

高速运动平台MIMO雷达“三跨”补偿研究

骆成¹, 李军¹, 何子述¹, 刘红明²

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 空军试验训练基地 兰州 732750)

【摘要】针对高速运动平台MIMO雷达地面动目标“三跨”运动及补偿的问题,建立空间模型,导出了回波时延和发射方向图随时间及周期变化的公式。分析了回波的特性,给出“三跨”走动的表达式,提出了用预补偿校正目标跨距离单元走动和跨波束走动,并结合分数阶傅里叶变换(FrFT)补偿目标跨多普勒单元走动的方法。该方法可以实现对目标“三跨”运动的同时补偿,且由于预补偿是对发射信号进行处理,其计算量远低于现有的补偿算法。最后用MIMO雷达稀布阵的思想,采用“稀疏发射紧凑接收”的方式进行跨波束走动及补偿的仿真,仿真结果证明了预补偿与FrFT相结合的补偿方法对于“三跨”走动补偿的有效性。

关键词 分数阶傅里叶变换; 高速运动; MIMO雷达; 稀布阵; 预补偿; 三跨

中图分类号 TN95

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.006

Study of ‘Three Crossing’ Compensations of High Speed Moving MIMO Radar

LUO Cheng¹, LI Jun¹, HE Zi-shu¹, and LIU Hong-ming²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Test and Training Base of PLA Air Force Lanzhou 732750)

Abstract According to the problem of the ‘three crossing’ motions and compensations for the ground moving target of high speed moving multi-input and multi-output (MIMO) radar, a space model is established and the equations of delay and transmit pattern which is changing with time and period are deduced. The echo characteristics are analyzed and the formulas of ‘three crossing’ are derived. A compensation method is proposed by using pre-process to compensate crossing range-cell and crossing-beam and by applying FrFT to compensate crossing Doppler-cell. The method could compensate ‘three crossing’ simultaneously with much less calculating quantities than methods presented before as pre-process of the transmit signals. At last, the phantom antenna array is used in the simulations, and the ‘sparse transmit dense receive’ is applied to the simulation of crossing-beam and its compensation. The results of simulations demonstrate the validity of the method combining pre-process and FrFT to compensate ‘three crossing’.

Key words FrFT; high speed moving; MIMO Radar; phantom antenna array; pre-process; three crossing

随着现代航空航天技术的发展,飞行器的速度越来越快,如“猎鹰HTV-2”“X-43A”等的速度都达到了十马赫以上,且其机动性也越来越强,这给雷达的搜索、检测和跟踪等提出了难题。虽然可以通过长时间积累提高目标回波的信噪比,改善雷达的检测性能,但在增加积累时间后,目标容易出现“三跨”现象,即跨距离单元走动、跨多普勒单元走动和跨波束走动。“三跨”使得回波不满足相参性,为了进行相参积累以获得最好的检测性能,必须对“三跨”进行补偿。

关于跨距离单元走动和跨多普勒单元走动的研究已有不少成果^[1-8],但多数是针对其中一个方面的补偿进行的,而相控阵雷达等的工作方式则限制了对跨波束走动的研究。当目标出现跨波束走动时,相控阵雷达等无法对其进行补偿,相关文献也一直没有出现。MIMO雷达^[9-10]使用正交信号,发射信号在空域形成一个低增益的宽波束,覆盖整个需要监测的范围。即使目标出现了“三跨”走动,MIMO雷达仍然能够接收到所有的回波,不会有能量的损失,这就为“三跨”走动及其补偿的研究提供了条件。

收稿日期: 2012-07-17; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC61032010); 国家自然科学基金联合基金(NSAF11076006); 中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2010J015)

作者简介: 骆成(1984-),男,博士生,主要从事雷达信号处理方面的研究。

本文对高速运动平台MIMO雷达目标的“三跨”走动进行研究, 首先建立空间模型, 导出时延和发射方向图随时间及周期变化的公式; 然后引入一般形式的信号, 分析、说明目标存在“三跨”走动; 再用预补偿^[11]对跨距离单元走动和跨波束走动进行补偿, 并用分数阶傅里叶变换^[8,12]补偿跨多普勒单元走动, 实现同时对目标“三跨”走动的补偿; 最后仿真证明算法对“三跨”走动补偿的有效性。

1 空间模型

假设雷达和所检测的目标的几何关系如图1所示。设 t 时刻, 雷达处于点 P , 高度为 H , 以速度 v_r 水平沿 Y 轴正向运动, 点目标位于 Q 处。 PQ 为雷达与目标的 t 时刻位置连线, 雷达速度方向与 PQ 的夹角为 θ 。二者 t 时刻的距离为 R_0 , 经过时间 t_1 , 发射信号刚好照射到目标身上, 此时雷达运动到点 P' , 二者间的距离变为 $R(t_1)$ 。

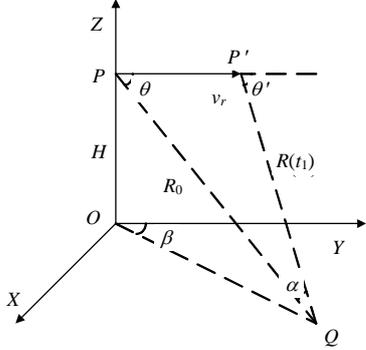


图1 雷达与目标的几何位置关系图

根据图1的模型, 在 $\triangle PP'Q$ 中用余弦定理求出 $P'Q$, 即 $R(t_1)$, 然后可解出回波时延的泰勒展开为:

$$\tau(t) = \frac{2R_0}{c} + \frac{-2v}{c-v} \left(t - \frac{R_0}{c} \right) + \frac{ac^2}{(c-v)^3} \left(t - \frac{R_0}{c} \right)^2 \quad (1)$$

进一步可以得到:

$$t - \tau(t) = kt - kt_0 - pt^2 \quad (2)$$

式中,

$$k = \frac{c+v}{c-v}, t_0 = \frac{2R_0}{c+v}, p = \frac{ac^2}{(c-v)^3} \quad (3)$$

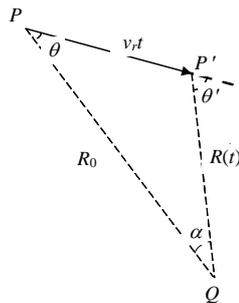


图2 角度变化示意图

提取 $\Delta PP'Q$, 在整个观测期间, 目标相对于雷达阵列的角度变化可以等价于角度 α , 如图2所示。

假设单个周期内, 目标相对雷达的角度不变, 周期间存在变化。并假设MIMO雷达收发阵元数分别为 M 和 N , 积累期间共发射 L 个脉冲。由此可以解出发射阵列导向矢量相位的矩阵分别为:

$$\Psi_T = [\psi(t_1), \psi(t_2), \dots, \psi(t_L)]^T = \begin{bmatrix} \psi_1(t_1) & \psi_1(t_2) & \dots & \psi_1(t_L) \\ \psi_2(t_1) & \psi_2(t_2) & \dots & \psi_2(t_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_M(t_1) & \psi_M(t_2) & \dots & \psi_M(t_L) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Psi_R = [\phi(t_1), \phi(t_2), \dots, \phi(t_L)]^T = \begin{bmatrix} \phi_1(t_1) & \phi_1(t_2) & \dots & \phi_1(t_L) \\ \phi_2(t_1) & \phi_2(t_2) & \dots & \phi_2(t_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_N(t_1) & \phi_N(t_2) & \dots & \phi_N(t_L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, 第 m 发射通道的导向矢量的相位为:

$$\psi_m(t_l) = \frac{2\pi(m-1)d_l}{\lambda} \sin[\alpha_1(t_l)] \quad m=1, 2, \dots, M, \quad l=1, 2, \dots, L \quad (6)$$

第 n 接收通道的导向矢量的相位为:

$$\phi_n(t_l) = \frac{2\pi(n-1)d_r}{\lambda} \sin[\alpha_2(t_l)] \quad n=1, 2, \dots, N, \quad l=1, 2, \dots, L \quad (7)$$

这里的角度 α_1 和 α_2 即为图2中的 α 。若经过 b 个周期后, 目标相对于阵列的角度发生了变化, 则 t_l 的取值应为:

$$t_l = \left\lfloor \frac{l}{b} \right\rfloor T \quad l=1, 2, \dots, L \quad (8)$$

式中, T 可以是雷达周期 T_r 内的任意时刻。用余弦定理在 $\triangle PP'Q$ 中解出 $\sin \alpha$ 并代入式(6), 整理得:

$$\psi_m(t_l) = \left(1 + \frac{v_r \cos \theta}{R_0} \left\lfloor \frac{l}{b} \right\rfloor T \right) \frac{v_r}{R_0} \left\lfloor \frac{l}{b} \right\rfloor T \times \frac{2\pi(m-1)d \sin \theta}{\lambda} \quad m=1, 2, \dots, M, \quad l=1, 2, \dots, L \quad (9)$$

如果收发同阵列, 对于接收阵列, $\sin[\alpha_2(t_l)]$ 与 $\sin[\alpha_1(t_l)]$ 表达形式相同, 故式(9)也可用于 $\phi_n(t_l)$ 。

2 回波分析

发射信号可表示为:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1(t), \mathbf{s}_2(t), \dots, \mathbf{s}_L(t)]^T = \begin{bmatrix} s_{11}(t), s_{12}(t), \dots, s_{1M}(t) \\ s_{21}(t), s_{22}(t), \dots, s_{2M}(t) \\ \vdots \\ s_{L1}(t), s_{L2}(t), \dots, s_{LM}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, 第 l 个周期第 m 个发射阵元的发射信号为:

$$s_{lm}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - lT_r}{T_p}\right) s_{bm}(t - lT_r) e^{j2\pi f_c t} \quad (11)$$

式中, $s_{bm}(t)$ 代表发射的基带信号。则第 n 个接收阵元接收到的回波混频后, 有:

$$s_{r_ln}(t) = \sum_{m=1}^M \text{rect}\left[\frac{t - \tau(t) - lT_r}{T_p}\right] s_{bm}[t - \tau(t) - lT_r] \times e^{-j2\pi f_c \tau(t)} e^{j\psi_m(t_l)} e^{j\phi_n(t_l)} + v_n(t) \quad (12)$$

由于机载MIMO雷达的杂波抑制较为复杂, 且在高速运动下还存在着杂波扩散和杂波凝聚的问题, 在此不对其进行讨论。本文关注的重点为“三跨”运动及其补偿, 故假设不考虑杂波的影响, $v_n(t)$ 仅表示接收到的噪声。

提取式(12)的矩形函数, 记为 $f(t)$, 有:

$$f(t) = \text{rect}\left[\frac{t - \tau(t) - lT_r}{T_p}\right] = \text{rect}\left(\frac{kt - kt_0 - pt^2 - lT_r}{T_p}\right) \quad (13)$$

令式(13)的分子为0, 解出快慢时间域的回波前沿为:

$$\hat{t}(t) = \frac{pT_r^2}{k^3} l^2 + \left(\frac{1}{k} - 1 - \frac{2pT_r t_0}{k^2}\right) lT_r + (2k - 1)t_0 + \frac{pt_0^2}{k} \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 回波包络将随脉冲个数 l 的增加而出现距离走动现象。

将式(13)的基带信号及第一个指数项记为 $g(t)$, 则有:

$$g(t) = \sum_{m=1}^M s_{bm}[t - \tau(t) - lT_r] e^{-j2\pi f_c \tau(t)} \quad (15)$$

式中, $\tau(t)$ 是一个关于时间 t 的二次多项式。回波的多普勒频率满足:

$$f_d = f_d(t) \quad (16)$$

即回波多普勒是时间的函数, 随周期数的增加而改变, 使回波的相参性不能得到满足, 说明回波中存在着多普勒走动的现象。

记式(12)的后两个指数项为 $h(t)$, 有:

$$h(t) = \sum_{m=1}^M e^{j\psi_m(t_l)} e^{j\phi_n(t_l)} \quad (17)$$

根据式(4)~式(9), 有:

$$\psi_m(t_{l_1}) \neq \psi_m(t_{l_{1+b}}), \phi_n(t_{l_1}) \neq \phi_n(t_{l_{1+b}}) \quad (18)$$

即在 b 个周期后目标进入了相邻的下一个波束主瓣内, 出现了跨波束走动的现象。

3 补偿方法

本文提出使用预补偿和分数阶傅里叶变换对上一小节分析的“三跨”走动进行补偿。预补偿的思路是利用直接数字频率合成(DDS)技术, 对发射信号进行精细控制, 调整其发射脉宽, 使回波可以自动在快慢时间域内对齐包络, 从而实现了对目标距离走动的补偿; 对跨波束走动的补偿, 主要是针对发射信号进行。基于预补偿的思路, 在发射信号中加入目标相对于发射端的角度所引起的导向矢量的共轭, 使发射导向矢量可以在目标处被补偿掉。

由 $p = ac^2/(c-v)^3 \approx a/c^3$ 知, p 对包络走动的影响很小, 回波的矩形函数可以近似为:

$$f(t) = \text{rect}\left(\frac{kt - kt_0 - lT_r}{T_p}\right) \quad (19)$$

根据预补偿的思路, 新的发射信号可以写为:

$$s_{lm}(t) = \text{rect}\left(\frac{t/k - lT_r}{T_p}\right) s_{bm}(t/k - lT_r) e^{-j\psi_m(t_l)} e^{j2\pi f_c t} \quad (20)$$

则目标处的合成信号为:

$$s_{r_lm}(t) = \sum_{m=1}^M \text{rect}\left[\frac{(t - t_1)/k - lT_r}{T_p}\right] \times s_{bm}[(t - t_1)/k - lT_r] e^{j2\pi f_c (t - t_1)} \quad (21)$$

式中, t_1 表示信号从雷达到目标的传输延时。接收阵列接收到的回波经过混频后可得:

$$s_{r_ln}(t) = \sum_{m=1}^M \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_0}{T_p}\right) s_{bm}\left[\frac{t - \tau(t)}{k} - lT_r\right] \times e^{-j2\pi f_c \tau(t)} e^{j\phi_n(t_l)} + v_n(t) \quad (22)$$

回波包络在快慢时间域内的前沿为常数 t_0 , 即包络是对齐的, 说明可通过预补偿方法实现对距离走动的校正。

接收波束形成后, 有:

$$s_{r_l}(t) = \sum_{n=1}^N s_{r_ln}(t) e^{-j\phi_n(t_l)} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_0}{T_p}\right) s_{bm}\left[\frac{t - \tau(t)}{k} - lT_r\right] \times e^{-j2\pi f_c \tau(t)} + \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (23)$$

收发导向矢量对消完毕, 回波中不再存在跨波束走动现象。下面使用分数阶傅里叶变换对式(23)进行多普勒走动补偿, 补偿后回波中将只含有时间 t

的一次项及常数项, 结果可以写为如下形式:

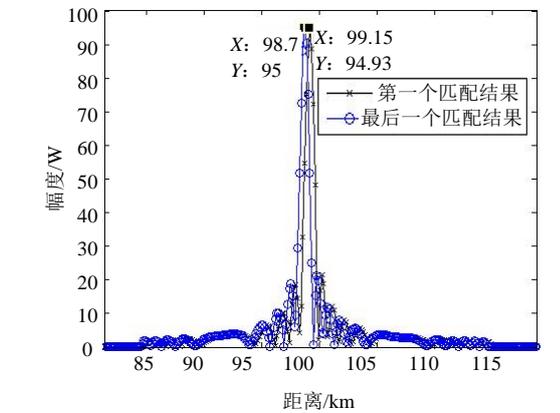
$$s_{r-1}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect}\left(\frac{\hat{t}-t_0}{T_p}\right) s_{bm}(\lambda_1 t + \lambda_0) \times e^{-j2\pi f_c(\xi_1 t + \xi_0)} + \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (24)$$

式中, λ_1 和 ξ_1 表示 t 的一次项的系数; λ_0 和 ξ_0 为常数项。

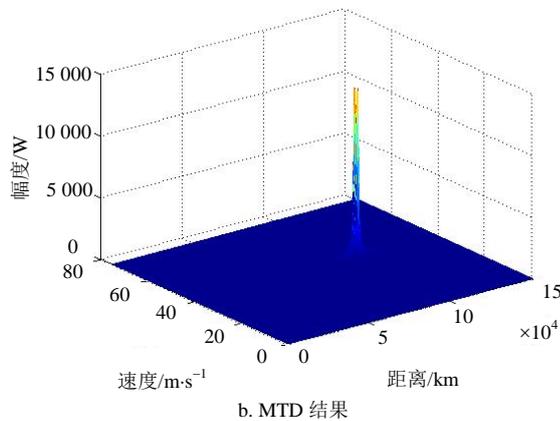
式(24)中的回波包络在快慢时间域内是对齐的, 回波波形表达式中时间 t 的指数不高于1次, 并且无导向矢量变化的影响。说明经过预补偿和FrFT的处理, 回波的“三跨”走动得到了校正, 接收波束满足相参性, 可在匹配滤波后利用FFT进行相参积累。

4 仿真

仿真时使用LFM信号, 先针对存在距离和多普勒走动的情况进行仿真。仿真条件为: 雷达周期1ms, 脉宽0.1ms, 初始距离100km, 高速平台匀速1km/s, 夹角 $\pi/6$, 发射阵元数2, 带宽0.2MHz, 通道频率间隔0.2MHz, 脉冲数500, 采样率1MHz, 载频2GHz, 零中频0.2MHz。计算可得, 相对初始速度 $v_r \approx 866$ m/s, 加速度为 5 m/s², 积累期间距离改变量 $\Delta R \approx 433.6$ m。



a. 快慢时间域内第一个和最后一个匹配结果



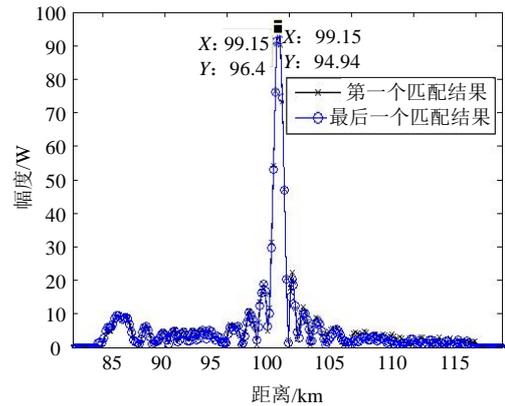
b. MTD 结果

图3 存在距离和多普勒走动时的匹配滤波和MTD

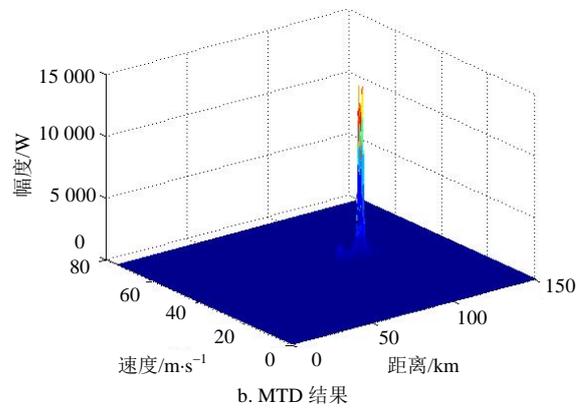
首先, 存在距离和多普勒走动时的匹配滤波和MTD的结果由图3所示, 然后进行距离补偿; 图4给出了补偿距离走动后的匹配滤波和MTD结果; 再进行多普勒补偿, 结果如图5所示。

积累期间距离变化量为433.6m, 与图3中的匹配滤波结果相符; 因还存在多普勒走动, 所以MTD的结果在速度维出现了发散现象。

距离补偿完成后, 匹配滤波峰值位置重合; 但还未补偿多普勒走动, 所以MTD的发散现象仍然存在。

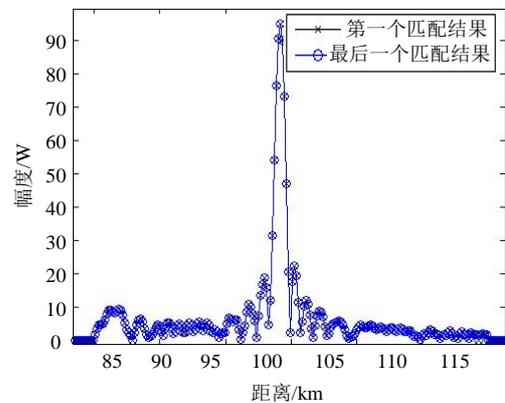


a. 快慢时间域内第一个和最后一个匹配结果



b. MTD 结果

图4 只存在多普勒走动时的匹配滤波和MTD



a. 快慢时间域内第一个和最后一个匹配结果

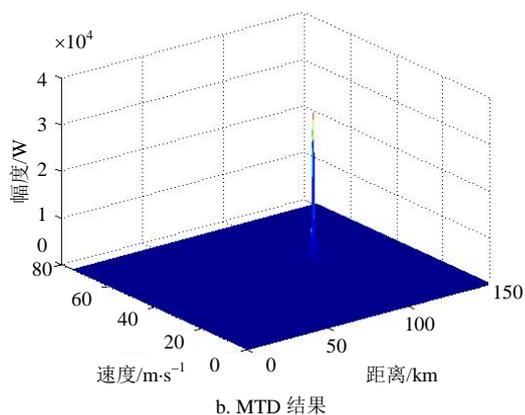


图5 完成补偿后的匹配滤波和MTD

距离走动和多普勒走动都补偿后, 匹配滤波结果很好地重合在一起, 且MTD的结果也是理想的一个细尖峰。

当目标出现跨波束走动的现象时, 往往满足以下3个条件: 1) 雷达发射阵列阵元数较大; 2) 雷达与目标的距离不太远; 3) 切向速度不太小, 所以将雷达与目标的距离设为 20 km, 平台速度提升到 3 000 m/s, MIMO雷达发射阵元数设为10个, 同时将雷达周期改为 2 ms。发射阵采用稀布阵^[13]的方式, 阵元间距为半波长乘以阵元数, 这样布阵可以虚拟出100个发射阵元, 从而减小发射信号的主瓣宽度。可以计算得到, 主瓣的宽度约为 0.731° , 单个周期目标运动引起的角度变化为 0.0744° , 在100个周期后, 目标跨过了约2.0362个波束。

图6所示即为在完成了跨距离走动和跨多普勒走动补偿的情况下进行跨波束走动补偿前后的积累效果。图中用补偿跨波束走动前的积累结果对补偿前后的积累结果同时进行了归一化, 得到补偿后相对于补偿前的相对幅度。可以看出, 补偿后积累峰值提升了2倍左右, 与目标跨过了约2个波束的情况相符。

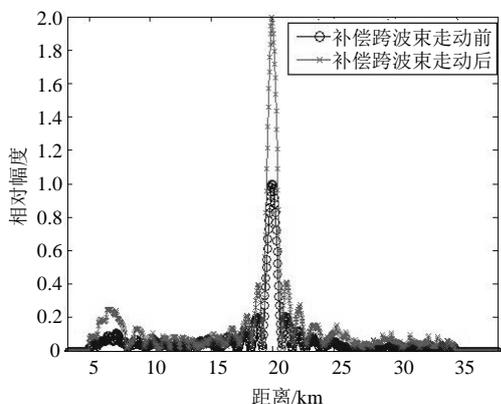


图6 补偿目标跨波束走动前后的直接积累效果

图7为补偿前后的检测概率曲线, 在90%的检测概率下, 补偿后回波的输入信噪比有7 dB左右的改善。说明本文所提的方法可以有效提高MIMO雷达目标存在“三跨”走动时的检测性能。

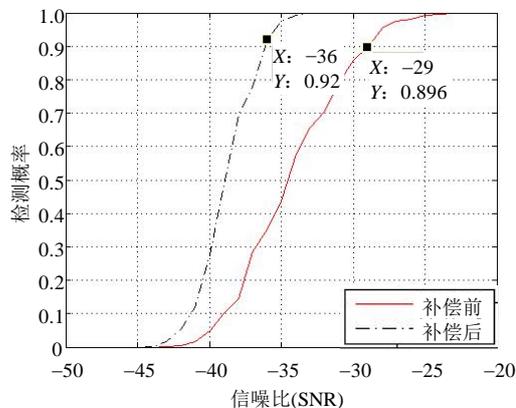


图7 补偿前后检测概率曲线

5 结论

随着现代飞行器速度的提升, 长时间积累引起的“三跨”问题愈加严重, 相控阵雷达等因工作方式的局限不能对跨波束走动进行补偿, 现有文献中也没有出现过对“三跨”走动的讨论, 而MIMO雷达宽发的特点为实现跨波束走动补偿提供了条件。本文以机载MIMO雷达检测地面动目标为背景, 从分析回波特性入手, 导出了目标的“三跨”走动模型, 然后用预补偿和分数阶傅里叶变换对“三跨”进行了补偿。仿真结果证明, 预补偿和FrFT可有效地补偿目标的“三跨”走动。

参考文献

- [1] SU J, XING M, WANG G, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. IET Radar Sonar Navig, 2010, 4(4): 595-603
- [2] 张顺生, 张伟. 低信噪比下基于Keystone变换的多目标检测[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 23-26.
ZHANG Shun-sheng, ZHANG Wei. Multiple targets' detection at the low SNR level based on keystone transform[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 23-26.
- [3] LIU Yi-min, MENG Hua-dong, LI Gang, et al. Velocity estimation and range shift compensation for high range resolution profiling in stepped-Frequency radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 791-795
- [4] BOERS Y, DRIESSEN J N. Multi-target particle filter track before detect application[J]. IEE Proceedings of Radar Sonar Navi, 2004, 151(6): 351-357
- [5] 刘建成. 加速运动目标检测机跟踪技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.

- LIU Jian-cheng. Study on accelerating target detection and tracking[D]. Changsha: University of National Defense Technology, 2007.
- [6] 王胜利. 雷达信号处理的新方法—匹配傅里叶变换研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
WANG Sheng-li. New radar signal processing method—study on matched Fourier transform[D]. Xi'an: Xidian University, 2003.
- [7] GEROLEO F G, BRANDT-PEARCE M. Detection and estimation of LFM CW radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 405-418.
- [8] GUAN J, CHEN X L, HUANG Y, et al. Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. IET Radar Sonar Navig, 2012, 6(5): 389-401.
- [9] MOO P W. Multiple-input multiple-output radar search strategies for high-velocity targets[J]. IET Radar Sonar Navig, 2011, 5(3): 256-265.
- [10] HASSANIEN A, VOROBYOV S A, GERSHMAN A B. Moving target parameters estimation in noncoherent MIMO radar systems[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2012, 60(5): 2354-2361.
- [11] CHENG Luo, JUN Li, HONG Ming-liu, et al. Compensation method for envelop migration of MIMO radar high speed moving target based on transmit signal pre-process[C]//International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology (MMWCST). Chengdu: [s.n.], 2012.
- [12] SUN Hong-bo, LIU Guo-sui, GU Hong, et al. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [13] DONNET B J, LONGSTAFF I D. MIMO radar, techniques and opportunities[C]//Proceedings of the 3rd European Radar Conference. Manchester, UK: [s.n.], 2006: 112-115.

编辑 税红

(上接第30页)

- [11] HARDJAWANA W, VUCETIC B, LI Y H. Multi-user cooperative base station systems with joint precoding and beamforming[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(6): 1079-1093.
- [12] BOON L N, EVANS J S, HANLY S V, et al. Distributed downlink beamforming with cooperative base stations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(12): 5491-5499.
- [13] MAHDAVI-DOOST H, EBRAHIMI M, KHANDANI A K. Characterization of SINR region for interfering links with constrained power[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(6): 2816-2828.
- [14] 吕星哉, 王振, 朱近康. 分布式无线通信系统中的主从协同功控[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(1): 59-64.
LÜ Xing-zai, WANG Zhen, ZHU Jin-kang. Primary-subsidary cooperative power control in ordered distributed wireless communication system[J]. Journal of Circuits and Systems, 2010, 15(1): 59-64.
- [15] BINELO M O, de ALMEIDA A L F, CAVALCANTI F R P. MIMO array capacity optimization using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2471-2481.
- [16] SHIU Y Y, CHI K C. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 454-472.
- [17] 郑鹏, 何同林, 刘郁林, 等. 基于实数编码遗传算法的盲信源分离方法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 295-297.
ZHENG Peng, HE Tong-lin, LIU Yu-lin, et al. Blind source separation method based on real coded genetic algorithm[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(3): 295-297.

编辑 税红