

# 超宽带合成孔径雷达运动补偿精度分析

常文革

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文对高分辨力超宽带 SAR 的运动补偿精度的要求进行了研究. 论文首先分析了影响 SAR 成像的方位向相位误差及其误差容限, 在此基础上, 对雷达平台的平移运动误差和姿态误差进行了分析, 对 UWB SAR 天线的安装误差进行了讨论. 论文的研究对于 UWB SAR 系统设计、实现具有重要的指导意义.

**关键词:** UWB SAR; 相位误差; 运动补偿

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1748-04

## Research on UWB SAR Motion Compensation Accuracy

CHANG Wen-ge

(School of electronic science and engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Motion compensation accuracy of high resolution UWB SAR is studied in the paper. First, phase errors are discussed and the phase errors tolerance is allocated. Then, the motion accuracy of radar platform is developed. The antenna fixing accuracy is studied. Finally, the paper is summarized and the conclusion is proposed.

**Key words:** UWB SAR; phase error; motion compensation

### 1 引言

超宽带雷达的瞬时相对带宽超过 25%, 具有极高的距离分辨力. 超宽带雷达结合合成孔径技术, 即超宽带合成孔径雷达 (UWB SAR), 可对地表、叶簇等地物覆盖的目标进行精细探测成像. UWB SAR 在民用应用和军事应用中均有巨大的应用前景.

SAR 要求雷达平台作匀速直线运动, 这种理想的运动在飞机飞行时是很难保证的, 飞机的飞行常常会偏离航线, 出现横滚、俯仰和偏流等姿态的变化, 这些非理想运动将会导致 SAR 在 LOS 方向出现距离误差、使方位向采样不均匀, 导致相位误差, 进而引起 SAR 图像质量下降, 如分辨力下降, 图像对比度下降, 甚至无法成像.

运动补偿是实现高分辨力 SAR 的关键, 研究运动补偿技术就是寻找如何减小甚至消除由于运动误差所导致的相位误差的方法. 总的来讲, 运动补偿研究内容包含两个方面:

**1. 补偿雷达平台的平移运动误差** 平移运动误差主要指三方面的运动误差: 沿飞行方向  $x$  的运动误差 (非匀速运动)、沿雷达平台的横向  $y$  的运动误差以及沿雷达平台垂直方向  $z$  的运动误差. 飞机的实际飞行轨迹与平移运动的关系如图 1 所示. 无论是沿  $x$  方向,  $y$  方向, 还是沿  $z$  方向的运动误差, 均会使沿雷达视线 (Line-Of-Sight; LOS) 方

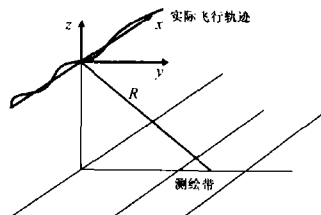


图 1 飞机平台的实际飞行轨迹与平移运动的关系

向出现附加相位误差. 另外, 沿  $x$  方向的运动误差还会使 SAR 在方位向的采样不均匀. 所以对于平移运动误差的补偿方法是补偿 LOS 方向附加的相位误差; 对方位向进行均匀插值.

**2. 补偿雷达平台的姿态变化** 雷达平台的三维姿态变化为: 横滚、俯仰和偏流. 雷达平台的三维姿态变化会导致雷达天线波束指向出现误差: 垂直波束指向误差和方位波束指向误差. 雷达波束指向误差会使雷达回波出现幅度调制, 如果飞机姿态调整足够快, 那么幅度调制便为一高频函数, 高频幅度调制会导致 SAR 出现成对回波. 另外, 方位波束指向的变化还会使方位向回波相位历史发生变化, 尤其是当方位波束指向出现固定误差时, 还会导致方位多普勒中心频率发生偏移. 所以对于雷达平台姿态误差的补偿方法是: 采用移定平台移定天线波束指向; 补偿或估计多普勒频偏.

UWB SAR 与常规窄带 SAR 相比, 运动补偿技术有其自身特殊性. 本文针对 UWB SAR, 对高分辨力 SAR 运动补偿的精度要求进行了分析研究, 为机载 SAR 运动补偿的实现方案提供设计依据. 本文的内容安排为: 首先讨论了方位向相位误差的来源、影响及其 SAR 系统对相位误差的容限, 详细分析了平台平移运动和姿态误差的影响, 提出了 UWB SAR 系统对平台的具体要求.

### 2 相位误差

飞机非理想的平移运动, 会导致 SAR 出现相位误差, 根据载机的飞行情况, 相位误差通常分为三类: 低频相位误差、高频相位误差以及宽带随机相位误差. 分析这些相位误差的影响及其容限是非常必要的.

收稿日期: 2001-08-06; 修回日期: 2002-06-10

2.1 低频相位误差

低频相位误差的周期大于一个合成孔径时间,采用 Taylor 展开式,又可以把低频相位误差分解为一次误差,二次误差和三次误差等.这些误差信号对于方位向信号的影响<sup>[2,1]</sup>可以总结为:一次相位误差导致图像发生偏移,导致图像失真;二次相位误差导致图像主瓣展宽,分辨力下降;三次相位误差导致图像出现非对称冲激响应.

在低频相位误差中,二次相位误差为主要成份,影响也比较大.表 1 为不同二次相位误差对于方位向成像的影响.其中加权函数采用 Hamming 加权,表中 QPE(Quadratic-Phase-Error) 的数值为二次相位误差在合成孔径两端的最大相位误差.

从表 1 可知:当二次相位误差为  $\pi/4$  时,方位冲激响应的主瓣宽度基本未展宽,主瓣仅下降了约 0.1dB.因此在实际设计中,二次相位误差的容限设为  $\pi/4$ .

2.2 高频相位误差

高频相位误差指相位误差的变化周期远小于一个合成孔径时间.高频相位误差会导致方位向冲激响应出现成对回波,

表 1 非周期性误差的影响 (-42dBHamming 加权)

QPE(rad)	-3dB 主瓣宽度	峰值损失 (dB)
0	1.0	0
$\pi/6$	1.0	0.015
$\pi/4$	1.0	0.03
$\pi/2$	1.14	0.14

旁瓣电平升高,影响峰值旁瓣比(PSLR),导致图像对比度下降.当相位误差幅度较小时,由成对回波理论<sup>[2]</sup>可知:

$$PSLR = \Phi_0^2/4 \tag{1}$$

其中  $\Phi_0$  为高频相位误差的峰一峰值.

表 2 为不同  $\Phi_0$  时高频相位误差对方位冲激响应的影响情况.

在 SAR 图像应用中,一般要求 PSLR 在 -25dB 以下,因此,对于高频相位误差的误差容限为 0.11rad( $6.3^\circ$ ).

2.3 带宽相位误差

宽带相位误差主要指随机相位误差,带宽相位误差会使方位向冲激响应的积分旁瓣比(ISLR)下降<sup>[2]</sup>:

$$ISLR = e^{\sigma_\phi^2} - 1 \approx \sigma_\phi^2 \tag{2}$$

ISLR 是反映图像对比度的主要指标,表 3 为随机相位误差对 ISLR 的影响情况.

在 SAR 图像应用中,要求 PSLR 在 -20dB 以下,因此,宽带相位的方差容限为 0.10rad( $6^\circ$ ).

表 2 不同  $\Phi_0$  时的高频相位误差对方位冲激响应的影响情况

PSLR(dB)	$\Phi_0$ (rad)
-20	0.20
-25	0.11
-30	0.06

表 3 几种误差的随机相位误差对 ISLR 的影响情况

ISLR(dB)	$\sigma_\phi$ (rad)
-15	0.18
-20	0.10
-35	0.04

3 UWB SAR 对平台运动参数要求

如引言所述,飞机的飞行运动误差分为两类:平移误差和姿态误差.平台的平移误差导致 SAR 在方位向产生相位误差;平台的姿态误差导致雷达回波调制发生变化、多普勒中心频率发生偏移.在上节相位误差容限分析的基础上,这一节分析 SAR 对雷达平台运动参数的要求,分析结果将对 UWB SAR 系统设计具有重要意义.

3.1 SAR 对平台平移运动误差的要求

平台的平移运动误差造成 LOS 方向的相位误差,为方便分析,本节将采用图 2 所示的  $(x-y'-z')$  坐标系,即将图 1 的坐标系沿横向转动  $\phi$  ( $\phi$  为俯视角).

图 2 所示的坐标系将平台的平移运动误差分解为沿飞行方向的运动误差  $\delta x$ 、沿 LOS 方向的运动误差  $\delta y'$  以及与前两个方向垂直方向的运动误差  $\Delta z'$ .

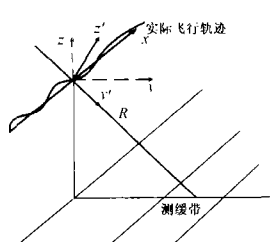


图 2  $(x-y'-z')$  坐标系

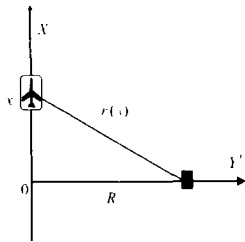


图 3  $(x-y')$  坐标系

$\delta x$  导致方位向采样间隔不均,引起 LOS 方向的距离误

差; $\delta y'$  直接引起 LOS 方向的相位误差; $\delta z'$  一般较小,对 LOS 方向的相位误差影响很小,可忽略.下面主要分析  $\delta x, \delta y'$  的影响.

将  $(x-y'-z')$  坐标系沿  $z'$  投影至地面,形成二维如图 3 所示的  $(x-y')$  坐标系.在该坐标系下,假设雷达在  $x$  处,雷达至目标的距离为:

$$r(x) = \sqrt{R^2 + x^2} \tag{3}$$

式中  $R$  为雷达航迹距目标的最近距离.

如果在  $x$  方向有一个小的扰动  $\delta x$ ,必然会导致  $r(x)$  的扰动  $\delta r$ ,即:

$$\delta r = (x/\sqrt{R^2 + x^2})\delta x = f(x)\delta x \tag{4}$$

$f(x)$  为增函数,  $\delta r$  的最大扰动  $\delta r_{\max}$  出现将出现合成孔径的两端.合成孔径长度与 SAR 方位分辨力有关,进而可以推导出  $\delta r_{\max}$  与方位分辨力  $\rho_a$  的关系为:

$$\delta r_{\max} = (\lambda k_a / 4 \rho_a) \delta x \tag{5}$$

引起的最大相位误差为

$$\sigma_{\phi_{\max}} = (4\pi/\lambda) \delta r_{\max} = (\pi k_a / \rho_a) \delta x \tag{6}$$

式中  $k_a$  为方位向加权系数.如果允许最大相位误差为  $\pi/4$ ,则允许的在  $x$  方向的扰动  $\delta x$  为:

$$\delta x \leq \rho_a / (4k_a) \tag{7}$$

对于机载 SAR,飞机的航速误差  $\Delta v$  导致方位向采样间隔误差  $\delta x$  的产生.为方便讨论,把式(7)变换为对飞机相对航速误差的要求,即:

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{\lambda}{4R \operatorname{tg}(\Delta\theta/2) \sin(\Delta\theta/2)} \varphi_{\max} \quad (8)$$

其中  $\Delta\theta$  为合成孔径的积累角. 式(8)表明了 SAR 的分辨力(隐含)、雷达作用距离、发射信号波长与飞机相对航速误差之间的关系. 显然, SAR 对飞机相对航速的精度要求随着距离的增加而更苛刻.

UWB SAR 的积累角一般为  $30^\circ \sim 40^\circ$ , 常规高波段 SAR 的积累角更小, 这样有下面的近似式成立:

$$\operatorname{tg}(\Delta\theta/2) \sin(\Delta\theta/2) \approx [\sin(\Delta\theta/2)]^2 = ((k_a \lambda / 4\rho_a))^2 \quad (9)$$

考虑式(9)、(8)可以近似表达为:

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{4\rho_a^2}{Rk_a^2 \lambda} \varphi_{\max} \quad (10)$$

式(10)清楚表明了飞机相对速度误差与 SAR 分辨力成正比, 与作用距离、波长成反比. 这是因为当作用距离大、波长较长时, 对于一定的分辨力要求的积累孔径更长, 因而由于速度误差所引起的相位误差积累也更大. 假设飞机飞行速度为  $120\text{m/s}$ , 中心频率  $f_c = 350\text{MHz}$ , 表 4 为不同作用距离时对于飞机飞行速度误差的要求, 其中方位向加权采用 Hamming 加权 ( $k_a = 1.33$ ),  $\rho_a = 1\text{m}$ ,  $\varphi_{\max} \leq \pi/4$ .

表 4 UWB SAR 对飞行速度的精度要求

作用距离	10000m	20000m	40000m
飞行速度精度	0.024m/s	0.012m/s	0.006m/s

关于  $y'$  方向的运动误差  $\delta y'$ , 则直接引起 LOS 方向相位误差, 即

$$\sigma_\varphi = (4\pi/\lambda) \delta r = (4\pi/\lambda) \delta y \quad (11)$$

如果给定相位误差的容限, 则允许的在 LOS 方向的扰动  $\delta y'$  为:

$$\delta y' \leq (\lambda/4\pi) \sigma_\varphi \quad (12)$$

由式(12)可见:

(1) 尽管 SAR 对的  $\delta y'$  要求与分辨力无显式关系, 但是  $\sigma_\varphi$  却与 SAR 分辨力、峰值旁瓣比 PSLR 和积分旁瓣比 ISLR 有关, 所以  $\delta y'$  也与分辨力  $\rho_a$ 、峰值旁瓣比 PSLR 和积分旁瓣比 ISLR 有关.

(2)  $\delta y'$  与波长有关, 较低的波段, 对  $\delta y'$  的要求更为宽松些.

(3)  $\delta y'$  反映了 SAR 对平台横向、垂直向(见图 1 坐标系的  $y-x$  方向)的误差要求. 具体讲, SAR 对于飞机横向的平移偏差要求为:

$$\sigma_H = \delta y' / \cos\phi = \lambda\sigma_\varphi / (4\pi\cos\phi) \quad (13)$$

SAR 对于飞机垂直向平移偏差为:

$$\sigma_v = \delta y' / \sin\phi = \lambda\sigma_\varphi / (4\pi\sin\phi) \quad (14)$$

式中  $\phi$  为雷达俯视角.

根据  $\Delta y'$  的变化情况, 相应的相位误差呈现出低频变化、高频变化和随机变化的规律, 不同变化规律的相位误差对 SAR 方位向成像的影响是不同的, 这一点在上一节已经分析过了. 表 5 为 UWB SAR ( $f_c = 350\text{MHz}$ ) 在不同相位误差情况下对飞机飞行参数的要求 ( $\Phi = 30^\circ$ ). 从表 5 的计算数值来看, SAR 对雷达平台在  $y$  方向、 $z$  方向的运动误差非常苛刻, 实际

的飞机平台是很难满足上述要求.

表 5 飞机平移飞行要求

相位误差类型	二次误差	高频误差	随机误差
相位误差容限	0.79rad	0.11rad	0.10rad
UWB SAR	偏航 $\leq 62\text{mm}$	偏航 $\leq 8\text{mm}$	偏航 $\leq 8\text{mm}$
平移运动误差要求	垂直 $\leq 108\text{mm}$	垂直 $\leq 14\text{mm}$	垂直 $\leq 14\text{mm}$

通过对雷达平台平移运动误差的分析发现: 高分辨力 SAR 对于飞机的航速稳定性或惯导系统统的测速精度要求随着雷达工作波段的降低而升高, UHF 波段的高分辨力 SAR 对于飞机的测速精度要求非常严格, 精度达到每秒毫米量级; SAR 对于飞机平台沿 LOS 方向的运动误差要求随着雷达工作波段的降低而降低, 对于 UWB SAR, 要求较为宽松.

### 3.2 姿态误差

实际上, 飞机姿态的变化不可能不引起飞机的平移运动误差, 前面已经比较详细地分析了平移运动误差的影响以及误差容限, 这里仅讨论“纯粹”的姿态误差: 没有引起任何平移运动误差的姿态误差. 或者说, 在已经完全补偿平移运动误差后, 再来讨论姿态误差的影响.

飞机的姿态误差会引起雷达波束指向的变化. 具体讲, 飞机偏航导致雷达波束指向在横向发生变化, 飞机的横滚导致雷达波束指向在垂直方向发生变化, 飞机俯仰使雷达波束发生转动. 偏航和横滚对于 SAR 的影响更为显著. 雷达波束指向的变化会对 SAR 产生两种影响: 波束指向偏离测绘区域使 SAR 无法成像, 波束的变化使得雷达接收回波出现幅度调制.

UWB SAR 的天线波束非常宽, 以美国 P3 UWB SAR 为例, 雷达工作频率为  $200\text{--}900\text{MHz}$ ,  $E$  面波束宽度为  $42^\circ\text{--}114.2^\circ$ ,  $H$  面波束宽度为  $23.4^\circ\text{--}82.5^\circ$ . 如此宽的波束即使当飞机有一定的偏航、横滚等姿态变化, 也不会使波束指向偏离测绘区域.

波束指向的变化对雷达成像的影响使方位回波历程产生幅度调制. 按照成对回波理论, 只要调制频足够高, 就能形成成对回波, 造成旁瓣电平升高. 显然, 幅度调制是与天线波束形状有关的.

UWB SAR 的天线波束很宽, 在波束顶部附近的形状可以用高斯函数来描述. 如图 4 所示, 图中实线为国防科技大学研制的平面 TEM 喇叭超宽带天线的增益实测曲线, 图中虚线为采用高斯函数拟合的曲线. 可见, 在主瓣附近, 两者拟合的非常好.

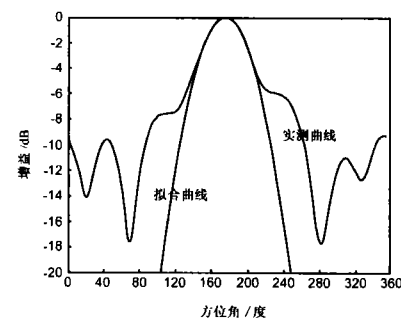


图 4 天线增益曲线与拟合曲线

因此, UWB SAR 的天线方向图的增益可以近似表达为:

$$G = \exp\left[-\alpha\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2\right] \quad (15)$$

经过微分, 有:

$$(\Delta G/G) = (-2\alpha\theta/\theta_{3dB}^2)\delta\theta \quad (16)$$

UWB SAR 的孔径积累时间较长,一般达到几十秒钟.在这么长的时间内,飞机难免有姿态的变化,一般可以认为  $\delta\theta$  按正弦规律变化,那么,  $\Delta G/G$  也应按正弦规律发生变化,因此回波的幅度调制也应该按照正弦规律变化,因而导致方位向峰值旁瓣比为:

$$PSLR = (\alpha\theta/\theta_{3dB})\delta\theta \quad (17)$$

以图 4 的天线波束图为例( $\alpha = 2.7, \theta_{3dB} = 55^\circ$ ),如果  $PSLR \leq -25dB$ ,则对于不同得  $\theta$ ,对于  $\delta\theta$  的约束见下表.

显然,随着波束指向由波束中心向波束外侧变化,对于波束指向精度愈来愈高.以 SAR 俯视角为  $30^\circ$  为例,假设飞机高度为 10000m,测绘带为 2000m,可以计算,对应俯视角的变化范围为  $[-1.5^\circ, 1.4^\circ]$ ,对照表 6 的计算数值,波束指向精度要求极低.或者说,允许飞机制的偏航角度变化可以达  $11.5^\circ$ .

通过对雷达平台平移运动误差和姿态误差的分析可以发现:UWB SAR 运动补偿的重点应该是对平移运动误差的补偿,而平移运动误差的运动补偿要求具有极高的运动测量精主的设备.对于姿态的稳定,UWB SAR 却要求非常宽松,甚至不需任何稳定平台来隔离飞机的姿态误差.这一点,对于实现 UWB SAR 的运动补偿非常重要,不需要稳定平台意味着 SAR 系统的实现又简化了许多,成本又降低了许多.

另外,在天线安装时存在的固有偏角(方位向)是一个必须注意的问题.本文研究的 SAR 为正侧视 SAR( $\theta = 90^\circ$ ),假设天线安装时,存在固有指向误差  $\delta\theta$ ,那么该指向误差将会导致 SAR 方位向历程轨迹发生变形,如果以多普勒频率的观点来看,指向误差会导致多普勒中心频率发生偏移(正侧视 SAR 的多普勒中心频率为 0),致使方位向多普勒频率上限上移,如果 SAR 重复频率不是足够高,将会使 SAR 方位向出现模糊,严重影响成像质量.下面就来讨论在雷达重复频率一定时,可以容忍多少方位向波束的偏移.

假设雷达工作频率为  $[f_{min}, f_{max}]$ ,对应波长为  $[\lambda_{max}, \lambda_{min}]$ ,雷达重复频率为  $f_r$ ,天线实际方位波束宽度所能达到的分辨力为  $(\rho_a)_r$ ,可以计算,在正侧视时,可容忍的波束指向误差  $\Delta\theta$  为:

$$\delta\theta \leq (\lambda_{min}/2v_a)f_r - (f_{min}/(\rho_a)_r) \quad (18)$$

其中,  $v_a$  为飞机地速.

关于  $\delta\theta$  的具体数值,可以举一个具体的例子,假设雷达工作频率为  $[2000MHz, 500MHz]$ ,天线实际方位波束所能达到的分辨力为 0.5m,雷达重复频率为 1000Hz,飞机地速 120m/s,则可容忍的指向误差达到  $\delta\theta \leq 74^\circ$ .

显然,与高波段相比,UWB SAR 对于横向波束的指向精度要求非常低,不要求特别精确的天线安装,因此也大大降低了 UWB SAR 的飞行实验成本.

#### 4 结束语

本文分析了 UWB SAR 对雷达平台的飞行精度要求,对于机载 UWB SAR 的设计、实现是非常重要的.国防科技大学已经研制成功了轨道 UWB SAR 实验系统,利用该轨道实验系统,开展了大量的 UWB SAR 理论研究.经轨道 UWB SAR 实验系统的实验验证,本文的研究成果是正确有效的.

#### 参考文献:

- [1] 张澄波.综合孔径雷达[M],北京:科学出版社,1989.
- [2] Walter G Carrara, Ron S Goodman, et al. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. London: Artech House Boston, 1995.
- [3] 常文革,梁甸农,周智敏.轨道超宽带 SAR 实验技术研究[J].电子学报,2001,29(9):1213-1216.
- [4] Donald R Wehner. High-Resolution Radar[M]. London: Artech House Boston, 1995.
- [5] Mehrdad Soumekh. Synthetic Aperture Radar signal Processing with MATLAB Algorithms[M]. A Wiley-Interscience Publication, 1999.
- [6] W G Carrara, S Tummala, R Goodman. Motion Compensation Algorithm for Widebeam Stripmap SAR[J]. SPIE, 2487: 13-25.
- [7] W S Helliwell. Motion Estimation from SAR Data[J]. SPIE. 2487: 325-336.
- [8] Thomas Mayer, Alberto Moreira. An Algorithm for Airborne Motion Error Correction Using the Phase Information in SAR Raw Data[J]. EUSAR'96, Konigswinter, Germany 1996: 139-142.

#### 作者简介:

常文革 男,1965年9月生于陕西省岐山县.在国防科技大学获硕士、博士学位,现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授.主要从事 SAR 信号处理,自适应信号处理等信号与信息处理领域的研究工作.

表 6 波束内不同位置对波束指向的要求

波束内不同指向 $\theta$	对波束指向误差要求 $\delta\theta$
$\theta = 0.10\theta_{3dB} = 1.5^\circ$	11.5°
$\theta = 0.20\theta_{3dB} = 3^\circ$	5.8°
$\theta = 0.30\theta_{3dB} = 4.5^\circ$	3.8°
$\theta = 0.40\theta_{3dB} = 6^\circ$	2.9°