

基于稀疏分解的双基地 ISAR 一维距离成像方法

韩 宁 尚朝轩 何 强 董 健

(军械工程学院雷达工程教研室, 河北石家庄 050003)

摘 要: 双基地 ISAR 成像中, 一维距离像分辨率不仅受发射信号带宽限制, 同时还受制于成像双基地角, 最终导致双基地 ISAR 距离像分辨率远低于同等带宽的单基地 ISAR。为了解决双基地角造成的一维距离像分辨率下降问题, 在研究双基地 ISAR 目标基带回波稀疏性的基础上, 提出了利用目标基带回波信号稀疏分解系数生成一维距离像的方法。构建稀疏分解冗余基的等效延迟时间单元越短, 则距离像分辨率越高, 基于此思路, 首先构造出与半双基地角余弦成正比, 且与发射信号带宽成反比的延迟时间单元, 然后利用此延迟时间单元构建冗余基, 最后基于推广的正则化 FOCUSS 算法估计基带信号的稀疏表示, 得到分辨率不受双基地角影响的目标一维距离像。空间目标理想散射点的仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 双基地逆合成孔径雷达; 稀疏分解; 冗余基; 距离像

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)01-0054-06

Method for Bistatic ISAR One-dimensional Range Profile Based on Sparse Decomposition

HAN Ning SHANG Chao-xuan HE Qiang DONG Jian

(Radar Engineering Staff Room, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract: In bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), resolution of one-dimensional range profile is restricted not only by transmission signal bandwidth but also by imaging bistatic angle, which result in the bistatic ISAR range profile resolution far lower than monostatic ISAR with the same transmission signal bandwidth. To resolve the range profile resolution decline problem caused by imaging bistatic angle, a method for range profile creation is presented based on the analysis of sparse characteristic of target baseband echo signal. The sparse decomposition coefficients of target baseband signal in the according redundant basis are used to create the one-dimensional range profile. If the equivalent time-delay cell used for the construction of sparse decomposition redundant basis is shorter, the range profile resolution is higher. Base on this idea, the time-delay cell proportional to half bistatic angle cosine and inverse proportional to transmission signal bandwidth is created. Then the redundant basis is constructed via this time-delay cell. And the extended generalization FOCUSS (Focal Underdetermined System Solver) algorithm is used to estimate the sparse decomposition coefficients of baseband echo signal. Finally, one-dimensional range profile immune to bistatic-angle-influence is created by the sparse coefficients. Simulation experiment of space target with ideal scatters validates the algorithm.

Key words: bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar; sparse decomposition; redundant basis; range profile

1 引言

双基地雷达是发射机和接收机分离很远的雷达系统^[1],也是雷达的最早期形式。双基地逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar ISAR)是双基地雷达

的一种特殊形式,目前对其研究仅停留在实验样机阶段,尚未见实用系统^[2]。昆士兰大学的 J. Palmer 系统研究了伪多基地 ISAR(Emulated Multistatic ISAR)成像技术^[3,4],并进行实验验证,得到了一定分辨率的二维图像。挪威防御技术研究院研究的“搭乘雷达系

统”得到了较清晰的民航客机双基地 ISAR 图像^[5]。国内的研究主要集中在成像原理^[6-9]以及各种补偿算法上^[10-12]。

以上文献在对双基地 ISAR 成像原理及回波模型进行仔细研究的基础上,利用基于 FFT 的匹配滤波法获得目标的一维距离像。与单基地 ISAR 相比,双基地 ISAR 成像中,距离像分辨率不仅受限于发射信号带宽^[13],而且还受双基地角的影响^[1],成像双基地角越大,距离像分辨率越差,最终导致双基 ISAR 距离像分辨率远低于同等带宽的单基地雷达。双基地角是双基地 ISAR 成像模型中固有存在的物理量,其造成的距离像分辨率下降问题,无法通过硬件上的改动得以解决,只能从信号处理的角度出发,研究相应算法抑制乃至消除其影响。

近几年来,随着稀疏分解理论的逐步完善,其在雷达信号处理领域的优势逐渐体现出来。稀疏分解的主要目的是从一个过完备的矢量集(或函数集)中选择尽量少的元素来表示已知信号^[14]。当构造出与信号特征相适应的冗余基后,稀疏分解能挖掘出信号内部的精细结构,提高变换域的分辨能力。文献^[15]从数学理论推导的角度对稀疏分解进行研究,并将其研究成果应用于单基地 ISAR 成像中。本文在分析双基地 ISAR 回波稀疏性的基础上,研究了基于稀疏分解的双基地 ISAR 一维距离成像算法。

2 双基地 ISAR 回波稀疏性分析

运动目标双基地 ISAR 成像的几何关系如图 1 所示。

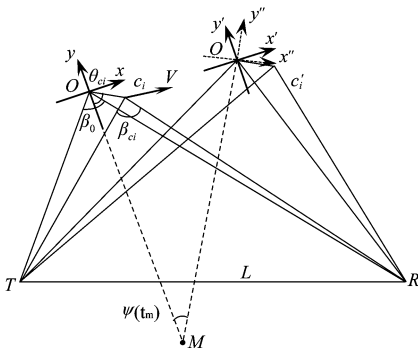


图 1 双基地 ISAR 成像几何关系

Fig.1 Bistatic ISAR geometry

其中, T 为发射站, R 为接收站; y 轴是开始观测时目标的双基地角平分线方向,也是双基地距离向; β_0 是目标双基地角, β_{ci} 是目标上散射点 c_i 的双基地角,近似认为 $\beta_0 \approx \beta_{ci}$; 点 O 是相位中心; θ_{ci} 是散射点 c_i 的位

置矢量 Oc_i 与 y 轴负方向的夹角; V 为目标运动速度; $\psi(t_m)$ 是成像期间目标双基地角平分线的转动角度。

文献^[11]分析得出,无论目标运动轨迹与双基地基线是否共面,成像过程中散射点的距离变换均具有以下形式:

$$R_{ci}(t_m) = R_{ref}(t_m) + R_{roti}(t_m) \\ = R_{ref}(t_m) - 2r_i \cos[\theta_{ci} + \psi(t_m)] \cos\left[\frac{\beta(t_m)}{2}\right] \quad (1)$$

其中, $t_m = mT$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 是慢时间; $\beta(t_m)$ 是成像期间随慢时间变化的目标双基地角; $R_{ci}(t_m) = R_{ref}(t_m) + R_{roti}(t_m)$ 是成像过程中目标相位中心到收发双站的距离历程,包含目标运动的平动分量 $R_{ref}(t_m)$ 和转动分量 $R_{roti}(t_m)$ 。从式(1)可以看出,双基地 ISAR 成像中,目标散射点的距离变化依然包括平动分量 $R_{ref}(t_m)$ 和转动分量 $R_{roti}(t_m)$,因此,双基地 ISAR 具有与单基地 ISAR 类似的成像原理,同样可以经过距离压缩,包络对齐,相位校正,方位压缩等几步,完成对目标的图像重建^[11]。假设雷达以重复周期 T 发射 LFM 信号且假定双基地雷达理想同步,则经中频采样且下变频后,散射点 c_i 的回波可表示为

$$s_{ci}(\hat{t}, t_m) = \sigma_{ci} \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_{ci}(t_m)/c}{T_p}\right) \times \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R_{ci}(t_m)}{c}\right] \\ \exp\left[j\pi\mu\left(\hat{t} - \frac{R_{ci}(t_m)}{c}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中, \hat{t} 是快时间; t_m 是慢时间; f_0 是载频; μ 是调频斜率; T_p 是脉冲宽度。其中, σ_{ci} 为第 i 个距离单元内

散射点 c_i 的非后向散射强度。若令 $s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi\mu\hat{t}^2)$, 则式(2)所示散射点 c_i 的回波可表示为

$$s_{ci}(\hat{t}, t_m) = \lambda_{ci} s_0\left(t - \frac{R_{ci}(t_m)}{c}\right) \quad (3)$$

其中,

$$\lambda_{ci} = \sigma_{ci} \exp\left[-j2\pi f_0 \frac{R_{ci}(t_m)}{c}\right] \quad (4)$$

假设目标纵向成像区域共有 K 个散射点,每个散射点对应一个距离单元,则经中频采样且下变频后,目标回波可表示为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^K \lambda_{ci} s_0\left(t - \frac{R_{ci}(t_m)}{c}\right) \quad (5)$$

为后文叙述方便,将式(5)所示目标回波简称为目标基带回波。此时,令 $\Phi = [s_0(t), s_0(t-t_0), s_0(t-2t_0), s_0(t-3t_0) \dots]$, 其中 t_0 是根据系统分辨率要求而设定的等效延迟时间单元。分析式(5)可以看出,只需使 t_0 足够小,则目标任一散射点的延迟时间 $R_{ci}(t_m)/c$ 都可近似表示为 t_0 的整数倍,此时,令基 Φ 张成的空间为 Ω , 即 $\Omega = L[s_0(t), s_0(t-t_0), s_0(t-2t_0), s_0(t-3t_0) \dots]$, 则目标基带回波完全可用空间 Ω 中的某些点来表示。成像过程中,目标仅占成像区域中很小一部分面积,只需用 Φ 中很少一部分向量即可表示出回波信号,即 $s_r(\hat{t}, t_m)$ 在空间 Ω 上具有稀疏表示性。

3 基于稀疏分解的一维距离成像

3.1 一维成像方法

双基地雷达的距离分辨率是电磁波散射方向上时延分辨力在双基地雷达距离向上的反投影,投影角度是双基地角的一半^[16]。若双基地雷达发射信号带宽为 B_w , 成像期间目标双基地角不变,则经中频采样且下变频后,基于 FFT 匹配滤波脉冲压缩法得到的一维距离像分辨率如式(6)所示^[16]

$$\rho_{rc} = \frac{c}{2B_w \cos(\beta/2)} \quad (6)$$

由上一小节的分析可知,某散射点对应的基带回波稀疏表示系数 λ_{ci} 中,已包含该散射点的非后向散射强度信息,因此,若能利用目标的基带回波直接估计一维距离像,从而避免基于 FFT 的匹配滤波脉冲压缩法,则一维距离像的分辨率完全可以突破式(6)所示的瑞利限,不再受双基地角的限制。假设生成空间 Ω 的等效延迟时间单元为 t_0 , 且存在某种算法,可将回波延迟时间相差为 t_0 的两散射点正确区分,此时,根据双基地雷达的距离分辨率是电磁波散射方向上时延分辨力在双基地雷达距离向上的反投影这一结论可得,目标一维距离像的分辨率如下式所示

$$\rho_{rc} = \frac{ct_0}{2\cos(\beta/2)} \quad (7)$$

若目标按式(7)共可划分为 L 个距离单元,则目标基带回波可改写为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^L \lambda_{ci} s_0(t - it_0) \quad (8)$$

从上式可以看出,各距离单元散射点回波在基 Φ 中的表示系数是一个常数,该常数包含了该距离单元散射点的非后向散射强度信息,只需对各距离单元散射点的稀疏表示系数取模,即可得到不同距离单元散射点间的相对散射强度分布,即实一维距离像。若

式(8)所示基带回波在空间 Ω 上的稀疏表示系数为 $\hat{\lambda} = [\lambda_{c1} \lambda_{c2} \dots \lambda_{cL}]_{1 \times L}$, 则可将式(8)改写成矩阵形式 $s_r(t) = \Phi \hat{\lambda}$ 。根据稀疏分解理论,由回波信号 s_r 估计稀疏系数 λ 的问题可描述为

$$\hat{\lambda} = \arg \min_{\lambda} \|\lambda\|_0 \quad s.t. \quad s_r(t) = \Phi \lambda \quad (9)$$

其中, $\|\lambda\|_0 = \text{Card}\{i: |\lambda_{ci}| \neq 0\}$, $\text{Card}(\cdot)$ 表示集合的势。式(9)的求解是一个 NP 难题。一般情况下,采用某种稀疏性度量函数 $d(\cdot)$ 来逼近 $\|\cdot\|_0$, 从而获得稀疏解。稀疏性度量函数应该对 $\|\cdot\|_0$ 具有凹逼近性能^[17], 文献[17]证明了函数 $f(\lambda) = \sum \ln|\lambda_{ci}| (|\lambda_{ci}| \neq 0)$ 凹逼近 $\|\cdot\|_0$ 的性能,且其运算相对简单,故本文选取该函数作为稀疏性度量函数。结合双基地 ISAR 的成像特性,给出基于稀疏分解的双基地 ISAR 一维成像步骤如下。

Step1: 根据系统对一维距离像分辨率的需求,根据式(6)设定等效延迟时间单元 t_0 。

Step2: 构造冗余基 Φ , 令 $\Phi = [s_0(t), s_0(t-t_0), s_0(t-2t_0), s_0(t-3t_0) \dots s_0(t-nt_0)]$ 其中, N 由目标尺寸的先验信息决定。

Step3: 使用 $f(\lambda) = \sum \ln|\lambda_{ci}| (|\lambda_{ci}| \neq 0)$ 作为稀疏性度量函数,利用推广的正规化 FOCUSS 算法求解式(9),得到目标回波信号的稀疏表示 $\hat{\lambda}$ 。

Step4: 对基带信号的稀疏表示 $\hat{\lambda}$ 取模,根据非零分量对应的时延信息,构建目标的一维距离像。

以上分析是基于各距离单元内只存在一个散射点的假设,实际成像过程中,横向尺寸不同但纵向延迟时间相同的散射点回波叠加在一起,但本文仅研究实一维距离像,因此,若同一距离单元内存在多个不同横向尺寸的散射点,可等效地认为该距离单元只存在一个强散射点,算法依然适用。

3.2 算法抑制双基地角影响距离分辨率的机理

针对中频直接采样线性调频体制雷达,假设信号发射带宽为 B_w , 若利用基于 FFT 的匹配滤波脉冲压缩法,同等带宽的单基 ISAR 可获得 $\rho_r = c/2B_w$ 所示的距离分辨率,与式(7)比较可以看出,如果让延迟时间单元 t_0 与半双基地角的余弦成正比,而与信号带宽成反比,即 $t_0 = \cos(\beta/2)/B_w$, 则 $\rho_{rc} = \rho_r$, 式(7)所示双基地 ISAR 距离分辨率不再受双基地角的限制,分辨率可达到同等带宽单基地 ISAR 的分辨率水平。从式(7)还可看出,当双基地角固定时,基于稀疏分解的双基地 ISAR 距离分辨率完全决定于 t_0 , 构建基 Φ 时,若使得 $t_0 < \cos(\beta/2)/B_w$, 即可生成分辨率高于同等带宽单基地

ISAR 的一维距离像。理论上,只需减小 t_0 ,一维距离像分辨率可达任意高。实际应用时,在利用推广 FOCUSS 算法求解式(9)的过程中,需进行多步迭代搜索以寻找最优解。迭代过程的运算量正比于 $O((PL)^3)^{[15]}$,其中, P 为散射点数目。当分辨率提高 2 倍时,运算量几乎增大 8 倍,且当目标散射点数目比较多时,运算量更是难以承受。因此,一般选取 $t_0 = 1/f_s$ 。此时,式(7)所代表的双基地 ISAR 分辨率改写为

$$\rho_{rc} = \frac{c}{2\cos(\beta/2)f_s} \quad (10)$$

其中, f_s 为系统的中频采样率。若 $f_s = \sec(\beta/2)B_w$,则 $\rho_{rc} = \rho_r = c/2B_w$,分辨率不再受双基地角的限制,更进一步,若 $f_s > \sec(\beta/2)B_w$,则 $\rho_{rc} < \rho_r$,即双基地 ISAR 距离像分辨率可完全高于同等带宽的单基地 ISAR 一维距离像。若双基地 ISAR 的系统采样率无法满足距离分辨率要求,可通过插值等变采样方法提高原始数据的采样率,然后利用同样的方法即可得到分辨率不受双基地角限制的一维距离像。

双基条件下,回波信号受时间同步和相位同步误差的影响,初相会发生紊乱,造成回波信号的去相干。与式(2)相比,此时的复基带回波多出一个干扰相位项 $\exp(j\phi)$,若利用本文研究方法进行冗余基的构建,回波信号依然具有稀疏性,依然可用推广的正则化 FOCUSS 算法进行稀疏分解,只是稀疏分解系数变为式(11)所示形式

$$\lambda_{ic} = \lambda_i \exp(j\phi) \quad (11)$$

其中, λ_{ic} 代表存在时间及相位同步误差时的稀疏分解系数; λ_i 代表无误差时的稀疏分解系数。由式(11)可以看出,当存在时间及相位同步误差时,稀疏分解的系数增加了相位干扰项 $\exp(j\phi)$,但该项并不影响实一维距离像的建立,且该部分误差可在二维 ISAR 成像中的相位校正这一步去除,故不会对二维 ISAR 像造成影响。空间目标可视为合作目标,其轨道信息可在精密测控的基础上通过预估得到,因此双基地 ISAR 的空间同步要求容易满足。

下文为论证方便,仿真时假设双基地雷达满足时间、空间及相位的三大同步要求。

4 仿真实验验证

本文主要针对空间目标的双基地 ISAR 成像进行研究,因此,下文基于空间目标成像的假设对算法进行仿真验证。为了避免信号带宽及双基地角以外的因素影响距离分辨率,同时方便计算,假设双基地雷达满足空间、时间和相位的三大同步要求,且在单次一维距离

像成像期间双基地角保持不变。设雷达发射线性调频信号,脉冲宽度为 $50\mu\text{s}$;信号带宽为 200MHz ;采样频率为 600MHz ;基线长度为 650Km 。

基于以上雷达参数,对于同等带宽的单基地 ISAR,因其距离像分辨率不受双基地角的影响,依据 $\rho_r = c/2B_w$ 可计算得到,距离像分辨率为 0.75m 。假设双基地角为 120° ,由于双基地角的限制,基于 FFT 匹配滤波法的双基地 ISAR 一维距离像分辨率为 $1.5\text{m} > 0.75\text{m}$,分辨率小于同等带宽的单基地 ISAR。此时若令 $t_0 = 1/f_s$,依据式(10),基于稀疏分解的双基地 ISAR 距离像分辨率为 $0.5\text{m} < 0.75\text{m}$,分辨率不再受双基地角的限制且高于同等带宽的单基地 ISAR。若对数据进行两倍插值提高系统采样率,则双基地 ISAR 的距离像分辨率可达 0.25m ,分辨率相对插值前提高了两倍。仿真时,为了避免方位向运动对距离像分辨率的影响,假定目标的运动场景如图 2 所示。

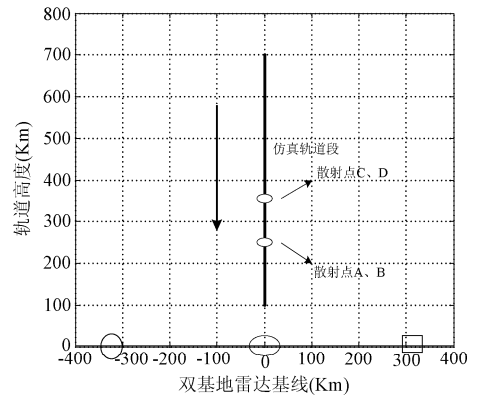


图 2 目标运动场景

Fig. 2 Target simulation geometry

仿真结果如图 3-图 5 所示。为了突出显示散射点间的相对距离分辨率,只给出包含各散射点的部分一维距离像。图 3 是受双基地角限制的双基地 ISAR 一维距离像;图 4 是 $t_0 = 1/f_s$ 时,基于稀疏分解的双基 ISAR 一维距离像;图 5 是对采样数据两倍插值变采样后的双基 ISAR 一维距离像。

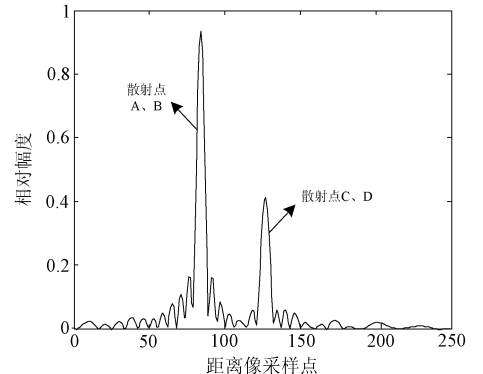


图 3 受双基地角限制的距离像

Fig. 3 Range profile constricted by bistatic angle

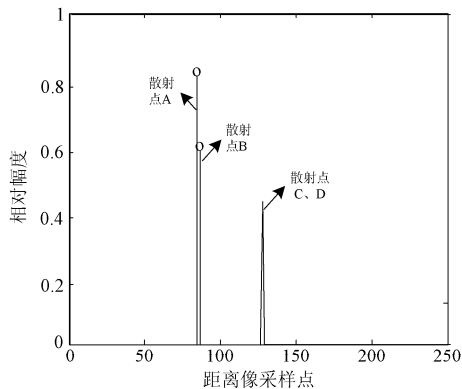


图4 稀疏分解生成的距离像

Fig. 4 Range profile based on sparse decomposition

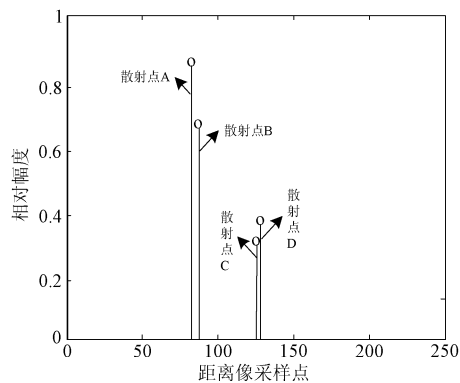


图5 两倍变采样后的距离像

Fig. 5 Range profile with sampling frequency doubled

如图3所示,因受双基地角的限制,一维像分辨率只有1.5m,无法将任意一组散射点正确区分;图4中,基于稀疏分解的一维距离像可将散射点A、B正确区分,且没有距离像旁瓣,分辨率达到了0.5m。分辨率不再受双基地角的限制且已高于同等带宽的单基地ISAR。但因等效延迟时间单元 t_e 受系统采样率的限制,其距离像分辨率无法达到0.25m,因此仍无法将散射点C、D正确区分。图5中,经两倍插值提高了系统采样率,用于构建冗余基的延迟时间单元 t_e 相应减少一半,距离像分辨率相对图4提高了两倍,达到0.25m,两组散射点都可正确区分,且各散射点强度与仿真参数一致。综合以上分析可以看出,利用本文所提方法,可以生成不受双基地角影响的双基地ISAR一维距离像,正确提取目标散射中心,且没有距离旁瓣。距离像分辨率只与构建冗余基的等效延迟时间单元 t_e 有关,与双基地角无关。

5 结论

稀疏分解技术能从过完备函数集中获得待分析信号的稀疏表示,挖掘出信号内部的精细结构。本文以

双基地ISAR一维成像为背景,研究了如何利用稀疏分解技术抑制双基地角对距离像分辨率影响的问题。结果表明,利用本文方法生成的双基地ISAR一维距离像,分辨率完全不受双基地角的限制,仅与等效延迟时间单元有关,其分辨率完全可高于同等带宽的单基地ISAR距离像。对于算法在低信噪比条件下的稳健性及稀疏分解针对双基地ISAR一维成像的快速迭代算法也在进一步研究之中。

参考文献

- [1] 杨振起,张永顺,骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
Yang Z Q, Zhang Y S, Luo Y J. Bistatic (Multistatic) Radar Systems[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Marco M, James P, John H, Brad L, Dennis L. On Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007(3): 1125-1134.
- [3] James P, John H, Longstaff I D, Marco M, Littleton B. ISAR imaging using an emulated multistatic radar system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4):1464-1472.
- [4] James P, John H, Bijan M. Improving on the monostatic radar cross section of targets by employing sea clutter to emulate a bistatic radar [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 1:324-326.
- [5] Overrein O, Olsen K E, Sornes P K, Jose N. Geometrical and signal processing aspects using a bistatic hitchhiking radar system [C]. IEEE International Radar Conference, 2005:332-336.
- [6] 赵亦工. 双基地逆合成孔径雷达成像及信号外推方法的研究[D]. 北京:北京理工大学博士学位论文, 1989:1-4,26-38.
Zhao Y G. Study on Bistatic ISAR Imaging and Signal Extrapolation[D]. Beijing: Doctorial Dissertation of Beijing Institute of Technology, 1998:1-4,26-38. (in Chinese)
- [7] 吴勇. 双站逆合成孔径雷达二维成像算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学硕士学位论文, 2005.
Wu Y. Study of Bistatic ISAR 2-D Imaging Algorithm [D]. Changsha: Master's Thesis of natioanl University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] 黄艺毅. 双站逆合成孔径雷达的成像算法研究[D]. 上海:上海交通大学硕士学位论文, 2008.
Huang Y Y. Research on Principles of Bistatic Inverse

- Synthetic Aperture Radar Imaging[D]. Shanghai: Master Thesis of Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [9] 高昭昭. 高分辨 ISAR 成像新技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学博士学位论文, 2009.
Gao Z Z. New Technologies of High Resolution ISAR Imaging[D]. Xian: Doctorial Dissertation of Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [10] 张亚标,朱振波,汤子跃,苑秉成. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6):969-972.
Zhang Y B, Zhu Z B, Tang Z Y, Fan B C. Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Image FORMation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6):969-972. (in Chinese)
- [11] 董健,尚朝轩,高梅国,傅雄军. 空间目标双基地 ISAR 成像的速度补偿研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010(1):78-85.
Dong J, Shang C X, Gao M G, Fu X J. Research on Bistatic ISAR Speed Compensation of Space Target [J]. Journal of CAEIT, 2010(1):78-85. (in Chinese)
- [12] 董健,尚朝轩,高梅国,傅雄军. 双基地 ISAR 成像平面研究及回波模型修正[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8):1855-1862.
Dong J, Shang C X, Gao M G, Fu X J. The Image Plane Analysis an Echo Model Amendment of Bistatic ISAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8):1855-1862. (in Chinese)
- [13] Chen V C, Rosiers A, Ron L. Bi-static ISAR range-doppler imaging and resolution analysis[C]. IEEE Radar Conference, 2009:1-5.
- [14] Fadili M J, Starck J L, Bobin J, Yassir M. Image Decomposition and Separation Using Sparse Representations: An Overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6):983-994.
- [15] 杜小勇. 稀疏成份分析及在雷达成像处理中的应用[D]. 长沙:国防科学技术大学博士学位论文, 2005.
Du X Y. Sparse component analysis and its applications in radar imaging processing [D]. Changsha: Doctorial Dissertation of National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [16] 董健. 空间目标双基地 ISAR 成像关键技术研究[D]. 石家庄:军械工程学院博士学位论文, 2009.
Dong J. Research on Key Technology of Bistatic ISAR Imaging of Space Target[D]. Shijiazhuang: Doctorial Dissertation of Ordnance Engineering College, 2009. (in Chinese)
- [17] Du X Y, Hu W D, Yu W X. A criterion for the construction of regularization functions in sparse component analysis[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2005, 24(4):315-325.

作者简介



韩 宁(1985-),男,陕西城固人,现为军械工程学院导航制导与控制专业博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。E-mail:haning1103@163.com



尚朝轩(1964-),男,河南滑县人,教授,博士生导师,主要从事雷达信号处理及雷达故障诊断领域的研究工作。E-mail:sex@hotmail.com



何 强(1972-),男,河北石家庄人,副教授,硕士生导师,主要从事雷达信号处理及语音信号处理领域的研究工作。E-mail:qhe@126.com



董 健(1982-),男,福建福州人,讲师,主要从事雷达信号处理领域的研究工作。E-mail:radarvincent@sina.com