

基于星载照射源的被动 SAR 系统时频同步误差影响分析*

张启雷, 常文革, 黎向阳

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:时间和频率同步问题是基于星载照射源的被动 SAR 系统的关键技术之一。为了研究时、频同步误差对其成像的影响, 针对系统工作特性, 分析了时、频同步误差的产生机理, 建立了时、频同步误差模型, 并利用二阶距离模型和 RD 成像算法, 建立了完整的时、频同步误差到成像结果的传递模型, 仿真验证了理论分析的准确性。理论推导和仿真计算结果指出了基于星载照射源的被动 SAR 系统对时间同步和频率同步的精度要求。分析结论对于指导基于星载照射源的被动 SAR 系统设计及同步方法研究具有重要意义。

关键词:被动 SAR; 时间同步; 频率同步; 误差分析

中图分类号: TP957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)01-0077-06

Analysis of time and frequency synchronization error for the passive SAR system with spaceborne illuminators

ZHANG Qilei, CHANG Wenge, LI Xiangyang

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

Abstract: The problem of time and frequency synchronization is a bottleneck technology for the passive SAR system with spaceborne illuminators. In order to analyze the impact of time and frequency synchronization error to passive SAR imaging, the mechanism of time and frequency synchronization error was studied based on the particular operation mode of passive SAR. Then the error model of time and frequency synchronization was established, and the integrated error transfer model from synchronization error to passive SAR imaging was established. In the end, the correctness of the theoretical analysis was validated by simulation experiment. The theoretical analysis and the simulation result show the accuracy requirement of time and frequency synchronization for such a system. The conclusion can be used as principal guidance for passive SAR system design and synchronization method research.

Key words: passive SAR; time synchronization; frequency synchronization; error analysis

基于星载照射源的被动 SAR (简称被动 SAR) 是指利用已在轨的星载 SAR 作为照射源, 接收机被动接收地面目标散射回波, 实现对观测场景高分辨成像的新型遥感系统^[1-4]。相对于单基地 SAR, 被动 SAR 系统的技术优势明显, 譬如: 系统配置更灵活, 获取的信息更丰富, 抗干扰、抗截获能力更强等。但是, 由于收、发系统分置, 时间和频率同步问题是被动 SAR 系统必须要解决的关键技术之一。

文献[5-6]在二阶统计模型下, 研究了振荡器相位噪声对双基地 SAR 系统性能的影响, 但未建立误差模型, 研究结论不够明确。文献[7]给出了双基地 SAR 时间同步误差模型, 并就时间同步误差对机载双基地 SAR 成像处理的影响进行了分析。文献[8-10]对星载寄生式 SAR/InSAR 系统中的时、频同步问题进行了深入研究, 建立了

误差模型, 定量分析了时、频同步误差对其成像处理及干涉处理的影响, 但没有对相位噪声的影响进行分析。文献[11]详细分析了相位噪声对双基地 SAR 成像的影响。文献[12]对双基地 SAR 中的时、频同步误差影响进行了分析, 但没有建立误差传递模型。

被动 SAR 虽然隶属双基地 SAR 范畴, 但其系统体制独特, 时、频同步误差的产生机理也有所不同, 因此上述研究结论并不完全适用。本文首先针对被动 SAR 系统中时、频同步误差产生机理, 建立时、频同步误差模型, 进而得到包含时、频同步误差的回波信号模型。然后, 针对被动 SAR 成像的特点, 利用二阶距离模型和 RD 成像算法, 分别给出了时、频同步误差的各个分量在被动 SAR 成像的不同阶段的表现形式, 得到了完整的时、频同步误差传递模型。通过理论分析和仿真

* 收稿日期: 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61072116)

作者简介: 张启雷(1985—), 男, 甘肃景泰人, 博士研究生, E-mail: zhangqilei1985@gmail.com;

常文革(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: changwenge@nudt.edu.cn

实验,全面研究了时、频同步误差对被动 SAR 成像的影响,最终得到了时、频同步精度指标要求。

1 时、频同步误差模型

1.1 时间同步误差

为了提高实验的成功率,被动 SAR 系统通常采用连续接收体制,即在系统工作时间内接收机保持打开状态并连续采集回波数据,因此被动 SAR 接收到的回波为一维数据流。为了进一步成像处理,需要将该数据流转化为二维回波矩阵。该转化操作需要两个参数:参考时刻与发射系统脉冲重复周期(PRI, Pulse Repetition Interval)值^[4]。在实际情况下,要想完全精确地获得这两个参数的数值是不现实的,因此数据转换过程必然会引入误差,即时间同步误差。

在被动 SAR 系统中,通常以零多普勒时刻(Zero Doppler Time, ZDT)为参考零时刻,也就是发射机到接收机直线距离最短的时刻。如果 ZDT 估计存在误差 Δt_{ZDT} ,则会引入测距误差:

$$\Delta R = R_{TR}(\Delta t_{ZDT}) - R_{TR,0} \quad (1)$$

其中, $R_{TR,0}$ 为发射机到接收机的最短直线距离。该测距误差在系统工作时间内保持不变,反映在时间同步误差上则为固定时间同步误差:

$$\Delta t_0 = \Delta R/c \quad (2)$$

而发射系统的瞬时 PRI 可以表示为^[8]:

$$PRI(t) = PRI_0 + \Delta PRI + n_{PRI}(t) \quad (3)$$

其中, PRI_0 为标称值, ΔPRI 为实际值与标称值之间的偏差, $n_{PRI}(t)$ 则是由发射系统 PRI 随机抖动引入的时间误差。假设发射系统 PRI 的估计值为 PRI_E ,则由 PRI 值估计误差引入的时间误差具有累积效应:

$$\Delta t_{PRI}(t) = \alpha \cdot t + n_{PRI}(t) \quad (4)$$

其中, α 代表 PRI 估计值的相对准确度,

$$\alpha = \frac{PRI_0 + \Delta PRI - PRI_E}{PRI_0} \quad (5)$$

因此,总的时间同步误差可以表示为:

$$e(t) = \Delta t_0 + \alpha \cdot t + n_{PRI}(t) \quad (6)$$

可以看出,时间同步误差主要包括固定误差、线性误差和随机误差三部分。

1.2 频率同步误差

频率同步误差来自于收、发系统频率源输出频率信号之间的频率偏差以及随机抖动^[13]。收、发系统本振信号可以表示为:

$$v_R(t) = \cos(2\pi(f_0 + \Delta f_R) \cdot t + \phi_R(t)) \quad (7)$$

$$v_T(t) = \cos(2\pi(f_0 + \Delta f_T) \cdot t + \phi_T(t)) \quad (8)$$

其中, $f_0 = M \cdot \Delta f_{OSC}$ 为系统中心频率, $\Delta f_{TR} = M \cdot \Delta f_{OSC} - f_{TR}$ 为固定频率误差, ϕ_{TR} 为相位噪声, $M = f_0/f_{OSC}$ 为系统中心频率与频率源标称频率之比。因此,收、发系统本振信号的瞬时频率为^[13]:

$$f_{TR}(t) = f_0 + \Delta f_{TR} + n_{TR}(t) \quad (9)$$

由式(7)和(8)可知,由于收、发系统本振信号相互独立,回波信号解调过程中将产生相位误差,进而影响成像处理。

1.3 回波信号模型

被动 SAR 系统利用已在轨的星载 SAR 作为照射源,其发射信号为:

$$s_T(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k \tau^2\} \cdot \exp\left\{j2\pi \int_0^t f_T(t) dt\right\} \quad (10)$$

其中, $\text{rect}[\cdot]$ 为矩形窗函数, T_p 为脉冲持续时间, k 为信号调频率, t 为绝对时间, τ 为距离向时间。则点目标回波信号可以表示为:

$$s(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{\tau - t_d}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k (\tau - t_d)^2\} \cdot \exp\left\{j2\pi \int_0^{t-t_d} f_T(t) dt\right\} \quad (11)$$

其中, $t_d = R(t_n)/c$ 为发射机-目标-接收机距离 $R(t_n)$ 对应的时间延迟, c 为光速, $t_n = n \cdot \text{PRI}$ 为方向向时间。假设时间同步误差为 $e(t)$, 则点目标回波信号为:

$$s(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{\tau - t_d - e(t)}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k (\tau - t_d - e(t))^2\} \cdot \exp\left\{j2\pi \int_0^{t-t_d-e(t)} f_T(t) dt\right\} \quad (12)$$

而接收机本振信号可以表示为:

$$s_R(t) = \exp\left\{j2\pi \int_0^t f_R(t) dt\right\} \quad (13)$$

如果仅考虑时间同步误差,则解调后的回波信号模型为:

$$s(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{\tau - t_d - e(t)}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k (\tau - t_d - e(t))^2\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 (t_d + e(t))\} \quad (14)$$

而仅考虑频率同步误差,则解调后的回波信号模型为:

$$s(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{\tau - t_d}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k (\tau - t_d)^2\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 t_d\} \cdot \exp\{j2\pi (\Delta f_T - \Delta f_R) t\} \cdot \exp\{j(\phi_T(t - t_d) - \phi_R(t))\} \quad (15)$$

在式(14)和(15)的基础上,根据被动 SAR 成像特点,分别对时间同步误差和频率同步误差的影响进行分析。

2 时间同步误差影响分析

在被动 SAR 系统中,发射系统平台为卫星,而接收系统平台可以是飞艇、飞机或固定站。由于接收平台速度远远小于发射平台速度,为了便于分析,可以采用二阶模型^[8],即:

$$R(t_n) \approx R_0 - \lambda[f_{dc}(t_n - t_0) + \frac{1}{2}k_a(t_n - t_0)^2] \quad (16)$$

其中, R_0 为发射机 - 目标 - 接收机最短距离, λ 为系统中心波长, f_{dc} 为多普勒中心频率, k_a 为多普勒调频率, t_0 表示该目标的方向向坐标, $(t_n - t_0) \in [-T_s/2, T_s/2]$, T_s 为合成孔径时间。

根据时间同步误差产生的机理可知,时间同步误差随方位向慢时间 t_n 变化,即 $e(t) = e(t_n)$,则经过距离压缩之后可以表示为:

$$s_{RC}(\tau, t_n) = \text{sinc}\{B(\tau - R(t_n)/c - e(t_n))\} \cdot \exp\{-j2\pi R_0/c\} \cdot \exp(j2\pi f_{dc}(t_n - t_0)) \cdot \exp(j\pi k_a(t_n - t_0)^2) \cdot \exp(-j2\pi f_0 e(t_n)) \quad (17)$$

从式(17)可以看出,时间同步误差 $e(t_n)$ 对距离压缩后的回波信号产生了如下影响:

(1) 距离压缩峰值发射了偏移,引入距离单元徙动 (Range Cell Migration, RCM) 误差 $\Delta R(t_n) = c \cdot e(t_n)$,将对距离单元徙动校正 (Range Cell Migration Correction, RCMC) 造成影响。

(2) 多普勒相位中引入了相位误差 $\Delta\phi(t_n) = -2\pi f_0 e(t_n)$,将对方位向成像产生影响。

2.1 固定时间同步误差

假设存在固定时间同步误差,即 $e(t_n) = \Delta t_0$,则由此引入的距离单元徙动误差 $\Delta R(t_n) = c \cdot \Delta t_0$ 和相位误差 $\Delta\phi(t_n) = -2\pi f_0 \Delta t_0$ 均为固定值。由 SAR 成像原理可知,此时被动 SAR 图像可以良好聚焦,只是距离向位置发生了固定偏移,不能精确定位。

2.2 线性时间同步误差

假设存在线性时间同步误差,即 $e(t_n) = \alpha \cdot t_n$,则由此引入的 RCM 误差为:

$$\Delta R(t_n) = c \cdot \alpha \cdot t_n \quad (18)$$

由式(18)可以看出,线性时间同步误差引入的 RCM 误差是方位向慢时间的线性函数,则合成孔径时间内的 RCM 误差变化量为 $|c \cdot \alpha \cdot T_s|$ 。在成像处理中,通常要求 RCM 误差小于距离向脉压宽度的 1/4,即:

$$|\alpha| < 1/|4B \cdot T| \quad (19)$$

假设发射信号带宽 $B = 100\text{MHz}$,合成孔径时间 $T_s = 1\text{s}$,则 $|\alpha| < 2.5 \times 10^{-9}$,也就是说对发射系统 PRI 值估计的相对准确度要优于 2.5×10^{-9} 。

假设经过粗同步处理之后^[14],RCM 误差满足式(19)的要求,则可以忽略线性时间同步误差对 RCM 校正的影响,则式(17)可以简化为:

$$s_{RC}(\tau, t) = \text{sinc}\{B(\tau - R(t)/c)\} \cdot \exp\{-j2\pi R_0/\lambda\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 \alpha t_0\} \cdot \exp\{j2\pi f_{dc} t'\} \cdot \exp\{j\pi k_a t'^2\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 \alpha t'\} \quad (20)$$

其中, $t' = t_n - t_0$ 。对距离压缩后的回波进行 RCMC,变换到距离多普勒域为:

$$S_{RC}(\tau, f_a) = \text{sinc}\{B(\tau - R_0/c)\} \cdot \exp\{-j2\pi R_0/\lambda\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 \alpha t_0\} \cdot \text{rect}\left\{\frac{f_a - (f_{dc} - \alpha f_0)}{B_a}\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{(f_a - (f_{dc} - \alpha f_0))^2}{k_a}\right\} \quad (21)$$

其中, $B_a = k_a \cdot T_s$ 为多普勒带宽。从式可以看出,由于存在线性相位误差 $\exp\{-j2\pi f_0 \alpha t\}$,回波多普勒频谱发生了偏移。而方位向聚焦所用的匹配滤波函数为:

$$H_a(f_a) = \text{rect}\left(\frac{f_a - f_{dc}}{B_a}\right) \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{(f_a - f_{dc})^2}{k_a}\right\} \quad (22)$$

方位向压缩之后的二维成像结果为:

$$s(\tau, t') = \text{sinc}\{B(\tau - R_0/c)\} \cdot \text{sinc}\{(B_a - |\alpha f_0|)(t' - \alpha f_0/k_a)\} \cdot \exp\{-j2\pi R_0/\lambda\} \cdot \exp\{-j2\pi \alpha f_0 t_0\} \cdot \exp\{j2\pi(f_{dc} - \alpha f_0/2)t'\} \quad (23)$$

由式(23)可以看出,线性时间同步误差对被动 SAR 成像有如下影响:

- (1) 方位向压缩主瓣展宽;
- (2) 方位向压缩峰值位置偏移;
- (3) 成像后的目标峰值点存在相位误差。

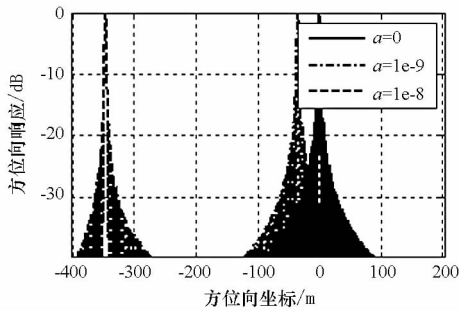
为了验证线性时间同步误差对被动 SAR 成像的影响,本节进行计算机仿真实验,表 1 为实验所用的系统仿真参数。图 1 给出了 α 分别为 0×10^{-9} 、 1×10^{-9} 和 1×10^{-8} 时,线性时间同步误差对点目标被动 SAR 方位向成像的影响。图 1(a) 中实线、点线和虚线的图形分别代表 α 为 0×10^{-9} 、 1×10^{-9} 和 1×10^{-8} 时的方位向成像结果,可以看出,线性时间同步误差造成了目标方位位置的偏移,且其移动距离与理论计算结果相符。为了仔细比较不同量级的时间同步误差的影响,图 1(b) 给出了放大后叠在一起的图像,可以看出当 α 为

10^{-9} 量级时, 图像质量几乎没有影响; 而当 α 为 10^{-8} 量级时, 方位向主瓣产生了明显的展宽, 成像质量有明显下降, 验证了之前的分析结论。

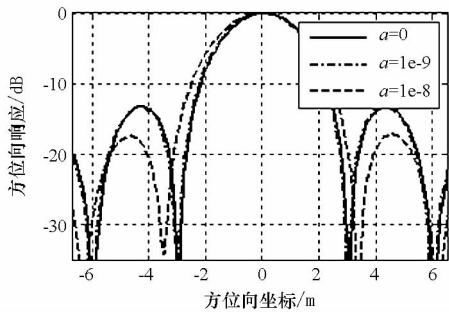
表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
卫星高度	620km	接收机高度	20km
载频	9.65GHz	接收机作用距离	80km
带宽	100MHz	接收机速度	0
PRF	4000Hz	卫星俯视角	45°
卫星速度	7600m/s	线性时间同步误差	0, 1e-9, 1e-8



(a) 方位向成像结果



(b) 方位向响应对比结果

图 1 线性时间同步误差对被动 SAR 成像幅度的影响

Fig. 1 The influence of linear time synchronization errors on image amplitude in passive SAR

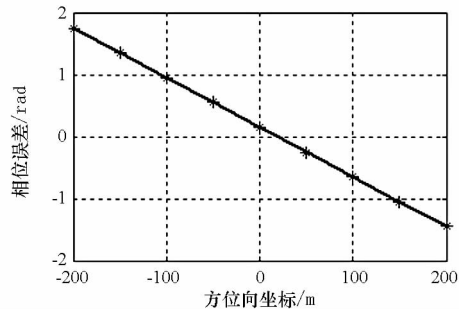


图 2 线性时间同步误差对被动 SAR 成像相位的影响

Fig. 2 The influence of linear time synchronization errors on image phase in passive SAR

进一步分析线性时间同步误差对被动 SAR 成像相位的影响, 设 $\alpha = 1 \times 10^{-9}$ 。沿方位向等间隔布置 9 个目标, 目标之间的间隔为 50m。仿真

中, $f_{dc} = 0$, 因此线性时间同步误差引入的成像相位误差为 $\Delta\phi = -\pi(\alpha f_0)^2/k_a - 2\pi\alpha f_0 t_0$, 即 $\Delta\phi$ 随目标方位位置 t_0 而线性变化。图 2 给出了成像相位误差的仿真结果, 其中直线是计算结果, 星点为仿真结果。可以看出, 仿真结果与理论计算吻合得很好, 验证了前面分析的正确性。

2.3 随机时间同步误差

假设随机时间同步误差 $n_{PRI}(t_n)$ 满足均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布^[8], 则由此引入的 RCM 误差满足均值为 0, 方差为 $(c\sigma)^2$ 的正态分布; 相位误差服从均值为 0, 方差为 $(2\pi f_0 \sigma)^2$ 的正态分布。

随机时间同步误差没有累积效应, 因此其影响较小。根据 3σ 准则, 随机时间同步误差引入的距离迁徙误差上限为 $3c\sigma$, 则要求 $\sigma < 1/(12B)$ 。假设 $B = 100\text{MHz}$, 则要求 $\sigma < 8.3 \times 10^{-10}\text{s}$ 。假设发射系统脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 为 2000Hz, 则要求频率源稳定度优于 1.7×10^{-6} 。同理, 随机时间同步误差引入的相位误差上限为 $6\pi f_0 \sigma$, 通常成像要求相位误差小于 $\pi/4$, 则要求 $\sigma < 1/(24f_0)$ 。假设系统工作频率 $f_0 = 9.65\text{GHz}$, 则要求 $\sigma < 4.3 \times 10^{-12}\text{s}$, 即频率源稳定度优于 8.6×10^{-9} 。目前的频率源稳定度远远优于上述指标^[14], 因此随机时间同步误差对被动 SAR 成像的影响可以忽略。

3 频率同步误差影响分析

频率同步误差对距离向成像的影响可以忽略^[9], 只需要考虑其对方位向成像的影响, 因此式(15)可以改写为:

$$s(\tau, t_n) = \text{rect}\left(\frac{\tau - t_d}{T_p}\right) \cdot \exp\{j\pi k(\tau - t_d)^2\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 t_d\} \cdot \exp\{j2\pi(\Delta f_T - \Delta f_R)t_n\} \cdot \exp\{j(\phi_T(t_n - t_d) - \phi_R(t_n))\} \quad (24)$$

在式(24)中, 最后两个相位项分别是由固定频率同步误差和相位噪声引起的相位误差, 下面分别对其进行分析。

3.1 固定频率同步误差

根据二阶距离模型(16), 式(24)代表的回波信号的距离压缩结果为:

$$s_{RC}(\tau, t') = \text{sinc}\{B(\tau - R(t_n)/c)\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 R_0/c\} \cdot \exp\{-j2\pi\Delta f t_0\} \cdot \exp\{j2\pi f_{dc} t'\} \cdot \exp\{j\pi k_a t'^2\} \cdot \exp\{-j2\pi\Delta f t'\} \quad (25)$$

其中, $\Delta f = \Delta f_R - \Delta f_T$ 。由式(25)可以看出, 与线性

时间同步误差相似,固定频率同步误差在回波中引入了线性相位误差,因此其影响也是相似的。

需要说明的是,在被动 SAR 中,收、发系统无法事先进行系统频率源对准,因此 Δf 的量值可能高达数 kHz^[15],与多普勒带宽量级相同。如果不消除固定频率同步误差的影响,被动 SAR 成像将几乎得不到聚焦图像。

3.2 相位噪声

相位噪声通常用来表征频率的短期稳定性。由于相位噪声的存在,引起了频率源载波频谱的扩展,造成信号频率随时间变化^[13]。根据式(24)可知,被动 SAR 中由相位噪声引入的相位误差为:

$$\phi(t_n) = \phi_r(t_n - t_d) - \phi_R(t_n) \quad (26)$$

由于收、发系统频率源相互独立,假设二者的相位噪声具有相同的功率谱密度 $S_\phi(f)$,则被动 SAR 回波相位噪声 $\phi(t_n)$ 的功率谱密度为:

$$S_{\phi \text{ PSAR}}(f) = 2M^2 S_\phi(f) \quad (27)$$

由式(27)可以看出,被动 SAR 中的收、发系统相位噪声直接相加,其影响更加严重。而在单站 SAR 中,收、发系统共用同一个频率源,相位噪声的低频分量被有效地抵消了,只保留量值很小的高频分量,因此单站 SAR 一般不考虑相位噪声的影响。

相位噪声是一个非平稳的随机过程,但根据相位噪声的变化快慢,可以将合成孔径时间 T_s 内的相位噪声分解为线性相位、二次相位和高频相位分量^[10]。

$$\phi(t_n) = 2\pi\Delta f(t_0)t' + \pi\Delta k(t_0)t'^2 + \Delta\phi \quad (28)$$

其中, t_0 和 t' 的定义不变, $\Delta f(t_0)$ 和 $\Delta k(t_0)$ 分别为频率偏差和调频率, $\Delta\phi$ 为高频相位分量。

3.2.1 线性相位分量

线性相位是相位噪声的主要分量,该分量的影响与固定频率同步误差相似,主要造成被动 SAR 方位向成像位置偏移。但相位噪声的线性相位分量随目标方位位置不同而变化,没有累积效果。

方位成像位置偏移为:

$$\Delta x' = \Delta f(t_0)v_T/k_a \quad (29)$$

根据被动 SAR 的系统特性可知,其沿卫星飞行方向的方位向分辨率为 $\rho_A = v_T/B_a$ 。因此,方位位置偏移的分辨单元数为:

$$\Delta x = \Delta x'/\rho_A = T_s \cdot \Delta f(t_0) \quad (30)$$

利用阿伦方差可以近似得到方位位置偏移单元数的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta x}^2 &= (T_s f_0)^2 \cdot \sigma_y^2(T_s) \\ &= \frac{2}{\pi^2} \cdot \int_0^\infty S_{\phi \text{ PSAR}}(f) \sin^4(\pi T_s f) df \end{aligned} \quad (31)$$

3.2.2 二次相位分量

二次相位分量会引入线性调频率误差,是造成方位向压缩散焦的主要原因。尽管相位噪声的二次相位分量相对较小,但其影响并不能忽略。二维压缩结果可以表示为:

$$\begin{aligned} s(\tau, t) &= \text{sinc}\{B(\tau - R_0/c)\} \cdot \exp\{-j2\pi f_0 R_0/c\} \\ &\cdot \int_{-B_a/2}^{B_a/2} \exp(j\pi \frac{\Delta k(t_0)}{k_a^2} (f_a - f_{dc})^2) \exp(j2\pi f_a t) df_a \end{aligned} \quad (32)$$

二次相位误差会引起主瓣展宽、PSLR 和 ISLR 的抬高。二次相位误差不仅会对脉压幅度产生影响,还会在脉压的峰值位置引入 QPE/3 的相位误差,其中, $QPE = \pi\Delta k(t_0)T_s^2/4$ 。根据式(28)可知,线性调频率 $\Delta k(t_0)$ 满足:

$$\Delta k(t_0) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial^2 \phi(t)}{\partial t^2} \quad (33)$$

因此, $\Delta k(t_0)$ 的功率谱可以写为:

$$S_{\Delta k}(f) = 4\pi^2 f^4 S_{\phi \text{ PSAR}}(f) \quad (34)$$

则二次相位误差 QPE 的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{QPE}}^2 &= \left(\pi \frac{T_s}{4}\right)^2 \cdot \sigma_k^2(T_s) \\ &= \frac{\pi^4 T_s^2}{4} \cdot \int_0^{1/T_s} f^4 S_{\phi \text{ PSAR}}(f) df \end{aligned} \quad (35)$$

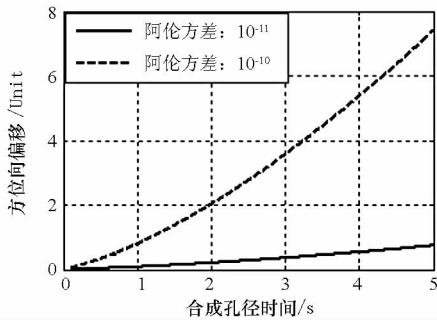
3.2.3 高频相位分量

高频相位分量主要引起虚假旁瓣,造成积分旁瓣比(ISLR)的抬高。

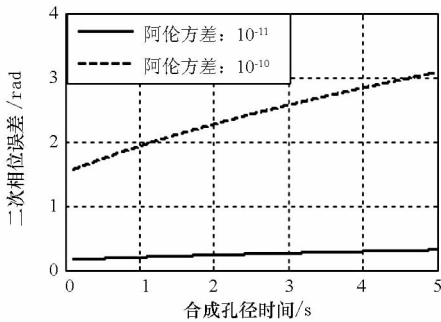
$$\text{ISLR} = \int_{1/T_s}^\infty S_{\phi \text{ PSAR}}(f) df \quad (36)$$

根据上面的分析可以看出,相位噪声的不同分量对被动 SAR 成像的影响并不相同。下面针对两种不同档次的振荡器,根据式(31)、(35)和(36),计算了相位噪声各个分量造成的影响,计算中 $M = 965$ 。振荡器 1: $(-95, -90, -200, -130, -155)$ $\sigma_y^2(1s) = 10^{-11}$; 振荡器 2: $(-75, -70, -150, -120, -125)$ $\sigma_y^2(1s) = 10^{-10}$ ^[10]。计算结果如图 3 所示,其中横坐标均为合成孔径时间。

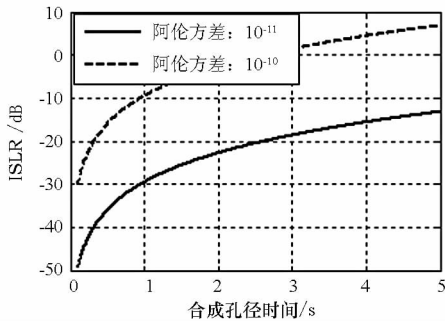
从图 3 可以看出,随着合成孔径时间的增加,振荡器相位噪声对被动 SAR 成像的影响更加严重,振荡器 1 ($\sigma_y^2(1s) = 10^{-11}$) 的相位噪声对被动 SAR 成像的影响要小于振荡器 2 ($\sigma_y^2(1s) = 10^{-10}$)。假设要求方位位置偏移小于一个分辨单



(a) 方位向偏移



(b) 二次相位误差



(c) 积分旁瓣比

图 3 相位噪声对被动 SAR 成像的影响

Fig 3 The influence of phase noise on image in passive SAR

元,则振荡器 1 容许合成孔径时间达到 5s,而振荡器 2 则只能达到 1s。对振荡器 1 而言,即使合成孔径时间达到 5s,其引入的 QPE 仍小于 $\pi/4$;而振荡器 2 引入的 QPE 总是大于 $\pi/4$ 。SAR 成像一般要求 ISLR 小于 -20dB ,则振荡器 1 容许合成孔径时间达到 2.5s 左右,而振荡器 2 则只能达到 0.3s 左右。

4 结论

本文针对基于星载照射源的被动 SAR 系统特点,研究了时间同步和频率同步对其成像的影响。首先建立了时、频同步误差模型,进而得到包含时、频同步误差的回波信号模型。然后,针对被动 SAR 成像的特点,利用二阶距离模型和 RD 成像算法,建立了完整的时、频同步误差传递模型。文章通过理论分析和仿真实验,全面研究了时、频同步误差

对被动 SAR 成像的影响,最终得到了时、频同步精度指标要求。下一步的研究工作将集中于有效的同步方法研究,以满足同步精度要求。

参考文献 (References)

- [1] Krieger G, Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potentials and challenges[J]. IEE Proceedings Radar Sonar & Navigation, 2006, 153(3):184 - 198.
- [2] Broquetas A, Lopez D P, Mallorqui J J, et al. SABRINA-X: Bistatic SAR Receiver for TerraSAR-X [C]//Proceeding of EUSAR, Aachen, Germany, 2010.
- [3] Behner F, Reuter S. HITCHHIKER, Hybrid bistatic high resolution SAR experiment using a stationary receiver and TerraSAR-X transmitter[C]//Proceeding of EUSAR, Aachen, Germany, 2010.
- [4] Sanz M J, Lopez D P, Mallorqui J J, et al. SABRINA: A SAR bistatic receiver for interferometric applications [J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2005, 4(2): 307 - 311.
- [5] Krieger G, Younis M. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR [J]. IEEE Geosciences Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 424 - 428.
- [6] Krieger G, Cassola M R, Younis M, et al. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR [C]//Proceedings of IGARSS, Korea, July 2005: 1043 - 1046.
- [7] Zhang X L, Li H B, Wang J G. The analysis of time synchronization error in bistatic SAR system [C]//Proceedings of IGARSS, Korea, July 2005: 4615 - 4618.
- [8] 张永胜,梁佃农,孙造宇,等. 时间同步误差对星载寄生式 InSAR 系统干涉相位的影响分析[J]. 宇航学报,2007, 28(2):370 - 374.
ZHANG Yongsheng, LIANG Diannong, SUN Zaoyu, et al. Effect of time synchronization error on interferometric phase of spaceborne parasitic InSAR system [J]. Journal of Astronautics, 2007,28(2):370 - 374. (in Chinese)
- [9] Zhang Y S, Liang D N, Dong Z. Analysis of frequency synchronization error in spaceborne parasitic interferometric SAR system [C]//Proceeding of EUSAR, Dresden, Germany, 2006.
- [10] Zhang S K, Yang R L. Analysis of oscillator phase noise effect on bistatic SAR [C]//Proceeding of EUSAR, Dresden, Germany, 2006.
- [11] 张永胜,梁佃农,董臻. 星载寄生式 SAR 系统频率同步分析[J]. 国防科技大学学报,2006, 28(2):85 - 87.
ZHANG Yongsheng, LIANG Diannong, DONG Zhen. Analysis of frequency synchronization error in spaceborne parasitic SAR system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(2):85 - 87. (in Chinese)
- [12] Wang W Q, Ding C B, Liang X D. Time and phase synchronization via direct-path signal for bistatic synthetic aperture radar systems [J]. IEE Proceeding Radar Sonar & Navigation, 2008, 2(1):1 - 11.
- [13] Rutman J, Walls F L. Characterization of phase and frequency stabilities in precision frequency sources [J]. Proceedings of IEEE, 1991, 79(7): 952 - 960.
- [14] Weib M. Time and frequency synchronization aspects for bistatic SAR system [C]//Proceedins of EUSAR, Ulm, Germany, 2004.
- [15] Moccia A. A bistatic SAR for earth observation [C]//Proceedings of SPIE,2007,4173.