

微动特性干扰对基于 FrFT 的多孔径 SAR/GMTI 的效果分析

刘 阳, 王雪松

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 微动特性干扰主要模拟了微动目标对合成孔径雷达图像的方位扩展影响, 其成像特性已经得到了比较好的研究, 但是对 SAR/GMTI 的影响研究还不充分. 本文主要分析了基于分数阶傅里叶变换的多孔径 SAR/GMTI 的原理, 根据分数阶傅里叶变换的本质和该方法下的杂波对消、干涉相位的响应特性, 结合了微动干扰的多普勒特性, 初步研究了在旋转角度匹配的条件下, 微动干扰对 SAR/GMTI 的幅度和相位影响. 文章利用计算机仿真结果验证了分析的正确性. 结果表明: 微动干扰也具备对 SAR/GMTI 的干扰能力, 并结合分析结果指出了微动干扰的参数选择.

关键词: 合成孔径雷达; 动目标检测; 分数阶傅里叶变换; 微运动; 干扰

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2039-07

The Analysis of the Effect for a Micro-Motion Jamming to Multi-Aperture SAR/GMTI Base on Fractional Fourier Transform

LIU Yang, WANG Xue-song

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: In this paper, impacts on SAR/GMTI of the jamming which imitating micro-motion targets is developed focused on a Multi-Aperture SAR/GMTI system which based on Fractional Fourier Transform. Firstly the FrFT and the FrFT SAR/GMTI method were introduced. Secondly the response of the amplitude characteristic after clutter cancellation and interference phase were straightly reached, combined with analyzing the Doppler perspective of physical significance of the jamming, it easily got the jamming effects to SAR/GMTI. The expression of the amplitude and the phase were presented under the circumstance of matched rotating angle of FrFT. All the results were verified by computer simulations. It shows that the micro-motion jamming is efficiency in not only imaging but also GMTI. In the end, it gives some parameter choice advice for the jamming.

Key words: SAR; moving target detection; fractional Fourier transform; micro-motion; jamming

1 引言

当 SAR 对地面微动目标探测时, 会受到微多普勒的影响^[1]. 例如: 在 SAR 图像上, 旋转目标——如雷达天线、车轮等——主要的影响是方位向的错位和能量扩展. 文献[2~4]利用了旋转目标的微多普勒特性构造了新的干扰样式——基于余弦调相的 SAR 转发干扰. 对于其成像特性分析已经有了大量分析, 而多通道 SAR/GMTI 模式下微运动目标的特性研究还不充分. 文献[5]尝试给出了定性分析, 没有得到解析结果. 研究该类型干扰对多通道 SAR/GMTI 的影响, 不仅对微动类型 SAR 干扰效果的研究具有重要意义, 并且也能为 SAR 对微动目标探测、特征提取提供相关的参考.

从动目标检测的角度来讲, 在多通道 SAR 系统中, 比较常用的方法有相位中心偏置天线(DPCA)技术、沿迹干涉(ATI)处理及多孔径干涉处理等, 其本质都是利用了不同方位时刻对动目标观测的不同斜距的特性^[6]. 近几年又引入了基于分数阶傅里叶变换(FrFT: Fractional Fourier Transform)的动目标检测方法^[7]. 这种方法不仅能够检测和估计动目标的跨航迹向运动分量, 还能够检测沿航迹向的运动分量, 并且对匀速目标具有良好的聚焦性能, 能够为动目标检测提供更好的信杂比.

本文首先简单分析和介绍了 FrFT 对线性调频信号的检测及其在 SAR/GMTI 中的应用, 并根据 FrFT 的物理意义得到了微动特性干扰在其斜率匹配单元内的输出响应特性, 继而得到其在基于 FrFT 方法下多通道 SAR/

GMTI 的幅度特性及干涉相位特性,最后分析了干扰可能对 SAR/GMTI 的影响,并用仿真分析对分析结果进行了验证.结果表明,微动类型干扰具有对 SAR/GMTI 干扰的潜力.

2 基于分数阶傅里叶变换的 SAR/GMTI

2.1 分数阶傅里叶变换原理

分数阶傅立叶变换是时频平面上的一种旋转变换,与傅立叶变换、WVD 变换、小波变换、Chirplet 变换以及 WVD-Radon 变换有十分密切的关系.但是由于其在时频分析中不会产生交叉分量,使得其具有独特的优势^[8].图 1 示意了 FrFT 是如何通过时频平面旋转来检测线性调频信号的. FrFT 通过旋转坐标轴 α 角度,使得线性调频信号的时频分布正交于 FrFT 域 u 轴,沿 v 轴进行积分,获得一个窄的积累峰值.

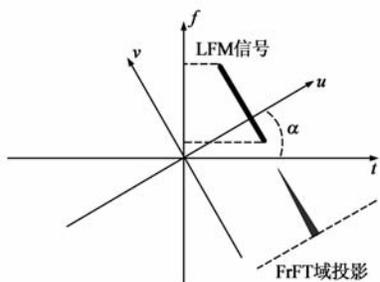


图1 FrFT检测线性调频信号原理图

时宽为 T 的线性调频信号的 FrFT 为

$$F_p[s(t)] = C \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \exp\left[j2\pi\left(\frac{t^2}{2} \cot\alpha - ut \csc\alpha\right)\right] \cdot \exp(j2\pi f_c t + j\pi K t^2) dt$$

$$= C \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \exp\{j\pi(\cot\alpha + K)t^2\} \cdot \exp\{j2\pi(f_c - u \csc\alpha)t\} dt \quad (1)$$

其中 f_c 是中心频率, K 为调频率; $C = \sqrt{\frac{1 - j \cot\alpha}{2\pi}} \cdot \exp(j\pi u^2 \cot\alpha)$. 当 $\alpha = \cot^{-1}(-K)$ 时,式(1)退化为一般傅里叶变换的形式,此时积分具有辛格函数的峰值,其包络平方为

$$|F_p[s(t)]|^2 = C_0 |\text{sinc}[T\pi(f_c - u \csc\alpha)]|^2 \quad (2)$$

C_0 是常数项. 式(2)包络的峰值出现在 FrFT 域 $u = f_c \cdot \sin\alpha$ 处,峰值幅度为 $\frac{T^2 \csc\alpha}{2\pi}$.

如果 $\alpha \neq \cot^{-1}(-K)$, 利用驻定相位可得式(1)的包络平方近似为

$$|F_p[s(t)]|^2 = \frac{\csc\alpha}{2\pi |\cot\alpha + K|} \cdot \left| \text{rect}_T\left(\frac{u \csc\alpha - f_c}{\cot\alpha + K}\right) \right|^2 \quad (3)$$

门函数在 u 轴上的分布区间为 $u \in \left[\left(f_c - \frac{\Delta B_a}{2}\right) \cdot \sin\alpha, \left(f_c + \frac{\Delta B_a}{2}\right) \cdot \sin\alpha \right]$, 其中 $\Delta B_a = |\cot\alpha + K| \cdot T$ 为 FrFT 旋转积分方向与信号调频率失配后的带宽.

2.2 基于 FrFT 的三孔径 SAR/GMTI

本文通过分析一种基于 FrFT 的三孔径动目标检测方法来分析微动对此类动目标检测方法可能造成的影响^[9]. 类似方法也是 Radarsat-2 在研制阶段进行了论证研究的动目标检测方式^[6]. 该方法利用 FrFT 对线性调频信号的聚焦特性,使得本来散焦动目标也能够聚焦从而获得更高的信杂比,并且根据对消地杂波后动目标峰值在 FrFT 域分布情况以及相应位置的干涉相位,能同时估计目标的沿航迹速度、跨航迹向速度,并且能校正目标位置. 其原理如图 2 所示.

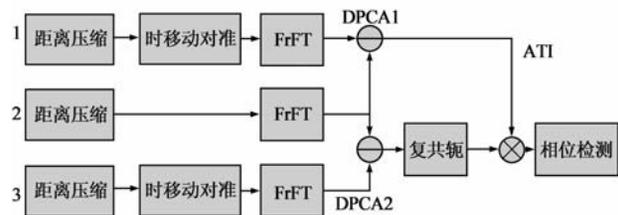


图2 基于FrFT的三孔径InSAR/GMTI原理图

3 副天线的相位中心沿航迹等间隔 d 分布,中间孔径天线 2 负责发射信号,3 副天线同时接收回波. 将天线 1 和天线 3 的信号进行时移对准,对天线 2 的回波信号经过距离压缩以及去载频之后进行沿方位向的 FrFT. 图 2 中 DPCA 后的残差图像以及 ATI 干涉相位分别为^[6]:

$$|F_{12}(u)| = |F_{23}(u)| = 2 \sin\left(\frac{\pi x_0 v_x d}{\lambda R_B v_s}\right) |F_p[s_2(\eta)]| \quad (4)$$

$$\varphi_{ATI} = \frac{2\pi x_0 v_x d}{\lambda R_B v_s} \quad (5)$$

此时地杂波及静止目标在残差图像中被对消. 检测剩余能量峰值位置的干涉相位获得目标跨航迹向速度估计值为

$$\hat{v}_x = \varphi_{ATI} \frac{\lambda \hat{R}_B v_s}{2\pi x_0 d} \quad (6)$$

最小斜距 \hat{R}_B 的估计值可以从距离向一维压缩的图像上获知,同时根据飞行高度可估计 x_0 . 沿航迹向速度估计值为

$$\hat{v}_y = v_s - \sqrt{\frac{\text{PRF}^2 \lambda R_B}{N_a} \cot\alpha_0 - \hat{v}_x^2} \quad (7)$$

其中 N_a 为方位向的信号采样点数, α_0 是峰值所对应的 FrFT 旋转角度. 将速度估计值 \hat{v}_x 和 \hat{v}_y 、距离压缩图像上所得 x_0 的值以及峰值在 FrFT 平面的位置,可求得动目

标在最小斜距时刻的方位位置校正量应该为

$$\Delta y = \frac{\hat{v}_x x_0}{v_s} \quad (8)$$

基于 FrFT 的三孔径 SAR/GMTI 利用分数阶傅里叶变换能够为 ATI 处理提供更好的信杂比. 同时 FrFT 是线性变换没有交叉分量, 因此对于散射强度较弱的动目标, 也可以将一维距离压缩后的图像先进行时移对准和杂波对消, 从而方便从距离图像上获得最小斜距估计值, 之后再利用 FrFT 对其他参数进行估计.

3 微动特性干扰对基于 FrFT 的 SAR/GMTI 的影响

3.1 微动特性干扰的 FrFT 响应特性

微动特性的干扰方位向角度调制表达式抽象为以下数学表达式:

$$f(\eta) = A_m \sin(2\pi f_m \eta + \varphi_0) \quad (9)$$

直接推导余弦方位调相干扰的 FrFT 分布非常困难, 但是可以从分数阶傅里叶变换的实质意义入手, 可以定性得到其 FrFT 的响应特性.

观察分数阶傅里叶变换的定义, 做变量替换 $v = c \operatorname{sca} \cdot u$ 并忽略常数项, 则分数阶傅里叶变换可以表示为

$$\begin{aligned} F_p [s(t)] &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [s(t) \exp(j\pi \alpha t^2)] \exp\{-j2\pi vt\} dt \\ &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g_\alpha(t) \exp\{-j2\pi vt\} dt \\ &= \text{Fourier}_v [g_\alpha(t)] \end{aligned} \quad (10)$$

等效为将变换的信号首先乘以一个斜率为 α 的线性调频信号和一个与 α 有关的幅度、相位常量, 得到新的信号 $g_\alpha(t)$ 再进行傅里叶变换. 因此对线性调频信号的分数阶傅里叶变换, 当调频斜率与 α 为等量负方向时, $g_\alpha(t)$ 就成为一个单频信号, 再进行傅里叶变换使其聚焦在相应的 u 位置. 同时由于图 1 中所示 FrFT 的旋转变换特性, 在频域占据一定宽度的信号映射到 FrFT 域的 u 轴时, 带宽有 $\sin\alpha$ 因子的变化.

微动特性转发干扰由两部分组成. 一个是其运动质心位置处等效目标回波的时频特性; 另一附加部分就是余弦规律变化的微多普勒. 因此对其进行分数阶傅里叶变换时, 只有当运动质心位置等效目标回波的调频斜率与 FrFT 的二次相位抵消时, 质心处等效回波输出的总功率才得到最大峰值. 此时的分数阶傅里叶变换等效于一个匹配调频斜率的 Dechirp 变换, 即最终结果是对具有一定多普勒中心的余弦调频信号进行常规的傅里叶变换, 其输出特性也必定为一个贝塞尔函数加权幅度的对称脉冲串^[2]:

$$\begin{aligned} s_{md}(u) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(A_m) \cdot \exp\left\{jn\left[\varphi_m - \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\ &\quad \cdot \delta(nf_m \cdot \sin\alpha)_{\text{PRF}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 f_m 是旋转频率; $J_n(A_m)$ 是第一类 n 阶贝塞尔函数; $(nf_m \cdot \sin\alpha)_{\text{PRF}}$ 表示多次移频在脉冲重频 PRF 下的观测频率; φ_m 是常量, 与天线的前斜侧视角及微动类型干扰的调制初相 φ_0 有关. 常规傅里叶变换后, 余弦调相信号峰值间隔等于其旋转频率 f_m , 对应到分数阶傅里叶域, 其对应间隔变为 $f_m \sin\alpha$. 因此在分数阶傅里叶变换域分布的多个边频分量峰值在 u 轴分布间隔距离将小于常规傅里叶变换下频率轴上的分布间隔.

根据式(11), 微动目标造成了方位多普勒谱的扩散, 并且每个边频分量具有 $n[\varphi_m - \frac{\pi}{2}]$ 的附加相位, 因此其在分数阶傅里叶域的其他 α 位置的输出特性就比较复杂. 根据信号 $g_\alpha(t)$ 失配程度, Dechirp 处理的输出从 Fresnel 积分输出响应逐步过渡到式定义的近似矩形的包络.

另外, 根据调频斜率匹配的 α 单元内峰值可分特性, 又有两种情况:

(1) 若微动调制频率足够大, 在匹配单元内的各个边频分量峰值可分离时: 以匹配单元为中心, α 轴上 α 减小的一侧, 边频造成平移分量分布间隔距离随着 α 的减小而进一步“压缩”, 多个边频分量有可能重合. 由于扩展的各个边频分量具有附加相位 $n[\varphi_m - \frac{\pi}{2}]$, 且各分量功率总和等于微动目标回波功率, 因此多个边频分量的幅度相干叠加后总的输出幅度可能大于匹配位置的峰值. 而 α 增大的一侧, 边频造成平移分量分布间隔距离随着 α 的增大而更加扩散. 那么这一侧 α 单元内的任一边频分量的幅度峰值不会超过匹配单元内对应边频分量的输出幅度峰值.

(2) 若微动调制频率不足以使匹配单元内的各个边频分量峰值可分离时: 由于各边频分量按照其阶数存在 $n[\varphi_m - \frac{\pi}{2}]$ 的附加相位, 此时匹配单元内的峰值输出可能会减小. 那么以匹配单元中心, α 轴上 α 增大的一侧, 各个边频分量间隔距离随着 α 的增大而分离开来, 由于不存在矢量叠加的过程, 因此输出峰值有可能会增大; 而 α 减小的一侧, 各个边频分量间隔变小, 多个边频分量有可能重合而相干叠加, 这一侧的各个 α 单元内的输出峰值有可能会进一步减小.

根据以上分析, 分别仿真两种情况下的微动特性干扰的 FrFT 输出特性. 三孔径之间相位中心间隔 1.5m, 飞行速度 150m/s, 方位调频率约为 250Hz/s^2 , 并取微动调制指数 $A_m = 4$, 对应可得到总共约 11 个脉冲峰值; 微动调制频率分别取 4Hz 和 2Hz, 使得匹配单元

内的各扩散的边频分量对应峰值分别出现完全可分离和不完全可分离两种状况. 信号经过 FrFT 的结果分别如图 3、图 4 所示.

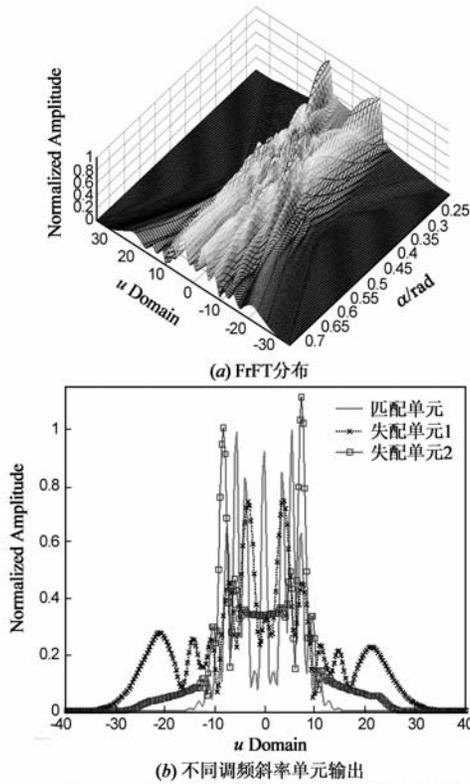


图3 4Hz调制频率微动目标的FrFT输出结果

调制频率为 4Hz 的微动干扰分数阶傅里叶变换输出如图 3(a) 所示, 将调频斜率匹配单元置于了分数阶傅里叶平面中央. 图中可观察到最大峰值并不在匹配单元处, 而是出现在匹配单元 α 减小的一侧. 取出匹配单元、最大峰值所在单元和峰值较小一侧失配某单元, 各自剖面依次如图 3(b) 所示, 纵坐标是统一以匹配单元内的最大值做归一化(实线). 图中可见最大峰值所在失配单元的输出峰值经过相干叠加后(实线带空心方块标识), 能量主要叠加在两点, 形成的峰值略微大于匹配单元内的最大峰值. 而 α 增大一侧的失配单元内, 由于峰值之间间隔距离进一步变大且本身失配造成的能量扩散(点线带交叉标识), 虽然同样形成了若干可分离的峰值, 但是都比匹配单元内对应阶数的边频分量峰值小.

调制频率为 2Hz 的微动干扰分数阶傅里叶变换输出如图 4(a) 所示. 图中可观察到最大峰值出现在 α 增大的一侧. 同样取出匹配单元、最大峰值所在单元和峰值较小一侧失配某单元, 各自剖面依次如图 4(b) 所示. 最大峰值所在失配单元的输出峰值经过相干叠加后, 形成一个强度较大的单点峰值. 而 α 减小的一侧, 相干叠加的结果形成了一个比较平坦的包络.

分数阶傅里叶变换域中, 微动目标的复杂表现形式, 究其根本原因在于微多普勒是一个余弦调频信号, 不仅存在多普勒频偏和多普勒调频率, 还有无穷多高阶的多普勒分量. 而 FrFT 仅仅只能处理其中多普勒调频率以及多普勒频偏项, 对于更高阶项是无法处理的.

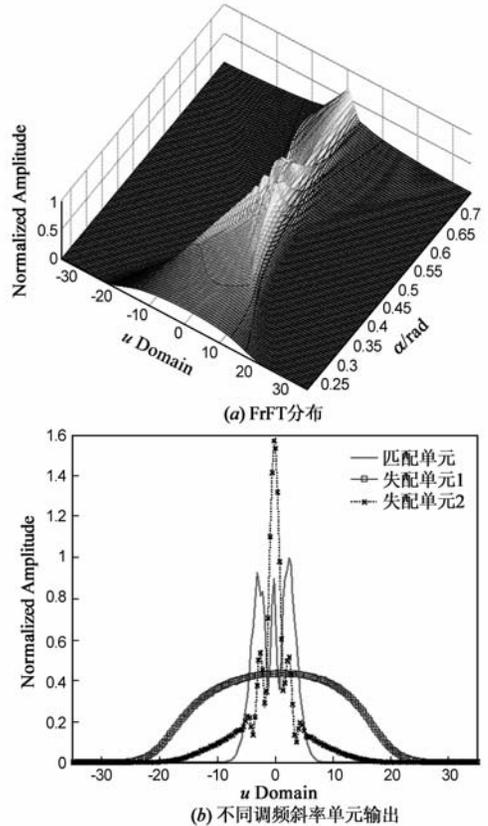


图4 2Hz调制频率微动目标的FrFT输出结果

3.2 基于 FrFT 的 SAR/GMTI 下旋转目标的响应特性

根据 2 节分析可知, 分数阶傅里叶变换沿 u 轴的分布, 实际上类似于多普勒域形式表达的 SAR 方位向图像剖面. 并且可知: 分数阶傅里叶变换相当于用不同斜率的线性调频信号尝试对方位向多普勒进行匹配, 并依次输出不同调频斜率去斜率条件下的傅里叶变换结果. 另外分数阶傅里叶变换的线性特性, 使得 DPCA 处理后再进行 FrFT 与先 FrFT 再进行 DPCA 是等价的.

微多普勒频谱在频域是等间隔分布的, 分布规律

为 $[nf_m]_{\text{PRF}}$, 等效于跨航迹向速度 $\frac{\lambda R_B}{2x_0} [nf_m]_{\text{PRF}}$ 所形成的多普勒偏移. 因此可以直接联合式(4)和式(11)两式得到微动干扰在调频斜率匹配单元内的 FrFT/DPCA 的包络特性为

$$|I_{\text{DPCA}}| = \sum_n 2J_n(A_m) \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi d}{2v_s} \cdot [nf_m]_{\text{PRF}} \sin\alpha\right) \right| \cdot \left| \text{sinc}[\pi T_s(u - [nf_m]_{\text{PRF}} \sin\alpha)] \right| \quad (12)$$

其中 T_s 为方位孔径时宽. 经过干涉处理后任意一阶分量的相位为

$$\hat{\phi}_n = -\pi \frac{d}{v_s} [nf_m]_{\text{PRF}} \sin\alpha \quad (13)$$

非匹配单元内的输出响应比较复杂, 本文不作具体分析.

基于 FrFT 的 SAR/GMTI 通常先直接在距离方位域进行 DPCA 杂波对消, 从残差图像中检测可能存在运动目标的距离单元, 选取这些距离单元进行分数阶傅里叶变换. 若该距离单元内还存在多个散射强度不一的动目标, 还需要采取进一步的处理, 依次在 FrFT 域将这些动目标检测出来, 然后再估计其运动参数^[10].

根据对散射强度不同的多个运动目标检测的方法不同以及对消后残余能量所影响的 CFAR 检测门限, 微动类型干扰形成的多个扩展分量如果具有足够的能量, 则有可能通过 DPCA 的检测, 形成多个虚假的运动目标, 只是对消零点的位置损失若干能量. 那么一旦选取该距离单元进行后继的 FrFT 处理以及干涉处理, 干扰在 FrFT 域调频率匹配的单元内输出也能形成一组可检测的脉冲串包络, 该包络同样是在 DPCA 对消零点位置损失一部分能量. 这个结果也可以由式(12)观察可知. 或者微动干扰能量在 FrFT 平面内形成的遮蔽效应^[11], 会对同一距离单元内需要保护的运动目标形成掩盖保护, 使得其无法被正确检出.

如果 GMTI 错误的检测到了 FrFT 匹配单元内微动类型干扰扩散所形成的“虚假”动目标, 则每个边频分量对应的跨航迹向速度为

$$\hat{v}_x = -[nf_m]_{\text{PRF}} \frac{\lambda \hat{R}_B}{2x_0} \sin\alpha \quad (14)$$

对应方位位置的校正量为

$$\Delta y = -[nf_m]_{\text{PRF}} \frac{\lambda \hat{R}_B}{2v_s} \sin\alpha \quad (15)$$

即: 若在一定雷达脉冲重频条件下, 各边频分量的“观测”频率满足 $-1 < \frac{d}{v_s} [nf_m \sin\alpha]_{\text{PRF}} < 1$ 时, 所有分量位置都会校正到旋转中心处来, GMTI 结果为同一处存在多个速度的目标. 不满足该条件的分量则会被校正到错误的位置, GMTI 结果为同一距离单元不同方位位置上存在多个速度的目标.

图 5 即是 4Hz 频率调制的微干扰标经过 DPCA 后, FrFT 域调频率匹配单元内的输出包络. 从图 5(a) 可以看到 DPCA 沿 α 轴方向形成了一个“凹槽”, 凹槽宽度随着旋转角 α 的增大而增大. DPCA 对消了等效径向速度为 0 及其附近的能量. 对比从图 5(b) 和图 3(b) 也可以看到, 其中心处的能量被明显对消. 对两路对消后的信号进行干涉, 得到如图 5(c) 所示的相位图. 中心点的相位跳变原因是由于两幅 DPCA 残差图完全对消该处值所造成的 2π 相位模糊.

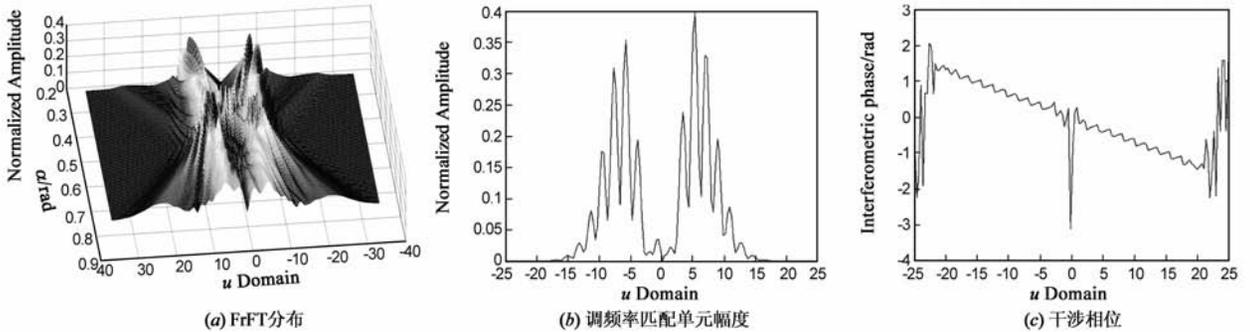


图5 微动目标DPCA后FrFT域输出包络

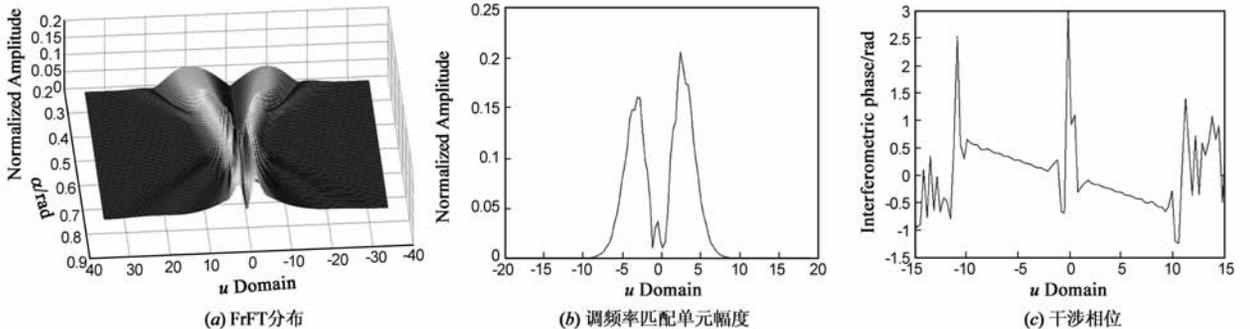


图6 微动目标DPCA后FrFT域输出包络

同样将 2Hz 微动目标的相应结果仿真图呈现于图 6. 由于 2Hz 微动干扰的 FrFT 输出能量大部分集中在对消零点附近, 因此能量损失相对于 4Hz 微动干扰的情况要严重一些, 从图 6(b) 的输出分布以及旋转角匹配单元内包络的情况也可以看得出来. 但是图 6(c) 中的干涉相位不受幅度影响, 仍然符合式的结果. 可见此时微动干扰只能从 DPCA 残差图上形成能量保护, 不能在干涉相位上对伴随保护的目标形成保护.

另外这两种条件下的仿真, 各多普勒扩展分量均未超出 GMTI 最大速度探测范围, 因此干涉相位没有发生 2π 的折叠. 因此各分量经过方位位置校正后, 最终的显示结果会使得各分量聚集在同一方位位置上.

图 7 则仿真演示了当微动干扰的调制量 A_m 增大, 使得多个分量频移所形成的等效跨航迹向速度超出 GMTI 最大速度探测范围时, 错误的跨航迹向速度分量估计及方位位置校正后的结果.

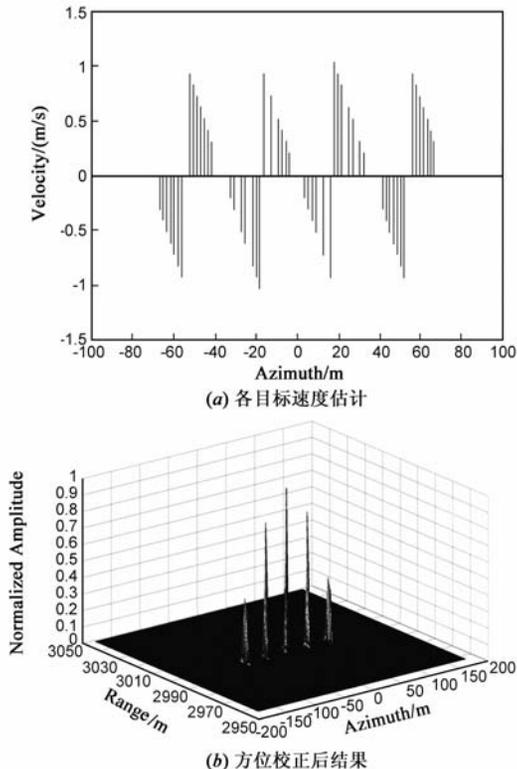


图 7 干涉相位发生缠绕的速度估计及位置校正

因此微动干扰对基于 FrFT 方法的三孔径 SAR/GMTI 的影响是复杂的: 一方面取决于微动干扰的参数对输出结果的影响, 另一方面还需要考虑基于 FrFT 的 GMTI 对动目标的检测方式——对同一距离单元内多个运动目标的处理方式. 综合上述分析, 微动干扰要对 SAR/GMTI 形成有效干扰, 一方面需要一定的干扰功率, 使得至少有部分边频分量的 FrFT 输出峰值与被保护目标的峰值相当; 另一方面调制频率不能过小, 以避免能量过于集中在 DPCA 对消的零点位置; 最后还

要保证扩展的边频分量最好大于 GMTI 的最大速度检测范围, 使得经过方位位置校正及对动目标参数的匹配滤波后, 在方位向上形成一系列分布的多个不同速度的动目标.

本文主要是从理论上研究了微动干扰的特性, 因此并未考虑杂波特性和噪声特性以及具体的多动目标同时存在时所采取的检测策略. 这也是今后需要在工作中进一步完善的.

4 结论

本文从分数阶傅里叶变换的特性入手, 根据基于该方法的 SAR/GMTI 的物理意义及微动类型干扰的多普勒特性, 得到了微动特性在这种方法下的幅度响应特性及干涉相位特性, 并初步分析了 FrFT 平面上其他单元内幅度特性的变化趋势. 从分析结果来看, 微动特性的干扰具有干扰 SAR/GMTI 的潜力, 文章通过一系列的仿真验证了分析的正确性, 同时也结合以上的理论分析和仿真结果探讨此时干扰参数应该如何选择的问题.

由于该领域研究尚浅, 因此本文也只是针对理想情况和特定输出单元进行了探讨, 不足之处需要在深入研究中逐步完善.

参考文献

- [1] Rüegg M, Meier E, Nüesch D. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2): 293 - 304.
- [2] 刘阳, 王雪松, 代大海, 王涛, 李永祯. 对 SAR 的余弦调相转发干扰 [J]. 信号处理, 2009, 58(3): 362 - 367.
LIU Yang, WANG Xue-song, DAI Da-hai, WANG Tao, LI Yong-zhen. A repeater jamming with cosinusoidal phase modulation to SAR [J]. Signal Processing, 2009, 58(3): 362 - 367. (in Chinese)
- [3] 陈思伟, 代大海, 李永祯, 王雪松. SAR 二维余弦调相转发散射波干扰原理 [J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2620 - 2624.
CHEN Si-wei, DAI Da-hai, LI Yong-zhen, WANG Xue-song. The theory of 2-D cosinusoidal phase-modulation repeater scatter-wave jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2620 - 2624. (in Chinese)
- [4] 陈思伟, 王雪松, 刘阳, 代大海, 邢世其. 合成孔径雷达二维余弦调相转发干扰研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1862 - 1866.
CHEN Si-wei, WANG Xue-song, LIU Yang, DAI Da-hai, XING Shi-qi. The 2-D cosinusoidal phase modulation repeater Jamming of SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1862 - 1866. (in Chinese)

- [5] 孙光才,周峰,邢孟道.一种 SAR-GMTI 的无源压制性干扰方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(1): 39-44.
SUN Guang-cai, ZHOU Feng, XING Meng-dao. New passive barrage jamming method for SAR-GMTI [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 39-44. (in Chinese)
- [6] Chiu S, Livingstone C. A Comparison of Displaced Phase Centre Antenna and Along-track Interferometry Techniques for RADARSAT-2 Ground Moving Target Indication[R]. Ottawa: Defence R&D Canada - Ottawa, 2005.
- [7] Chiu S. Two-Channel SAR-GMTI via Fractional Fourier Transform[R]. Ottawa: Defence R&D Canada - Ottawa, 2004.
- [8] 陈兴华. FrFT 与 SAR 动目标检测和成像[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
CHEN Xing-hua. SAR Moving Target Detection and Imaging with FrFT [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [9] 史洪印,周荫清.一种改进的三通道 SAR 地面运动目标指示方法[J].遥测遥控,2009,30(3): 35-40.
SHI Hong-yin, ZHOU Yin-qing. An improved method of three-channel SAR ground moving target indication [J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2009, 30(3): 35-40. (in Chinese)
- [10] 孙泓波,顾红,苏为民,刘国岁.利用分数阶 Fourier 域滤波的机载 SAR 多运动目标检测[J].航空学报,2002,23(1): 33-37.

SUN Hong-bo, GU Hong, SU Wei-min, LIU Guo-sui. Using the filtering in fractional Fourier domain for airborne SAR multiple moving targets detection [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2002, 23(1): 33-37. (in Chinese)

- [11] 邓兵,陶然,曲长文.分数阶 Fourier 域中多分量 chirp 信号的遮蔽分析[J].电子学报,2007,35(6): 1094-1098.
DENG Bing, TAO Ran, QU Chang-wen. Analysis of the shading between multicomponent chirp signals in the fractional Fourier domain [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1094-1098. (in Chinese)

作者简介



刘 阳 男,1979 年出生于湖南长沙.2001 年和 2003 年在国防科学技术大学电子科学与工程学院分别获得工学学士和工学硕士学位.现为国防科技大学博士研究生,主要研究方向为 SAR 对抗及仿真.

E-mail: liuyang_hn_cn@gmail.com



王雪松 男,1972 年出生于内蒙古包头,工学博士,国防科学技术大学教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,IEEE 会员,“三遥”分会委员.主要从事导弹攻防对抗技术、雷达目标识别和新体制雷达技术等领域的研究工作.

E-mail: wxs1019@vip.sina.com