

◇ 研究报告 ◇

双基地合成孔径声呐时间同步误差分析

郭 慧^{1,2,3} 黄 勇^{2,3†} 王迎迎^{1,2,3} 刘纪元^{2,3}

(1 中国科学院大学 北京 100049)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(3 中国科学院先进水下信息技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 双基地合成孔径声呐克服了单基地声呐系统的诸多缺陷,在成像等方面有很大优势,但时间同步仍然是一个目前制约成像质量的重要因素,时间同步误差影响是值得关注的重大问题。在回波信号模型和时间同步误差模型基础上,针对双基地合成孔径声呐进行误差影响的理论分析,并进行仿真验证。结果表明,固定时间误差主要引起距离向聚焦位置偏移,线性时间误差引起方位向聚焦模糊和分辨率降低,随机时间误差引起距离与方位向旁瓣升高。

关键词: 双基地合成孔径声呐;时间同步误差;分辨率计算;误差影响分析

中图法分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)02-0284-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.02.016

Analysis of time synchronization errors in bistatic synthetic aperture sonar

GUO Hui^{1,2,3} HUANG Yong^{2,3} WANG Yingying^{1,2,3} LIU Jiyuan^{2,3}

(1 University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Institute of Acoustic, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Key Laboratory of Advanced Underwater Information, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The bistatic synthetic aperture sonar overcomes many shortcomings of the monostatic sonar system, and has great advantages in imaging performance. However, time synchronization technology is still a significant factor that restricts imaging quality, so analysis of time synchronization error is an important issue worthy of attention. Based on the signal echo model and time synchronization error model, the resolution under the influence of error is calculated, and the theoretical analysis of the error influence of the bistatic synthetic aperture sonar is carried out and verified by simulation. The results show that the fixed time error mainly results in focus position migration in distance dimension, the linear time error results in the azimuth focus blur, and the random time error results in the rising of side lobes both in distance dimension and azimuth dimension.

Keywords: Bistatic synthetic aperture sonar; Time synchronization errors; Resolution calculation; Analysis of error impact

2019-04-01 收稿; 2019-11-28 定稿

作者简介: 郭慧 (1995-), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向: 双基地声呐同步技术。

† 通信作者 E-mail: y_huang@mail.ioa.ac.cn

0 引言

双基地合成孔径声呐 (Bistatic synthetic aperture sonar, Bi-SAS) 是一种收发分置的新型声呐体制, 与常规成像声呐相比, 双基地成像声呐具有显著优势: 收发分置, 灵活性好; 探测效率高; 充分利用目标的散射特性; 探测安全性高等^[1]。同步技术是双基地成像声呐系统的核心技术之一, 包括时间同步、相位同步和运动补偿, 分别指收发换能器具有统一的时间标准、相位对齐以及对运动轨迹偏移的补偿, 其中时间同步是需要解决的一个重要问题。

国外对双基地声呐的理论与应用的研究比较多。20世纪90年代起, 双/多基地声呐系统研究进入新阶段, 主要成果有目标散射特性、海底混响、目标探测等理论方面的研究, 并研制出了部分实验样机。如1998年由MIT和SACLANTCEN联合的GOATS项目, 致力于研制适用于沿海环境的反水雷系统, 实现了对掩埋物的探测成像, 但该系统未考虑时间同步误差的补偿, 成像效果不理想^[2]。

我国对双/多基地声呐研究起步较晚, 主要集中在目标散射特性、定位原理及成像算法等理论方面的研究^[3-6], 对时间同步技术的研究不多, 尚无有效的同步系统。雷达系统中常用的同步技术有基于GPS和运动传感器同步^[7]、高精度晶振同步、独立式同步法等。但GPS在水下使用范围受限, 高精度晶振价格昂贵, 这些方法不适用于双基地声呐系统, 利用回波数据的声学方法是目前行之有效的一种时间同步方案。

目前Bi-SAS系统中没有成熟应用的时间同步方案, 有必要进行深入的研究^[8-9]。文献^[10]指出, 双基地声呐系统对时间同步精度的要求是信号压缩后脉宽的若干分之一, 即 10^{-3} 量级, 但合成孔径声呐 (Synthetic aperture sonar, SAS) 无需精确测距, 主要关注对回波调频特性的影响, 所以本文将对时间同步误差重点进行理论分析。首先给出Bi-SAS几何模型、回波信号模型及时间同步误差模型, 计算误差影响下的距离和方位分辨率, 然后理论分析误差对成像性能的影响, 最后进行仿真验证。

1 BiSAS回波信号模型

1.1 Bi-SAS回波信号模型

双基地合成孔径声呐三维几何模型如图1所示, 假定收发平台做同向匀速直线运动, 均以侧视

方式工作, 并以一定的脉冲重复频率发射和接收声信号。

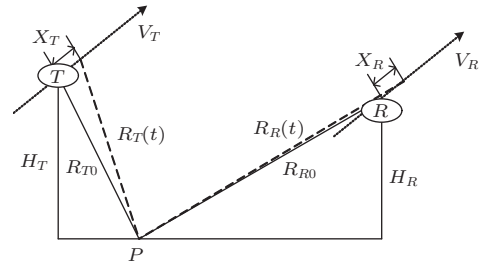


图1 Bi-SAS三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional model of Bi-SAS

从图1给出的几何关系可以得到Bi-SAS的合成孔径关系。在 $t=0$ 时刻, Bi-SAS收发平台分别处在某一合成孔径中心位置, R_{T0} 、 R_{R0} 分别为0时刻发射平台和接收平台到点目标的距离, $R_0 = R_{T0} + R_{R0}$ 为0时刻收发位置到目标位置的距离和。设 t 时刻发射平台和接收平台到点目标的距离分别为 $R_T(t)$ 、 $R_R(t)$, 则 t 时刻回波信号所经历的距离可表示为

$$R(t) = R_T(t) + R_R(t), \quad (1)$$

式(1)中,

$$R_T(t) = (R_{T0}^2 + x_T^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$R_R(t) = (R_{R0}^2 + x_R^2)^{1/2}, \quad (3)$$

其中, x_T 、 x_R 分别表示 t 时刻发射平台和接收平台相对于初始时刻移动的距离, 其值分别为

$$x_T(t) = V_T t, \quad (4)$$

$$x_R(t) = V_R t, \quad (5)$$

其中, V_T 、 V_R 分别为发射平台和接收平台匀速直线运动的速度。假设 $|x_T| \ll R_T$ 和 $|x_R| \ll R_R$, 根据菲涅尔公式, 式(2)和式(3)可以分别近似为

$$R_T(t) \approx R_{T0} + \frac{x_T^2}{2R_{T0}}, \quad (6)$$

$$R_R(t) \approx R_{R0} + \frac{x_R^2}{2R_{R0}}. \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(1), 可得到

$$R(t) = (R_{T0}^2 + V_T^2 t^2)^{1/2} + (R_{R0}^2 + V_R^2 t^2)^{1/2} \approx R_0 + \Delta R(t), \quad (8)$$

式(8)中,

$$\Delta R(t) = \frac{x_T^2}{2R_{T0}} + \frac{x_R^2}{2R_{R0}} = \frac{(V_T t)^2}{2R_{T0}} + \frac{(V_R t)^2}{2R_{R0}}. \quad (9)$$

双基地 SAS 通过脉冲压缩提高分辨率, 假设发射信号是线性调频信号,

$$s_T(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau}{T}\right] \cdot \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi k_r \tau^2), \quad (10)$$

式(10)中, τ 为距离向时间; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数; T 为脉冲持续时间; f_c 为信号载频中心频率; K_r 为线性调频率, 其表达式为 $K_r = B/T$; B 为信号带宽。

接收回波为延迟后的线性调频信号形式,

$$s_R(\tau, t) = \text{rect}\left[\frac{\tau - R(t)/c}{T}\right] \cdot \exp\{j2\pi f_c [\tau - R(t)/c] + j\pi K_r [\tau - R(t)/c]^2\}, \quad (11)$$

式(11)中, 回波信号延迟表示为 $\tau_d(t) = R(t)/c$, t 为方位向时间, c 为声波传播速度。

接收换能器接收信号本振角频率为 $2\pi f_c$, 本振信号为 $\exp(-j2\pi f_c \tau)$ 。但实际上双基地 SAS 系统发射与接收存在不可忽略的时间同步误差, 设接收时间与发射时间相差 $\Delta\tau$, 则接收换能器参考时钟为 $\tau' = \tau + \Delta\tau$, 接收换能器本振信号为 $\exp[-j2\pi f_c \tau']$ 。解调后的回波信号为

$$s_{dR}(\tau', t) = \text{rect}\left[\frac{\tau' - \Delta\tau - \tau_d(t)}{T}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c \cdot [\Delta\tau + \tau_d(t)] + j\pi K_r [\tau' - \Delta\tau - \tau_d(t)]^2\right\}. \quad (12)$$

忽略包络影响, 对回波信号式(12)进行距离向傅里叶变换, 可得到^[11]

$$S_R(f_\tau, t) = \exp\left(-j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}\right) \cdot \exp\{-j2\pi f_c \cdot [\Delta\tau + \tau_d(t)]\} \cdot \exp\{-j2\pi f_\tau \cdot [\Delta\tau + \tau_d(t)]\}, \quad (13)$$

式(13)中, f_τ 为距离向频率。设频域匹配滤波器为

$$H(f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{|K_r|T}\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}\right), \quad (14)$$

距离向压缩得到

$$s_{rc}(\tau, t) = \text{IFFT}\{S_R(f_\tau, t) H(f_\tau)\} = A_0 \text{sinc}\{K_r T [\tau - \tau_d(t) - \Delta\tau]\} \cdot \exp\{-j2\pi f_c [\Delta\tau + \tau_d(t)]\} \cdot \exp\{-j\pi K_r T [\tau - \tau_d(t) - \Delta\tau]\}. \quad (15)$$

1.2 Bi-SAS 的分辨率

收发分置 SAS 致使距离向和方位向物理意义明显区别于单基地 SAS。收发传播路径不一样使得地面分辨率表示不一致, 方位向分辨率也不再是常数。

对于线阵, 分辨率一般指波束信号半功率点对应的波束宽度, 即常用幅度的 -3 dB 带宽表示, 有

$$P\left(\frac{\theta_{3 \text{ dB}}}{2}\right) = \frac{1}{2}. \quad (16)$$

在 $\lambda \ll D$ 条件下, 角分辨率近似解为^[12]

$$\theta_{3 \text{ dB}} = 0.886 \frac{\lambda}{D} \approx \frac{\lambda}{D}. \quad (17)$$

线分辨率近似解为

$$\delta_{3 \text{ dB}} = r \cdot \theta_{3 \text{ dB}} \approx \frac{\lambda}{D} r. \quad (18)$$

其中, P 为信号功率, D 为接收阵长度, λ 为信号波长。

当同步误差与时间有关时, 式(12)表明一次线性误差会对调频率产生影响。设 $\Delta\tau_s = \beta \cdot t + \chi$, 代入式(15)的幅度项得到

$$s_{rc}(\tau, t) = A_0 \cdot \text{sinc}\left[K_r T (1 - \beta) \left(\tau - \frac{\tau_d - \chi}{1 - \beta}\right)\right] \cdot \exp\{-j2\pi f_c [\Delta\tau + \tau_d(t)]\} \cdot \exp\{-j\pi K_r T [\tau - \tau_d(t) - \Delta\tau]\}. \quad (19)$$

信号经过脉冲压缩后, 按其半功率带宽计算分辨率, 得到 Bi-SAS 的时间分辨率为

$$\rho = \frac{0.886}{K_r T} \approx \frac{1}{B}. \quad (20)$$

因此, 无误差影响时, Bi-SAS 距离向脉压分辨率为

$$\rho_R = c \cdot \rho \approx \frac{c}{B}. \quad (21)$$

考虑线性时间误差时, Bi-SAS 时间分辨率为

$$\rho = \frac{0.886}{k_r T (1 - \beta)} \approx \frac{1}{B(1 - \beta)}. \quad (22)$$

Bi-SAS 脉压分辨率为

$$\rho_R = c \cdot \rho \approx \frac{c}{B(1 - \beta)}. \quad (23)$$

由于双基地声呐配置形式多样, 地面距离分辨率随着配置形式的不同而具有空变性。

考虑方位向分辨率, 回波信号多普勒频率为

$$f_{dt} = -R(t)' / \lambda \approx \left(\frac{V_T^2}{\lambda R_{T0}} + \frac{V_R^2}{\lambda R_{R0}}\right) t. \quad (24)$$

令 $k_V = V_T/V_R$ ($V_R \neq 0$), $k_R = R_{T0}/R_{R0}$, 对应的多普勒线性调频率为

$$\gamma_a = \frac{V_R^2}{\lambda R_{R0}} \left(\frac{k_V^2}{k_R} + 1 \right). \quad (25)$$

多普勒带宽为

$$B_d = |\gamma_a T_s|, \quad (26)$$

式(26)中, T_s 为 Bi-SAS 的孔径合成时间, 由接收平台参数可以得到

$$T_s = \frac{\lambda R_{R0}}{DV_R}. \quad (27)$$

将式(15)中时间表示为时变距离, 有

$$\begin{aligned} s_{rc}(\tau, t) &= A_0 \text{sinc} \left\{ B \left[\tau - \frac{R(t)}{c} - \Delta\tau \right] \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ -jk [c \cdot \Delta\tau + R(t)] \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ -j\pi B \left[\tau - \frac{R(t)}{c} - \Delta\tau \right] \right\}, \quad (28) \end{aligned}$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数, 当 $\Delta R(t) < \rho_R/2$ 时, 可以忽略合成孔径长度内斜距变化量对回波延迟时间的影响。将式(28)中时变距离 $R(t)$ 引起的相位项用方位向多普勒调频率表示, 得到

$$\begin{aligned} s_{rc}(\tau, t) &= A_0 \text{sinc} \left[B \left(\tau - \frac{R_0}{c} - \Delta\tau \right) \right] \\ &\cdot \exp \left[-j2\pi f_c (R_0/c + \Delta\tau) + j\pi \gamma_a t^2 \right] \\ &\cdot \exp \left\{ -j\pi B \left[\tau - \frac{R(t)}{c} - \Delta\tau \right] \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

式(29)表明, 二次线性误差对调频率会产生影响, 设 $\Delta\tau = \alpha \cdot t^2 + \beta \cdot t + \chi$ 。设参考信号为

$$H(f_a) = \exp \left(-j\pi \frac{f_a^2}{\gamma_a} \right). \quad (30)$$

方位向脉冲压缩得到影响调频率的幅度项为

$$s_{ac,amp}(t) = \text{sinc} \left[\left(1 - \frac{\alpha \omega_c}{\gamma_a} \right) B_d t \right]. \quad (31)$$

因此, 无误差影响时, Bi-SAS 的方位向分辨率为

$$\rho_A = \frac{V_R}{B_d} = \frac{D}{k_V^2/k_r + 1}. \quad (32)$$

考虑时间同步误差时, 方位向分辨率为

$$\begin{aligned} \rho_A &= \frac{V_R}{B_d} = \frac{D}{(k_V^2/k_r + 1) \left(1 - \frac{\alpha \omega_c}{\gamma_a} \right)} \\ &= \frac{D}{(k_V^2/k_r + 1) - 2\pi \alpha c \frac{R_{R0}}{V_R^2}}. \quad (33) \end{aligned}$$

2 时间同步误差分析

2.1 时间同步误差模型

在双基地 SAS 系统中, 收发换能器的触发脉冲由各自载体平台上的频率源分频得到, 时间同步误差主要是发射与接收平台的时钟源不一致与不稳定导致的。将时间同步误差分为 3 个部分^[13]: 收发平台初始触发信号间的时间差 $\Delta\tau_0$, 收发脉冲重复间隔之差引起的线性时间误差 $\Delta\tau(t)$, 以及频率源稳定性引起的随机误差 $\Delta\tau_{\text{rand}}$ 。因此, 系统的时间同步误差模型可表示为

$$\Delta\tau_s = \Delta\tau_0 + \Delta\tau_l + \Delta\tau_{\text{rand}}, \quad (34)$$

其中, $\Delta\tau_s(t)$ 为时间同步总误差; 第一项为固定时间差; 第二项为随时间变化的线性积累误差, 假设服从二次线性分布, 表示为 $\Delta\tau_l = a \cdot t^2 + b \cdot t$; 第三项为随机时间误差, 服从均值为零的正态分布^[14-15]。

基于此误差模型的触发信号时序图如图 2 所示。

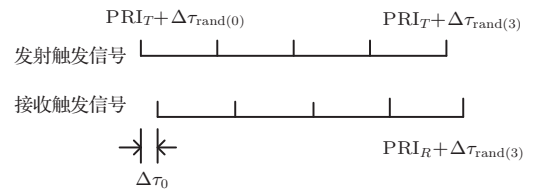


图 2 Bi-SAS 收发触发信号时序示意图

Fig. 2 Transceiver trigger signal timing diagram of Bi-SAS

2.2 时间同步误差影响分析

首先分析收发换能器间只存在脉冲重复频率 (Pulse repetition frequency, PRF) 触发不同步对成像性能的影响。此时时间误差为固定值 $\Delta\tau_0$, 将 $\Delta\tau_s(t) = \Delta\tau_0$ 代入式(13)距离向傅里叶变换表达式, 可得到

$$\begin{aligned} S_R(f_\tau, t) &= \exp \left(-j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r} \right) \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c \cdot [\Delta\tau_0 + \tau_d(t)] \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ -j2\pi f_\tau \cdot [\Delta\tau_0 + \tau_d(t)] \right\}. \quad (35) \end{aligned}$$

由式(35)可知, 固定时间误差 $\Delta\tau_0$ 引入两项相位误差, 在距离向引入误差相位项 $\exp(-j2\pi f_\tau \cdot \Delta\tau_0)$, 使成像聚焦位置在距离向产生固定偏移, 引起回波采样窗的偏移^[10]。代入式(23)得到距离向分

分辨率 $\delta_R = c/B$, 由此可见, 固定时间误差对距离向分辨率没有影响。方位向引入误差相位项 $\exp(-j2\pi f_c \cdot \Delta\tau_0)$, 不随方位时间变化而变化, 因此对方位向分辨率没有影响。

回波采样窗偏移如图3所示, 图中 $\Delta\tau$ 为收发间固定时间差, B_e 为回波信号有效带宽, T 为回波信号时长。当偏移造成回波窗不能完全采样时, 会使回波采样信号发生位移、截断, 带宽变窄^[16]。

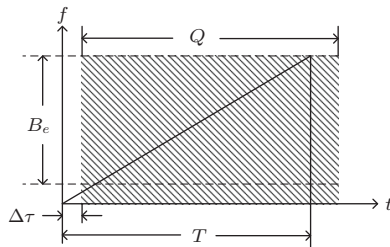


图3 回波采样窗偏移示意图

Fig. 3 Echo sampling window offset diagram

收发换能器间脉冲重复时间差引起线性时间误差 $\Delta\tau(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t$, 线性误差具有累积性, 示意图如图4所示。

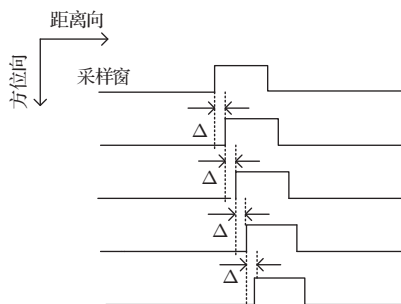


图4 线性时间误差示意图

Fig. 4 Linear time error diagram

只考虑线性时间误差影响时, 将 $\Delta\tau(t) = at^2 + bt$ 代入式(13)距离向傅里叶变换式, 得到

$$S_R(f_\tau, t) = \exp\left(-j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}\right) \cdot \exp\{-j2\pi f_c \cdot [a \cdot t^2 + b \cdot t + \tau_d(t)]\} \cdot \exp\{-j2\pi f_r \cdot [a \cdot t^2 + b \cdot t + \tau_d(t)]\}. \quad (36)$$

分析式(36)可知, 线性时间误差在距离向引入线性误差相位项 $\exp[-j2\pi f_\tau \cdot (a \cdot t^2 + b \cdot t)]$, 成像时引起距离向聚焦位置偏移, 且偏移量与时间 t 有关。将线性误差代入式(23), 可得到距离向分辨率为 $\rho_R = c/B(1-b)$, 造成距离向分辨率降低, 成像性能下降。

在方位向引入误差相位项 $\exp[-j2\pi f_c \cdot (a \cdot t^2 + b \cdot t)]$, 引起复杂的聚焦恶化和方位聚焦位置偏移。代入式(33), 得到方位向分辨率为 $\rho_A = \frac{D}{(k_v^2/k_r + 1) - 2\pi ac \frac{R_{R0}}{V_R^2}}$, 造成方位向分辨率

降低, 成像产生聚焦模糊以及主瓣展宽、旁瓣升高。

随机时间误差是由发射与接收换能器频率源不稳定造成的, 累积造成PRF随时间随机变化, 示意图如图5所示。

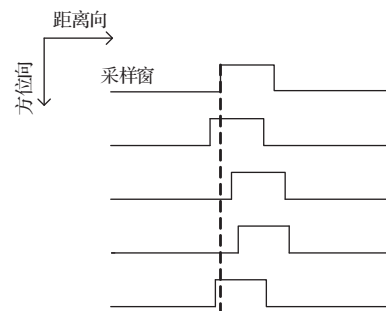


图5 PRF随时间随机变化的示意图

Fig. 5 PRF jitter diagram

设发射与接收PRF随机变化分别服从 $\Delta\tau_s(\tau) \sim (0, \sigma_s^2)$ 与 $\Delta\tau_r(\tau) \sim (0, \sigma_r^2)$ 的高斯分布, 则接收端相邻采样窗PRF随机误差 $\Delta\tau_{\text{rand}}$ 也服从高斯分布, 此误差在方位向没有累积性。

$$\Delta\tau_{\text{rand}}(\tau) \sim (0, \sigma_s^2 + \sigma_r^2). \quad (37)$$

该误差影响回波信号在距离向和方位向上的调频特性, 当时钟源稳定性差或误差较大时, 采样所得信号将无法对齐, 造成图像旁瓣升高, 对积分旁瓣比影响较大。随机时间误差影响的点目标示意图如图6所示。

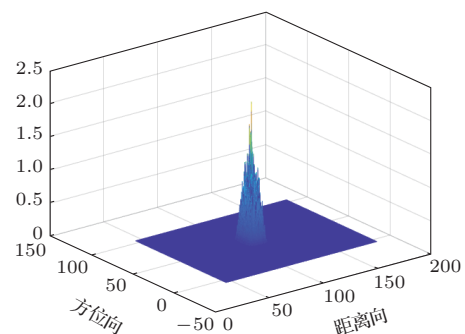


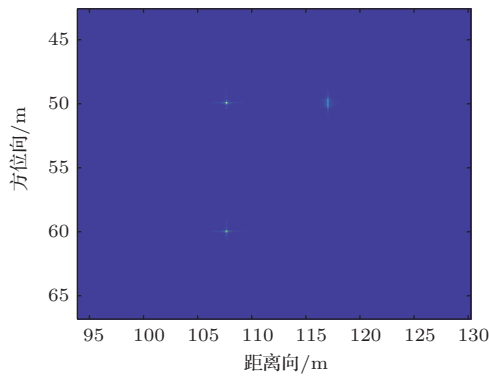
图6 随机误差影响的点目标示意图

Fig. 6 Point target affected by random error

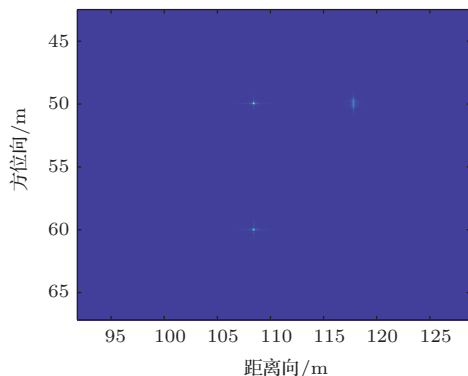
3 仿真结果

通过对时间同步误差的仿真,以验证对 Bi-SAS 成像的影响效果,仿真参数如表 1 所示。

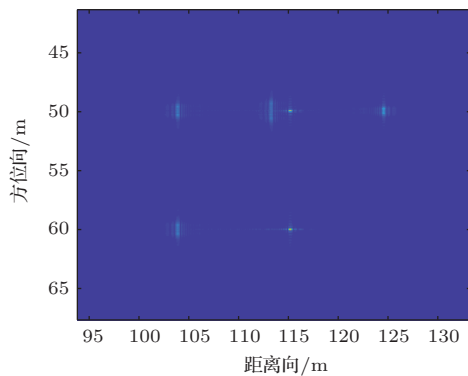
利用表 1 中仿真参数对 3 个点目标进行距离-多普勒 (Range Doppler, RD) 算法成像仿真,分别加入不同的固定时间同步误差, $\Delta\tau_0 = 0$ 、 $\Delta\tau_0 = 1$ ms 和 $\Delta\tau_0 = 10$ ms,得到的成像仿真结果如图 7 所示。



(a) 无误差



(b) 1 ms 固定时差

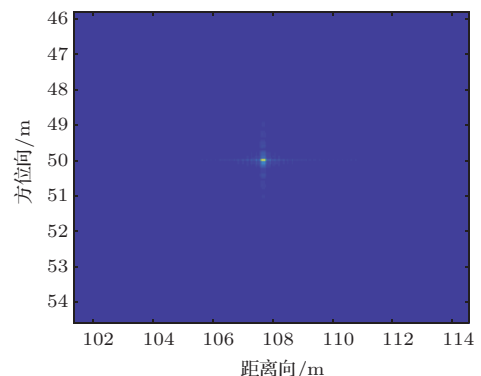


(c) 10 ms 固定时差

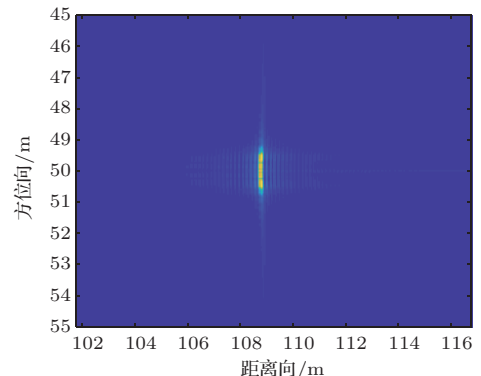
图 7 固定时间误差对成像性能的影响
Fig. 7 Image affected by fixed time error

从图 7 仿真结果可知,当固定时间误差较小、系统采样窗满足对偏移后信号的完全采样时,仅在距离向引起相应的偏移,对成像质量没有明显影响。但当误差较大、采样窗不能完全采样时,回波采样信号带宽变窄,造成距离向频谱宽度缩短,在成像范围内出现干扰点,明显影响成像性能。

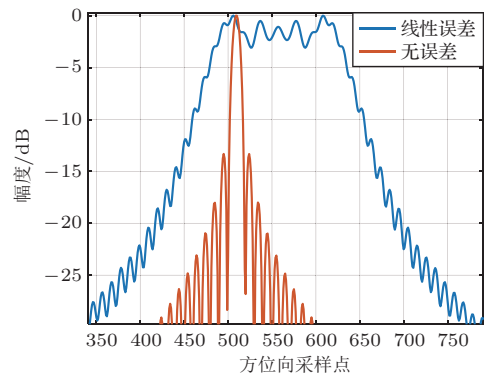
利用表 1 中仿真参数对一个点目标进行 RD 算法成像仿真,加入 $\alpha = 0.1$ 、 $\beta = 0.1$ 的线性时间误差,得到的成像仿真结果如图 8 所示。



(a) 无误差时



(b) 有线性时间误差时的点目标成像结果

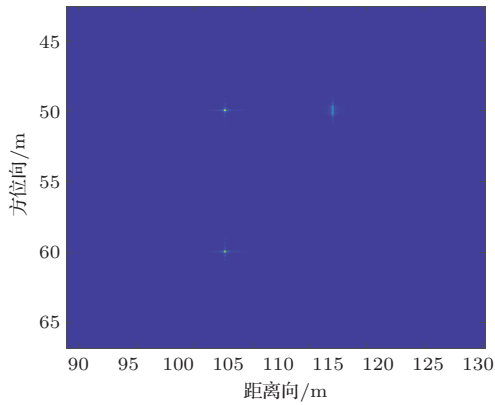


(c) 方位向剖面图

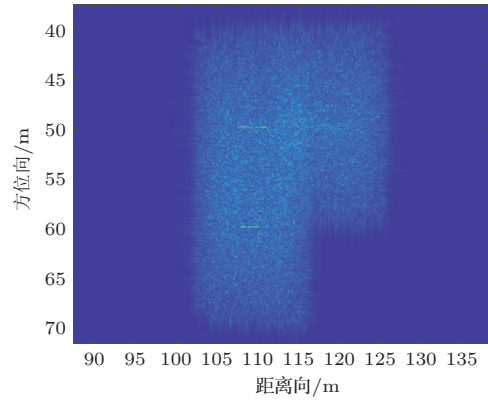
图 8 线性时间误差对成像性能的影响
Fig. 8 Image affected by linear time error

表1 仿真参数表
Table 1 Simulation parameter table

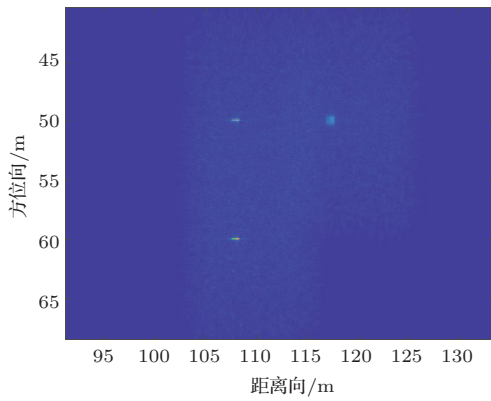
参数	声速 /(m·s ⁻¹)	信号带宽 /kHz	脉冲宽度 /ms	脉冲重复 频率/Hz	载频/ kHz	收发平台运动 速度/(m·s ⁻¹)	目标到接收平台 最短斜距/m	3个点目标位置/m	单个点目标 位置/m
数值	1500	5	5	2.6	110	0.16	107	(50,100) (60,100) (50,110)	(50,100)



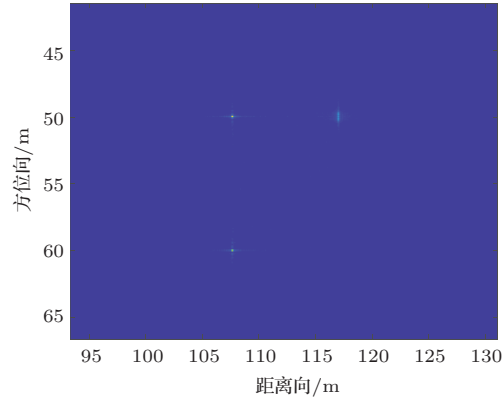
(a) 无误差



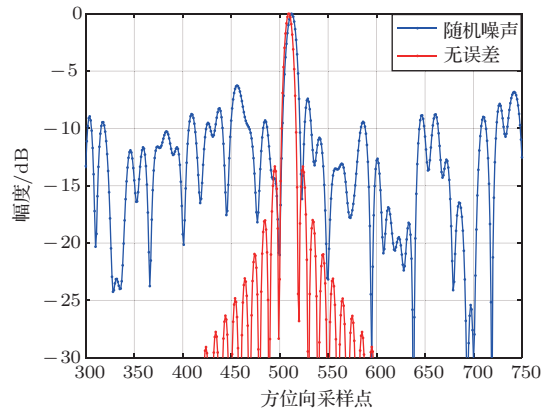
(b) 10⁻²量级误差的成像结果



(c) 10⁻³量级误差的成像结果



(d) 10⁻⁴量级误差的成像结果



(e) 10⁻³量级误差时的方位向剖面图

图9 随机时间误差对成像性能的影响
Fig. 9 Image affected by random time error

从图8中可见,线性时间误差影响距离向和方位向聚焦性能,距离向引起目标图像偏移和分辨率降低,更为明显的是方位向聚焦模糊,主瓣展宽,旁瓣升高,分辨率降低,成像效果不佳。

利用表1中仿真参数对3个点目标进行RD算法成像仿真,加入不同量级的随机时间误差,分别加入 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 量级的随机噪声,得到的成像仿真结果如图9所示。

从图9可以看出,随机时间误差影响距离向和方位向调频特性,使旁瓣升高,积分旁瓣比增大,目标受到周围噪声干扰影响增大,甚至可能被淹没,因此应用时需要频率源的时间稳定度提出相应的性能指标要求。

4 结论

本文开展了Bi-SAS时间同步误差影响的理论分析和仿真验证,计算了误差影响下的距离和方位向分辨率,分别分析了固定时间误差、线性时间误差以及随机时间误差对点目标成像性能的影响。固定时间误差主要引起目标距离向聚焦位置偏移,对方位向聚焦影响不大,但当采样窗无法完全采样时,会出现干扰点;线性时间误差对方位向成像性能影响严重,造成聚焦位置模糊和分辨率下降;随机时间误差不具有累积性,影响距离向与方位向调频特性,造成旁瓣升高。

参 考 文 献

- [1] 赵俊渭, 闫宜生, 丁纬, 等. 双基地声呐的性能与展望[J]. 声学与电子工程, 1991, 23(3): 29–33.
- [2] Edwards J R, Schmidt H, Lepage K D. Bistatic synthetic aperture target detection and imaging with an AUV[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 690–699.
- [3] Yang L, Cai Z M. Analysis of detectable region for the bistatic sonar in reverberation background[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(4): 597–602.
- [4] Sun Y, Zhao J W, Zhang X F. Research on the algorithms of localization performance of bistatic sonar[J]. Computer Simulation, 2006, 23(9): 129–132.
- [5] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆, 等. 双基地声呐散射声场的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 562–565.
Zhang Xiaofeng, Zhao Junwei, Wang Rongqing, et al. Modeling and simulation of scattering field for bistatic sonar[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(5): 562–565.
- [6] 王迎迎, 刘纪元, 黄勇, 等. 脉冲压缩与互相关联合的合成孔径声呐回波时延补偿[J]. 声学学报, 2019, 44(4): 626–637.
Wang Yingying, Liu Jiyuan, Huang Yong, et al. An echo time-delay compensation method combining correlation with pulse compression for synthetic aperture sonar[J]. Acta Acustica, 2019, 44(4): 626–637.
- [7] Wang R, Deng Y, Zhang Z, et al. Double-channel bistatic SAR system with spaceborne illuminator for 2-D and 3-D SAR remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8): 4496–4507.
- [8] Matthews A D, Johnson V B, Ball R W. Results of a multi-static synthetic aperture sonar experiment[C]. Oceans 2003 Celebrating the Past Teaming Toward the Future, 2003, 4: 2138–2142.
- [9] López-Dekker P, Mallorquí J J, Serra-Morales P, et al. Phase and temporal synchronization in bistatic SAR systems using sources of opportunity[C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007: 97–100.
- [10] 周鹏, 皮亦鸣, 戴永寿, 等. 星机双基地 SAR 的时间同步误差分析[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1467–1470.
Zhou Peng, Pi Yiming, Dai Yongshou, et al. Analysis of time synchronization errors in spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1467–1470.
- [11] Cumming I G, Wong F H. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 119–125.
- [12] 江泽林. 合成孔径声呐大范围成像关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2013.
- [13] Zhang Y S, Liang D N, Dong Z. Analysis of time and frequency synchronization errors in spaceborne parasitic InSAR system[C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, 2006: 3047–3050.
- [14] 张帆. 机载双基地 SAR 同步技术与成像研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [15] López-Dekker P, Mallorquí J J, Serra-Morales P, et al. Phase synchronization and doppler centroid estimation in fixed receiver bistatic SAR systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3459–3471.
- [16] 黄钰林. 机载双基地 SAR 同步与成像处理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.