

# 基于线性调频步进信号的 SAR 实测数据成像

张志敏, 张群, 郭英

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**介绍了线性调频步进信号的形式及合成高分辨距离像的原理,提出了一种基于该信号形式拉伸处理的地杂波剔除方法,分析了目标运动以及雷达载机振动对合成的一维距离像的影响等问题,给出了合成距离像的仿真结果以及一种毫米波直升机机载成像雷达的实测数据成像结果。

**关键词:**线性调频信号; 带宽; 合成距离像; 雷达系统改造

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2006)02 - 0051 - 04

雷达的距离分辨率取决于其发射信号的带宽,为获得距离高分辨率(HRR),较早采用的是单频窄脉冲信号,但由于受到器件峰值功率的限制,采用窄脉冲信号不能发射较强的信号功率,因而限制了雷达系统的探测距离,使系统探测距离与距离分辨力成为一对矛盾。为此,人们通过各种不同的调制方式来获得高距离分辨率,在现代雷达系统中,步进频率信号就是这样一种高分辨距离信号<sup>[1]</sup>。但这种信号在距离分辨率一定的前提下,要想提高数据利用率,就要限制脉冲宽度,同样带来探测距离的下降。如果把步进频率信号<sup>[2-3]</sup>中的常载频子脉冲换成线性调频子脉冲<sup>[4-6]</sup>就可以解决这一问题,这种信号的优点是在保持步进频率信号发射能量和总带宽不变的同时减小步进阶梯的周期数,提高系统的数据率。其处理步骤是首先将线性调频子脉冲通过一次脉冲压缩成粗高分辨率的距离像,然后利用步进频率信号特性对粗高分辨像上的分辨单元进行二次脉压形成精高分辨的一维距离像。

线性调频信号是目前雷达系统中较多采用的一种信号,如果采用调频步进形式对其进行改造,将大大改善现有型号雷达的性能(如火控雷达),提高其距离分辨率,并可以增加实时成像功能。

## 1 线性调频步进信号体制原理

### 1.1 信号形式及合成高分辨原理

调频步进信号的时域表示式为

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=0}^{n-1} u_1(t - iT) e^{j2\pi\Delta f i} e^{j2\pi f_0 t} = \frac{1}{\sqrt{nT_1}} \sum_{i=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t - iT}{T_1}\right) e^{j\pi k(t-iT)^2} e^{j2\pi\Delta f i} e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

式中:  $u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{T_1}} \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) e^{j\pi k t^2}$  为 chirp 子脉冲;  $k = \Delta f/T_1$  为调频斜率;  $T_1$  为子脉冲宽度;  $T$  为脉冲重复周期(PRT);  $f_0 + i\Delta f$  为第  $i$  个调频步进子脉冲的载频;  $n$  为子脉冲个数。为简化表达式,将信号的起始时刻定为  $-T_1/2$ 。图 1 是调频步进信号的频率变化规律。调频步进信回波可以表示为

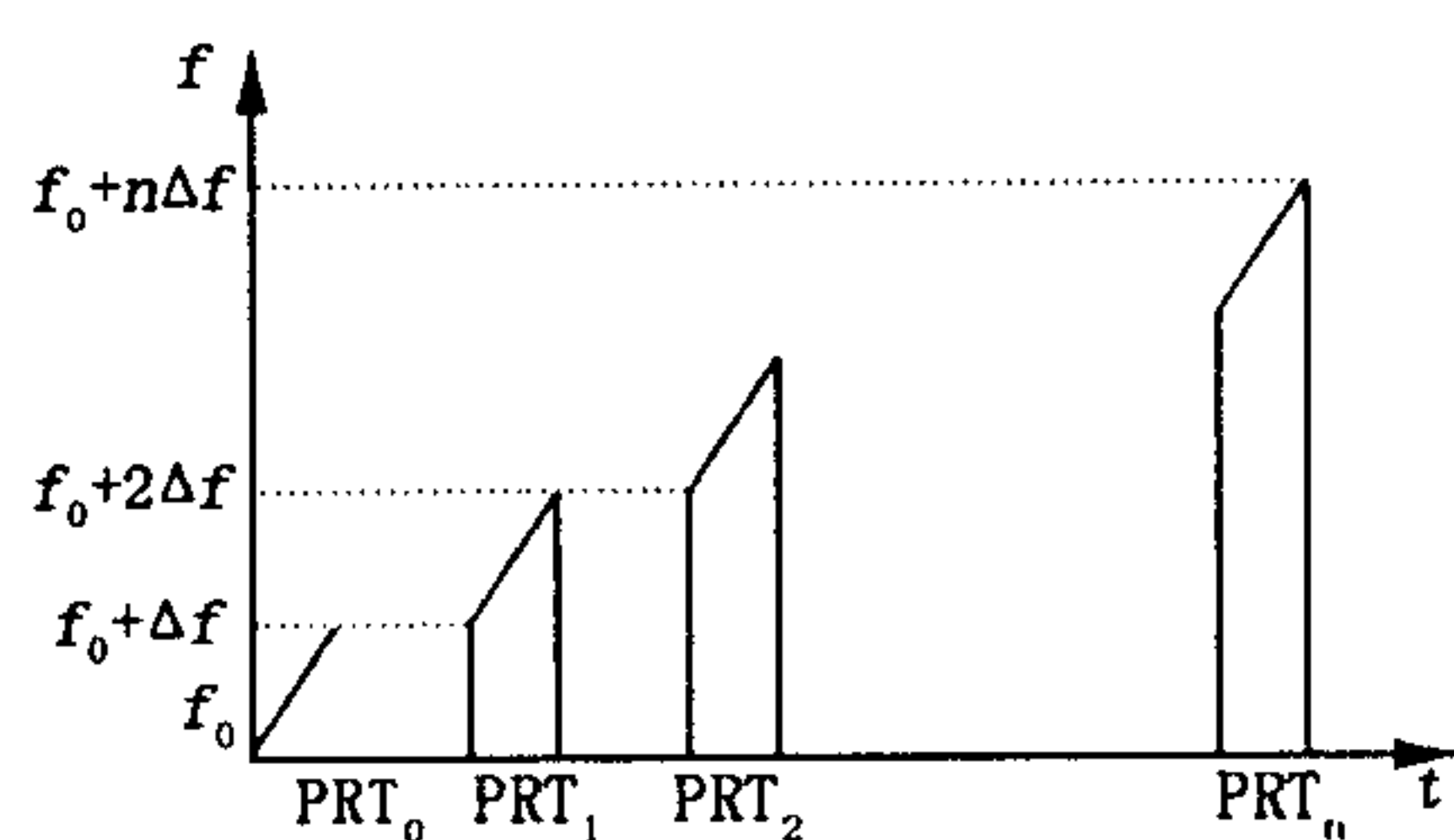


图 1 调频步进信号频率变化规律

收稿日期:2005 - 07 - 07

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2004F15)

作者简介:张志敏(1978 -),男,重庆市人,工程师,硕士生,主要从事信号处理技术研究。

$$s_r(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t - iT - \tau(t)}{T_1}\right) e^{j2\pi k(t - iT - \tau(t))^2} e^{j2\pi i \Delta f(t - \tau(t))} e^{j2\pi f_0(t - \tau(t))} \quad (2)$$

式中:  $\tau(t) = 2R(t)/c$  为回波时延;  $R(t)$  为目标距离;  $c$  为光速。为简单起见, 省略了回波幅度系数。将雷达回波信号与本振信号混频, 则得混频后的视频输出为

$$s_r(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t - iT - \tau(t)}{T_1}\right) e^{j\pi k(t - iT - \tau(t))^2} e^{-j2\pi i \Delta f(t - \tau(t))} e^{-j2\pi f_0(t - \tau(t))} \quad (3)$$

从上式不难看出, 调频步进信号的回波可以分为以下两部分:

$$A = \text{rect}\left(\frac{t - iT - \tau(t)}{T_1}\right) \exp(j2\pi k(t - iT - \tau(t))^2) \quad (4)$$

$$B = \exp(-j2\pi i \Delta f \tau(t)) \exp(-j2\pi f_0 \tau(t)) \quad (5)$$

因子  $A$  是 Chirp 信号, 因子  $B$  是由于信号载频跳变而形成的相位变化, 则式(3) 可以分解为各个 PRT 的 Chirp 子脉冲和不同 PRT 之间的步进频率两个部分。同时信号处理也可以分解为两步<sup>[2]</sup>: 首先在各个 PRT 内进行 Chirp 脉冲压缩, 然后在脉冲压缩后进行 PRT 之间的 IDFT 处理。假设  $\tau(t) = \tau = 2R/c$ , 即目标为固定点目标, 时延不随时间变化。则得一次脉压后的输出信号为

$$s_c(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{kT_1^2} \text{rect}\left(\frac{t - iT - \tau}{T_1}\right) \frac{\sin(\pi k T_1 (t - iT - \tau))}{\pi k T_1 (t - iT - \tau)} \times \exp(-j\pi k(t - iT - \tau)^2) \exp\left(j\frac{\pi}{4}\right) \exp(-j2\pi i \Delta f \tau(t)) \exp(-j2\pi f_0 \tau(t)) \quad (6)$$

取采样时刻为  $t = iT + \tau$ , 可得采样后的数字信号为

$$s_c(i) = \begin{cases} \sqrt{kT_1^2} \exp\left(j\frac{\pi}{4}\right) \exp(-j2\pi i \Delta f \tau(t)) \exp(-j2\pi f_0 \tau(t)) & iT + \tau - \frac{T_2}{2} \leq t \leq iT + \tau + \frac{T_2}{2} \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

对上式进行 IDFT 处理, 则得二次脉压后的高分辨距离像为

$$|S(l)| = \sqrt{kT_1^2} \left| \frac{\sin \pi(l - N \Delta f \tau)}{N \sin \pi(l/N \Delta f \tau)} \right| \quad (8)$$

## 1.2 速度对合成距离像的影响<sup>[6]</sup>

多普勒效应对调频步进信号的影响分为两部分: 对子脉冲压缩的影响和对步进频率的影响。对频率步进的主要影响是形成了两次相位误差, 一次相位误差造成了 IDFT 的耦合时移, 使目标像产生距离移动, 走动的高分辨单元数为  $2Vf_0 nT/c$ , 在对采样序列进行速度补偿时, 其运动补偿精度要求:

$$|\Delta V| < c/(4nf_0 T) \quad (9)$$

二次相位误差将造成合成像的失真, 其运动补偿精度要求:

$$|\Delta V| < c/(4n^2 \Delta f T) \quad (10)$$

对脉冲压缩的影响主要体现在脉压输出的距离移动, 如果雷达系统设计满足下面条件, 则可以进行后续 IDFT 处理。

$$\frac{2V}{c} nT < \frac{1}{4B} = \frac{1}{4kT_1} \quad (11)$$

## 1.3 地杂波剔除方法及其他问题

基于线性调频步进信号的地杂波剔除方法, 可参考文献[7] 中提出的关于步进频率信号的处理方法。关于线性调频步进信号的匹配滤波处理方式, 文献[8-9] 进行了简单的讨论及仿真。下面主要讨论在线性调频步进信号的拉伸处理方式下的地杂波处理方式。

为了利用延迟线技术来对消杂波, 我们建立类似文献[7] 中的信号形式: 发射一串由  $N$  组调频信号组构成的脉冲串, 每个脉冲组的载频是均匀步进的, 步进值为  $\Delta f$ ; 每脉冲组由两个具有相同载频的线性调频信号子脉冲构成, 脉冲组的重复时间为  $T_r$ 。

不失一般性, 考虑一个具有恒定速度的点目标。则第  $i$  个脉冲组发射的两个脉冲可表示为

$$p_{11}(t) = \exp(2\pi(f_0 + i\Delta f)t) \exp(j\pi\mu t^2) \quad iT \leq t \leq iT + T_1 \quad (12)$$

$$p_{12}(t) = \exp(2\pi(f_0 + i\Delta f)t) \exp(j\pi\mu t^2) \quad iT + T_r \leq t \leq iT + T_r + T_1 \quad (13)$$

式中  $T_1$  是脉冲宽度;  $T_r$  是每个脉冲组的脉冲重复间隔;  $\mu$  是调频率。假设雷达到散射点和参考点的快时间

延迟分别为  $\tau_p$  和  $\tau_c$ , 则雷达回波信号和参考信号可分别表示为

$$s(t) = p(t - \tau_p) \quad (14a) \quad s_c(t) = p(t - \tau_c) \quad (14b)$$

经过拉伸处理后, 得到<sup>[10]</sup>:

$$s_1(t) = s(t)s_c^*(t) = \exp(j2\pi\Delta Ft) \exp(j\varphi) \quad (15)$$

式中  $\Delta F = -\mu\Delta\tau_p$ ,  $\varphi = -2\pi[(f_0 + i\Delta f)\Delta\tau_p - (\mu/2)\Delta\tau_p^2]$ 。则一次脉压可以通过对上式进行傅立叶变换后得到。

下面利用文献[10]中的离散信号形式来简明地讨论拉伸处理的杂波剔除。

发射信号的离散形式可以表示成如下形式:

$$s_1(n) = \exp(j2\pi\Delta Fn\Delta t) \exp(j\varphi) \quad (16)$$

其中  $\Delta t$  为采样间隔。假设运动点目标是  $a$ 、固定点目标是  $b$ , 运动目标与雷达之间的径向速度为  $v$ , 脉冲重复间隔为  $T_r$ ,  $\tau_c(i)$  ( $i = 1, 2, \dots, 2m$ ) 是第  $i$  个参考信号的快时间延迟,  $\tau_a(i)$ 、 $\tau_b(i)$  分别是雷达回波相对于点  $a$ 、 $b$  的快时间延迟。当对第  $i = 2k$  个回波进行拉伸处理时, 所采用的参考信号必须与前一个相同, 即第  $2k - 1$  个, 这是为了保证两个回波之间的相干性。因此, 经过一次对消后, 得到

$$\begin{aligned} s_1(2k, n) - s_1(2k - 1, n) &= \exp(-2\pi(f_0 + i\Delta f)[\tau_a(2k - 1) - \tau_c(2k - 1)]) \times \\ &\exp(j\pi\mu[\tau_a(2k - 1) - \tau_c(2k - 1)]^2) \exp(j2\pi\mu[\tau_a(2k - 1) - \tau_c(2k - 1)]n\Delta t) - \\ &\exp(-2\pi(f_0 + i\Delta f)[\tau_a(2k - 1) - \tau_c(2k - 1)]) \exp(j\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_c(2k - 1)]^2) \times \\ &\exp(j2\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_c(2k - 1)]n\Delta t) \end{aligned} \quad (17)$$

从上式不难看出, 作为地杂波地固定点目标已经被剔除, 剩下的是从运动处得到的两个回波之差, 其包络  $\phi(t)$  是如下形式的正弦信号:

$$\phi(t) = \sin[-2\pi(f_0 + \Delta f)\Delta_a(2k) + \pi\mu\Delta_a(2k)^2 + 2\pi\mu(\Delta\tau_a(2k) + f_d T_r)n\Delta t] \quad (18)$$

它的幅度为  $|2\sin(\pi\mu[2\Delta\tau_a(2k)] + f_d T_r)|$ , 其中  $f_d = 2v/c$ 。对其进行二次脉压就可以得到高分辨距离像。

另外, 在高巡航速度的战场条件要求下, 直升机振动必定会对合成孔径雷达的性能带来影响。直升机旋翼的高速振动可能对发射和接收信号产生附加的寄生调制, 关于载机振动对线性调频步进体制雷达信号的影响以及解决办法, 文献[11]已经进行了讨论及仿真, 这里不再赘述。

## 2 仿真结果

选择系统参数如下: 雷达工作频率  $f_0 = 35$  GHz, 即波长  $\lambda = 8.57$  mm; 脉冲重复周期  $T = 100$   $\mu$ s; 发射 Chirp 信号脉宽  $T_1 = 2$   $\mu$ s; 频率步进量  $\Delta f = 16$  MHz; 频率步进阶数  $n = 16$ ; 调频斜率  $k = 8 \times 10^{12}$ ; 信号处理的采样频率  $f_s = 16$  MHz。由以上参数可以得出: 线性调频子脉冲形成的粗分辨距离像的分辨率为  $\Delta R_c = c/2B = 9.375$  m, 采用 16 点 IDFT 合成距离高分辨后, 也就是形成精高分辨距离像后的距离分辨率  $\Delta R_c = c/2N = 0.5859$  m; 设目标由 2 个距离为 2.29 m 的散射点构成, 散射中心与雷达的距离为 10 m; 由图 2 可以看出, 由于散射点之间的距离过小, Chirp 脉压后无法分辨 2 个散射点; 合成距离高分辨后, 则可以清楚地分辨 2 个散射点(见图 3)。

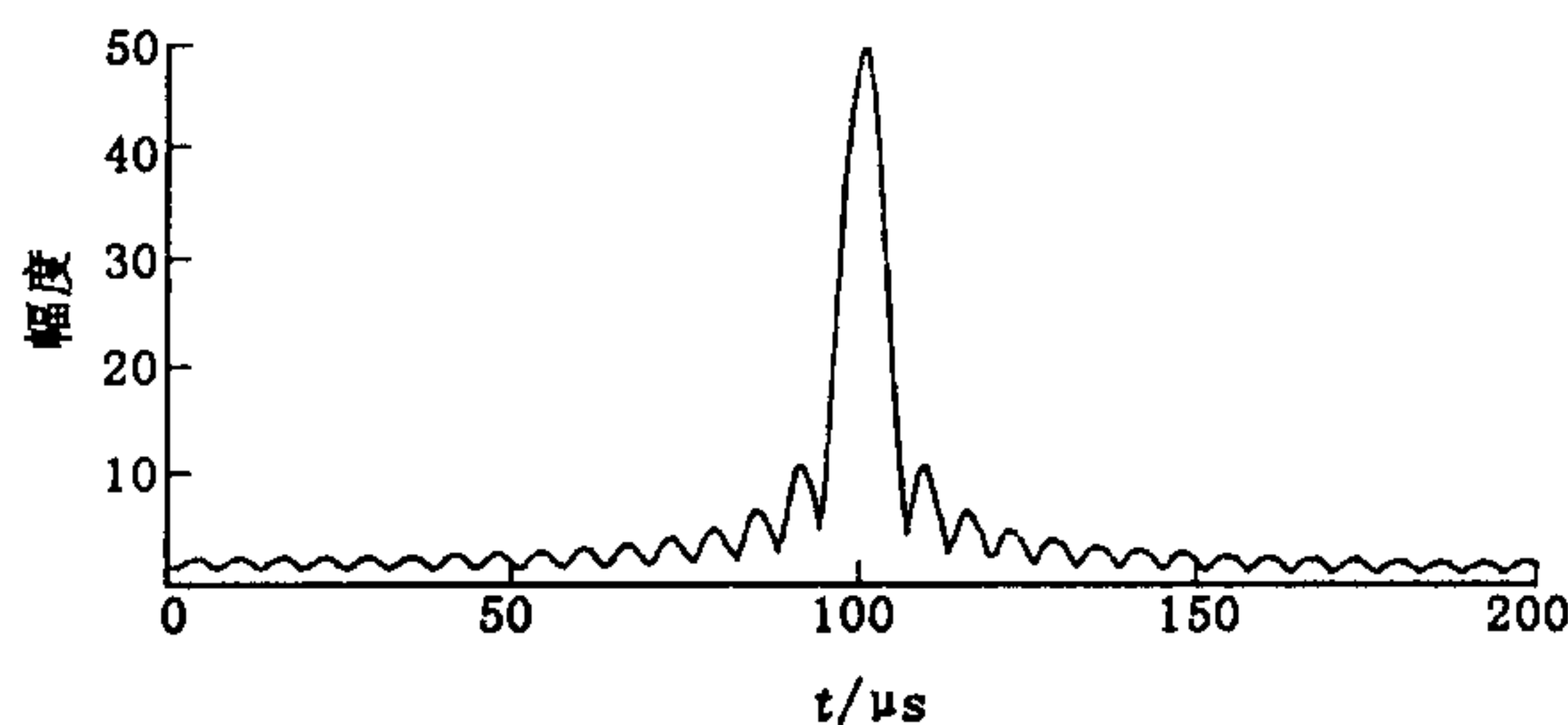


图2 静止目标的 Chirp 子压缩输出

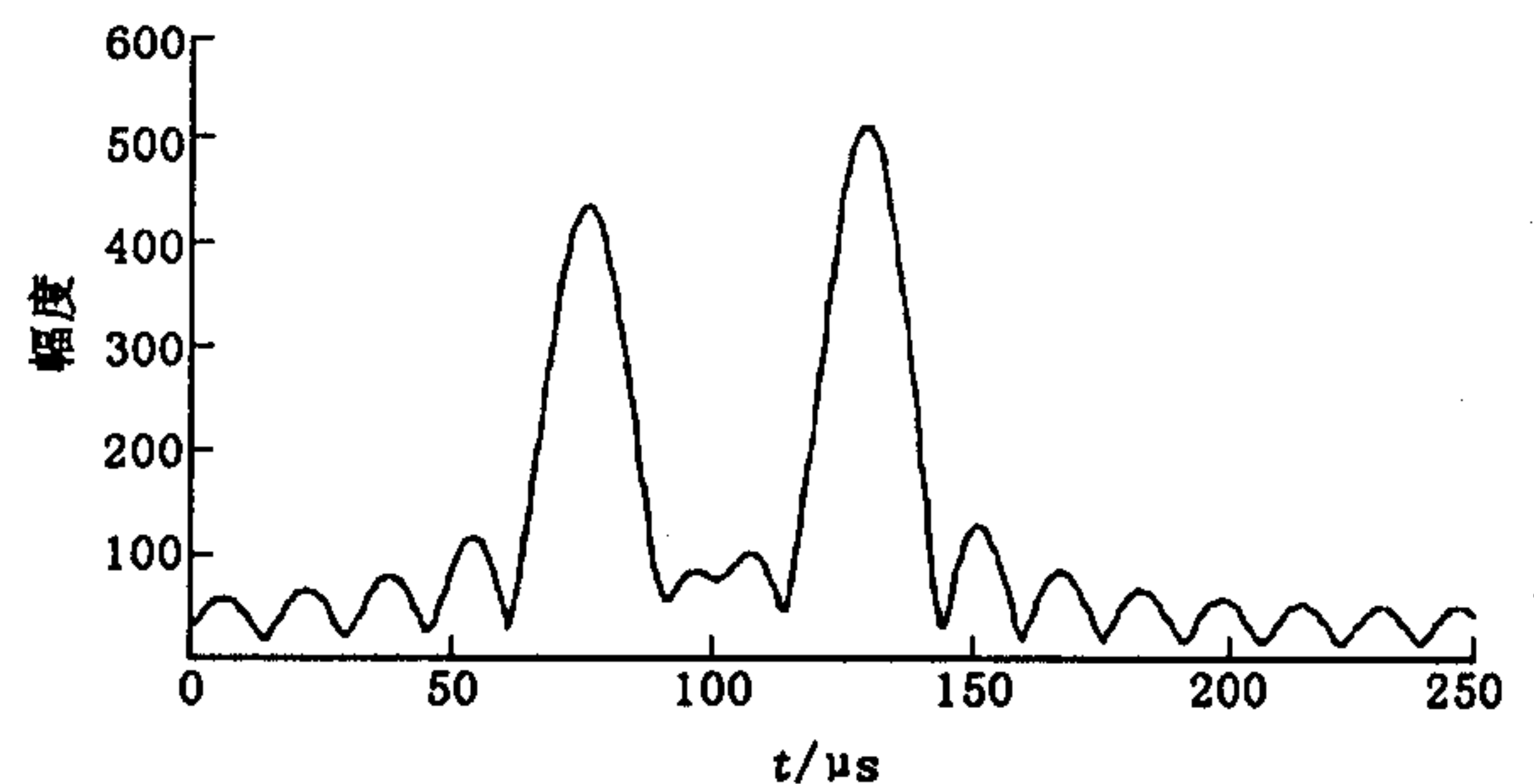


图3 IDFT 后的静止目标高距离分辨输出

### 3 结论

线性调频信号同时具备大时宽带宽积和数据利用率高这2个特点,本文提出了利用线性调频步进信号来提高雷达系统的距离分辨率,这种信号不需要在雷达硬件系统上进行大量的改动,主要是算法的研制。一旦在本文中提到的各种问题得到完善解决,这种信号形式的应用前景将非常广阔,特别是对目前我国现有旧型调频信号体制雷达的改造具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar[M]. Artech House, 1997.
- [2] 刘 峥,刘宏伟,张守宏. 步进频率信号分析[J]. 西安电子科技大学学报,1999, 26(1):71-74.
- [3] 刘宏伟,王 俊,张守宏. 运动目标环境下步进频率信号的设计及处理[J]. 西安电子科技大学学报,1997, 24:75-84.
- [4] 龙 腾,毛二可,何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报,1998,26(12):84-88.
- [5] 郑学合,阮文杰,袁 起. Chirp 子脉冲子脉冲步进频率雷达信号的探讨[J]. 现代防御技术, 1998,26(2):52-54
- [6] 张 群,张 涛,张守宏. 运动目标环境下的调频步进信号分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2001,28(2):220-224.
- [7] Zhang Q, Yeo T S, Du G. ISAR Imaging in Strong Ground Clutter by Using a New Stepped - Frequency Signal Format[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003,41(5):948-952.
- [8] Zhang Qun, Li Zhi - an, Wu Yong, et al. Cancellation Techniques in ISAR Data Processing[A]. Proc. 2004 China - Japan joint meeting on microwaves[C]. Harbin, China:2004. 327 - 330.
- [9] Zhang Q, Yeo T S. Three - Dimensional Imaging of Ground Moving Target Using the LnISAR Technique[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004,42(9):1818-1828.
- [10] Zhang Q, Li Y, Zhang T. Low - Altitude Target Imaging in Strong Ground Clutter[A]. 2001 CIE International Conference on Radar Processing[C]. Oct. 2001. 665 - 669.
- [11] 张冠杰,张 群,张 涛,等. 直升机振动环境下的毫米波调频步进信号仿真分析[J]. 西安电子科技大学学报,2005, 32(2):247-252.

(编辑:门向生)

## Imaging of Real SAR Data Based on LFM - stepped Chirp Signal

ZHANG Zhi - min, ZHANG Qun, GUO Ying

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** The formation of LFM stepped Chirp signal and the principle of synthetic high resolution range profile are introduced. A clutter cancellation method is put forward and then some problems about this radar system, such as the influence of helicopter vibration on imaging and so on, are analyzed in brief. Moreover, the synthetic range profile and the imaging results of real data are given in this paper.

**Key words:** LFM signal; band - wide; synthetic range profile; radar system reconstruction