

## 基于雷达脉冲重复间隔设计的 Radon-Fourier 变换盲速旁瓣抑制

钱李昌<sup>\*①</sup> 许稼<sup>②</sup> 孙文峰<sup>①</sup> 彭应宁<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国人民解放军空军预警学院 武汉 430010)

<sup>②</sup>(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要:** 盲速旁瓣可能增加长时间相干积累方法 Radon-Fourier 变换(RFT)的虚警概率并影响检测性能。为此,该文提出一种基于脉冲重复间隔(PRI)设计的盲速旁瓣抑制方法。利用不同 PRI 盲速旁瓣位置及速度分辨率的关系,给出了 PRI 具体设计方法。然后,联合处理两个相邻相参处理间隔(CPI)的 RFT 输出结果,在不降低 RFT 积累性能的情况下实现盲速旁瓣(BSSL)的抑制。最后,数值实验结果验证了该文所提方法的有效性。

**关键词:** 目标检测; Radon-Fourier 变换; 长时间相参积累; 盲速旁瓣抑制; 脉冲重复间隔设计

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2608-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00724

## Blind Speed Side Lobe Suppression in Radon-Fourier Transform Based on Radar Pulse Recurrence Interval Design

Qian Li-chang<sup>①</sup> Xu Jia<sup>②</sup> Sun Wen-feng<sup>①</sup> Peng Ying-ning<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430010, China)

<sup>②</sup>(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The Blind Speed Side Lobes (BSSL) may increase the false alarm probability and deteriorate the detection performance of the long time coherent integration method, namely, the Radon-Fourier Transform (RFT). A novel BSSL suppression method based on the design of radar Pulse Recurrence Interval (PRI) is proposed. First, detailed PRI design method is given based on the BSSL locations and velocity resolutions. Then, by jointly processing the RFT outputs of two adjacent Coherent Processing Intervals (CPIs), the BSSL suppression can be realized without deteriorating the integration performance of the RFT. Finally, detailed numerical experiments are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Target detection; Radon-Fourier Transform (RFT); Long-time coherent integration; Blind Speed Side Lobes (BSSL) suppression; Pulse Recurrence Interval (PRI) design

### 1 引言

对于脉冲体制雷达, 脉间积累能够有效提高信噪比(SNR), 从而提高雷达微弱目标的探测性能。脉间积累主要分为相参积累和非相参积累。对于非相参积累方法, 例如 Carlson<sup>[1-3]</sup>提出的 Hough 变换, 由于没有补偿脉间相位起伏, 因此无法得到最优积累性能。同时非相参积累存在最小 SNR 阈值问题<sup>[1]</sup>, 在微弱目标检测中, 目标能量无法有效积累。在相参积累方法中, 对于常规的动目标检测(MTD)<sup>[4]</sup>, 脉间相参积累的必须满足目标在相参处理时间(CPI)内没有跨距离单元走动(ARU)。因此,

对于高速运动目标, MTD 的积累性能有限。为了实现跨距离单元相参积累, 文献[5,6]提出了通过频域解耦及插值实现距离走动补偿的 Keystone 变换方法, 但该方法难以解决存在多普勒模糊目标的 ARU 问题。

最近, 文献[7-9]提出了一种长时间相参积累方法, 即 Radon-Fourier 变换(RFT)。该方法通过联合搜索参数空间中目标参数的方式解决了距离走动与相位调制耦合的问题。RFT 本质上是一种广义多普勒滤波器组<sup>[8]</sup>, 其最优检测性能在文献[8]得到了证明。但在实际应用中, 脉冲采样以及有限的距离分辨率会导致严重的盲速旁瓣(Blind Speed Side Lobe, BSSL)问题, 从而产生大量虚警。为了抑制 BSSL, 文献[8]提出了一种在 RFT 积累平面对称加窗的方法。但是, 对称加窗法仍存在 BSSL 抑制剩余, 会导致较多的虚警。

本文提出了一种基于脉冲重复间隔(Pulse

2012-06-11 收到, 2012-09-03 改回

国家自然科学基金(60971087, 61271391), 北京自然科学基金(4122038), 国家部委基金(9140A07021012JW0101), 航天创新基金(CASC201104), 航天支撑基金和清华 TNLlist 交叉基金资助课题

\*通信作者: 钱李昌 qlc009@sina.com

Recurrence Interval, PRI)设计的 BSSL 抑制方法。该方法首先推导了 BSSL 分辨率与盲速的关系, 根据不同 CPI 的 BSSL 位置及分辨率关系, 给出了 PRI 的设计方法, 确保 BSSL 在不同 CPI 的 RFT 输出中位置不交叠。然后, 通过对两个 CPI 的 RFT 结果进行取小操作, 实现 BSSL 的有效抑制。最后, 数值实验验证了本文方法的有效性。

## 2 信号模型及问题描述

在脉冲体制雷达中, 忽略目标在不同脉冲间的起伏, 即假设目标为 Swerling 0 型<sup>[4]</sup>, 则匹配滤波器在“快-慢时间”域的 2 维输出可以表示为<sup>[7]</sup>

$$s_{\text{MF}}(t_s, \tau) = A_0 \text{sinc}\left(\pi B\left(\tau - 2r(t_s)/c\right)\right) \cdot \exp\left(-j4\pi r(t_s)/\lambda\right) \quad (1)$$

式中  $A_0$  为匹配滤波器输出的峰值幅度,  $T_r$  为脉冲重复间隔,  $B$  为带宽,  $c$  为光速,  $\lambda$  为波长,  $\tau=2r(t_s)/c$  为快时间, 设目标以径向速度  $v_0$  匀速运动, 起始斜距为  $r_0$ , 则目标瞬时斜距  $r(t_s) = r_0 + v_0 t_s$ ,  $t_s = nT_r$  为慢时间, 即脉冲维采样时间,  $n = 0, 1, \dots, N_s - 1$ ,  $N_s$  为 CPI 内脉冲个数。

由式(1)知, 当目标在  $\Delta t_s$  时间内移动距离  $\Delta r > \rho_r$  时, 即产生 ARU 问题, 其中  $\Delta r = v_0 \Delta t_s$ ,  $\rho_r = c/(2B)$  为距离分辨率。为了解决 ARU 问题, 进而实现脉冲相参积累, 文献[7-9]提出了在参数空间联合搜索的 RFT 算法。RFT 算法可以描述为<sup>[7]</sup>: 假设  $f(t_s, \tau) \in \mathcal{C}$  是定义在  $(t_s, \tau)$  平面的 2 维复函数,  $\tau = \phi(\alpha_1, \alpha_2) + \varphi(\alpha_1, \alpha_2)t_s$  表示  $(t_s, \tau)$  平面的任意一条直线, 参数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  用于确定直线的斜距  $\phi(\cdot)$  和斜率  $\varphi(\cdot)$ , 则连续 RFT 定义为

$$G(\alpha_1, \alpha_2) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t_s, \phi(\alpha_1, \alpha_2) + \varphi(\alpha_1, \alpha_2)t_s) \cdot \exp(j2\pi\varepsilon\varphi(\alpha_1, \alpha_2)t_s) dt_s \quad (2)$$

式(2)中  $\varepsilon$  是由  $f(t_s, \tau)$  确定的一个常数。

令  $f(t_s, \tau) = s_{\text{MF}}(t_s, \tau)$ ,  $\alpha_1 = r$ ,  $\alpha_2 = v$ ,  $r$  和  $v$  分别表示搜索空间中的距离和速度,  $\phi(\alpha_1, \alpha_2) = \tau = 2r/c$ ,  $\varphi(\alpha_1, \alpha_2) = 2v/c$ , 式(2)变为

$$\begin{aligned} G(r, v) &= \sum_{n=0}^{N_s-1} s_{\text{MF}}\left(m, 2(r + vnT_r)/c\right) \exp(j4\pi vnT_r/\lambda) \\ &= A_0 \exp(-j4\pi r_0/\lambda) \\ &\quad \cdot \sum_{n=1}^{N_s} \text{sinc}\left(2\pi B\left[(r - r_0) + nT_r(v - v_0)\right]/c\right) \\ &\quad \cdot \exp(j4\pi(v - v_0)nT_r/\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)得到 RFT 在目标处的输出结果为

$$G(r_0, v_0) = A_0 N_s \quad (4)$$

由式(4)可知, 通过联合搜索  $(r, v)$  空间, RFT 在目标  $(r_0, v_0)$  处可以得到理想的相参积累增益。事实上, 式(3)中的相位起伏不仅在  $v(p) = v_0$  处可以被补偿掉, 而且当速度满足

$$v(p) = v_0 + pv_b \quad (5)$$

时, 式(3)中的相位起伏都可被补偿掉, 式中  $p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  为盲速模糊度,  $v_b$  为盲速, 即

$$v_b = \lambda/2T_r \quad (6)$$

将式(5)代入式(3)得到

$$G(r, v(p)) = A_0 \sum_{n=1}^{N_s} \text{sinc}\left(2\pi B\left[(r - r_0) + nT_r pv_b\right]/c\right) \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 当  $p = 0$ ,  $r = r_0$  时, 式(7)变为式(4)中目标处 RFT 输出。当  $p \neq 0$  时, sinc 函数峰值位置随着  $n$  变化, 即  $r = r_0 + nT_r pv_b$ , 因此对于一个确定的  $r$  值, 式(7)无法得到式(4)的理想积累结果。尽管如此, 式(7)仍然会产生较大的积累峰值, 即 BSSL 峰值。BSSL 峰值超过检测门限时即造成虚警, 因此必须对其进行抑制。

## 3 盲速旁瓣抑制

由式(6)可知, 改变不同 CPI 的 PRI 可以改变盲速, 进而改变 BSSL 位置, 利用不同 CPI 中 BSSL 不同的位置信息可实现 BSSL 的抑制。但是, BSSL 具有一定的速度分辨率, 如果不同 CPI 的 BSSL 位置变化没有超过速度分辨单元, 同样无法区分 BSSL。因此, 本节首先分析 BSSL 速度分辨率, 然后根据分辨率设计 PRI, 最后利用 BSSL 位置关系实现 BSSL 抑制。

### 3.1 BSSL 速度分辨率

将式(3)中 sinc 函数用矩形窗函数  $\text{rect}(\cdot)$  近似, 得到

$$\begin{aligned} G(r, v) &\approx A_0 \exp(-j4\pi r_0/\lambda) \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{N_s-1} \text{rect}\left(\frac{r - (r_0 + v_0 nT_r/2)}{\rho_r}\right) \\ &\quad \cdot \exp(j4\pi(v - v_0)nT_r/\lambda) \\ &= A_0 \exp(-j4\pi r_0/\lambda) \\ &\quad \cdot \sum_{n=N_1(r, v)}^{N_2(r, v)} \exp(j4\pi(v - v_0)nT_r/\lambda) \\ &= A_0 \frac{\sin\left(2\pi(N_2(r, v) - N_1(r, v) + 1)(v - v_0)T_r/\lambda\right)}{\sin\left(2\pi(v - v_0)T_r/\lambda\right)} \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi[(N_2(r, v) + N_1(r, v))(v - v_0)T_r - 2r_0]/\lambda) \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $N_1(r, v)$  和  $N_2(r, v)$  分别表示 RFT 中点  $(r, v)$  可积累脉冲的起始与结束位置, 且有  $0 \leq N_1(r, v) \leq N_2(r, v) \leq N_s - 1$ 。由式(8)可知 RFT 的速度分辨率为

$$\rho_v(r, v) = \frac{\lambda}{2N(r, v)T_r} \quad (9)$$

式(9)中  $N(r, v) = N_2(r, v) - N_1(r, v) + 1$  为 RFT 中点  $(r, v)$  实际积累脉冲个数。由式(9)可知, 速度分辨率是距离与速度的函数, 因此, 不同盲速的 BSSL 可能具有不同的速度分辨。为了得到 BSSL 速度分辨率的具体表达式, 下面将详细讨论 RFT 中  $N(r, v(p))$  的解析式。

RFT 的积累路径如图 1 所示。图 1 中阴影部分为式(9)中矩形窗函数为 1 的区域, 即目标支撑区。RFT 参数空间中任意一点  $(r, v)$  对应一条积累路径, 横轴截距为  $r$ , 斜率为  $1/v$ 。显然, 点  $(r, v)$  在 RFT 中的实际积累脉冲个数  $N(r, v)$  对应于该路径在目标支撑区内的长度。将积累路径平移至过目标支撑区旋转对称中心  $O_T$  的位置, 这时, 对于给定速度(或斜率), 积累路径位于目标支撑区的长度最长, 因而对应于 RFT 中速度切片的峰值。根据积累路径穿过目标支撑区的最大长度, 积累路径可以分为以下两种情况:

**情况 1** 积累路径全部位于目标支撑区内, 如图 1 中积累路径 1, 因此  $N(r, v) = N_s$ 。由式(9)得 BSSL 的速度分辨率为

$$\rho_v(r, v(p)) = \frac{\lambda}{2N_s T_r} \quad (10)$$

由图 2 可知, 满足情况 1 的速度最小值为  $v_{0\min} = \rho_r/T - v_0$ , 最大值为  $v_{0\max} = \rho_r/T + v_0$ ,  $T = N_s T_r$  为一个 CPI 间隔。因此情况 1 中速度范围为

$$v_0 - \rho_r/T \leq v \leq v_0 + \rho_r/T \quad (11)$$

将式(6)代入式(11), 得到盲速模糊度范围

$$-\frac{\rho_r}{T v_b} \leq p \leq \frac{\rho_r}{T v_b} \quad (12)$$

**情况 2** 积累路径部分位于目标支撑区内, 如

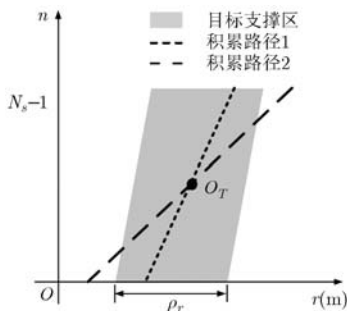


图 1 RFT 积累路径示意图

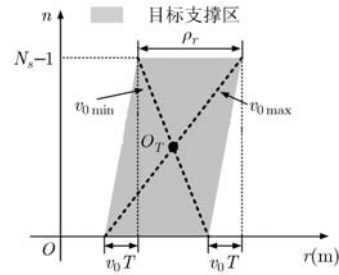


图 2 情况 1 积累路径示意图

图 1 中的积累路径 2, 因此  $N(r, v) < N_s$ 。由式(11)得到满足情况 2 的速度范围为

$$v_{\min} \leq v < v_0 - \rho_r/T \text{ 或 } \rho_r/T + v_0 < v \leq v_{\max} \quad (13)$$

式(13)中  $v_{\min}$  和  $v_{\max}$  分别为 RFT 中速度搜索范围最小及最大值。将式(6)代入式(13), 得到盲速模糊度范围

$$\frac{v_{\min} - v_0}{v_b} \leq p < -\frac{\rho_r}{T v_b} \text{ 或 } \frac{\rho_r}{T v_b} < p \leq \frac{v_{\max} - v_0}{v_b} \quad (14)$$

通过平移路径 2 至图 3 所示位置求解  $N(r, v)$ 。图 3 中  $R$  为目标在积累时间  $N(r, v)T_r$  内移动的距离, 即  $R = N(r, v)T_r v_0$ 。从而

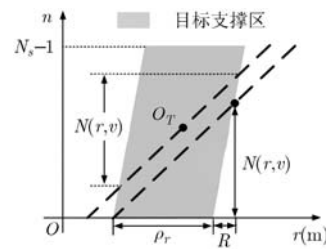


图 3 情况 2 积累路径示意图

$$|N(r, v)T_r v - R| = \rho_r \quad (15)$$

将式(6)代入式(15)解得

$$N(r, v(p)) = \frac{\rho_r}{|p|T_r v_b} \quad (16)$$

将式(16)代入式(9), 情况 2 中 BSSL 的速度分辨率为

$$\rho_v(r, v(p)) = \rho_v(p, T_r) = \frac{\lambda|p|v_b}{2\rho_r} = \frac{\lambda^2|p|}{4\rho_r T_r} \quad (17)$$

由式(17)可知, 情况 2 中, BSSL 速度分辨率与  $|p|$  成正比, 与  $T_r$  成反比。

比较式(14)与式(12), 情况 1 可以视为 RFT 主瓣(即  $p=0$ )近区 BSSL, 情况 2 可以视为远区 BSSL。由于式(16)中  $N(r, v(p)) < N_s$ , 因此, 情况 2 中 BSSL 分辨率大于情况 1 中 BSSL 分辨率。注意, 式(10)和式(17)中的  $r$  对应于 BSSL 峰值距离。

### 3.2 基于 PRI 设计的 BSSL 抑制

令  $G_1(r, v)$  和  $G_2(r, v)$  分别为相邻两个 CPI 的 RFT 输出。如果在  $G_1(r, v)$  和  $G_2(r, v)$  中, 目标主瓣位置相同, 而 BSSL 在分辨单元内没有重叠, 则可通过对  $G_1(r, v)$  和  $G_2(r, v)$  求小操作实现 BSSL 抑制, 即

$$|G(r, v)| = \min(|G_1(r, v)|, |G_2(r, v)|) \quad (18)$$

因此, BSSL 抑制问题可以转化为: (1) 补偿目标在一个 CPI 内移动; (2) 合理设计 PRI, 使  $G_1(r, v)$  和  $G_2(r, v)$  中 BSSL 在分辨单元内不重叠。为了解决第 (1) 个问题, 将式(18)改写为

$$|G(r, v)| = \min(|G_1(r, v)|, |G_2(r - \Delta r, v)|) \quad (19)$$

式(19)中  $\Delta r = Tv$  为目标在一个 CPI 内的移动距离。通过距离移动补偿, 目标在相邻 CPI 内斜距相同; 同时由于目标径向速度不变及基于目标 RCS 在相邻 CPI 间无起伏的假设, RFT 中目标主瓣峰值及位置相同。因此, 式(19)中取小操作不会使目标主瓣峰值减小。

为了解决第(2)个问题, 需要对两个 CPI 内的 PRI(设为  $T_{r1}$  与  $T_{r2}$ ) 的关系进行约束。下面推导给定  $T_{r1}$  约束  $T_{r2}$  的具体公式。

由式(6),  $T_{r1}$  与  $T_{r2}$  相应的盲速分别为  $v_{b1} = \lambda/2T_{r1}$  和  $v_{b2} = \lambda/2T_{r2}$ , 假设  $T_{r1} < T_{r2}$ , 则  $v_{b1} > v_{b2}$ 。由式(5)知 BSSL 在速度维的分布关于  $p = 0$  对称, 因此这里只需要讨论  $p > 0$  的情况,  $p < 0$  的结论相同。图 4 为 BSSL 在速度维的分布示意图, 图 4 中矩形宽度表示速度分辨率。根据 3.1 节分析, 远区 BSSL 速度分辨率随  $|p|$  线性增大。

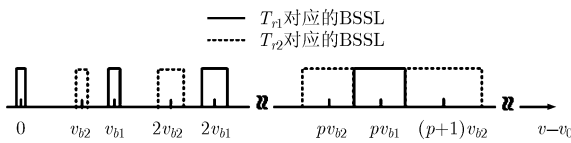


图 4 BSSL 位置关系

由图 4 可知,  $T_{r2}$  与  $T_{r1}$  分别对应的 BSSL 在速度分辨单元没有重叠的条件为

$$\left. \begin{aligned} (p+1)v_{b2} - pv_{b1} &> \frac{\rho_v(p, T_{r1}) + \rho_v(p+1, T_{r2})}{2} \\ pv_{b1} - pv_{b2} &> \frac{\rho_v(p, T_{r1}) + \rho_v(p, T_{r2})}{2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由 3.1 节知, 情况 1 中的 BSSL 分辨率不变且比情况 2 中的 BSSL 分辨率小, 因此, 当情况 2 满足式(20)时, 情况 1 一定也满足。因此这里只需讨论情况 2 时式(20)的解。

将式(17)代入式(20)得

$$\frac{4\rho_r + \lambda}{4\rho_r - \lambda} T_{r1} < T_{r2} < \frac{(4\rho_r - \lambda)(p+1)}{(4\rho_r + \lambda)p} T_{r1} \quad (21)$$

对于给定所需最大不模糊速度  $v_{NA}$ , 得到最大盲速模糊度  $p_{max}$  为

$$p_{max} = \left\lceil \frac{v_{NA}}{v_{b1}} \right\rceil \quad (22)$$

式(22)中  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整操作。利用式(22)进一步约束式(21)中  $T_{r2}$  的范围, 得到

$$\frac{4\rho_r + \lambda}{4\rho_r - \lambda} T_{r1} < T_{r2} < \left(1 + \frac{1}{p_{max}}\right) \frac{4\rho_r - \lambda}{4\rho_r + \lambda} T_{r1} \quad (23)$$

式(23)等价于

$$T_{r2} = \frac{4\rho_r + \lambda}{4\rho_r - \lambda} T_{r1} + \alpha \left[ \left(1 + \frac{1}{p_{max}}\right) \frac{4\rho_r - \lambda}{4\rho_r + \lambda} - \frac{4\rho_r + \lambda}{4\rho_r - \lambda} \right] T_{r1} \quad (24)$$

式(24)中  $\alpha \in (0, 1)$  为 PRI 调整因子。

式(24)即为在给定  $T_{r1}$  情况下设计  $T_{r2}$  的公式。在相邻两个 CPI 内发射 PRI 分别为  $T_{r1}$  和  $T_{r2}$  的信号, 即可保证相邻 CPI 的两个 RFT 输出中 BSSL 分布在不同分辨单元内, 即通过式(19)的取小操作可实现 BSSL 抑制。

为了评价 BSSL 抑制效果, 定义 BSSL 积分抑制比  $I$  为

$$I = \frac{S_0 / (S - S_0)}{S_{10} / (S_1 - S_{10})} \quad (25)$$

式(25)中,  $S_1 = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{v \in \mathcal{V}} |G_1(r, v)|^2$  和  $S = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{v \in \mathcal{V}} |G(r, v)|^2$  分别为 BSSL 抑制前后 RFT 输出能量总和,  $S_{10} = \sum_{r=v_0-\rho_r/2}^{v_0+\rho_r/2} \sum_{v=v_0-\rho_{v0}/2}^{v_0+\rho_{v0}/2} |G_1(r, v)|^2$  和  $S_0 = \sum_{r=v_0-\rho_r/2}^{v_0+\rho_r/2} \sum_{v=v_0-\rho_{v0}/2}^{v_0+\rho_{v0}/2} |G(r, v)|^2$  分别为 BSSL 抑制前后目标主瓣能量,  $r$  和  $v$  分别表示 RFT 速度和距离搜索范围,  $\rho_{v0} = \lambda/2N_s T_{r1}$  为主瓣分辨率。显然, 积分抑制比越大, BSSL 抑制效果越好。

## 4 实验结果及分析

雷达参数设置如下: 载频  $f_c = 2.5$  GHz, 系统带宽  $B = 80$  MHz, 则距离分辨率为  $\rho_r = 1.875$  m, 脉冲宽度  $T_p = 1$   $\mu$ s, 采样频率  $f_s = 320$  MHz, 每个 CPI 内积累脉冲个数  $N_s = 50$ , 设定脉冲 PRI 为  $T_{r1} = 0.5$  ms, 则盲速  $v_{b1} = 120$  m/s。雷达距离波门中心为 100 km。令式(22)中最大不模糊速度  $v_{NA} = 200$  m/s, 则  $p_{max} = 2$ 。

### 4.1 单目标 BSSL 抑制

场景中设置目标  $T_1 = [0 \text{ m}, 10 \text{ m/s}]$ , 令式(24)中  $\alpha = 0.5$ , 则  $T_{r2} = 0.621$  ms,  $v_{b2} = 96.57$  m/s。由式(3)得到相邻 CPI 的 RFT 结果如图 5 所示。图 5(b)

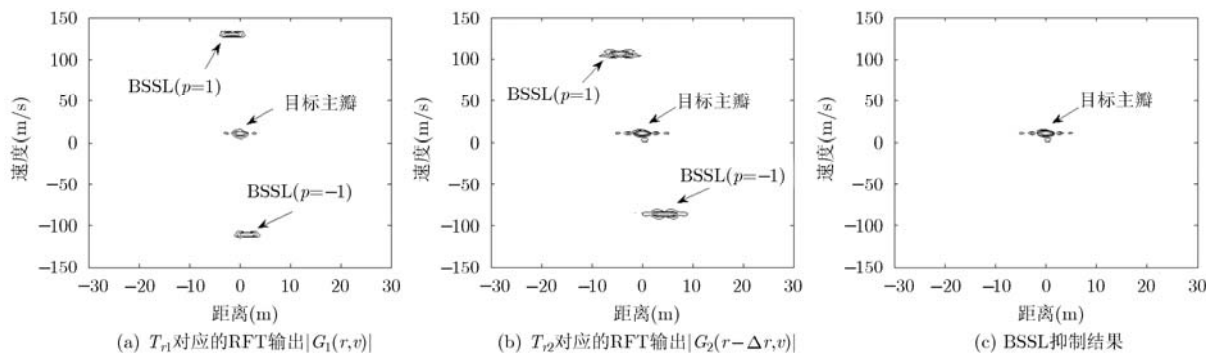


图5 RFT输出及BSSL抑制结果

中 BSSL 距离偏移是由式(20)中目标距离补偿所致, 偏移量为  $\Delta r = T(v_0 + pv_{b2})$ 。因此, BSSL 在第 2 个 CPI 的 RFT 结果中存在一个以目标为中心的线性距离偏移, 偏移斜率为积累时间  $T$ 。显然, BSSL 在图 5(a) 和 图 5(b) 中 BSSL 位置不同, 且在分辨单元内没有重叠。因此, 通过取小操作, 得到 BSSL 抑制结果如图 5(c) 所示。

不同调整因子  $\alpha$  得到的 BSSL 抑制性能不同。当  $\alpha$  取边界值即 0 或 1 时, 对应于图 4 中  $(p+1)v_{b2}$  或  $pv_{b2}$  与  $pv_{b1}$  处 BSSL 分辨单元刚好相接的情况。这种情况下, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 两种 BSSL 分辨单元外副瓣会部分重叠, 无法通过取小操作进行抑制, 从而影响了 BSSL 抑制效果。图 7 为不同  $\alpha$  的 BSSL 积分抑制比计算结果。当  $\alpha \approx 0.5$  时, BSSL 抑制效果最好。事实上, 当  $\alpha = 0.5$  时, 如图 8 所示, 两种 BSSL 在速度维上基本等间隔分布, 因此副瓣重叠区最小, BSSL 抑制剩余最少, 积分抑制比最高。

#### 4.2 噪声背景下多目标 BSSL 抑制

下面进一步验证本文方法在 Gaussian 白噪声背景下多目标 BSSL 抑制的有效性。

设雷达场景中有 5 个目标, 运动参数分为  $T_1 = [0 \text{ m}, 10 \text{ m/s}]$ ,  $T_2 = [20 \text{ m}, -40 \text{ m/s}]$ ,  $T_3 = [-20 \text{ m},$

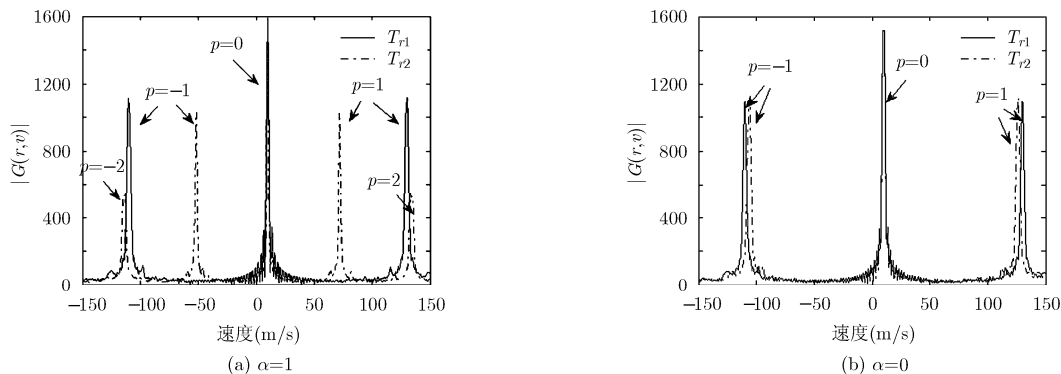
$-40 \text{ m/s}]$ ,  $T_4 = [20 \text{ m}, 50 \text{ m/s}]$ ,  $T_5 = [-20 \text{ m}, 50 \text{ m/s}]$ 。原始数据信噪比均设为  $-20 \text{ dB}$ 。在同等的总处理时间(即两个 CPI)内, 对称加窗法及本文方法 BSSL 抑制结果分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示。显然, 对称加窗法有较多抑制剩余, 而本文方法 BSSL 剩余很少, 5 个目标清晰可见, 从而验证了本文方法的有效性。

#### 4.3 BSSL 抑制性能

令  $\alpha = 0.5$ , 图 10(a) 给出了不同积累脉冲数对应的 BSSL 积分抑制比结果。设两种方法处理的脉冲总数相同, 且均为  $N_p = 2N_s$ , 即两个 CPI 内脉冲总和。由图 10 知, 对称加窗法和本文方法的 BSSL 积分抑制比均随脉冲数增加而近似线性提高, 但本文方法积分抑制比显著高于对称加窗法, 且提高速度更快。

设高斯白噪声背景, 噪声虚警概率为  $P_f = 10^{-6}$ ,  $N_p = 100$ , 两种 BSSL 抑制方法目标检测性能的蒙特卡罗仿真结果如图 10(b) 所示。由于两种方法均没有降低目标的主瓣峰值, 因此, 对于相同的脉冲数, 两种方法的目标检测性能基本相同。

图 10(c) 给出了 BSSL 导致的虚警概率曲线。由图 7 知, 当  $\alpha = 0$  和  $\alpha = 1$  时, 本文方法的 BSSL 抑制效果最差; 此时, 与对称加窗法相比, 如图 10(c)

图6  $\alpha = 1$  和  $\alpha = 0$  对应的 RFT 峰值距离切片

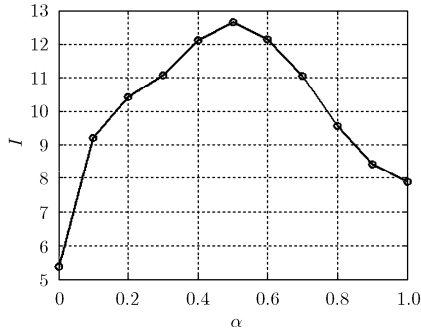


图 7 不同  $\alpha$  对应的 BSSL 积分抑制比

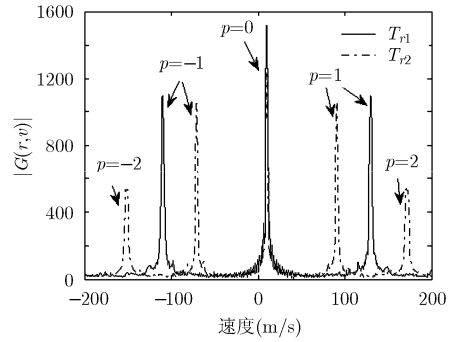
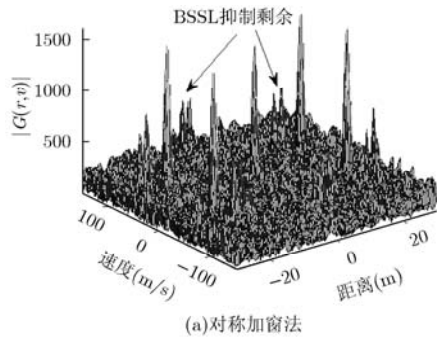
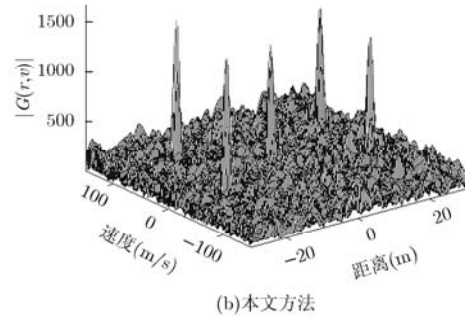


图 8  $\alpha = 0.5$  时 RFT 峰值距离切片

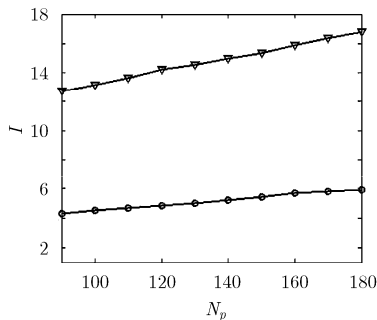


(a)对称加窗法

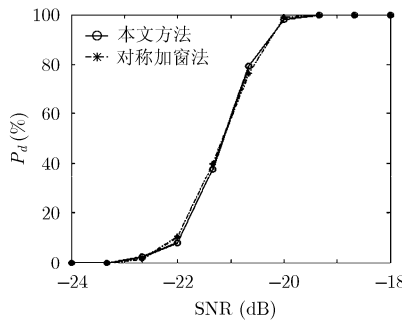


(b)本文方法

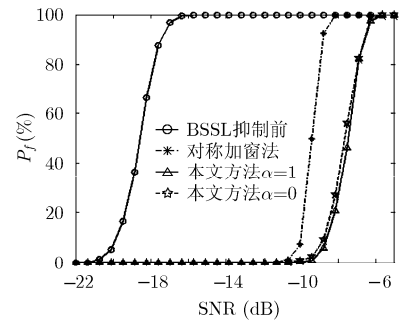
图 9 BSSL 抑制结果



(a)不同积累脉冲的BSSL积分抑制比



(b)目标检测性能



(c) BSSL 产生的虚警概率

图 10 BSSL 抑制性能结果

所示，本文方法的 BSSL 抑制剩余导致相同虚警概率所需的 SNR 更大，即对称加窗法在低信噪比时更容易产生虚警。事实上，由图 7 和图 8 可知，当  $\alpha = 0.5$  时，本文方法 BSSL 抑制剩余基本达到噪声水平，因此，此时 BSSL 抑制剩余对雷达目标检测的影响可忽略。

因此，与对称加窗法相比，本文方法能够在保证目标检测性能的同时，显著提高 BSSL 抑制效果，从而进一步验证了本文方法的有效性。

### 5 结束语

RFT 是近来提出的实现雷达微弱目标检测的新方法，但其 BSSL 的存在可能导致雷达虚警概率增加而影响 RFT 的检测性能。为此，本文首先详细

推导了 BSSL 位置及分辨率与 PRI 的关系，并且利用相邻 CPI 的 RFT 中 BSSL 不重叠的约束条件给出了 PRI 具体设计公式。然后，通过联合处理相邻两个 CPI 的 RFT 输出结果，实现 BSSL 抑制。本文新方法只需设计雷达 PRI，便于硬件实现。与对称加窗法相比，本文方法在保证目标检测性能的同时可进一步提高 BSSL 抑制效果。

### 参考文献

[1] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Searching radar detection and track with the Hough transform. I. system concept[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 102-108.

[2] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Searching radar

- detection and track with the Hough transform. II. detection statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 109-115.
- [3] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform. III. Detection performance with binary integration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 116-125.
- [4] Richards M A 著, 邢孟道, 王彤, 李真芳, 译. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 62-200.
- [5] Zhang S S, Zeng T, Long T, *et al.* Dim target detection based on Keystone transformation[C]. IEEE International Radar Conference, Shanghai, China, 2005: 889-894.
- [6] Perry R P, DiPietro R C, and Fante R L. Coherent integration with range migration using Keystone formatting [C]. IEEE Radar Conference, Boston, USA, 2007: 863-868.
- [7] Xu J, Yu J, Peng Y N, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection (I): generalized doppler filter bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186-1202.
- [8] Xu J, Yu J, Peng Y N, *et al.* Radon-Fourier Transform (RFT) for radar target detection (II): performance analysis and sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2473-2489.
- [9] Yu J, Xu J, Peng Y N, *et al.* Radon-Fourier Transform (RFT) for radar target detection (III): optimality and fast implementations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 991-1004.
- 钱李昌: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为雷达微弱目标检测.
- 许 稼: 男, 1974年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像、微弱目标检测及多源信息融合.
- 孙文峰: 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 彭应宁: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、自适应阵列信号处理、空间谱估计等.