

频率源稳定性对 BiSAR 成像的影响研究¹

汤子跃* ** 张守融*

*(中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家级重点实验室 北京 100080)

** (空军雷达学院重点实验室 武汉 430010)

摘要: 高稳定度的频率源是实现双站合成孔径雷达 (BiSAR) 系统相位同步的基础, 该文研究分析了收、发系统独立频率源条件下不同类型的频率误差对 BiSAR 成像的影响, 确定了 BiSAR 成像的频率源稳定性要求。最后, 给出了计算机仿真的结果。

关键词: 双站合成孔径雷达, 频率稳定度, 微波成像

中图分类号: TN951, TN751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0100-07

Influence of the Frequency Instability on the Bistatic-SAR Imaging

Tang Zi-yue* ** Zhang Shou-rong*

*(National Key Lab of Microwave Imaging Technology,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

** (Key Lab of Wuhan Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract The high stability of frequency sources is the foundation to the phase synchronization of the Bistatic Synthetic Aperture Radar (BiSAR) system. This paper analyzes the influence of various frequency instabilities of sources in transmitter and receiver to the BiSAR imaging, and demonstrates the requirement to the source stability. The computer simulation results of BiSAR imaging with four types of frequency instabilities are presented.

Key words Bistatic Synthetic Aperture Radar (BiSAR), Frequency stability, Microwave imaging

1 引言

双站合成孔径雷达 (Bistatic Synthetic Aperture Radar, BiSAR) 的概念早在 20 世纪 80 年代已经出现在美国的专利文献里^[1,2], 文献 [3] 也提及美国曾经成功进行机载 BiSAR 实验的事情。与常规的合成孔径雷达 (SAR) 相比, BiSAR 主要有两个方面的优点: 一是收、发分置, 可以获取目标或场景的非后向散射信息; 二是发射机远离待成像或侦察区域, 接收机抵近接收, 可以适合某些特殊用途的需要。可能是由于系统复杂性问题, 也可能是出于保密的原因, 目前还未见有关 BiSAR 理论或技术的系统报道。

由于收、发平台的分置, BiSAR 系统的触发脉冲、发射脉冲信号与接收机本振等信号之间不存在相干关系, 这样, 就必须采用高稳定度的频率源和专门的同步系统来保证 BiSAR 收、发系统间的这些信号在时间和相位上的严格同步。与常规的地面双站 (基地) 雷达系统相比, 机载 BiSAR 的一个有利条件是收发载机工作在视距之内, 同步信息和其它数据可以直接传输。从频率源的角度来看, 解决 BiSAR 收、发系统的相干性问题主要有两条技术途径: 一是以视距信道为基础, 将频率基准信号从发射系统发送到接收平台, 再在接收系统中采用锁相环等手段实现对频率基准信号的相位锁定, 并最终实现收、发系统的相位同步。理论上, 这种方法可以获

¹ 2002-07-04 收到, 2002-11-15 改回

得较高的相位同步精度,但由于收、发平台间可能存在的相对运动(包括运动误差)所产生的多普勒频移会使锁相环对相位进行错误跟踪或锁定,从而使得回波信号的多普勒变化规律发生改变,导致图像散焦甚至无法成像;另外,多径效应和其它干扰也有可能造成锁相环的误差。二是收、发系统采用独立的频率源,此时, BiSAR 需要依靠两个频率源的一致性和高稳定性来确保系统在整个合成孔径时间内具有足够小的相位误差。本文将以 BiSAR 系统采用收、发独立频率源为对象,研究分析频率源的频率误差对 BiSAR 成像的影响,并确定频率源的稳定性要求。

2 回波相位误差模型

在采用收、发独立频率源的情况下,发射载波的频率源于发射系统的频率源,而接收机的本振频率源于接收系统的频率源。这样,两个频率源间的任何频率误差或频率不稳定都将导致回波信号相位误差的产生。设发射载波信号为

$$s_T(t) = \cos[2\pi f_T t + \varphi_{T0}] \quad (1)$$

式中 φ_{T0} 为初始相位; f_T 为载波频率,可以表示为

$$f_T = f_0(1 + \delta_T(t)) \quad (2)$$

式中 f_0 为 BiSAR 系统的工作频率; $\delta_T(t)$ 是相对频率误差,其值取决于发射系统晶振频率稳定度。接收机的本振参考信号为

$$s_R(t) = \cos[2\pi f_R(t + t_d) + \varphi_{R0}] \quad (3)$$

式中 φ_{R0} 为初始相位; t_d 表示回波信号相对于雷达发射信号的延迟时间; f_R 为接收机的本振频率,可以表示为

$$f_R = f_0(1 + \delta_R(t)) \quad (4)$$

式中 $\delta_R(t)$ 表示接收本振的相对频率误差,其值取决于接收系统中晶振的频率稳定度。

对于 t_0 时刻的发射信号,回波信号经过 t_d 时间的延迟到达接收机,经过同步解调后的剩余相位为

$$\phi_{t_0} = \int_0^{t_0} 2\pi(f_R - f_T)dt + \int_{t_0}^{t_0+t_d} 2\pi f_R dt + \varphi_{R0} - \varphi_{T0} = \varphi_{t_0} + \varphi_{d_0} + \varphi_0 \quad (5)$$

其中

$$\varphi_{t_0} = \int_0^{t_0} 2\pi(f_R - f_T)dt \quad (6)$$

$$\varphi_{d_0} = \int_{t_0}^{t_0+t_d} 2\pi f_R dt \quad (7)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{R0} - \varphi_{T0} \quad (8)$$

对于 t_1 时刻的发射信号,回波信号经过 t_d 时间的延迟到达接收机,经过同步解调后的剩余初始相位为

$$\phi_{t_1} = \varphi_{t_1} + \varphi_{d_1} + \varphi_0 \quad (9)$$

其中

$$\varphi_{t_1} = \varphi_{t_0} + \int_{t_0}^{t_1} 2\pi(f_R - f_T)dt \quad (10)$$

$$\varphi_{d_1} = \int_{t_1}^{t_1+t_d} 2\pi f_R dt \quad (11)$$

将式 (9) 与式 (5) 相减, 可以求得 t_1 时刻相对于 t_0 时刻的回波信号相位误差为

$$\phi_e(t_1) = \phi_{t_1} - \phi_{t_0} = \int_{t_0}^{t_1} 2\pi(f_R - f_T)dt + (\varphi_{d_1} - \varphi_{d_0}) \quad (12)$$

时延 t_l 的最大值通常要小于雷达脉冲重复周期 T_r (或几倍的 T_r , 高重频时), $(\varphi_{d_1} - \varphi_{d_0})$ 相当于常规 (单站)SAR 中一个回波周期内由于频率源不稳定所引起的回波相位误差。根据目前实际 SAR 系统的水平, $(\varphi_{d_1} - \varphi_{d_0})$ 项不会对成像产生影响, 在此可以将其忽略。这样, 式 (12) 可以简化为

$$\phi_e(\tau) \approx \int_0^\tau 2\pi(f_R - f_T)dt = \int_0^\tau \omega_0(\delta_R(t) - \delta_T(t))dt \quad (13)$$

式中 $\tau = t_1 - t_0$; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。由于 f_R, f_T 之间不存在相干性, 对相位误差的考察时间至少要等于一个合成孔径时间 T_S , 即 $\tau_{\max} \geq T_S$ 。

3 频率误差对成像的影响

收、发系统独立频率源的频率不稳定和误差会使回波信号产生相位误差, 从而影响方位向压缩的性能, 但不同的频率起伏和误差形式对成像的影响是不一样的, 这里主要对固定频率偏差、线性时变频率误差、正弦起伏频率误差及随机起伏频率误差的影响进行分析。

3.1 确定性频率误差的影响

在发射机载频与接收机本振之间存在固定的频率偏差的情况下, 由式 (13) 可以求得回波信号的相位误差为

$$\phi_e(\tau) = 2\pi f_0(\delta_R - \delta_T)\tau = 2\pi\Delta f_0\tau \quad (14)$$

式中 $\Delta f_0 = f_0(\delta_R - \delta_T)$ 为发射机载频与接收机本振之间的固定频率偏差。式 (14) 表明确定性频率源误差将产生一次相位误差, 相当于给回波信号增加了一个非零的多普勒中心频率项, 它将引起横向压缩主瓣位置的偏离。主瓣位置的偏移量可以由下式来估计:

$$\Delta x = \frac{\lambda R_{R0} R_{T0}}{V_{a0}(R_{R0} + R_{T0})} \Delta f_0 \quad (15)$$

式中 $\lambda = c/f_0$ 为工作波长, c 是光速; R_{R0}, R_{T0} 分别为收发天线相位中心到测绘带中心线的距离; V_{a0} 为平台匀速直线运动速度。当最大允许的横向偏移量限制为 Δx_m 时, 发射机载频与接收机本振之间固定频率偏差 Δf_0 的限制值为

$$|\Delta f_0| \leq \frac{V_{a0}(R_{R0} + R_{T0})}{\lambda R_{R0} R_{T0}} \Delta x_m \quad (16)$$

或者表示成相对频率偏差的形式, 为

$$\left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \leq \frac{V_{a0}}{c} \cdot \frac{(R_{R0} + R_{T0})}{R_{R0} R_{T0}} \Delta x_m \quad (17)$$

上式说明, 在图像横向位置偏移限制一定的情况下, 平台速度越慢, 接收距离越远, 对频率源的相对频率偏差要求就越高。

3.2 线性时变频率误差的影响

设 $\delta_R(t) = a_R t$, $\delta_T(t) = a_T t$, a_R, a_T 是常数, 由式 (13) 求得相位误差为

$$\phi_e(\tau) = (1/2)\omega_0(a_R - a_T)\tau^2 \quad (18)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。式 (18) 表明线性时变频率误差将引起二次相位误差, 主要影响是使图像散焦和旁瓣电平升高。取 $\tau = T_S$, 相位误差为

$$\phi_{em} = (1/2)\omega_0(a_R - a_T)T_S^2 \quad (19)$$

选取相位误差限制条件为 $|\phi_{em}| \leq \pi/8$, 则有

$$|a_R - a_T| \leq 1/(8f_0T_S^2) \quad (20)$$

通常 a_R, a_T 具有相同的量级, 统一用 a 来表示, 并考虑两个频率源变化的极性不同, 得出的保守估计为

$$|a| \leq 1/(16f_0T_S^2) \quad (21)$$

或者表示为

$$|aT_S| \leq 1/(16f_0T_S) \quad (22)$$

式中 $|aT_S|$ 表示的是频率源在合成孔径时间 T_S 内所产生的相对频率偏差, 即频率稳定度 $|\Delta f/f_0|$ 。这样可以将式 (22) 表示为

$$|\Delta f/f_0| \leq 1/(16f_0T_S) \quad (23)$$

上式说明, 在合成孔径时间一定的条件下, 雷达工作频率越高, 系统对频率源的稳定度要求就越高。例如, 取 $T_S = 5\text{s}$, 当 $f_0 = 10\text{GHz}$ 时, 频率稳定度要满足 $|\Delta f/f_0| \leq 1.25 \times 10^{-12}$ 的条件; 而当 $f_0 = 1.25\text{GHz}$ 时, 其要求为 $|\Delta f/f_0| \leq 1 \times 10^{-11}$ 。

需要指出的是, 通常认为 SAR 成像对系统相位误差的限制条件为 $|\phi_c| < \pi/4$, 这里考虑到 BiSAR 比普通 SAR 有更多的因素产生系统相位误差, 所以, 将由单个因素引起的相位误差限制为 $|\phi_c| < \pi/8$ 。

3.3 正弦起伏型频率误差的影响

设正弦起伏型频率误差为 $\delta_R(t) = b_R \cos(\omega_R t + \theta_R)$, $\delta_T(t) = b_T \cos(\omega_T t + \theta_T)$, b_R, b_T 是振幅, ω_R, ω_T 是起伏角频率, θ_R, θ_T 是初始相位。由式 (13) 求得相位误差为

$$\phi_c(\tau) = \omega_0 \left[\frac{b_R}{\omega_R} \sin(\omega_R \tau + \theta_R) - \frac{b_T}{\omega_T} \sin(\omega_T \tau + \theta_T) - \left(\frac{b_R}{\omega_R} \sin(\theta_R) - \frac{b_T}{\omega_T} \sin(\theta_T) \right) \right] \quad (24)$$

式中 $[(b_R/\omega_R) \sin(\theta_R) - (b_T/\omega_T) \sin(\theta_T)]$ 是一固定相位项, 对成像不产生影响, 可以忽略。这样, 式 (24) 可以简化为

$$\phi_c(\tau) = \omega_0 \left[\frac{b_R}{\omega_R} \sin(\omega_R \tau + \theta_R) - \frac{b_T}{\omega_T} \sin(\omega_T \tau + \theta_T) \right] \quad (25)$$

式 (25) 是正弦起伏相位误差, 它将引起成对回波的出现^[4], 结果是使压缩处理后的积分旁瓣升高。假设两个频率源性能相同, 记 $\omega_0 b/\omega = \max(\omega_0 b_R/\omega_R, \omega_0 b_T/\omega_T)$, 可以知道成对回波的最大相对幅度为 $A = \omega_0 b/(2\omega)$ 。按 -20dB 的要求来限制, 则有

$$b/\omega \leq 0.2/\omega_0 \quad (26)$$

设 $\omega = 2\pi m/T_S$, 当 $m > 1$ 时, 式 (25) 的最大值为 $|\phi_{em}| = 2\omega_0 b/\omega$, 按 $|\phi_{em}| \leq \pi/8$ 来限制, 有

$$b/\omega \leq \pi/(16\omega_0) \quad (27)$$

比较式 (26), (27), 可以发现按旁瓣电平和相位误差的限制条件所得到的结果是一致的, 而且, 雷达工作频率越高, BiSAR 系统对频率源正弦起伏频率误差 (幅频比) 的要求就越苛刻。

3.4 正态随机起伏型频率误差的影响

取时间 $\tau = T_S$, 并设 T_S 内共有 N 个脉冲, 由式 (13) 求得相位误差为

$$\phi_e(T_S) = \omega_0 \int_0^{NT_r} (\delta_R(t) - \delta_T(t)) dt \quad (28)$$

式中 $\delta_T(t)$ 和 $\delta_R(t)$ 都是零均值的高斯随机过程。将式 (28) 的积分形式表示成求和形式, 有

$$\phi_e(T_S) = \sum_{i=1}^N \omega_0 T_r (\delta_{Ri} - \delta_{Ti}) \quad (29)$$

式中 δ_{Ri} , δ_{Ti} 分别表示接收机本振和发射机载频在时间 $(i-1)T_r \sim iT_r$ 上的随机相对频率误差。假定 δ_{Ri} , δ_{Ti} ($i \in [1, N]$) 独立同分布, 是均值为 0, 方差为 σ_f^2 的高斯随机变量, 则由式 (29) 可以知道 ϕ_e 也符合高斯分布, 其均值和方差分别为

$$\bar{\phi}_e = 0 \quad (30)$$

和

$$\sigma_\phi^2 = (\omega_0 T_r)^2 \cdot (2N\sigma_f^2) \quad (31)$$

其标准差为

$$\sigma_\phi = (\omega_0 T_r) \cdot \sqrt{2N\sigma_f^2} \quad (32)$$

式中 σ_f 为频率源相对频率误差的标准差。最后, 可以得出 ϕ_e 的概率密度函数为

$$f(\phi_e) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_\phi) \exp(-\phi_e^2/(2\sigma_\phi^2)) \quad (33)$$

考虑主值区间 $|\phi_e| \leq 3\sigma_\phi$, 依概率得出在整个合成孔径时间内由频率源不稳定所引起的回波信号相位随机误差的上限值为

$$|\phi_{em}| = (3\omega_0 T_r) \cdot \sqrt{2N\sigma_f^2} \quad (34)$$

将条件 $|\phi_e| \leq \pi/8$ 代入式 (34), 得

$$\sigma_f \leq 1/(48\sqrt{2N}f_0 T_r) \quad (35)$$

在合成孔径时间 T_S 是固定的情况下, 式 (35) 分母中 $\sqrt{2N}T_r$ 项是一定量, 此时, 雷达工作频率越高, 频率稳定度的要求就越高。因此, 从频率稳定度角度来看, 选择低频工作对 BiSAR 系统有利。根据式 (35), 对于一个工作在 L 波段 ($f_0 = 1.339\text{GHz}$, $T_r = 1\text{ms}$, $N = 5000$) 的 BiSAR 系统来说, 其收发系统所选用的频率源的秒级频率稳定度应满足 $\sigma_f < 1.56 \times 10^{-10}$ 的条件; 而工作在 X 波段 ($f_0 = 10\text{GHz}$, $T_r = 1\text{ms}$, $N = 5000$) 时, 其频率源的秒级稳定度要求满足 $\sigma_f < 2 \times 10^{-11}$, 这与常规 SAR 中频率源稳定度的要求 $\sigma_f < 10^{-8}$ 相比, 要高出近 3 个数量级。

4 仿真

图 1~ 图 4 给出的是 BiSAR 方位向回波信号压缩仿真的结果, 虚线表示无误差时的理想结果, 实线表示有误差时的结果。仿真参数为: 工作频率 $f_0 = 1.339\text{GHz}$; 脉冲重复周期

PRF=1000Hz; 收、发平台平行匀速直线运动速度 $V_{a0} = 150\text{m/s}$; 发射平台远离测绘带, 其天线相位中心到测绘带中心线的距离为 $R_{T0} = 100\text{km}$; 接收天线相位中心到测绘带中心线的距离为 $R_{R0} = 10\text{km}$, 接收天线的方位向口径为 $d_{Ra} = 3.3607\text{m}$ 。图 1 给出的是收、发系统频率源间存在固定频率偏差 $\Delta f_0 = 1.3256\text{Hz}$ 时的结果, 实线主瓣偏离了虚线主瓣将近 20m 。图 2 给出的是频率源存在线性时变频率误差时的结果, 其中图 2(a) 给出的是误差满足式 (23) 要求时的结果; 图 2(b) 则是误差增大 5 倍时的结果, 与图 2(a) 相比, 其主瓣展宽明显, 并且位置发生了明显偏移。图 3 给出的是频率源存在正弦起伏频率误差时的结果, 其中图 3(a) 给出的是满足式 (27) 要求时的结果; 图 3(b) 则是正弦误差角频率降低一半时的结果, 与图 3(a) 相比, 出现了电平较高的成对旁瓣。图 4 给出的是频率源存在正态随机起伏频率误差时的结果, 其中图 4(a) 给出的是满足式 (35) 要求时的结果 ($\sigma_f = 1.65 \times 10^{-10}$); 图 4(b) 则是 $\sigma_f = 1.65 \times 10^{-9}$ 时的结果, 与图 4(a) 相比, 其主瓣有所偏离, 旁瓣电平升高。

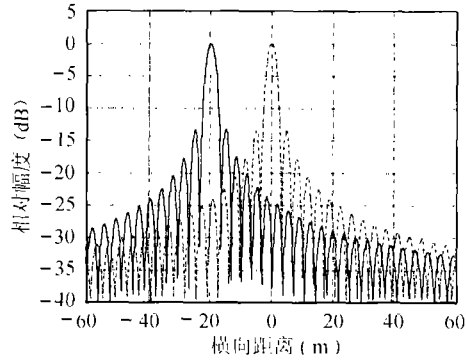
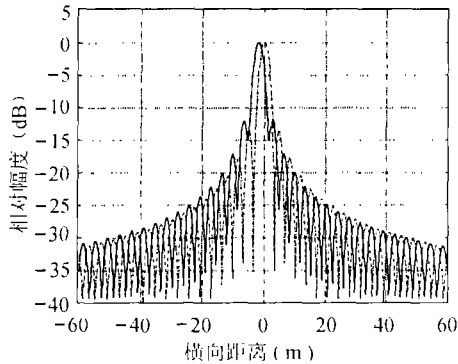
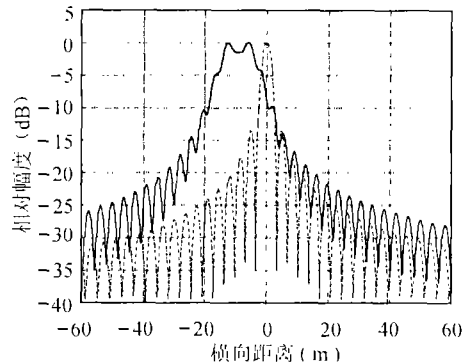


图 1 固定频率偏差对成像的影响

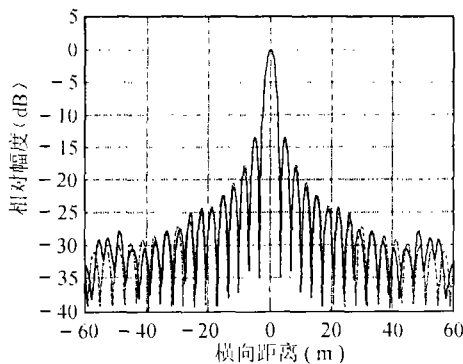


(a) 误差较小时的压缩处理结果

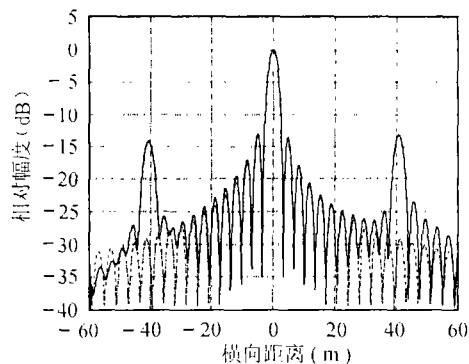


(b) 误差较大时的压缩处理结果

图 2 线性时变频率误差对成像的影响



(a) 误差较小时的压缩处理结果



(b) 误差较大时的压缩处理结果

图 3 正弦起伏频率误差对成像的影响

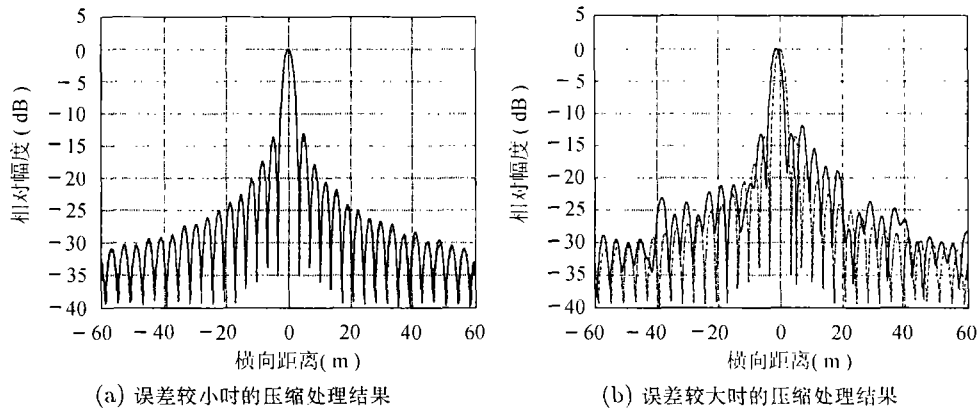


图 4 正态随机起伏频率误差对成像的影响

5 结束语

本文以 BiSAR 收、发系统采用独立的高稳定度频率源为背景,就收、发系统独立频率源之间的固定频率偏差、线性时变频率误差、正弦起伏频率误差及随机起伏频率误差对 BiSAR 成像的影响问题进行了深入的研究和分析,得到了 BiSAR 成像对收、发系统频率源关于前面 4 种误差的定量限制条件;仿真结果则进一步验证了理论分析的正确性。根据前面的研究结果, BiSAR 的工作频率越高,其成像对后 3 种类型频率误差的限制就越苛刻,这样,从工程实现来说, BiSAR 系统采用较低的频段(如 L 波段)比较有利。

另外,在 BiSAR 情况下,由于双站平台需要合作运动,运动误差所造成的相位误差也相当严重,这样,一种可能的办法是基于运动补偿算法^[5,6]将由频率源稳定性所带来的回波信号相位误差部分地给予补偿掉,从而在一定程度上缓解 BiSAR 成像对频率源稳定度的要求,当然,这是值得进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Grisham. Method of satellite operation using synthetic aperture radar addition holography for imaging. US Patent, 4, 602, 257, July 22, 1986.
- [2] Powell, *et al.*. Autonomous synchronization of a bistatic synthetic aperture radar (SAR) system. US Patent, 5, 113, 193, May 12, 1992.
- [3] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1998, 3: 5-6.
- [4] 张澄波. 综合孔径雷达原理, 系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989, 11: 140-153.
- [5] Kirk J. Motion compensation for SAR. *IEEE Trans. on AES*, 1975, AES-11(3): 338-348.
- [6] Madsen S. Estimating the Doppler centroid of SAR data. *IEEE Trans. on AES*, 1989, AES-25(1): 134-140.

汤子跃: 男, 1966 年生, 博士(后), 副教授, 研究方向为合成孔径雷达系统、微波成像新技术等。

张守融: 男, 1942 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主研究方向为微波成像理论。