

一种用于非合作式星机双基地 SAR 中的波束同步技术

周鹏^{①②} 皮亦鸣^①

^①(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

^②(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院 东营 257061)

摘要: 已有文献中提出的基于收发波束指向控制的波束同步方法,在非合作式的星机双基地 SAR 中不适用。根据星机双基地 SAR “远发近收”的特点,提出了一种宽波束接收工作模式用于提高场景长度。针对卫星过顶时间的估计误差和飞机导航系统的误差,提出了一种基于对直达波信号进行处理的补偿方案。仿真结果表明,该文提出的方法能在方位分辨率略好于单星 SAR 的前提下,使场景长度达到 1 km 以上。

关键词: 双基地 SAR; 星机双基地 SAR; 非合作 SAR; 波束同步

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1122-05

A Technique for Beam Synchronization in Non-Cooperative Hybrid Bistatic SAR

Zhou Peng^{①②} Pi Yi-ming^①

^①(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

^②(School of Information and Control Engineering, University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: An existing approach for beam synchronization, which is based on antenna steering on both sides, can not be applied to Spaceborne/Airborne hybrid Bistatic SAR (SA-BSAR) systems using sources of opportunity since the transmitter beam can not be steered. An approach via wide-beam receiving is proposed. The inspiration comes from the fact that the receiving distance in SA-BSAR is much shorter than the one in spaceborne SAR systems. An approach for compensating the estimation error of the satellite overpass time and the error in the aircraft navigation system is also proposed. The compensation is implemented through the processing of the direct path signal. The results of the performed simulation show that it can achieve a useful scene extension (at least more than 1 km) with an azimuth resolution slightly superior to the one obtained in spaceborne SAR systems.

Key words: Bistatic Synthetic Aperture Radar (BSAR); Spaceborne/Airborne hybrid Bistatic SAR (SA-BSAR); Non-cooperative SAR; Beam synchronization

1 引言

双基地 SAR(Synthetic Aperture Radar)是近年来微波成像领域的一大研究热点。较早的研究以对称体制为主,如:卫星发射/卫星接收、飞机发射/飞机接收等。随着这类系统的不断发展成熟,人们又将目光投向非对称体制的双基地 SAR^[1]。其中,最为引人注目的是一种由雷达卫星发射、由飞机接收的系统——星机双基地 SAR^[2,3]。该系统有望将星载发射器安全性好与机载接收器灵活机动的优点结合在一起,应用前景较好。特别是在未来的雷达卫星星座的支持下,该系统的应用前景将更加广阔。

由于雷达卫星的速度是飞机的几十倍,波束同步是星机双基地 SAR 面临的最大挑战。这里的波束同步包括两个方面:(1)在方位分辨率的量级可接受的前提下,如何尽可能地

提高场景长度;(2)当卫星过顶时间估计的不准确时,以及飞机未能精确地在预定时间到达指定地点时,如何进行补偿。对于合作式系统的波束同步技术,已有多篇文献进行过研究。Gebhardt 针对问题(1)给出了一种方案^[4-6],其核心思想是:通过让平台工作于“双向滑动聚束式”,降低波束速度差,从而提高波束重叠时间及场景长度。Espeter 针对问题(2)提出了一种方案^[7],其基本思路是:通过对直达波栅瓣的分析,侦测出实际的卫星过顶时间,进而计算出接收平台开始波束指向控制的适宜时刻,从而补偿卫星过顶时间的估计误差;根据接收平台上导航设备的实时测量值,确定适宜的波束指向角,从而补偿飞机导航系统的误差。对于非合作式系统的波束同步技术,目前还未见有国内外的公开文献进行过研究。由于非合作卫星不会主动进行波束指向控制,直达波信号中也不会存在栅瓣,文献[4-7]提出的方案均不适用于非合作式系统。本文旨在提出一种适用于非合作式系统的波束同步技术。

2008-03-09 收到,2008-09-01 改回

国家自然科学基金(60772143),教育部新世纪优秀人才支持计划(23901019)和四川省青年科技基金(06ZQ026-006)资助课题

2 波束同步机制的必要性

如果收发平台平行飞行,收发波束在方位向的重叠时间应为

$$t_{ol} = \frac{D_{az,t} - D_{az,r}}{V_{F,t} - V_{F,r}} \quad (1)$$

其中 $D_{az,t}$ 和 $D_{az,r}$ 为卫星、飞机方位向波束足迹长度, $V_{F,t}$ 和 $V_{F,r}$ 为波束移动速度。 $D_{az,t}$ 和 $D_{az,r}$ 的典型量级分别为几公里和几百米。如果收发平台均工作于传统的条带式, $V_{F,t}$ 和 $V_{F,r}$ 的速度差一般在 7.5 km/s 左右。根据式(1),波束重叠时间将不足 1 s,在这段时间内飞机只能覆盖几十米。显然,这样的系统没有任何实用价值。因此必须设计新的工作模式,在保证方位分辨率的量级可接受的前提下,将场景长度至少提高到公里级以上。

对于指定的成像区域,卫星只能在某些特定时间出现在该区域上方。一般可利用几十分钟前的卫星轨道观测数据,通过轨道摄动模拟软件,估计出卫星过顶时间^[7]。然后,飞行员在导航系统的帮助下,控制飞机也恰好在该时刻到达成像区域。然而,无论是卫星过顶时间的估计值,还是飞机的导航系统都会存在误差。显然,如果飞机仍然在原先预定的时间段内开机的话,将可能采集不到数据。因此必须采取某种技术手段,侦测出卫星经过成像区域的实际时间,从而合理确定接收机开始数据采集的适宜时刻和适宜的天线指向角。

3 宽波束接收工作模式

在非合作式星机双基地 SAR 中,卫星天线是不可控的,只能从飞机波束上做文章。根据该系统“远发近收”的特点,本文提出一种宽波束接收工作模式。其基本要点包括:(1)由于飞机速度相对较慢,成像时间又很短,完全可将系统近似地看作为一个“接收机固定”的系统;(2)对于“接收机固定”的系统,场景长度取决于接收波束足迹的宽度,因此,可以通过展宽接收波束的方法提高场景长度;(3)相比于单星 SAR,系统信噪比很高,足可弥补接收波束展宽后造成的信噪比损失。图 1 给出了该方案的示意图。

首先从信噪比方面论证方案的可行性。经距离和方位压缩后,系统的信噪比为^[3]

$$SNR_b = \frac{P_t \lambda^2 G_t G_r \sigma_b^0 A_{res,b} \xi_{int,b} \eta}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 k T_b F_b L_b} \quad (2)$$

其中 P_t 为信号峰值功率, λ 为信号波长, G_t 和 G_r 是卫星天线和飞机天线的增益, σ_b^0 是归一化双基地散射系数, R_t 和

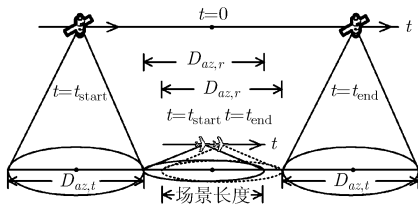


图 1 宽波束接收方案示意图

R_r 是卫星-目标和飞机-目标间的距离, $\xi_{int,b}$ 为合成孔径时间, η 是信号占空比, k 为玻尔兹曼常数, T_b 是机载接收机噪声温度, F_b 是接收机噪声系数, L_b 是双基地系统损耗, $A_{res,b}$ 是分辨单元面积。当收发平台平行飞行时, $A_{res,b}$ 可由下式计算^[3]

$$A_{res,b} = \rho_{az,b} \rho_{gr,b} = \left(\frac{\lambda}{V_t/R_t + V_r/R_r} \frac{1}{\xi_{int,b}} \right) \frac{c}{2B \cos(\beta/2) \sin(\eta_b)} \quad (3)$$

其中 $\rho_{az,b}$ 和 $\rho_{gr,b}$ 分别为方位和地距分辨率, V_t 和 V_r 为平台速度, c 为光速, B 为信号带宽, β 为双基地角, η_b 为双基地角角平分线对应的入射角。将式(3)代入式(2)后,可得

$$SNR_b = \frac{P_t \lambda^3 G_t G_r \sigma_b^0 \eta}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 k T_b F_b L_b} \cdot \left(\frac{1}{V_t/R_t + V_r/R_r} \frac{c}{2B \cos(\beta/2) \sin(\eta_b)} \right) \quad (4)$$

单星 SAR 的信噪比可看作是式(4)的特例, 即有

$$SNR_m = \frac{P_t \lambda^3 G_t^2 \sigma_m^0 \eta}{(4\pi)^3 R_t^4 k T_m F_m L_m} \frac{1}{2(V_t/R_t) 2B \sin(\eta_m)} \quad (5)$$

其中 σ_m^0 是归一化的单基地散射系数, T_m 是星载接收机噪声温度, F_m 是接收机噪声系数, L_m 是单基地系统损耗, η_m 是波束入射角。用式(4)除以式(5), 可得星机双基地 SAR 与单星 SAR 信噪比之比(即:理论上接收波束允许展宽的最大倍数)为

$$K_{max} = \frac{SNR_b}{SNR_m} = \frac{G_r}{G_t} \left(\frac{R_t}{R_r} \right)^2 K_1 K_2 \quad (6)$$

其中

$$K_1 = \frac{2 \cdot V_t/R_t}{V_t/R_t + V_r/R_r} \frac{\sin \eta_m}{\cos(\beta/2) \sin \eta_b} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{\sigma_b^0 T_m F_m L_m}{\sigma_m^0 T_b F_b L_b} \quad (8)$$

下面,通过一些典型参数对 K_{max} 的量级做一下简单的估算。设一个 C 波段星载发射机在 800 km 高的轨道上飞行,飞行速度为 7.45 km/s, 天线增益 45 dB, 天线视角 30°; 飞机高度 3 km, 天线增益 28 dB, 天线视角 60°, 速度 100 m/s; $K_2 = 1$ 。将以上参数代入式(6)-式(8), 可得 $K_{max} \approx 200$ 。由此可见,即使接收波束展宽为单机 SAR 的十几甚至几十倍,信噪比仍比单星 SAR 的量级高得多。

接下来,讨论飞机波束展宽后是否会对其它参数带来较大影响。众所周知,在单机 SAR 中,方位向天线尺寸与俯仰向天线尺寸、信噪比、测绘带、脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)等都有着密切联系。例如:通过减小方位向天线尺寸使波束展宽后,若要求信噪比不变,则俯仰向天线尺寸必须增加,从而导致测绘带减小;若波束展宽后,允许信噪比降低,测绘带可保持不变,但由于多普勒带宽的增加以及照射区域的扩大可能会引起 PRF 选择的困难。对于星机双基地 SAR,情况会如何呢?对于俯仰向天

线, 由于允许信噪比降低到单星 SAR 的量级, 其尺寸可保持不变, 测绘带也相应不变, 这点与单机 SAR 的情况相同。然而对于 PRF 的选择, 则有较大区别, 非合作式星机双基地 SAR 的 PRF 应满足^[8]

$$B_{az,b} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{V_t^2}{R_t} + \frac{V_r^2}{R_r} \right) \xi_{int,b} < \left(\text{PRF}_s = \frac{2V_t}{l_{az,t}} \right) < \frac{1}{T_{dur,b} + \tau_p} \quad (9)$$

其中 $B_{az,b}$ 为多普勒带宽, PRF_s 为星载照射源所使用的 PRF, $l_{az,t}$ 为卫星方位向天线尺寸, $T_{dur,b}$ 为波束照射范围内回波的持续时间, τ_p 为信号脉宽。式(9)中的 $\xi_{int,b}$ 应取收、发波束扫过时间中更短的那一个。在收发波束均不进行指向控制的情况下, 由于卫星速度是飞机的 70 余倍, 而且卫星天线尺寸远大于飞机天线尺寸, 因此卫星波束的扫过时间要短得多, 即有

$$\xi_{int,b} = \min \left(\frac{D_{az,t}}{V_t}, \frac{D_{az,r}}{V_r} \right) = \frac{D_{az,t}}{V_t} = \frac{R_t \cdot \lambda / l_{az,t}}{V_t} \quad (10)$$

考虑到 $V_t^2/R_t \gg V_r^2/R_r$, 将式(10)代入式(9)后可得

$$B_{az,b} \approx \frac{V_t}{l_{az,t}} < \left(\text{PRF}_s = \frac{2V_t}{l_{az,t}} \right) < \frac{1}{T_{dur,b} + \tau_p} \quad (11)$$

而对于单机 SAR, 式(9)对应的限制条件演变为

$$B_{az,a} = \frac{2V_r}{l_{az,r}} < \text{PRF}_a < \frac{1}{2T_{dur,a} + \tau_p} \quad (12)$$

其中 $l_{az,r}$ 为飞机方位向天线尺寸, PRF_a 为机载 SAR 的 PRF, $T_{dur,a}$ 为单机 SAR 回波的单程持续时间。对比式(11)和式(12)后可发现, 当 $l_{az,r}$ 十几甚至几十倍地减小时, 单机 SAR 中的多普勒带宽成比例地急剧增加, 而星机双基地 SAR 中的多普勒带宽则与 $l_{az,r}$ 无关。换句话说, $l_{az,r}$ 的减小不会对星机双基地 SAR 中 PRF 的选择造成困难。另外, 从式(11)还可看出, 由于 $V_t/l_{az,t} < 2V_t/l_{az,t}$, 并且 $T_{dur,b} \ll T_{dur,s}$, 星载照射源的 PRF 很容易满足式(11)的要求。

前面, 从信噪比以及对其它参数的影响两个方面论证了宽波束接收模式的可行性。接下来推导系统几个重要指标的计算公式。这些指标包括: 成像时间、场景长度、方位分辨率。其中, 成像时间定义为: 从发射波束与接收波束出现重叠时开始, 到发射波束完全离开为止, 其间所经历的时间。根据图 1, 利用平台间的相对速度可推导出该时间等于

$$t_{\text{image}} = t_{\text{end}} - t_{\text{start}} = \frac{D_{az,t} + D_{az,r}}{V_t - V_r} \quad (13)$$

场景长度定义为: 经历了卫星波束完整照射的所有目标点对应的长度。根据图 1, 场景长度应按下式计算

$$L_{\text{scene}} = D_{az,r} - V_r t_{\text{image}} \quad (14)$$

方位分辨率的公式实际上已在式(3)中给出, 将式(10)代入式(3)并整理后可得

$$\rho_{az} = l_{az,t} / \left(1 + \frac{R_t V_r}{R_r V_t} \right) \quad (15)$$

4 同步误差的补偿方案

前面的讨论只涉及到理想情况, 即: 卫星与飞机都恰好

在事先所估计出的卫星过顶时间经过场景中心。如前所述, 无论是卫星过顶时间的估计值, 还是飞机的导航系统都可能存在误差。本节给出一种基于直达波的误差补偿方案。

补偿的关键是在飞机飞到成像区域之前能及时侦测出实际的卫星过顶时间。直达波信号中包含有该时刻的信息, 是获取该时间的理想工具^[7]。设 $D(t)$ 表示基线距离史, 则直达波的幅度史可表示为^[7]

$$A_d(t) = \frac{P_t G_t}{4\pi D^2(t)} |C_t[\theta(t), \phi(t)]|^2 A_r \quad (16)$$

其中 A_r 为直达波天线的有效面积, θ 和 ϕ 是相控阵天线理论中球坐标系下的标准变量^[9], $C_t(\theta, \phi)$ 是卫星天线的幅度方向图。设 $t=0$ 代表的是事先所估计出的卫星过顶时间。当不存在误差时, 由于 $t=0$ 时收发间距离最短, 同时飞机又处于卫星方位向波束的中心指向上, 所以此时的直达波幅度最强。然而, 当存在误差时, 直达波最强幅度所对应的时刻将出现偏移。偏移量恰好是卫星与飞机在方位向上的实际“重合”时刻与其估计值之间的偏差。因此, 可以将理想的直达波信号事先保存在存储器中, 然后与实际接收到的直达波信号做相关, 相关峰对应的时刻就应为卫星和飞机的实际“重合”时刻。

然而, 由于只能在实际过顶时间之后才能检测到该时刻的出现, 上述方案并不能完全满足要求。为能提前做出预测, 还需增加一个门限比较器。其所依据的原理可由图 2 进行解释。图中给出了当 Δt_t (卫星过顶时间的估计误差) 和 Δt_r (飞机导航系统的误差) 取不同值时, 对“时刻 t 已接收到的直达波信号”和“理想直达波信号”执行相关运算所得到的峰值。从图 2 可看出, 几条曲线的形状基本相同, 只是时间关系不同。显然, 只要如图 2 所示地设置适宜门限, 就可以提前 Δt 时间预测出卫星和飞机的实际“重合”时刻。这里的关键之处就在于 Δt 只与卫星天线方向图、收发平台的几何关系、门限值等有关, 而与 Δt_t 和 Δt_r 无关。

检测到“重合时刻”将在 Δt 时间之后出现时, 飞机平台根据其当前位置可预测出“重合时刻”时其所在位置, 相应地也就预测出了卫星在“重合时刻”所处的位置。再根据场景中心的地理位置, 即可预测出卫星实际的过顶时间。得

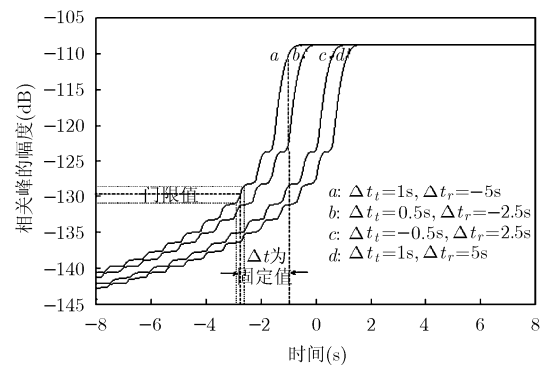


图 2 利用门限检测预测卫星过顶时间的依据

表 1 仿真过程中所使用的参数

参数	X 波段		C 波段		L 波段	
	TerraSAR-X	飞机	Envisat	飞机	TerraSAR-L	飞机
平台高度(km)	515	3	800	3	645	3
平台速度(km/s)	7.6	0.1	7.45	0.1	7.53	0.1
波束中心入射角(°)	20-55	40-75	15-45	45-70	20-45	50-60
载波频率(GHz)	9.65	9.65	5.331	5.331	1.2575	1.2575
发射功率(kw)	2.26	-	2.3	-	4	-
系统损耗(dB)	2	3	2	3	2	3
脉冲宽度(μs)	45	-	25	-	35	-
接收机噪声系数(dB)	-	5	-	5	-	5
接收机噪声温度(K)	-	<260	-	<260	-	<260
信号带宽(MHz)	150	150	16	16	85	85
俯仰向波束宽度(°)	2.3	10	2.3	24	4.3	42
方位向阵元数	-	24	-	24	-	6
方位向波束宽度(°)	0.33	12	0.28	27.6	1.1	30

到该时间之后,回波通道数据采集的起始时刻及接收波束的斜视角即可确定下来^[7]。图 3 给出了上述补偿方案的硬件方框图。

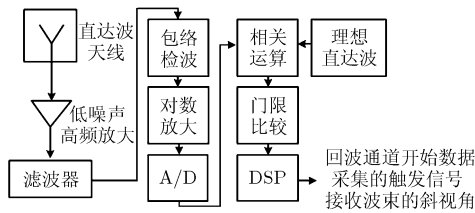


图 3 同步误差补偿方案的硬件方框图

5 仿真实例

前面所给出的例子只针对一些特殊的参数。为增强说服力,开展了 3 组不同仿真实验,分别针对 SAR 卫星中常用的 X 波段, C 波段和 L 波段。同时,在每一组实验中都对所有可能的波束入射角进行了论证。

表 1 列出了仿真过程中所使用的参数,其中 3 个波段方位向的原始波束宽度分别为 2°, 2.3°, 10°, 分别展宽 6, 12, 3 倍。另外, σ_b^0 设定为 -20 dB。

将以上参数分别代入式(4)和式(11)后可计算出信噪比及 PRF 的合理范围。图 4 和图 5 给出了最终的结果。从图 4 中可发现,3 组实验的信噪比均在 5 dB 以上,完全可以满足要求。从图 5 中可看出,3 组实验中的 PRF 都存在着很大的可选择范围。

为获得成像时间、场景长度和方位分辨率的大致量级,将以上参数代入式(13)-式(15)进行计算。表 2 给出了最终的计算结果。从结果中可看出,本文提出的方案能在方位分辨率略好于单星 SAR 的前提下,使场景长度达到 1km 以上。

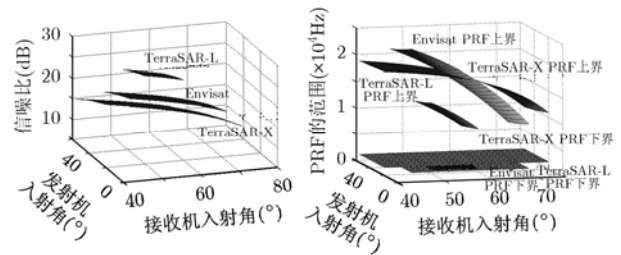


图 4 信噪比的仿真结果

图 5 PRF 合理范围的仿真结果

表 2 成像时间、场景长度和方位分辨率的量级

性能指标	X 波段实验	C 波段实验	L 波段实验
成像时间(s)	0.5~1	0.8~1.3	2.1~2.7
场景长度(km)	1~2.3	1.9~4	2.2~2.9
方位分辨率	1.2~3	2.3~4.4	3.2~4.4
单星 SAR 分辨率(m)	3	5	5.5

6 结束语

本文针对非合作式星机双基地 SAR 系统的波束同步问题,完成了以下两方面的工作。第一,根据星机双基地 SAR “远发近收”的特点,提出并论证了一种宽波束接收模式。仿真结果表明,该方案能在方位分辨率略好于单星 SAR 的前提下,使场景长度达到 1km 以上。第二,根据实际直达波信号可看作是理想直达波时移信号的特点,提出了一种先执行相关再进行门限比较的方案,用于补偿卫星过顶时间的估计误差和飞机导航系统的误差。

参考文献

- [1] Sanz-Marcos J, Lopez-Dekker P, and Mallorqui J J, *et al.* SABRINA: A SAR bistatic receiver for interferometric applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(2): 307-311.
- [2] Ender J, Klare J, and Walterscheid I, *et al.* Bistatic exploration using spaceborne and airborne SAR sensors: A close collaboration between FGAN, ZESS, and FOMAAS. IGARSS'2006, Denver, USA, Aug. 2006: 1828-1831.
- [3] Walterscheid I, Klare J, and Brenner A R, *et al.* Challenges of a bistatic spaceborne/airborne SAR experiment. EUSAR'2006, Dresden, Germany, May 2006.
- [4] Gebhardt U, Loffeld O, and Nies H, *et al.* Bistatic airborne/spaceborne hybrid experiment: basic consideration. Proc. SPIE International symposium on remote sensing, Brugge, Belgium, Oct. 2005: 479-488.
- [5] Gebhardt U, Loffeld O, and Nies H, *et al.* Bistatic airborne/spaceborne hybrid experiment: simulation and analysis. EUSAR'2006, Dresden, Germany, May 2006.
- [6] Gebhardt U, Loffeld O, and Nies H, *et al.* Bistatic spaceborne/airborne experiment: geometrical modeling and simulation. IGARSS'2006, Denver, USA, Aug. 2006: 1832-1835.
- [7] Espeter T, Walterscheid I, and Klare J, *et al.* Synchronization techniques for the bistatic spaceborne/airborne SAR experiment with TerraSAR-X and PAMIR. IGARSS'2007, Barcelona, Spain, July 2007: 2160-2163.
- [8] Loffeld O, Nies H, and Gebhardt U, *et al.* Bistatic SAR - some reflections on Rocca's smile. EUSAR'2004, Ulm, Germany, May 2004: 379-383.
- [9] 张祖稷, 金林, 束咸荣. 雷达天线技术. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第4章.
- Zhang Zu-ji, Jin Lin, and Shu Xian-rong. Radar Antenna Technology. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2005, Chapter 4.
- 周 鹏: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为双基地合成孔径雷达系统.
- 皮亦鸣: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究领域包括雷达信号处理、图像的传输与处理、导航定位技术等.