

基于信噪比控制的自适应伪码捕获算法

赵志远¹, 陈树新¹, 华 璐²

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;2.69052 部队指挥自动化站,新疆乌鲁木齐,830000)

摘要 针对复杂电磁环境下接收信噪比随机变化的特点,提出了一种基于信噪比控制的自适应伪码捕获算法,减少了捕获时间,降低了虚警概率。在分析滑动相关捕获法的性能基础上,构建了滑动相关伪码捕获的自适应结构,实现了在接收信噪比控制下积分时间和门限值的设置,研究了上述参数对捕获性能的影响,仿真结果表明:根据积分时间不同,在 $\text{SNR} > -3 \text{ dB}$ 时,平均捕获时间最大可以减少 50%,在 $\text{SNR} < -7 \text{ dB}$ 时虚警概率下降 5%~35%,满足信噪比变化情况下对捕获性能的设计需求。

关键词 自适应捕获;积分时间;门限设置;捕获时间;虚警概率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.019

中图分类号 TN911.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0080-05

An Adaptive Acquisition Algorithm of PN Codes Based on SNR Control

ZHAO Zhi-yuan¹, CHEN Shu-xin¹, HUA Lu²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Automatic command station, Unit 69052, Urumqi 830000, China)

Abstract: An adaptive acquisition algorithm of PN codes is presented based on SNR control because the acquiring SNR is time-varying in complex electromagnetism environment. The use of the algorithm can reduce the mean code acquisition time and the virtual alarm probability. Based on the performance analysis of the sliding correlation method, an adaptive scheme is constructed to achieve the goal to set the time of integral and the threshold in SNR control, and the influence of the above parameters on the performance of acquisition is studied as well. Simulation results show that the method can reduce the mean code acquisition time by 50% when $\text{SNR} > -3 \text{ dB}$, and reduce the virtual alarm probability by 5%~35% when $\text{SNR} < -7 \text{ dB}$, the method meets the design requirements of acquisition properties under the SNR change environment.

Key words: adaptive acquisition; time of integral; threshold; acquisition time; virtual alarm probability

PN 码同步主要分为捕获和跟踪 2 个过程,并且只有正确实现了伪码捕获才有可能实现后续的处理。当前常用的伪码捕获方法有滑动相关捕获法^[1]、并行捕获法^[2]、匹配滤波器捕获法^[3]、频域变

换捕获法等^[4]。如何用更短的时间和较少的资源完成捕获,是研究的重要方向。相关文献[5]利用非对称 FFT 计算和视频积累相结合的捕获算法解决极低信噪比条件下的捕获问题。文献[6]利用 FFT 并

收稿日期:2013-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302153)

作者简介:赵志远(1989—),男,山东德州,硕士生,主要从事非合作电子干扰、信号处理等研究。

E-mail:zhaozhiyuan-0815@126.com

行搜索伪码相位和载波频偏,通过差分处理消除载波频偏的影响,先捕获伪码相位再纠正频偏,以牺牲少量信噪比为代价来换取资源、平均捕获时间的减少。文献[7]通过预估计直扩系统中的相关能量来调整门限,减少了捕获时间,补偿高信噪比时的性能衰减。文献[8~9],使用一种基于折叠匹配滤波器的伪码捕获方法,减少了资源利用,提高捕获速度。

1 滑动相关伪码捕获

滑动相关捕获法见图1。接收信号与本地信号经过乘法器和积分器,在时刻 T_d 输出积分值,送入门限比较器。如果积分值小于门限,输出一个信号给控制时钟,改变本地参考序列的相位状态,重复上述过程;当积分器的输出大于设定的门限,就完成了对接收伪码序列相位的捕获,门限比较器的输出不再改变控制时钟的工作状态,同时输出一个信号给同步跟踪电路,进入伪码序列的同步跟踪^[10]。

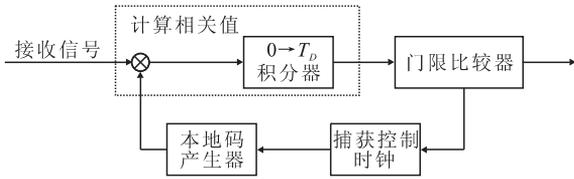


图1 单积分滑动相关捕获法

Fig.1 The single integral sliding correlation acquisition method

滑动相关捕获法的平均捕获时间 $\bar{T} = NT_d = kNT_c$ 。其中, N 为伪码周期, T_c 为码元长度, $T_d = kT_c$ 为积分时间, $n \leq k \leq N^{[10]}$ 。

考虑噪声干扰的影响,使检测概率 $P_d < 1$, 虚警概率 $P_a \neq 0 (0 < P_a \leq 1)$, 发生虚警造成惩罚时间, 平均捕获时间^[10]:

$$\bar{T} = \left[N + \frac{P_a}{(1 - P_a)^2} \right] T_d + \frac{1 - P_d}{P_d} \left[2N + \frac{P_a}{(1 - P_a)^2} \right] T_d \quad (1)$$

根据式(1),减少平均捕获时间 \bar{T} 需要增大检测概率 P_d , 减小虚警概率 P_a , 减小积分时间 T_d 。 P_d 与 P_a 受积分时间 T_d 的影响。 $T_d = kT_c$, 通过调整积分器系数 k 改变积分时间, 进而改变捕获电路的相关输出, 使检测概率和虚警概率变化。增大系数 k 使 T_d 增大, 可以减小 P_a , 但积分时间的延长增加了捕获时间, 减小系数 k 使 T_d 减小, 减小捕获时间, 在低信噪比时会因为相关增益不足使 P_a 变大。图2仿真了 k 值对虚警概率的影响。

仿真对31位 m 序列的捕获, 设置 $SNR = 0 \text{ dB}$ 、 -3 dB 、 -8 dB 3种情况, 仿真积分时间 $T_d = kT_c$ 中系数 k 从31减小到1时滑动相关法的捕获状况。如图2所示, 积分时间影响虚警概率。大信噪比情况下, $SNR = 0 \text{ dB}$, 积分时间 $T_d = 12T_c$, 虚警概率 $P_a < 10^{-2}$ ^[11], 本地序列 $T_d > 12T_c$ 捕获性能不再提高, 但会增加平均捕获时间。 $SNR = -3 \text{ dB}$, 本地码长 $T_d > 18T_c$ 捕获性能不再提高。小信噪比情况, $SNR = -8 \text{ dB}$ 时, 噪声能量覆盖同步相位的增益, 为获得比较好的捕获性能, 需要增加序列周期。

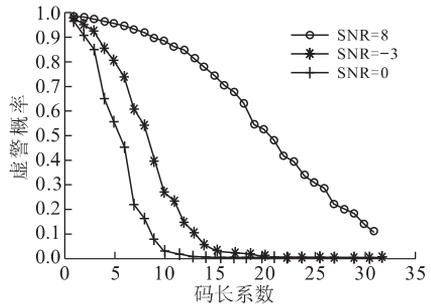


图2 码长系数 k 对捕获的影响

Fig.2 The effects on capture of the code length coefficient k

滑动相关捕获法的积分时间是定值, 大信噪比时存在相关增益和捕获时间的浪费, 小信噪比时相关增益不足造成虚警概率增大, 使捕获时间增加。

2 自适应伪码捕获算法

针对滑动相关捕获法的结构不能适应信噪比变化的问题, 本文构建了伪码捕获的自适应结构, 根据信噪比控制积分时间和门限的设置。

2.1 自适应算法结构

通过上一节分析, 在大信噪比情况下, 缩短积分时间不影响捕获性能。可以考虑根据具体环境中信噪比变化, 自适应的调整积分时间的设置, 减少捕获时间。改变积分时间会使相关增益变化, 需要同时调整门限, 控制捕获过程的检测概率和虚警概率的变化。改进后的捕获结构见图3。

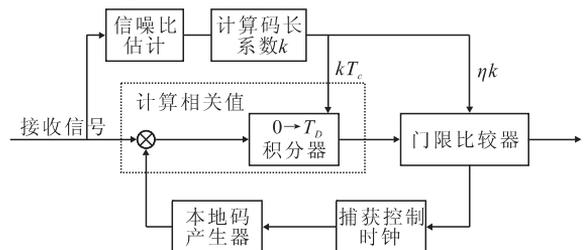


图3 自适应滑动捕获法

Fig.3 The adaptive sliding correlation acquisition method

信号进入接收机,首先进行信噪比估计,然后根据所处的信号环境和对捕获性能的要求计算系数 k ,调整积分时间 T_D 和门限值 ϵ 。信号能量强,系统减少积分时间,降低门限值,提高检测概率,减少平均捕获时间。信号能量弱,系统延长积分时间,提高门限值,减少虚警,改善捕获性能。

复杂电磁环境下信噪比随机变化,根据信噪比改变积分时间,可以缩短捕获时间,改善捕获性能。假设信噪比估计准确,为实现积分时间的自适应设置,需要计算不同信噪比对应的系数 k 。为保证捕获性能,需要计算不同信噪比对应的门限。

2.2 积分时间自适应控制

设置接收信号和本地信号是 31 位 m 序列,通过调整积分器中系数 k 改变积分时间,影响捕获的虚警概率,仿真得到使 $P_{fa} < 10^{-2}$ [11] 的 k 值,见图 4。

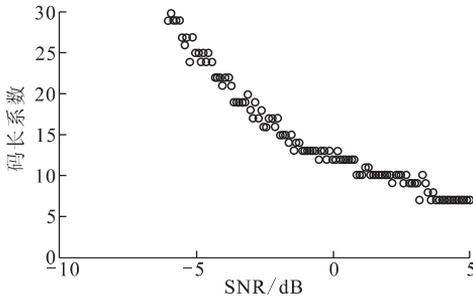


图 4 不同信噪比下满足捕获性能的 k 值
Fig.4 The coefficient k meet the acquisition performance under different SNR

图 4 中,随着信噪比的增加,满足 $P_{fa} < 10^{-2}$ 需要的 k 值减少。 $SNR < -7$ dB,积分时间 $T_D > 31 T_c$ 才能满足捕获性能,此时需要增加序列周期; $SNR > -7$ dB, $T_D < 31 T_c$ 可以满足捕获性能,并且积分时间可以进一步减少; $SNR > 3$ dB, $T_D = 7 T_c$ 可以满足捕获性能。 -7 dB \leq SNR \leq 3 dB 时,系数 k 与信噪比 SNR 近似于二次曲线关系,拟合得到两者的对应关系:

$$k = 0.23SNR^2 - 1.4SNR + 11.79 \quad (2)$$

那么:

$$T_D = (0.23SNR^2 - 1.4SNR + 11.79) T_c \quad (3)$$

得到不同信噪比需要的 k 值后,接收机可根据实际环境中的信噪比调整积分时间。为处理方便,可根据式(3)近似计算积分时间。

2.3 门限自适应设置

根据式(1),积分时间的缩短使相关增益减小,如果不降低门限,会使检测概率迅速下降,影响平均捕获时间。

本文中伪码周期 $N = 31$,虚警概率 $P_{fa} < 10^{-2}$,

虚警对平均捕获时间的影响不明显,可认为虚警概率 $P_{fa} = 0$,式(1)可化简为:

$$\bar{T}(P_{fa} = 0) = \frac{2 - P_d}{P_d} N T_D \quad (4)$$

式中: N 为伪码周期,影响平均捕获时间 \bar{T} 的变量是积分时间 T_D 和检测概率 P_d 。 T_D 由信噪比控制,是定值, P_d 与 \bar{T} 成反比例关系。减少捕获时间,要尽量提高检测概率 P_d ,需要调整门限。

设置门限 $\epsilon = \eta k$,积分时间 T_D 决定了同步相位的相关增益,所以门限值要随积分时间改变。受噪声影响,积分器输出地增益会有衰减或增加,可通过门限系数 η 进行调整。 η 增大,门限值提高,则检测概率 P_d 降低,虚警概率 P_{fa} 降低; η 减小,门限值降低,则检测概率 P_d 增大,虚警概率 P_{fa} 增大。为减少捕获时间,要使 P_d 尽量大, P_{fa} 尽量小。图 5 为仿真得到 $P_d \geq 0.8$,不同信噪比对应的门限系数。

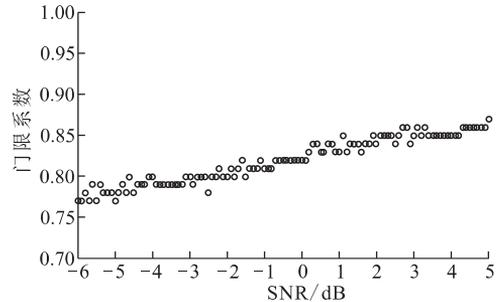


图 5 不同信噪比对应门限系数
Fig.5 Threshold coefficient under different SNR

从图 5 中得出,信噪比提高,使检测概率 $P_d \geq 0.8$,需要增大 η ,提高门限;为处理方便,设置 $\eta = 0.8$,可以满足较大信噪比范围内的捕获性能。

3 性能分析

改进后的捕获方法实现了在接收信噪比控制下的积分时间和门限值设置,与传统滑动相关捕获方法比较,在完成捕获的同时减少了平均捕获时间和虚警概率。

3.1 捕获情况

图 6 仿真实验验证了 SNR = -3 dB 时,设置 $k = 12, k = 17, k = 25, k = 31$ 的捕获情况。第 2.2 节仿真得到 SNR = -3 dB,捕获 31 位 m 序列,要求捕获时虚警概率 $P_{fa} < 10^{-2}$ 时,需要积分时间 $T_D = 17 T_c$ 。图 6 中, $T_D = 12 T_c$,同步位的相关增益不够大,受噪声影响会产生较多虚警; $T_D = 17 T_c$,同步相位的相关增益很明显,受噪声影响的可能性大大降低; $T_D = 25 T_c, T_D = 31 T_c$,同步相位的相关增益继续增大,对捕获性能的改善不明显。

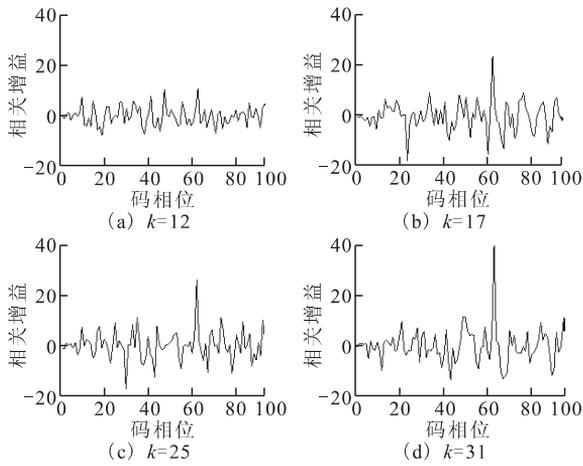


图6 SNR=-3 dB 不同积分时间的捕获情况
Fig.6 The acquisition condition of different time of integral under -3 dB SNR

3.2 平均捕获时间

滑动相关捕获法的平均捕获时间 $\bar{T} = NT_D = kNT_c$, ($n < k \leq N$), 受伪码周期和积分时间影响, 不受信噪比直接影响。改进后的捕获方法, 在信噪比控制下自适应调整相关积分时间, 从而改变平均捕获时间。2种方法的平均捕获时间见表1。

表1中, 信号环境不同, 传统滑动相关捕获法的积分时间是定值, 平均捕获时间是定值。改进的捕获方法在 $SNR \geq 3$ dB 和 $SNR < -7$ dB 时, 平均捕获时间固定; -7 dB \leq SNR \leq 3 dB 情况下, 平均捕获时间随 k 值改变。 k 值由图4仿真得到, $N=31$,

取码元长度 $T_c=0.002$ ms; 对滑动相关法, 取 k 分别为 15 的 25, 图7 仿真了 2 种方法平均捕获时间。

由图7可得出, 改进的捕获算法的捕获时间随着信噪比的提高不断减少, 信噪比越大, 在捕获时间上的优势越明显。SNR=5 dB, 与积分时间 $k=15$ 的滑动相关法相比节约一半的时间, 与积分时间 $k=25$ 的滑动相关法相比只需要不到 1/3 的时间。

3.3 虚警概率

信噪比不直接影响滑动相关捕获法的捕获时间, 但小信噪比情况下虚警概率增加。积分时间越短, 同步相位的增益越小, 小信噪比时的虚警次数增多, 捕获时间越长。改进后的捕获方法根据环境中信噪比的变化自适应的调整积分时间, 在信噪比较大时, 减少积分时间, 提高捕获速度, 在信噪比小的情况下延长积分时间, 提高相关增益, 降低虚警概率。仿真2种方法的捕获性能见图8。

从图8中得出, 改进后的捕获方法虚警概率小于滑动相关捕获法。与图7比较, 滑动相关法积分时间 $k=15$ 的平均捕获时间少, 但随着信噪比降低, 相关增益不足, 虚警概率迅速增大, 性能最差。改进的捕获方法虚警曲线比较平稳, 捕获性能最好。

综合比较滑动相关法改进前后在平均捕获时间和虚警概率上的表现, 改进方法在信噪比大时减少了捕获时间, 在信噪比小时通过牺牲捕获时间的代价降低虚警概率, 整体的捕获性能有所提高。

表1 2种捕获方法平均捕获时间

Tab.1 The mean code acquisition time of acquisition method

捕获方法	信噪比	相关积分时间	平均捕获时间
滑动相关捕获法		$T_D = kT_c$ ($n < k \leq N$)	$\bar{T} = NT_D = kNT_c$
	$SNR \geq 3$ dB	$T_D = 7T_c$	$\bar{T} = 7NT_c$
自适应捕获法	-7 dB \leq SNR \leq 3 dB	$T_D = kT_c$ (k 为 SNR 对应码长)	$\bar{T} = kNT_c$
	$SNR < -7$ dB	$T_D = NT_c$	$\bar{T} = N^2 T_c$

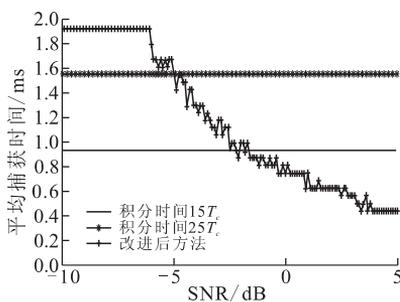


图7 2种方法平均捕获时间比较

Fig.7 The mean code acquisition time of acquisition method

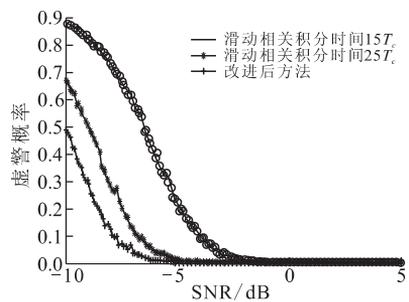


图8 2种方法在不同信噪比情况下的捕获性能

Fig.8 The acquisition performance of acquisition method under different SNR

4 结语

针对复杂电磁环境中信噪比随机变化的特点,提出一种基于信噪比的自适应伪码捕获算法,分析了积分时间、门限对捕获性能的影响,在滑动相关捕获法的基础上构建自适应结构,实现在接收信噪比控制下积分时间和门限值设置,改善了滑动相关法的捕获性能。通过仿真数据验证,该方法可以适应信噪比变化,在信噪比大时减少捕获时间,在信噪比小时降低了虚警概率,捕获性能有所提高。

仿真了对短码的捕获,分开讨论积分时间和门限的自适应设置,没有考虑它们之间的相互影响。没有考虑信噪比估计性能对算法性能的影响。对于复杂电磁环境,只针对信噪比变化和白噪声情况进行仿真,没有考虑多普勒频移、多径和其它噪声情况下捕获方法的性能。滑动相关法适用于短码捕获,对于长周期伪码序列,匹配滤波器捕获法和频域变换捕获法更加有效,也可以在这两种方法中引入自适应结构。这些是本文进一步深入研究的方向。

参考文献(References):

- [1] Polydoros A and Weber C. A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition part I/II: a matched-filter receiver. *IEEE transactions on communications*, 1984, 32(5): 550-560.
- [2] Chawla K K Sarwate D V. Parallel acquisition of PN sequences in DSSS systems[J]. *IEEE trans on commun*, 1994, 42(5): 2155-2164.
- [3] Yu T S. Rapid code acquisition algorithms employing PN matched filters[J]. *IEEE trans on commun*, 1998, 36(6): 724-733.
- [4] Akopian D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods[J]. *IEE proceedings-radar, sonar and navigation*, 2005, 152(4): 277-286.
- [5] 卢虎, 廉保旺, 沈淑渭, 等. 极低信噪比环境下的 P 码二维直接捕获改进算法[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2009, 10(5): 45-49.
LU Hu, LIAN Baowang, SHEN Shuwei, et al. An improved algorithm for P-code dimension direct capture in extra-low SNR condition[J]. *Journal of air force engineering university: natural science edition*, 2009, 10(5): 45-49. (in Chinese)
- [6] 罗炬锋, 王翔, 付耀先, 等. 基于 FFT 并行搜索伪码和频偏的快速捕获新方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 563-568.
LUO Jufeng, WANG Xiang, FU Yaoxian, et al. A new fast acquisition method of parallel search pseudo-code and frequency offset based on FFT[J]. *Journal of electronics & information technology*, 2011, 33(3): 563-568. (in Chinese)
- [7] Soonam Yeom, Yunho Jung, Seongjoo Lee. An adaptive threshold technique for fast PN code acquisition in DS-SS systems[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2011, 60(6): 2870-2875.
- [8] 徐晓艳, 李署坚, 邵定蓉, 等. 高动态环境下扩频通信系统信号快速捕获的研究[J]. *遥测遥控*, 2005, 30(3): 22-27.
XU Xiaoyan, LI Shujian, SHAO Dingrong, et al. Study of signal's rapid acquisition for spread spectrum communication system in high dynamic circumstances[J]. *Journal of telemetry, tracking and command*, 2005, 30(3): 22-27. (in Chinese)
- [9] 王江浩, 李署坚. 一种改进的伪码捕获方法[J]. *电子测量技术*, 2008, 32(12): 136-138.
WANG Jianghao, LI Shujian, Improved method of acquisition of pseudo noise[J]. *Electronic measurement technology*, 2008, 32(12): 136-138. (in Chinese)
- [10] 冯彦芳. 直扩通信中的伪码捕获技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
FENG Yanfang, Research on pseudo-code acquisition technology in DSSS communication[D]. Xi'an: Xidian university, 2010. (in Chinese)
- [11] 刘杨, 秦红磊, 金天. 考虑互相关干扰的 GPS 信号捕获门限设定方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(3): 268-273.
LIU Yang, QIN Honglei, JIN Tian. Threshold setting method for GPS signal acquisition under cross-correlation effect[J]. *Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics*, 2011, 37(3): 268-273. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)