

一种用于宽带机载 SAR 的空变相位误差补偿算法

孟大地 丁赤飏

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文提出了一种用于机载合成孔径雷达(SAR)的方位向空变相位误差补偿算法。传统的机载 SAR 运动补偿技术只补偿方位向相位误差的空不变分量,而常常忽略空变分量。对于高分辨率宽带 SAR,传统的运动补偿算法由于没有补偿空变相位误差,不能满足分辨率要求。该文提出的子孔径算法通过在距离-多普勒域将 SAR 数据分为若干子孔径,每个子孔径数据进行单独的相位误差补偿,从而实现了空变相位误差的补偿。在传统的运动补偿处理中嵌入该算法可以大大提高 SAR 图像方位向分辨率。

关键词: 合成孔径雷达; 运动补偿; 空变相位误差

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2375-04

A New Approach to Compensating Spatially Variant Phase Error in Airborne Wideband SAR

Meng Da-di Ding Chi-biao

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A new motion compensation algorithm dealing with spatially variant phase error in azimuth direction is purposed in this article. Traditionally, only the spatially invariant part of phase error can be compensated and the residual spatially variant part is ignored. It is essential to compensate the spatially variant part of phase error in the high resolution wideband SAR. The new algorithm purposed in this article manages this part of phase error by splitting the SAR data to several sub-apertures in range-Doppler domain and compensates the spatially variant phase error respectively. The azimuth resolution is enhanced when the new algorithm is embedded into the traditional motion compensation algorithm.

Key words: SAR; Motion compensation; Spatially variant phase error

1 引言

对于机载合成孔径雷达(SAR),由于载机运动状态的非理想匀速直线性,若仅仅对 SAR 数据进行成像处理,所得到的 SAR 图像将出现严重散焦。运动补偿技术在成像处理阶段逐步补偿载机轨迹非理想性对 SAR 数据造成的各种影响,是提高 SAR 分辨率的关键技术。

SAR 技术的广泛应用对 SAR 图像分辨率等指标提出更高要求的同时,对运动补偿精度也提出了更高的要求。从成像空间几何模型来说,运动补偿算法在相同时刻对不同方位向位置地面散射点所需补偿的相位误差不同,这部分误差称为“空变相位误差”。传统的运动补偿技术在距离压缩之前补偿不随距离向变化的空不变相位误差,在方位压缩之前补偿剩余空不变相位误差(或用自聚焦的方法补偿剩余的空不变相位误差^[1]),而忽略了空变相位误差^[2]。对于分辨率要求不高的 SAR 系统,在运动误差较小的情况下,这样的近似足以满足分辨率要求;而当运动误差较大时,空变相位误差也较大,导致传统的补偿技术不足以满足分辨率要求;对于

大带宽、大视角的高分辨率 SAR 系统,即使运动状态测量环节没有任何误差,所忽略的空变相位误差也将造成 SAR 图像散焦,不能达到分辨率指标^[3]。因此如何补偿空变相位误差,是提高运动补偿精度,实现高分辨率 SAR 成像的关键。

文献[4]中提出了一种条带 SAR 空变相位误差的聚束式算法,但该方法只能对场景中的某一区域达到较好的聚焦效果,而在场景的其他位置,聚焦效果较差^[2]。

本文提出了一种距离-多普勒域空变相位误差补偿算法。该算法将距离-多普勒域数据划分为若干子孔径,每个子孔径分别进行高精度运动补偿处理。该算法实现简便,补偿效果良好。将该算法嵌入传统的运动补偿算法,可以大大提高运动补偿精度,进而提高 SAR 图像质量。

2 空变相位误差分析

在本文中,“空变相位误差”是指当载机处于方位向某个位置时的运动误差值,对地面场景不同方位向位置点目标来说,引起不同的相位误差值。如图 1 所示,理想航迹处于 yOz 平面内且与 y 轴平行,当载机处于方位向位置 P 时,对应理想航迹位置 P_0 ,即 PP_0 处于 xOz 平面内。正侧视视线

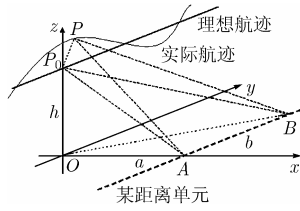


图 1 空变相位误差三维图示

方向点目标 A，点目标 B 位于 A 所在距离单元不同方向位置。载波波长为 λ 时，载机运动误差对点目标 A，B 造成的相位误差分别为

$$\varphi_{eA} = \frac{4\pi(|PA| - |P_0A|)}{\lambda} \quad (1)$$

$$\varphi_{eB} = \frac{4\pi(|PB| - |P_0B|)}{\lambda} \quad (2)$$

通常情况下， $|PA| - |P_0A| \neq |PB| - |P_0B|$ ，因此 $\varphi_{eA} \neq \varphi_{eB}$ 。传统的运动补偿算法对 A 所在距离单元上的所有点目标只补偿 φ_{eA} ，并称 φ_{eA} 为“空不变相位误差”，而剩余的相位误差称为“空变相位误差”。

图 1 中，设航迹高度为 h ， P_0 点坐标为 $(0,0,h)$ ，P 点坐标为 $(dx,0,h+dz)$ ，OA 长度为 a ，AB 长度为 b ，则 P 到 P_0 的运动误差对点目标 A 产生的斜距误差：

$$|PA| - |P_0A| = \sqrt{(h+dz)^2 + (a-dx)^2} - \sqrt{h^2 + a^2} \quad (3)$$

对点目标 B 产生的斜距误差

$$|PB| - |P_0B| = \sqrt{(h+dz)^2 + (a-dx)^2 + b^2} - \sqrt{h^2 + a^2 + b^2} \quad (4)$$

假设载波波长为 λ ，则点目标 B 处的空变相位误差为

$$\tilde{\varphi}_{eB} = \frac{4\pi[(|PB| - |P_0B|) - (|PA| - |P_0A|)]}{\lambda} \quad (5)$$

假设 $\lambda = 0.03\text{m}$ ， $dx = 3\text{m}$ ， $dz = 3\text{m}$ ， $h = 8000\text{m}$ ，则在点目标 A 所在距离单元上， $a = 5000\text{m}$ 或 10000m 时，空变相位误差 φ_e 随波束方位向视角 $\angle AP_0B$ 变化关系如图 2 所示。

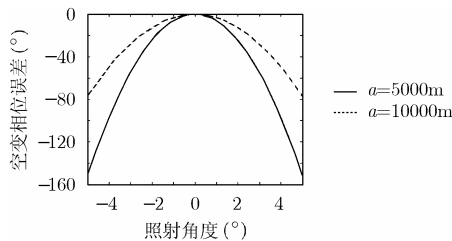


图 2 空变相位误差随照射角度变化图示

由以上分析及图示可知，运动误差越大，相应空变相位误差就越大；空变相位误差与波长 λ 成反比，频段越高，运动误差影响越大；天线视角越大，运动误差影响越大；入射角越小，运动误差影响越大。以 X 波段 SAR 仿真为例，运动

误差幅度为 4m (中度载机运动误差水平^[3])，在小入射角时， $\pm 2.7^\circ$ 之外的点目标具有较大的空变相位误差，在大入射角时， $\pm 3.8^\circ$ 之外的点目标具有较大的空变相位误差。

3 空变相位误差子孔径补偿算法

本文提出了一种补偿方位向空变相位误差的子孔径补偿算法。该算法基于线性调频信号(chirp 信号)特殊的时频对应关系，对 SAR 数据进行方位向子孔径分割，对每个子孔径单独进行相位误差补偿。以下从对线性调频信号的时频特性分析开始对该算法的讨论。

3.1 线性调频信号的时频对应关系

根据驻定相位原理，当 chirp 信号的时间带宽积足够大 (一般要求大于 $100^{[1]}$) 时，chirp 信号的时域坐标与其频谱的频域坐标有近似一一对应的线性关系。假设一个 chirp 信号

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot e^{j\pi kt^2} \quad (6)$$

其中 k 为线性调频率，在常规 SAR 成像中， $k < 0$ 。T 为信号时宽。其时间带宽积 $A = |k| \cdot T^2$ 。

对 $s(t)$ 做傅里叶变换后其频谱近似为

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{|k|}} \text{rect}\left(\frac{f}{F}\right) \cdot e^{-j\pi \frac{1}{k} f^2 + \frac{\pi}{4}} \quad (7)$$

其中 F 为频谱带宽。chirp 信号 $s(t)$ 中的某一时间点 t 对应 $S(f)$ 中的频点 $f = k \cdot t$ 。

由以上关系可知，对于 chirp 信号 $s(t)$ 的某一段时间段 $t \in [t_1, t_2]$ ，当该段的时间带宽积 $k \cdot (t_2 - t_1)^2$ 足够大时，对其单独做傅里叶变换，所得频谱即是 $S(f)$ 的 $f \in [k \cdot t_2, k \cdot t_1]$ 频段。这时如果将 $s(t)$ 等分为若干个等间隔时间段时，其对应频谱分别对应 $S(f)$ 的某一频段。根据帕斯瓦尔定理，这些频谱求和之后将完全恢复频谱 $S(f)$ 。该关系如图 3 所示。为方便起见，图中已将频谱进行 3 段划分，频率坐标轴与时间坐标轴反向表示。

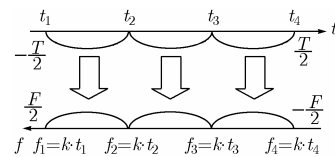


图 3 Chirp 信号时频对应关系图示

对于某一距离单元内的方位向信号 $x(t)$ (已完成距离压缩及距离迁移校正)，它是该距离单元场景中所有点目标反射回波 $s_i(t), i = 1, \dots, N$ 的叠加，其中 N 为点目标个数：

$$x(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (8)$$

每个点目标反射回波都是 chirp 信号：

$$s_i(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_i}{T}\right) e^{j\pi k(t-t_i)^2}, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

根据以上结论及图 3 所示,在时间带宽积条件满足的情况下,某距离单元方位向信号 $x(t)$ 的频谱 $X(f)$ 的某一频段对应各 $s_i(t)$ 的某一段时间。假设 $N = 3$, 这种关系如图 4 所示。

3.2 空变相位误差子孔径补偿算法

在对一个 chirp 信号进行少量的相位及幅度调制时,该调制后信号依然满足驻定相位原理^[9]。因此对于受运动误差影响的方位向信号, 3.1 节的结论依然成立。

在图 4 中,当截取频段 B 并返回时域时,所得信号是每个点目标的时间段 B 信号的叠加。对每个点目标来说,该时间段都对应天线方位向视角同样的范围,因此可以用一个相同的空间几何模型进行空变相位误差补偿。同理,频段 A 、 C 也分别可以用同样的空间几何模型进行空变相位误差补偿。

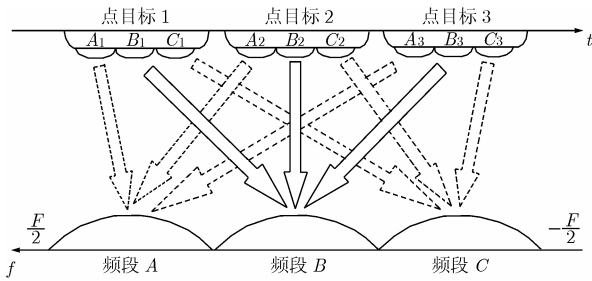


图 4 SAR 方位向信号时频对应关系图示

假设在截取每个频段时,都用该频段中心所对应时间点的空间几何模型进行空变相位误差补偿。一般地,假设载机运动误差用 $dx(t)$, $dz(t)$ 表示,根据式(5),对各点产生的空变相位误差为 $\tilde{\varphi}_{\varepsilon B}(t)$, 频段 B_1, B_2, \dots, B_M (其中 M 为划分频段数)截取频域信号分别对应时域信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)$ 且有

$$x(t) = \sum_{i=1}^M x_i(t) \quad (10)$$

$x(t)$ 是空不变相位误差补偿之后的信号,则基于式(5),对各时域信号分别用式(11)做空变相位误差补偿:

$$\tilde{x}_i(t) = x_i(t) \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi \cdot \tilde{\varphi}_{\varepsilon B}(t)}{\lambda} \right\} \quad (11)$$

将所有补偿结果求和,即得到最终补偿结果:

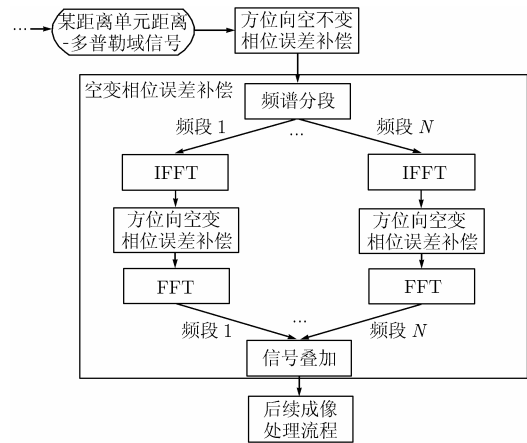
$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^M \tilde{x}_i(t) \quad (12)$$

参考式(5),在式(11)中,相位因子的前一项表示在当前频段信号中运动误差所造成的相位误差,后一项表示在当前频段信号中运动误差所造成的空不变相位误差,因此整个相位因子表示运动误差对当前频段所造成的空变相位误差。式(12)求和之后即是空变相位误差补偿之后的 SAR 方位向信号。

基于以上图示及分析,在常规成像过程中,距离压缩、

距离迁移校正之后,可以通过以下步骤对距离-多普勒域 SAR 数据的某一距离单元信号做方位向空变相位误差补偿:

- (1)在所有的补偿开始之前,先用传统的运动补偿算法去除方位向空不变相位误差,以提高后续空变相位误差补偿精度;
 - (2)在满足时间带宽积的条件下,依图 4 所示,将距离-多普勒域 SAR 方位向信号划分为 N 个频段;
 - (3)对每个频段的信号,将频段之外的信号置零,并做 IFFT,得到该频段对应时域信号,如图 4 所示;
 - (4)以当前频段所对应时间段中心位置为准,利用式(11)进行空变相位误差补偿;
 - (5)对每个补偿后信号进行 FFT 得到距离-多普勒域方位向信号;
 - (6)将补偿之后的距离-多普勒域方位向信号叠加,完成空变相位误差补偿。
 - (7)继续方位向脉冲压缩等后续成像处理流程。
- 算法流程图如图 5 所示。



在该流程中,也可以不预先做空不变相位误差补偿,而对式(11)稍做修改,直接补偿所有相位误差。而在实际应用中,一般先在空变相位误差补偿之前补偿空不变相位误差,是为了防止相位误差造成的频谱畸变影响驻定相位原理的有效性。

频段的划分必须使得各频段时间带宽积满足 chirp 信号的驻定相位原理要求。在此前提下,各频段越短补偿效果越好。极限情况下,若只划分一个频段,则相当于传统的空不变相位误差补偿。

4 仿真结果

对以上所介绍的子孔径空变相位误差补偿算法的仿真实验如下所述。所选择仿真参数为:波长为 0.03m,合成孔径时间为 10s,方位向时间跨度为 40s,载机飞行速度为

140m/s, 斜距为 20000m。假设运动误差的测量是无误差的, 在一定的运动误差水平下, 分 6 个频段进行处理(每段的时间带宽积为 177), 在一个合成孔径范围内, 载机运动误差曲线如图 6 所示, 空变相位误差补偿前后的剩余误差如图 7 所示, 空不变相位误差补偿前后的点目标压缩波形如图 8 所示, 补偿前后及标准波形的各成像指标如表 1 所示。

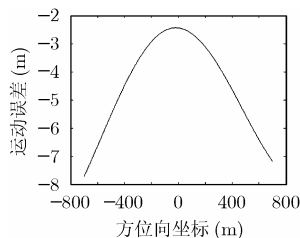


图 6 运动误差图示

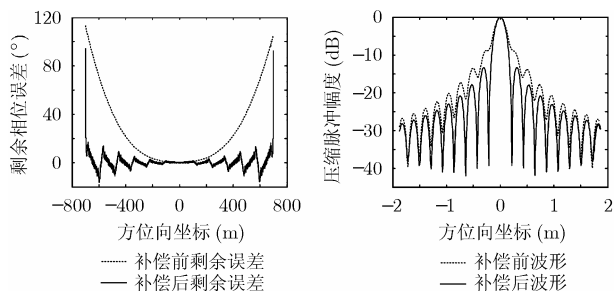


图 7 空变相位误差补偿前后剩余相位误差图示

图 8 空变相位误差补偿前后点目标压缩波形图示

表 1 空变相位误差补偿前后成像指标比较

	分辨率(m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
无误差波形	0.1816	-13.2674	-9.6814
补偿前	0.2029	-8.8477	-7.8996
补偿后	0.1816	-13.3038	-9.3744

在该仿真中, 空变相位误差在合成孔径边缘达到 100° 以上, 造成压缩波形质量恶化, 空变相位误差补偿之后, 剩余相位误差减小至 $\pm 20^\circ$ 以内, 而在合成孔径边缘的剩余误差仍然较大, 是由于驻定相位原理的近似引起的。由表 1 可知,

在这样的误差水平下, 压缩所得的波形指标均已非常接近标准指标。可见, 对于大视角 SAR 成像, 上述空变相位误差补偿算法弥补了传统运动补偿算法的不足, 进一步提高了运动补偿精度。

5 结束语

传统的机载 SAR 运动补偿技术由于没有考虑方位向空变相位误差对成像质量的影响, 补偿精度较低, 尤其是在大视角成像模式下, 所得到的 SAR 图像常常不能满足各项指标要求。本文提出了一种用于机载 SAR 运动补偿的方位向空变相位误差子孔径补偿算法。该算法有效去除了 SAR 数据中的方位向空变相位误差, 与传统的运动补偿算法相结合, 大大地提高了运动补偿精度及 SAR 图像质量。

参考文献

- [1] Eichel P H, Ghiglia D C, and Jakowatz C V Jr. Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction. *Optical Letters*, 1989, 14(1):1-3.
- [2] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [3] Kirk D R and Maloney R P. Impact of platform motion on wide-angle synthetic aperture radar(SAR) image quality. *Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference*, Waltham, April 1999: 20-22.
- [4] Carrara W, Tunmala S, and Goodman R. Motion compensation algorithm for wide beam stripmap SAR. *Proceedings of the SPIE*, Orlando FL, April 1995, 2487: 13-23.
- [5] 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, 第 4 章.

孟大地: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像及运动补偿.

丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达.