

文章编号:1001-9081(2010)08-2214-04

高动态环境下结合频谱校正的长周期伪码捕获

庞统,张天骐,刘燕丽,杜晓华

(重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆400065)

(justpt@163.com)

摘要:针对基于快速傅里叶变换(FFT)的伪码捕获过程中出现的能量泄漏和扇贝损失,通过对一种基于分段匹配滤波—快速傅里叶变换(PMF-FFT)的伪码捕获方法的分析,提出了使用频谱校正的方法来解决这些问题。对FFT后的功率谱最大值进行频谱校正后,提高了最大幅值,同时抑制了旁瓣的干扰,得到了更为精确的多普勒频偏,这样就能获得更高的检测概率。同时给出了基于该算法的信号模型和理论分析的表达式,在理论分析的基础上,使用计算机进行仿真,证明该方法有良好的捕获效果。

关键词:频谱校正;伪码捕获;高动态环境;扇贝损失;功率谱

中图分类号:TP393;TP391.9 **文献标志码:**A

Capture of long-period PN code using spectrum correction in high dynamic doppler shift situation

PANG Tong, ZHANG Tian-qi, LIU Yan-li, DU Xiao-hua

(College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For the problem of power leakage and scallop loss in PN code capture that bases on Fast Fourier Transform (FFT), spectrum correction was used according to the analysis of method based on the PMF-FFT. While spectrum correction of the maximum power spectrum after FFT, the maximum amplitude was increased, the sidelobe interference was restrained, and a more accurate Doppler shift was obtained, so that a higher detection probability was got. At the same time, signal model and theoretical analysis expression based on this algorithm were shown. On the basis of the theoretical analysis, the computer simulation results show that the method has good capture results.

Key words: spectrum correction; PN code capture; high dynamic environment; scallop loss; power spectrum

0 引言

直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)系统是一种应用广泛的数字信息传输处理系统,具有抗干扰能力强,隐蔽性好,容易实现多址传输等优点,它在发射端直接用伪随机序列进行扩频调制,然后在接收端用一个与发射端相同且同步的伪随机序列进行解扩处理,所以精确的同步是DSSS通信系统优越性的基本前提。同步一般包括:捕获阶段和跟踪阶段。概括来讲,捕获是使本地参考码和接收码的相位差小于一个码元宽度,即通常所说的粗同步;跟踪是调整相位差,尽可能使其趋近于零,即精同步。

伪码捕获的方法众多,在当前有许多使用并行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的方法进行捕获,它的一大优点是捕获速度快,如文献[1-3]所提出的方法。但在使用这些基于FFT的方法在频域进行捕获时,会引起由于时域的截断而产生的能量泄漏和分析点个数有限而带来的扇贝损失^[4],它们使得离散频谱的幅值、相位和频率都可能产生较大的误差。

本文针对FFT过程中出现的能量泄露和扇贝损失,提出

了将频谱校正的方法运用到伪码捕获的过程中。通过对累加后的捕获信号最大值的频谱进行校正,能够使信号的多普勒频偏尽可能精确,有效地减小能量泄露,降低扇贝损失,提高检测概率,同时不增加硬件的复杂度,并为进一步的载波恢复奠定基础。在这之后进行伪码同步跟踪,将能获得更优的基带信号。下面详细介绍谱估计算法在直接序列扩频通信同步方面的应用。

1 理论分析

通过一种分段匹配滤波—快速傅里叶变换(PMF-FFT)法为例来说明伪码捕获^[5],并对捕获过程中出现的问题进行分析,提出合理的解决方案。

1.1 相关损失和扇贝损失

根据参考文献[5]中伪码捕获结构,取伪码速率为10 Mc/s,部分相关器组总的运算长度为 $L = 800$,单个相关器长度为 $P = 50$,相关器个数为 $R = 16$,FFT的点数取8,可得伪码捕获幅频响应如图1所示。图中部分相关是一个低通滤波的过程,随着多普勒频移的增大,对应的FFT输出值随之下降;同时,相关运算带来相关损失^[6],相关损失引起FFT输

收稿日期:2010-02-03;**修回日期:**2010-04-07。 **基金项目:**国家自然科学基金—中物院NSAF联合基金资助项目(10776040);国家自然科学基金资助项目(60602057);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0927);重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC, 2009CA2003);重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BB2287);重庆市教委自然科学基金资助项目(KJ080517)。

作者简介:庞统(1984-),男,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向:直接序列扩频通信、信号谱估计;张天骐(1971-),男,四川眉山,教授,主要研究方向:宽带微弱无线电信号处理、无线通信智能信号处理;刘燕丽(1983-),女,河南鹤壁人,硕士研究生,主要研究方向:扩频通信信号的捕获和跟踪;杜晓华(1984-),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向:多径环境下伪码捕获。

出值下降,因而导致检测概率的下降。相关器的个数越多,做FFT运算的点数越少,但同时相应相关损失也越大。在实际中,应根据系统多普勒频移的范围以及DSP器件的运算能力合理选择相关器规模和FFT点数。虽然相关损失不可避免,但可以通过频谱校正的方法使FFT输出值得到修正,降低相关损失的影响。

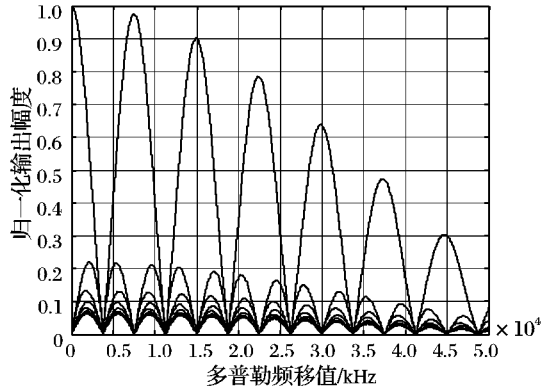


图1 幅频响应图

同时,由文献[4]知道在这种伪码捕获方法中,FFT运算同时存在着扇贝损失。也就是说输出频谱只限制在基频的整数倍处,而不是连续的频率函数,只能在离散点上看到真实的数值,当多普勒频移值位于FFT输出两点之间时,该频率对应的FFT输出也会下降,这种周期性的幅度下降也会带来检测概率的下降。

减小扇贝损失的方法一般有补零法和加窗法^[6-7]。补零法就是在FFT运算的实际数据后面补零,增加FFT运算的点数就必然使样点间距离更近、谱线更密,谱线变密后原来看不到的谱分量就看到了,这样就减小了扇贝损失。加窗法是通过输入有效数据进行窗函数加权来改善谱分析结果,它对扇贝损失的改善效果与补零法相近。但这两种方法都是以付出硬件复杂度为代价的。

本文通过用频谱校正的方法^[8-9]来对捕获到的信号进行校正,提高频偏检测的精度,尽可能减小扇贝损失,用这种方法使得输出幅值和频率得到校正,从而有效提高检测概率。

1.2 频谱校正

比值校正公式法是一种比较常用的校正方法,具有方法简单,运算速度快的优点。使用比值校正公式法进行校正,由文献[9]得到校正函数:

$$v = F(\Delta f) = \frac{W(\Delta f)}{W(\Delta f + 1)} = \frac{y_k}{y_{k+1}} \quad (1)$$

其中: $F(\cdot)$ 是校正函数, Δf 是真实频率与次大值对应频率之间的间隔, $W(\Delta f)$ 表示窗谱函数的幅值, y_k 为离散频谱中第 k 条谱线处的幅值。求解出其反函数得:

$$\Delta f = g(v) \quad (2)$$

校正得到的真实频率为:

$$f_0 = (k - \Delta f) \frac{f_s}{N} \quad (3)$$

其中: N 表示采样点数, f_s 为采样频率。设归一化频谱模函数为 $W(f)$, 则归一化加窗谐波信号频谱主瓣函数为:

$$y = AW(\Delta f) = AW(f - f_0) \quad (4)$$

上式中 A 为真实幅值, 对应主瓣中心 f_0 , 将 $y = y_k$, $f = k$ 代入式(4)得:

$$y_k = AW(f - f_0) \quad (5)$$

式中 $k - f_0 = \Delta f$, 故可解得幅值校正公式:

$$A = y_k / W(\Delta f) \quad (6)$$

为了与参考文献[5]中提到传统的加窗法相区别, 本文以矩形窗为例来构造窗函数, 得到校正函数:

$$v = F(\Delta f) = \frac{W(\Delta f)}{W(\Delta f + 1)} = \frac{\sin(\pi \Delta f)}{\pi \Delta f} \times \frac{\pi(\Delta f + 1)}{\sin[\pi(\Delta f + 1)]} = -\frac{\Delta f + 1}{\Delta f} = \frac{y_k}{y_{k+1}} \quad (7)$$

解出归一化的频率校正量:

$$\Delta f = -\frac{1}{v + 1} \quad (8)$$

将归一化的频率校正量 Δf 代入(3)式得到校正频率。将式(8)代入式(6), 可得矩形窗幅值校正公式:

$$A = \frac{\pi \Delta f y_k}{\sin(\pi \Delta f)} \quad (9)$$

由上文可以总结出使用频谱校正法进行校正的过程如下:

通过使用PMF-FFT法求出累加后的功率谱 $A(r)$, 并对 $A(r)$ 选大处理, 得到多普勒频偏的估计值 \hat{f}_d ; 设 $\hat{f}_d = y_k$, 其中 k 为功率谱最大值对应的频率数, 根据频谱校正公式求出归一化的频率校正量 Δf ; 将 Δf 分别代入频率校正公式和幅值校正公式求出校正频率和校正幅值。

2 算法总结

图2给出了实现以上算法的结构框图。

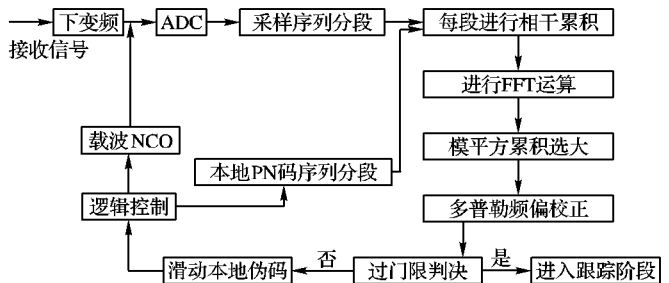


图2 伪码捕获框图

算法流程描述如下。

1) 将接收到的直扩信号下变频以后, 以伪码速率进行采样, 按顺序取 L 点, 每 P 点为一段, 顺序取 R 段。同时按照时间不确定度生成一定初始相位的本地伪码序列, 也为 P 点为一段, 共 R 段。

2) 利用部分匹配滤波器, 将每一段中的信号与本地伪码序列做 P 点的相关运算, 依次完成 R 段。

3) 对得到新的每段 P 点共 R 段的 L 个数据进行重新组合, 组成一个 R 行 P 列的相关矩阵 W_{RP1} , 矩阵元素 $W_{RP1}(i, j)$ 中, i 表示相关器的编号, j 表示相关器中的第 j 个存储值, 1 表示第一次迭代, 每列表示在 R 个相关器存储值中取下标相同的数据, $(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Rj})$ 表示取每个相关器中的第 j 个元素。然后对矩阵 W_{RP1} 的每列做 K 点 FFT 运算, 得到矩阵 W_{PR1} 对 FFT 的输出结果取模平方, 将结果存储在相应的累加器中, 共 PK 个累加器。

4) 在接收端顺序取 L 点, 同时将本地伪码顺序延迟 L 个码片, 取得另一矩阵 W_{PR2} , 重复 3) ~ 4) 步, 将此过程执行 Q

次,得到 Q 个相关矩阵,将每次 FFT 的结果取模平方,在累加器中进行 Q 次非相干累加,将 Q 次非相干累加结果按行计算。

5)在不补零的情况下 $R = K$,按列比较 K 个累加器的数值,对其中的最大值进行频谱校正,将校正过的最大值与门限进行比较,如超过预设门限,则说明本地伪码序列与接收扩频信号的伪码相对齐,如果没有超过预设门限值,则说明本地伪码序列与接收端扩频信号中的伪码相位没有对齐。将行数加 1 再比较。

6)若将矩阵的行运算进行完以后,仍没有超过门限的值出现,则认为本地伪码与扩频信号中伪码相位没有对齐,通过逻辑控制,将已经生成的 R 段本地扩频码中的第一段数据舍去,其余 $R - 1$ 端数据一次前移,在其后顺序补上一段 P 点的伪码数据。

7)重复 1)~5)步,直到伪码相对齐为止。

3 仿真结果及性能分析

3.1 频偏校正

采用上述捕获法进行伪码捕获,扩频增益 $G = 1\,024$,取部分相关器组总的运算长度为 $L = 1\,024$,多普勒频偏为 $f_d = 2\,000.12\text{ kHz}$,伪码速率为 10 Mcchip/s ,累加次数为 $Q = 20$,单个部分相关器长度为 $P = 1$ 时,做 $1\,024$ 点 FFT。信噪比 = 6.0206 dB 的情况下,能够很明显地将功率谱最大值即多普勒频偏估计值捕获,但是由于噪声和扇贝损失的影响,所得到的多普勒频偏存在一定的偏差。具体如表 1 所示。

表 1 幅频响应对应表

幅值	频率/kHz
0.023 1	1 982.4
1.206 6	1 992.2
1.798 4	2 002.0
0.546 2	2 011.7
0.015 1	2 021.5

表 1 是伪码捕获时,幅频响应对应的一组数据,由表 1 可知最大幅值对应的频率为 $2\,002\text{ kHz}$,与设定的多普勒频偏存在较大的偏差,同时存在比较明显的旁瓣干扰。下面通过频谱校正的方法对得到的多普勒频偏估计值进行校正,达到改善扇贝损失,降低检测误差的目的。

在上述各个参数不变的条件下,对捕获到得多普勒频偏的估计值 f_d 使用矩形窗进行校正,得到校正前后的幅频响应仿真,调节信噪比,得到在不同的信噪比条件下,校正前后的幅频响应图。如图 3~图 5 所示。图 3(信噪比 $SNR = 6.0206\text{ dB}$)中上面的是没有校正的功率谱幅频响应仿真,下面的是校正后的幅频响应仿真。

当信噪比 = -6.0206 dB 时,校正前后的幅频响应如图 4 所示。当信噪比 $SNR = -13.9794\text{ dB}$ 时,校正前后的幅频响应如图 5 所示。当信噪比 $SNR = -20\text{ dB}$ 时,校正前后的幅频响应如图 6 所示。

由图 3~6 的对比,可以明显看出:对于同一段伪码进行捕获,对累加后的功率谱最大值进行校正,使校正后功率谱最大值有了明显的提高,同时频偏精度有所改善,旁瓣的干扰相对大幅降低,在信噪比较低的条件下,这种情况更加明显。这样就使得扇贝损失显著减小,同时对于多普勒频偏的检测概

率将大幅提升。

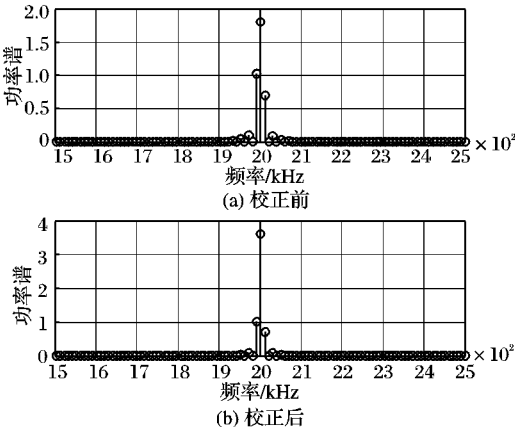


图 3 SNR = 6.0206 dB 时幅频响应对比

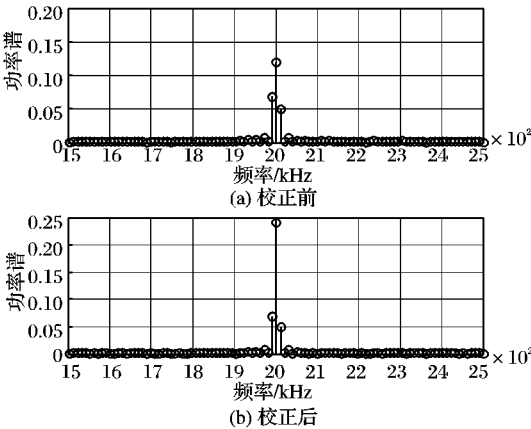


图 4 SNR = -6.0206 dB 时幅频响应对比

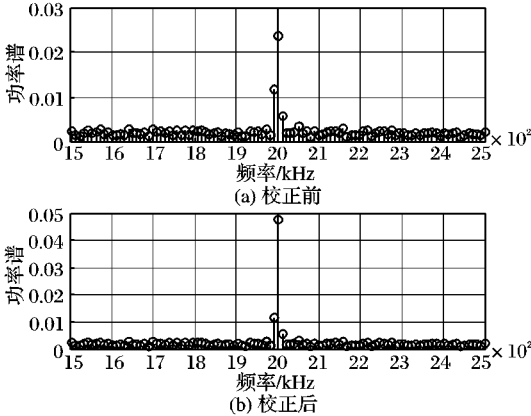


图 5 SNR = -13.9794 dB 时幅频响应对比

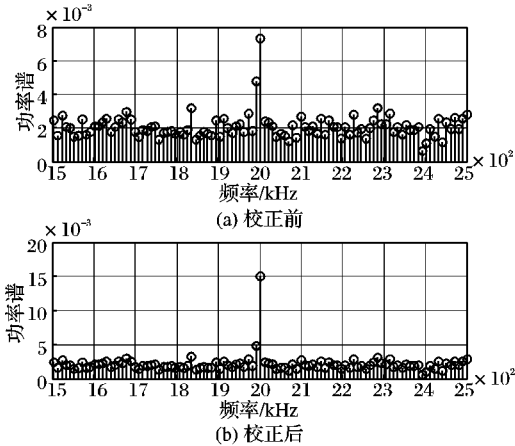


图 6 SNR = -20 dB 时幅频响应对比

3.2 检测概率

实验1 在上文的条件下,取FFT点数 $N = 256$,经过1000次蒙特卡罗仿真,考查校正前后的捕获性能,仿真结果如图7所示。可以看出,取 $N = 256$,对累加后的功率谱校正后,伪码的捕获性能有了大幅的提高,与校正前比较,检测概率为0.9时能提高3 dB左右。

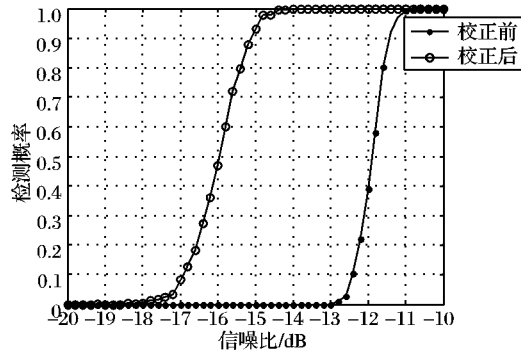


图7 $N = 256$ 时校正前后的检测性能

实验2 在同样的条件下,取FFT点数 $N = 512$,经过1000次蒙特卡罗仿真,仿真结果如图8所示。可以看出,取 $N = 512$,对累加后的功率谱校正后,与校正前比较,检测概率为0.9时同样能提高3 dB左右。

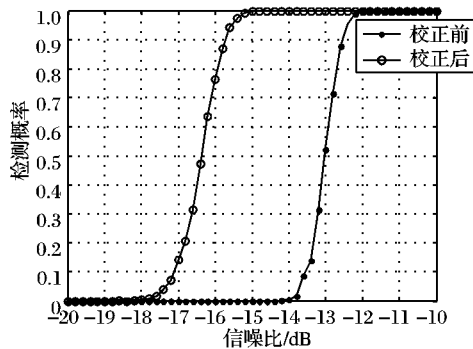


图8 $N = 512$ 时校正前后的检测性能

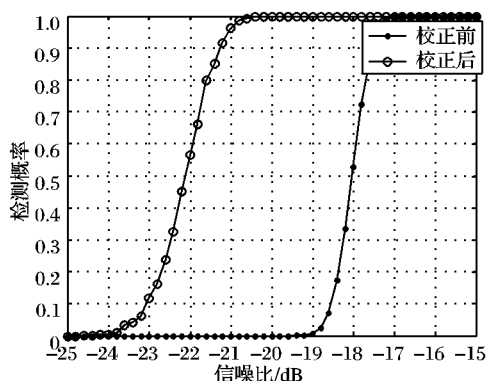


图9 $N = 1024$ 时校正前后的检测性能

实验3 在同样的条件下,取FFT点数 $N = 1024$,经过1000次蒙特卡罗仿真,仿真结果如图9所示。可以看出,取 $N = 1024$,经过校正,检测概率为0.9时同样能提高3 dB左右。

由实验1~3可知,通过取不同的FFT点数,在其他条件相同的情况下,我们可以明显看到,经过频谱校正后,检测概率等于0.9时能提高3 dB左右。同时可以看出,在其他条件相同的情况下,FFT点数越大,得到的检测性能越好,但这要求的硬件复杂度也越高。

4 结语

对于高动态长周期伪码直接序列扩频信号的捕获问题,本文提出了一种在伪码捕获后进行频谱校正,然后再进行判决的方法。在部分相关与功率谱相结合的捕获算法基础上,使用比值校正公式法,对功率谱最大值进行校正。通过仿真实验可以看出,校正后的最大值的幅值显著提高,其对应频率的精度也得到明显的改善。经过对校正前后的检测性能进行比较,可以看出校正后检测概率能提高3 dB左右,同时不需增加硬件的复杂度。因此,新的方法能够更精确地捕获到同步伪码和多普勒频偏。

参考文献:

- [1] AKOPIAN D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods[J]. IEE Proceedings of Radar Sonar and Navigation, 2005, 154(4): 277-286.
- [2] CANDIDA L S, SASCHA M S, GORDON J R P, *et al.* A Serial-parallel FFT correlator for PN code acquisition from LEO satellites [C]// International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Washington, DC: IEEE, 1998, 11: 446-448.
- [3] 郭肃丽,刘云飞.一种基于FFT的伪码快捕方法[J].扩频技术, 2003, 29(1): 11-13.
- [4] HARRIS J G. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[C]// Proceedings of the IEEE. Washington, DC: IEEE, 1978, 66: 51-83.
- [5] 刘燕丽,张天骐,苗圃,高清山.部分相关与功率谱相结合的伪码快捕算法[J].测控技术, 2009, 28(11): 14-18, 31.
- [6] 胡建波.高动态扩频信号快速捕获方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005.
- [7] 石代军.直接序列扩频突发信号同步算法研究及实现[D].成都:电子科技大学, 2007.
- [8] 谢明,丁康.频谱分析的校正方法[J].振动工程学报, 1994, 7(2): 172-179.
- [9] 丁康,谢明,杨志坚.离散频谱分析校正理论与技术[M].北京:科学出版社, 2008: 102-105.

(上接第2160页)

- [8] FICARA D, GIORDANO S, PROCISSI G, *et al.* An improved dfa for fast regular expression matching[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(5): 29-40.
- [9] KUMAR S, DHARMAPURIKAR S, YU F, *et al.* Algorithms to accelerate multiple regular expressions matching for deep packet inspection [C]// Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Washington, DC: IEEE, 2006: 339-

350.

- [10] Application layer packet classifier for Linux[EB/OL]. [2009-01-7]. <http://17-filter.sourceforge.net/>.
- [11] SMITH R, ESTAN C, JHA S. Xfa: Faster signature matching with extended automata [C]// Proceedings of the 2008 IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington, DC: IEEE, 2008: 187-201.
- [12] BECCHI M, CROWLEY P. Extending finite automata to efficiently match perl-compatible regular expressions [C]// Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference. New York: ACM, 2008: 25.