比的增加提高较快, 而 LJ 算法则出现了性能随信噪比变化不明显甚至波动, 无法适应动态信噪比下的业务应用。

Case II 不同信道下参数 pop 、 tour 和 L , 以及 P_c 和 P_m 对捕获概率性能的影响

算法参数 pop 、 tour 和 L 对系统性能指标具有重要

影响,如式(10)~(12)所示.为便于指标分析,给定 $pop + tour = 10$,本文对参数组合 $(pop, tour)$ 以及 $L = 10$ 与 20 ,在两组信道下分别进行了实验.如图7、图8所示结果,对于种群规模 pop 较大的参数组合,两组信道下各个性能指标都相对更高,表明较大的种群规模尽管意味着较多的单步驻留时间,但加快了GA算法向系统指标 δ 的收敛(搜索)速度,仍然可以提高系统性能.对于 $pop + tour$ 不确定的情况,考虑到二者在两项指标中的耦合特性,需要折中设计以提高各项性能指标.而信噪比估计的导频长度 L 则对系统性能的影响不大,CM2条件下影响略微提高,与图3的结果一致.

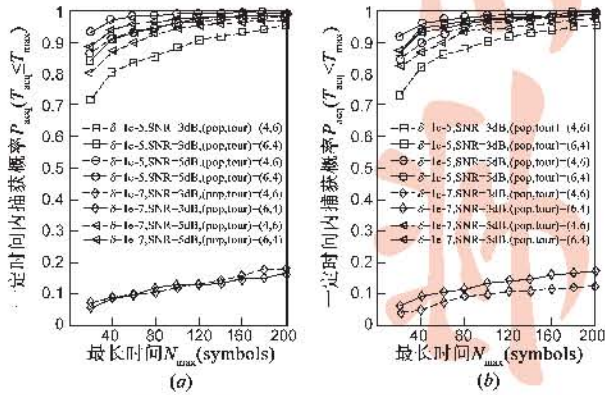


图7 CM1信道下本文算法在不同种群规模和锦标赛规模参数下的捕获概率性能.其中 $P_c=0.7, P_m=0.2, (a) L=10, (b) L=20$

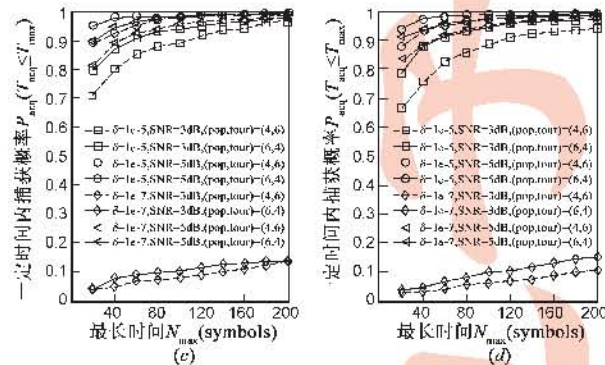


图8 CM2信道下本文算法在不同种群规模和锦标赛规模参数下的捕获概率性能.其中 $P_c=0.7, P_m=0.2, (a) L=10, (b) L=20$

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 对GA算法本身性能具有一定的影响.图9、10给出了二者对本文的算法性能影响的实验结果.从平均捕获时间指标来看,交叉概率 P_c 在两组信道下对性能的影响不具有明显的规律.对于变异概率 P_m ,无论哪个指标,两组信道下都表明了较大的变异概率提高了系统性能,主要原因在于适当提高变异概率可以优化种群结构,避免局部最优,加快了向系统指标 δ 的搜索速度.

两组实验都表明,对于信噪比较低和系统BEP性能要求较高的情况,本文提出的算法仍然可以实现一定的捕获性能,相对于传统算法更具有应用上的广泛性.

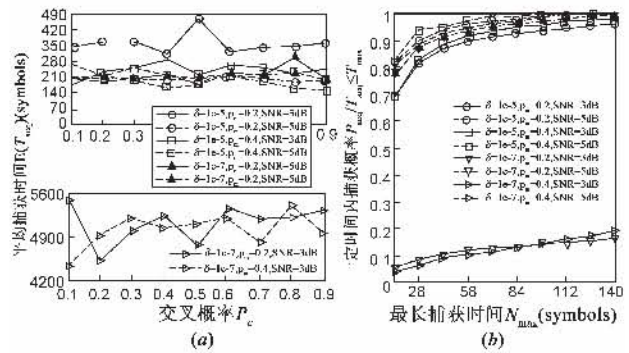


图9 CM1信道本文算法性能与GA参数之间的关系.其中 $L=10, pop=7, tour=7$.(a)为交叉概率与平均捕获时间的关系;(b)为(a)中最少捕获时间对应交叉概率所得捕获概率

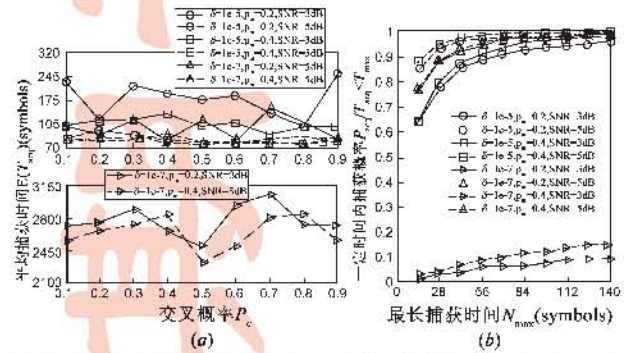


图10 CM2信道本文算法性能与GA参数之间的关系.其中 $L=10, pop+tour=7$.(a)为交叉概率与平均捕获时间的关系;(b)为(a)中最少捕获时间对应交叉概率所得捕获概率

5 结论与未来的工作

无线业务的多样性和泛在性提高了UWB系统中信号捕获的难度,其中信噪比的未知性和动态性是其中的两个关键难题,本文提出的UWB非相干系统基于遗传算法的捕获方法,以实时信噪比估计和GA算法为核心,解决了未知信噪比条件下传统算法无法选择积分窗口长度和设计门限的难题.算法实现复杂度较低,并不改变能量检测系统的基本结构,便于工程应用.其中,在以种群规模、锦标赛规模和导频序列长度三个关键变量为核心的指标计算中,通过实验分析了这些参数对性能的影响,结果表明种群规模的增加可以提高捕获性能.同时,变异概率对性能的影响比较明显,交叉概率的影响不具有规律性.对于用于实时估计信噪比的导频序列长度 L ,分析表明文中所取参数值对系统性能的影响在一定的范围内并不明显,可以适当降低系统前导序列的开销.与传统算法look and jump算法相比,本文算法不仅有效的提高了不同信道下两项指标性能,而且具有一定的稳定性,不会出现传统算法的捕获性能波动的问题,可以适应不同业务模型下的应用.

对于单步驻留时间中种群规模和锦标赛规模两个参数,其影响系统性能的机理具有一定的耦合性,未来需要深入分析和折中优化设计.

参考文献:

- [1] PORCINO D, HIRT W. Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2003, 41(7): 66 - 74.
- [2] VIJAYAKUMARAN S, WONG T F. On equal-gain combining for acquisition of time-hopping ultra-wideband signals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(3): 335 - 346.
- [3] 匡麟玲, 陆建华, 等. 密集多径信道下 IR-UWB 信号同步捕获方法[J]. *电子学报*, 2004, 32(12A): 127 - 131.
KUANG Lin-ling, LU Jian-hua, et al. Acquisition of IR-UWB Signals in Dense Multipath Channels[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12A): 127 - 131. (in Chinese)
- [4] YANG L, GIANNAKIS G B. Timing UWB signals using dirty templates[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 53(11): 1952 - 1963.
- [5] SUWANSANTISUK W, WIN M Z. Multipath aided rapid acquisition: Optimal search strategies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 52(1): 174 - 193.
- [6] VIJAYAKUMARAN S, WONG T F. Best permutation search strategy for ultra-wideband signal acquisition[J]. *IEEE Transaction on Communication*, 2005, 52(5): 760 - 765.
- [7] HOMIER E A, SCHOLTZ R A. A generalized signal flow graph approach for hybrid acquisition of ultra-wideband signals[J]. *International Journal of Wireless Information Network*, 2003, 10(4): 179 - 191.
- [8] TIAN Z, GIANNAKIS G B. A GLRT approach to data-aided timing acquisition in UWB radios-part I: Algorithms[J]. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2956 - 2967.
- [9] VIJAYAKUMARAN S, WONG T F, et al. On the asymptotic performance of threshold-based acquisition systems in multipath fading channels[J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2005, 51(11): 3973 - 3986.
- [10] RENZO D, ANNONI M, et al. A novel class of algorithms for timing acquisition of differential transmitted reference UWB receivers: Architecture, performance analysis and system design[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 6(7): 2368 - 2387.
- [11] 汪一鸣, 朱洪波. 一种基于自适应的 DS-UWB 同步捕获方法[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1148 - 1152.
WANG Yi-ming, ZHU Hong-bo. A synchronization scheme based on the adaptation algorithm for DS-UWB[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1148 - 1152. (in Chinese)
- [12] HE N, TEPEDELENLIOGLU C. Performance analysis of non-coherent UWB receivers at different synchronization levels[J]. *IEEE Transaction on Wireless Communication*, 2006, 5(6): 1266 - 1273.
- [13] HE N, TEPEDELENLIOGLU C. Adaptive synchronization for non-coherent UWB receivers[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP'04)*[C]. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, May 17 - 21, 2004, vol 4: iv - 517 - iv - 520.
- [14] SHIN D H, CHO Y H, et al. A new synchronization scheme exploiting mean energy profile in UWB non-coherent receiver[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communication(ICC'06)*[C]. Istanbul, Turkey: IEEE, Jun 11-15, 2006, vol 12: 5721 - 5725.
- [15] RABBACHIN A, OPPERMANN I. Synchronization analysis for UWB systems with a low-complexity energy collection receiver[A]. *Proceedings of 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (Joint UWBST&IWUWBS 2004)*[C]. Kyoto, Japan: IEEE, 2004, 288 - 292.
- [16] KAI BAI, NING HE, et al. Acquisition performance comparison of energy detector and single-pulse correlator for UWB systems[A]. *Proceedings of IEEE 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems(CISS 2007)*[C]. Baltimore, MD, USA: IEEE, John Hopkins University, 2007, 141 - 146.
- [17] ZHANG J, ORLIK P, et al. UWB Systems for wireless sensor networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(2): 313 - 331.
- [18] IINATTI J H. On the threshold setting principles in code acquisition of DS-SS signals[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000, 18(1): 62 - 72.
- [19] HUMBLET P A, AZIZOGLU M. On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(11): 1576 - 1582.

作者简介:



杨志华 男,汉族,1978年8月生于黑龙江绥化市,哈尔滨工业大学深圳研究生院博士研究生.主要研究方向超宽带信号与系统、捕获与同步技术. Tel: 13798239337; 0755 - 26033066;
E-mail: yangzhihua@hitsz.edu.cn; yangzhihua_00@sina.com.cn



张钦宇 男,汉族,1972年12月生于江苏扬州市,哈尔滨工业大学深圳研究生院通信工程研究中心主任,教授.主要研究方向包括无线通信、生物医学电子、人工智能神经网络等.
E-mail: zqy@hit.edu.cn