

基于 FPGA 的高动态弱扩频信号捕获方法

刘 宇¹ 张前南² 邓元俊²

LIU Yu ZHANG Qiannan DENG Yuanjun

摘 要

针对传统方法对高动态大多普勒信号捕获存在困难以及 FPGA 资源的限制, 提出一种基于多路 FFT 相关的捕获方法, 有效提高了多普勒捕获范围, 减少了 FPGA 资源消耗。算法共分为粗捕获和精捕获两步进行, 首先通过并行多路与伪码循环相关和差分相干来进行多普勒频偏粗捕获以及伪码延迟计算, 然后通过快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT) 得到多普勒精捕获频偏。通过粗捕获过程中的分路下变频, 大幅度提高了多普勒捕获范围; 通过差分相干, 降低噪声对信号与本地伪码序列相关值的影响。仿真结果表明, 所提出的捕获方法可以在信噪比为 -25 dB 的条件下, 对频偏为 -300 ~ 300 kHz 的扩频信号进行精确捕获。

关键词

高动态; 多普勒频偏; FFT; 差分相干

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.038

0 引言

在现代战场中, 为防止信息传输被敌方捕获, 通常采用扩频的方法来确保通信的保密性^[1]。常规的扩频信号的捕获方法一般有三种, 分别为串行搜索算法^[2]、基于循环相关的快速捕获算法^[3-6]、FFT 频域捕获算法^[7-8]。其中串行搜索算法和 FFT 频域捕获算法对于码相位偏差的查询使用了逐位搜索法, 导致算法复杂度较大, 资源占用过高^[9]。基于循环相关的捕获算法, 通过将信号从时域转换到频域来进行与本地伪码序列的相关, 再将相关值转换回时域进行峰值搜索来查询码相位偏差, 大幅降低了算法的复杂度, 提高了捕获速度。但是受到信号的码速率和实际采样速率的影响, 频偏捕获范围较小且在低信噪比的情况下不能准确进行捕获。因此, 本文在循环相关算法的基础上提出了一种基于多路 FFT 相关的差分相干^[10]捕获算法, 通过并行分路的方法, 提高信号频偏的捕获范围, 并通过差分相干算法, 降低了噪声对信号的影响, 从而实现低信噪比下高动态弱信号的捕获。

1 算法设计

1.1 捕获头设计

捕获头由 150 个 78 kHz 的随机序列组成, 具体的帧结构如图 1 所示。前 119 个发送为全 0 符号, 后 31 个是 M 序列。捕获头全部采用长度为 127 的伪随机序列进行扩频。

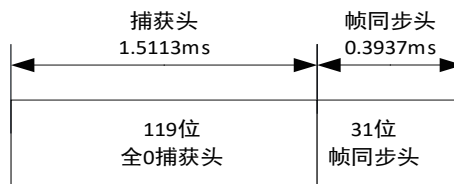


图 1 捕获头帧结构

1.2 粗捕获算法

1.2.1 粗捕获原理

粗捕获的原理是采样信号与本地扩频码求相关, 然后将相关值的峰值点与捕获门限进行比较, 当相关值的峰值点大于捕获门限时, 判定为捕获成功, 并通过峰值点位置来求得相对的伪码相位。相关的实现是本地扩频码与采样信号进行滑动相关, 即卷积。为了节约 FPGA 资源以及降低复杂度, 将时域的相关算法转换到频域运算。离散数字信号的时域相关运算公式为:

$$z(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)h(n+m) \quad (1)$$

式中: $z(n)$ 为信号与本地扩频码的相关值, $x(m)$ 为输入信号 $h(m)$ 为本地扩频码。

通过对式 (1) 进行 FFT 并经过化简可得:

$$Z(K) = X(K)H^{-1}(K) \quad (2)$$

式中: $H^{-1}(K)$ 代表快速傅里叶逆变换 (inverse fast fourier transform, IFFT)。如果 $h(m)$ 为实数, 则有 $h(m) = h^*(m)$, 于是可以得到 $H^*(K) = H^{-1}(K)$, 其中 $H^*(K)$ 是 $H(K)$ 的共轭。因此, 可以得到:

1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 黑龙江哈尔滨 150001

2. 北京遥感设备研究所 北京 100000

$$Z(K) = X(K)H^*(K) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),可得:

$$\begin{aligned} z(n) &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m)h(n+m) \\ &= \text{IFFT}(\text{FFT}[x(n)] \bullet \text{FFT}^*[h(n)]) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $z(n)$ 为信号与本地扩频码的相关值, $x(n)$ 为输入信号 $h(n)$ 的本地扩频码。

在较低信噪比的情况下, 只对一个码元进行相关值计算并不能准确地得到相关峰值, 因此本文采用差分相干算法, 即采用相邻两个码元的相关值进行共轭相乘, 提高信号增益, 减少噪声对信号的影响。差分相干算法在本文中对应公式为:

$$D(n) = |Z^*(n)Z(n+1)| \quad (5)$$

式中: $D(n)$ 为差分相干后的相关值, $z(n)$ 和 $z(n+1)$ 为相邻码元的相关值。

1.2.2 粗捕获框图与步骤

粗捕获系统结构框图如图2所示。粗捕获步骤如下。

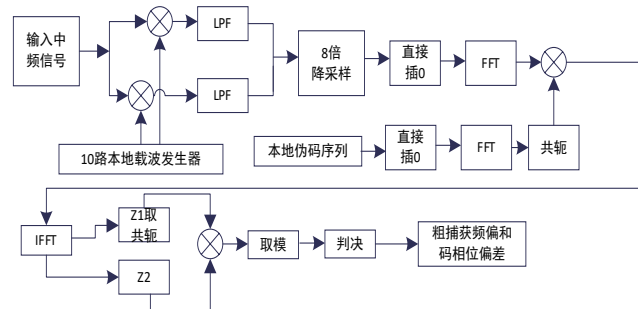


图2 粗捕获算法框图

(1) 并行多路正交下变频。本系统接收信号的多普勒频偏为 ± 300 kHz, 考虑精捕获的频偏捕获范围, 步长为 60 kHz, 共分为 10 路, 将采样信号分别与 10 路本地载波发生器输出的同相和正交分量相乘, 通过低通滤波器滤除高频分量得到基带信号 $y_m(n)$ (其中 m 代表不同分路, 取值为 1 ~ 10)。

(2) 直接插零法。码速率为 10 MHz, 系统采样频率为 80 MHz, 扩频码长度为 127, 为了降低资源占用, 本文用 8 倍降采样后, 点数变为 127 个点。在 FPGA 平台上实现 FFT 通常采用 IP 核进行, 但 FFT 的 IP 核只能实现基 2 的 FFT 运算, 因此本文采用直接插零法, 将点数变为 128 点。经过以上过程, 大幅度降低了 FFT 以及 IFFT 的点数, 减少了运算量以及 FPGA 资源占用。

(3) 将补零后的 128 位伪码序列进行 FFT 后取共轭, 分别与基带信号 $y_m(n)$ 快速傅里叶变换后的结果相乘得到 $Z_m(K)$, 将 $Z_m(K)$ 做 IFFT, 得到相关值 $z_m(n)$ 。

(4) 差分相干。每完成一次 IFFT, 将会得到 128 个点, 舍弃掉直接插零的点, 即得到一次 127 个点的相关值。得到 $z_{mi,n} = [z_{mi,1} \ z_{mi,2} \ \cdots \ z_{mi,127}]$, z_{mi} 表示第 m 路第 i 个符号与伪码

序列的相关结果。

考虑到捕获头长度以及 FPGA 资源占用, 本文差分相干采用两个相邻码元进行, 即:

$$Z_{mi} = \begin{bmatrix} z_{mi,1} & z_{mi,2} & \cdots & z_{mi,127} \\ z_{mi+1,1} & z_{mi+1,2} & \cdots & z_{mi+1,127} \end{bmatrix} \quad (6)$$

按列做差分相干, 得到:

$$D_{mi,n} = [d_{mi,1} \ d_{mi,2} \ \cdots \ d_{mi,127}] \quad (7)$$

将 10 路行向量变为 10×127 矩阵:

$$D_{m,n} = \begin{bmatrix} D_{1,1} & D_{1,2} & \cdots & D_{1,127} \\ D_{2,1} & D_{2,2} & \cdots & D_{2,127} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{10,1} & D_{10,2} & \cdots & D_{10,127} \end{bmatrix} \quad (8)$$

找到矩阵中最大值对应的坐标 m 和 n 的值:

$$[m,n] = \text{find}(D_{m,n} = \max(\max(D_{m,n}))) \quad (9)$$

得到对应的 m 路多普勒频偏 f_{dm} , 得到对应的码相位偏差 c_d :

$$c_d = (n_d - 1) \cdot 8 \quad (10)$$

为了提高捕获成功率, 降低误捕获概率, 当 $\max(D_{m,n})$ 初次超过阈值时, 再进行 5 次捕获, 当连续 6 次捕获得的 $\max(D_{m,n})$ 均超过阈值, 且对应的分路 m 的取值一致时, 则认为捕获成功, 将对应分路的 f_{d1} 以及最后一次捕获得的相位偏差传输给后续模块。

1.3 精捕获算法

1.3.1 精捕获原理

通过得到的粗捕获码相位偏差和频偏对信号进行补偿, 然后取 64 个相关后的码元进行 64 阶傅里叶变换, 将时域信号转换为频域信号, 通过得到的 64 点数据峰值位置, 计算得到对应峰值点的频偏, 即精捕获频偏^[11]。最后将得到的信号频偏是粗捕获频偏与精捕获频偏的和。精捕获框如图3所示。

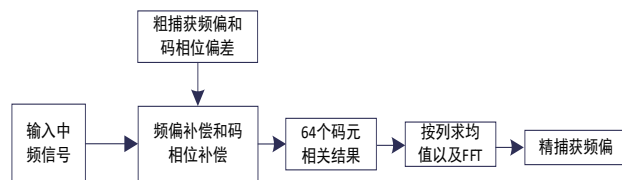


图3 精捕获算法框图

如图3所示, 将采样信号经过粗捕获频偏 f_{d1} 以及相位偏差补偿后的 $y(n)$, 取 64 个符号与本地伪码做相关, 将得到的相关数据, 取模方后按列进行存储, 即:

$$Z = \begin{bmatrix} |Z_{1,1}|^2 & |Z_{2,1}|^2 & \cdots & |Z_{64,1}|^2 \\ |Z_{1,2}|^2 & |Z_{2,2}|^2 & \cdots & |Z_{64,2}|^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ |Z_{1,127}|^2 & |Z_{2,127}|^2 & \cdots & |Z_{64,127}|^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对 Z 按列求均值后按行进行 FFT, 得到 $Y = [Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_{127}]$, 取得最大值点记为 l 。对应的频偏为:

$$f_{d2} = -(l-1-M/2)/R_b \times M \quad (12)$$

式中： M 为FFT点数，此处为64， R_b 为符号速率，本文中为78 kbit/s。最后将得到的 $f_d = f_{d1} + f_{d2}$ 以及相位偏差传输给后续模块。

2 仿真性能分析

2.1 数值仿真结果

本文采用的基于差分相干的算法参数设置如下：伪码长度为127，码元速率为 $R_c = 10$ Mc/s，AD采样速率 $f_s = 80$ MHz，多普勒频偏 f_d 设置为280 kHz，信噪比为-25 dB，相位偏差为73个伪码码元。10路分路下变频设置为-270 kHz、-210 kHz、-150 kHz、-90 kHz、-30 kHz、30 kHz、90 kHz、150 kHz、210 kHz、270 kHz。

在上述条件下，分别进行不累积、非相干累积和差分相干三种类型的粗捕获仿真，仿真结果如图4和图5。

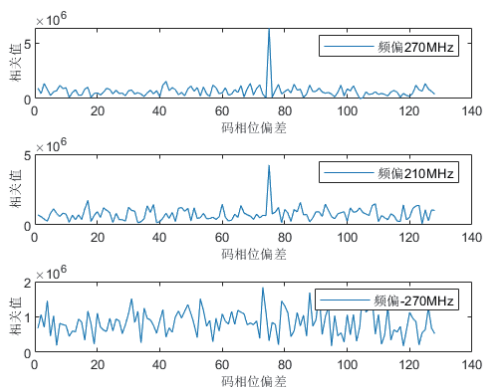


图4 差分相干累积相关值 (30 ~ 270 kHz)

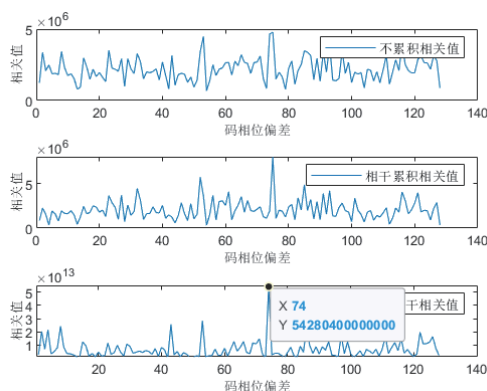


图5 三种类型相关值 (270 kHz)

由图4可以看出，差分相干算法计算得到的相关值，在频偏为270 kHz分路的峰值最大，因此得出粗捕获频偏为270 kHz，符合多普勒频偏280 kHz设定，粗捕获结果正确。

由图5中相同信噪比情况下，三种不同方法进行粗捕获相关值运算得到的结果可以看出，不累积算法不能得到正确的码相位偏差和多普勒频偏，相干累积算法得到相关值峰值并不明显，而本文采用的差分相干算法得到的相关值峰值最

为明显，可以准确完成码相位以及多普勒频偏的搜索。

根据图5中峰值坐标点位置可知，粗捕获的码相位偏差为 $74-1=73$ ，码相位捕获结果正确。

根据精捕获得到的结果， $l=25$ ，计算得出 $f_{d2} = -(l-1-M/2)/R_b \times M = 9.84$ kHz，因此 $f_d = f_{d1} + f_{d2} = 270 + 9.84 = 279.84$ kHz，与仿真预设值 $f_d = 280$ kHz偏差了0.16 kHz，符合理论差值范围。

3 FPGA实现

FPGA工程中符号速率 $R_b = 78$ kbit/s，伪码长度为127，码元速率为 $R_c = 10$ Mc/s，采样速率 $f_s = 80$ MHz，输入信号信噪比为-25 dB，多普勒频偏为280 kHz，相位偏差为50。本文采用vivado2018.3进行FPGA工程实现以及仿真，仿真结果如图6。

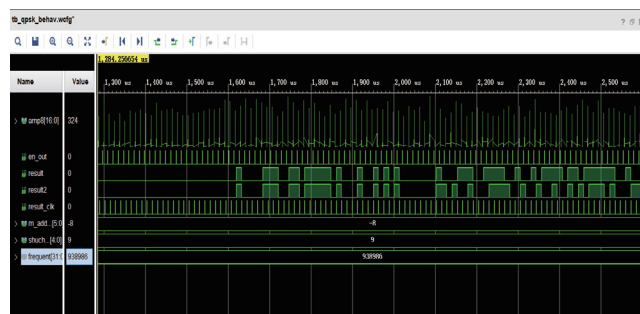


图6 FPGA仿真图

图6中amp8为270 kHz分路计算得出的相关值，可以看到相关峰值非常明显，捕获结果很好。

FPGA仿真中频率表示为vivado中DDS IP核的频率控制字，工程中配置的DDS IP核输入时钟为80 MHz，位宽设置为28，因此频率控制字计算公式为：

$$M = f_0 \times 2^n / f_c \quad (13)$$

式中： M 为对应频率的频率控制字， f_0 为需要DDS输出的载波频率， n 为DDS位宽， f_c 为DDS输入时钟频率。对应本位中， $n=28$ ， $f_c=80$ MHz。

图6中m_addr为精捕获模块输出结果，对应代入式(12)为：

$$f_{d2} = -(l-1-M/2)/R_b \times M = -(-8)/R_b \times M = 9.84 \text{ kHz} \quad (14)$$

图6中frequency为最终计算得到的多普勒频偏频率控制字，代入(13)得到对应的 $f_0 = 279.839$ kHz，与matlab仿真结果相同。图6中result代表I路解调结果，result2代表Q路解调结果，与仿真设置相同，解调误码率为0。

4 总结

本文提出了一种基于并行多路FFT相关的差分相干的扩频信号捕获算法，以此来解决低信噪比环境下高动态扩频信号的捕获问题。算法内容包括捕获头帧结构设计、捕获算法

(下转第176页)

- [6]MOCK M, FRINGS R, NETT E, et al. Continuous clock synchronization in wireless real-time applications[C]//The IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems.Los Alamitos:IEEE Computer Society,2000:125-133.
- [7]CARTER J LARRY, WEGMAN M N. Universal classes of hash functions[J].Journal of computer and system sciences, 1979, 18(2):143-154.
- [8]VICTOR S. On fast and provably secure message authentication based on universal hashing[C]//Advances in cryptology - CRYPTO'96.Berlin:Springer,1996:313-328.
- [9]BOWERS K D, JUELS A, OPREA A. HAIL: a high-availability and integrity layer for cloud storage[C]//Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security(CCS'09).New York:ACM,2009:187-198.
- [10]ZHAI Z, QIAN J, TAO Y, et al. A lightweight time-stamp-based MAC detection scheme for XOR network coding in wireless sensor networks[C]//MobiCom '18: Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile

- Computing and Networking.New York:ACM,2018: 735-737.
- [11]YU Z, WEI Y, RAMKUMAR B, et al. An efficient scheme for securing XOR network coding against pollution attacks (IEEE, Rio de Janeiro, 2009)[C]//IEEE INFOCOM 2009-IEEE Conference on Computer Communications.New York:ACM,2009:406-414.

【作者简介】

陶苑(1991—),女,安徽芜湖人,硕士研究生,助教,研究方向:信息安全、算法研究。

祝晴雨(2003—),女,安徽淮北人,本科,研究方向:软件工程。

沈薇(1996—),女,安徽马鞍山人,硕士研究生,助教,研究方向:计算机视觉。

(收稿日期:2024-03-14)

(上接第171页)

设计、MATLAB 仿真分析和 FPGA 实现。算法步骤如下:首先对输入的中频信号进行并行 10 路下变频,8 倍下采样;然后分别取 127 个采样点进行 FFT 并与本地伪码进行 FFT 后的共轭相乘,再进行 IFFT,实现一次相关值的计算,将相邻 2 个符号相关的结果进行差分相干;最后通过 10 个分路峰值比较以及门限判决得到对应的码相位偏差和粗捕获频偏。通过得到的码相位偏差和粗捕获频偏对采样信号进行补偿后,取 64 个相关后的码元进行 64 阶傅里叶变换,通过峰值点位置,计算得到精捕获频偏,将精捕获频偏与粗捕获频偏相加得到准确的频偏。该方法在低信噪比的情况下,可以准确实现对频偏范围在 -300 ~ 300 kHz 内的扩频信号的捕获。通过仿真分析以及工程实践可以得出,基于并行多路 FFT 相关的差分相干算法比传统的捕获算法,捕获范围提高了 530 kHz,信噪比提高了 18 dB,可以广泛应用于大频偏低信噪比扩频接收系统中。

参考文献:

- [1]杨俊,武奇生.GPS 基本原理及其 Matlab 仿真[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006.
- [2]黎山,易清明,陈庆,等.适用于 GPS 软件接收机的弱信号捕获方法[J].计算机应用,2012,32(3):816-818+822.
- [3]孙慧贤,张玉华,唐友喜,等.双通道跳频通信系统同步捕获方法[J].探测与控制学报,2019,41(6):23-32.
- [4]杨峰,史康为,韩航程.一种基于 FPGA 的直扩系统快速捕获算法[J].微计算机信息,2012,28(9):125-127.

- [5]方科.高动态低信噪比下扩频信号捕获算法研究[J].电视技术,2013,37(13):113-115+152.
- [6]李文刚,黄鑫磊,刘龙伟.低信噪比环境下的长码捕获新算法[J].西安电子科技大学学报,2013,40(4):29-36.
- [7]赵丽,陈小惠,潘树国.GPS 频域并行码捕获改进算法[J].电子测量与仪器学报,2011,25(11):985-990.
- [8]王研,鲁金昆,韩航程.基于相干累积的跳频扩频信号的捕获方法[J].计算机应用,2021,41(S2):187-191.
- [9]PÉREZ M A, FONT-MORÉ J, FERNÁNDEZ-ESMERATS J. Structural damage assessment in lattice towers based on a novel frequency domain-based correlation approach[J]. Engineering structures,2021,226:111329.
- [10]黄健,张德海,孟进,等.一种改进的高动态扩频信号捕获方法[J].电子测量技术,2015,38(9):116-120.
- [11]马晓晓.跳频同步技术综述[J].通讯世界,2020,27(6):95+98.

【作者简介】

刘宇(1998—),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向:雷达辐射源个体识别。

张前南(1988—),男,四川泸县人,硕士研究生,研究方向:数据链总体设计。

邓元俊(1996—),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向:数据链总体设计。

(收稿日期:2024-03-18)