

## 利用脉间跳频和信号增强技术实现低信噪比下 雷达距离超分辨<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** 针对大时带积 (TB) 线性 / 非线性调频 (LFM/NLFM) 脉压信号, 本文研究了低信噪比 (SNR) 下获得雷达距离维超分辨性能的技术和方法。首先提出了一种有效的信号增强算法, 并通过脉间跳频的设计获得了不同目标回波非相关性, 进而提出了一系列进一步降低超分辨处理的 SNR 门限的有效方法。计算机模拟表明: 同样条件下本文方法较直接频域处理使超分辨估计所需的 SNR 门限改善了 10dB 以上, 较好地解决了低 SNR 环境下雷达距离域的多目标超分辨问题。

**关键词** 距离超分辨, 信号增强, 脉间跳频, 线性调频, 非线性调频

**中图分类号** TN951

### 1 前 言

现代雷达技术的发展对雷达系统在多目标环境中的多维高分辨率的需求越来越迫切。其中高的距离分辨力有助于分辨编队飞行的机群, 甚至有助于通过观测目标上的散射体分布特性进行目标识别。在距离域上利用经典的相关处理 (匹配滤波) 分辨重叠的目标回波存在固有的极限 (近似为信号带宽的倒数<sup>[1]</sup>); 为了提高目标的距离分辨能力只能依靠发射具更大带宽的信号, 从而对整个雷达系统提出了更高的要求。另一方面, 脉冲压缩信号具有的诸多优点<sup>[1-3]</sup> 使之成为现代雷达所普遍采用的信号形式, 因此研究脉压信号的距离超分辨技术对雷达系统性能的提高就具有十分重要的意义。

近年来, 高分辨率谱估计及阵列处理技术得到了巨大发展<sup>[2]</sup>。A. M. Bruckstein 等较早地注意到了宽带源重叠回波时延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>[3]</sup>, W. F. Gabriel 等则着重研究了在雷达距离域的超分辨问题<sup>[4-6]</sup>。然而, 已有的文献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, 但他基本上沿用了与简单信号相同的处理方式, 并未充分利用大时带积 (TB) 信号的潜在优势。而实际中, 雷达常常工作在较强的噪声环境中, 在低 SNR 下仍然可获得超分辨性能就成为这一技术能否实用的关键。本文的工作正是试图在这一点上寻求有效的解决方法。

### 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

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

<sup>1</sup> 1997-05-19 收到, 1997-10-29 定稿

式中  $K$  为可获得的回波脉冲数,  $s(t)$  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,  $\tau_k, \omega_{kd}$  分别为第  $k$  个目标回波时延和多普勒频率, 其中  $\tau_k$  对应于该目标的距离。本文假定: 适当选取回波脉冲数  $K$  和雷达重频, 使当目标径向速度不太大时, 可认为回波时延在这  $K$  回波脉冲内不变。对一般目标, 当  $K$  较小时目标回波功率的变化甚微, 而目标群内各目标一般在速度上接近, 在雷达信号多普勒容限内 (否则需作多普勒补偿), 可忽略多普勒频率引起的相位项, 因而式 (1) 可进一步表示为

$$r_l(mT_s) = \sum_{k=1}^D a_k s(mT_s - \beta_k T_s) + n_l(mT_s), \quad m = 0, 1, \dots, L-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (2)$$

其中  $\tau_k = \beta_k T_s$ ,  $T_s$  为采样间隔,  $a_{kl} = a_k e^{j\varphi_{kl}}$  为目标复振幅,  $L$  为单次回波时间采样数。将 (2) 式变换到频域:

$$R_l(n) = \sum_{k=1}^D a_{kl} S(n) e^{j\omega_k n} + N_l(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (3)$$

其中  $\omega_k = -2\pi\beta_k/N$ ,  $N$  为 FFT 点数,  $N \geq L$ 。若信号频谱  $S(n)$  无零点 (LFM/NLFM 信号正是如此), 则在信号带宽  $B$  内可得等效复谐波序列:

$$X_l(n) = \sum_{k=1}^D a_{kl} e^{j\omega_k n} + V_l(n), \quad n = 0, 1, \dots, M-1, \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (4)$$

式中  $M = NBT_s$ ,  $V_l(n) = N_l(n)/S(n)$  为等效观测噪声。不难看出, (4) 式与高分辨谱估计及阵列处理的信号模型<sup>[2]</sup>存在对应的关系, 这就为基于高分辨阵列处理算法实现距离超分辨估计提供了基本的依据。类似地, 阵列相关矩阵及样本相关矩阵具有如下形式:

$$\mathbf{R}_X = E\{\mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H\} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{R}_V, \quad (5a)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_X = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H, \quad (5b)$$

其中  $\mathbf{A}, \mathbf{P}, \mathbf{R}_V$  分别表示阵列响应矩阵, 源相关矩阵和噪声相关矩阵。

### 3 一种基于 FFT 处理的 LFM/NLFM 信号增强新算法

为了充分利用大 TB 脉压信号在时间上的能量, 针对 LFM/NLFM 信号的特点, 我们提出了一种新的信号增强算法。该算法具有计算量小, 无需噪声的统计特性, 能处理多个时延叠加信号的特点。图 1 为该算法结构框图。

#### 3.1 算法基本原理

大 TB 信号时域可压缩的特点为信噪分离提供了基本的依据。然而, 信号经脉压后能量虽集中在相对极窄的主瓣, 但旁瓣与噪声仍是不可分的; 尽管旁瓣加权可进一步降低旁瓣电平, 但直接截取主瓣仍然会造成信号的损失。为此, 可利用 LFM/NLFM 信号频谱无零点的特性, 在逆滤波后级联一在时域上有限紧支撑的脉冲形成滤波器 (图 1 中 Part A)。这样,

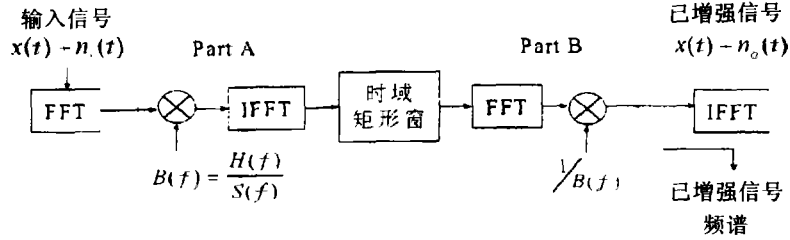


图 1 LFM/NLFM 信号增强算法结构框图

含信号成分的分量在时域截取后不会带来信号损失。为了还原原信号形式，一个相反的过程（图 1 中 Part B）还原出降噪后的已增强信号。当输入为多个时延叠加信号时，时域截取的矩形窗宽度由脉冲形成滤波器的时宽和初步估计的目标群最大相对时延决定。当存在一个以上的目标群（任意两目标群相距大于脉冲形成滤波器的时宽）时，这一降噪预处理算法还能起到有效分离不同目标群的作用，从而简化了多目标群情况下的超分辨处理。

### 3.2 脉冲形成滤波器的设计

脉冲形成滤波器  $h(n)$  的设计即为求最短长度 FIR 滤波器  $h(n)$ ，使经图 1 算法处理后的信号在信号带宽  $B$  内的噪声尽可能多地被抑制。可以看出：若复合滤波器在整个频率轴上（至少在信号带宽内）具有全通特性，则噪声将“无损失”地通过而在时域上被去除达到最大。为此，我们运用如下加权最小二乘近似较好地解决了这一问题：

$$\mathbf{h}_{\text{opt}} = \arg_{\mathbf{h}} \min \|\mathbf{W}\mathbf{F}_N\mathbf{P}\mathbf{h} - \mathbf{r}\|^2 \quad (6)$$

式中  $\mathbf{W}$  为正定加权矩阵， $\mathbf{F}_N$  为  $N$  点 DFT 矩阵， $\mathbf{P} = [\mathbf{I}_l \mathbf{0}]^T \in \mathbb{C}^{N \times l}$ ， $\mathbf{I}_l$  为  $l$  阶单位矩阵， $\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_l)^T$  为待求长为  $l$  的脉冲形成滤波器， $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_N)^T$  为目标滤波器。当  $\mathbf{W} = \text{diag}\{|S(0)|^{-1}, |S(1)|^{-1}, \dots, |S(N-1)|^{-1}\}$ ， $\mathbf{r} = (|S(0)|, |S(1)|, \dots, |S(N-1)|)^T$  时获得最佳近似，其中  $S(k)|_{k=0,1,\dots,N}$  为 LFM/NLFM 信号频谱，则

$$\mathbf{h}_{\text{opt}} = (\mathbf{P}^H \mathbf{F}_N^H \mathbf{W}^2 \mathbf{F}_N \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^H \mathbf{F}_N^H \mathbf{u} \quad (7)$$

式中  $\mathbf{u} = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。脉冲形成滤波器长度  $l$  可根据长度尽可能短及对 LFM/NLFM 信号幅度谱最优幅度逼近的折衷来确定。

## 4 J. A. Cadzow 信号增强算法在距离超分辨处理中的应用

J.A.Cadzow 的信号增强算法<sup>[7]</sup>利用阵列相关矩阵先验的特征结构，基于交替投影的原理对样本相关矩阵进行去噪处理，以获得更合理的阵列相关矩阵的估计，从而改善参数的估计性能。本节遵循该算法的思路，提出了计算量较小并适合距离超分辨应用的改进方法。

### 4.1 J. A. Cadzow 信号增强算法

在白噪声的假设下，J. A. Cadzow 的信号增强算法应用到阵列处理可用迭代运算表示为

$$\mathbf{X}_k = F_B F_{(D)}(\mathbf{X}_{k-1}), \quad k \geq 1, \quad (8)$$

其中， $\mathbf{X}_0$  为样本相关矩阵，算子  $F_{(D)}(\cdot)$ ， $F_B(\cdot)$  分别反映了以下两个阵列相关矩阵的先验性质（参见文献 [7]）：(1) 最小的特征值等于传感器噪声功率  $\sigma^2$  且有  $M - D$  个（ $M$  为阵列单元数， $D$  为阵列波达数）；(2) Hermitian-Toeplitz 线性结构。

#### 4.2 距离超分辨中的应用

考虑到 (4) 式中等效观测噪声为色噪声, 算子  $F_{(D)}(\cdot)$  可由下式实现:

$$F_{(D)}(\mathbf{X}) = \mathbf{R}_v^{1/2} \left( \sum_{k=1}^D \lambda_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H - \lambda \sum_{k=D+1}^M \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H \right) \mathbf{R}_v^{1/2}, \quad (9)$$

式中  $\lambda = \frac{1}{M-D} \sum_{k=D+1}^M \lambda_k$ ,  $\lambda_k$  为  $M \times M$  阶 Hermite 矩阵  $\mathbf{R}_v^{1/2} \mathbf{X} \mathbf{R}_v^{-1/2}$  的特征值, 且按单调非增排序,  $\mathbf{u}_k$  是相应的正交特征向量。为避免文献 [7] 建议的庞大的 Toeplitz 线性结构投影矩阵的计算, 我们提出了算子  $F_B(\cdot)$  的简单的实现方法:  $F_B(\mathbf{X})$  的每一正向对角线 (指从左上到右下方向) 元素相等且为  $\mathbf{X}$  的相应对角线元素的平均值。一个关键的但文献 [7] 忽略的问题是阵列相关矩阵的 Toeplitz 线性结构是有条件的, 这就是源相关矩阵必须为满秩的对角矩阵 (这意味着信号源是非相关的), 且阵列噪声是平稳的 (这保证了  $\mathbf{R}_v$  是 Toeplitz 的)。在接收噪声为白噪声的条件下, 可知 (4) 式中等效观测噪声是不相关却非平稳的, 这时除主对角线元素外, 其它对角线元素仍具有 Toeplitz 特性。因此, 在实现算子  $F_B(\cdot)$  时, 主对角线元素不参与计算而保持不变。另外, 我们发现交换 (8) 式中映射的次序可获得较好的性能。

#### 4.3 一种稳健的分辨增强预处理新方法

注意到在回波不相关条件下, 矩阵  $\mathbf{C} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H = \mathbf{R}_X - \sigma^2 \mathbf{R}_v$  的元素可表示为

$$c_{mn} = \sum_{k=1}^D p_k e^{j\omega_k(m-n)}, \quad (10)$$

式中  $p_k$  为源相关矩阵  $\mathbf{P}$  的对角线元素, 即第  $k$  个谐波的功率。这表明矩阵  $\mathbf{C}$  的第一列向量是一复谐波序列且各谐波分量初相均为零, 利用共轭对称性得到长度增加一倍的新谐波序列:

$$\mathbf{g} = (c_{M-1}^*, c_{M-2}^*, \dots, c_1^*, c_0^*, c_0, c_1, \dots, c_{M-2}, c_{M-1})^T \in C^{(2M-1) \times 1}, \quad (11)$$

其中  $c_l = \sum_{k=1}^D p_k e^{j\omega_k l}$ ,  $l = 0, 1, \dots, M-1$ , 增加的数据长度大大改善了高分辨估计的性能。实际中, 矩阵  $\mathbf{C}$  的估计可由下式得到

$$\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{R}_v^{1/2} \left( \sum_{k=1}^D \lambda_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H \right) \mathbf{R}_v^{1/2}, \quad (12)$$

其中  $\lambda_k, \mathbf{u}_k$  分别为矩阵  $\mathbf{R}_v^{-1/2} \hat{\mathbf{R}}_X \mathbf{R}_v^{-1/2}$  的特征值及特征向量。由 6 节知该方法对目标数过估计具有良好的稳健性, 且较 J. A. Cadzow 信号增强算法 (一次  $F_{(D)}(\cdot)$  映射) 有更好的分辨性能。

## 5 距离超分辨的实现中的有关问题

### 5.1 脉间跳频去相关技术

由上节知信号源不相关的先验信息可进一步降低超分辨的 SNR 门限, 而这可以通过对发射信号参数的设计来获得。首先将 (1) 式所示零中频回波信号进一步表示为

$$r_l(t) = \sum_{k=1}^D a_k s(t - \tau_k) \exp\{j[\omega_{dk}(t - \tau_k) + \varphi_k^0 + T_r \omega_{dk} l]\} + n_l(t), \quad l = 0, 1, \dots, K-1, \quad (13)$$

其中  $\varphi_k^0$  与  $T_r \omega_{dk} l$  分别为重复周期内目标回波初相及多普勒频率导致的不同重复周期间起伏的相位项。由上式知不同的目标速度将对回波解相干起重要作用, 但目标群内的各目标往往具有接近的速度, 而且仅靠目标的速度差异难以提供不同目标回波信号完全的非相关性。为此可引入脉间跳频来解决这一问题, 它是靠主动产生大频偏来获得类似多普勒频率引起的脉内相位项的。这时 (13) 式中增加了一新的相位项  $\Delta\omega\tau_k$ , 其中  $\Delta\omega$  为脉间频率跳变量。在极端的情况下, 各目标具有相等的速度, 将时间变量离散化, 源相关系数可表示为

$$p_{mn} = a_m a_n E\{\exp[j(2\pi\Delta f T_s(\beta_m - \beta_n) + \varphi_m^0 - \varphi_n^0)]\}. \quad (14)$$

若相位项  $2\pi\Delta f T_s(\beta_m - \beta_n)$  在  $[-\pi, +\pi]$  上均匀分布, 则满足非相关条件  $p_{mn} = 0 (m \neq n)$ 。因此可令脉间载波频率跳变量  $\Delta f$  在  $[-f_s/2, +f_s/2]$  上 (或更宽的范围) 均匀随机变化, 从而有效地去除不同目标回波的相关性。

### 5.2 目标数目的判定

由于经第 3 节提出的基于 FFT 处理的信号增强算法预处理及良好的源非相关性, 实际上即使在较低的 SNR 下我们也能简单地通过观察相关矩阵特征值的相对幅度来获得目标数目的信息; 在更低的 SNR 情况下, 利用 4.3 节提出的分辨增强算法作预处理 (这时可用简单的过估计的目标数作低秩去噪处理), 由新形成的相关矩阵可进一步较好地估计目标数目。另外, 还可增加一些附加的计算辅以一定的信息论准则来判定目标的数目<sup>[8]</sup>, 而一些对信号源数目判定具有较好稳健性且无需特征分解的 MUSIC 类算法也是值得推荐的<sup>[9]</sup>。因此本文假定目标数已知。

### 5.3 降维处理

当 LFM/NLFM 信号 TB 较大时, FFT 点数  $N$  及等效复谐波序列长度  $M$  往往相当大, 直接应用高分辨算法计算量过大。但是, 目标群内回波时延往往集中在某一较小的区间, 存在很高的采样冗余。这时, 可将采样率降低为  $1/m$  倍, 在一次回波脉冲中获得  $m$  组相同采样间隔的序列, 分别计算相关矩阵再平均, 从而在不降低分辨性能的前提下, 起到了降维的作用。

$$\hat{R}_{XX} = \frac{1}{m} \sum_{s=0}^{m-1} \left( \frac{1}{K} \sum_{l=0}^{K-1} \mathbf{X}_{sl} \mathbf{X}_{sl}^H \right), \quad (15)$$

式中  $\mathbf{X}_{sl} = (X_j(s), X_j(s+m), \dots, X_j(s+(M'-1)m))^T$ ,  $M' = M/m$  为降维后数据长度。

## 6 计算机模拟及结论

本节对本文所拟方法进行随机模拟试验, 以具代表性的 MUSIC 算法给出典型的模拟结果。实验中 NLFM 信号由 Hamming 窗设计得到<sup>[10]</sup>, LFM/NLFM 信号  $TB=128$ ,  $B=10\text{MHz}$  (故雷达距离单元  $R_{\text{bin}} = 1/B$ ), 脉冲重复周期  $T_r = 0.1\text{ms}$ , 回波数  $K=50$ , 载波脉间跳频范围为  $\pm 2B$ 。采样率  $f_s = 4B$ , FFT 点数  $N=1024$ , 降维后的复谐波序列长度  $M'=32$ 。脉冲形成滤波器长度  $l=8$ , 设定目标群内目标最大相对时延  $\tau_{\text{max}} = 6R_{\text{bin}}$ 。噪声为方差归一化零均值复高斯白噪声, 幅度为  $A_X$  的某目标回波信号信噪比定义为  $\text{SNR} = A_X^2 / \sigma^2$ 。

图 2 给出了 LFM/NLFM 信号多次随机试验得到的典型 SNR(单位为 dB) 下相距  $0.75 R_{\text{bin}}$  的三个零多普勒目标超分辨处理的 MUSIC 谱。三个目标的真实位置均标识于各子图中。图中分辨输出曲线由上而下分别对应: ①回波增强 +MUSIC; ②回波增强 + $F_B(\cdot)$  映射 +MUSIC; ③回波增强 + $F_B(\cdot)$  映射 + $F_{(D)}(\cdot)$  映射 +MUSIC, 映射中目标数分别用真实值  $D=3$  和过估计值  $D=8$ ; ④回波增强 + $F_B(\cdot)$  映射 +4.3 节方法 +MUSIC, 分别对应  $D=3$  和  $D=8$ 。由图 2 可以看出, 对 LFM 信号, 方法④较③略好, 对目标数的过估计均表现一定的稳健性。对 NLFM 信号, 方法④明显优于③: 在低 SNR 下, 方法③即使用真实的目标数也难以得到正确的分辨结果, 而方法④则能给出较好的结果; 当 SNR 较高时, 方法③对目标数的过估计很敏感, 而方法④则表现出对目标数的过估计良好的稳健性。

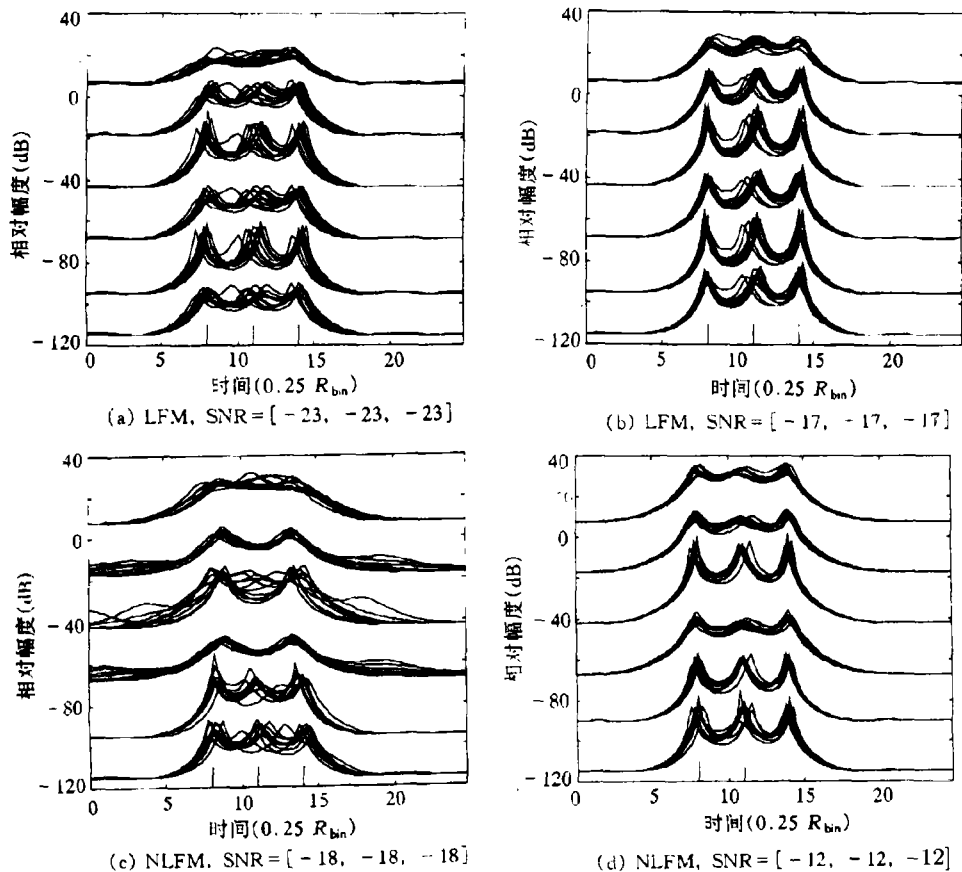


图 2 LFM/NLFM 信号各种距离超分辨处理方法比较

表 1 列出了运用方法④及无任何预处理直接频域处理两类信号距离超分辨的分辨概率。正确分辨定义为对一定 SNR 下两个相距  $0.5 R_{\text{bin}}$  的等功率零多普勒目标回波作 MUSIC 超分辨处理, 以  $0.25 R_{\text{bin}}$  间隔在目标群所在的距离段离散搜索, 输出峰点正确位于两目标回波真实时延处, 且两峰点间谷点幅度比两峰点幅度最小值小 3dB。所有情况均作 100 次 Monte-Carlo 运行。可以看到本文方法较直接频域处理 SNR 门限改善了大约 12-14dB, LFM 信号比 NLFM 信号 SNR 门限约低 4-5dB。LFM 信号的分辨能力优于 NLFM 信号是由于其频

谱接近矩形而携带了最大的时延信息, 相反, NLFM 信号通带内两侧频谱的较大衰落实际上使时延信息受到一定的抑制。另外, 我们还对不同的时带积的 LFM 及 NLFM 信号作了测试, 发现 TB 每增加一倍, 两类方法的 SNR 门限均有 3dB 改善。

表 1 LFM/NLFM 信号距离超分辨处理分辨概率

直接处理				本文方法			
LFM		NLFM		LFM		NLFM	
SNR(dB)	分辨概率	SNR(dB)	分辨概率	SNR(dB)	分辨概率	SNR(dB)	分辨概率
-8	0.09	-4	0.11	-25	0.16	-20	0.18
-7.5	0.12	-3.5	0.20	-24	0.34	-19	0.23
-7	0.32	-3	0.34	-23	0.38	-18	0.29
-6.5	0.49	-2.5	0.56	-22	0.45	-17	0.31
-6	0.59	-2	0.76	-21	0.68	-16	0.43
-5.5	0.90	-1.5	0.89	-20	0.72	-15	0.64
-5	0.92	-1	0.96	-19	0.79	-14	0.81
-4.5	0.98	-0.5	0.99	-18	0.94	-13	0.91

表 2 给出了 LFM/NLFM 信号距离超分辨处理的多普勒性能。分辨概率测试中, 两个相距  $0.5R_{\text{bin}}$  的等功率目标多普勒频率  $f_d$  符号相反, LFM 及 NLFM 信号 SNR 分别取  $-18\text{dB}$  及  $-13\text{dB}$ , 所有情况均作 100 次 Monte-Carlo 运行。可以看到 LFM 信号较 NLFM 信号的多普勒性能好。实验中我们还发现超分辨处理与常规匹配滤波时延分辨一样, 多普勒容限取决于雷达波形及时宽。

表 2 LFM/NLFM 信号距离超分辨多普勒性能

$ f_d $ (kHz)	LFM	NLFM
0	0.94	0.91
2	0.92	0.98
4	0.92	0.86
6	0.74	0.61
8	0.53	0.22
10	0.31	0
12	0.1	0

计算机模拟表明, 本文方法大大地扩展了雷达距离超分辨的 SNR 门限, 并具有较宽的多普勒容限, 而脉间跳频的引入既为超分辨处理提供了附加的先验信息, 又有利于提高雷达系统的低截获性能及生存能力。因此, 较好地解决了低 SNR 下多目标距离超分辨问题。

## 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] Bruckstein A M, *et al.* The resolution of overlapping echoes. IEEE Trans. on ASSP, 1985, ASSP-33(6): 1357-1367.
- [4] Gabriel W F. Superresolution techniques and ISAR imaging. IEEE National Radar Conf., Dallas, Texas: 1989, 48-55.
- [5] Gabriel W F. Superresolution techniques in range domain. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Virginia: 1990, 263-267.
- [6] Abatzoglou T J. Superresolution signal processing and its application. Proc. of SPIE, 1995, Vol.2562, 88-98.
- [7] Cadzow J A. Signal enhancement—A composite property mapping algorithm. IEEE Trans. on ASSP, 1988, ASSP-36(1): 49-62.

- [8] Vax M, Kailath T. Determining the number of signals by information theoretic criteria. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, ASSP-33(2): 387-392.
- [9] Karhunen J T, Joutsensalo J. Sinusoidal frequency estimation by signal subspace approximation. *IEEE Trans. on SP*, 1992, SP-40(12): 2961-2972.
- [10] Johnson J A, Fairhead A C. Waveform design and Doppler sensitivity analysis for nonlinear FM chirp pulses. *IEE Proc-F*, 1986, 133(2): 163-175.

## RANGE SUPER-RESOLUTION AT LOW SNR VIA INTERPULSE FREQUENCY HOPPING AND SIGNAL ENHANCEMENT

Liu Sheng     Xiang Jingcheng

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

**Abstract** For linear and non-linear frequency modulation (LFM/NLFM) signals with large time-bandwidth product (TB), radar super-resolution in range domain at low SNR is investigated. A novel signal enhancement algorithm based on FFT for LFM/NLFM signals used for preprocessing, which significantly raises the effective signal-to-noise ratio (SNR), is presented. By use of decorrelation between echoes of different targets achieved by pulse-to-pulse carrier frequency hopping, a variety of approaches are suggested to further lower the SNR threshold for range super-resolution. Monte-Carlo simulation results are presented to illustrate the improved performance.

**Key words** Range super-resolution, Signal enhancement, Interpulse frequency hopping, Linear/Nonlinear frequency modulation (LFM/NLFM)

刘 晟: 男, 1971 年生, 博士生, 主要研究方向涉及实时信号处理, 高分辨参数估计, 雷达波形设计, 信号的恢复及重建等领域.

向敬成: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 当前的研究方向包括高速实时信号处理, 波形设计及优化, 毫米波雷达技术等.