

# 运动误差对双站 SAR 相位同步及成像的影响

汤子跃<sup>1,2</sup>, 张守融<sup>2</sup>, 王卫延<sup>2</sup>

(1. 空军雷达学院, 湖北武汉 430010; 2. 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 收、发系统间的相位同步是双站合成孔径雷达的一项关键技术, 采用锁相环接收机是实现双站 SAR 系统相位同步的一种可能方法. 本文主要就锁相环接收机在运动误差条件下的相位同步问题进行了研究, 并分析了锁相环相位误差对系统成像的影响, 最后, 给出了计算机仿真结果.

**关键词:** 双站合成孔径雷达; 锁相环; 运动误差

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1907-04

## The Influence of Motion Error on the Phase synchronization and Imaging of Bistatic SAR

TANG Zi-yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Shou-rong<sup>2</sup>, WANG Wei-yan<sup>2</sup>

(1. Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The phase synchronization between transmitter and receiver is a key problem to the bistatic synthetic aperture radar (BiSAR) system. Using a phase locked loop (PLL) receiver is one of possible methods to realize the phase synchronization of a BiSAR system. The performance of a PLL receiver in the case of aircraft motion error is discussed, and the influence of PLL phase error on imaging of BiSAR system is analyzed in this paper. Finally, the results of computer simulation are presented.

**Key words:** bistatic synthetic aperture radar; phase locked loop (PLL); motion error

### 1 引言

双站合成孔径雷达 (Bistatic Synthetic Aperture Radar, 双站 SAR)<sup>[1,2]</sup>是指发射系统和接收系统(含天线)安装在不同平台上的 SAR. 由于收、发分置, 双站 SAR 的系统配置更为灵活, 有利于获取目标区域的多方向散射信息, 有利于以较长的基线实现干涉成像, 有利于作为无源系统进行军事(成像)侦察. 但也正由于收、发分置, 双站 SAR 系统的接收机本振信号与发射载波信号之间不存在相干关系, 这样, 就必须采用专门的措施来解决发射信号与接收机本振信号之间的相位同步问题(当然, 还存在波束照射同步、触发同步等问题需要解决).

解决双站 SAR 收、发系统相位同步的基本办法有: (1) 收、发系统采用独立的频率源, 其缺点是需要频率源有很高的稳定性和一致性; (2) 锁相环同步法, 即将导频信号(即频率基准信号)从发射系统发送到接收平台, 再在接收系统中利用锁相环技术实现接收机本振对导频信号相位的跟踪和锁定. 理论上, 锁相环同步法可以实现较高的同步精度, 但收、发平台运动误差的存在, 可能会使接收机接收发射导频信号时产生多普勒频移, 从而使接收机本振信号及回波信号产生相位误差, 并最终影响系统成像. 本文将主要研究和分析收、发平台的运动误差对接收机锁相本振相位同步和双站成像的影响.

### 2 运动坐标系

假设双站 SAR 收、发载机横向位置相同, 且以相同的速度和方向作匀速直线运动, 均以正侧视方式工作. 这样, 可以

以收发天线相位中心连线为基础来建立双站运动坐标系, 如图 1 所示, 收、发平台运动坐标系中的三个轴分别为沿理想航线方向的  $a$  轴, 沿收发天线相位中心连线方向的  $l$  轴, 以及与  $a$  轴和  $l$  轴正交的  $z$  轴.  $l_R$  轴和  $l_T$  轴同在收发天线相位中心连线上, 指向相同.

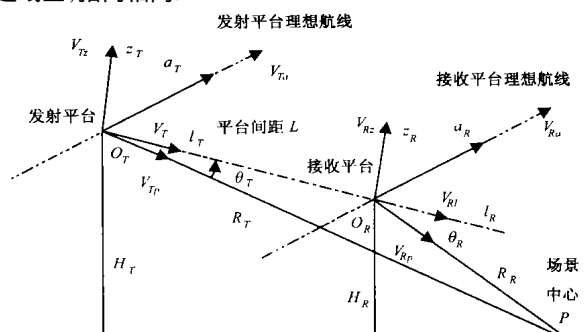


图 1 平台运动坐标系

图 1 的运动坐标系将收、发载机运动速度分解为三个正交分量  $V_{Ra}$ 、 $V_{Rl}$ 、 $V_{Rz}$  和  $V_{Ta}$ 、 $V_{Tl}$ 、 $V_{Tz}$ . 理想情况下,  $a$  轴方向的速度为  $V_{Ta} = V_{Ra} = V_{a0}$ , 而  $l$  轴、 $z$  轴方向的速度分量  $V_{Rl}$ 、 $V_{Tl}$  和  $V_{Rz}$ 、 $V_{Tz}$  均为 0. 实际中, 由于受气流和导航系统控制的影响, 收发载机的运动总有误差. 由于三个速度分量的正交关系, 载机在  $a$  轴方向和  $z$  轴方向的速度误差, 引起收发天线相位中心之间的距离变化较小, 对锁相环接收机的影响相对较小(对回波信号相位的影响也较小);  $l$  轴方向的速度误差将直接引

起收发天线相位中心距离的变化,从而使得接收导频信号产生相应的多普勒频移,影响锁相环对导频信号的相位跟踪,同时, \$l\$ 轴方向的速度误差还将直接引起回波信号的相位误差,从而对成像产生影响.因此,本文将研究 \$l\$ 轴方向速度误差的影响问题.

### 3 相位误差模型

假定发射导频信号具有足够高的稳定度(不影响合成孔径成像),接收系统中的锁相环电路能够稳定跟踪发射导频信号,并忽略锁相环对信号频率稳定度的影响.这样,接收系统利用锁相环技术得到的本振信号可以表示为

$$s_L(t) = \cos \left[ 2\pi f_T \left( t - \frac{L}{c} \right) + \phi_0 \right] \quad (1)$$

式中 \$f\_T\$ 为发射载频; \$\phi\_0\$ 为锁相环的稳定跟踪误差相位; \$L\$ 为收发天线相位中心的距离.当收、发平台间存在相对运动时, \$L\$ 将随时间变化.设 \$t=0\$ 时刻的收发天线相位中心初始距离为 \$L\_0\$,则在 \$t\$ 时刻,其长度 \$L\$ 为

$$L = L_0 - \int_0^t (V_{Tl} - V_{Rl}) dt \quad (2)$$

距离增量为

$$\Delta L = - \int_0^t (V_{Tl} - V_{Rl}) dt \quad (3)$$

这一距离增量带来锁相环接收机本振信号的相位误差为

$$L_e = - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \quad (4)$$

式中变量下标 \$L\$ 表示本振信号.

\$V\_{Tl}\$、\$V\_{Rl}\$ 的存在(不为零),同时会引起目标视线方向上的速度误差,并引起回波信号的相位误差.如图 1 所示,设 \$V\_{Tp}\$、\$V\_{Rp}\$ 为 \$V\_T\$ 和 \$V\_R\$ 在目标视线方向上的分量,其相互关系为

$$V_{Tp} = V_T \cos(\theta_T) \quad (5)$$

$$V_{Rp} = V_R \cos(\theta_R) \quad (6)$$

式中 \$\theta\_T\$ 为收发天线相位中心连线方向与发射平台目标视线方向的夹角; \$\theta\_R\$ 为相位中心连线方向与接收平台目标视线方向的夹角. \$V\_{Tp}\$、\$V\_{Rp}\$ 引起目标至收、发载机距离和的变化,其距离和误差为

$$\Delta R = - \int_0^t (V_{Tp} + V_{Rp}) dt \quad (7)$$

这一距离和误差对应的回波信号相位误差为

$$E_e = - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (8)$$

式中变量下标 \$E\$ 表示回波信号,以区别于本振信号.

这样,实际视频回波信号的相位误差为

$$\phi_e = E_e - L_e \quad (9)$$

下面,我们将按恒定速度误差、匀加速度误差和正弦变化误差这三中速度误差模型,来具体分析其对接收机本振信号(以锁相环技术为基础)相位以及成像的影响.

### 4 运动误差的影响

#### 4.1 恒定速度误差的影响

设 \$V\_{Tl} = v\_T\$、\$V\_{Rl} = v\_R\$ 为常量,由式(4)求得相应的相位误差为

$$L_e = - \frac{2\pi}{\lambda} (v_T - v_R) t \quad (10)$$

将 \$v\_{Tp} = v\_T \cos(\theta\_T)\$ 和 \$v\_{Rp} = v\_R \cos(\theta\_R)\$ 代入式(8),可以求得回波信号相位误差为

$$E_e = - \frac{2\pi}{\lambda} [v_T \cos(\theta_T) + v_R \cos(\theta_R)] t \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(9),得到实际视频回波信号的相位误差为

$$\phi_e = - \frac{2\pi}{\lambda} \{ [v_T \cos(\theta_T) - 1] + [v_R \cos(\theta_R) + 1] \} t \quad (12)$$

式(12)是一次相位项,它将引起方位向压缩主瓣位置的偏移,等效偏移量大小 \$x\$ 由下式决定

$$x = \frac{2\pi V_{a0} (R_{R0} + R_{T0}) t}{R_{R0} R_{T0}} \cdot x \quad (13)$$

式中 \$R\_{R0}\$、\$R\_{T0}\$ 分别为收发天线相位中心到场景的中心距离.由式(13)可以求得

$$x = \frac{[v_T \cos(\theta_T) - 1] + [v_R \cos(\theta_R) + 1]}{V_{a0} (R_{R0} + R_{T0})} R_{R0} R_{T0} \quad (14)$$

假设收发载机速度误差量级相同,并考虑误差方向相反的不利情况(即 \$v\_T = -v\_R = v\$),由式(14)可得

$$x = - \frac{[2 - \cos(\theta_T) + \cos(\theta_R)] R_{R0} R_{T0}}{V_{a0} (R_{R0} + R_{T0})} \quad (15)$$

设最大允许位置偏移量为 \$x\_m\$,则可以求得恒定速度误差的限制条件为

$$|x| \leq \frac{R_{R0} + R_{T0}}{[2 - \cos(\theta_T) + \cos(\theta_R)] R_{R0} R_{T0}} V_{a0} x_m \quad (16)$$

特别地,当收发载机到目标的距离远大于收发载机的高度(即, \$R\_{R0} \gg H\_R\$, \$R\_{T0} \gg H\_T\$)时,式中 \$[2 - \cos(\theta\_T) + \cos(\theta\_R)]\$ 的值接近于 2,这样,式(16)可以近似为

$$|x| \leq \frac{R_{R0} + R_{T0}}{2 R_{R0} R_{T0}} V_{a0} x_m \quad (17)$$

#### 4.2 匀加速运动误差的影响

设 \$V\_{Tl} = a\_T t\$、\$V\_{Rl} = a\_R t\$,由式(4)得

$$L_e = - \frac{2\pi}{\lambda} (a_T - a_R) t^2 \quad (18)$$

将 \$a\_{Tp} = a\_T \cos(\theta\_T)\$ 和 \$a\_{Rp} = a\_R \cos(\theta\_R)\$ 代入式(8),可以求得回波信号的相位误差为

$$E_e = - \frac{2\pi}{\lambda} [a_T \cos(\theta_T) + a_R \cos(\theta_R)] t^2 \quad (19)$$

将式(18)、(19)代入式(9),得

$$\phi_e = - \frac{2\pi}{\lambda} \{ [a_T \cos(\theta_T) - 1] + [a_R \cos(\theta_R) + 1] \} t^2 \quad (20)$$

式(20)是二次相位项,它的影响主要是使图像散焦和旁瓣电平升高.在 \$t = T\_s/2\$ 时,式(20)取得最大值,为

$$\phi_{em} = - \frac{2\pi}{\lambda} \{ [a_T \cos(\theta_T) - 1] + [a_R \cos(\theta_R) + 1] \} T_s^2 \quad (21)$$

式中 \$T\_s\$ 为合成孔径时间.假设收发载机运动误差量级相同,考虑式(21)最不利的误差方向相反的情况(\$a\_T = -a\_R = a\$),得

$$\phi_{em} = - \frac{a}{4} [2 - \cos(\theta_T) + \cos(\theta_R)] T_s^2 \quad (22)$$

选取相位误差限制条件为  $|e_m| \leq \frac{\pi}{4}$ , 有

$$|a_l| \leq \frac{1}{[2 - \cos(\pi T_s) + \cos(\pi R_s)] T_s^2} \quad (23)$$

同样,  $[2 - \cos(\pi T_s) + \cos(\pi R_s)]$  的值接近于 2, 式(23)可以近似为

$$|a_l| \leq \frac{1}{2 T_s^2} \quad (24)$$

实际中, 载机在收发天线相位中心连线方向的恒定的速度分量和匀加速度误差一般不会长时间存在, 通常由于气流等因素的影响, 更常出现的则是正弦摆动型误差, 下面, 我们就具体分析其影响。

### 4.3 正弦起伏型速度误差的影响

设  $V_{\pi} = b_{\pi} \cos(\pi t + \pi_0)$ 、 $V_{Rl} = b_{Rl} \cos(R_l t + R_{l0})$ , 由式(4)得(忽略固定相位项后)

$$\phi_{L,e} = 2 \left[ \frac{b_{\pi}}{\pi} \sin(\pi t + \pi_0) - \frac{b_{Rl}}{R_l} \sin(R_l t + R_{l0}) \right] \quad (25)$$

将  $b_{\pi} = b_{\pi} \cos(\pi T_s)$ 、 $\pi_0 = \pi$  和  $b_{Rl} = b_{Rl} \cos(R_l T_s)$ 、 $R_{l0} = R_l$  代入式(8), 得

$$E_e = 2 \left[ \frac{b_{\pi}}{\pi} \sin(\pi t + \pi_0) \cos(\pi T_s) + \frac{b_{Rl}}{R_l} \sin(R_l t + R_{l0}) \cos(R_l T_s) \right] \quad (26)$$

将式(25)、(26)代入式(9), 得

$$\phi_e = 2 \left\{ \frac{b_{\pi}}{\pi} \sin(\pi t + \pi_0) [\cos(\pi T_s) - 1] + \frac{b_{Rl}}{R_l} \sin(R_l t + R_{l0}) [\cos(R_l T_s) + 1] \right\} \quad (27)$$

假设收、发载机的摆动误差(振幅和频率)基本相同, 考虑最不利的情况  $\left[ \frac{b_{\pi}}{\pi} = \frac{b_{Rl}}{R_l} = \frac{b_l}{l}, \pi_0 = R_{l0} = \pi_0 + \pi \right]$ , 可以求得式(27)的时变相位分量为

$$\phi_e = 2 \left[ 2 - \cos(\pi T_s) + \cos(R_l T_s) \right] \cdot \frac{b_l}{l} \sin(l t + \pi_0) \quad (28)$$

类似地, 通常  $[2 - \cos(\pi T_s) + \cos(R_l T_s)]$  接近于 2, 式(28)可以近似为

$$\phi_e = \frac{4}{l} \cdot \frac{b_l}{l} \sin(l t + \pi_0) \quad (29)$$

引入摆动频率参量  $n$ , 令  $l = 2\pi n / T_s$  ( $n > 1$  对应于高频摆动, 而  $n < 1$  对应于低频摆动), 式(29)变为

$$\phi_e = \frac{2 b_l T_s}{n} \sin(2\pi n t / T_s + \pi_0) \quad (30)$$

对于高频摆动 ( $n > 1$ ), 式(30)的正弦型相位误差将主要引起成对回波的出现<sup>[3]</sup>, 导致方位向旁瓣电平的升高。最大旁瓣电平值为

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{2 b_l T_s}{n} \right)^2 \quad (31)$$

设旁瓣电平的允许值为  $A_{\max}$ , 则可以求得对载机摆动幅度的限制条件为

$$b_l \leq \frac{n}{T_s} \sqrt{\frac{A_{\max}}{2}} \quad (32)$$

对于低频摆动 ( $n < 1$ ) 的情况, 可以将式(29)在  $t = 0$  处进

行泰勒级数展开(忽略高次项), 有

$$\phi_e = \frac{4}{l} \frac{b_l}{l} \sin \pi_0 + \frac{4}{l} \frac{b_l}{l} \cos \pi_0 \cdot t - \frac{2}{3} \frac{b_l}{l} \sin \pi_0 \cdot t^2 - \frac{2}{3} \frac{b_l}{l} \cos \pi_0 \cdot t^3 + \dots \quad (33)$$

式(33)中的第 1 项为固定相位项, 对成像没有影响; 第 2 项为线性相位项, 主要造成方位向压缩主瓣的位置偏移, 等效偏移量  $x$  在初始相位  $\pi_0 = 0$  (或者  $\pi$ ) 时, 取得最大值

$$x = \frac{2 R_{R0} R_{T0} b_l}{(R_{R0} + R_{T0}) V_{d0}} \quad (34)$$

设最大允许的偏移量为  $x_m$ , 则有

$$b_l \leq \frac{(R_{R0} + R_{T0}) V_{d0}}{2 R_{R0} R_{T0}} x_m \quad (35)$$

式(35)即为按最大允许图像偏移量来选取的载机摆动幅度限制条件。

式(33)中的第 3 项为二次相位项, 在  $\pi_0 = \pi/2$ ,  $t = T_s/2$  时, 二次相位误差取得最大值, 为

$$|e_m| = \frac{2 b_{\pi}}{T_s} \cdot T_s \quad (36)$$

选取相位误差限制条件  $|e_m| \leq \pi/4$ , 则有

$$b_l \leq \frac{\pi}{4} n T_s \quad (37)$$

式(37)即为按最大允许二次相位误差量来选取的载机摆动幅度限制条件。

式(33)中的第 4 项为三次相位误差项, 在  $\pi_0 = 0$ ,  $t = T_s$  时, 相位误差最大, 为

$$|e_m| = \frac{8}{3} \frac{b_l n^2}{T_s} \cdot T_s \quad (38)$$

同样选取相位误差限制条件  $|e_m| \leq \pi/4$ , 则有

$$b_l \leq \frac{3}{32 n^2 T_s} \quad (39)$$

式(39)即为按最大允许三次相位误差量来选取的载机摆动幅度限制条件。

## 5 仿真

选取仿真参数为: 雷达工作频率  $f_0 = 1.339 \text{ GHz}$ ; 脉冲重复频率  $\text{PRF} = 1000 \text{ Hz}$ ; 收、发载机平行匀速直线运动速度  $V_{d0} = 150 \text{ m/s}$ ; 发射载机离测绘带中心线的距离为  $R_{T0} = 100 \text{ km}$ , 载机高度  $H_T = 10000 \text{ m}$ , 接收载机到测绘带中心线的距离为  $R_{R0} = 20 \text{ km}$ , 载机高度  $H_R = 5000 \text{ m}$ , 接收天线的方位向口径为  $d_{Ra} = 15^\circ$ 。图 2~6 给出的是收发天线相位中心连线方向运动误差条件下, 双站 SAR 方位向压缩处理的仿真结果, 虚线表示无误差时的理想结果, 实线表示有误差时的结果。

图 2 给出的是存在恒定速度误差  $l = 0.045 \text{ m/s}$  时的结果, 其实线主瓣偏离了虚线主瓣将近  $10 \text{ m}$ ; 图 3 给出的是存在匀加速度误差  $al = 0.023 \text{ m/s}^2$  时的结果。

图 4 给出的是  $n = 5.35$ ,  $A_{\max} = -20 \text{ dB}$ , 正弦起伏型速度误差条件满足式(32)要求时的结果; 图 5 给出的是  $n = 0.88$ , 摆动误差幅度选为式(37)最大限制值 3 倍时的结果; 图 6 给出的是  $n = 0.38$ , 摆动误差幅度选为式(39)最大限制值 3 倍时的结果。结果说明, 高频摆动误差主要引起压缩旁瓣(远区)电

平的升高,高频摆动误差主要引起压缩旁瓣(近区)电平的高以及主瓣位置的偏移(和展宽)。

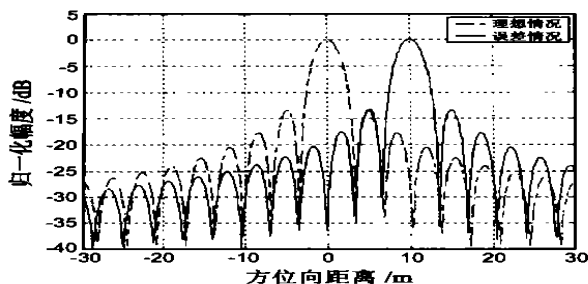


图2 恒定速度误差对成像的影响

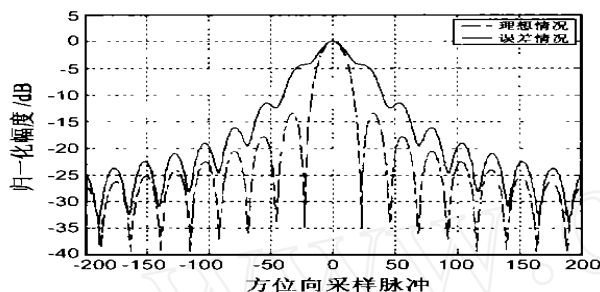


图3 匀加速度误差对成像的影响

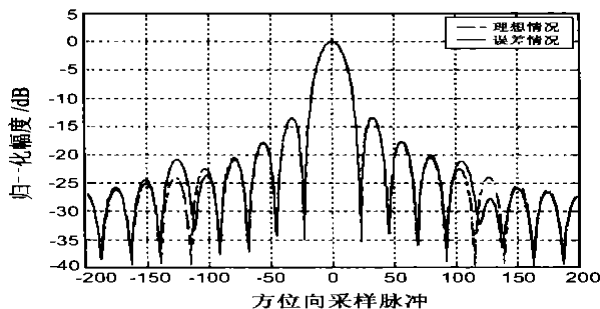


图4 正弦起伏型速度误差( $n=5.35$ )对成像的影响

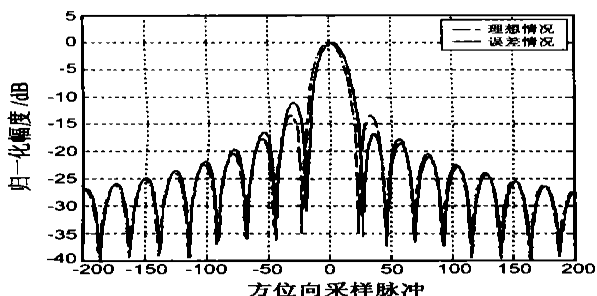


图5 正弦起伏型速度误差( $n=0.88$ )对成像的影响

需要说明的是,在双站 SAR 情况下,运动误差的测量和补偿方法<sup>[4,5]</sup>基本上可以沿用常规 SAR 中的技术和方法,因此,上面分析得出的载体速度误差限制,实际上更多的是对测量传感器的要求。另外在公式推导中,我们考虑了误差影响最大的情况,而实际双站 SAR 系统在工作时,收发载机速度误差的影响也会有相互抵消的时候。与常规 SAR 的情况相比<sup>[3]</sup>,基于锁相环相位同步的双站 SAR 对速度误差的限制并无特别之处,即并不因为有两个工作平台,而使其运动误差对

成像的影响变得更严重。

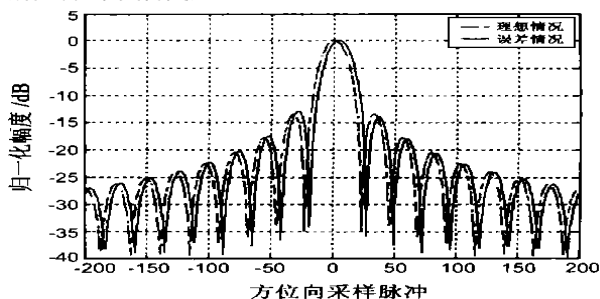


图6 正弦起伏型速度误差( $n=0.38$ )对成像的影响

## 6 结束语

本文进行的理论分析表明,在理想情况下(收发载机航线平行),载体运动误差对锁相环接收机的相位同步性能和双站 SAR 系统成像的影响不大;在收发载机航线不平行的情况下(斜飞模式),由于只增加了一个固定的多普勒项,可以证明上述结论同样成立。

需要强调的是,本文仅针对运动误差进行分析,而实际系统中,导频信号的信噪比、多径效应以及战场电磁环境等诸多因素都可能会对锁相环相位同步系统产生不良影响。这样,为了提高双站 SAR 同步系统的可靠性,通常可以将多种相位同步方法(如锁相环同步方法、独立频率源同步方法以及基于回波数据分析的自同步方法)和互补方法<sup>[4,5]</sup>综合起来应用。

## 参考文献:

- [1] Grisham, Method of satellite operation using synthetic aperture radar addition holography for imaging[P]. US Patent, 4,602,257, July 22, 1986.
- [2] Powell, et al. Autonomous synchronization of a bistatic synthetic aperture radar(SAR) system[P]. US Patent, 5,113,193, May 12, 1992.
- [3] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 299 - 349.
- [4] J Kirk. Motion compensation for SAR[J]. IEEE Trans. On AES, 1975, 11(3): 338 - 348.
- [5] S Madsen. Estimating the Doppler centroid of SAR data[J]. IEEE Trans on AES, 1989, 25(1): 134 - 140.

## 作者简介:



汤子跃 男, 1966 年 10 月生于浙江湖州, 博士, 副教授, 1990 年于空军雷达学院获硕士学位, 2000 年于海军工程大学获博士学位, 2001 年 2 月至 2003 年 4 月于中科院电子所进行博士后流动, 主要从事雷达系统、雷达信号处理、SAR 成像及信息处理等领域的研究。

张守融 男, 1942 年 11 月生于江苏无锡, 博士, 中科院电子所研究员, 博士生导师, 长期从事电磁散射、微波遥感和微波成像技术研究。

王卫延 男, 1947 年 10 月生于陕西, 硕士, 中科院电子所研究员, 博士生导师, 主要从事电磁场及微波成像等领域的研究。