

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.02.012

基于 FPGA 的 BOC(1,1) 信号捕获技术

王奕新, 左启耀, 李 峰

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:BOC 调制是新一代卫星导航系统中广泛采用的调制方式,在时域上具有多峰值特性,副峰的存在增加了捕获的难度。采用自相关副峰消除技术(ASPeCT)在原有的 BOC 码相关支路的基础上增加一条伪码相关支路,可以有效削弱码相位检测函数的副峰,避免误捕获,是一种性能良好的 BOC 信号捕获技术。提出一种采用二维并行快速搜索的在 FPGA 芯片中实现 ASPeCT 捕获技术的方案,可以显著缩短捕获时间。在理论分析和仿真验证的基础上,采用 Verilog 硬件描述语言在接收机 FPGA+DSP 平台上编程实现,在露天测试中,成功捕获到 Galileo E1B 卫星导航信号,并对 ChipScope 采集的数字中频信号的多普勒频率和码相位静态捕获结果进行验证,与同一段信号的 Matlab 仿真结果一致,证明所提出的技术方案正确合理可行。

关键词:BOC 调制; ASPeCT 技术; 信号捕获; FPGA

中图分类号:TN967.1

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)02-0064-08

Technique of BOC(1,1) Signal Acquisition Based on FPGA

WANG Yi-xin, ZUO Qi-yao, LI Feng

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract:BOC modulation will be widely adopted in new satellite navigation system. The signal has multi-peaks in time domain. The existence of side-peak increases the difficulty of acquisition. Autocorrelation side-peak cancellation technique (ASPeCT) is good in performance as it can effectively weaken the side-peak of code-phase detecting function and avoid false lock by adding a pseudo-code detecting branch on the basis of one BOC-code detecting branch. An implementation project of 2-D parallel fast search for ASPeCT on the FPGA chip is put forward which can significantly cut the acquisition time. On the basis of theoretical analysis and emulation verification, the acquisition algorithm is realized by Verilog HDL programming on FPGA+DSP receiving platform. The Galileo E1B satellite navigation signal is successfully acquired in the open air test. The Doppler frequency and code phase static acquisition results of the digital IF signal captured by ChipScope fall in line with the Matlab simulation results of the same signal, which proves the validity and feasibility of the project put forward.

Key words:BOC modulation; ASPeCT; Signal acquisition; FPGA

0 引言

随着卫星导航技术的发展,传统的 BPSK 调制

信号在提高定位精度上遭遇瓶颈,因此,新一代卫星导航系统计划采用 BOC 调制方式^[1]。BOC 调制相较于 BPSK 调制,增加了一个副载波调制环节,

收稿日期:2016-06-02;修订日期:2016-08-01

作者简介:王奕新(1991-),女,硕士,主要从事卫星接收机基带处理算法研究。E-mail:wangyixin0916@163.com

将原有的基带信号频谱分别向左右两侧搬移。BOC 调制不仅提高了频段的复用性,而且信号的自相关函数峰值相较于 BPSK 信号更加尖锐,有利于提高伪距测量精度^[2];但是自相关函数的多峰值特性^[3]也增加了信号捕获的复杂性,尤其是存在噪声和干扰的情况下,容易造成误捕获,给接收机捕获算法设计带来难度。

BOC 信号捕获技术的研究重点是如何正确识别主峰值,BPSK-Like 捕获算法^[4]只捕获频谱中一个边带,适合高信噪比信号捕获;SCC 捕获算法^[5]、三路并行相关捕获算法^[6]、Filtered 捕获算法^[7]和 ASPeCT 算法^[8]都是通过增加额外的相关支路来确定主峰,由于 2 个频谱边带都参与运算,所以低信噪比信号也有很好的处理效果。本文提出一种基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获技术实现方

案,并在 FPGA 芯片中完成了方案的软件设计,以及实际信号的捕获测试。

1 ASPeCT 算法实现原理

通过多普勒频率和码相位的二维搜索实现捕获。如果每次只搜索一个单元,对于伪码周期长度为 4ms 的 BOC(1,1)调制信号,完成 128×8184 个单元的搜索大约需要 1h,难以在 FPGA 上实现。因此,本文提出了 ASPeCT 算法的二维并行快速搜索实现方案,在多普勒频率一维,通过傅里叶变换一次完成 128 个频率的搜索;在码相位一维,通过 100 路并行相关器一次搜索 100 个码相位,将搜索次数由 128×8184 降为 82,最小捕获时间降为 328ms。算法原理图如图 1 所示。

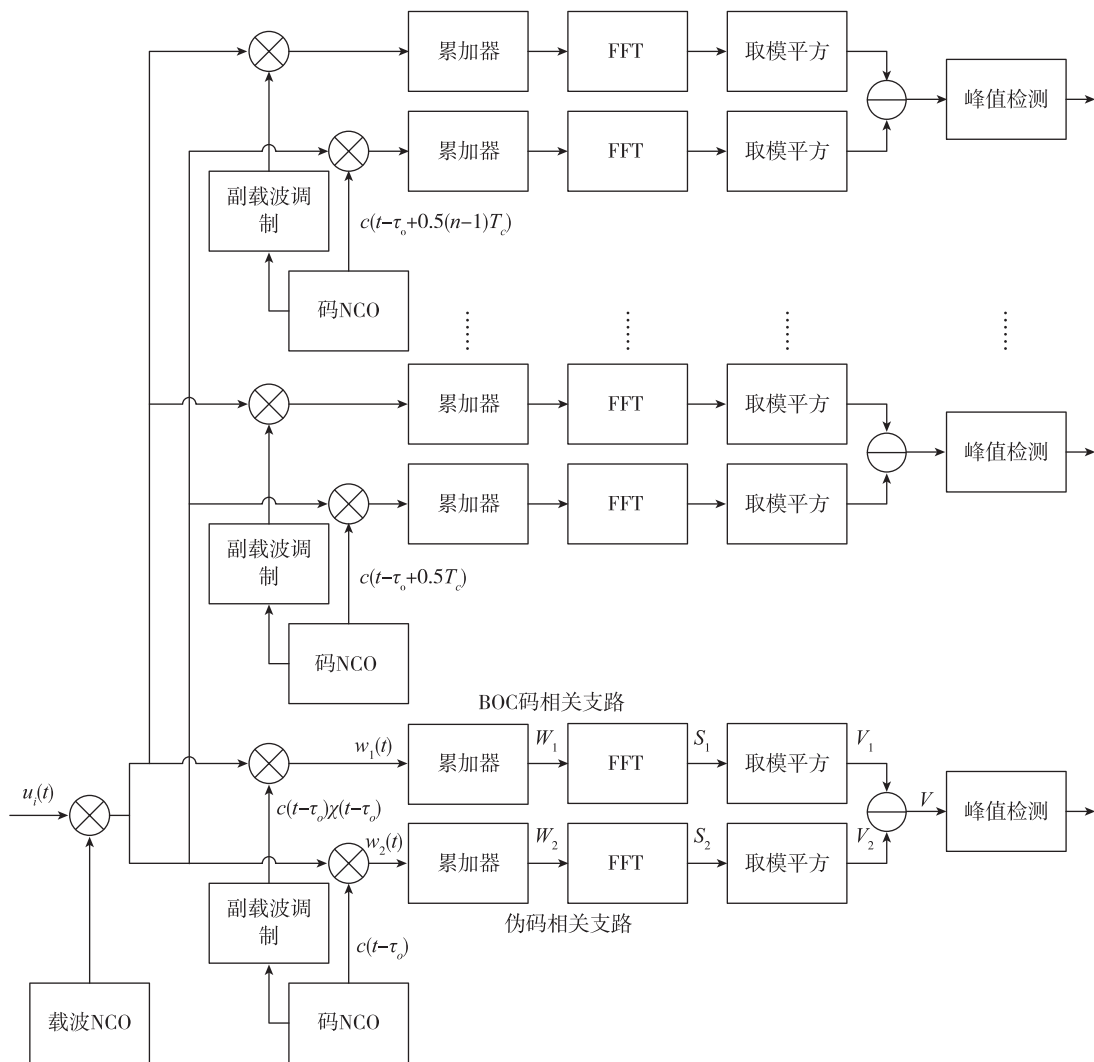


图 1 基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法原理图

Fig. 1 The schematic diagram of ASPeCT acquisition algorithm based on 2-D parallel fast search

以图1中最下方一对相关支路为例,它可以完成一个码相位上全部频率搜索单元的搜索,将输入的BOC(1,1)数字中频信号表示为^[9]

$$u_i(t) = \sqrt{2}c(t - \tau_i(t))\chi(t - \tau_i(t))\cos\theta_i(t) \quad (1)$$

其中, $c(t)$ 和 $\chi(t)$ 分别表示信号中的调制伪码和调制副载波, $\tau_i(t)$ 表示传播相位时延, $\theta_i(t)$ 是载波相位。

载波NCO用于控制生成本地载波 $\sqrt{2}\exp j\theta_o(t)$,包括同相正交两路信号成分, $\theta_o(t)$ 为输出载波相位。码NCO用于控制生成本地伪码 $c(t - \tau_o(t))$,及经过副载波调制的本地BOC码 $c(t - \tau_o(t))\chi(t - \tau_o(t))$, $\tau_o(t)$ 表示对输入信号码相位时延的估计。

对于BOC码相关支路,中频输入信号先与本地载波混频,再与本地BOC码做相关运算,结果可表示为

$$\begin{aligned} w_1(t) &= 2c(t - \tau_i(t))c(t - \tau_o(t))\chi(t - \tau_i(t)) \\ &\quad \chi(t - \tau_o(t)) \cdot \cos\theta_i(t)(\cos\theta_o(t) + j\sin\theta_o(t)) \\ &= c(t - \tau_i(t))c(t - \tau_o(t))\chi(t - \tau_i(t)) \\ &\quad \chi(t - \tau_o(t)) \cdot ((\cos\theta_e(t) - \cos(\theta_i(t) + \\ &\quad \theta_o(t))) + j(\sin\theta_e(t) + \sin(\theta_i(t) + \theta_o(t)))) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\theta_e(t) = \theta_i(t) - \theta_o(t)$ 。再经过时间为 T 的积分,对积分结果采样得到

$$W_1(nT) = TR_{\text{BOC/BOC}}(\tau_e(nT))\text{sinc}\left(\frac{1}{2}\omega_e(nT)T\right) \cdot (\cos\varphi_e(nT) + j\sin\varphi_e(nT)) \quad (3)$$

$R_{\text{BOC/BOC}}(\tau)$ 为BOC码自相关函数, $\tau_e(t) = \tau_i(t) - \tau_o(t)$, $\omega_e(t) = \omega_i(t) - \omega_o(t)$, $\omega_i(t)$ 和 $\omega_o(t)$ 分别为信号载波和本地载波角频率, $\varphi_e(t)$ 表示信号载波和本地载波的相位差均值。 $R_{\text{BOC/BOC}}(\tau)$ 的表达式为

$$R_{\text{BOC/BOC}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{nT-T}^{nT} (c(t - \tau_i(t))c(t - \tau_o(t)) \cdot \chi(t - \tau_i(t))\chi(t - \tau_o(t))) dt \quad (4)$$

由于M点FFT的归一化幅频响应为^[10]

$$L(\omega, k) = \frac{1}{M} \left| \frac{\sin(M\omega/2)}{\sin(\omega/2 + \pi k/M)} \right|, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

故经过归一化FFT的结果可表示为

$$S_1(k) = TR_{\text{BOC/BOC}}(\tau_e)\text{sinc}\left(\frac{1}{2}\omega_e T\right) \cdot (\cos\varphi_e + j\sin\varphi_e)L(\omega_e, k) \quad (6)$$

对 $S_1(k)$ 取模平方,得到式(7)。

$$V_1 = R_{\text{BOC/BOC}}^2(\tau_e)\text{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\omega_e T\right)L^2(\omega_e, k) \quad (7)$$

伪码相关支路有类似结果

$$V_2 = R_{\text{BOC/PRN}}^2(\tau_e)\text{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\omega_e T\right)L^2(\omega_e, k) \quad (8)$$

其中, $R_{\text{BOC/PRN}}(\tau)$ 为BOC码与伪码的互相关函数, $R_{\text{BOC/PRN}}(\tau)$ 的表达式为

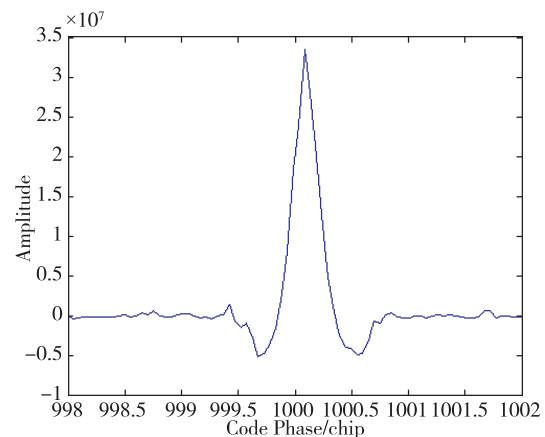
$$R_{\text{BOC/PRN}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{nT-T}^{nT} (c(t - \tau_i(t))c(t - \tau_o(t)) \cdot \chi(t - \tau_i(t))) dt \quad (9)$$

将 V_1 与 V_2 相减,得到

$$V = R_{\text{ASPeCT}}(\tau_e)\text{sinc}^2\left(\frac{1}{2}\omega_e T\right)L^2(\omega_e, k) \quad (10)$$

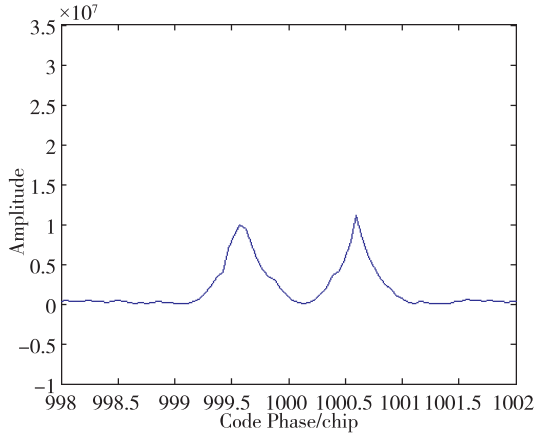
其中, $R_{\text{ASPeCT}}(\tau_e) = R_{\text{BOC/BOC}}^2(\tau_e) - \beta R_{\text{BOC/PRN}}^2(\tau_e)$, β 是调节负峰大小的参数, β 越大,ASPeCT相关函数的负峰越大,通常情况下可取 $\beta=1$ 。由于ASPeCT相关函数和sinc函数的峰值分别出现在 τ_e 和 ω_e 等于零处,故只有本地复制载波频率接近中频信号频率,且本地复制伪码相位接近中频信号码相位时, V 才会有最大峰值。将 V 与预设的捕获门限比较,如果 V 大于预设门限,判定捕获到信号。

在预设BOC(1,1)中频信号载噪比为45dB·Hz、码相位延迟为1000码片的条件下,BOC码相关支路输出的取模平方结果 V_1 、伪码相关支路输出的 V_2 及两路求差结果 V 分别如图2所示,可以看出,基于二维并行快速搜索的ASPeCT算法通过伪码相关支路可以显著削减位于捕获码相位 ± 0.5 码片处的副峰,使合路输出检测量不受副峰的影响,主峰值更加尖锐,是一种性能良好的快速高精度捕获算法。



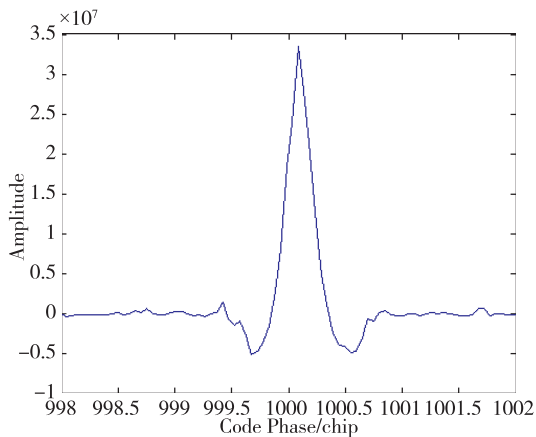
(a) BOC码相关支路平方结果

(a) The square result of BOC code correlation branch



(b) 伪码相关支路平方结果

(b) The square result of pseudo code correlation branch



(c) 两路求差结果

(c) The subtraction of two branches

图 2 两路求差前后的结果

Fig. 2 The result before and after subtraction of two branches

2 ASPeCT 算法的硬件实现

基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法在 FPGA+DSP 硬件平台上实现,其中 FPGA 采用 Xilinx 公司的 Kintex-7 K325T 芯片,工作时钟为 62M,中频信号数据速率为 62M,位数为 4bit。

2.1 实现流程

基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法流程如图 3 所示。输入中频信号先与载波 NCO 生成的正余弦信号相乘得到同相正交两路零中频信号 I_Data 和 Q_Data,再将它们分别与码 NCO 生成的伪码序列 Code 和 BOC 码序列 Code_BOB 相关,一次完成 K 个码相位上的相关,经过部分累积降低采样频率分别得到 P 个采样点补零至 M 点进行傅里叶变换,将时域信号转换为频域信号,一次完成对多普勒频率一维的搜索,然后将两条相关支路的变换结果平方相减生成检测量,最后将检测量的最大值 MaxValue 和对应地址 MaxAddr 传给 DSP,在 DSP 的控制下进行 N/K 次运算完成对整个伪码周期的搜索。

以 Galileo E1B 信号的捕获为例, Galileo E1B 信号采用 CBOC(6, 1, 1/11, '+') 调制方式,只捕获其中的 BOC(1, 1) 成分造成的损耗不超过 0.5dB。Galileo E1B 信号长度为 4ms,包含 4092 码片。将实现的搜索参数说明如下:

1)对于多普勒频率一维,一般陆基运动载体上的卫星信号接收机接收到载波的最大多普勒频率为 $\pm 10\text{kHz}$,为了覆盖 20kHz 的频率搜索范围,相

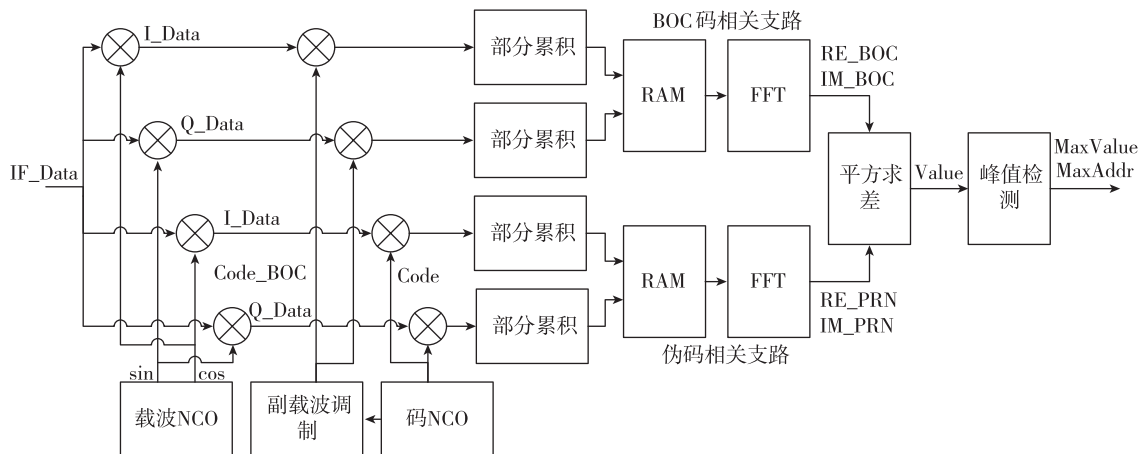


图 3 基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法流程图

Fig. 3 The flowing chart of ASPeCT acquisition algorithm based on 2-D parallel fast search

干积分时间最长不能超过 $50\mu\text{s}$ ^[11]。对于伪码周期为 4ms 的 Galileo E1B 信号,取 P 等于 80,4ms 信号经过 $50\mu\text{s}$ 相关累积得到 80 点采样数据。如果将这 80 点数据直接进行 FFT,由式(10)可知,虽然对所有频率单元搜索可以一次完成,但是当 ω_e 偏离谱线时会产生频率损耗 $L^2(\omega_e, k)$,多普勒频率一维的输出结果如图 4 所示。

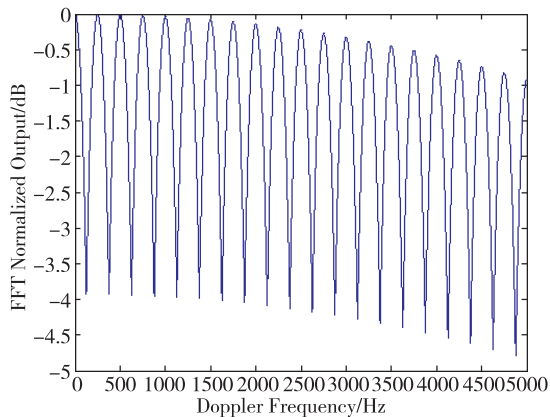


图 4 80 点 FFT 归一化输出结果

Fig. 4 The normalized output result of 80 point FFT

可以看出,在 FFT 点数和输入数据个数均为 80 时,FFT 的频谱泄漏会造成 ASPeCT 算法多普勒频率输出结果最大 3.9dB 的频率损耗,严重影响性能。为了弥补频率损耗,同时兼顾 FFT 对输入数据的长度是以 2 为底的指数幂的要求,取 FFT 点数 M 为 128,将 80 点采样数据补零至 128 点进行运算。补零后的多普勒频率输出结果如图 5 所示。

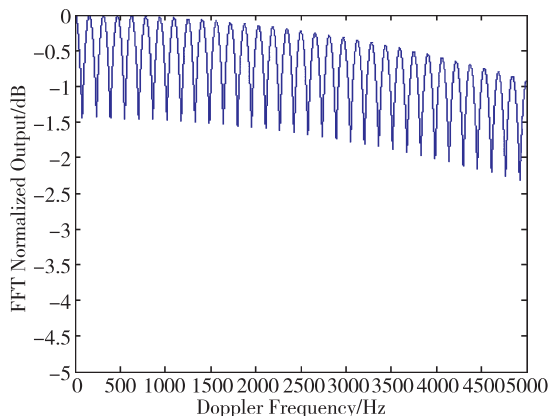


图 5 128 点补零 FFT 归一化输出结果

Fig. 5 The normalized output result of 128 point FFT

由图 5 可知,补零后的 ASPeCT 捕获算法最大仅有 1.4dB 的频率损耗,满足实际要求。算法的频

率分辨率为

$$\Delta_f = 20\text{kHz}/128 = 156.25\text{Hz} \quad (11)$$

2)对于码相位一维, Galileo E1B 信号的伪码周期长度为 4092 码片,选取码相位搜索步长 Δ_c 为 0.5 码片,实现对整个伪码周期的搜索需要遍历 8184 个搜索单元。本文取 K 等于 100,即采用 100 路并行相关器,一次搜索 100 个半码相位,只需 82 次就可以完成对码相位一维的搜索。算法对码相位的估算精度为 0.5 码片。

可以看出,基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法通过复杂的傅里叶变换和追加更多相关器资源,在码相位估算精度和频率分辨率不变的前提下,将搜索次数从原有的 128×8184 次降为 82 次,最小捕获时间从 70min 降为 328ms,适合在资源丰富的 Kintex-7 芯片中实现。

2.2 实现结构

2.2.1 本地载波和码的生成

捕获电路的载波 NCO 通过累加 DSP 提供的载波频率控制字,并将累加值作为取样地址送入相幅转换电路得到本地复制正余弦载波信号 Carrier_Sin 和 Carrier_Cos 用于混频,如图 6 所示。

码 NCO 通过读入 DSP 提供的码频率控制字,得到 2 倍于伪码速率的半码片发生计数信号 Code_En,当计数值为偶数时,通过 ROM 控制器依次读取存在 ROM 里的 4092 个 Galileo E1B 信号的伪码码片值,得到伪码序列 Code;如果同时在计数值为奇数时反转伪码电平,即可生成经副载波调制的伪码序列 Code_BOC,如图 7 所示。

2.2.2 相关支路数据的处理

BOC 码相关支路的结构如图 8 所示。将 BOC 码延时得到依次相差半个码片的 100 路信号,再将这 100 路信号分别与同相正交支路上的零中频信号相关并进行 $50\mu\text{s}$ 累积,每个码相位上产生 80 个累积结果,100 路信号共产生 100×80 个累积结果。每完成一次 $50\mu\text{s}$ 累积,就将 100 个结果纵向写入 100×80 RAM 的一列,4ms 写满 RAM 的 80 列。当一个 RAM 纵向写满后,依次将每个码相位上的 80 个结果横向读出补零后进行 128 点 FFT 变换,输出的实部和虚部结果分别为 RE_BOC 和 IM_BOC。伪码相关支路的情况与之类似,输出的 FFT 变换实部和虚部结果分别为 RE_PRN 和 IM_PRN。

2.2.3 检测量的生成

将 BOC 码和伪码相关支路输出的 FFT 结果平

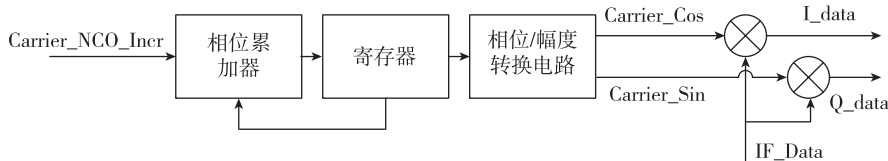


图 6 本地载波生成的结构框图

Fig. 6 The structured flowchart of local carrier generation

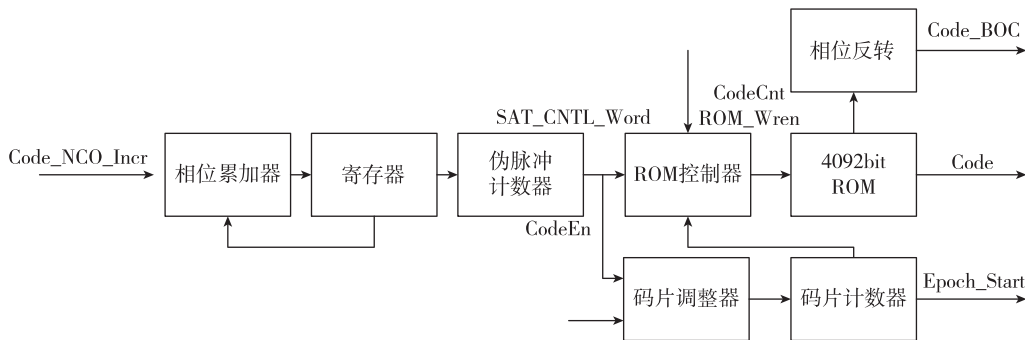


图 7 本地码生成的结构框图

Fig. 7 The structured flowchart of local code generation

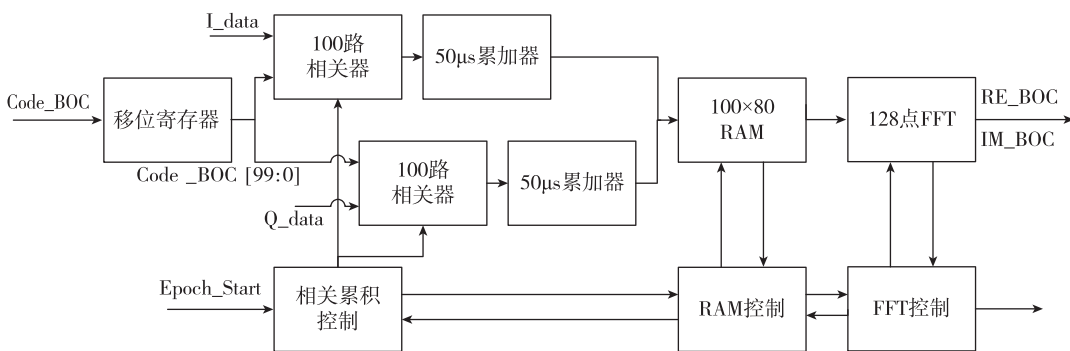


图 8 BOC 码相关支路的结构框图

Fig. 8 The structured flowchart of BOC code correlation branch

方相减得到峰值检测量 $Value$ ，计算公式为

$$Value = \left| \begin{matrix} (RE_BOC^2 + IM_BOC^2) \\ -(RE_PRN^2 + IM_PRN^2) \end{matrix} \right| \quad (12)$$

实现框图如图 9 所示，利用平方差公式进行分解，并采用流水线的工作模式，依次计算 100 个半码相位上 FFT 变换输出的多普勒频率搜索结果存入 100×128 RAM，然后逐一比较选出最大值 $MaxValue$ 和对应地址 $MaxAddr$ 传给 DSP，由 DSP 比较 82 次搜索的结果得到整个伪码周期的最大值，当最大值超过门限时，声明捕获成功，对应地址就是捕获到信号的码相位时延和多普勒频率。

3 ASPeCT 算法验证

ASPeCT 算法验证是通过接收实际 Galileo E1B 信号实现的。2015 年 8 月 25 日上午 9 点 54 分，北京市仅可以观测到播发 BOC(1,1)信号的 Galileo 系统

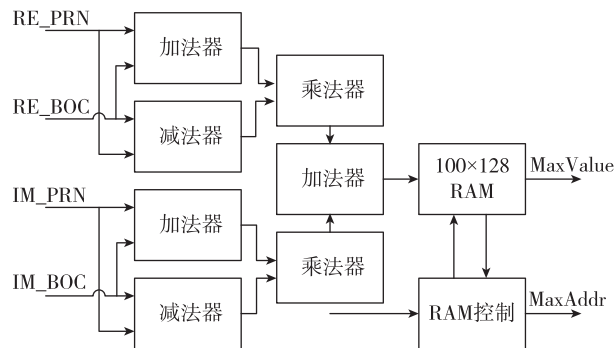
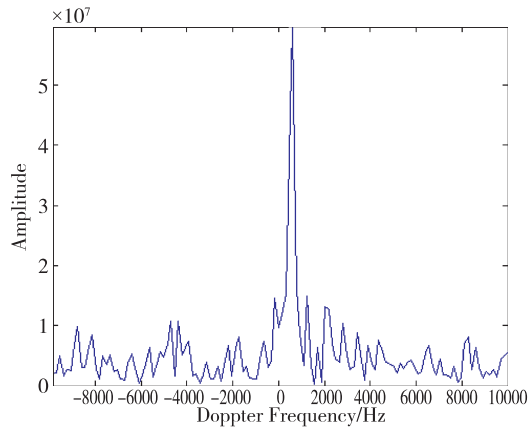


图 9 检测量生成的结构框图

Fig. 9 The structured flowchart of test quantity generation

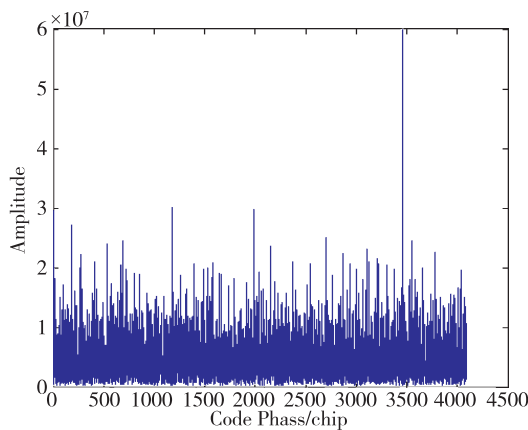
在轨工作的 11 号卫星，经过反复调试，解决实际问题，在露天环境下，采用基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法在“FPGA+DSP”平台上成功实现了对 11 号卫星的动态捕获，并利用 ChipScope 采集了

4bit 卫星信号数据,数据中频频率为 15.58MHz,数据长度为 4ms。实际卫星信号的 Matlab 捕获仿真结果如图 10 所示,信号的多普勒频率和码相位时延分别为 625Hz 和 3459.5 码片。



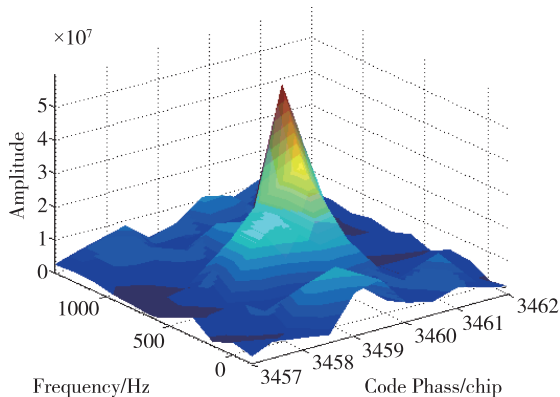
(a) 多普勒频率捕获结果

(a) The Doppler frequency acquisition result



(b) 码相位捕获结果

(b) The code phase acquisition result



(c) 二维捕获结果(局部)

(c) The two-dimension acquisition result (part)

图 10 ASPeCT 算法的实际卫星信号捕获结果

Fig. 10 The real satellite signal acquisition result of ASPeCT

同一段卫星信号的 FPGA 捕获结果如图 11 所示,可以看出,捕获结果峰值明显,最大值远大于次大值,且在地址 00100110000100 处有一个幅值为 3231 的峰值,地址的前七位 0010011 即十进制数 19 为码相位捕获结果,后七位 0000100 即十进制数 4 为多普勒频率捕获结果,经过 DSP 计算得到的实际卫星信号的多普勒频率和码相位分别为

$$Doppler = 4\Delta_f = 4 \times 156.25 = 625(\text{Hz}) \quad (13)$$

$$Phase = (100 \times 69 + 19)\Delta_c \\ = 6919 \times 0.5 = 3459.5(\text{chip}) \quad (14)$$

与 Matlab 仿真结果一致,验证了设计的正确性。

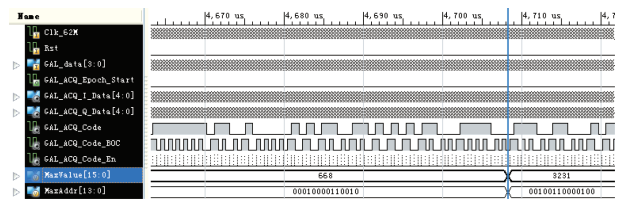


图 11 基于 ASPeCT 技术的实际卫星信号的实际卫星信号的 FPGA 捕获结果

Fig. 11 The FPGA acquisition result of actual satellite signal based on ASPeCT

4 结论

为了削弱 BOC 调制信号的副峰、避免误捕获,ASPeCT 算法在原有的 BOC 码相关支路的基础上增加一条伪码相关支路,实现方案更为复杂,每次只搜索一个单元的串行搜索不能满足 BOC 信号在 FPGA 上动态捕获的实现。

本文提出了一种 ASPeCT 捕获算法在 FPGA 芯片上的二维并行快速搜索实现方案,在 BOC 码相关支路和伪码支路并行工作的基础上,在码相位一维,通过追加更多的相关器资源一次搜索多个码相位;在多普勒频率一维,通过傅里叶变换一次完成所有频率单元的搜索,显著缩短了捕获时间。在理论分析和仿真验证的基础上,通过 FPGA 逻辑编程在 FPGA+DSP 平台上实现了动态捕获并采集了卫星导航信号数据。数据的 FPGA 测试结果显示捕获峰值明显,且多普勒频率和码相位时延与 Matlab 仿真结果一致,证明了方案设计的正确性和有效性。可见,基于二维并行快速搜索的 ASPeCT 捕获算法是一种捕获 BOC(1,1)信号的有效算法,可以在实际应用中加以推广。

参考文献

- [1] Betz J W. The offset carrier modulation for GPS modernization [C]. Proceedings of ION National Technical Meeting Institute of Navigation, 1999.
- [2] 周骥, 郭承军, 曹建蜀, 等. GNSS CBOC 信号快速无模糊度捕获算法研究 [J]. 信号处理, 2015, 31(7):876-882.
- [3] 许磊, 何巍巍, 赵胜. BOC 调制导航信号的精确捕获方法研究 [J]. 无线电工程, 2015, 45(12):36-39.
- [4] Martin N, Leblond V, Guilletot G, et al. BOC(x,y) signal acquisition techniques and performances [C]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GPS/GNSS, 2003.
- [5] Ward P W. A design technique to remove the correlation ambiguity in binary offset carrier (BOC) spread spectrum signal [C]. Proceedings of Annual Meeting of the Institute of Navigation & Cigtg Guidance Test Symposium, 2003.
- [6] 邢兆栋, 张其善, 杨东凯. GALILEO 接收机中 BOC (1,1) 信号的捕获 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6):687-690.
- [7] Brickell F, Gardon M, McCurley S, et al. Fast exponentiation with precomputation [C]. Proceedings of Eurocrypt on Advances in Cryptology, 1993.
- [8] Julien O, Cannon M E, Lachapelle G. A New unambiguous BOC (n, n) signal tracking technique [C]. The European Navigation Conference GNSS, 2004.
- [9] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [10] Rabiner L R, Gold B. Theory and application of digital signal processing [M]. NJ: Prentice Hall, 1989.
- [11] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.