

基于 GPS 信号的双基 SAR 数值距离徙动成像算法

甄 杰^{①②} 张振华^③ 吴顺君^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

^③(中国航天科技集团 704 所 北京 100076)

摘 要: 非对称星-机双基 SAR 成像算法研究是双基 SAR 研究的难点问题之一。该文针对以 GPS 卫星为照射源的连续波星-机双基 SAR, 提出一种基于数值计算的快速双基距离徙动成像算法(RMA)。此方法利用瞬时多普勒频率法得到系统回波信号精确的 2 维频域解析式, 并用数值方法得到 RMA 算法所用的匹配函数和插值函数。此算法既有 RMA 算法速度快, 精度高的特点, 又有后向投影(BP)算法适用范围广的特点。

关键词: 全球定位系统; 双基合成孔径雷达; 距离徙动成像算法

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2039-05

GPS Signal Based Numeric Range Migration Algorithm of Bistatic SAR

Zhen Jie^{①②} Zhang Zhen-hua^③ Wu Shun-jun^①

^①(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Information Science Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

^③(No.704 Institute, China Aerospace Science and Technology Corp., Beijing 100076, China)

Abstract: Research of asymmetric spaceborne-airborne bistatic SAR imaging algorithm is one of difficult issues in field of bistatic SAR. In this paper, a fast numerical Range Migration Algorithm (RMA) is proposed for GPS signal based continuous wave spaceborne-airborne bistatic SAR. A two dimensional precise analytic expression in frequency domain of system response signal is deduced by using approach of instantaneous Doppler wavenumber, and the match function and interpolation function of the proposed algorithm can be obtained numerically. The proposed algorithm has the characteristics of fast speed and high precision of RMA. In addition, it also has the same wide application range compared with Back Projection (BP) algorithm.

Key words: Global Positioning System(GPS); Bistatic Synthetic Aperture Radar (BiSAR); Range Mitigation Algorithm(RMA)

1 引言

以机载和分布式小卫星 SAR 为代表的双基合成孔径雷达(BiSAR)与单基 SAR 相比, 具有隐蔽、抗干扰、生存能力强, 可获得地物的非后向散射系数, 成本低等优点。基于导航卫星、通信卫星、电视、广播等非合作信号源的双/多基地雷达系统更是显示了极大的优点。英国的 Cherniakov 等人于 2002 年提出一种以全球导航卫星系统(GNSS)卫星为信号照射源的星-表双基 SAR(SS-BSAR, Space-Surface Bistatic SAR)系统^[1], 详细分析了该系统的性能、特点, 并利用 GLONASS 卫星作为信号照射源进行了双基实测数据处理^[2,3]。Usman 分析了基于

GPS 散射信号对地成像所面临的系统信噪比低和直达波将使图像模糊两大困难, 并提出了解决办法^[4]。文献[5]分析了 GPS 卫星信号作为无源雷达信号的特性。文献[6]对基于 GPS 信号的 SS-BSAR 系统的分辨率、信噪比、信干比进行了详细的分析, 并提出提高信干比的方法。上述文献多集中讨论 SS-BSAR 系统的信号及系统信噪比特性, 有关该复杂双基 SAR 系统成像算法的研究非常有限。在双基 SAR 成像算法方面, 文献[7]用近似方法得到双基 SAR 的 2 维频域传递函数, 并在此基础上设计类似于单基的快速成像算法。文献[8]利用数值计算方法得到双基 SAR 系统适当近似后的 2 维频域相应函数, 缺点是运算量很大。文献[9]把双基回波数据经过补偿变为单基回波数据, 然后按单基 SAR 成像方法进行成像, 该方法存在的问题是补偿函数 2 维空

2008-11-26收到, 2009-06-08改回

国家自然科学基金(40871166)和中国博士后科学基金(20070411120)资助课题

变很难精确实现。

本文针对飞机接收非合作 GPS 连续波信号的平行非等速 SS-BSAR 系统, 研究适用于该系统的快速成像算法。首先, 基于瞬时多普勒频率方法^[10]推导出该平行非等速双基 SAR 系统点目标响应函数的精确 2 维频域表达式。基于近似后的频域点目标响应函数, 文中给出一种数值 RMA 算法。此算法考虑了连续波对 SAR 成像的影响和频域响应函数的距离线性空变, 算法中用到的多个参数均由数值方法计算得到。最后给出对仿真数据的处理结果。由于本文的数值计算是在已知频域解析表达式基础上通过代入系统参数计算的, 因此运算量不大。

2 SS-BSAR 系统的信号模型

2.1 系统构形

GPS 卫星为距离地面 20000 km 左右的中高轨卫星, 作为信号发射端, 其运行速度在 3000 m/s 量级, 机载接收雷达距离地面高度为数千米, 运行速度为几十米到数百米每秒。设收发平台分别以速度 v_R 和 v_T 匀速直线飞行, 该双基 SAR 系统构形如图 1 所示。假设零时刻收发平台到地面某一点目标 P 的斜视角分别为 θ_{R0} 和 θ_{T0} , 最近距离分别为 R_{BR} 和 R_{BT} 。则经历方位时间 t 后, 收发平台到目标 P 的斜距 $R_R(t)$ 和 $R_T(t)$ 可表示为

$$\begin{cases} R_R(t) = \sqrt{R_{BR}^2 + (v_R t - v_R t_{0R})^2} \\ R_T(t) = \sqrt{R_{BT}^2 + (v_T t - v_T t_{0T})^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $t_{0R} = R_{BR} \tan \theta_{R0} / v_R$, $t_{0T} = R_{BT} \tan \theta_{T0} / v_T$ 。

2.2 回波信号的形式

SAR 回波信号为发射信号的时延, 且回波幅度受地面散射系数、天线等多种因素调制。在常规窄脉冲 SAR 系统中, 发射信号的时宽与重复采样时间相比很短, 可以认为在回波采样时刻雷达是停止不动的, 即满足“走-停-走”模型。GPS 信号不同于常规的线性调频信号, 它发射的是连续伪随机码序列, 常规 SAR 的“走-停-走”模型不再适用, 需要考虑每

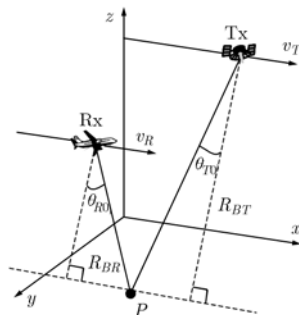


图 1 平行非等速 SS-BSAR 系统构形

次回波采样时间内雷达平台的运动, 因此回波信号应表示为(忽略天线加权的影响)

$$\begin{aligned} s_1(t, \tau) = & \sigma s \left[\tau - \frac{R_R(t + \tau - \tau_0) + R_T(t + \tau - \tau_0)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j2\pi f_c \frac{R_R(t + \tau - \tau_0) + R_T(t + \tau - \tau_0)}{c} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中 f_c 为雷达载频, $\tau_0 = \frac{R_R(t) + R_T(t)}{c}$ 表示 t 时刻目标回波延时。

由文献[11]可推得

$$s_1(t, \tau) \approx \sigma s(\tau - \tau_0) \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \exp[-j2\pi f_d(\tau - \tau_0)] \quad (3)$$

其中第 1 个指数项表示点目标的相位历程, 第 2 个指数项表示由于多普勒频移引入的线性相位, 在成像过程中应当予以校正。

3 回波信号的 2 维频域表达式

3.1 距离、方位傅里叶变换

对式(3)中的 τ 进行傅里叶变换, 回波信号的距离频域表达式为

$$S_2(t, f_r) \approx \sigma S(f_r + f_d) \exp[-j2\pi(f_c + f_r)\tau_0] \quad (4)$$

其中 f_r 表示距离频率, $S(f_r)$ 表示发射信号的频域表达式。由式(4)可见, 由于雷达平台的连续运动, 使单次回波信号的频谱发生移动, 移动量等于多普勒频率 $f_d(t)$ 。

GPS 卫星发射的是连续伪随机码序列, 以 C/A 码为例, 每个序列包含 1023 个码元, 码元脉宽为 $\tau_c = 1/1.023 \times 10^{-6}$ s, 信号带宽等于 1.023×10^6 Hz。其信号频谱形式为

$$C(f_r) = \tau_c \text{sinc}[\tau_c f_r] \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(-j2\pi f_r k \tau_c) \quad (5)$$

其中 $C_k \in [1, -1]$ 为 C/A 码序列的取值。从式(5)可以看出, C/A 码的频谱主要由码元的频谱决定, 每个码元的取值决定了频谱的细节。将式(5)代入式(4), GPS 信号回波的距离频域表达式为

$$\begin{aligned} S_2(t, f_r) \approx & \sigma \text{sinc}[\tau_c(f_r + f_d)] \exp[-j2\pi(f_c + f_r)\tau_0] \\ & \cdot \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp[-j2\pi(f_r + f_d)k\tau_c] \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)中的变量 t 进行方位傅里叶变换(只有第 2 个指数项与 t 有关), GPS 回波信号 2 维频域表达式为

$$\begin{aligned} S_3(f_a, f_r) = & A(f_r) \int \exp \left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{R_T(t) + R_R(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp(-j2\pi f_a t) dt \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $A(f_r)$ 表示式(6)中除第 2 个指数项外的部分。

求解式(7)的积分式是双基成像算法的关键。

3.2 场景中不同点目标的2维频域表达式

考虑图1所示的平行非等速构形SS-BSAR系统,假设GPS卫星和接收飞机在 $t=0$ 时刻都处于正侧视,波束中心照射到场景中心点 P 的横坐标为0,斜距和为 $R_{BT} + R_{BR}$,在任一时刻 t ,雷达到场景中心点的斜距如式(1)。

利用驻定相位原理对式(7)进行积分,并假设驻相点处的时间为 \tilde{t} 。以0时刻为基准,当GPS卫星和飞机均运动时间 \tilde{t} 后,其几何关系如图2所示,从中可以得出

$$\left. \begin{aligned} R_R(\tilde{t}) &= R_{BR} \cos \theta_R + v_R \tilde{t} \sin \theta_R \\ R_T(\tilde{t}) &= R_{BT} \cos \theta_T + v_T \tilde{t} \sin \theta_T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

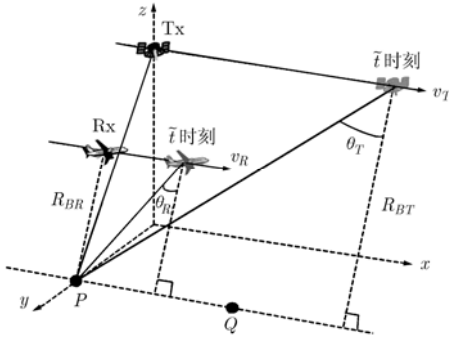


图2 $t = \tilde{t}$ 时刻SS-BSAR系统的几何关系

式(7)的积分结果可表示为

$$S_3(f_a, f_r) = A(f_r) \cdot \exp \left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{(R_{BR} \cos \theta_R + R_{BT} \cos \theta_T)}{c} \right] \quad (9)$$

其中 θ_T 和 θ_R 是多普勒频率 f_a 的函数。至此得到了场景中心点目标的2维频域响应函数的表达式。

场景中不同距离单元的点目标(如图2中 y 轴上的点目标),其收、发最近距离不同,2维频域表达式的形式和式(9)完全一致。

场景中不同方位单元的点目标(如图2中 Q 点),其频域表达式与(9)式不同。把 Q 点的斜距历程作2阶近似后其2维频域表达式可表示为

$$S_q(f_a, f_r) = \exp(-j\Delta\phi_q) \int S_3(t - t_q, f_r) \exp[-j2\pi\Delta f_{dq}(t - t_q) + j\pi\Delta k_q(t - t_q)^2 - j2\pi f_a t] dt \quad (10)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_q &= \pi h_x^2 / (\lambda R_{BT}) \\ \Delta k_q &= h_x^2 v_T^2 / (\lambda R_{BT}^3) \\ \Delta f_{dq} &= v_T h_x / \left(\lambda \sqrt{R_{BT}^2 + h_x^2} \right) \\ h_x &= (v_T - v_R) \cdot x_q / v_R = \Delta v \cdot x_q / v_R \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

从式(10)可以看出, Q 点的多普勒中心频率增加了 Δf_{dq} ,多普勒调频率增加了 Δk_q ,而且初相也不同于 P 点,增加了 $\Delta\phi_q$,这充分体现了此双基系统的方位空变特性。

4 数值RMA(NRMA)成像算法

从上面的推导可知,SS-BSAR系统不但是距离空变的,而且是方位空变的,即地面上不同的点目标具有不一样的系统传递函数。因此,不能用同一个传递函数匹配全部场景的回波,而应把场景分为不同距离和不同方位单元的点目标,分别对这些点目标进行成像处理。下面首先来考虑不同距离向的空变处理方法,然后分析方位向的空变处理方法。

4.1 y 轴上点目标的RMA成像算法

由于 y 轴上的点目标仅有距离空变,无方位空变,故先考虑这些点目标的成像算法。把 y 轴上点目标的频域表达式作关于距离变量的1阶线性近似得:

$$S_4(f_a, f_r) \approx A(f_r) \times \exp[-j\varphi_0(f_r, f_a) - j\rho(f_r, f_a)\Delta R_{B\Sigma}] \quad (12)$$

其中

$$\varphi_0(f_r, f_a) = 2\pi(f_c + f_r) \frac{(R_{BR0} \cos \theta_R + R_{BT0} \cos \theta_T)}{c} \quad (13)$$

表示场景中心点的2维频域响应函数; $\Delta R_{B\Sigma}$ 表示不同点目标相对场景中心点最近距离和的变化量,即 $R_{BT} + R_{BR} = R_{BT0} + R_{BR0} + \Delta R_{B\Sigma}$; $\Delta\varphi(f_r, f_a)$ 表示距离不同的点目标其2维频域响应函数随距离线性空变的系数。

因为RMA算法只能精确处理回波相位函数中随距离线性空变的相位,而单基SAR中空变部分只包含距离的一次项,因此RMA算法对单基SAR是完全精确的。但双基SAR却不然,因为在双基里,空变部分包含距离的高次项,只能忽略,故不精确,如式(12)所示。不过随距离高次(包含2次)空变的相位值一般很小,在一定场景宽度内完全可以忽略,在实际处理中也可以用分距离段处理的方法降低影响。

RMA算法的处理流程如图3所示。

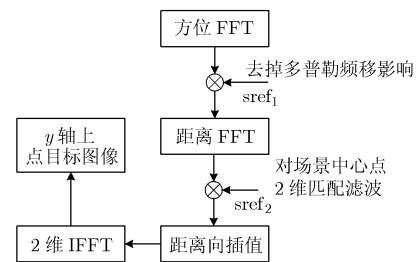


图3 y 轴上点目标的RMA算法

其中 $\text{sref}_1 = \exp[j2\pi f_a(\tau - \tau_0)]$ 表示由于连续波产生的多普勒频移对距离频率的调制; $\text{sref}_2 = \text{conj}[A(f_r) \exp(j\varphi_0)]$ 为场景中心点 (P 点) 的 2 维频域响应函数表达式; 距离向插值是在 2 维频域把 $\rho(f_r, f_a)$ 的距离向非均匀采样进行均匀化处理, 表示为 $\rho(f_r, f_a) \rightarrow \bar{\rho}(f_r, f_a)$ 。上述算法中, 虽然 φ_0 的解析表达式已给出, 但其中有两个未知参数 θ_T 和 θ_R , 且 $\rho(f_r, f_a)$ 的表达式也未知, 而这些参数是 RMA 算法的关键。下面给出解决上述问题的数值计算方法。

(1) φ_0 的计算方法 以场景中心点 P 作为参考点 (0 时刻波束中心指向 P 点), 计算 t 时刻 P 点的收发斜距 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$, 并计算此时的收发斜视角 $\theta_T(t)$ 和 $\theta_R(t)$, 根据多普勒频率计算公式 ($f_{dT} = 2v_T \sin \theta_T / \lambda$, $f_{dR} = 2v_R \sin \theta_R / \lambda$) 计算相应的多普勒频率 $f_{dT}(t)$ 和 $f_{dR}(t)$ 。利用 $\theta_T(t)$, $\theta_R(t)$, $f_{dT}(t)$, $f_{dR}(t)$ 之间的对应关系就可得到多普勒域均匀采样的 $\theta_T(f_a)$, $\theta_R(f_a)$ 取值。

(2) $\rho(f_r, f_a)$ 的计算方法:

步骤1 在 y 轴上取 N 个点目标, 分别计算它们的最短斜距 $R_{B\Sigma_i}$ ($i = 1 \sim N$), 为减小运算量, 目标点的间隔小于聚焦深度即可。相对于场景中心点的变化量为 $\Delta R_{B\Sigma_i} = R_{B\Sigma_i} - R_{B\Sigma_0}$ 。

步骤2 按照上面计算 φ_0 的方法计算每个点目标的 2 维频域相位 φ_i ($i = 1 \sim N$)。

步骤3 计算不同点目标相对于场景中心点 P 的相位变化量 $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0$, 在每个 (f_r, f_a) 坐标处, 通过曲线拟合计算 $\rho(f_r, f_a)$, 满足 $\Delta\varphi_i(f_r, f_a) \approx \rho(f_r, f_a) \Delta R_{B\Sigma_i}$ 。

4.2 不同方位点目标的成像算法

除了 y 轴上的点目标外, 其它点目标的 2 维频域响应函数表达式如式(10)。显然, 与 y 轴上的点目标相比, 增加了随方位坐标变化的初相、多普勒中心频率、多普勒调频率。对成像而言, 主要关心调频率变化。本双基 SAR 系统的方位调频率随方位非线性空变, 由式(11)可知:

$$\Delta k_q = \frac{\Delta v^2 v_T^2}{\lambda R_{BT}^3 v_R^2} x_q^2 \quad (14)$$

对此方位非线性空变项, 现有的变标方法均无法解决, 最简单可行的办法是方位上分块处理。

4.3 运算量分析

本文提出的快速 RMA 算法与传统的后向投影 (Back Projection, BP) 算法都可以应用于类似于 SS-BSAR 的 2 维空变成像系统。但在运算量上, BP 算法的运算量大概是 $O(N^3)$, 其中 N 表示成像像素个数。而本文算法的运算量是在常规 RMA 算法的基础上增加了参数计算, 常规 RMA 算法的运算量为 $O(N^2)$, 参数计算由于只用到地面上稀疏网格上的特征点, 运算量很小, 与 RMA 算法相比可

以忽略。因此本文算法的运算量远小于常规 BP 算法。

5 仿真

5.1 SS-BSAR 系统参数

为了说明本文算法的适用范围, 我们对 GPS 的 C/A 码信号进行仿真, 系统参数如表 1 所示。为了说明此算法对宽幅场景可以一次成像, 在场景中设置了 9 个点, 在地面呈矩形分布, 方位向两两间距 500 m, 距离向两两间距 4000 m, 其坐标如图 4。收发雷达 0 时刻分别位于 $(0, 0, 4000)$ 和 $(0, 0, 2 \times 10^7)$, 单位 m。

5.2 成像结果

利用上面的参数生成一组回波数据, 用本文的方法成像, 其结果如图 5, 其中横坐标为方位采样点, 纵坐标为距离采样点。表 2 为点目标的聚焦性能指标, 其中 PSLR 表示峰值旁瓣比, ISLR 表示积

表 1 仿真参数

仿真参数	GPS 卫星	接收飞机
速度 v	3000 m/s	110 m/s
脉冲宽度 T_p	1 ms(C/A 码)	
载频 f_c	1.575 GHz	
重频 PRF	100 Hz	
信号带宽	1.023 MHz(150 m 距离分辨率)	
信号采样率 f_s	5.115 MHz	
高度 H	20000 km	4 km
斜视角	0	0°
合成孔径长度	480 m	
方位分辨率	2 m	
0 时刻水平基线 hx	0 m	
入射角	15°	45°
最短斜距	20706 km	8.4 km
场景宽度	1 km × 8 km(方位 × 距离)	

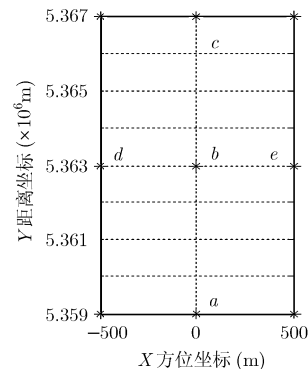


图 4 仿真点目标分布图

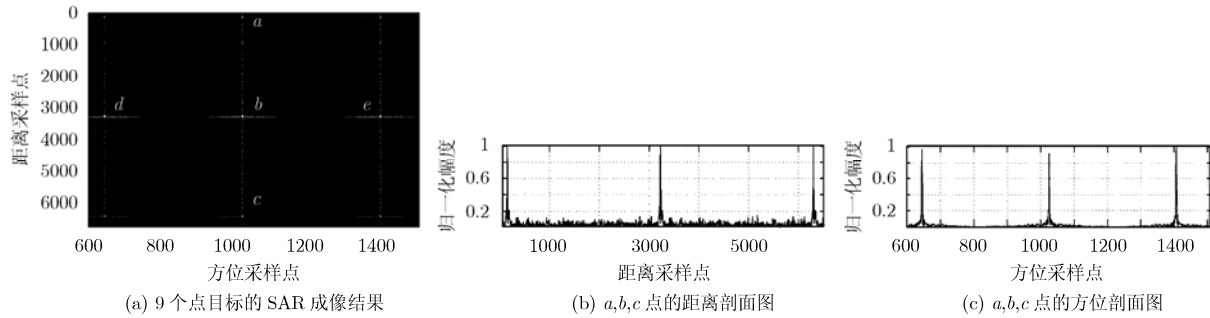


图5 SS-BSAR 系统的点目标成像结果

表2 b, c, d 点目标的脉压性能指标

参数	点 b		点 c		点 d	
	方位	距离	方位	距离	方位	距离
PSLR(dB)	-14.5	-12.5	-13.5	-13.1	-13.1	-13.2
ISLR(dB)	-12.1	-10.1	-11.6	-11.5	-12.3	-11.2
理论分辨率(m)	2	150	2	150	2	150
实际分辨率(m)	2.2	181	2.2	183	2.3	183

分旁瓣比, IRW 表示脉冲宽度。

从图 5 点目标成像结果可以看出, 本文的方法可以对不同方位(d 点, b 点, e 点)和不同距离(a 点, b 点, c 点)单元的点目标进行聚焦。表 2 表明, 聚焦性能和理论值相符。由此可知本文的方法对 SS-BSAR 系统的一块区域可以一次成像。

6 结束语

本文基于瞬时频率的概念, 推导出基于 GPS 连续波信号的非等速平行轨道构形星-机双基 SAR 系统成像算法。首先推导出该系统的 2 维频域表达式, 然后把此表达式作关于最近距离和的 1 阶泰勒展开, 得到一种双基 RMA 成像算法。对 1 阶展开式中的某些参数, 采用曲线拟合的数值方法进行计算。由于本方法与目标点的 2 维频域解析表达式相结合, 因此其运算量远低于其它已有的数值计算方法, 而且可以对宽幅场景一次成像。对于收发速度矢量不平行的双基 SAR 有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Cherniakov M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar perspective and problems[C]. Proc. Int. Conf. Radar, Edinburgh, 2002: 22-25.
- [2] Antoniou M, Saini R, and Cherniakov M. Results of a space-surface bistatic SAR image formation algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3359-3371.
- [3] Cherniakov M, Saini R, and Zuo R, *et al.* Space-surface bistatic synthetic aperture radar with global navigation satellite system transmitter of opportunity-experimental results[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(6): 447-458.
- [4] Usman M and Armitage D W. A remote imaging system based on reflected GPS signals[C]. International conference on advances in space technologies, Islamabad, Pakistan, 2006: 173-178.
- [5] 杨进佩, 刘中, 朱晓华. 用于无源雷达的 GPS 卫星信号性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5):1083-1086.
Yang Jin-pei, Liu Zhong and Zhu Xiao-hua. The performances analysis of GPS signals for passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1083-1086.
- [6] He X, Cherniakov M, and Zeng T. Signal detectability in SS-BSAR with GNSS non-cooperative transmitters[J]. *IEE Proc., Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 124-132.
- [7] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(9): 2044-2055.
- [8] Bamler R and Boerner E. On the use of numerically computed transfer functions for processing of data from bistatic SARs and high squint orbital SAR[C]. IGARSS2005, Seoul, Korea, July, 2005: 1051-1055.
- [9] Aria D D, Guarnieri A M, and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [10] Zhang Zhenhua, Xing Mengdao, and Ding Jinshan, *et al.* Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [11] De Wit J J M, Meta A, and Hoogeboom P. Modified range-doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 83-87.

甄 杰: 女, 1969年生, 博士后, 副教授, 研究方向为双基SAR成像及GNSS信息处理。

张振华: 男, 1977年生, 博士, 研究方向为雷达信号处理及双基SAR成像算法。

吴顺君: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统及雷达信号处理与检测。