

## 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法

杨金禄\* 单涛 陶然

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 增加相参积累时间是提高数字电视辐射源雷达探测能力的主要途径,但目标的速度和加速度导致的距离徙动和多普勒徙动限制了相参积累时间的进一步增加。该文给出了外辐射源雷达中匀加速运动目标的回波模型,分析了目标速度和加速度对相参积累的影响,提出了基于包络插值和分数阶傅里叶变换的数字电视辐射源雷达徙动补偿算法。仿真结果表明,该算法可有效补偿长时间积累和目标运动导致的距离徙动和多普勒徙动,提高了相参积累增益,从而使相参积累时间不再受目标速度和加速度的限制。

**关键词:** 外辐射源雷达; 相参积累; 包络插值; 分数阶傅里叶变换; 徙动补偿

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0407-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00414

## Method of Migration Compensation in Coherent Integration for Digital TV Based Passive Radar

Yang Jin-lu Shan Tao Tao Ran

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Increasing integration time is the main approach to improve performance of digital TV based passive radar, but the range and Doppler migration caused by velocity and acceleration of the targets restrict the coherent integration time. This paper presents the echo signal model of the moving targets in uniform acceleration for passive radar, and analyzes the influence of velocity and acceleration, and then proposes a new migration compensation algorithm based on envelope interpolation and fractional Fourier transform for digital TV based passive radar. Simulation results show that the proposed algorithm can efficiently compensate the range and Doppler migration caused by long integration time and moving targets, and the coherent integration gain is improved, so the constraint of integration time limited by velocity and acceleration is removed.

**Key words:** Passive radar; Coherent integration; Envelope interpolation; Fractional Fourier transform; Migration compensation

### 1 引言

外辐射源雷达利用广播、电视、通信等非合作发射信号作为辐射源,具有一定的反隐身、反低空突袭和隐蔽能力<sup>[1]</sup>,成为近年来国内外研究的热点之一。在我国,数字电视将逐步取代模拟电视,同时数字电视信号具有大带宽、信号稳定等优点,因此基于数字电视的外辐射源雷达具有重要的研究意义<sup>[2]</sup>。外辐射源雷达使用的信号并非为雷达专门设计,因此提取回波中的目标信息成为信号处理的难点。为了探测远距离的微弱目标,通常采用长时间相参积累的方法。随着积累时间的增加,目标的距离和多普勒频率将跨越多个距离和多普勒单元,导致目标能量分散,降低相参积累增益<sup>[3]</sup>。此外,对于高速加速运动目标,其距离和多普勒频率在较短的

积累时间内仍会有较大的变化,同样会影响积累效果<sup>[4]</sup>。数字电视信号的带宽较模拟电视显著提高,其较高的距离分辨率更易受距离徙动的影响。因此,研究数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法成为提高高速加速运动目标和微弱目标探测能力的关键问题。

文献[5]提出了在成像雷达中使用包络对齐方法补偿目标运动引起的距离徙动,近年来国内外学者在距离徙动补偿方面也进行了大量的研究工作<sup>[4,6-9]</sup>。在多普勒徙动补偿方面,针对二次相位信号存在多种补偿方法<sup>[10,11]</sup>。但是,上述距离和多普勒徙动补偿算法均是针对 SAR, ISAR 和脉冲雷达而设计,应用于外辐射源雷达特别是数字电视辐射源雷达中,此前未见报道。本文首先给出了外辐射源雷达匀加速运动目标的回波模型,分析了目标速度、加速度及双基地配置对相参积累的影响,在此基础上提出基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法,最后给出了仿真结果和相关结论。

2010-04-23 收到, 2010-09-23 改回

国家部委基金资助课题

\*通信作者: 杨金禄 yangjl@bit.edu.cn

## 2 外辐射源雷达中匀加速运动目标的回波模型

假设外辐射源雷达的双基地配置如图1所示, 其中 $T_x$ 为发射站位置,  $R_x$ 为接收站位置,  $T_g$ 为目标。设初始时刻目标位于 $O$ 点, 目标沿双基地角平分线匀加速运动, 速度为 $v_0$ , 加速度为 $a$ ,  $t$ 时刻运动到 $O'$ 点。  $R_{T0}$ 和 $R_T$ 分别为初始时刻和 $t$ 时刻目标距发射站的距离,  $R_{R0}$ 和 $R_R$ 分别为初始时刻和 $t$ 时刻目标距接收站的距离,  $\beta_0$ 为初始时刻的双基地角,  $L$ 为基线距离。

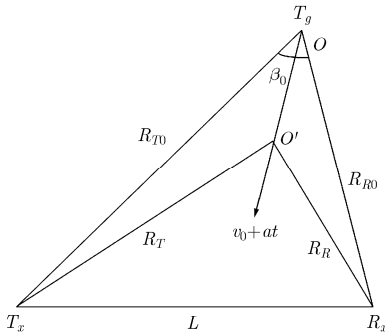


图1 外辐射源雷达的双基地配置

由余弦定理可得

$$R_T = \sqrt{R_{T0}^2 + \left(\int_0^t (v_0 + at) dt\right)^2 - 2R_{T0} \left(\int_0^t (v_0 + at) dt\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \quad (1)$$

$$R_R = \sqrt{R_{R0}^2 + \left(\int_0^t (v_0 + at) dt\right)^2 - 2R_{R0} \left(\int_0^t (v_0 + at) dt\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \quad (2)$$

利用式(1)和式(2)可得双基地雷达距离和为

$$\begin{aligned} R_{\text{sum}} &= R_T + R_R \\ &= \sqrt{R_{T0}^2 + \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right)^2 - 2R_{T0} \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \\ &\quad + \sqrt{R_{R0}^2 + \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right)^2 - 2R_{R0} \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \end{aligned} \quad (3)$$

则回波相对于直达波的时延 $\tau$ 与距离和的关系为

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{R_{\text{sum}} - L}{c} \\ &= \left[ \sqrt{R_{T0}^2 + \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right)^2 - 2R_{T0} \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{R_{R0}^2 + \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right)^2 - 2R_{R0} \left(v_0 t + \frac{1}{2} at^2\right) \cos \frac{\beta_0}{2}} - L \right] / c \end{aligned} \quad (4)$$

双基地雷达中的多普勒频率为<sup>[12]</sup>

$$f_d = -\frac{1}{\lambda} \frac{dR_{\text{sum}}}{dt} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5), 可得

$$\begin{aligned} f_d &= -\frac{v_0 + at}{\lambda} \left\{ \left[ \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 - R_{T0} \cos \frac{\beta_0}{2} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \sqrt{R_{T0}^2 + \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \right)^2 - 2R_{T0} \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \right]^{1/2} \right. \\ &\quad \left. + \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 - R_{R0} \cos \frac{\beta_0}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{R_{R0}^2 + \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \right)^2 - 2R_{R0} \left( v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \right) \cos \frac{\beta_0}{2}} \right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

对式(4)和式(6)在 $t=0$ 处进行泰勒展开, 并忽略二次及以上项, 可得

$$\tau \triangleq \tau_0 + a_\tau t \approx \left( \frac{R_{T0} + R_{R0} - L}{c} \right) + \left( \frac{-2v_0 \cos \frac{\beta_0}{2}}{c} \right) t \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_d &\triangleq f_{d0} + a_f t \approx \left( \frac{2v_0 \cos \frac{\beta_0}{2}}{\lambda} \right) \\ &\quad + \frac{1}{\lambda} \left( 2a \cos \frac{\beta_0}{2} - \frac{v_0^2 \sin^2 \frac{\beta_0}{2}}{R_{T0}} - \frac{v_0^2 \sin^2 \frac{\beta_0}{2}}{R_{R0}} \right) t \end{aligned} \quad (8)$$

则回波可表示为

$$r(t) = A_0 s(t - \tau_0 - a_\tau t) \exp(j2\pi f_{d0} t) \exp(j2\pi a_f t^2) \quad (9)$$

其中 $A_0$ 为幅度常数,  $s(t)$ 为接收站接收的直达波。

由式(9)可以看出, 由于 $a_\tau$ 和 $a_f$ 的存在, 回波的时延和多普勒频率不再固定不变, 而会随着时间变化, 即为距离徙动和多普勒徙动。徙动的程度与积累时间成正比, 同时也与目标的速度、加速度和双基地角等因素有关, 其中距离徙动主要由速度引起, 而多普勒徙动主要由加速度引起, 并且当目标减速运动时( $a < 0$ )多普勒徙动尤为明显。通过模拟不同速度和加速度的运动目标, 分析数字电视辐射源雷达中距离徙动和多普勒徙动对相参积累的影响。加速度为零时, 不同速度引起的距离徙动如图2所示, 可见随着速度的增加, 积累后的距离主瓣逐渐展宽, 同时积累增益显著下降。速度为零时, 不同加速度引起的多普勒徙动如图3所示, 随着加速度的增加, 积累后的多普勒频率主瓣逐渐展宽, 同样导致积累增益显著降低。因此, 当积累时间较长且目标速度和加速度较大时, 距离徙动和多普勒徙动将严重影响积累效果, 必须采用适当方法进行补偿。

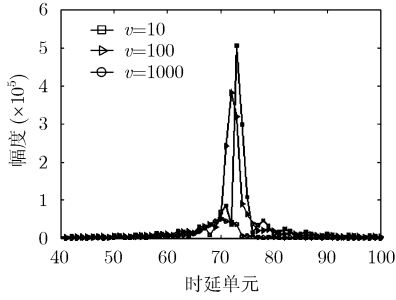


图2 速度导致的距离徙动

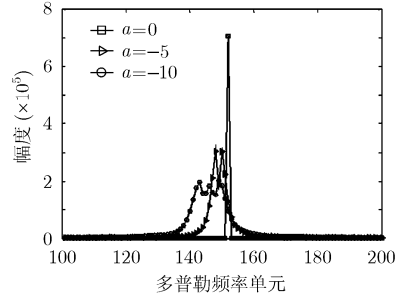


图3 加速度导致的多普勒徙动

### 3 基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法

针对上节中描述的距离徙动和多普勒徙动对相参积累增益的影响, 本文提出数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法, 并给出适用于数字电视辐射源雷达的补偿算法框图和相应处理流程。

#### 3.1 基于分数阶傅里叶变换的多普勒徙动补偿算法

定义在  $t$  域的函数  $x(t)$  的  $p$  阶分数阶傅里叶变换为<sup>[13]</sup>

$$X_p(u) = A_p \exp(j\pi u^2 \cot \alpha) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \exp(j\pi t^2 \cot \alpha) \exp(-j2\pi t u \csc \alpha) dt \quad (10)$$

其中  $A_p = \sqrt{1 - j \cot \alpha}$ ,  $\alpha = p\pi/2$ ,  $p \neq 2n$ ,  $n$  是整数。式(10)也可用 FFT 表示为

$$X_p(u) = A_p \exp(j\pi u^2 \cot \alpha) \text{FFFT}_t \{x(t) \exp(j\pi t^2 \cot \alpha)\} \quad (11)$$

与传统 FFT 所形成的窄带滤波器组不同,  $p$  阶分数阶傅里叶变换实际是一组扫频速率为  $\cot(p\pi/2)$  的扫频滤波器组, 可实现对调频率  $-\cot(p\pi/2)$  的二次相位项进行补偿。回波的  $p$  阶分数阶傅里叶变换为

$$R_p(u) = A_0 A_p \exp(j\pi u^2 \cot \alpha) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} [s(t - \tau_0 - a_f t) \exp(j2\pi f_{d0} t) \cdot \exp(j2\pi a_f t^2) \exp(j\pi t^2 \cot \alpha) \cdot \exp(-j2\pi t u \csc \alpha)] dt \quad (12)$$

可见, 当  $\cot \alpha = -2a_f$  时, 多普勒频率徙动项  $\exp(j2\pi a_f t^2)$  的影响可完全消除。此时,

$$p = \frac{2}{\pi} \cot^{-1}(-2a_f) \quad (13)$$

#### 3.2 基于包络插值的距离徙动补偿算法

当式(13)满足时,  $a_f$  的影响被消除, 此时回波可进一步表示为

$$r(t) = A_0 s(t - \tau_0 - a_f t) \exp(j2\pi f_{d0} t) \quad (14)$$

假设积累时间为  $T$ , 将长度为  $T$  的回波分为  $N_1$  端,

每段长度为  $T_r$ 。  $T_r$  满足

$$T_r = \frac{T}{N_1} \ll \frac{c}{2Bv_{\max}} \quad (15)$$

其中  $B$  为数字电视信号带宽,  $v_{\max}$  为目标最大可能速度,  $c$  为光速。式(15)表示在每段信号的持续时间内, 回波信号的距离徙动远小于雷达的距离分辨率, 因此在满足式(15)的条件下, 每一段内目标的距离徙动可以忽略, 则第  $i$  段回波信号的时延为

$$\tau_i = \tau_0 + a_f i T_r, \quad i = 0, 1, \dots, N_1 - 1 \quad (16)$$

令  $t_i = t - i T_r$ , 则第  $i$  段回波信号可表示为

$$r(i, t) \approx A_0 s(t_i - \tau_i) \exp[j2\pi f_{d0} (t_i + i T_r)] \quad (17)$$

如果对各段回波信号做时延, 则第  $i$  段回波信号为

$$r'(i, \hat{t}) = r(i, \hat{t} - \Delta t_i) = A_0 s(\hat{t}_i - \tau_i - \Delta t_i) \cdot \exp[j2\pi f_{d0} (\hat{t}_i + i T_r - \Delta t_i)] \quad (18)$$

其中  $\Delta t_i$  为第  $i$  段回波信号与第 0 段信号的相对时延估计值, 且有  $\Delta t_i = -a'_f i T_r$ ,  $a'_f$  为时延变化率的估计值。当  $a'_f = a_f$  时, 各段回波的距离徙动可完全消除。此时第  $i$  段回波信号为

$$r'(i, \hat{t}) = A_0 s(\hat{t}_i - \tau_0) \exp[j2\pi f_{d0} (\hat{t}_i + i T_r - \Delta t_i)] \quad (19)$$

令  $\hat{t} = \hat{t}_i + i T_r$ , 并且通常情况下  $T_r \ll T$ , 则积累时间内的回波信号为

$$r'(\hat{t}) \approx A_0 s(\hat{t} - \tau_0) \exp[j2\pi f_{d0} (1 + a'_f) \hat{t}] \quad (20)$$

由此可见, 处理后的回波包络不再随时间变化, 同时相位与  $\hat{t}$  的线性关系没有改变, 因此对相参积累效果没有影响。

在实际应用中, 信号都是离散采样得到的, 由于采样间隔的影响, 不可能实现精确的时延补偿。本文采用线性插值的方法, 弥补采样间隔造成的幅度和相位信息的丢失, 重构信号的包络来实现时延补偿。令  $\Delta m = \text{floor}(\Delta t_i / T_s)$ , 其中  $\text{floor}(\bullet)$  表示向  $-\infty$  方向取整,  $T_s$  为采样率, 插值公式为<sup>[11]</sup>

$$r'(i, m) = r(i, m + \Delta m) + \frac{r(i, m + \Delta m + 1) - r(i, m + \Delta m)}{T_s} \cdot (\Delta t_i - \Delta m T_s) \quad (21)$$

式(21)表示对分段后的每一段回波信号, 根据时延估计值确定插值所使用的整数采样点位置, 然后按照线性关系计算出时延估计值所对应的回波复包络。

### 3.3 基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法

分数阶傅里叶变换对多普勒徙动的补偿和包络插值对距离徙动的补偿需要获得准确的加速度和速度信息, 而在实际应用中这是不可能的。但是通过对预计观测目标的类型等先验信息的判断, 可以确定目标的加速度范围和速度范围, 进而确定需要补偿的时延变化率和多普勒变化率的范围。然后按照该范围内的一定搜索步长进行多普勒徙动补偿和距离徙动补偿。

基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法的流程图如图 4 所示。其具体处理流程如下:

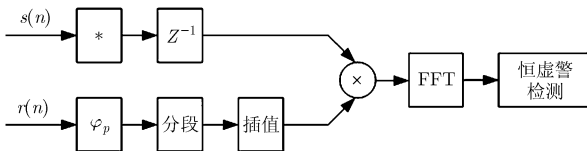


图 4 基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法

(1) 将回波的每一点乘上系数  $\varphi_p$ , 其中  $\varphi_p = \exp[j\pi(nT_s)^2 \cot \alpha]$ ;

(2) 将  $N$  点的回波分为  $N_1$  段, 每段  $N_2$  点, 其中  $N_2$  满足  $N_2 \ll c/(4Bv_{\max}T_s)$ ;

(3) 对每一段回波按照式(21)进行插值;

(4) 将直达波共轭后延迟, 并与插值后的回波对应相乘;

(5) 对相乘的结果做 FFT;

(6) 对 FFT 后的 2 维结果做恒虚警检测, 估计目标的参数。

## 4 仿真分析

本节通过仿真说明本文提出的徙动补偿算法在数字电视辐射源雷达中的效果。仿真参数: 数字电视信号带宽  $B = 7.56$  MHz, 基带采样率  $f_s = 10$  MHz, 双基地基线长度  $L = 13$  km, 双基地角  $\beta_0 = 60^\circ$ , 目标速度  $v_0 = 1000$  m/s, 目标加速度  $a = -10$  m/s<sup>2</sup>, 积累时间  $T = 400$  ms。

图 5 表示未补偿的积累结果及其投影图, 由于距离徙动和多普勒徙动的影响, 积累后的主瓣在时延维和多普勒频率维均大幅度展宽, 主瓣分散到多个单元, 导致峰值不明显。图 6 表示分数阶傅里叶变换补偿后的积累结果及其投影图, 此时多普勒徙动被消除, 但是积累结果受距离徙动影响较大, 导致能量不能聚集。图 7 表示包络插值后的积累结果及其投影图, 此时时延维的能量能够聚集到一起, 但是多普勒徙动仍然使能量分散到多个多普勒频率单元, 存在多个峰值, 影响目标检测。图 8 表示包络插值和分数阶傅里叶变换同时补偿的积累结果及其投影图, 此时距离徙动和多普勒徙动都被消除, 目标在时延-多普勒频率 2 维平面上形成一个明显

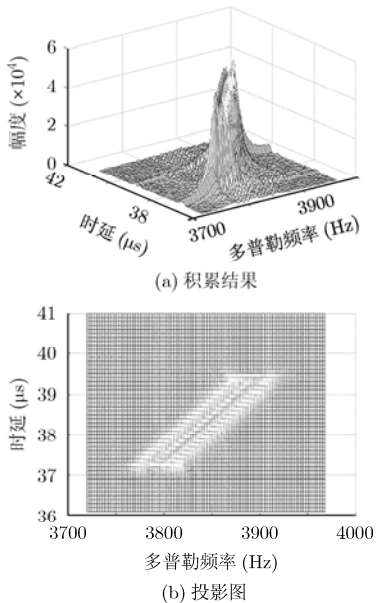


图 5 未补偿的积累结果及其投影图

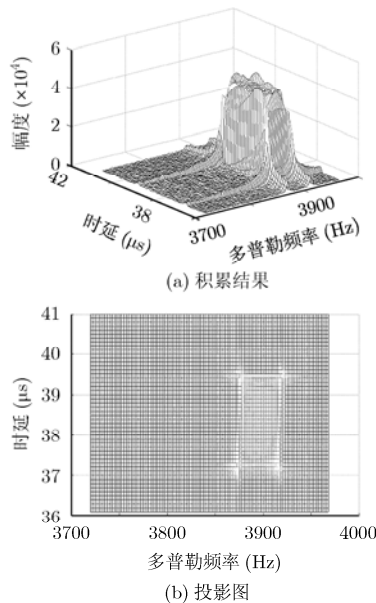


图 6 多普勒徙动补偿后的积累结果及其投影图

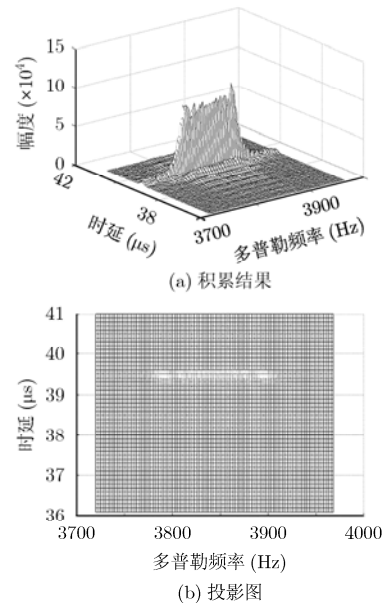


图 7 距离徙动补偿后的积累结果及其投影图

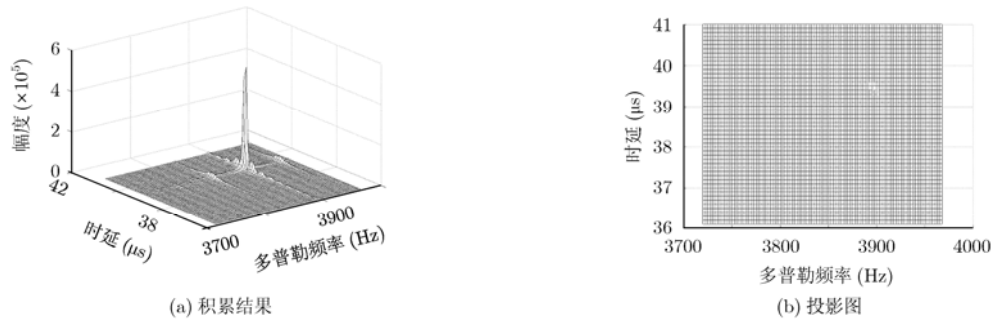


图 8 距离和多普勒徙动同时补偿后的积累结果及其投影图

的峰值, 且峰值较补偿前提高约 10 倍。可见, 本文提出的基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿能够有效补偿目标的距离徙动和多普勒徙动, 使目标在 2 维平面上形成一个明显的峰值, 提高积累增益。

## 5 结论

数字电视信号大带宽的特点使其距离分辨率较高, 当目标速度和加速度较大时, 会带来明显的距离徙动和多普勒徙动, 严重限制了数字电视辐射源雷达的积累时间, 不能有效提高积累增益, 降低了目标的探测距离, 因此在相参积累前必须进行距离徙动和多普勒徙动的补偿。本文提出的基于包络插值和分数阶傅里叶变换的徙动补偿算法对距离徙动和多普勒徙动在积累前进行补偿, 使积累时间的增加不再受目标徙动的限制, 使目标在时延-多普勒频率 2 维平面上形成一个明显的峰值, 提高了目标的积累增益, 为提高数字电视辐射源雷达的探测性能提供了一种有效的方法。

## 参考文献

- [1] Griffiths H D and Baker C J. Passive coherent location radar systems. Part 1: performance predication[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2005, 152(3): 153-159.
- [2] Saini R and Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2005, 152(3): 133-142.
- [3] 保铮. 雷达信号的长时间积累[C]. 第七届全国雷达学术年会, 南京, 1999: 9-15.  
Bao Zheng. Long-term integration of radar signal[C]. The 7th Chinese Radar Conference, Nanjing, 1999: 9-15.
- [4] 张焕颖, 张守宏, 李强. 高速运动目标的 ISAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1789-1793.  
Zhang Huan-ying, Zhang Shou-hong, and Li Qiang. ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(8): 1789-1793.
- [5] Chen C C and Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 1-14.
- [6] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 一种改进的基于 DEM 的机载重轨干涉 SAR 运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5):

1090-1094.

Tang Xiao-qing, Xiang Mao-sheng, and Wu Yi-rong. An improved topography-dependent motion compensation approach for airborne repeat-Pass interferometric SAR systems[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(5): 1090-1094.

- [7] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, Wu Ren-biao, Zhou Feng, and Bao Zheng. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870-2883.
- [8] Callow H J, Hayes M P, and Gough P T. Motion-compensation improvement for widebeam, multiple-receiver SAS systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(3): 262-268.
- [9] 陈远征, 朱永锋, 赵宏钟, 付强. 基于包络插值移位补偿的高速运动目标的积累检测算法研究[J]. 信号处理, 2004, 20(4): 387-390.  
Chen Yuan-zheng, Zhu Yong-feng, Zhao Hong-zhong, and Fu Qiang. Detection algorithm research of high velocity moving target based on the envelope interpolation[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(4): 387-390.
- [10] Yasotharan A and Thayaparan T. Time-frequency method for detecting an accelerating target in sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1289-1310.
- [11] Xia Xiang-gen. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 40(11): 3122-3133.
- [12] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 75-80.  
Yang Zhen-qi, Zhang Yong-shun, and Luo Yong-jun. Bistatic (Multistatic) Radar Systems[M]. Beijing: National defense industry Press, 1998: 75-80.
- [13] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 12-15.  
Tao Ran, Deng Bing, and Wang Yue. Fractional Fourier Transform and Its Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 12-15.

杨金禄: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。

单涛: 男, 1969 年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理。

陶然: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为分数阶傅里叶变换理论及应用、通信与信息系统、信息安全与对抗。