

# 基于多片 ADSP 的 PPS 雷达信号 参数估计算法实现\*

李 利<sup>1,2</sup>, 张 永<sup>3</sup>, 赵武生<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001;

2 91329 部队, 山东威海 264200; 3 海军大连舰艇学院, 辽宁大连 116018)

**摘 要:**采用四片 ADSP-TS101S 构成的雷达信号参数估计平台, 实现了基于三次相位函数的多项式相位信号参数估计算法。该算法只需要通过二阶非线性变换即可实现 PPS 的参数估计。硬件实验表明, 该算法可在低信噪比条件下准确地估计 PPS 参数, 并且通过多片流水式的并行处理, 最大限度地节省了估计时间。

**关键词:**三次相位函数; 参数估计; 多项式相位信号; ADSP

**中图分类号:** TN957.51 **文献标志码:** A

## An Implementation of the Algorithm for Estimating the Parameters of PPS Radar Signals Based on Multiple ADSPs

LI Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, ZHAO Wusheng<sup>1</sup>

(1 College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2 No. 91329 Unit, Shandong Weihai 264200, China;

3 Dalian Naval Academy, Liaoning Dalian 116018, China)

**Abstract:** This paper used a platform to estimate the parameters of radar signals based on 4 ADSP-TS101Ss, which made the algorithm for estimating the parameters of polynomial phase signal (PPS) radar signals based on the cubic phase function come true. It just needs second-order nonlinear transform to estimate the PPS parameters. Hardware experiments show that the method is exact to estimate the PPS parameters in lower SNR, and saves estimating time mostly with pipeline parallel processing on multiple ADSPs.

**Keywords:** cubic phase function; parameter estimation; polynomial phase signal; ADSP

## 0 引言

多项式相位信号 (polynomial phase signal, PPS) 是一种有着广泛应用的信号形式。对于它的参数估计, 文中基于工程应用的角度讨论 PPS 的参数估计问题。参考文献 [1-2] 中, P. O' Shea 提出了三次相位函数 (CPF) 法。它只需通过二阶非线性变换在信号参数空间形成最大值来估计 PPS 参数, 算法快速简单, 并且具有高精度和良好的低信噪比能力。文中讨论 PPS 在雷达领域的参数估计问题, 所以只考虑三阶 PPS。

由于 DSP 芯片在实时信号处理领域的强大功能, 文中使用 AD 公司四片 300MHz 的浮点 ADSP-TS101S 搭建了雷达信号参数估计硬件处

理平台, 基于三次相位函数法实现了 PPS 雷达信号参数估计算法。

## 1 基于三次相位函数的 PPS 参数估计算法

### 1.1 PPS 的三次相位函数

对于信号  $s(t)$ , 其三次相位函数<sup>[3]</sup> 定义为:

$$\text{CPF}(t, k) = \int_0^{+\infty} s(t+\tau)s(t-\tau)e^{-jk\tau^2} d\tau \quad (1)$$

其中,  $k$  表示信号的瞬时频率。  $k = d^2\phi(t)/dt^2$ ,  $\phi(t)$  为信号的相位。

单分量 PPS  $s(t) = Ae^{j(a_1t+a_2t^2+a_3t^3)}$  的三次相位函数为:

\* 收稿日期: 2007-12-31

作者简介: 李利(1982-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向: 宽带信号的探测、识别与处理。

$$CPF(t, k) = A^2 \xi(t) \int_0^{+\infty} e^{j[(2a_2 + 6a_3 n) - k] \tau^2} d\tau = \begin{cases} A^2 \xi(t) \sqrt{\frac{\pi}{8 |2a_2 + 6a_3 t - k|}} (1 + j), & (2a_2 + 6a_3 t) > k \\ A^2 \xi(t) \sqrt{\frac{\pi}{8 |2a_2 + 6a_3 t - k|}} (1 - j), & (2a_2 + 6a_3 t) < k \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\xi(t) = e^{j2(a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3)}$ 。可见, 三次相位函数必将沿着瞬时频率  $k = 2a_2 + 6a_3 t$  形成最大值。

离散情况下, 设信号采样点数为  $N$ ,  $N$  为奇数, 信号的三次相位函数表示为:

$$CPF(n, k) = \sum_{m=0}^{(N-1)/2} s(n+m)s(n-m) e^{-jkm^2} \quad (3)$$

其中,  $-(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2$ 。

这样,  $m$  的取值可以保证所有的  $N$  个采样点均能参与运算。

### 1.2 基于三次相位函数的 PPS 参数估计算法

由于 PPS 的三次相位函数沿着瞬时频率  $k = 2a_2 + 6a_3 t$  形成最大值, 可以选取两个不同的时间点来分别计算 PPS 的三次相位函数, 由此可以估计出  $a_2$  和  $a_3$ 。然后使用这两个估计值对信号解线调, 将信号转化成正弦信号, 然后对所得信号做 FFT 就可估计  $a_1$ 。

因此, 对单分量的 PPS, 其参数估计算法步骤如下:

1) 选取两个不同的时间中点  $n_1$  和  $n_2$ , 计算信号的三次相位函数, 得到  $k$  轴峰值点对应值  $k_1$  和  $k_2$ , 则:

$$\begin{cases} k_1 = 2a_2 + 6a_3 n_1 \\ k_2 = 2a_2 + 6a_3 n_2 \end{cases} \quad (4)$$

2) 解式(4) 方程, 即可求得  $a_2$  和  $a_3$  的估计值, 采用解线调的方法:  $x(n) = x(n) e^{-j(a_2 t^2 + a_3 t^3)}$ , 将信号转变成了正弦信号。

3) 对信号做傅里叶变换, 得到  $a_1$  的估计值。

## 2 硬件平台系统设计

TigerSHARC 是 ADI 公司的定浮点兼容的高速 DSP 系列处理器, 专门为数字信号处理任务和复杂通信算法而设计<sup>[4]</sup>。内部集成了静态超标量

体系结构和大容量的 SRAM。处理器工作在 300MHz, 单周期能执行 4 条指令, 每秒能进行 2.4 亿次乘累加操作和每秒进行 1.8 亿次浮点操作, 并且支持两种方式的集成多处理器连接, 很容易实现多片并行处理系统, 使得该处理器能达到无缝超标量能力和杰出的 I/O 性能表现。

采用链路口连接的多处理器系统, 可以实现无缝连接, 无总线仲裁问题, 总的链路口通道数据传输速率高于共享总线方式。各 DSP 程序可以独立设计, 而且片间引线少, PCB 板设计容易。系统总体的硬件结构框架如图 1 所示。

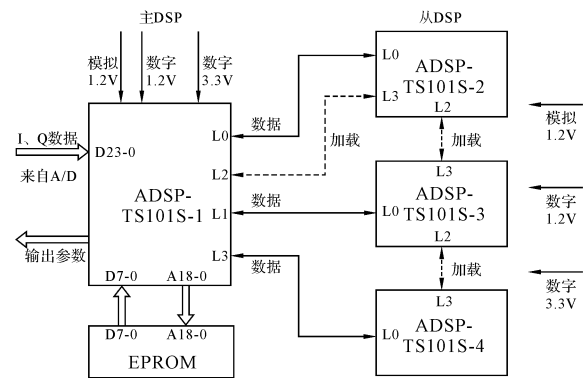


图 1 硬件平台系统结构框图

本系统由四片 ADSP-TS101S 构成, 将一个算法分解为多个部分, 多片 DSP 流水实现, 大大节省了算法的处理时间, 以期满足实时处理的要求。DSP1 接收来自信道化数字接收机的 I、Q 数据, 对数据进行误差校正和噪声抑制, 然后进行定点数据到浮点数据的转换和归一化处理, 同时完成对 PPS 和常规信号的类型识别, 通过链路口 DMA 将 PPS 数据发送给 DSP2 和 DSP3, 然后 DSP1 完成普通信号参数估计任务, 并将后续的参数估计结果报告给下一级处理机; DSP2 和 DSP3 接收完数据, 选取不同的时间点完成各自的三次相位函数计算, 搜索瞬时频率对应的峰值点, 将计算结果通过链路口 DMA 传送给 DSP4; DSP4 接收完数据, 根据运算结果计算  $a_2$  和  $a_3$ , 然后使用这两个估计值进行解线调运算, 最后进行 FFT 运算, 得到  $a_1$  的估计值。运算完毕, 将最终结果上报给 DSP1, DSP1 发送给下一级处理机。

### 3 硬件平台实验与分析

文中是基于工程应用的角度讨论雷达信号参数估计算法的实现。故将文中所述算法移植到硬件平台中,实现了基于多片 ADSP 的 PPS 雷达信号参数估计算法。

假设从信道化数字接收机得到的 I、Q 数据经过下变频以后,载频范围为 0~10MHz,采样频率为 60MHz。

实验参数:单分量 PPS,  $y = \exp(j2\pi(a_1t + a_2t^2 + a_3t^3))$ ,  $a_1 = 5\text{MHz}$ ,  $a_2 = 0.5 \times 10^{12}$ ,  $a_3 = 10^{16}$ , 持续时间  $10^{-5}\text{s}$ , 采样频率 60MHz, 这样一个脉冲采样点数为 600 点。时间点  $t_1$  取  $0.4 \times 10^{-5}\text{s}$ , 时间点  $t_2$  取  $0.6 \times 10^{-5}\text{s}$ ,  $m$  值取 200, 即数据滑动点数 200 点。信噪比为 0dB。瞬时频率率的搜索范围为  $0.8 \times 10^{12} \sim 1.6 \times 10^{12}$ , 搜索步长为  $0.2 \times 10^{10}$ , 这样搜索点数为 400 点。

图 2 和图 3 分别为 0dB 时选取时间点  $t_1$  和  $t_2$  PPS 的三次相位函数结果。横轴为瞬时频率率的搜索点数,纵轴为幅度。图 2 峰值出现在第 217 点,理论位置为第 220 点,得到  $k_1 = 1.234 \times 10^{12}$ ,图 3 峰值出现在第 278 点,理论位置为第 280 点,得到  $k_2 = 1.356 \times 10^{12}$ ,由此得到估计值:  $a_3 = 1.018 \times 10^{16}$ ,  $a_2 = 4.950 \times 10^{11}$ ,使用这两个值对信号进行解线调,然后对解线调后的数据做 512 点 FFT,结果如图 4 所示,峰值出现在第 43 点的位置,由于采样频率为 60MHz,最终得到  $a_1$  的估计值为  $5.029 \times 10^6$ 。

在运算时间上,计算一次三次相位函数并搜索到峰值点所需的时间是 12.153ms,由于后续 FFT 的点数是 512 点,故只需要对 512 点数据解线调,所需时间是  $148.70\mu\text{s}$ ,做 512 点 FFT 并计算功率谱然后搜索频率峰值点的时间是  $34.02\mu\text{s}$ 。可见程序大部分时间花费在三次相位函数的运算上,由于采用了流水式的并行处理,可以认为整个程序的运算时间为计算一次三次相位函数的时间。

估计值的 RMSE 相对真值的比值,文中称其为相对 RMSE,设真值为  $a$ ,估计值为  $a'$ ,则相对 RMSE 可表示为:

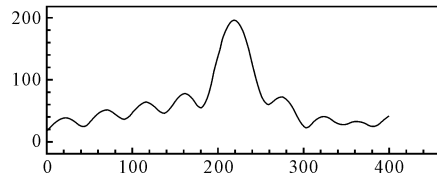


图 2 时间点选  $t_1$  时 PPS 的 CPF

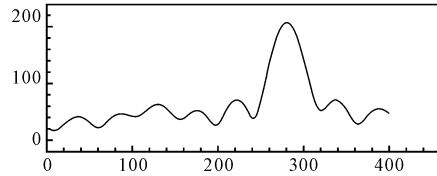


图 3 时间点选  $t_2$  时 PPS 的 CPF

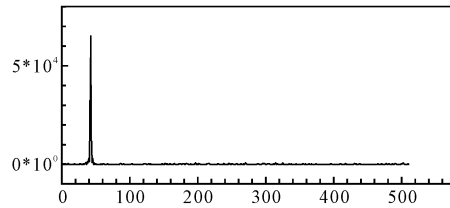


图 4 解线调后 512 点 FFT 的结果

$$\text{相对 RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (a'_n - a)^2}{N}} / a$$

其中  $N$  为估计次数。

文中统计了在不同信噪比下,使用该方法对各个参数进行估计的相对 RMSE,结果如表 1 中所示。图中数据为 100 次 Monte-Carlo 实验的统计结果。

表 1 不同信噪比下各参数的相对 RMSE

参数	信噪比 /dB					
	-8	-5	-3	0	3	5
$a_3$	0.1316	0.1141	0.0746	0.0445	0.0408	0.0263
$a_2$	0.0344	0.0081	0.0055	0.0036	0.003	0.0019
$a_1$	0.03	0.0247	0.0247	0.0247	0.0247	0.0247

对  $a_1$  的估计误差主要是由 FFT 变换的栅栏效应引起的,在 -5dB 以后,这个误差趋于恒定,如果要进一步减小这个误差,可以增大 FFT 的点数。

由式(3)直接计算 PPS 三次相位函数的运算量是  $O(N^2)$ 。类似离散傅里叶变换运用子带分解技术而得到 FFT 大大节省运算量一样,三次相位函数的运算也可利用子带分解技术而有望将计算量减少到  $O(N\log N)$ ,相比较于最大似然估计  $O(N^3\log N)$  的运算量,运算量大大减少<sup>[5]</sup>。三次相位函数快速算法的研究将是文中以后工

作的重点。

### 4 结论

文中将基于三次相位函数的 PPS 参数估计算法成功移植到四片 ADSP-TS101S 搭建的雷达信号参数估计硬件处理平台,实现了 PPS 雷达信号参数估计。实验结果表明了该算法的有效性和优越的低信噪比参数估计性能,并且估计准确度高,在 12ms 左右的时间内就可完成参数估计,是 PPS 雷达信号参数估计的一种有效方法。由于三次相位函数的运算占据了大多数的运算时间,因此研究快速算法,节约运算时间成为下一步工作努力的重点。

#### 参考文献:

[1] O'Shea P. A new technique for estimating instan-

taneous frequency rate[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002,9(8):251-252.

[2] O'Shea P. A fast algorithm for estimating the parameters of a quadratic FM signal [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2004, 52(2): 385-393.

[3] P Wang, J Yang, J Xiong. An algorithm for parameter estimation of multi-component chirp signals[J]. Proc. ICASSP, 2006,3(5):404-407.

[4] 刘书明,苏涛,罗军辉. Tiger SHARC DSP 应用系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

[5] T Abotzoglou. Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate[J]. IEEE Trans. Acoustis, Speech, Signal Processing,1986, AES-22(6):708-715.

(上接第 246 页)

其中: $\tilde{f}_h$  是  $f_h$  的反图像,是每个像素值取反得到的。

### 4 融合结果

图 5 为实验结果,比较观察图像可知,融合图像既有较亮的目标信息,又具有丰富的细节背景。表 1 是融合前后调和熵、局部熵的比较,其中融合图像的调和熵和局部熵均比中波图像大,均值也比中波图像大,实验数据说明了该方法的有效性,即把隐藏目标和较多细节集中到融合图像上。

表 1 基于图像特征的融合数据分析

	调和熵	局部熵	均值
红外图像	6.455	16.828	95.653
可见光图像	7.0626	19.110	167.22
融合图像	6.800	17.002	97.5671



图 3 红外图像



图 4 可见光图像

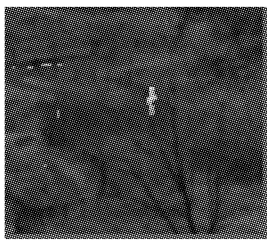


图 5 融合图像

### 5 结论

文中分析总结了可见光和红外图像中目标和背景的图像特征,并对特征进行了具体的描述,在此基础上对图像的特征进行了保持和提取,将提取出的图像特征融合起来,取得了比较好的融合效果,将图像特征分析和算法有效结合起来,提高了算法的针对性,探索了特征级融合,同时还引入了调和熵对图像进行评价。

#### 参考文献:

[1] Ajjimarange P. Neural network model for fusion of visible and infrared sensor outputs [C]// SPIE. 1988, Vol. 1003: 153-160.

[2] Toet A, Lodewik J, Ruyven V, et al. Merging thermal and visual image by a contrast pyramid[J]. Optical Engineering, 1992, 28(7): 789-792.

[3] Steinnocher K. Application of adaptive filters for multisensorial image fusion [J]. Geoscience and Remote Sensing, 1997(2): 910-912.