

最大熵方法在准连续波体制中的实现¹

郑晋军 谷学敏* 张丽艳**

(跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

*(国防科工委指挥技术学院 北京 101407)

** (北京航天指挥控制中心 北京 100094)

摘要 本文分析了最大熵方法的特点和准连续波体制原理,提出了用于雷达接收机系统的最大熵谱预测外推算法的选择依据,设计实现了以 TMS320C31 为主芯片的核心外推运算单元,完成了对最大熵谱预测外推电路的实时监控。信号传输速率达到 40Mb/s,当定义外推算法为 8 阶时,数据吞吐量达到 1Mb/s。本文所做工作对准连续波雷达走向实际应用具有较大意义。

关键词 准连续波,最大熵算法,硬件实现

中图分类号 TN957.5

1 前言

1995 年本文作者之一谷学敏提出准连续波体制理论^[1],该体制做为一种新型雷达体制兼并了连续波体制和脉冲体制的优点,具有低截获概率、较强的抗反辐射导弹能力、抗有源干扰能力、体积小、重量轻和机动性强等优点。它克服了当前连续波雷达共用天线收发隔离的难点,增大了雷达作用距离,同时保持了连续波雷达无速度模糊,可同时捕获多个目标等特点。本文选择最大熵方法在准连续波体制中的实现作为研究内容,旨在提高系统实时性以推进准连续波雷达真正走向实际应用。

2 最大熵原理

不完全数据序列在自然演变过程中熵是不会减少的^[2]。在数据不充分的情况下对不适应问题求解,解必须与已知的数据相吻合,而同时又必须对未知的部分做最少的假设。求解可以认为是从已知数据中提取信息的过程。已知数据(存在噪声)的不确定量最少,熵较小;当不存在噪声时,它将完全确定,未知数据熵最大。由于数据的不完全而不得不对未知部分作一定的假定,人为地“添加”一部分信息,即附加熵,则外推过程中保持熵最大就意味着外推导致的附加熵最小。最大熵方法求解的实质正是利用已知数据得到确定性的数据特征,根据数据特征扩展已知数据。准连续波体制巧妙地利用了这一特点,将间断观测样本连成连续数据完成单根谱线的捕获。

3 准连续波体制原理

准连续波体制发射信号、接收信号形式分别如(1)、(2)式所示:

¹ 1997-03-17 收到, 1997-10-13 定稿

$$S_T(t) = U(t) \times P(t) \times e^{j\omega t}, \quad (1)$$

$$S_R(t) = \sum_{i=1}^N U'(t - \tau_i) \times P(t - \tau_i) \times e^{j\omega_i(t - \tau_i)}, \quad (2)$$

式中 $U(t)$ 表示重复频率为 $1/T_r$ 、占空比为 0.5 的周期脉冲; N 表示不同距离上的目标总数; $U'(t - \tau_i)$ 表示占空比不同的周期脉冲, 仅在第 i 个距离上的目标回波时延等于发射信号持续时间时占空比保持 0.5 不变。

准连续波体制的发射和接收波形如图 1, 采用伪码 BPSK 调制, 发射周期 T_r 满足 $T_r \geq 4R_{\max} \div c$ (R_{\max} 为要求探测的最大距离, c 为光速), 发射时间 $T_t \approx T_r/2$, T_{re} 为接收信号持续时间。

准连续波体制雷达中频信号数字信号处理原理框图示于图 2。采用零中频 I 、 Q 双通路全数字信号处理, $\tau - f_d$ 二维判决处理方式。

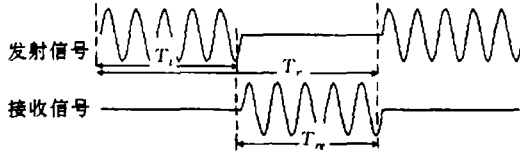


图 1 发射信号和接收信号示意图

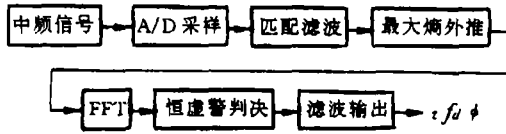


图 2 数字信号处理原理框图

接收机的中频输入信号为

$$S_I(t - \tau) = U'(t - \tau) \times P(t - \tau) \times \{ \cos[(\omega_1 + \omega_d)t + \phi] + \sum_{m=1}^M \cos(\omega_m \times t + \phi_m) \}, \quad (3)$$

式中 $P(t - \tau)$ 为编码时延信号; ω_I 为中频角频率; ω_d 为多普勒角频率; ϕ 为中频相位; ω_m 为近地杂波角频率; ϕ_m 为近地杂波相位; M 为近地杂波角频率数。

I 、 Q 两支路数据经杂波对消电路后输出归一化为

$$I \text{ 支路 } S_{a,I}(t - \tau) = U'(t - \tau) \times P(t - \tau) \cos(\omega_d \times t + \phi), \quad (4)$$

$$Q \text{ 支路 } S_{a,Q}(t - \tau) = U'(t - \tau) \times P(t - \tau) \sin(\omega_d \times t + \phi). \quad (5)$$

送到编码匹配滤波器, 利用本地码与接收码进行相关处理, 输出归一化为 I 支路

$$\begin{aligned} S_{a,I}(t - \tau) &= U'(t - \tau) \times R(\Delta\tau) \times \int_{t_0}^{t_1} \cos(\omega_d \times t + \phi) \times dt \\ &= U'(t - \tau) \times T_g \times R(\Delta\tau) \times (\sin x/x) \times \cos[\omega_d \times (t_0 + T_g/2) + \phi], \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\Delta\tau = \tau - \hat{\tau}$, $\hat{\tau}$ 为时延估值; $R(\Delta t)$ 是 $P(t - \tau)$ 与本地码 $P(t - \hat{\tau})$ 的相关函数; t_0 、 t_1 表示进入相关器的接收码序列首码、尾码对应的时刻; $T_g = t_1 - t_0$ 为积分时间; $x = (\omega_d \times T_g/2)$ 。

Q 支路 同理可得

$$S_{a,Q} = U'(t - \tau) \times T_g \times (\sin x/x) \times R(\Delta\tau) \times \sin[\omega_d \times (t_0 + T_g/2) + \phi]. \quad (7)$$

对编码匹配滤波器输出用最大熵估计 (maximum entropy spectral estimation - MESE) 进行预测外推^[3]。由图 1 可以看出, 利用 MESE 外推 $N_1/2$ 点的方法, 可将间断的准连续波波形变为连续波形。输出信号形式如下:

$$S_{a,I} = \begin{cases} U_m \times \cos\{\omega_d \times [t_0 + (n + 1/2) \times T_g] + \phi\}, & \Delta\tau = 0; \\ \approx 0, & \Delta\tau \neq 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{a,Q} = \begin{cases} U_m \times \sin\{\omega_d \times [t_0 + (n + 1/2) \times T_g] + \phi\}, & \Delta\tau = 0; \\ \approx 0, & \Delta\tau \neq 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中 $U_m = T_g \times (\sin x/x)$; $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$; N 为进入 FFT 滤波器组的数据个数。

将最大熵外推电路输出做 FFT 处理, 此时 FFT 滤波器组中单个滤波器带宽可选得足够窄。若 FFT 处理器有超过门限的输出值, 则可同时确定 $\hat{\tau}$ 和 f_d , 方法如下:

i 号波门选通 N 个数据作一次 FFT 运算, 如有超过门限的输出, 则表示目标出现在 i 距离上 ($i = 0, 1, \dots, M-1$)。做 M 次 FFT, 如果在作用距离范围内有目标存在, M 次 FFT 中必有一次有超过门限的输出, 则 f_d 可由该输出对应谱线的位置 j 得到, 如 (10) 式所示, 此次目标出现的距离 i 即可表示 $\hat{\tau}$ 。

$$f_d = j/(N \times T_m), \quad (10)$$

其中 T_m 为抽样频率 (由码速率和编码匹配滤波器的积分时间决定)。若在作用距离范围内存在多个目标, 则 M 次 FFT 中就有多次超出门限的输出。

4 最大熵算法

最大熵方法的引入是准连续波体制雷达消除普通雷达中测速与测距相互耦合并提高速度分辨率的关键技术之一。补齐 FFT 运算所需数据的外推算法是引入最大熵方法的实质。外推算法的性能主要取决于多普勒谐波数、输入数据信噪比、外推数据点数、已知数据的点数及其在多普勒周期中所占比例值等诸因素^[4]。只有对输入、输出信号进行充分的分析, 才能判断出适于本系统的最大熵外推算法。

例如, 在信噪比为 -5.1dB 情况下对 16 点占多普勒周期 34.4% 的观测数据外推 78 个点, 共推 12 个周期, 将连成的 1032 点连续数据去掉最后 8 点, 做 1024 点 FFT 运算, 各算法外推情况如图 3。可见, 在此种条件下, 利用 Burg 算法进行外推能够较好地体现准连续波体制的优势。

5 外推电路的硬件实现

图 4 为 MESE 外推电路及其外围电路的原理框图。预测误差滤波器系数计算电路是核心运算单元, 运算时间占系统实际工作时间的比例很大, 而数据传输所占系统时间很小, 因此, 采用一条总线进行数据的输入和输出。

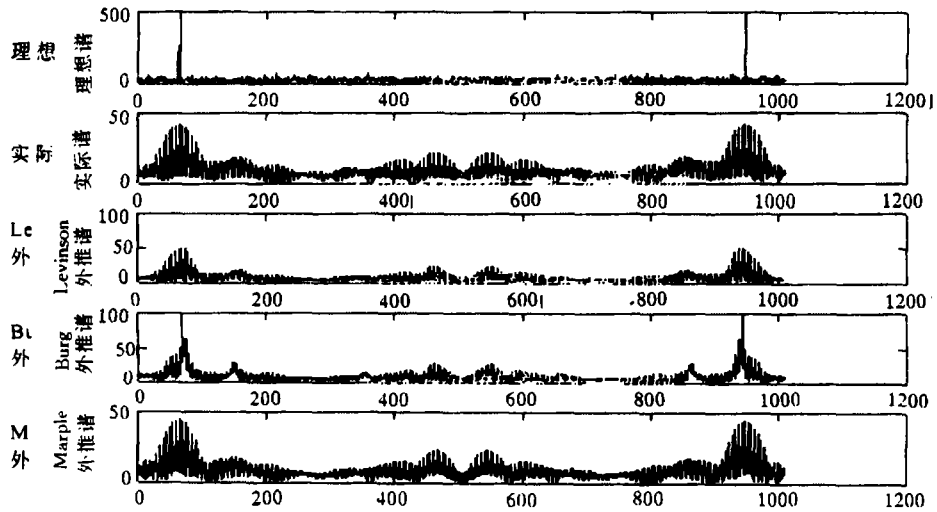


图 3 多种外推算法仿真结果

Burg 算法对于反射系数的精度要求高，而器件的位数直接反映了精度，故选择核心运算器件的原则主要是位数足以满足精度要求。高速处理芯片 TMS320C31 的最大动态范围为 776.6dB^[5]，计算机仿真结果表明满足外推算法的精度要求。

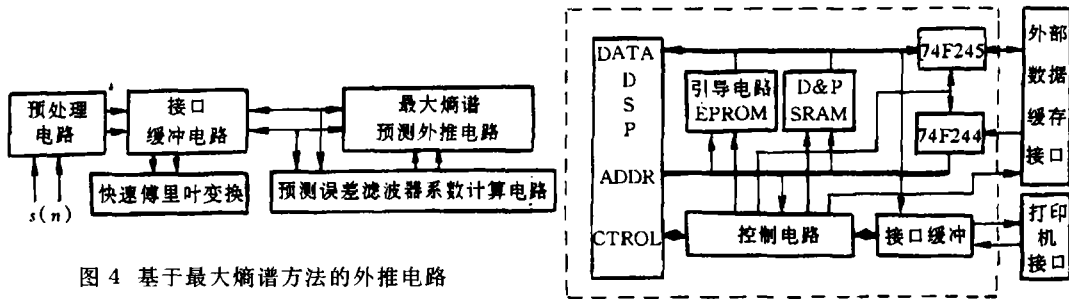


图 4 基于最大熵谱方法的外推电路

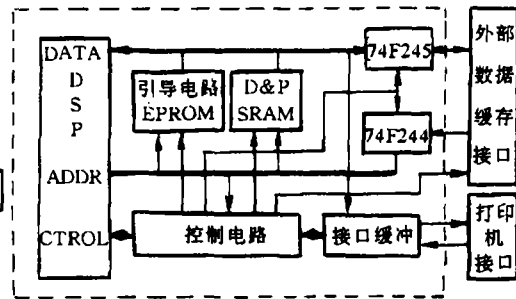


图 5 最大熵谱外推内部电路结构

最大熵谱外推内部电路结构如图 5 所示。从图 5 中可以看出：间断观测数据通过并行接口进入运算电路内部存储区，控制信号通过握手控制电路对核心运算器件进行控制。在观测数据进入存储区之后，启动核心运算器件进行运算，运算完毕后核心运算器件将外推后的数据放回存储区，并通过控制电路向并行接口发出取数信息。

为使处理器系统处于可监控状态，以用户熟悉的计算机系统实现实时监控。通过打印口完成数据交换是处理器与计算机实现信息交换的最简单方式，处理器与打印口相连时，主要考虑以下几个问题：

- (1) 确定打印口在处理器系统中的 I/O 地址，将打印口作为处理器系统的一个 I/O 设备。
- (2) 处理器 32 位字长工作方式与打印机 8 位数据口的数据交换问题。
- (3) 为了对处理器系统进行控制，打印口电路必须能产生中断处理器的信号。

6 技术指标和外推效果

理论上, 用上述硬件实现进行外推运算, 单组数据可达到的实时速度为 4Mb/s, 满足 1Mb/s 的系统要求。实际电路中, 中间数据的转存、移动和准备将占去大量时间。例如采用 8 阶 Burg 算法, 对 32 组, 每组长度为 16 的观测样本进行外推时, 实时运算速度为 1.1Mb/s。此时可以通过采用多片 DSP 芯片并行处理进一步提高实时运算速度。

用试验样机在最优和最劣环境下得到的观测样本作为检验硬件外推效果的输入数据, 将本文设计的外推电路的输出数据与计算机仿真结果相比较, 如图 6 所示。

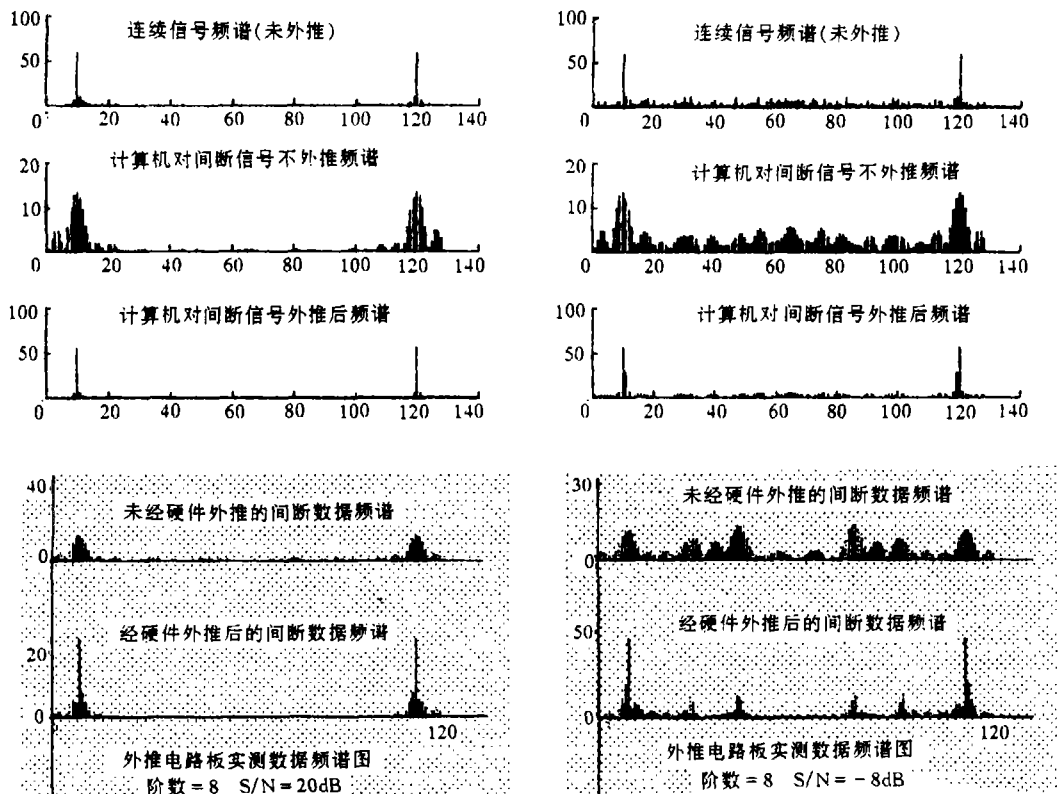


图 6 计算机仿真结果和硬件实现输出结果

信噪比为 -8dB 和 20dB 两种情况下, 采用 8 阶 Burg 算法, 对 4 组, 每组长度为 16 的观测样本进行外推, 每组外推到 32 点, 连成 128 点数据, 做 FFT 运算, 计算机仿真结果和硬件实现输出结果。

从图中可以看出:

(1) C31 硬件外推的数据与计算机外推的数据基本吻合, 未出现明显偏差, C31 硬件运算精度完全能够满足接收机系统对外推的要求。

(2) 在 -8dB 的情况下, C31 硬件外推满足要求, 可见, 低信噪比下, 采用多组数据推算一组反射系数效果很好, 避免了短序列样本的非平稳性造成的外推失真。

(3) 理论上, 最佳作用距离时 ($R = R_{\max}$ 准连续波体制优于连续波体制 3dB ; 非最佳作用距离时 ($R < R_{\max}$, 近空目标接收信噪比增加, 虽然处于非最佳信号处理状态, 仍可检

测目标。例如对于近空目标, $R = R_{max}/2$, 接收机输入端目标反射的功率增加 12dB, 由于处于非最佳信号处理状态 (损失一半时间), 损失 3dB 信噪比, 故仍比最佳距离目标的信噪比高 9dB。

7 结论

本文研究表明, 在准连续波体制中, 应用最大熵方法改进系统的性能不仅在理论上可行, 在工程上也是可以实现的。通过选择适宜的外推算法、利用高速 DSP 芯片完成核心外推运算电路, 不仅能满足系统所要求的精度, 而且也能达到实时外推的目的。

参 考 文 献

- [1] 谷学敏, 徐永元. 直升机载警戒雷达预研立项理论可行性与工程可实现性论证报告. 国防科工委指挥技术学院, 电子部二十七研究所, 1994, 4-7, 30-32.
- [2] 吴乃龙, 袁素云著. 最大熵方法. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1991, 6-7.
- [3] Schott J P, McClellan J H. Maximum entropy spectrum estimation with uncertainty in correlation measurements. Proc. IEEE, 1983, 170: 1069-1071.
- [4] 杨叔子, 吴雅等著. 时间序列分析的工程应用 (上册). 武汉: 华中理工大学出版社, 1994, 266-299.
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320C3X User's Guide. 1992, ch5, ch6.

IMPLEMENTATION OF MAXIMUM ENTROPY METHOD IN QCW

Zheng Jinjun Gu Xuemin* Zhang Liyan**

(*Institute of Track and Communication Technology, Beijing 100094*)

(**Institute of Command and Technology, COSTIND, Beijing 101407*)

**(*Beijing Astronautic Command and Control Center, Beijing 100094*)

Abstract This paper analyzed the principle of maximum entropy method in QCW radar, advanced the requirements of the maximum entropy spectral estimation in test radar system, designed and implemented the arithmetic unit by C31 chip, and accomplished real-time control for the maximum entropy spectral estimation circuit. Data transmission rate can reach 40Mb/s and data handling capacity arrives at 1Mb/s when the order of algorithm is 8. Researches this paper made will promote QCW radar from theory to application.

Key words Quasi-continuous wave, Maximum entropy algorithm, Hardware implementation

郑晋军: 男, 1971年生, 助工, 航天测控, 主要从事雷达信号处理研究.

谷学敏: 男, 1934年生, 教授, 通信与电子, 主要从事雷达信号处理研究.

张丽艳: 女, 1972年生, 助工, 通信工程, 试验指挥, 主要从事航天测控工作与研究.