

## 基于脉冲压缩的距离超分辨技术<sup>1</sup>

刘 晟 向敬成

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘 要** 利用高分辨阵列处理算法实现重叠回波时延超分辨是扩展雷达距离分辨率的有效方法, 而降低这类算法适用的信噪比 (SNR) 门限是其能否实用的关键。本文针对大时宽带宽积 (TB) 信号压缩后能量集中, 峰值 SNR 提高的特点, 提出了一种低 SNR 下大 TB 信号距离超分辨新方法。即利用脉压和旁瓣抑制技术对大 TB 信号进行预处理, 结合噪声的预白化, 对截取的脉压输出主瓣进行超分辨处理。计算机模拟表明该方法可以在低 SNR 下实现多目标的距离超分辨估计, 并大大降低数据存储量和计算量。

**关键词** 距离超分辨, 脉冲压缩, 旁瓣抑制, 线性调频 (LFM), 子空间方法

**中图分类号** TN911.7, TN951

### 1 前 言

在雷达、声纳等有源探测系统中, 多目标的分辨能力一直是决定其性能的重要因素; 高分辨率是雷达成像、目标识别和分类所必须的。根据目标回波可以在距离、速度、方位等参数上对多目标进行区分。通常的做法是基于线性处理的, 即在距离域上作相关 (匹配) 处理 (对大时宽带宽积 (TB) 信号即为脉压), 在多普勒域上作 FFT 处理, 在方位域上作方位压缩处理。尽管线性处理可以使信号检测和估计较好地统一并易于实现, 但其分辨极限近似为信号带宽的倒数<sup>[1]</sup>。

近年来, 高分辨率谱估计和阵列处理技术得到了巨大的发展<sup>[2]</sup>。它的直接应用可以使多普勒域上目标的速度分辨力大大提高, 特别是当可获得的回波脉冲数较少时<sup>[3]</sup>。距离和方位分辨最终都归结为重叠信号时延分辨问题。A. M. Bruckstein 等较早地注意到了宽带源重叠回波分辨问题与高分辨率阵列处理问题在信号模型上的统一性, 提出了基于高分辨阵列处理技术的重叠回波时延分辨的思想<sup>[4]</sup>; 而后, 不少学者对此作了进一步的发展<sup>[3,5-8]</sup>。其中, W. F. Gabriel 首先将其应用于雷达距离域的处理。然而, 在已有的文献中, 大都只涉及简单的信号形式; 尽管 W. F. Gabriel 文中研究的是 LFM 信号, 但他基本沿用了与简单信号相同的处理方式, 并未充分利用大 TB 信号的潜在优势。但是, 实际中接收到的雷达回波信号 SNR 一般均较低, W. F. Gabriel 所提的方法实际上很难应用。鉴于此, 我们提出了一种新的距离超分辨方法, 它利用大 TB 信号压缩后能量集中, 峰值信噪比提高的特点, 大大降低了超分辨适用的 SNR 门限。

<sup>1</sup> 1997-02-17 收到, 1997-09-23 定稿

## 2 信号模型

常规雷达的目标模型可用点目标进行描述<sup>[1]</sup>, 体目标则可分解为多个散射点而用点目标群来近似。在多目标环境中, 对含  $D$  个点目标的目标群, 其回波信号可以表为

$$r_l(t) = \sum_{k=1}^D a_{kl} s(t - \tau_k) \exp[j(\omega_{dk} t + \varphi_{kl})] + n_l(t), \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (1)$$

式中  $K$  为可获得回波脉冲数,  $s(t)$  为雷达发射信号,  $n_l(t)$  为方差  $\sigma^2$  的零均值白噪声;  $a_{kl}$ 、 $\varphi_{kl}$  分别为第  $l$  个回波脉冲中第  $k$  个目标回波的幅度和相位,  $\tau_k$ 、 $\omega_{dk}$  分别为第  $k$  个目标回波时延与多普勒频率, 其中  $\tau_k$  对应于该目标的距离。

一般地, 当  $K$  个回波脉冲获取时间不太长, 且目标表面无明显变化时, 可忽略所观测的目标散射截面的变化, 各目标的回波幅度可视为常数。另外, 考虑到超分辨技术通常是作为雷达测量的增强手段, 因此, 假定已由通常的雷达测量单元获得了目标(群)的距离和速度的初步估值。这样可用目标(群)速度的初步估值对(1)式进行多普勒补偿。实际上, 第4节的计算机模拟表明当目标速度不大时, 即使不作多普勒补偿对距离超分辨算法也不会产生明显的影响。因而, (1)式可进一步表示为

$$r_l(t_i) = \sum_{k=1}^D a_k s(t_i - \tau_k) \exp(j\varphi_{kl}) + n_l(t_i), \quad i = 0, 1, \dots, L-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (2)$$

其中时间变量已离散化,  $L$  为单次回波时间采样数, 满足条件  $L \geq L_s + \tau_{\max}$  和  $L > D$ ,  $L_s$  为信号长度,  $\tau_{\max}$  为最大时延。(2)式即为我们所讨论的多目标距离超分辨问题的信号模型。

## 3 基本原理

### 3.1 宽带源时延估计和回波分辨

考察(2)式所示的时域中多目标回波信号模型, 可发现其与多传感器阵列处理的信号模型具有相似性, 如表1所示。

表1 宽带源回波分辨与阵列处理信号模型的对应关系

	宽带源回波分辨	窄带阵列方向估计
信号模型	$r_l(t_i) = \sum_{k=1}^D a_k s(t_i - \tau_k) \exp(j\varphi_{kl}) + n_l(t_i),$ $i = 0, 1, \dots, L-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1,$	$x_i(t_l) = \sum_{k=1}^D s_k(t_l) a_i(\theta_k) + n_i(t_l),$ $i = 0, 1, \dots, L-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1,$
待估参数项	$s(t_i - \tau_k)$	$a_i(\theta_k)$
$D$	重叠回波数	平面波源数
$L$	单次回波时间采样数	传感器阵列单元数
$K$	接收机接收的回波数	阵列接收的快拍数
随机参数项	$a_k \exp(j\varphi_{kl})$	$s_k(t_l)$

为便于讨论, 将(2)式表示为矩阵形式

$$\mathbf{r}(l) = \mathbf{A}\mathbf{u}(l) + \mathbf{n}(l), \quad (3)$$

式中  $\mathbf{u}(l) = [a_1 e^{j\varphi_{1l}}, \dots, a_D e^{j\varphi_{Dl}}]^T$ ,  $\mathbf{r}(l) = [r_l(0), \dots, r_l(L-1)]^T$ ,  $\mathbf{n}(l) = [n_l(0), \dots, n_l(L-1)]^T$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\tau_1), \dots, \mathbf{a}(\tau_D)]$  称为基信号矩阵, 其中  $\mathbf{a}(\tau_k) = [s(-\tau_k), s(1-\tau_k), \dots, s(L-\tau_k)]^T$  为基信号向量。可以看到, 如果使不同目标回波的相位在脉间随机变化且不相干, 则回波相关矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(l)\mathbf{r}^H(l)] = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{P} = E[\mathbf{u}(j)\mathbf{u}^H(j)] \in C_D^{D \times D}$ 。  $\mathbf{R}$  的估计即为样本相关矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{l=0}^{K-1} \mathbf{r}(l)\mathbf{r}^H(l). \quad (5)$$

由上面分析可知, 基于时域处理的宽带源回波分辨问题可类似地沿用阵列处理中的高分辨算法, 但应注意具体问题中基信号向量的特点。不同目标信号的解相干可通过雷达载波跳频来实现<sup>[6]</sup>。载波跳频将导致零中频信号的相位随目标回波时延与载波变化之积而随机变化, 因而能保证存在距离差异的目标正确地解相干。

### 3.2 脉压和旁瓣抑制在距离超分辨中的应用

脉冲压缩能让雷达系统发射宽度相对较宽而峰值功率低的脉冲, 以获得窄脉冲高峰值功率系统的距离分辨力和探测性能<sup>[1]</sup>, 因而被现代雷达系统所广泛采用。本文的讨论将使用一类应用最为广泛的脉压信号—— LFM 信号:

$$s(t) = \exp[j\pi B(t - T/2)^2/T], \quad 0 \leq t \leq T, \quad (6)$$

式中  $T$  为脉冲宽度,  $B$  为信号带宽。

由 (4) 式可知, 在时域进行宽带源回波超分辨处理与线性的相关 (匹配) 处理不同, 它的分辨性能与发射信号的波形没有直接的关系。因此, 对脉压信号而言, 其大 TB 的潜在性能并未得到有效的发挥。与此同时, 为了改善宽带源回波超分辨的分辨性能, 一个自然的想法是期望能提高 SNR, 即先对回波信号匹配滤波, 再对匹配滤波输出的信号作时延超分辨处理。但是可以证明, 用发射信号的自相关函数作基信号而对整个匹配输出进行处理, 与直接对回波信号处理是完全等效的。然而, 大 TB 脉压信号匹配滤波后大部分能量被集中到主瓣, 旁瓣电平却很低。因此, 可以截取信号能量集中的主瓣而丢弃低电平的旁瓣, 使参与超分辨处理的数据的有效 SNR 大大提高。计算机模拟表明, 丢弃 SNR 较差的旁瓣对时延超分辨的影响, 主要表现为使分辨输出产生一定的基底而可能使得不能分辨临近的较小目标。为了进一步减小旁瓣的影响, 可利用旁瓣抑制技术, 使旁瓣影响减弱到可以忽略的程度, 当然由此带来的失配也使 SNR 略有损失<sup>[1]</sup>。这样, 经脉压和旁瓣抑制预处理, 不但大大降低了超分辨所需的 SNR 门限, 而且起到了降维的作用, 使系统在分辨性能、数据存储量和计算量等方面均得到了很大的改善。一些典型的加权函数<sup>[1]</sup>, 可用于 LFM 信号的旁瓣抑制处理。

### 3.3 噪声预白化

脉压和旁瓣抑制预处理也使噪声成为有色噪声, 在运用高分辨算法前需作白化处理。由于脉压和旁瓣抑制滤波器均为线性网络, 输出噪声仍是平稳的, 其功率谱为

$$P_n(f) = |W(f)/S(f)|^2 \sigma^2, \quad (7)$$

式中  $W(f)$  为频域加权窗函数,  $S(f)$  为信号频谱。因而噪声相关函数为

$$r_n(\tau) = \text{IFFT}[P_n(f)], \quad (8)$$

进而可构造噪声相关矩阵  $\mathbf{R}_n$ 。当  $\mathbf{R}_n$  为满秩矩阵时, 利用其 Hermite 性质, 噪声预白化矩阵可以表示为

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_n^{-1/2} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}^{-1/2}\mathbf{U}^H, \quad (9)$$

其中  $\mathbf{R}_n = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^H$  为噪声相关矩阵特征分解的结果。若  $\mathbf{R}_n$  条件数过大, 可在对角线上加上一较小的正实数  $\delta \in R^+$ , 以改善其数值稳定性:

$$\tilde{\mathbf{R}}_n = \mathbf{R}_n + \delta\mathbf{I}. \quad (10)$$

另外, 当以分段重叠方式进行超分辨处理时<sup>[5]</sup>,  $\mathbf{R}_n$  的维数与整个回波数据长度无关, 可预先计算备用。

### 3.4 时延超分辨算法

高分辨阵列处理算法根据<sup>[2]</sup>可分为谱函数类方法 (Spectral-Based Approaches) 和参数化方法 (Parametric Approaches)。前者产生一个类似功率谱的待估参数的函数, 通过在参数空间搜索峰点来定位参数的估计值; 后者则是基于最大似然 (ML) 的参数估计方法, 它在估计精度, 相干源问题等方面优于前者, 但往往以增加的计算复杂性为代价。在这些方法中, 基于相关矩阵特征分解的子空间法和基于子空间近似的参数化方法在计算复杂性, 估计精度等方面具有明显的优势, 成为高分辨阵列处理的主流。本文就以子空间方法中最具代表性的 MUSIC 算法进行时延超分辨处理, 并假定目标数目  $D$  已知 ( $D$  可由一定的信息论准则确定<sup>[2,4]</sup>)。

## 4 计算机模拟和结论

本节用 LFM 信号作为发射信号对基于脉压的距离超分辨方法进行随机模拟试验。取 LFM 信号  $TB=2^k$  ( $k = 4 \sim 8$ ),  $B=5\text{MHz}$ (故距离单元  $R_{\text{bin}} = 1/B$ ), 脉冲重复频率  $f_r = 10\text{kHz}$ , 射频载波脉间跳频范围为  $\pm B/3$ 。采样率  $f_s = 4B$ , 雷达回波数  $K = 50$ , 采用 Hamming 窗抑制旁瓣。噪声为方差归一化零均值复高斯白噪声, 回波  $k$  的信噪比定义为  $\text{SNR}=10\lg(a_k^2/\sigma^2)$ 。对归一化脉压旁瓣抑制输出截取电平高于  $-20\text{dB}$  的主瓣, 时延搜索采取逐段重叠方式<sup>[5]</sup>。

图 1 给出了典型 SNR 下  $TB=128$  的 LFM 信号多次随机实验的分辨结果, 其中图 1(a) 和图 1 (b) 分别对应以下两种情况: ①  $\text{SNR}=-10\text{dB}$ , 相距  $0.5R_{\text{bin}}$  的两个等功率目标; ②  $\text{SNR}=-13\text{dB}$ , 相距  $0.75R_{\text{bin}}$  的三个等功率目标。图 2 对不同时带积的 LFM 信号分别采用本文方法和直接处理<sup>[5]</sup>测试了分辨概率, 所有情况均作 100 次 Monte Carlo 运行。其中成功分辨定义如下: 对一定 SNR 下两个相距  $0.5R_{\text{bin}}$  的等功率目标回波进行分辨, 以  $0.25R_{\text{bin}}$  间隔在目标群所在的距离段搜索, 输出峰点正确位于目标回波真实时延处, 且两峰点间谷点幅度比两峰点最小值低  $3\text{dB}$  以上。图 3 比较了这两种方法的计算量, 其中纵坐标按 10 的幂指数标度, 其值为一次分辨处理消耗的浮点运算次数。图 4 模拟了多普勒频率对超分辨处理的影响。分辨概率的定义同前, 其中的两个相距  $0.5R_{\text{bin}}$  的等功率目标具有符号相异的多普勒频率。

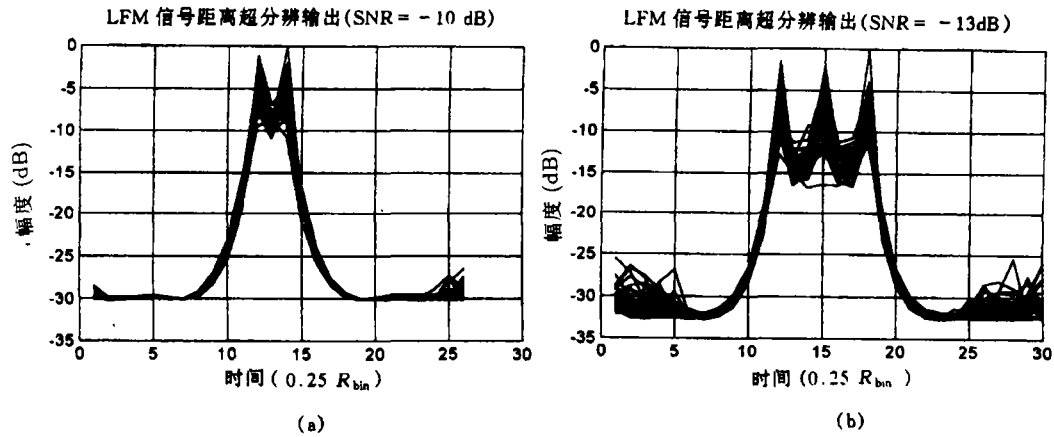


图 1 LFM 信号距离超分辨结果

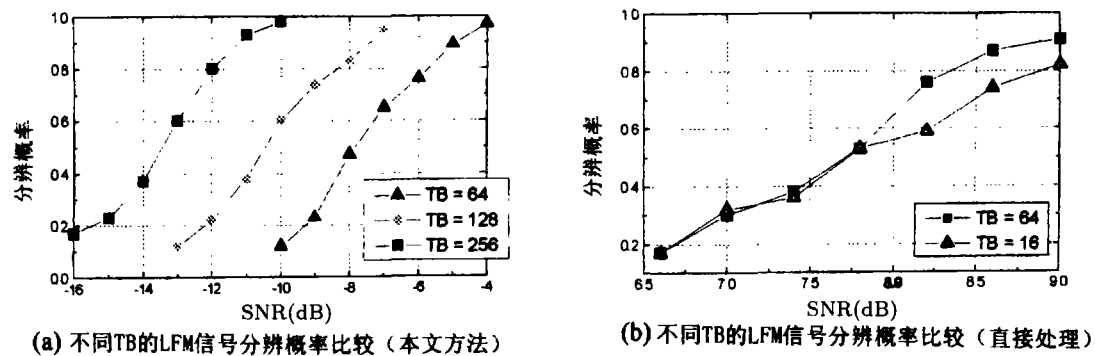


图 2 两种距离超分辨处理方法分辨概率比较

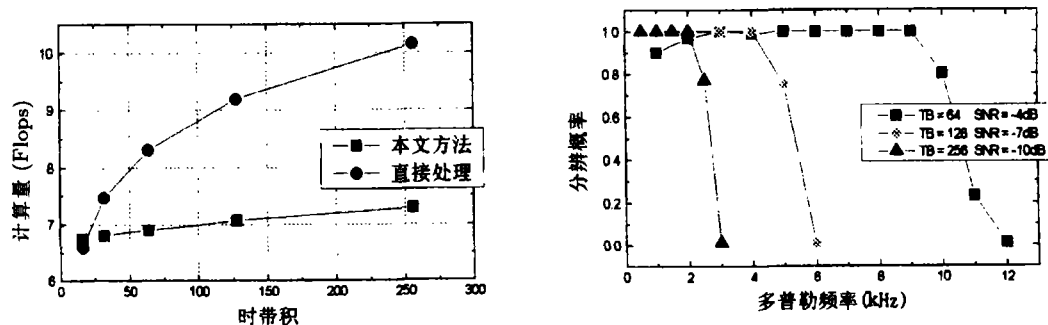


图 3 两种方法计算量的比较

图 4 不同 TB 的 LFM 信号距离超分辨多普勒性能

模拟结果表明, 本文方法大大扩展了 LFM 信号超分辨处理所需的 SNR 门限, 并具有较宽的多普勒容限。而且, TB 每增加一倍, 分辨所需的 SNR 门限下降 3dB, 而运算量几乎没有增加; 相比之下, 直接超分辨处理运算量几乎随 TB 加倍呈数量级增加, 而分辨所需

的 SNR 门限却无改善。另外, 大量的模拟表明, 处理中使用的目标数略大于实际值对超分辨处理影响不大, 这可以较好地解决实际应用中目标数目估计不准的问题。因此, 本文提出的方法较好地解决了大 TB 信号低 SNR 下的距离超分辨问题。

### 参 考 文 献

- [1] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论. 北京: 国防工业出版社, 1984, 115-151.
- [2] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research. *IEEE SP Mag.*, 1996, 13(4): 67-94.
- [3] Gabriel W F. Superresolution techniques and ISAR imaging. *IEEE National Radar Conf.*, Dallas, Texas: 1989, 48-55.
- [4] Bruckstein A M, *et al.* The resolution of overlapping echoes. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, ASSP-33(6): 1357-1367.
- [5] Gabriel W F. Superresolution techniques in range domain. *IEEE Int. Radar Conf.*, Arlington, Virginia: 1990, 263-267.
- [6] Gabriel W F. Improved range superresolution via bandwidth extrapolation. *IEEE National Radar Conf.*, Lynnfield, Massachusetts: 1993, 123-127.
- [7] Bresler Y, Delancy A H. Resolution of overlapping echoes of unknown shape. *IEEE Proc. of ICASSP*, Glasgow, Scotland: 1989, 2657-2660.
- [8] Zhu Z D, *et al.* Super-resolution range-Doppler imaging. *IEE Proc.-F*, 1995, 142(1): 25-32.

## RANGE SUPER-RESOLUTION BASED ON PULSE COMPRESSION

Liu Sheng    Xiang Jingcheng

(*Dept. of Electron. Eng., Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

**Abstract** Estimating the arrival time of overlapping echoes by high resolution array processing algorithms can efficiently expand the ability of target resolution in radar. Lowering the SNR threshold at which the algorithms take effect has particularly been an area of focus for practical applications. In this paper a novel method based on pulse compression for range super-resolution is presented. The proposed method, especially suitable to large time-bandwidth product (TB) signals, can be applied at very low SNR and greatly reduce the computational load in comparison with the known approaches.

**Key words** Range super-resolution, Pulse compression, Sidelobe suppression, Linear frequency modulation(LFM), Subspace approach

刘 晟: 男, 1971 年生, 博士生, 现从事雷达信号处理, 统计信号处理, 小波分析在雷达信号处理中的应用等研究工作。

向敬成: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 现从事雷达信号处理, 雷达系统分析和设计, 统计信号处理等领域的研究工作。