

机载双站 SAR 频率同步与误差补偿

朱振波¹, 汤子跃², 蒋兴舟¹

(1. 海军工程大学, 湖北武汉 430033; 2. 空军雷达学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 机载双站 SAR 系统中, 收发平台是分置的, 收发载机本振频率源的不同步, 将会引起回波信号相位误差的积累, 其积累时间长度为整个合成孔径时间. 本文给出了“GPS+ 独立高稳定频率源”实现双站 SAR 收发频率同步的方法, 并对该同步方法引起的同步相位误差进行了分析, 提出了一种基于收发平台视距通信的频率同步误差补偿方法. 最后给出了对几种典型频率同步误差的补偿仿真, 仿真结果表明, 该频率同步误差补偿方法能够有效地补偿由收发不同步引起的误差项.

关键词: 双站 SAR; 频率同步; 同步误差补偿

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2417-04

The Frequency Synchronization and Synchronization Error Compensation of Airborne Bistatic SAR

ZHU Zhen-bo¹, TANG Zi-yue², JIANG Xing-zhou¹

(1. University of Naval Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China; 2. Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: For airborne bistatic SAR system, bistatic SAR uses separated transmitter and receiver flying on different platforms, the difference between the oscillator clock of receiver and transmitter will result in phase drifts error, which will accumulate during the whole imaging time. The paper will concentrate on the problem of frequency synchronization between a bistatic transmitter and receiver pair, firstly a possible solutions (GPS+ high stable local oscillators) for synchronization error compensation is given, and the corresponding phase error aroused by the above frequency synchronization method is analyzed, then a synchronization error compensation method based on the direct communications between the transmitter and receiver pair is studied in detail. At last, this paper shows the simulation of frequency synchronization error compensation of several representative frequency synchronization error models, which shows the validity of the compensation method in the paper.

Key words: bistatic synthetic aperture radar; frequency synchronization; frequency synchronization error compensation

1 引言

双站合成孔径雷达(SAR)是指发射系统和接收系统安装在不同载体上的 SAR 系统. 它具有灵活的配置方式和成像模式(如平飞正侧视、跟随模式等), 可以充分利用目标的散射特性成像, 获取更多的信息^[1,2]. 对于机载双站 SAR, 除了成像处理、运动补偿等关键技术外, 接收机本振信号与发射机载波之间的频率同步同样是双站 SAR 系统中最为关键的问题之一.

常规 SAR 系统采用全相参体制, 其触发脉冲、发射脉冲信号、接收机本振信号等都源于同一个高稳定频率源(如恒温晶振), 容易保持系统的相干性. 而在双站 SAR 系统中, 收、发平台是分置的, 收发载机本振频率源的不同步, 将会引起回波信号相位误差的积累, 其积累时间长度为整个合成孔径时间,

因此实现双站 SAR 收发系统间的频率同步是难度很大的^[1,3,4]. 文献[1]对双站 SAR 收发系统间的频率同步误差对成像的影响进行了系统的研究, 同时给出了几种实现频率同步的方法, 但没有进行同步误差补偿的研究. 本文给出了“GPS+ 独立高稳定频率源”实现双站 SAR 收发频率同步的方法, 并对该同步方法引起的同步相位误差进行了分析, 提出了一种基于收发平台视距通信的频率同步误差补偿方法, 最后给出了仿真结果.

2 频率同步方法

合成孔径成像实际上是一种长时间的相干积累, 要求系统有很强的相干性, 在其合成孔径时间内, 回波信号的相位误差通常要求满足 $|\phi_e| < \pi/4$ 的要求. 假设收发系统频率源误差恒为 Δf , 合成孔径时间为 T_s , 则有 $2\pi\Delta f T_s < \pi/4$, 相应的频

率稳定度则要求为 $\Delta f/f < 1/8T_s$, 给定信号载频 $f = 10\text{GHz}$, 合成孔径时间为 $T_s = 10\text{s}$, 对应的频率稳定度为 1.25×10^{-12} , 可见双站 SAR 系统对频率源稳定度有着较高的要求, 收发系统频率同步问题是双站 SAR 系统的一个重要问题, 不解决好将导致成像质量下降或根本无法完成方位向孔径合成^[3].

目前, 解决双站 SAR 收发系统之间的频率同步问题, 主要有以下几种可能的技术途径:

(1) 独立频率源同步法

收发系统各自采用独立的高稳定度频率源(如温控石英振荡器)^[1,3], 主要依靠频率源的频率一致性和高稳定性来保证系统的相位同步要求.

(2) 锁相环同步法

将发射载机的频率基准信号从发射系统发送到接收平台, 接收系统则利用锁相环技术实现接收机本振信号对频率基准信号的跟踪和锁定, 理论上锁相环同步法可以实现较高的同步精度, 但实际中会受到收发载机之间的相对运动、多径效应和电磁环境等多种因素的影响. 关于收发载机相对运动误差对锁相环相位同步系统的影响, 在文献[1, 4]中进行了系统的分析.

对于机载双站 SAR 系统而言, 不可避免的收发载机之间的相对运动将会影响锁相环同步法的相位同步精度, 甚至产生比频率同步误差更大的相位误差, 因此机载双站 SAR 系统可以考虑采用独立频率源同步法. 对于独立频率源同步法, 长时间的工作仍可能导致收发频率源之间较大的频率同步误差, 因此可以每隔时间 T_0 , 利用精准、高稳定的 GPS 脉冲信号对收发系统的独立频率源进行同步校准, 对机载双站 SAR 系统, 这种方法有着较高的实用价值^[4].

3 频率同步误差与误差补偿

图 1 给出了机载双站 SAR 的工作示意图, 假设在 GPS 精准时钟信号校准后的时间间隔 T_0 内, 收发独立频率源的本振频率分别为 f_R 和 f_T , 其时变频率误差分别为 $\Delta f_R(t)$ 和 $\Delta f_T(t)$, r_1 和 r_2 分别表示发射载机和接收载机到达地面某点目标的距离.

假设机载双站 SAR 发射线性调频脉冲信号, 经地面反射到达接收机, 则时刻 t , 接收机解调后的接收信号解调相位可表示为^[5]

$$\varphi_R(t) = 2\pi \int_{-\frac{r_1+r_2}{c}}^{\frac{r_1+r_2}{c}} [f_R + \Delta f_R(t)] dt - 2\pi \int_0^t [f_T + \Delta f_T(t)] dt \quad (1)$$

将上式展开后, 可得

$$\varphi_R(t) = 2\pi \left\{ (f_R - f_T)t - f_R \cdot \frac{r_1 + r_2}{c} + \int_0^t \left[\Delta f_R \left(t - \frac{r_1 + r_2}{c} \right) - \Delta f_T(t) \right] dt \right\} \quad (2)$$

由上式可见, 对于 SAR 的方位向成像而言, 仅仅 $f_R \cdot (r_1 + r_2)/c$ 是有效的, 而其它项则属于误差相位项, 它的存在将会降低 SAR 图像的质量或根本无法完成方位向孔径合成. 为了保障好的方位向压缩效果, 在其合成孔径时间 T_s 内, 回波信号的相位误差通常要求满足 $|\phi_e| < \pi/4$ 的要求, 即

$$|\phi_e| = \left| 2\pi \left\{ (f_R - f_T)t + \int_0^t \left[\Delta f_R \left(t - \frac{r_1 + r_2}{c} \right) - \Delta f_T(t) \right] dt \right\} \right| < \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

$|\phi_e|$ 的存在, 严重时可能导致方位向成像结果的主瓣偏移、旁瓣散焦和主瓣散焦等问题, 下面将讨论该相位误差补偿的方法.

如图 1, 对于机载双站 SAR 系统, 收发载机之间存在直接的视距通信通道, 假设收发载机之间的视距为 r_{12} , 则 t 时刻发射机发射载频信号, 经视距通道到达接收机, 接收机解调后的得到的解调相位可表示为

$$\varphi_{s1}(t) = 2\pi \int_{-\frac{r_{12}}{c}}^{\frac{r_{12}}{c}} [f_R + \Delta f_R(t)] dt - 2\pi \int_0^t [f_T + \Delta f_T(t)] dt \quad (4)$$

将上式展开后, 可得

$$\varphi_{s1}(t) = 2\pi \left\{ (f_R - f_T)t - f_R \cdot \frac{r_{12}}{c} + \int_0^t \left[\Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) - \Delta f_T(t) \right] dt \right\} \quad (5)$$

同样, t 时刻接收机发射载频信号, 经视距通道到达接收机, 发射机解调后的得到的解调相位可表示为

$$\varphi_{s2}(t) = 2\pi \int_{-\frac{r_{12}}{c}}^{\frac{r_{12}}{c}} [f_T + \Delta f_T(t)] dt - 2\pi \int_0^t [f_R + \Delta f_R(t)] dt \quad (6)$$

将上式展开后, 可得

$$\varphi_{s2}(t) = 2\pi \left\{ (f_T - f_R)t - f_T \cdot \frac{r_{12}}{c} + \int_0^t \left[\Delta f_T \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) - \Delta f_R(t) \right] dt \right\} \quad (7)$$

于是, 由式(5)和(7)可得, $\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t)$

$$\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t) = 2\pi \left\{ 2(f_T - f_R)t - (f_T - f_R) \cdot \frac{r_{12}}{c} + \int_0^t \left[\Delta f_T \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) - \Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) \right] dt + \int_0^t [\Delta f_T(t) - \Delta f_R(t)] dt \right\} \quad (8)$$

由于在发射后脉冲信号的持续时间内, 有

$$\begin{aligned} \Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) &\approx \Delta f_R(t) \\ \Delta f_T \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) &\approx \Delta f_T(t) \end{aligned} \quad (9)$$

所以式(8)可以近似表达为

$$\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t) \approx 2\pi \left\{ 2(f_T - f_R)t - (f_T - f_R) \cdot \frac{r_{12}}{c} + 2 \int_0^t [\Delta f_T(t) - \Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right)] dt \right\} \quad (10)$$

则可用 $[\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t)]/2$ 去补偿 t 时刻, 接收机解调后的接收信号解调相位可得

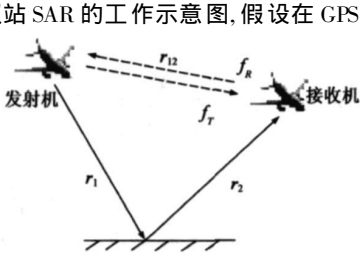


图 1 机载双站 SAR 工作示意图

$$\varphi_R(t) + \frac{\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t)}{2} = -2\pi \left\{ f_R \cdot \frac{r_1 + r_2}{c} + (f_T - f_R) \frac{r_{12}}{2c} \right\} \quad (11)$$

经过相位补偿后, 接收解调信号只剩下两项, 其中 $2\pi f_R \cdot (r_1 + r_2)/c$ 包含了方位向多普勒信息, 是方位压缩所需要的信息, 而后一项则是补偿后仍然存在误差相位项, 但与式(2)的误差项 $\phi_e(t)$ 相比

$$\phi_e(t) = 2\pi \left\{ (f_R - f_T)t + \int_0^t \left[\Delta f_R \left(t - \frac{r_1 + r_2}{c} \right) - \Delta f_T(t) \right] dt \right\} \quad (12)$$

由于时间 t 是方位向慢时间, 显然有

$$2\pi \left[(f_R - f_T) \frac{r_{12}}{2c} \right] \ll \phi_e(t) \quad (13)$$

从上面的分析可以看出, 经过相位补偿后, 基本上补偿掉了时变的相位同步误差, 消除了频率同步误差在时间上的积累, 补偿后的剩余误差项基本可以忽略。

同时, 根据式(6)、(7), 可以得到

$$\begin{aligned} \varphi_{s2}(t) + \varphi_{s1}(t) = 2\pi \left\{ - (f_T + f_R) \frac{r_{12}}{c} - \int_0^t [\Delta f_T(t) - \Delta f_R(t)] dt \right\} \\ + 2\pi \int_0^t \left[\Delta f_T \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) - \Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} \right) \right] dt \end{aligned} \quad (14)$$

同样, 根据式(9)上式可以简化为

$$\varphi_{s2}(t) + \varphi_{s1}(t) = 2\pi \left[- (f_T + f_R) \frac{r_{12}}{c} \right] \quad (15)$$

由此, 可以得到收发载机视距通信距离的估计值

$$r_{12} = - \frac{[\varphi_{s2}(t) + \varphi_{s1}(t)] \cdot c}{2\pi(f_T + f_R)} \quad (16)$$

综上, 式(11)的相位同步误差补偿, 基本上补偿掉了时变的相位同步误差, 消除了频率同步误差在时补偿后的剩余误差项基本可以忽略, 因此这种补偿方法。

假设收发载机视距通信存在时间同步误差, 即触发脉冲同步误差, 设其触发误差为 $\Delta\tau$, 则 t 时刻发射机发射载频信号, 经视距通道到达接收机, 接收机解调后得到的解调相位可表示为

$$\varphi_{s1}(t) = 2\pi \int_{-\frac{r_{12}}{c} - \Delta\tau}^{t - \frac{r_{12}}{c} - \Delta\tau} [f_R + \Delta f_R(t)] dt - 2\pi \int_0^t [f_T + \Delta f_T(t)] dt \quad (17)$$

由式(5)、(7)和(10)可得

$$\begin{aligned} \varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t) \approx 2\pi \left\{ 2(f_T - f_R)t - (f_T - f_R) \cdot \left(\frac{r_{12}}{c} + \Delta\tau \right) \right. \\ \left. + 2 \int_0^t \left[\Delta f_T(t) - \Delta f_R \left(t - \frac{r_{12}}{c} - \Delta\tau \right) \right] dt \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $\frac{r_{12}}{c} \gg \Delta\tau$, 显然有

$$\Delta f_R \left[t - \frac{r_{12}}{c} - \Delta\tau \right] \approx \Delta f_R \left[t - \frac{r_{12}}{c} \right] \quad (19)$$

则可用 $\frac{\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t)}{2}$ 去补偿 t 时刻, 接收机解调后的接收信号解调相位可得

$$\begin{aligned} \varphi_R(t) + \frac{\varphi_{s2}(t) - \varphi_{s1}(t)}{2} \\ = 2\pi \left\{ - f_R \cdot \frac{r_1 + r_2}{2c} - (f_T - f_R) \cdot \frac{r_{12}}{2c} - (f_T - f_R) \cdot \Delta\tau \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

因为 $2\pi[(f_T - f_R) \cdot \Delta\tau] \cong 0$, 由式(11)、(20)可以看出, 收发载机视距通信时的脉冲出发同步误差对该补偿方法影响很小, 可以忽略不计, 可见该补偿方法有着较好的应用价值。

4 仿真分析

下面分别给出了收发系统频率同步误差对双站成像的影响和基于本文方法进行同步误差补偿的仿真和分析。文中采用收发平飞正侧视模式, 选取仿真参数为: 雷达工作频率 $f_0 = 9.6\text{GHz}$; 信号带宽 100MHz ; 脉冲重复频率 200Hz ; 脉冲宽度 $10\mu\text{s}$; 载机速度 70m/s ; 发射载机高度 6km ; 接收载机高度 3km ; 发射载机正侧视距离 30km , 接收载机正侧视距离 10km 。

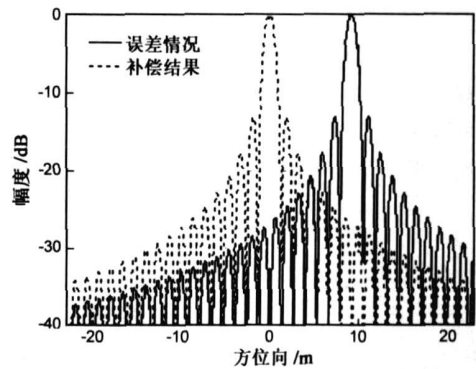


图2 固定频率同步误差与补偿后的成像结果

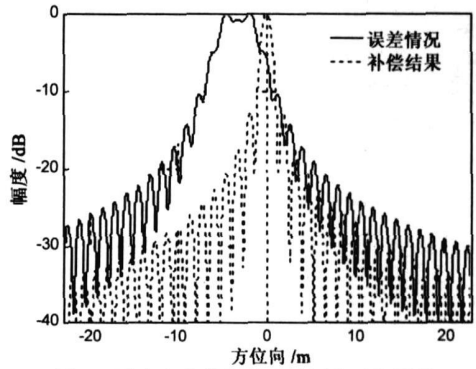


图3 固定和线性频率误差同在与补偿后的成像结果

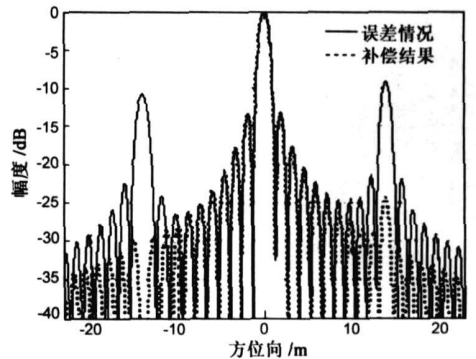


图4 正弦时变频率同步误差与补偿后的成像结果

在仿真结果中,“—”线表示带有频率同步误差时的方位向成像结果,“...”表示经过频率同步误差补偿后的结果.其中,图 2 给出了收发系统频率源存在固定频率误差 $\Delta f_0 = 1.75\text{Hz}$ 时的结果,可以看出,固定的同步频率误差导致了方位向成像结果的偏移,经过补偿后,消除了固定误差的影响.图 3 给出了收发系统频率源同时存在固定频率误差和线性同步误差时的结果(其中线性时变频率误差分量为 $\Delta f_l(t) = 3 \cdot f_0 \cdot 10^{-12} \cdot t^2$),可以看出,线性时变同步频率误差导致了方位向成像结果的主瓣展宽和散焦,降低了方位向分辨力,经过补偿后,消除了两项频率误差源的影响.图 4 给出了收发系统频率源存在正弦起伏频率误差(正弦起伏频率误差分量为 $\Delta f(t) = 2 \cdot f_0 \cdot 10^{-10} \cdot \cos(16 \cdot t)$),可以看出,正弦起伏频率误差导致了成对回波的出现,经过补偿后,成对回波消失.

5 结论

频率同步与误差补偿是机载双站 SAR 的一个关键问题,在机载双站 SAR 系统中,由于收、发平台是分置的,收发载机本振频率源的不同步,将会引起回波信号相位误差的在整个合成孔径时间内的积累,导致成像效果变差,严重时甚至不能成像.“GPS+ 独立高稳定频率源”是实现双站 SAR 收发频率同步比较可行的方法,基于收发平台视距通信的频率同步误差补偿方法,能够有效地补偿收发系统频率同步误差,且该补偿方法不受收发系统触发同步误差的影响,仿真结果也证明了该方法的有效性.本文的研究内容对解决机载双站 SAR 的频率同步问题有一定的实际指导意义.

参考文献:

- [1] 汤子跃,张守融.双站合成孔径雷达系统原理[M].北京:科学出版社,2003.86-106.
Tang Zi yue, Zhang Shou rong. Bistatic SAR System Theory [M]. Beijing: Science Publishing House. 2003. 86-106. (in Chinese)
- [2] Braun H M, Hartl P. Bistatic radar in space: a new dimension in

imaging radar[A]. Proceedings of International Conference on Geoscience and Remote Sensing [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1989. 2261-2264.

- [3] 汤子跃,张守融.频率源稳定性对 BiSAR 成像的影响[J].电子与信息学报,2004,26(1):100-106.
Tang Zi yue, Zhang Shou rong. Influence of the frequency instability on the bistatic SAR imaging[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(1):100-106. (in Chinese)
- [4] 汤子跃,张守融,王卫延.运动误差对双站 SAR 相位同步及成像的影响[J].电子学报,2003,31(12):1907-1910.
Tang Zi yue, Zhang Shou rong, Wang Wei yan. The influence of motion error on the phase synchronization and imaging of bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12):1907-1910. (in Chinese)
- [5] M Eineder. Oscillator clock drift compensation in bistatic interferometric SAR[A]. Proceedings of International Conference on Geoscience and Remote Sensing [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 1449-1451.

作者简介:



朱振波 男,1977 年出生于山东昌邑,博士生,2000 年毕业于空军雷达学院雷达工程专业,2003 年于空军雷达学院微波工程专业获硕士学位,2003 年在海军工程大学攻读博士学位,主要研究方向为合成孔径雷达/逆合成孔径雷达成像技术、雷达信号处理.
E mail: zzhtradar@126.com

汤子跃 男,1966 年生,博士后,教授,博士生导师,主要从事雷达系统、信号处理以及 SAR 成像等领域的研究.

蒋兴舟 男,1938 年生,教授,博士生导师,从事雷达及水声信号理论的研究.