

空时不等效对 MIMO 雷达采用 ISAR 技术成像影响的分析

陈刚* 顾红 苏卫民 邵华
(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: MIMO 雷达采用 ISAR 技术成像, 可以综合利用 MIMO 的空间采样和 ISAR 的时间积累, 减少阵元、提高成像质量。但当系统参数不完全匹配时, 会出现空间与时间采样不等效现象。该文研究了空时不等效对成像质量的影响, 经过详细推导, 得到计算成像结果中虚假目标数量、位置的数学公式, 给出了目标与最大假目标幅度比值的解析表达, 并对目标幅度衰减情况进行了定量分析。在此基础上, 对目标上特殊点进一步讨论, 总结了它们方位像的特点。最后, 通过仿真验证了分析推导的正确性。

关键词: 多入多出雷达; 逆合成孔径雷达; 虚假目标

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1806-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01507

Analysis on the Effect of Nonequivalent Relationship between Space and Time in MIMO-ISAR Imaging

Chen Gang Gu Hong Su Wei-min Shao Hua

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: MIMO radar imaging using ISAR technique combines the space sampling of MIMO radar and the time sampling of ISAR techniques, which can save many antenna elements and improve image resolution. However, there will be the nonequivalent relationship between the space sampling and time sampling, when parameters fail to be matched. By analyzing the effect of nonequivalent relationship between space and time in detail, this paper obtains the number and locations of false targets. Analytical formulas to calculate the peak to false ratio is deduced, and amplitude attenuation of targets is quantitatively analyzed. On this basis, further discussion gives some characteristics of images for targets in the special locations. Finally, simulations are performed to verify these analyses and formulas.

Key words: MIMO radar; ISAR; False target

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)对空天目标成像, 能够获得其运动态势和各种结构特征, 为目标分类、识别和编目提供有力支撑。因此, ISAR 成像技术在国家安全和国防发展方面发挥着重要作用^[1]。传统 ISAR 通过发射大带宽信号获得距离向高分辨, 利用目标与雷达的相对运动获得方位向分辨能力。相对运动, 一方面使得雷达能够从不同角度观测目标, 形成对目标回波的空间采样; 另一方面由于其不确定性, 给成像积累造成困难, 带来了运动补偿等复杂问题^[2]。在保持方位向分辨率不变的前提下, 若能缩短成像时间, 将有效降低对目标飞行状态的要求, 提高雷达成像质量。

为此, 学术界提出使用 MIMO 雷达进行 ISAR

成像^[3,4]。MIMO 是近年来出现的一种新的雷达体制, 它发射和接收均由多个阵元组成。发射端各阵元发射正交信号, 接收端每个阵元通过匹配滤波器组将所有发射信号对应的回波分离, 从而在收发之间建立远大于阵元数量的目标观测通道^[5]。将 MIMO 雷达和 ISAR 技术相结合(MIMO-ISAR), 一方面, 利用 MIMO 雷达形成的虚拟阵列, 大大提高雷达的空间采样能力, 显著降低成像所需相干积累时间, 减小目标运动不确定性对成像的影响和限制; 另一方面, 借助目标与 MIMO 雷达的相对运动, 通过较短时间的积累, 减少所需阵元数量, 消除因阵列稀疏化带来的采样缺失。基于这些优点, 国内外针对 MIMO-ISAR 开展了一系列研究: 文献[6]利用多个空中平台采集的雷达回波数据进行 2D-MIMO SAR/ISAR 成像; 文献[7]研究了收发阵列相互垂直的 MIMO 雷达的成像算法; 文献[8]提出一种 M^2 个发射阵元、 N^2 个接收阵元的 MIMO 雷达阵列进行 3D 成像; 文献[9]基于发射步进频信号的分布式

2012-11-20 收到, 2013-02-01 改回

国家部委基金, 教育部博士点基金(20113219110018)和南京理工大学研究基金(2011ZDJH13)资助课题

*通信作者: 陈刚 gang.chen@foxmail.com

ISAR, 通过合成距离像处理提高距离分辨率; 文献[10]讨论了 MIMO-ISAR 成像时所需的图像校正和目标速度估计; 文献[11]凭借采用 MIMO 技术的侧视多掠 ISAR, 增强雷达成像的方位分辨率。

虽然 MIMO-ISAR 具有种种优点, 但要想让 MIMO 的空间采样和 ISAR 技术的时间积累有效等价, 雷达参数之间必须满足一定的条件, 否则会造成空时不等效现象, 即回波数据空间非均匀。将这样的数据直接进行成像处理, 会导致真实目标幅度衰减, 成像结果中出现虚假目标。针对该问题, 本文对 MIMO-ISAR 回波方位向压缩过程进行研究, 定量分析了空时不等效对于图像的影响, 得到虚假目标的数量、位置、相对幅度大小的表达式。对于空时不等效影响图像质量机理的认识, 为 MIMO-ISAR 参数的选择提供了依据, 为回波数据方位向均匀化及后期图像处理算法的研究打下基础。

2 MIMO-ISAR 成像的基本原理

假设 MIMO 雷达有 M 个发射阵元、 N 个接收阵元。等效相位中心近似 (Phase Center Approximation, PCA) 原理表明, 一对发射、接收分开放置的阵元, 可以由位于它们中间位置的一个自发自收的阵元等效^[12]。因此通过合理的阵列设计, 收发线阵可等效为由 $Q = MN$ 个自发自收阵元组成的线性阵列。图 1 是其中一种布阵方式, 发射阵元间距 $2Nd$, 接收阵元间距 $2d$, 根据 PCA 原理, 它等同于 Q 个间距为 d 的虚拟阵元组成的线阵。

回波经过运动补偿后, 目标可视为匀速转动, 角速度为 Ω , 距离 R_0 。由于运动的相对性, 每次快拍(脉冲)数据可看作目标不动, 虚拟阵列各阵元相对上个快拍移位 d_{ss} 后, 对目标回波空间采样的结果, 其中 $d_{ss} = \Omega R_0 / \text{PRF}$, PRF 为雷达发射信号的脉冲重复频率, 如图 2(a)所示。经过 P 个脉冲的积累(图 2 中, $Q = 3, P = 3$), 若在此期间移位阵元位置不存在重叠, 则 MIMO 雷达共进行了 PQ 个不

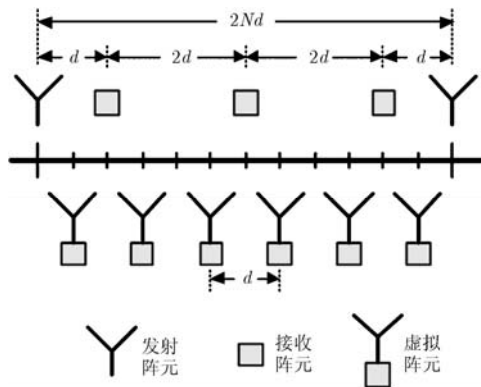


图1 MIMO-ISAR虚拟阵列示意图

同空间位置的采样, 这些数据按照空间位置顺序组成离散的采样序列, 记为 $y(n)$, 在图 2(b)中用小方块表示, 方块中数字表示采样点在序列中对应的序号。

当雷达参数满足条件:

$$\text{PRF} = \frac{P\Omega R_0}{d} \quad (1)$$

时, MIMO 雷达成像的过程, 可等效为图 2(c)中传统 ISAR 以脉冲重复周期 $T = 1/\text{PRF}$, 积累脉冲数 $N_a = PQ$ 进行成像, ISAR 得到的数据如图 2(b)中小圆圈所示, 圆圈内的数字表示采样点在序列中的序号。

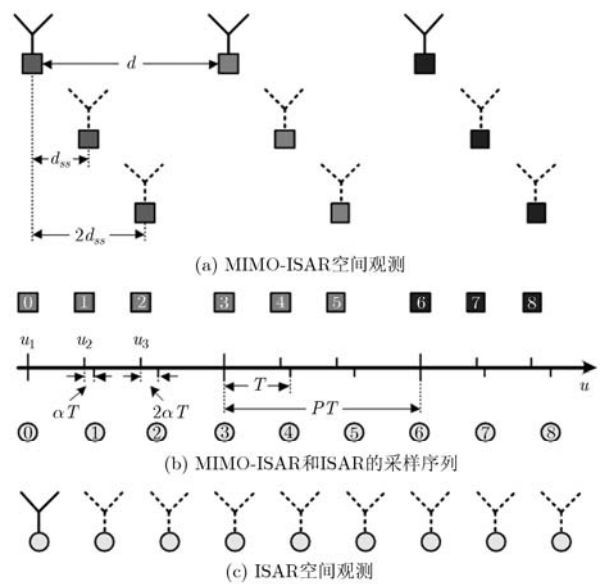


图2 MIMO-ISAR 与 ISAR 的空间时间等效关系

实际应用中, 由于对目标运动速度的估计可能存在误差, 此时根据式(1)计算得到的脉冲重复频率 PRF_{MIMO} , 不等于理想值 PRF。MIMO 雷达如果以 PRF_{MIMO} 为参数进行观测, 空间采样与时间采样不完全等效, 造成空间非均匀采样。若将这样得到的数据当作均匀数据直接进行成像处理, 会导致图像中出现虚假目标, 并使得真实目标幅度下降。

3 非均匀采样数据方位向压缩成像

图 2(b)中 MIMO 雷达通过不同空间位置观测得到的数据, 也可看作是单阵元雷达对运动目标在时域观测的结果。时间变量与阵元位置变量仅相差比例因子 $1/\Omega R_0$, 例如在 MIMO 雷达单次快拍中, 相邻虚拟阵元得到的数据相当于时间上相差 $T_{ss} = d/\Omega R_0 = PT$ 的采样。因此对得到的数据 $y(n)$ 既可以在空域进行分析, 也可以在时域进行分析。为叙述、讨论方便, 本文将 MIMO 雷达得到数据看作对目标

回波的时域采样, 在慢时间域进行分析。

匀速转动的目标产生的方位向回波信号为^[13]

$$r_a(u) = A \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} f_D u\right] \quad (2)$$

其中 A 是信号幅度, 它对本文分析没有影响, 为讨论方便, 令 $A = 1$; λ 是发射信号波长; u 是慢时间变量; f_D 是目标的多普勒频率, $|f_D| \leq B_D/2$, B_D 为多普勒带宽。为使得到的方位向数据满足奈奎斯特采样定理, 脉冲重复频率应满足:

$$\text{PRF} \geq B_D = \frac{2f_c \Omega X_{\max}}{c} \quad (3)$$

式中 f_c 为发射信号载频, c 是电磁波速度, X_{\max} 是目标相对于参考点的最大方位向距离。定义过采样因子 ξ , 因此

$$\text{PRF} = \xi B_D, \quad \xi \geq 1 \quad (4)$$

同时, 对于 MIMO 雷达来说, 要想与 ISAR 等效, 还应满足式(1), 根据式(1)、式(3)和式(4)可以解得积累脉冲数应符合的条件:

$$P = \frac{2\xi d X_{\max}}{\lambda}, \quad \xi \geq 1, \quad P \in \mathbf{Z} \quad (5)$$

式中 \mathbf{Z} 表示整数集合。雷达进行 $N_a = PQ$ 个脉冲的积累, 在此时间内的方位向信号可表示为

$$r(u) = \text{rect}\left[\frac{u - N_a T/2}{N_a T}\right] \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} f_D u\right] \quad (6)$$

从图 2(a)MIMO 雷达成像过程可以看出, 无论最终的数据 $y(n)$ 是否均匀, 由于虚拟阵元的等间隔分布, 各快拍都是均匀采样, 采样的重复周期为 PT 。将 $y(n)$ 按快拍分解为 P 个序列:

$$y(n) = \sum_{p=1}^P y_p(n) \quad (7)$$

其中

$$y_p(n) = \sum_{q=1}^Q y(n) \delta[n - (q-1)P - (p-1)], \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (8)$$

这些序列相当于各快拍比照 $y(n)$, 在无数据位置补零后得到。

对 $y_p(n)$ 进行离散时间傅里叶变换

$$Y_p(\omega) = \frac{1}{PT} \sum_{k=-\infty}^{\infty} R\left[\omega - k \frac{2\pi}{T_{ss}}\right] \exp\left[j\left(\omega - k \frac{2\pi}{T_{ss}}\right) u_p\right] \cdot \exp[-j\omega(p-1)T] \quad (9)$$

式中 $Y_p(\omega)$ 和 $R(\omega)$ 分别是 $y_p(n)$ 和 $r(u)$ 的离散时间傅里叶变换。

$$u_p = (p-1)T_{\text{MIMO}} \quad (10)$$

是第 p 个快拍采样的起始时刻, $T_{\text{MIMO}} = 1/\text{PRF}_{\text{MIMO}}$ 是 MIMO 雷达实际脉冲重复周期, T_{ss} 表

示每个快拍采样慢时间间隔。定义失配率

$$\alpha = \frac{T - T_{\text{MIMO}}}{T} \quad (11)$$

式(10)可改写为

$$u_p = (1-\alpha)(p-1)T \quad (12)$$

将 $T_{ss} = PT$ 及式(12)代入式(9), 得到

$$Y_p(\omega) = \frac{1}{PT} \sum_{k=-\infty}^{\infty} R\left[\omega - k \frac{2\pi}{PT}\right] \cdot \exp\left[j\left(\omega - k \frac{2\pi}{PT}\right)(p-1)\alpha T\right] \cdot \exp\left[-jk(p-1)\frac{2\pi}{P}\right] \quad (13)$$

根据傅里叶变换的性质, 由式(7)可以得到 $y(n)$ 的离散时间傅里叶变换

$$Y(\omega) = \sum_{p=1}^P Y_p(\omega) = \frac{1}{PT} \sum_{p=1}^P \sum_{k=-\infty}^{\infty} R\left[\omega - k \frac{2\pi}{PT}\right] \cdot \exp\left[j\left(\omega - k \frac{2\pi}{PT}\right)(p-1)\alpha T\right] \cdot \exp\left[-jk(p-1)\frac{2\pi}{P}\right] \quad (14)$$

对式(6)左右两边进行离散时间傅里叶变换, 得到

$$R(\omega) = \left[N_a T \cdot \text{sinc}\left(\frac{N_a T \omega}{2\pi}\right) \exp\left[-j \frac{\omega N_a T}{2}\right] \right] \otimes \delta(\omega - \omega_D) = N_a T \cdot \text{sinc}\left[\frac{N_a T(\omega - \omega_D)}{2\pi}\right] \cdot \exp\left[-j \frac{N_a T(\omega - \omega_D)}{2}\right] \quad (15)$$

其中 \otimes 表示卷积, $\omega_D = 2\pi f_D$ 是目标多普勒频率的角频率形式。将式(15)代入式(14), 得

$$Y(\omega) = Q \cdot \sum_{p=1}^P \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left[\frac{N_a T}{2\pi}\left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{PT}\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{N_a T}{2}\left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{PT}\right)\right] \cdot \exp\left[j\left(\omega - k \frac{2\pi}{PT}\right)(p-1)\alpha T\right] \cdot \exp\left[-jk(p-1)\frac{2\pi}{P}\right] \quad (16)$$

该式就是将 $y(n)$ 作为均匀采样数据进行方位向压缩成像后得到的结果。

4 方位向成像结果分析

下面将对不同失配率情况下方位向成像结果进行分析。

4.1 $\alpha = 0$ 时的成像结果

当 MIMO 雷达参数满足式(1)条件时, $\alpha = 0$, 代入式(16)可以得到

$$Y(\omega) = Q \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left[\frac{N_a T}{2\pi} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{PT} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{N_a T}{2} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{PT} \right) \right] \cdot \sum_{p=1}^P \exp \left[-jk(p-1) \frac{2\pi}{P} \right] \quad (17)$$

式中第2个求和部分：

$$\sum_{p=1}^P \exp \left[-jk(p-1) \frac{2\pi}{P} \right] = \frac{1 - \exp(-j2k\pi)}{1 - \exp(-j2k\pi/P)} = \begin{cases} P, & k = 0, P, 2P, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)，得

$$Y(\omega) = N_a \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left[\frac{N_a T}{2\pi} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{T} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{N_a T}{2} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{T} \right) \right] \quad (19)$$

对式(19)稍作整理代换，可以得到

$$Y(\omega) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} N_a T \text{sinc} \left[\frac{N_a T}{2\pi} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{T} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{N_a T}{2} \left(\omega - \omega_D - k \frac{2\pi}{T} \right) \right] = \frac{1}{T} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} R \left(\omega - k \frac{2\pi}{T} \right) \quad (20)$$

式(20)中 $Y(\omega)$ 是 $R(\omega)$ 乘以幅度因子 $1/T$ 后，以 $2\pi/T$ 为周期延拓得到。说明离散序列 $y(n)$ 是对连续时间信号 $r(u)$ 的均匀采样，采样频率为PRF。只要PRF按照式(3)条件选取，则得到的数据符合采样定理，成像处理后不会引入虚像。

4.2 $\alpha \neq 0$ 时的成像结果

当MIMO雷达参数不满足式(1)条件时， $\alpha \neq 0$ 。此时式(16)中的sinc函数在

$$\omega = \omega_D + 2\pi k / PT \quad (21)$$

处取最大值。在这些点中，当且仅当 $k=0$ ，即 $\omega = \omega_D$ 时代表真实目标，其余均为虚像。令

$$G(k) = Q \cdot \sum_{p=1}^P \exp[j\omega_D \alpha (p-1)T] \cdot \exp \left[-jk(p-1) \frac{2\pi}{P} \right] = Q \cdot \exp \left[-j \frac{P-1}{2} \left(\alpha T \omega_D + k \frac{2\pi}{P} \right) \right] \cdot \frac{\sin \left[\frac{P(\alpha T \omega_D + 2\pi k / P)}{2} \right]}{\sin \left(\frac{\alpha T \omega_D + 2\pi k / P}{2} \right)} \quad (22)$$

得到

$$|G(k)| = Q \cdot \frac{\left| \sin \left[\frac{P(\alpha T \omega_D + 2\pi k / P)}{2} \right] \right|}{\left| \sin \left(\frac{\alpha T \omega_D + 2\pi k / P}{2} \right) \right|} \quad (23)$$

该式的取值反映了包括真、假目标在内的所有“目标”的幅度。

考虑到最大方位向距离决定了 B_D 的大小，因此对于 $Y(\omega)$ ，仅关心 $|\omega| \leq \pi B_D$ 的部分。该区域内虚假目标的情况与脉冲重复频率大小有关。

(1) $\text{PRF} \geq P \cdot B_D$ 在这种情况下，式(21)右边当且仅当 $k=0$ 时，能够使得 $|\omega| \leq \pi B_D$ ，也就是说所有可能的虚像均位于 $[-\pi B, \pi B]$ 范围之外，对于成像处理得到的方位像几乎没有影响。

(2) $B_D \leq \text{PRF} < P \cdot B_D$ 此时虚假目标数量

$$N_{\text{false}} = \left\lfloor \frac{\omega_D + \pi B_D}{2\pi/PT} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{\pi B_D - \omega_D}{2\pi/PT} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{P}{\xi} \left(\frac{f_D}{B_D} + \frac{1}{2} \right) \right\rfloor + \left\lfloor \frac{P}{\xi} \left(\frac{1}{2} - \frac{f_D}{B_D} \right) \right\rfloor \quad (24)$$

式中 $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 下取整。PRF $\geq P \cdot B_D$ 时，根据式(4)可知 $\xi \geq P$ ，代入式(24)得到 $N_{\text{false}} = 0$ ，可见式(24)同样适用于PRF $\geq P \cdot B_D$ 情况下虚假目标数量的计算。定义集合

$$K = \left\{ k \left\lfloor \frac{(\omega_D + \pi B_D) PT}{2\pi} \right\rfloor \leq k \leq N_f - \left\lfloor \frac{(\omega_D + \pi B_D) PT}{2\pi} \right\rfloor, \text{且 } k \neq 0, k \in \mathbf{Z} \right\} \quad (25)$$

假目标位置为

$$\omega_{\text{false}} = \omega_D + 2\pi k / PT, \quad k \in K \quad (26)$$

目标与最大假目标幅度比

$$\gamma = \frac{|G(0)|}{\max_k [|G(k)|]} = \frac{\left| \sin \left[\frac{P(\alpha T \omega_D)}{2} \right] \right|}{\left| \sin \left(\frac{\alpha T \omega_D}{2} \right) \right|} \cdot \max_k \left\{ \frac{\left| \sin \left(\frac{\alpha T \omega_D + 2\pi k / P}{2} \right) \right|}{\left| \sin \left[\frac{P(\alpha T \omega_D + 2\pi k / P)}{2} \right] \right|} \right\}, \quad k \in K \quad (27)$$

除了引入虚假目标，失配造成的另一个影响是降低目标处的峰值幅度，目标幅度衰减率为

$$\eta = \left[1 - \frac{\left| \sin \left(\frac{\alpha PT \omega_D}{2} \right) \right|}{P \left| \sin \left(\frac{\alpha T \omega_D}{2} \right) \right|} \right] \times 100\% \quad (28)$$

图 3 中绘制了 $PRF=B_D=200\text{ Hz}$, $P=10$ 条件下, 对于不同 α 值, 目标幅度衰减率随目标多普勒变化的曲线。可以看出, 衰减率与失配率成正相关, 失配率越大, 衰减越严重。另一方面, 虽然部分曲线不具有单调性, 但是总的趋势是幅度衰减率随着目标多普勒的增大而增大。非单调是因为目标幅度表达式是类似于 sinc 的函数, 因此其随着多普勒增大, 按照类似 sinc 函数的形式震荡衰减。采用 ISAR 技术成像时, 目标方位向距离与多普勒成正比关系, 图 3 曲线说明目标离参考中心越远, 受 MIMO 雷达参数失配的影响越大。

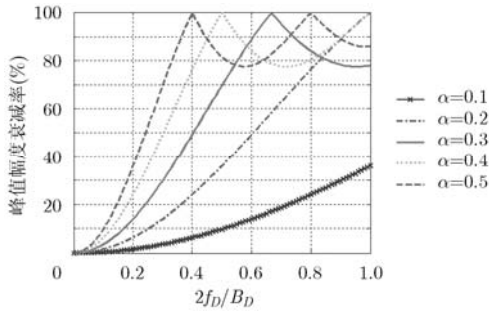


图3 目标峰值幅度衰减率变化曲线

4.3 $\alpha \neq 0$ 时, 特殊位置目标成像结果

(1) 目标位于参考点 目标位于参考点时, 其多普勒频率为 0, 将 $\omega_D=0$ 代入式(23)得

$$|G(k)| = \begin{cases} Q, & k=0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

即所有可能出现虚假目标位置上幅度均为 0。再令式(28)中 $\omega_D=0$, 得到 $\eta=0$ 。这两方面分析说明参数失配对参考点处目标没有影响。从直观上也容易理解, 频率为 0 的直流信号, 因为幅度、相位恒定, 所以无论以何种间隔进行采样, 得到的数据都具有相同的值, 不影响其频谱分析。

(2) 幅度衰减率 100% 的点 在图 3 中可以看到, 部分频点的幅度衰减率达到 100%。根据式(23)可知, 如果存在不为 0 的整数 l , 使得

$$|\omega_D| = \left| \frac{2\pi l \cdot PRF}{\alpha P} \right| \leq \frac{B_D}{2}, \quad l \in \mathbf{Z} \text{ 且 } l \neq 0 \quad (30)$$

则这些位置的目标因为参数失配的影响, 幅度衰减为 0。根据式(30)中不等式关系, 可以得到集合

$$L = \left\{ l \mid 0 < |l| \leq \frac{P|\alpha|}{2\xi}, \text{ 且 } l \in \mathbf{Z} \right\} \quad (31)$$

当 L 不是空集时, 因失配消失的目标位置为

$$\omega_D = l \cdot \frac{2\pi}{\alpha PT}, \quad l \in L \quad (32)$$

此时

$$\begin{aligned} |G(k)| &= Q \cdot \left| \frac{\sin \left[\frac{P(\alpha T \cdot l 2\pi PRF / \alpha P + 2\pi k / P)}{2} \right]}{\sin \left(\frac{\alpha T \cdot l 2\pi PRF / \alpha P + 2\pi k / P}{2} \right)} \right| \\ &= Q \cdot \left| \frac{\sin[\pi(l+k)]}{\sin(\pi(l+k)/P)} \right| \end{aligned} \quad (33)$$

可以得到

$$|G(k)| = \begin{cases} Q, & k = -l \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (34)$$

对于目标 $\omega_D = 2\pi l_1 / \alpha PT$, 若 $k = -l_1 \in K$, 则唯一的假目标位置为

$$\omega_{\text{false}} = \omega_D - \frac{2\pi l_1}{PT} \quad (35)$$

否则得到的方位像中该目标消失, 也不引入虚假目标。

表 1 总结了空时不等效, 即 $\alpha \neq 0$ 时, 不同目标的方位像特性。

表 1 $\alpha \neq 0$ 时, 不同目标成像结果

	位于参考中心的 目标	消失的目标	一般位置 的目标
满足条件	$\omega_D = 0$	式(32)	除前两种特殊位置之外的 目标
假目标个数	无	1 或 0	式(24)
假目标位置	无	式(35)或无	式(26)
目标与最大假目标 幅度比值	无	0 或无	式(27)
目标幅度衰减率	无	100%	式(28)

5 仿真实验

实验 1 仿真采用发射阵元数 $M=2$, 接收阵元数 $N=5$ 的 MIMO 雷达进行成像。收发阵列按照图 1 方法进行布置, 形成虚拟均匀线阵, 阵元数 $Q=MN=10$, 间距 $d=5\text{ m}$ 。目标距离 $R_0=10000\text{ m}$, 平行于阵列运动, 速度 $v=250\text{ m/s}$, 目标回波的多普勒带宽 $B_D=400\text{ Hz}$ 。发射信号选用伪随机相位编码脉冲信号, 载频 $f_c=30\text{ GHz}$, 脉冲宽度 $6.82\text{ }\mu\text{s}$, 码长 1023, 子脉冲宽度 6.67 ns 。积累脉冲数 $P=10$, 理想脉冲重复频率 $PRF=500\text{ Hz}$, 过采样率 $\xi=1.25$ 。目标由 A, B, C, D 4 个散射点组成, 它们相对于参考中心的坐标为 $(-40, 25), (0, 10), (-25, -10), (-16, 30)$ 。 x 轴方向为方位向, y 轴方向为距离向。各点的多普勒频率 $f_D=2vx/\lambda R_0$, 其中 x 为横坐标。图 4 是参数匹配情况下的成像结果。当失配率 $\alpha=0.25$ 时, 得到的图像如图 5 所示, 图 6, 图 7, 图 8, 图 9 分别是点 A, B, C, D

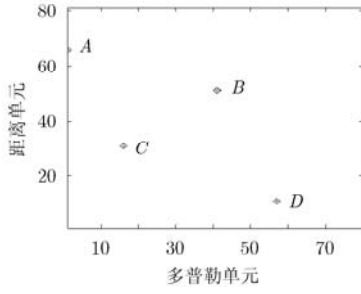


图4 参数匹配情况下成像结果

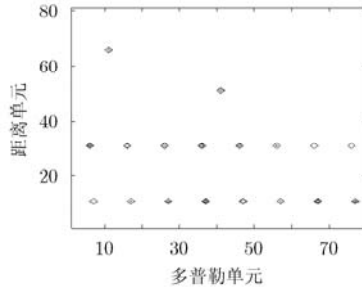


图5 失配率 $\alpha = 0.25$ 情况下的成像结果

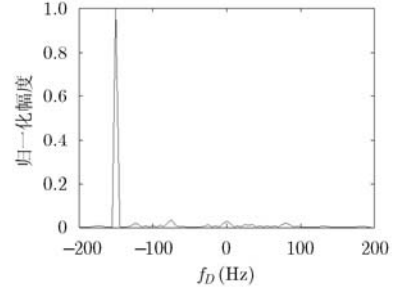


图6 沿目标A所在距离单元方向切片

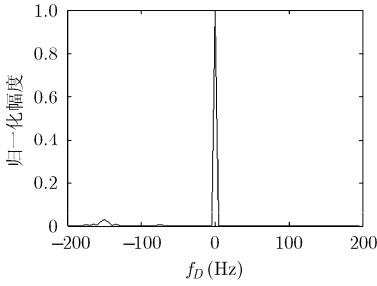


图7 沿目标B所在距离单元方向切片

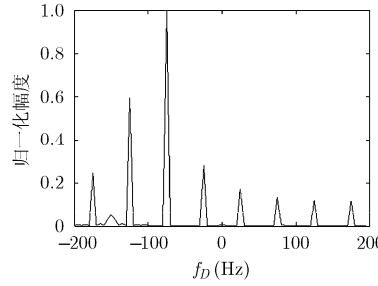


图8 沿目标C所在距离单元方向切片

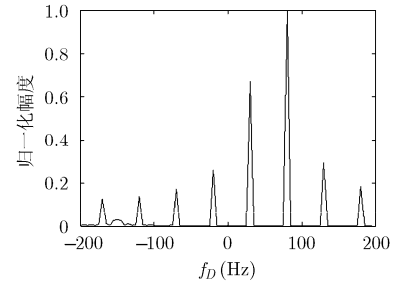


图9 沿目标D所在距离单元方向切片

所在距离门的方位向切片。

点 A 的多普勒频率为-200 Hz，满足式(31)和式(32)的条件，因此幅度衰减率达到 100%，目标完全消失。由式(35)算出唯一虚假目标位于-150 Hz 处，与图 6 仿真结果完全一致。

点 B 方位向距离为 0，其多普勒频率也为 0。图 7 仿真正如 4.3 节分析的结果，参数失配对位于参考点的目标没有影响。

点 C 的多普勒频率为-125 Hz，式(24)表明它的假峰个数是 7，进一步通过式(25)和式(26)得到它们的位置分别为-175 Hz, -75 Hz, -25 Hz, 25 Hz, 75 Hz, 125 Hz, 175 Hz，由式(27)算得目标与最大假目标幅度的比值为 0.6025，这些均在图 8 中得到了验证。

算得点 D 的多普勒频率为 80 Hz，用式(24)可以得到它的假峰个数是 7，根据式(25)和式(26)可知这些假目标的位置分别为-170 Hz, -120 Hz, -70 Hz, -20 Hz, 30 Hz, 130 Hz, 180 Hz，与图 9 仿真结果相符。式(27)计算得到目标与最大假目标幅度比是 1.4951，这也在图 9 中得到了印证。

实验 2 实验 2 中系统和信号参数与实验 1 相同，仅在仿真图 10(b)时，将积累脉冲数 P 改为 20，此时理想脉冲重复频率 $PRF = 1000$ Hz，过采样率 $\xi = 2.5$ 。图 10(a)和图 10(b)两幅图中绘制了失配率 α 分别为-0.3, -0.15, 0.2, 0.4 四种情况下，通过式(25)和式(27)计算得到的目标与最大假目标幅度比，以及仿真得到的结果。公式计算结果在图中标为“理论”，仿真结果记为“仿真”。可以看出仿真结果与

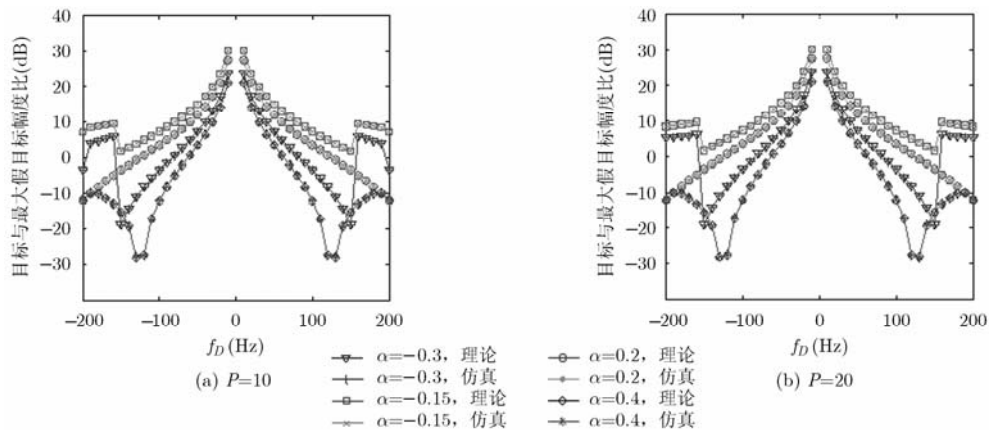


图 10 目标与最大假目标幅度比值随目标多普勒频率变化曲线

公式计算的理论值基本吻合。图中的幅度值比与 α 的绝对值有关, $|\alpha|$ 越大, 比值越小。因为 $|\alpha|$ 表征了参数的匹配情况, 失配越严重, 造成的虚假目标越明显。同时可以看到, 失配对于不同多普勒频率的目标影响不同, 总体而言, 频率越高的目标受失配影响越严重, 即目标方位向距离越远, 对于空时不等效越敏感。

6 结论

MIMO 雷达采用 ISAR 技术成像, 能够有效缩短成像所需积累时间, 但是参数之间需相互匹配, 满足一定的关系, 否则会造成空时不等效现象。若将失配条件下得到的回波数据不加校正直接成像, 会导致图像出现虚假目标。本文详细研究了失配对成像结果的影响, 推导得到产生的虚假目标的数量、位置及真假目标幅度之间关系的数学表达式。并对目标上一些特殊点进一步讨论, 分析了它们在失配条件下图像的性质特点。这些工作对于 MIMO-ISAR 参数选择、回波数据处理以及图像处理具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 白雪茹. 空天目标适合孔径雷达成像新方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
Bai Xue-ru. Study on new techniques for ISAR imaging of aerospace targets[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2011.
- [2] 许然, 李亚超, 邢孟道. 基于子孔径参数估计的双基地 ISAR 图像融合方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 622-627.
Xu Ran, Li Ya-chao, and Xing Meng-dao. Research on image fusion based on sub-aperture parameter estimation for bistatic ISAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 622-627.
- [3] Zhu Yu-tao, Su Yi, and Yu Wen-xian. An ISAR imaging method based on MIMO technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3290-3299.
- [4] Pastina D, Bucciarelli M, and Lombardo P. Multistatic and MIMO distributed ISAR for enhanced cross-range resolution of rotating targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3300-3317.
- [5] Zhang Bing-chen, Hong Wen, and Wu Yi-rong. Sparse microwave imaging: principles and applications[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(8): 1722-1754.
- [6] Pastina D, Santi F, Bucciarelli M, et al. 2D-MIMO SAR/ISAR imaging of moving targets with reconfigurable formation of platforms[C]. Nuremberg, Germany, 2012 EUSAR 9th European Conference on, Synthetic Aperture Radar, 2012: 223-226.
- [7] Wang Dang-wei, Ma Xiao-yan, and Su Yi. Two-dimensional imaging via a narrowband MIMO radar system with two perpendicular linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(5): 1269-1279.
- [8] Zhu Yu-tao and Su Yi. A type of M^2 -transmitter N^2 -receiver MIMO radar array and 3D imaging theory[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2011, 54(10): 2147-2157.
- [9] Pastina D, Santi F, and Bucciarelli M. Multi-angle distributed ISAR with stepped-frequency waveforms for surveillance and recognition[C]. 2011 IEEE CIE International Conference, on Radar, Chengdu, China, Oct. 24-27, 2011, Vol. 1: 528-532.
- [10] Ma C, Yeo T S, Tan C S, et al. Three-dimensional imaging using colocated MIMO radar and ISAR technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3189-3201.
- [11] Bucciarelli M and Pastina D. Multi-grazing ISAR for side-view imaging with improved cross-range resolution[C]. 2011 IEEE, Radar Conference, Kansas City, USA, May 23-27, 2011: 939-944.
- [12] Belletini A and Pinto M A. Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(4): 780-789.
- [13] 杨予昊. 自旋目标运动成像与静止目标凝视成像方法及关键技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学技术大学, 2011.
Yang Yu-hao. Research on the spinning target moving imaging and static target staring imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Science and Technology of China, 2011.

陈刚: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为稀布阵 MIMO 雷达成像。

顾红: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为噪声雷达理论和应用等。

苏卫民: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像理论和技术等。

邵华: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为单站机载无源雷达等。