

# 雷达脉冲信号压缩的一种新方法<sup>1</sup>

朱力\*\*\* 王盛利\*\* 林幼权\*\* 刘国岁\*

\*(南京理工大学电子工程技术研究中心 南京 210094)

\*\* (南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘要:** 该文提出了一种脉冲压缩的新方法——匹配傅里叶脉冲压缩技术。该方法可对多目标回波在匹配傅里叶域实现压缩。压缩回波峰值位置相对时延呈线性变化,从而使该方法与传统的脉冲压缩技术——匹配滤波器脉冲压缩一样,可在雷达信号处理中应用。文中首先给出匹配傅里叶脉冲压缩理论和脉冲压缩的回波时延分辨率,然后进行理论仿真验证。仿真结果表明该理论是正确的,所提出的方法是可行的。

**关键词:** 匹配傅里叶域脉冲压缩, 回波时延分辨率

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)10-1650-06

## A New Method of Pulse Compression for Radar Pulse Signal

Zhu Li\*\*\* Wang Sheng-li\*\* Lin You-quan\*\* Liu Guo-sui\*

\*(Electron. Eng. Dept, Nanjing Univ. of Science and Tech., Nanjing 210094, China)

\*\* (Nanjing Research Institute of Electron. Tech., Nanjing 210013, China)

**Abstract** A new method of pulse compression, match Fourier pulse compression technology is proposed in this paper. The method can achieve pulse compression to multi-targets' echoes in match Fourier domain, and the peak position of each compressed echo changes linearly with its time delay. The same as conventional method of match filter pulse compression, it can be applied to radar signal processing. The paper first gives the theory of match Fourier pulse compression and the resolution between echo time delays. Then the simulation is carried out. The results verify that the theory is right and the new method is feasible.

**Key words** Pulse compression of match Fourier domain, Resolution between echo time delays

## 1 引言

线性调频信号在雷达中已得到广泛应用,在 SAR 中,通过发射大时宽带宽积的线性调频信号并通过脉冲压缩技术可实现距离高分辨率。在雷达中常用的脉冲压缩技术指的是:较长的编码脉冲通过脉冲压缩接收机,得到具有高分辨率的脉冲响应。本文利用匹配傅里叶变换将线性调频信号在匹配傅里叶域实现脉冲压缩,并且压缩回波峰值位置相对时延呈线性变化。文中首先给出匹配傅里叶变换实现脉冲压缩的理论,然后对单目标、多目标回波进行脉冲压缩仿真,给出匹配傅里叶域压缩回波的主瓣宽度和副瓣特性以及压缩回波峰值位置与回波时延的关系;进行加窗处理,降低压缩脉冲的副瓣。仿真结果表明:该方法是正确的。

## 2 脉冲压缩理论

### 2.1 匹配傅里叶域脉冲压缩

设发射信号为

<sup>1</sup> 2003-06-11 收到, 2003-10-08 改回

国防科技重点实验室基金 (51442010101DZ2401) 资助项目

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j2\pi(f_{10}t + f_{20}t^2)] + n(t) \quad (1)$$

式 (1) 中  $f_{10}$ ,  $k = 2f_{20}$  和  $n(t)$  分别表示中频、线性调频率和噪声;  $T$  为信号脉冲宽度。

由文献 [1,2] 知, 式 (1) 的二步匹配傅里叶变换谱为

$$F(f_1, f_2) = 2 \int S(t) e^{-j2\pi f_1 t} e^{-j2\pi f_2 t^2} dt \quad (2)$$

其中  $f_1, f_2$  分别表示频率和匹配傅里叶频率, 当  $f_1 = f_{10}, f_2 = f_{20}$  时, 匹配傅里叶变换谱出现峰值。

对于线性调频信号的脉冲压缩, 我们知道线性调频率  $k$  即  $f_2$ , 这样就可对式 (2) 进行 FFT, 实现匹配傅里叶域的脉冲压缩; 当不知道线性调频率  $k$  时, 可对  $f_2$  进行搜索, 对每一个  $f_2$  进行 FFT 就可得到式 (2) 的二步匹配傅里叶变换谱, 由二步匹配傅里叶变换谱的峰值位置可确定线性调频率  $k$ , 然后进行匹配傅里叶域的脉冲压缩, 这称为盲脉冲压缩。

当线性调频率  $k$  即  $f_2$  未知时, 对于  $n$  个目标回波, 设回波时延为  $\tau_i (i = 1, \dots, n)$ , 由式 (1) 和式 (2) 得到

$$\begin{aligned} F(\omega_1, \omega_2) &= 2 \sum_{i=1}^n \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} S_i(t - \tau_i) \exp(-j\omega_1 t) \exp(-j\omega_2 t^2) dt \\ &= 2 \sum_{i=1}^n \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} \exp[j\omega_{10}(t - \tau_i)] \exp[j\omega_{20}(t - \tau_i)^2] \exp(-j\omega_1 t) \exp(-j\omega_2 t^2) dt \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 中  $\omega_{10} = 2\pi f_{10}$ ,  $\omega_{20} = 2\pi f_{20}$ ,  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_2$ ;  $\tau_i$  为各目标的时延。这种情形下, 先对  $f_2$  搜索, 对每一个  $f_2$  进行 FFT 就可得到式 (3) 的二步匹配傅里叶变换谱, 当  $f_2 = f_{20}$  时二步匹配傅里叶变换谱出现峰值, 这样就可确定  $f_{20}$ , 然后进行匹配傅里叶域脉冲压缩。

关于匹配傅里叶域脉冲压缩, 当线性调频率  $k$  即  $f_{20}$  已知时, 为了给出匹配傅里叶域压缩脉冲峰值点的频率与回波时延的关系, 这里假设  $n(t) = 0$ , 对于单目标回波, 当回波时延为  $\tau$ , 由式 (1) 和式 (2) 并且  $\omega_2 = \omega_{20}$ , 可得到

$$F(\omega_1) = 2 \int_{\tau}^{T+\tau} \exp[j\omega_{10}(t - \tau)] \exp[j\omega_{20}(t - \tau)^2] \exp(-j\omega_1 t) \exp(-j\omega_2 t^2) dt \quad (4)$$

式 (4) 计算结果为

$$F(\omega_1) = e^{-j\omega_{10}\tau} e^{j\omega_{20}\tau^2} e^{ja(T+2\tau)} \left[ \frac{T(T+2\tau) \sin(aT)}{aT} - j \frac{aT \cos(aT) - \sin(aT)}{a^2} \right] \quad (5)$$

式 (5) 中  $a = (\omega_{10} - 2\omega_{20}\tau - \omega_1)/2$ , 其功率谱为

$$P(\omega_1) = \left[ \frac{T(T+2\tau) \sin(aT)}{aT} \right]^2 + \left[ \frac{aT \cos(aT) - \sin(aT)}{a^2} \right]^2 \quad (6)$$

式 (6) 中, 当  $a = 0$ , 第 1 项为最大, 第 2 项为 0, 即  $f_1 = f_{10} - 2f_{20}\tau$  时,  $P(\omega_1)$  有最大值, 其最大值为  $[T(T+2\tau)]^2$ ; 因此时延  $\tau$  不同,  $P(\omega_1)$  峰值也不同; 随着  $\tau$  的增大,  $P(\omega_1)$  峰值也增大。其 3dB 主瓣宽度约为

$$\Delta f_1 = 0.886/T \quad (7)$$

由此看到, 在匹配傅里叶域, 功率谱峰值处频率  $f_1$  与时延  $\tau$  是线性关系, 这样压缩后的回波在匹配傅里叶域线性位移, 回波相对位置不会发生位移或畸变, 这一特性可用于成像中脉冲压缩。

当  $n(t) = 0$  时, 对于多目标的回波脉冲串, 将  $\omega_2 = \omega_{20}$  代入式 (3), 可得到多目标时压缩脉冲:

$$F(\omega_1) = \sum_{i=1}^n e^{-j\omega_1\tau_i} e^{j\omega_{20}\tau_i^2} e^{jb(T+2\tau_i)} \left[ \frac{T(T+2\tau_i) \sin(bT)}{bT} - j \frac{bT \cos(bT) - \sin(bT)}{b^2} \right] \quad (8)$$

式 (8) 中  $b = (\omega_{10} - 2\omega_{20}\tau_i - \omega_1)/2$ ,  $\tau_i$  为各目标的时延。

## 2.2 脉冲压缩后回波信号的分辨率

这里讨论匹配傅里叶域的压缩脉冲的目标分辨率, 由式 (6) 知, 当  $f_1 = f_{10} - 2f_{20}\tau$  时, 在匹配傅里叶域压缩回波出现峰值, 因此两压缩回波峰-峰间距为  $\Delta f_1 = k\Delta\tau$ , 由式 (7) 知, 若两目标的频率间距为  $0.886/T$  时, 从理论上可分辨这两个目标, 因此可分辨的最小回波时延间距  $\Delta\tau_{\min}$  为

$$\Delta\tau_{\min} = 0.886/B \quad (9)$$

式 (9) 中  $B$  为线性调频信号带宽。

## 3 仿真

### 3.1 无噪声时

假设中频为  $f_{10} = 20$  MHz, 信号脉冲宽度为  $T = 20\mu\text{s}$ , 信号带宽为  $B = 70$  MHz, 采样频率为  $f_s = 80$  MHz, 采样点数为 1601, 则线性调频率  $k = 3.5 \times 10^{12}$  Hz/s, 即  $f_2 = 1.75 \times 10^{12}$  Hz/s。

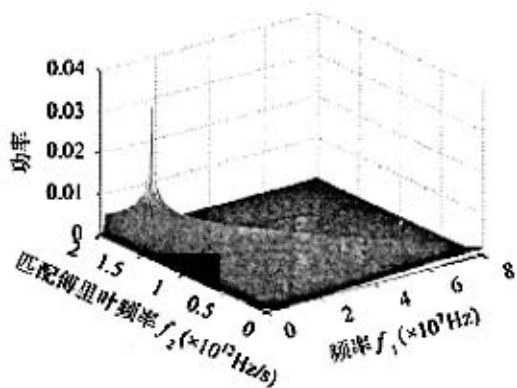
**3.1.1 线性调频率  $k$  未知即  $f_{20}$  未知时** 假设单目标回波, 其回波时延为  $2.5\mu\text{s}$ , 由  $f_1 = f_{10} - 2f_2\tau$ , 峰值处  $f_1 = 1.125 \times 10^7$  Hz; 另外假设有 3 个目标回波, 第 1, 2, 3 目标回波时延分别为  $0\mu\text{s}$ ,  $2.5\mu\text{s}$  和  $4.275\mu\text{s}$ , 则  $f_1$  分别为  $2.0 \times 10^7$  Hz,  $1.125 \times 10^7$  Hz 和  $0.50375 \times 10^7$  Hz 时出现峰值。

当  $f_{20}$  未知时, 利用式 (3), 先对  $f_2$  搜索, 对每一个  $f_2$ , 进行傅里叶变换, 当  $f_2 = f_{20}$  时第二步匹配傅里叶变换谱出现峰值, 这样就可估计出  $f_{20}$ , 其第二步匹配傅里叶变换谱三维图、等高线图如图 1 所示。图 1(a) 和图 1(b) 表示单目标回波情形, 其中图 1(a) 表示其第二步匹配傅里叶变换谱三维图, 图 1(b) 表示其等高线图; 图 1(c) 和图 1(d) 表示 3 个目标回波情形, 其中图 1(c) 表示其第二步匹配傅里叶变换谱三维图, 图 1(d) 表示其等高线图; 从图 1(b) 和图 1(d) 可清楚地看出, 功率谱的峰值点位于  $f_2 = f_{20} = 1.75 \times 10^{12}$  Hz/s, 估计出了  $f_{20}$ ; 同时还看到, 对于单目标回波, 其第二步匹配傅里叶变换谱的峰值点处,  $f_1$  确实为  $1.125 \times 10^7$  Hz; 对于 3 目标回波, 其第二步匹配傅里叶变换谱的峰值点处,  $f_1$  确实分别为  $2.0 \times 10^7$  Hz,  $1.125 \times 10^7$  Hz 和  $0.50375 \times 10^7$  Hz。

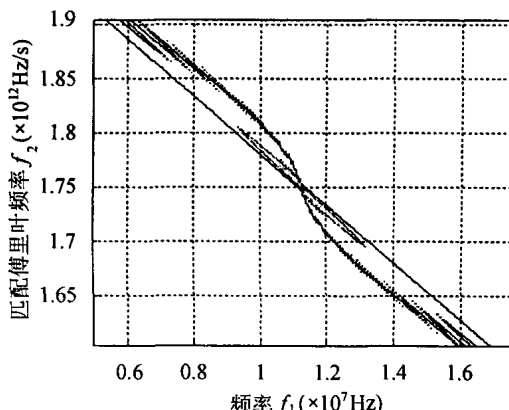
**3.1.2 匹配傅里叶脉冲压缩** 知道线性调频率  $k$  即  $f_{20}$  后, 就可利用式 (4) 和式 (8) 进行匹配傅里叶域脉冲压缩了。

(1) 单目标回波脉冲的情形 同上, 假设某回波时延为  $\tau = 2.5\mu\text{s}$ , 则  $f_1 = f_{10} - 2f_{20}\tau = 1.125 \times 10^7$  Hz, 由式 (4) 给出该回波压缩后的匹配傅里叶域功率谱如图 2 所示, 图 2(a) 表示未加权处理结果, 图 2(b) 表示海明加权处理结果。

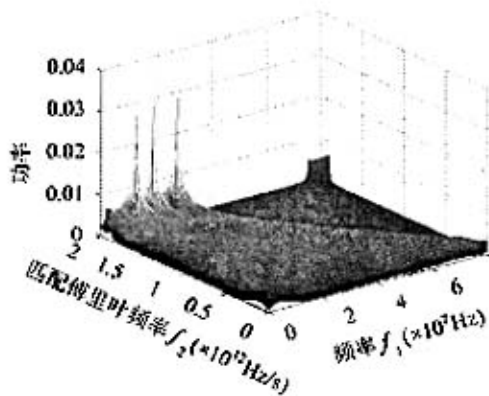
对图 2(a) 进行放大, 可看出其最大副瓣电平为  $-13.32$  dB; 比较图 2(a) 和图 2(b) 可看出, 海明加权后压缩脉冲副瓣电平降低。由图 2 可看出, 用匹配傅里叶变换同样可实现脉冲压缩。



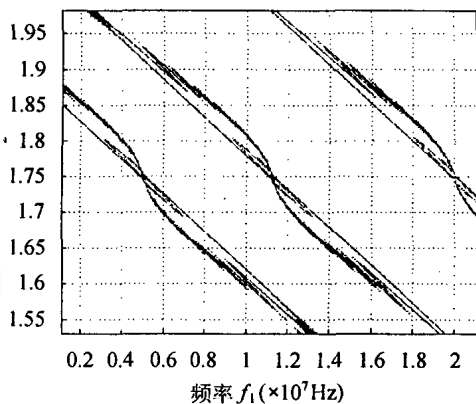
(a) 单目标回波三维图



(b) 单目标回波等线图

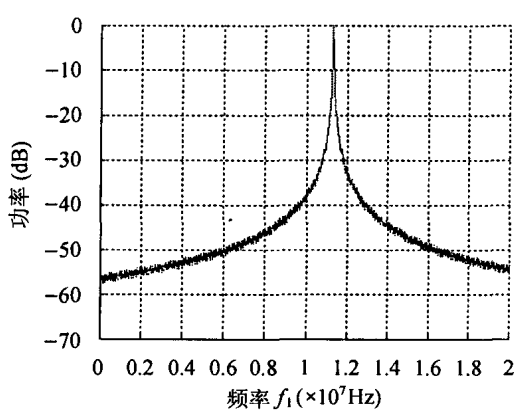


(c) 三目标回波三维图

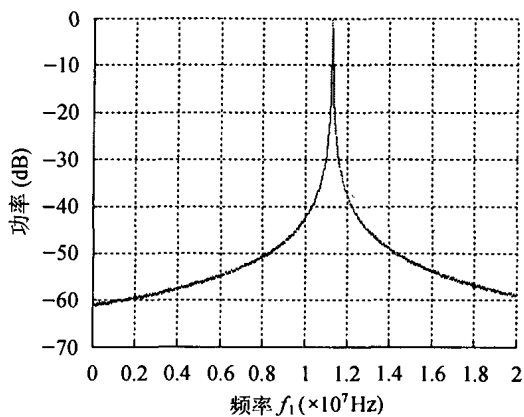


(d) 三目标回波等线图

图 1 无噪声时线性调频率  $f_{20}$  的估计



(a) 未加权



(b) 海明加权

图 2 匹配傅里叶域单目标回波脉冲压缩结果

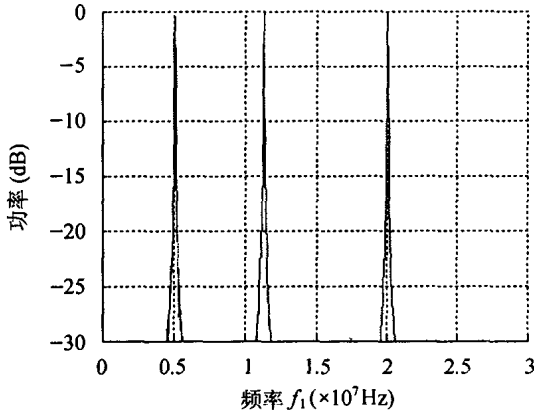


图 3 匹配傅里叶域多目标回波脉冲压缩结果

(2) 多目标回波脉冲时的情形同上, 假设有 3 个回波脉冲, 第 1, 2, 3 目标回波时延为  $0, 2.5 \mu s$  和  $4.275 \mu s$ , 由  $f_1 = f_{10} - 2f_{20}\tau$ ,  $f_1$  分别为  $2.0 \times 10^7 \text{ Hz}$ ,  $1.125 \times 10^7 \text{ Hz}$  和  $0.50375 \times 10^7 \text{ Hz}$ , 由式 (8) 回波串脉压后的匹配傅里叶域功率谱如图 3 所示, 可看出: 其峰值点处,  $f_1$  确实分别为  $2.0 \times 10^7 \text{ Hz}$ ,  $1.125 \times 10^7 \text{ Hz}$  和  $0.50375 \times 10^7 \text{ Hz}$ .

### 3.2 有噪声存在时

**3.2.1 当  $f_{20}$  未知时** 在信号中加白噪声, 设有单个回波, 信噪比为  $-9.5424 \text{ dB}$ , 回波时延为  $2.5 \mu s$ , 由式 (3), 进行匹配傅里叶变换, 其幅度谱如图 4(a) 所示, 图 4(b) 是 4(a) 平面投影; 通过对图 4(b) 中峰值点处的局部放大可看出, 功率谱的峰值点位于  $f_1 = 1.125 \times 10^7 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = f_{20} = 1.75 \times 10^{12} \text{ Hz/s}$ .

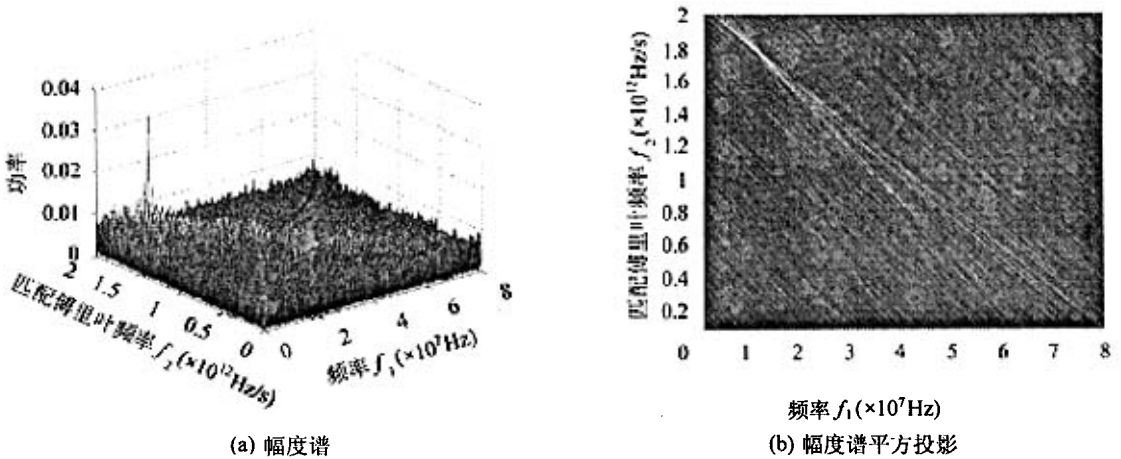


图 4 有噪声时线性调频率  $f_{20}$  的估计

**3.2.2 匹配傅里叶脉冲压缩** 当  $f_{20}$  已知时, 在信号中加白噪声, 设信噪比为  $-9.5424 \text{ dB}$ , 单个回波脉冲匹配傅里叶域压缩的结果如图 5(a) 所示, 其峰值点  $f_1 = 1.125 \times 10^7 \text{ Hz}$ , 最大副瓣电平为  $-13.0 \text{ dB}$ ; 3 个回波脉冲匹配傅里叶域压缩的结果如图 5(b) 所示, 可看出: 其峰值点处,  $f_1$  仍为  $2.0 \times 10^7 \text{ Hz}$ ,  $1.125 \times 10^7 \text{ Hz}$  和  $0.50375 \times 10^7 \text{ Hz}$ , 最大副瓣电平为  $-7.0 \text{ dB}$ .

## 4 结论

通过理论分析和仿真, 验证了本文提出的脉冲压缩方法是正确的和可行的, 可在雷达信号处理等领域中应用。

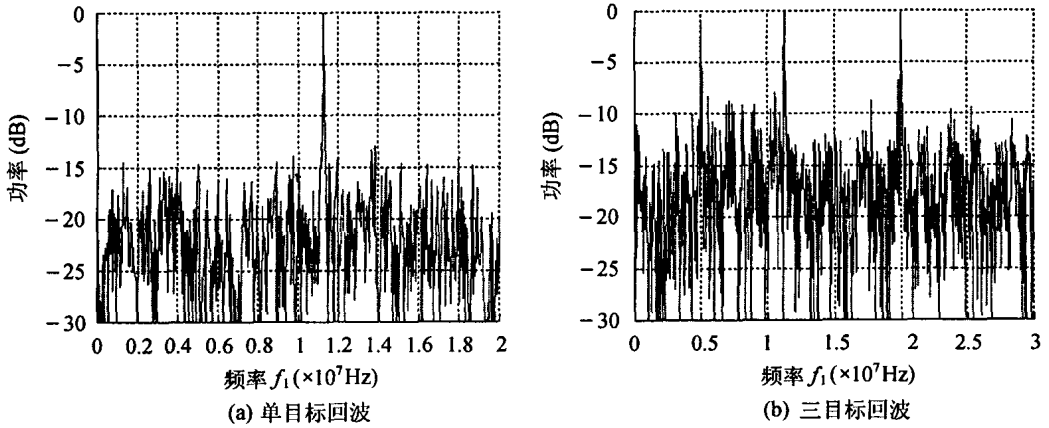


图 5 有噪声时匹配傅里叶域脉冲压缩结果

### 参 考 文 献

- [1] 王盛利, 李士国, 倪晋麟, 张光义. 一种新的变换—匹配傅里叶变换. 电子学报, 2001, 29(3): 403-405.  
 [2] 王盛利, 张光义. 匹配傅里叶变换的噪声抑制与滤波. 电子学报, 2001, 29(12): 1683-1684.

朱 力: 男, 1964 年生, 高级工程师, 博士生, 主要从事星载 SAR 总体、信号处理方面的研究.  
 王盛利: 男, 1957 年生, 高级工程师, 博士, 主要从事雷达总体、信号处理以及相关的技术研究工作.  
 林幼权: 男, 1966 年生, 研究员, 副总工程师, 博士, 长期从事雷达系统设计.  
 刘国岁: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 主要从事噪声雷达、连续波雷达系统及信号处理技术研究.