

文章编号: 1001-2486 (2000) 05-0037-04

地面轨道 UWB-SAR 的运动补偿*

朱国富, 常文革, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: SAR 的运动误差会造成相位误差, 从而影响脉冲压缩的结果。文章分析了地面轨道 UWB-SAR 的运动误差, 研究了对方位向脉冲压缩的影响, 最后提出了运动补偿的实现方案。

关键词: 运动补偿; 脉冲压缩; UWB-SAR

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

Motion Compensation of Ground Rail UWB-SAR

ZHU Guo-fu, CHANG Wen-ge, LIANG Dian-nong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The motion error of SAR will bring about phase error and affect the result of the pulse compression. In this paper, the motion error of ground rail UWB-SAR is analyzed, and the effect on azimuth pulse compression is investigated. A scheme of motion compensation is put forward in the end.

Key words: motion compensation; pulse compression; UWB-SAR

雷达的运动误差直接影响着 SAR 回波多普勒信号的相位和幅度, 从而使脉冲压缩产生畸变, 影响 SAR 图像的质量。因此, 运动补偿是 SAR 系统必不可少的^[1-3]。

本文首先从空间频率的角度分析了地面轨道 UWB-SAR 的方位向脉冲压缩, 然后定量地分析了运动误差对方位向脉冲压缩的影响, 最后提出了地面轨道 UWB-SAR 系统运动补偿的实现方案。

1 方位向脉冲压缩的一般性分析

利用雷达的直线运动, SAR 通过合成孔径可以在方位向获得很高的分辨率 (图 1)。假设雷达运动轨迹的高度为 z_0 , 点散射体 P 的位置在 $(0, y_0, 0)$ 处, 至轨迹的距离为 $R_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}$, 雷达发射角频

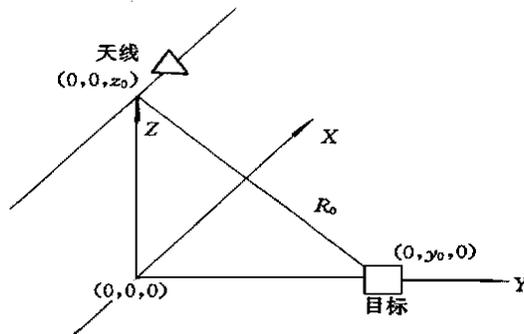


图 1 SAR 原理图

Fig 1 Schematic diagram of SAR

率为 ω_c 的单频脉冲, 则雷达在轨迹上 $(x, 0, z_0)$ 处接收到的信号为

* 收稿日期: 2000-04-12
 基金项目: 国家部委基金项目资助 (7.5.3.2)
 作者简介: 朱国富 (1972), 男, 博士生。

$$s_r(x, t) = \exp\{j\omega_c[t - 2\frac{R(x)}{c}]\} \quad (1)$$

这里暂不考虑信号的衰减。雷达至点散射体的距离为 $R(x) = \sqrt{x^2 + R_0^2}$ 。一般 $R_0 \gg x$ ，做菲涅耳(Fresnel)近似有

$$R(x) \approx R_0 + \frac{x^2}{2R_0} \quad (2)$$

由于雷达运动引起的多普勒相位为

$$\Phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} 2R(x) = \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{2\pi x^2}{\lambda R_0} \quad (3)$$

(3)式是方位向运动距离的二次函数，可见方位向的多普勒信号为线性调频(LFM)信号(其中 $\frac{4\pi R_0}{\lambda}$ 是固定相位项)，调频斜率为 $k = \frac{2}{\lambda R_0}$ 。对此多普勒信号做匹配滤波，使波形压缩，就可以在方位向得到很高的分辨率。

如果雷达的运动不是理想的匀速直线运动，那么目标到雷达的距离误差 $\Delta R(x)$ 就会使多普勒相位产生误差，从而影响方位向脉冲压缩的结果。下面就具体分析各个方向的运动误差对方位向多普勒相位的“贡献”，以及对方位向脉冲压缩的影响。

2 运动误差对方位向脉冲压缩的影响

假设雷达在3个方向的运动误差分别为 Δx 、 Δy 和 Δz ，则雷达至目标的距离为

$$R(x) = \sqrt{(x + \Delta x)^2 + (y_0 - \Delta y)^2 + (z_0 + \Delta z)^2} \quad (4)$$

一般运动误差不会很大，做菲涅耳近似有

$$\begin{aligned} R(x) &= \sqrt{(y_0 - \Delta y)^2 + (z_0 + \Delta z)^2} + \frac{(x + \Delta x)^2}{2\sqrt{(y_0 - \Delta y)^2 + (z_0 + \Delta z)^2}} \\ &= R_0 - \Delta y \sin \alpha + \Delta z \cos \alpha + \frac{1}{2R_0} \left(1 + \frac{\Delta y \sin \alpha - \Delta z \cos \alpha}{R_0}\right) (x + \Delta x)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 α 为俯角。此时，多普勒相位为(忽略固定相位项)

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \frac{4\pi}{\lambda} (-\Delta y \sin \alpha + \Delta z \cos \alpha) + \frac{2\pi}{R_0 \lambda} \left(1 + \frac{\Delta y \sin \alpha - \Delta z \cos \alpha}{R_0}\right) (x + \Delta x)^2 \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} (-\Delta y \sin \alpha + \Delta z \cos \alpha) + \pi(k + \Delta k)x + \Delta x)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可以看出，运动误差对多普勒相位造成的影响分为三个部分：

- (1) 常数相位误差 $\frac{4\pi}{\lambda} (-\Delta y \sin \alpha + \Delta z \cos \alpha)$;
- (2) Δx 造成的一次相位误差;
- (3) 调频斜率的改变 $\Delta y = \frac{\Delta y \sin \alpha - \Delta z \cos \alpha}{R_0} k$ ，产生的二次相位误差。

这3种相位误差对脉冲压缩波形的影响是不同的，评价脉冲压缩性能的最重要的指标是分辨率和峰值旁瓣比，下面就从这两个指标分析这3种相位误差对脉冲压缩的影响^[2]。

2.1 常数相位误差

常数相位误差只引起匹配滤波器输出相位的变化，不会引起幅度的变化，所以不影响方位向的脉冲压缩波形。

2.2 一次相位误差的影响

一次相位误差对应着回波延时的误差，会造成脉冲压缩波形位置的偏移，但不会影响脉冲压缩波形的形状。对于孤立点目标的情况，一次相位误差只会使点目标的位置发生偏移，不会造成图像失真。但是实际 SAR 图像往往是分布目标，这样一次相位误差就会造成图像的几何畸变，甚至会使分

分辨率下降。

2.3 二次相位误差的影响

二次相位误差使 LFM 信号的调频斜率发生改变, 从而影响脉冲压缩的波形。二次相位误差在信号持续时间的两端, 即合成孔径两端达到最大值 $\Delta\Phi_{2m}$,

$$\Delta\Phi_{2m} = \pi\Delta k\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4}L^2\Delta k \quad (7)$$

图 2 画出了不同最大二次相位误差时脉冲压缩的波形。从图中可以看出, 二次相位误差会对脉冲压缩造成两方面的影响:

- (1) 造成脉冲压缩波形的主瓣展宽, 分辨率下降;
- (2) 使脉冲压缩波形的峰值旁瓣比下降, 即峰值下降, 旁瓣升高。

对 SAR 成像而言, 影响较大是二次相位误差, 主瓣的展宽和旁瓣的升高会严重影响 SAR 图像的质量。根据 SAR 图像分辨率和峰值旁瓣比的要求, 通过数值分析可以确定出最大的二次相位误差 $\Delta\Phi_{2m}$, 从而对运动误差提出限制。

如果采用加权处理, 可以减小二次相位误差的影响, 从而放宽对运动误差的要求, 这里不做重点讨论, 具体分析请参考文献 [1]。

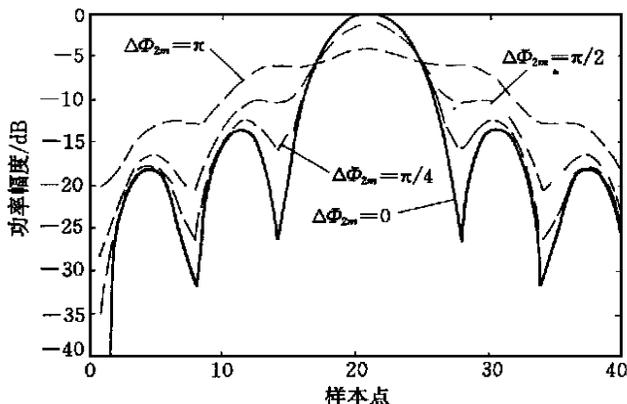


图 2 二次相位误差对脉冲压缩的影响

Fig. 2 Affect of quadratic phase error on impulse compression

3 地面轨道 UWB-SAR 运动补偿的实现方案^[3]

从以上的分析可以知道, x 方向的运动误差将会造成目标方位向位置的偏移, y 和 z 方向的运动误差将会使目标主瓣展宽, 峰值旁瓣比下降。在地面实验中, 为了减小运动误差对 SAR 图像的影响, 我们将雷达限制在轨道上作等间隔的步进运动。通过高精度的步进电机驱动器, 减小 x 方向的运动误差; 通过对轨道加工的平直度以及轨道安装的平行度的要求, 减小 y 和 z 方向的运动误差。

地面轨道 UWB-SAR 的运动补偿系统包括一台计算机和一台光电测距仪。光电测距仪由激光经纬仪和后向反射器组成。激光经纬仪放置在孔径的一端, 后向反射器安装在运动平台上天线的附近, 在整个孔径的运动中, 从激光经纬仪处都能够看到后向反射器。光电测距仪由计算机通过 RS-232C 通讯端口遥控。雷达在轨道做等间隔的步进运动, 在每个测量位置, 计算机控制光电测距仪测量后向反射器的水平角、垂直角和距离, 将数据以文件形式存储。为了获得最佳的补偿效果, 我们采用 BP 成像算法^[4], 对每一个测量位置做出精确补偿。

实验验证了运动补偿的效果。实验中的目标是一个三面角反射器。图 3 和图 4 分别给出了运动补偿前后, 三面角反射器所在距离门的方位向剖面图。可以看出, 经过补偿以后, 图像聚焦性能得到了明显改善, 图 4 和图 3 相比, 图像峰值提高了约 3 dB, 主瓣宽度减小了一半, 相当于分辨率提高了一

倍, 峰值旁瓣降低了约 6 dB, 所以运动补偿的效果是非常显著的。

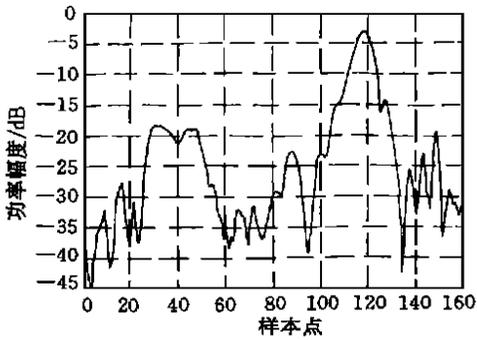


图3 运动补偿前结果

Fig. 3 Result before motion compensation

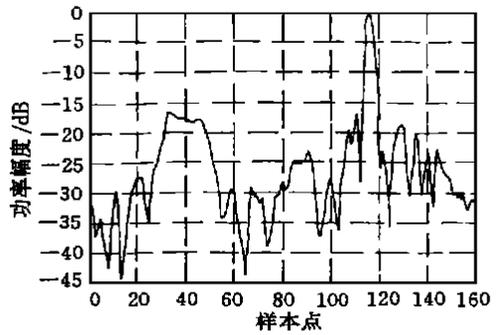


图4 运动补偿后结果

Fig. 4 Result after motion compensation

4 结束语

运动补偿是 SAR 系统的一个比较复杂的课题。本文从空间频率的角度分析了地面轨道 UWB-SAR 的方位向脉冲压缩, 研究了运动误差对方位向脉冲压缩的影响, 最后提出了地面轨道 UWB-SAR 运动补偿的实现方案。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Brown W.M. SAR Resolution in the Presence of Phase Error [J]. IEEE Trans. On AES, 1988, 24 (6): 808-814.
- [3] John S, Hepburn A, Colin P. Motion Compensation For ASTOR Long Range SAR [J]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1990: 205-208.
- [4] John W McCorkle. Focusing of Synthetic Aperture Ultra Wideband Data [J]. IEEE Intl. Conf. On System Engineering, 1991, ISBN 0-7803-0173-0.