

随机介质遮蔽条件下的雷达成像方法效能比较

伊铁延^{1,2}, 陈锬山¹, 刘玉¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了综合分析受随机介质遮蔽目标雷达成像方法效能, 本文系统比较了随机介质参数(散射厚度与吸收厚度)、天线布局方式(稀疏阵列的天线阵元间距及空间分布)对合成孔径雷达SAR、时间反转TR以及时间反转-多重信号分类TR-MUSIC这3种典型方法成像效能的影响。结果表明TR-MUSIC表现最优, SAR次之, TR较弱。随着光学厚度或单次散射反照率的增大, 3种成像方法效能均发生退化, 但TR-MUSIC总体而言相对受影响最弱。散射厚度是造成成像效能退化的主要原因, 而吸收厚度的影响较为微弱。根据稀疏阵列下成像方法效能比较结果, 利用TR-MUSIC可以抑制栅瓣特性的优势, 使用特殊布局的天线可以同时降低雷达系统复杂度和减弱杂波信号, 进而改善成像结果。本研究可为提高受随机介质遮蔽目标的雷达成像质量提供理论支撑。

关键词: 雷达成像, 随机介质, 比较分析, 合成孔径雷达, 时间反转成像

引用格式: 伊铁延, 陈锬山, 刘玉. 2021. 随机介质遮蔽条件下的雷达成像方法效能比较. 遥感学报, 25(7): 1503-1516

Yi T Y, Chen K S and Liu Y. 2021. Comparison of performance of radar imaging under condition of obscured by random media. National Remote Sensing Bulletin, 25(7):1503-1516[DOI:10.11834/jrs.20219079]

1 引言

随机介质(如植被、大气湍流、生物组织、墙壁)广泛存在, 且其介电特性和几何结构时空变化明显(Ishimaru, 1991), 从而严重干扰雷达观测目标的回波信号, 影响成像效果, 因此随机介质遮蔽目标的雷达成像一直是地理、医学、军事等领域中的难点也是热点问题(Fouda等, 2014; Ishimaru, 1978)。特别是工作在高频波段(如广泛应用的毫米波)的雷达系统, 其受随机介质的影响尤为严重, 因而极大的制约其应用(Yavuz和Teixeira, 2005)。

雷达成像方法种类很多, 其中合成孔径雷达(以下简称SAR)技术自从20世纪50年代发明以来, 已经在许多领域当中得到广泛应用, 特别是在遥感与对地观测领域中得到大量研究(Cumming和Wong, 2005; Moreira等, 2013; 于龙龙等, 2013)。学者们已经提出了许多成像方法, 并对数据进一步分析以获取被观测目标的空间结构与物

理特性信息, 如InSAR(Bamler和Hartl, 1998; 王超等, 2009), PolSAR(Lee和Pottier, 2009; 凌飞龙等, 2011; van Zyl和Kim, 2011), Pol-InSAR(Cloude和Papathanassiou, 1998; 李震等, 2009)及Tomo-SAR(Reigber和Moreira, 2000; 李文梅等, 2014)。SAR技术利用目标与传感器在方位向上相对运动产生的多普勒频移来克服天线孔径的限制, 在该方向上获取高分辨率成像结果。而另一种成像方法—时间反转成像技术, 则利用场(电磁波或者声波)波动方程的对称性以及格林函数的互易性来对目标成像。尽管这一技术初始发源于声学领域, 但是近年来在电磁成像领域同样得到广泛研究(常敬明等, 2018)。时间反转成像技术可以分为许多类别, 其中, TR(也被称为DORT)技术可对不同目标实现选择性聚焦(Prada和Fink, 1994; Yavuz和Teixeira, 2008), 而时间反转-多重信号分类技术(TR-MUSIC)则大大改善了成像分辨率(Lev-Ari和Devaney, 2000; Devaney, 2005)。针对这3种方法在一些

收稿日期: 2019-03-21; 预印本: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41531175, 41590853)

第一作者简介: 伊铁延, 1991年生, 男, 博士研究生, 研究方向为微波成像理论。E-mail: yity@radi.ac.cn

通信作者简介: 陈锬山, 1959年生, 男, 研究员, 研究方向为微波遥感。E-mail: chenks@radi.ac.cn

涉及随机介质场景下的成像效能, 学者们已经开展研究, 并对成像方法加以改进其提高成像质量 (Dehmollaia 和 Sarabandi, 2008; Ishimaru 等, 2014; Yousefnia 等, 2018)。但是总体上这些研究往往局限于某一特定领域 (如穿墙雷达成像、乳腺癌检测等) 和特定成像方法。针对不同成像方法效能进行对比分析的研究仅见于 Ishimaru 等 (2012) 研究成果, 且该研究未考虑单次散射反照率 (albedo) 的影响。为此, 我们选取了 SAR、TR 和 TR-MUSIC 这 3 种成像方法, 针对不同光学厚度和单次散射反照率的随机介质, 探讨对被其遮蔽目标的成像效果, 对不同方法的成像效能进行评估, 分析影响因素; 最后基于稀疏阵列, 尝试对最优成像方法做出进一步改进。

2 理论方法

2.1 成像场景设计

为了模拟被随机介质所遮蔽目标的雷达成像场景, 本文假设一位于 X 轴上的阵列天线, 透过一随机介质层对一点目标进行成像, 如图 1 所示, 相关符号含义在表 1 中给出。为方便起见, 坐标轴以波长 λ 为单位长度。第 i 个阵元发射信号经位于 M_1 处 (X-Z 坐标系中坐标为 (0, 50)) 的点目标散射后被第 j 个阵元接收。成像区域为图 1 中蓝色虚线围成矩形, 面积 $20\lambda \times 60\lambda$ 。该矩形四顶点坐标分别为: A (-10, 20)、B (-10, 80)、C (10, 80) 和 D (10, 20)。

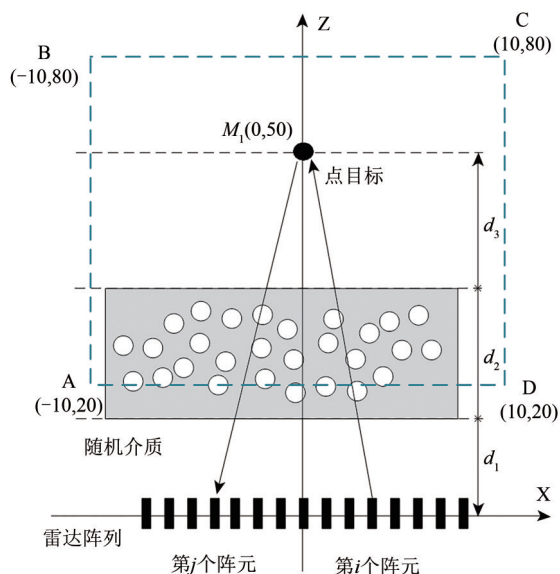


图 1 本文成像场景

Fig. 1 Imaging scene in this paper

表 1 文中涉及符号以及相应含义

Table 1 Nomenclature

符号	代表物理含义	符号	代表物理含义
M_m	第 m 个点目标	i, j	计数下标
R_n	第 n 个天线阵元	K	多站数据矩阵
d_1	阵列与随机介质下表面间距	T'	时间反转矩阵
d_2	随机介质厚度	U	发射信号频谱
d_3	随机介质上表面与点目标间距	T' 矩阵第 i 个特征值 (降序排列) 对应的特征向量	
$\tau/ST/AT$	随机介质光学厚度/散射厚度/吸收厚度	$G(M_m, R_n)$	第 m 点目标与第 n 个天线间的格林函数

2.2 自由空间中目标成像基本理论

为了分析受随机介质遮蔽目标的雷达成像效能, 需首先考虑随机介质不存在, 即 d_2 区域为自由空间的情形。另外, 为方便起见, 以下讨论均在频域上进行。

假定第 i 个阵元发射冲激信号, 第 j 个阵元接收信号形式可以表示为

$$K_{i,j} = G(M_1, R_i) \tau_1 G(R_j, M_m) \quad (1)$$

式中, τ_1 为点目标散射强度, 设其值为 1。 $G(M_1, R_n)$ 为目标与天线阵元间的格林函数:

$$G(M_1, R_n) = \exp(ikr)/4\pi r \quad (2)$$

式中, r 为目标与阵元间距, k 为电磁波波数。目标与所有阵元间格林函数可写成向量形式:

$$g_1 = [G(M_1, R_1), G(M_1, R_2) \cdots G(M_1, R_N)]^T \quad (3)$$

式中, T 代表矩阵转置, 式 (1) 的矩阵形式可表达为:

$$K = \{K_{i,j}\} = g_1 g_1^T \quad (4)$$

矩阵 K 被称为“多基数据矩阵”。值得注意的是由于格林函数的互易性: $G(M_1, R_n) = G(R_n, M_1)$, K 矩阵是一个对称矩阵。进一步可得时间反转矩阵 T' :

$$T' = K^* K = K^H K = g_1^* g_1^H g_1 g_1^T \quad (5)$$

式中, $*$ 和 H 分别表示矩阵的共轭形式与共轭转置形式。易验证 T' 矩阵为 Hermitian 矩阵, 故其特征值均为实数, 且特征向量间彼此正交。由于非零特征值对应的特征向量与目标处格林函数值的共轭形式一一对应, TR 成像方法将某个非零特征值对应的特征向量作为导向矢量时, 可在该特征向量对应的目标处实现聚焦。此场景下 TR 成像函数

为 (Ishimaru 等, 2012; Ishimaru, 2017):

$$\psi_{\text{TR}} = \int d\omega |U|^2 \lambda_1 \mathbf{g}_1^T \mathbf{v}_1 \exp(-i\omega t) \quad (6)$$

式中, λ_1 为 \mathbf{T}' 矩阵最大的特征值, 同时也是频率 ω 的函数, 扫描矢量为该最大特征值相对应特征向量, 由 \mathbf{v}_1 表示。 U 代表发射信号频谱形式, 带宽和载频分别为 $\Delta\omega$ 和 ω_0 。本文中采用高斯脉冲作为发射信号:

$$U(\omega) = \left(\frac{2\sqrt{\pi}}{\Delta\omega} \right) \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{(\Delta\omega)^2}\right) \quad (7)$$

当成像场景中存在多个目标, 且目标间排列紧密或者相互散射较强时, TR 成像方法难以较好地地区分不同目标。为了解决这一问题, 学者们将时间反转成像技术与多重信号分类技术 (MUSIC) 结合起来, 提出了时间反转—多重信号分类技术 (以下简称 TR-MUSIC) (Devaney, 2005)。通过借鉴多重信号分类技术中的“伪谱”概念, 可得 TR-MUSIC 的成像函数, 本文中场景下为

$$\psi_{\text{TR-MUSIC}} = \frac{1}{\sum_{p=2}^N \int d\omega |U|^2 \left| \langle \mathbf{g}_1^T \mathbf{v}_p \rangle \right|} \quad (8)$$

当目标处的格林函数值估计准确时, 上式分母趋于零, 因此在目标对应像元处产生峰值, 实现聚焦。

对于 SAR 成像, 结果可以表示为式 (9), 其中 G_{si} 代表搜索点处的格林函数, 当每一个像元处的格林函数无法精确已知的情况下, 我们用自由空间中的格林函数近似表示其值 (Ishimaru, 2017):

$$\psi_{\text{SAR}} = \int d\omega_1 d\omega_2 |U_1|^2 |U_2|^2 \times \sum_i \sum_j (G_i^2(\omega_1) G_j^{2*}(\omega_2)) (G_{si}^{2*}(\omega_1) G_{sj}^2(\omega_2)) \quad (9)$$

2.3 受随机介质遮蔽影响下的成像函数

以上成像函数均假定整个成像场景处于自由空间中; 若目标与天线阵列间存在一层随机介质 (图 1), 则以上的成像函数需考虑随机介质对电磁波传播, 以及由此对成像过程带来的影响。针对电磁场在随机介质中的传播过程这一问题, 学者们已经开发出一系列解析模型或数值方法 (Tsang 等, 1985; Ishimaru, 2017)。其中, 辐射传输方程因其相对简单又能较准确描述物理过程而得到了广泛应用 (Tsang 等, 2001; Ulaby 和 Long,

2014)。因此, 本文将采用这一模型来描述电磁波与随机介质间的相互作用。

根据辐射传输方程理论, 随机介质中电磁场的衰减与光学厚度 (τ) 有关, 并且此衰减效应可以进一步表示为散射厚度 (ST) 与吸收厚度 (AT) 引起的衰减效应之和。以上 3 项可分别表示为消光系数 κ_e , 散射系数 κ_s 和吸收系数 κ_a 的函数:

$$T' = \int \kappa_e d_2 \quad (10)$$

$$ST = \int \kappa_s d_2 \quad (11)$$

$$AT = \int \kappa_a d_2 \quad (12)$$

散射厚度 τ_s 与光学厚度的比值 τ 被称为单次散射反照率 (albedo)。在随机介质存在的情况下, 式 (5) 的集平均形式为

$$\langle \mathbf{T}' \rangle = \langle \mathbf{K}^* \mathbf{K} \rangle = \langle \mathbf{g}_1^* \mathbf{g}_1^H \mathbf{g}_1 \mathbf{g}_1^T \rangle \quad (13)$$

展开上式, 矩阵中每一项为

$$\begin{aligned} \langle T'_{ij} \rangle &= \sum_{n=1}^N \langle G(\mathbf{M}_1, \mathbf{R}_i) G^*(\mathbf{M}_1, \mathbf{R}_j) G(\mathbf{M}_1, \mathbf{R}_n) G^*(\mathbf{M}_1, \mathbf{R}_n) \rangle \\ &= \sum_{n=1}^N \langle G_n G_n^* G_i G_j^* \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

由于圆复高斯随机变量可代表一系列满足特定条件和关系的复高斯随机变量 (Goodman, 1985), 其常被用来描述波在随机介质中的起伏。并且有学者认为无论在强起伏 (对数幅度方差大于 0.2—0.5) 还是弱起伏的情况下该变量均可描述波在随机介质中的传播过程 (Ishimaru, 1978)。因此, 基于圆复高斯近似假设, (14) 式中格林函数四阶矩可以表示为:

$$\begin{aligned} \langle G_n G_n^* G_i G_j^* \rangle &= (G_{n0} G_{n0}^* G_{i0} G_{j0}^*) \times (\exp(-2\tau) + \\ &F_s \exp(-\tau) \times (X_{ij} + X_{nn} + X_{ni} + X_{nj}) + \\ &F_s^2 (X_{ij} X_{nn} + X_{ni} X_{nj})) \end{aligned} \quad (15)$$

且有:

$$\begin{aligned} F_s &= 1 - \exp(-ST); X_{ij} = \exp\left(-AT - \frac{|x_i - x_j|^2}{\rho_0^2}\right); \\ \frac{1}{\rho_0^2} &= \frac{ST \cdot k^2 ((d_1 + d_2)^3 - d_1^3)}{12\alpha_p (d_1 + d_2 + d_3)^2 d_2 F_s} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, G_{n0} 为自由空间背景下目标与阵元间的格林函数, 即 $G_{n0} = G(\mathbf{M}_1, \mathbf{R}_i)$ 。此外, 二阶矩代表的互相关函数 $\langle G_i G_j^* \rangle$ 可表示为 (Ishimaru 等, 2004):

$$\langle G_i G_j^* \rangle = G_{i0} G_{j0} (\exp(-\tau) + F_s X_{ij}) \quad (17)$$

将式 (15) 代入式 (14) 并逐项求和, 可得在圆复高斯近似假设下, 考虑随机介质影响后 $\langle \mathbf{T}' \rangle$ 矩阵

每一项元素的解析表达,进一步推导可见参考文献(Ishimaru等,2007)。

对于TR-MUSIC成像,是基于以上计算得到的 $\langle \mathbf{T}' \rangle$ 矩阵,并对其进行特征值分解,利用得到的特征向量获取成像结果。

对于TR成像,考虑到随机介质影响,成像结果可表示为(Ishimaru等,2012):

$$\langle \psi_{\text{TR}} \rangle = \int d\omega_1 d\omega_2 |U_1|^2 |U_2|^2 \times \lambda_1(\omega) \lambda_1^*(\omega) \sum_i \sum_j \langle G_i(\omega_1) G_j^*(\omega_2) \rangle \langle G_{si}(\omega_1) G_{sj}^*(\omega_2) \rangle \quad (18)$$

将式(17)代入式(18),即可获得平均成像强度解析表达。

类似地,对于SAR成像,考虑随机介质遮蔽影响下的平均成像强度可以表示为(Ishimaru,2017):

$$\langle \psi_{\text{SAR}} \rangle = \int d\omega_1 d\omega_2 |U_1|^2 |U_2|^2 \times \sum_i \sum_j \langle G_i^2(\omega_1) G_j^{2*}(\omega_2) \rangle \langle G_{si}^{2*}(\omega_1) G_{sj}^2(\omega_2) \rangle \quad (19)$$

2.4 场景参数与评价方法

本文成像场景涉及相关参数设定如表2所示。

表2 参数标定

Table 2 The values of some related parameters

参数	参数值	参数	参数值
d_1	12λ	N	41
d_2	13λ	相邻阵元间距	0.5λ
d_3	25λ	像元大小	$0.5\lambda \times 0.5\lambda$
目标位置	$(0\lambda, 50\lambda)$	发射信号形式	高斯脉冲
光学厚度	0, 0.1, 1 及 5	载频 ω_0	0.3 GHz
albedo	0.1, 0.5 及 1	带宽系数 $\Delta\omega/\omega_0$	0.01

为定量评估成像效能,本文使用方位向3 dB波束宽度($PSFa$)、距离向3 dB波束宽度($PSFr$)和目标定位误差(Δ)来对其辐射与几何效能进行定量评估(Chang等,2011; Chen,2015)。其中3 dB波束宽度也就是遥感中经常提到的“空间分辨率”概念。

另外,TR和TR-MUSIC均对时间反转矩阵 \mathbf{T}' 进行特征值分解以获取成像结果,当随机介质不存在时,最大的特征值与点目标相对应,其他特征值理论上为零,时间反转矩阵 \mathbf{T}' 的秩与点目标个数相等。而在随机介质的遮蔽作用影响下, \mathbf{T}' 矩阵特征值分解情况可能会发生变化。为了分析随机介质参数变化对时间反转矩阵 \mathbf{T}' 特征值分解结果的影响,可对不同成像条件下的时间反转矩阵 \mathbf{T}' 进行特征值分解,计算第 i 个特征值在不同频

域采样点处之和,即:

$$\eta(i) = \sum_{f=f_{N1}}^{f_{Nf}} \lambda_i(f) \quad (20)$$

式中, $f_{N1}, f_{N2}, \dots, f_{Nf}$ 为频域内的采样点, λ_i 代表第 i 个(从大到小排列)特征值在采样点 f 处的数值。为了显示方便,下文仅对前10个最大特征值的 η 值进行分析。

3 成像效能影响因素分析

3.1 成像方法对成像效能的影响

基于上一节中获得的成像函数式(8)、式(18)、式(19)以及成像参数,可获取不同成像方法相应成像仿真结果,并对其进行定量评估。经过计算可以发现,仿真结果中3种成像方法的定位误差主要出现在距离向上,而在方位向上的定位基本是准确的。因此以下仅关注距离向上的定位误差。对TR-MUSIC成像方法而言,波束宽度或者定位误差可能会小于一个像元,文中用“ <0.5 ”来代表这一情况。

首先列出 d_2 区域为自由空间(即 $\tau=0$)情况下3种成像方法的仿真结果(图2)。之后不同随机介质参数下3种成像方法仿真结果在图3—图5中列出。与之前报道学者研究结果(Ishimaru等,2012)对比,成像结果非常一致,侧面证明了本论文仿真结果的可靠性。总体而言,TR-MUSIC成像方法表现最佳,SAR成像次之,TR成像效能最弱;此外,随着光学厚度增加,成像效能退化;在光学厚度相同的情况下,随着albedo增加,成像效能退化。

3.2 随机介质吸收和散射特性对成像效能的影响

对仿真结果进一步分析可以发现,在评估随机介质对于成像结果的影响时仅仅考虑光学厚度是完全不够的,albedo同样非常重要。以TR-MUSIC成像结果中 $\tau=1$, albedo=1和 $\tau=5$, albedo=0.1两种情形为例,尽管后者光学厚度比前者大得多,但albedo的变化似乎完全“抵消”了光学厚度增大对于成像效能造成的退化影响。这一结论同样适用于TR和SAR成像($\tau=1$, albedo=1和 $\tau=5$, albedo=0.1)。在光学厚度相同的情况下,由于albedo的改变造成成像效能的变化也是非常明显的。由于光学厚度一定的情况下,改变albedo即改变了吸收厚度与散射厚度之间相对大小关系,因此有必要就二者对于成像结果的影响分别做进一步分析。

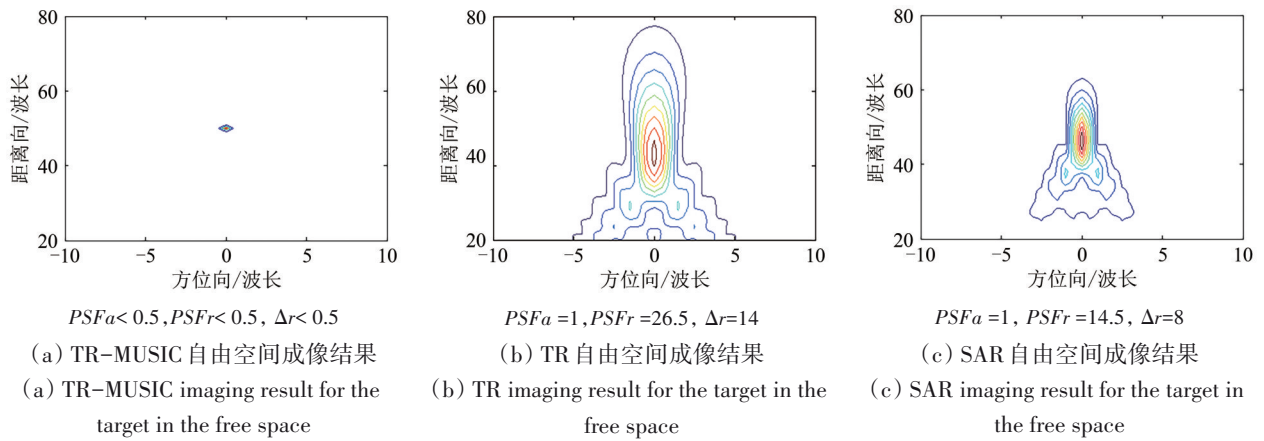


图 2 自由空间背景下 3 种成像方法仿真结果

Fig. 2 Simulated results of three imaging methods in the background of free space

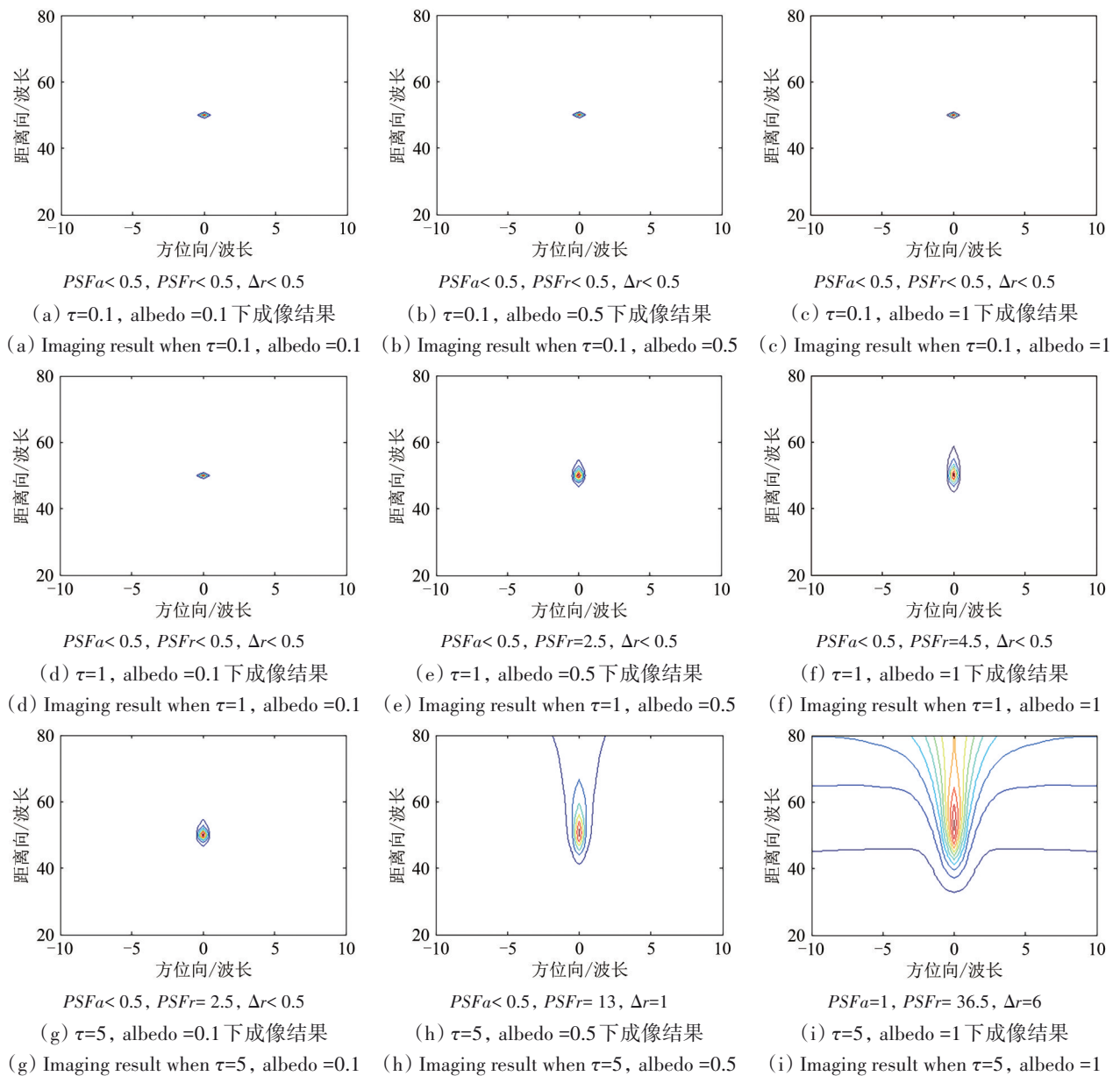


图 3 不同随机介质参数下 TR-MUSIC 成像仿真结果

Fig. 3 Simulated results of TR-MUSIC under different parameters of random media

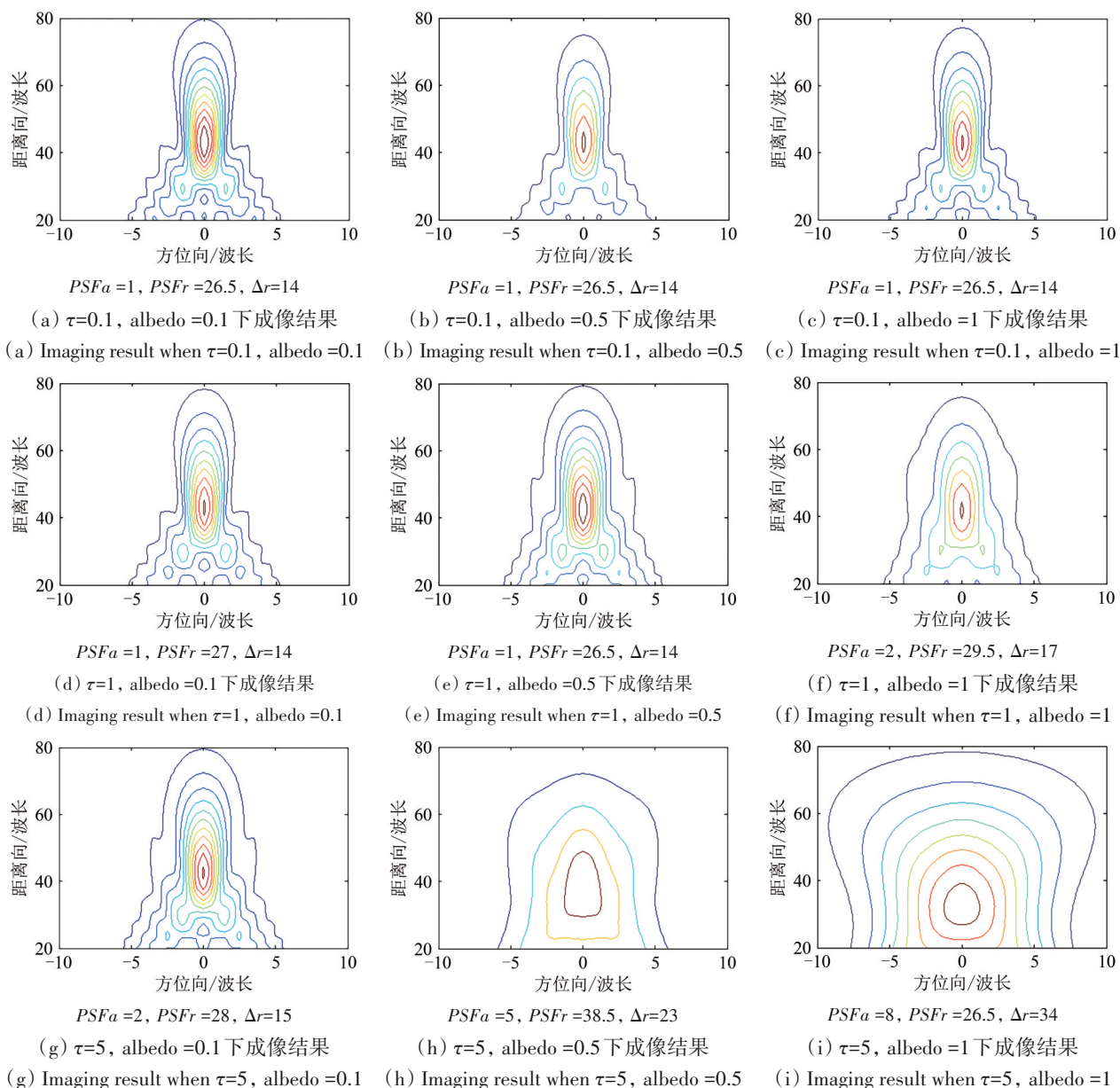
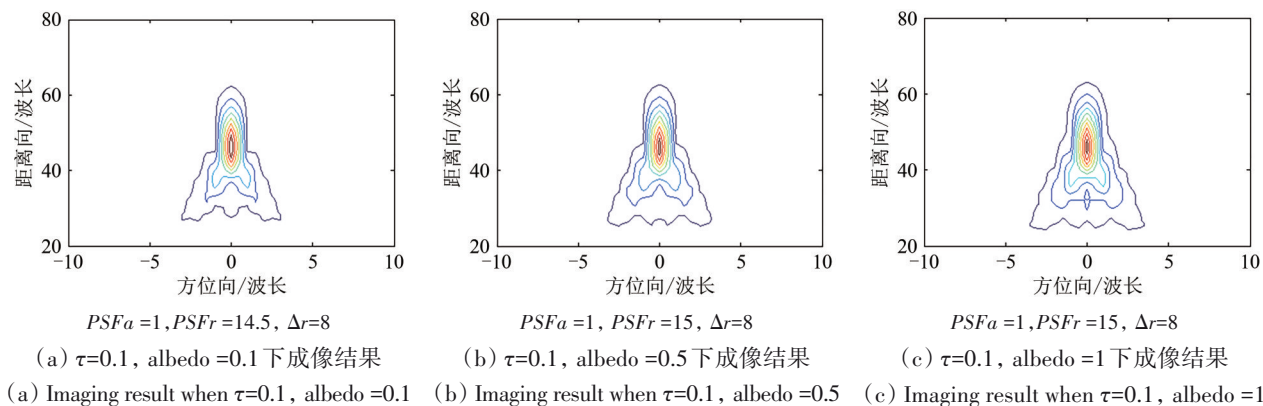


图4 不同随机介质参数下TR成像仿真结果

Fig. 4 Simulated results of TR under different parameters of random media



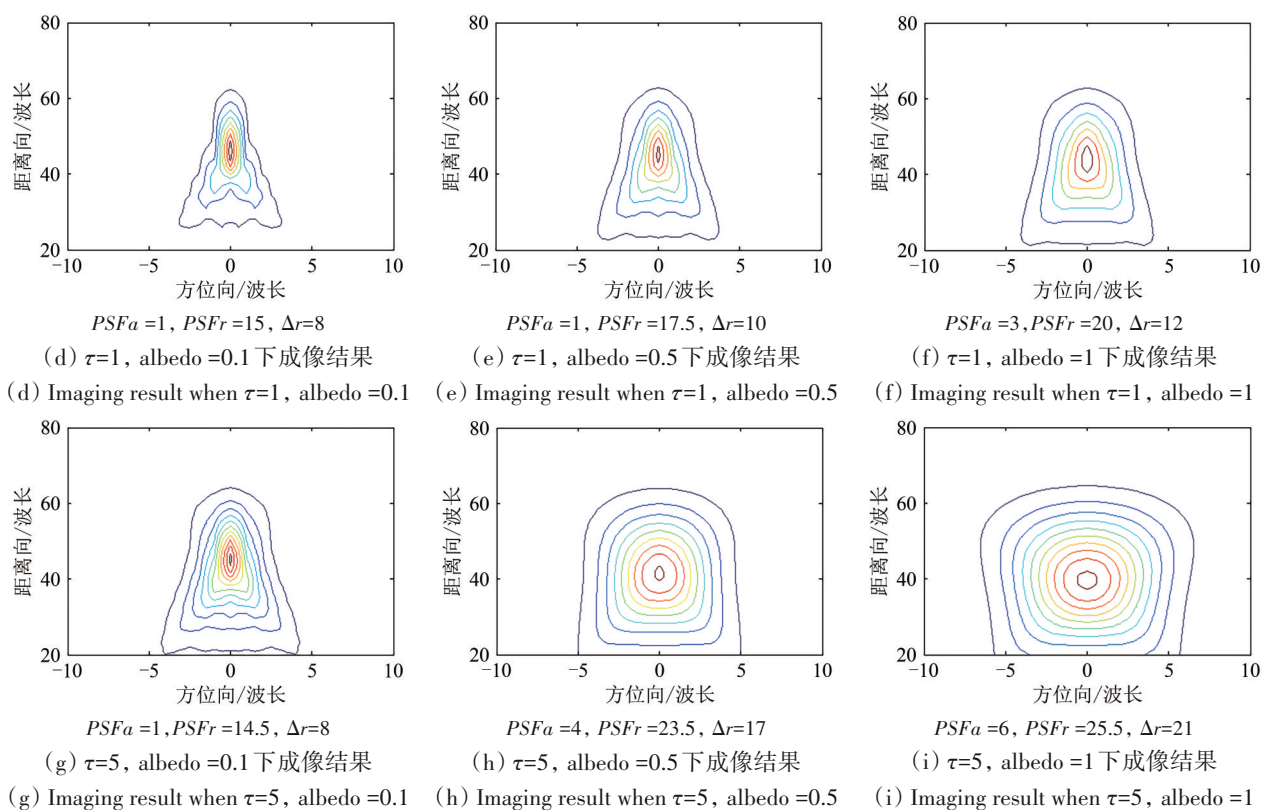
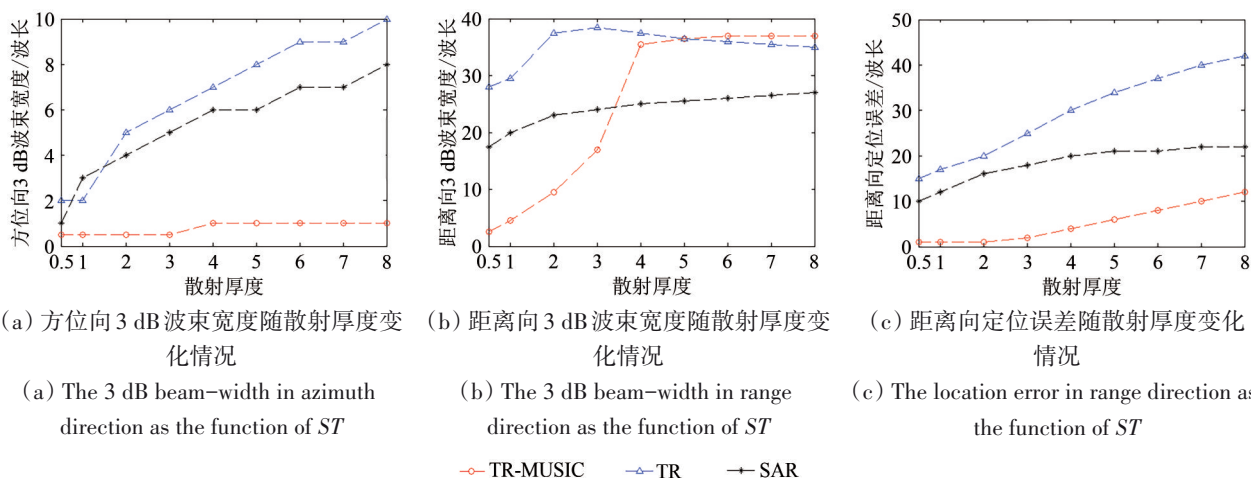


图 5 不同随机介质参数下 SAR 成像仿真结果

Fig. 5 Simulated results of SAR under different parameters of random media

图 6 与图 7 分别表示了成像效能随散射厚度和吸收厚度变化而变化的规律。理论上可将散射厚度或吸收厚度设为零值以排除零值项的影响,以便对另一项与成像效能间的关系加以分析。然而在本文采用的解析模型中,简单地将散射厚度设为零值会导致式 (16) 出现分母为零的情况。因此本文将散射厚度和吸收厚度分别设为较小值 (0.1), 以分析其中一项影响较为微弱条件下另一项与成像效能的关系。观察可以发现, 成像质量

主要受散射厚度影响, 而吸收厚度的影响是非常弱的。导致此现象的原因是, 散射厚度增大导致来自随机介质的杂波增强, 从而降低成像效能; 而吸收厚度仅对电磁波起吸收作用。需要注意的是在计算吸收厚度对成像效能的影响时, TR 和 SAR 在方位向上的分辨率是相同的, 代表二者的曲线发生重叠。另外由于 TR-MUSIC 成像方法较另外两种方法效能较好, 本研究对其成像效能变化情况做进一步分析。



(a) 方位向 3 dB 波束宽度随散射厚度变化情况

(a) The 3 dB beam-width in azimuth direction as the function of ST

(b) 距离向 3 dB 波束宽度随散射厚度变化情况

(b) The 3 dB beam-width in range direction as the function of ST

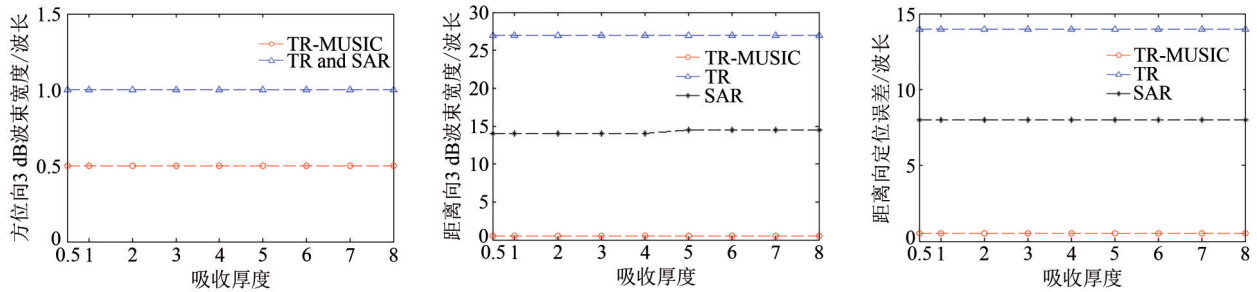
(c) 距离向定位误差随散射厚度变化情况

(c) The location error in range direction as the function of ST

—○— TR-MUSIC —△— TR —+— SAR

图 6 不同散射厚度下 TR-MUSIC, TR 和 SAR 成像效能评估, 其中 $AT=0.1$

Fig. 6 Evaluation of performance for TR-MUSIC, TR and SAR under various scattering thicknesses ($AT=0.1$)



(a) 方位向 3 dB 波束宽度随吸收厚度变化情况 (a) The 3 dB beam-width in azimuth direction as the function of AT
 (b) 距离向 3 dB 波束宽度随散射厚度变化情况 (b) The 3 dB beam-width in range direction as the function of AT
 (c) 距离向定位误差随散射厚度变化情况 (c) The location error in range direction as the function of AT

图 7 不同吸收厚度下 TR-MUSIC, TR 和 SAR 成像效能评估, 其中 $ST=0.1$

Fig. 7 Evaluation of performance for TR-MUSIC, TR and SAR under various absorption thicknesses ($ST=0.1$)

由于 TR-MUSIC 成像结果由对 T' 矩阵进行特征值分解最终得到, 下文将利用式 (20), 分析随机介质对 T' 矩阵特征值分解, 进而对成像结果的影响情况。

图 8 是自由空间中特征值分解情况。可以看出, 最大特征值相对较大, 其他特征值相当接近或者等于 0, 因而 T' 矩阵秩近似为 1, 与目标数相等, 和前文理论分析相符。图 9 是在图 8 的场景中, 加入随机介质效应, 即表示时间反转矩阵 T' 的特征值, 随散射厚度 ST 的变化情况。为了方便分析, 这里假设吸收厚度保持恒定 ($AT=0.1$)。可见, 随着随机介质散射厚度增加, 最大特征值迅速降低, 而其他特征值逐渐增大。在这一趋势在散射厚度从 0.5 增大至 4 时较为明显, 而后在散射厚度大于 5 时, 趋于稳定。导致此现象的原因是, 随机介质散射厚度的增加, 引起来自随机介质反

射杂波强度的增加, 点目标不再是回波信号的唯一来源, 时间反转矩阵 T' 的秩也随之改变。然而当散射厚度大于 5 时, 对于散射厚度的进一步增加, 时间反转矩阵特征值分解情况敏感性下降, 这也与成像效能的变化趋势是相符的, 可见图 3。

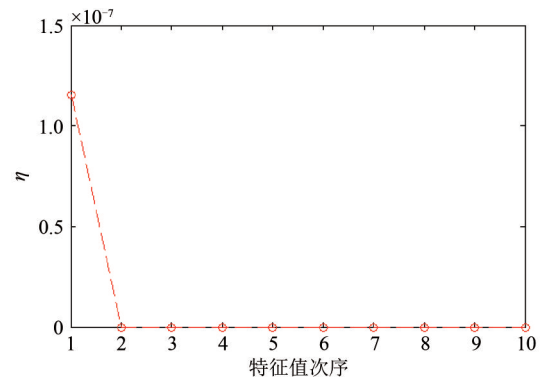
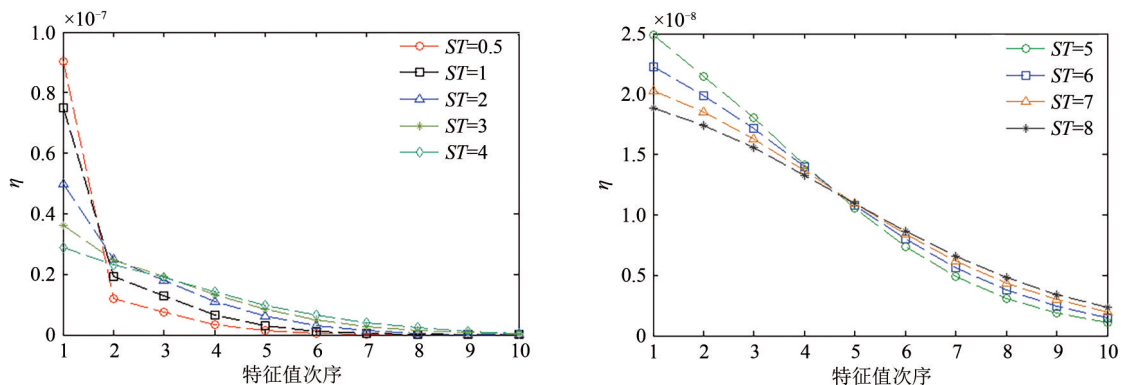


图 8 自由空间背景下中部分特征值对应 η 值情况
 Fig. 8 The value of η for some eigenvalues in the background of free space



(a) 散射厚度从 0.5 递增至 4 时特征值变化情况 (a) Eigenvalue as the function of ST which increases from 0.5 to 4
 (b) 散射厚度从 5 递增至 8 时特征值变化情况 (b) Eigenvalue as the function of ST which increases from 5 to 8

图 9 不同散射厚度下部分特征值变化情况, 其中 $AT=0.1$

Fig. 9 The value of for some eigenvalues under different scattering thickness ($AT=0.1$)

在散射厚度保持一定 ($ST=0.1$) 的情况下, 吸收厚度的变化对时间反转矩阵 T' 特征值分解情况的影响, 可见图 10。为了更清楚的表达这一效应, 本文展示了吸收厚度较小 ($AT=0.5$) 或较大 ($AT=5$) 两种情况下的特征值分解结果。从图中可以看出, 改变吸收厚度对 T' 矩阵特征值分解的值影响较大, 但对各特征值之间的相对贡献比率影响小。各种吸收厚度下, 最大特征值依然远大于其余特征值。导致此现象的原因是, 根据辐射传输方程, 吸收厚度的存在并不改变波的传播方向, 故而不会对阵列的接收信号产生杂波影响。这意味着吸收厚度的变化并不会造成时间反转矩阵 T' 的秩的明显改变, 也不会对于成像结果产生明显影响。

3.3 天线布局对成像效能的影响

为改善随机介质遮蔽下目标的雷达成像效能, 本文进一步研究了稀疏阵列中天线布局对成像效能的影响。这是因为一定条件下稀疏阵列可能保持较好的成像效能, 同时降低雷达系统的复杂度。本研究设定天线阵列总长度不变 ($L=20\lambda$), 天线阵元数分别设定为 5 个或 11 个, 相应的两相邻阵元间隔分别为 $d=4\lambda$ 或 $d=2\lambda$, 其他参数保持不变。为了简洁起见, 下文仅列出了随机介质效应影响较小 ($\tau=0.1$, albedo=0.1) 或者较大 ($\tau=5$, albedo=1) 情况

下的仿真结果 (图 11)。从图 11 中可见, 随阵元间隔增加, 成像效能退化, 但退化程度因随机介质光学厚度和 albedo 影响差异较大。一般而言, 当随机介质影响较小时, 随着阵元间隔增加, TR-MUSIC 能保持较好的空间分辨率, 但 TR 和 SAR 出现了栅瓣效应。随机介质影响较强时, TR 和 SAR 成像效能退化, 随着天线阵元间距增加, 退化更为明显。值得注意的是, 天线阵元间隔较大且随机介质影响较大时, TR-MUSIC 才出现较弱的栅瓣, 其成像效能最佳。

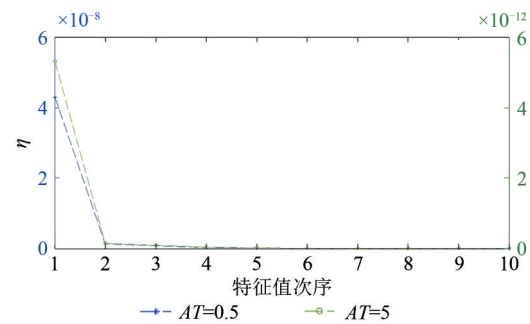
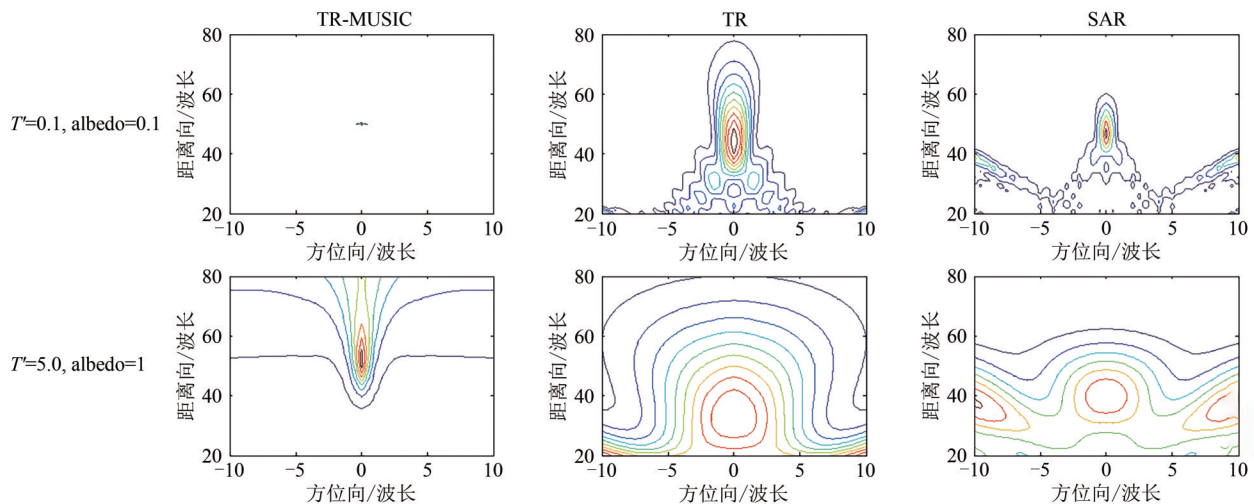


图 10 不同散射厚度下部分特征值对应 η 值情况, 其中 $ST=0.1$, 分别对应于在较小吸收厚度 ($AT=0.5$ 左侧, 蓝色纵坐标) 与较大吸收厚度 ($AT=5$ 左侧, 绿色纵坐标) 情况下的结果

Fig. 10 The value of η for some eigenvalues under low absorption thickness ($AT=0.5$, corresponding to the left blue vertical axis) and high absorption thickness ($AT=5$, corresponding to the right green vertical axis), $ST=0.1$



(a) 相邻阵元间距 $d=2\lambda$

(a) The spacing between two adjacent element $d=2\lambda$

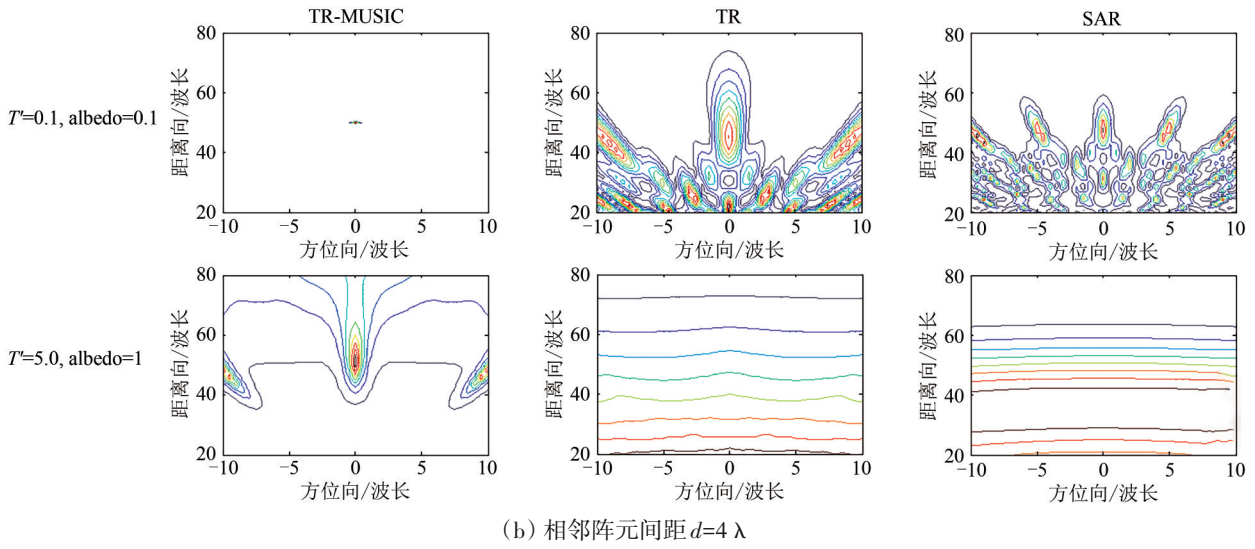


图 11 使用稀疏阵列在不同相邻阵元间隔值 d 下获取 3 种成像方法仿真结果

Fig. 11 Simulated results of imaging using the sparse array under different spacing between two adjacent element (d)

4 成像效能改进

与常规阵列布局相比,在一定情况下使用 TR-MUSIC 方法进行稀疏阵列成像仍有可能保持大致相当效能这一特性,不仅使得设计更简单轻便的雷达系统成为可能,而且为减弱随机介质干扰、提高成像质量提供了潜在途径。考虑本文中的场景,来自随机介质中散射厚度效应产生的杂波是导致成像效能退化的主要原因。如果设计一类特殊的天线布局,减少阵元接收到的杂波信号,可以获取更优成像结果。

为了实现这一目的,本文对比了随机介质存在与否两种情况下接收信号的差异并对此差异进行分析。由上文分析可知,全部接收信号由 \mathbf{K} 矩阵或者其集平均形式 $\langle \mathbf{K} \rangle$ 表示。很容易计算随机介质不存在情况下的 \mathbf{K} 矩阵,难点在于获得随机介质存在情况下 $\langle \mathbf{K} \rangle$ 矩阵的解析表达式,利用式 (13) 反解 $\langle \mathbf{K} \rangle$ 也相当困难。为了解决此问题,注意到根据矩阵运算法则, \mathbf{T}' 矩阵对角线上的元素可以表示为:

$$\langle T'_{ii} \rangle = \sum_{j=1}^N \mathbf{K}_{ij}^* \mathbf{K}_{ji} = \sum_{j=1}^N |\mathbf{K}_{ij}|^2 \quad (21)$$

式中, \mathbf{K} 矩阵第 i 行代表被第 i 个天线阵元所发射的冲激信号经过传播被所有阵元接收的情况,因此 $\sum_{j=1}^N |\mathbf{K}_{ij}|^2$ 可以代表这一情况下所有阵元接收信号的能量之和。因此,通过对比随机介质存在与否两

种情况下 \mathbf{T}' 矩阵对角元素之间差异,我们可以判断哪一部份天线阵元发射信号受到了随机介质最强的干扰。对于第 i 个天线阵元发射并被所有阵元接收的信号,其受到随机介质干扰情况,采用下式来进行定量评估:

$$\rho(i) = \frac{1}{N_f} \sum_{f=f_{N1}}^{f_{Nf}} \frac{\langle T'_{i,i}(f) \rangle}{\mathbf{T}'_{i,i}^{\text{free}}(f)} = \frac{1}{N_f} \sum_{f=f_{N1}}^{f_{Nf}} \frac{\sum_{j=1}^N |\langle \mathbf{K}_{i,j}(f) \rangle|^2}{\sum_{j=1}^N |\langle \mathbf{K}_{i,i}^{\text{free}}(f) \rangle|^2} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{T}'^{\text{free}}$ 和 \mathbf{K}^{free} 分别代表随机介质不存在情况下获得的 \mathbf{T}' 矩阵和 \mathbf{K} 矩阵中的相应元素。如论文前述分析,散射厚度是造成成像效能退化的主要原因,改进成像效能必然也与减弱散射厚度影响密切相关,因此下文将对不同散射厚度情况下的 ρ 值变化加以分析。在不同散射厚度 (ST) 情况下 (吸收厚度设为 0), 式 (22) 比值与天线阵元位置 (从左向右计数, 1 代表最左侧天线阵元) 关系如图 12 所示。可以发现所有比值均大于 1, 这是因为随机介质中散射厚度的存在使得阵元接收到了更强的回波能量。尽管随着散射厚度的增加,这一比值先增大后减小,但是中央部分天线阵元对应比值总是最大的。这表示由中央部分阵元发射并被所有阵元接收到的回波信号中杂波干扰是最强的。注意到这一点,并结合之前 TR-MUSIC 对于稀疏阵列有较好容忍度的特性,通过移除中央部分阵元可以进一步改善 TR-MUSIC 的成像效能。

图 13 为移除了 X 轴上坐标处于 -2λ 至 2λ 区间

内的7个阵元后, 使用34个阵元进行成像的仿真结果及特征值分解情况。对比之前类似参数情况下(图3第3行第3列, $\tau=5$, albedo=1, 对应 $ST=5$, $AT=0$)使用常规阵列获得的成像结果, 图13表明移除中央位置部分天线阵元后成像质量明显改善。与图9(b)中相同随机介质参数下($ST=5$, $AT=0.1$)特征值分解情况对比, 可以发现尽管第二大的特征值大小依然与最大特征值接近, 但是其余的特征值明显变小, 这意味着随机介质影响的减弱。

进一步移除更多位于中间位置的天线阵元, X轴上区间为 -5.5λ 至 5.5λ 内的阵元移除后剩余阵元数量为20个, 在相同随机介质参数情况下获取结果如图14所示。可以发现, 在仿真结果中目标附近区域成像分辨率进一步改善, 第3个以及之后的特征值相对大小进一步降低, 表3中对于不同天

线布局下成像结果的定量评估也证实了这一点。值得注意的是, 成像结果中出现了栅瓣效应。因此在采用较少阵元成像的情况下, 需要在减弱杂波(使用更少阵元)以及避免栅瓣间做出平衡; 而此关系又与随机介质的影响强弱密切相关, 这需要在未来进一步研究。

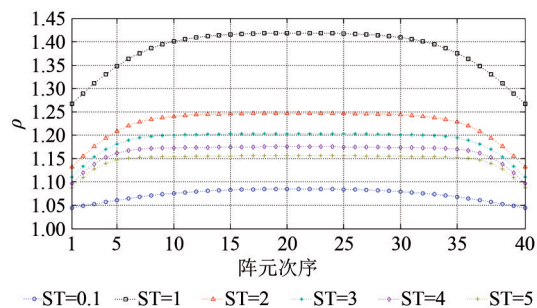


图12 不同散射厚度(ST)下 ρ 值与天线阵元位置关系
Fig. 12 The relationship between the location of array elements and the value of ρ under different scattering thicknesses (ST)

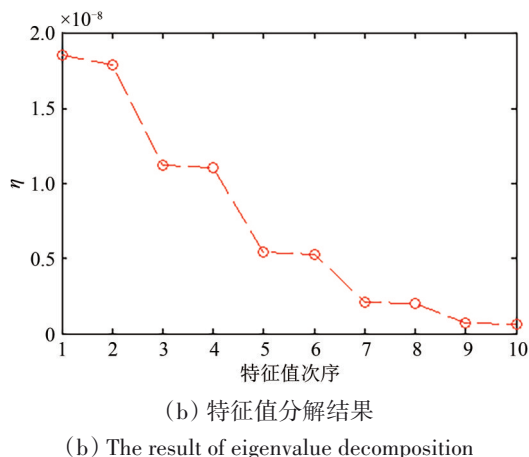
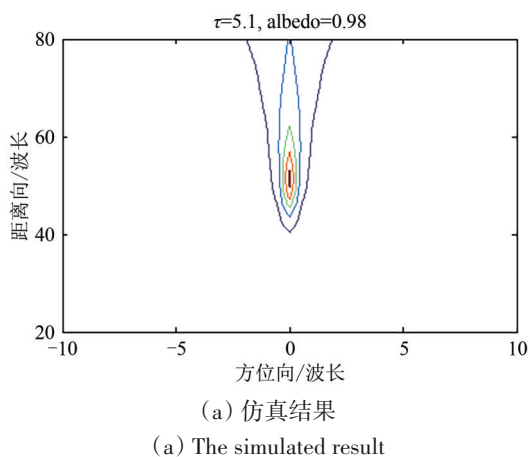


图13 在34个阵元下使用特殊天线布局得到TR-MUSIC仿真结果
Fig. 13 The result of TR-MUSIC employing the special array with 34 elements

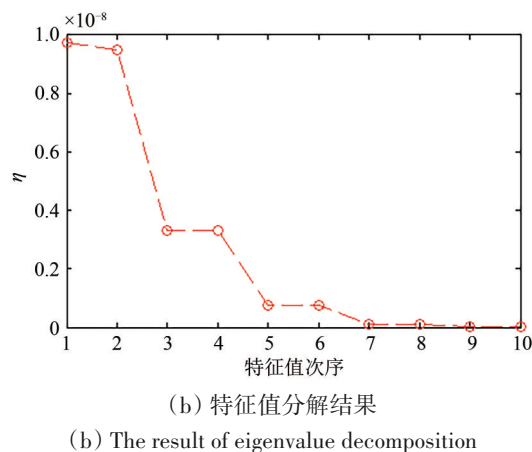
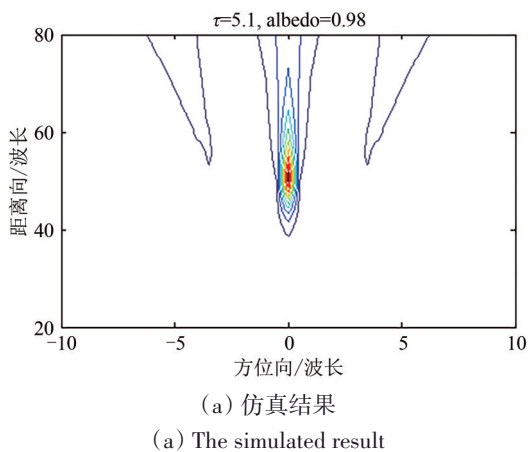


图14 在20个阵元下使用特殊天线布局得到TR-MUSIC仿真结果
Fig. 14 The result of TR-MUSIC employing the special array with 20 elements

表3 不同阵列布局下TR-MUSIC成像效能对比
Table 3 Comparison of TR-MUSIC imaging performance under different array layouts

阵元数	评价指标		
	$PSFa/\lambda$	$PSFr/\lambda$	$\Delta r/\lambda$
41	1	36.5	6
34	<0.5	20	2
20	<0.5	14.5	2

5 结论

本文对受随机介质遮蔽的目标其雷达成像效能变化情况及影响因素进行了分析,涉及雷达成像方法、随机介质参数以及阵列布局等。研究表明,在不同光学厚度以及单次散射反照率的情况下,TR-MUSIC表现最好,SAR次之,TR较差;散射厚度是造成3种成像方法效能退化的主要原因,而吸收厚度的影响较弱。不仅如此,相较SAR,TR和TR-MUSIC可以更好地抑制栅瓣特性,因此更适用于稀疏阵列。并且本文利用TR-MUSIC可以抑制栅瓣特性这一特点重新设计阵元排布,进行稀疏阵列成像,以减轻杂波干扰,改善成像效能。

虽然本文针对受随机介质遮蔽的目标进行雷达成像这一领域开展一些有益的初步研究,但主要是基于解析模拟;为了进一步验证以及探索随机介质遮蔽下的目标高精度成像方法,以后可利用数值仿真以及开展实验,对成像方法的一些关键步骤进行深入研究。例如本研究采用的光学厚度,并没有考虑到随机介质中散射体的几何位置和空间排布特征;而且其本质上是描述波的能量在随机介质中的变化情况,忽略了相位变化,然而任何相干成像系统都需要波的相位信息;另外,本研究采用的圆复高斯近似假设仅适用于描述随机介质遮蔽下的单点目标成像结果。为了更准确地描述多目标以及不同极化状态下的成像结果,需要开展进一步的数值仿真和实验分析。

参考文献(References)

Bamler R and Hartl P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4): R1-R54 [DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001]
Chang J M, Jin M, Zeng J Y and Chen K S. 2018. Analysis on time re-

versal imaging in presence of random media. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 35(1): 59-65 (常敬明, 金铭, 曾江源, 陈崑山. 2018. 随机介质场景下的时间反转成像效果分析. *中国科学院大学学报*, 35(1): 59-65 [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2018.01.008])

Chang Y L, Chiang C Y and Chen K S. 2011. SAR image simulation with application to target recognition. *Progress in Electromagnetics Research*, 119: 35-57 [DOI: 10.2528/PIER11061507]
Chen K S. 2015. *Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging: A System Simulation Approach*. Boca Raton: CRC Press
Cloude S R and Papathanassiou K P. 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1551-1565 [DOI: 10.1109/36.718859]
Cumming I G and Wong F H. 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Norwood: Artech House
Dehmollaian M and Sarabandi K. 2008. Refocusing through building walls using synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6): 1589-1599 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.916212]
Devaney A J. 2005. Time reversal imaging of obscured targets from multistatic data. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(5): 1600-1610 [DOI: 10.1109/TAP.2005.846723]
Fouda A E, Lopez-Castellanos V and Teixeira F L. 2014. Experimental demonstration of statistical stability in ultrawideband time-reversal imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1): 29-33 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2245097]
Goodman J W. 1985. *Statistical Optics*. New York: John Wiley and Sons
Ishimaru A. 1978. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. New York: Academic Press
Ishimaru A. 1991. Wave propagation and scattering in random media and rough surfaces. *Proceedings of the IEEE*, 79(10): 1359-1366 [DOI: 10.1109/5.104210]
Ishimaru A, Jaruwatanadilok S and Kuga Y. 2004. Multiple scattering effects on the radar cross section (RCS) of objects in a random medium including backscattering enhancement and shower curtain effects. *Waves in Random Media*, 14(4): 499-511 [DOI: 10.1088/0959-7174/14/4/002]
Ishimaru A, Jaruwatanadilok S and Kuga Y. 2007. Imaging of a target through random media using a short-pulse focused beam. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(6): 1622-1629 [DOI: 10.1109/TAP.2007.897318]
Ishimaru A, Jaruwatanadilok S and Kuga Y. 2012. Imaging through random multiple scattering media using integration of propagation and array signal processing. *Waves in Random and Complex Media*, 22(1): 24-39 [DOI: 10.1080/17455030.2010.528065]
Ishimaru A, Zhang C and Kuga Y. 2014. Hard wall imaging of objects hidden by non-penetrating obstacles using modified time reversal technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62

- (7): 3645-3651 [DOI: 10.1109/TAP.2014.2317479]
- Ishimaru A. 2017. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering: From Fundamentals to Applications. 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press
- Lee J S and Pottier E. 2009. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. Baton Rouge: CRC Press
- Lev-Ari H and Devaney A J. 2000. The time-reversal technique re-interpreted: subspace-based signal processing for multi-static target location//Proceedings of the 2000 IEEE Sensor Array and Multi-channel Signal Processing Workshop. Cambridge, MA, USA: IEEE: 509-513 [DOI: 10.1109/SAM.2000.878061]
- Li W M, Li Z Y, Chen E X and Feng Q. 2014. Status and development of tomographic SAR for forest vertical structural parameters inversion. *Journal of Remote Sensing*, 18(4): 741-751 (李文梅, 李增元, 陈尔学, 冯琦). 2014. 层析 SAR 反演森林垂直结构参数现状及发展趋势. *遥感学报*, 18(4): 741-751 [DOI: 10.11834/jrs.20143158]
- Li Z, Zhou J M, Tian B S and Guo M. 2009. Research progress on application methods of POLSAR and INSAR. *Journal of Remote Sensing*, 13(S1): 283-289 (李震, 周建民, 田帮森, 郭明). 2009. 极化与干涉合成孔径雷达应用方法研究进展. *遥感学报*, 13(S1): 283-289 [DOI: 10.11834/jrs.20090038]
- Ling F L, Li Z Y, Bai L N, Tian X, Chen E X and Yang Y T. 2011. Rice mapping using ALOS PALSAR dual polarization data. *Journal of Remote Sensing*, 15(6): 1221-1234 (凌飞龙, 李增元, 白黎娜, 田昕, 陈尔学, 杨永恬). 2011. ALOS PALSAR 双极化数据水稻制图. *遥感学报*, 15(6): 1221-1234 [DOI: 10.11834/jrs.20110019]
- Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, Krieger G, Hajnsek I and Papathanassiou K P. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1): 6-43 [DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301]
- Prada C and Fink M. 1994. Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media. *Wave Motion*, 20(2): 151-163 [DOI: 10.1016/0165-2125(94)90039-6]
- Reigber A and Moreira A. 2000. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2142-2152 [DOI: 10.1109/36.868873]
- Tsang L, Kong J A and Shin R T. 1985. Theory of Microwave Remote Sensing. New York: Wiley-Interscience Press
- Tsang L, Kong J A, Ding K H and Ao C O. 2001. Scattering of Electromagnetic Waves, Volume II: Numerical Simulations. New York: Wiley
- Ulaby F T and Long D G. 2014. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Ann Arbor: University of Michigan Press
- van Zyl J and Kim Y. 2011. Synthetic Aperture Radar Polarimetry. New York: Wiley
- Wang C, Zhang H, Tang Y X, Zhang B, Wu F and Wu H A. 2009. Exploration and practice of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) research. *Journal of Remote Sensing*, 13(S1): 226-236 (王超, 张红, 汤益先, 张波, 吴樊, 吴宏安). 2009. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)研究的探索与实践. *遥感学报*, 13(S1): 226-236 [DOI: 10.11834/jrs.20090030]
- Yavuz M E and Teixeira F L. 2005. A numerical study of time-reversed UWB electromagnetic waves in continuous random media. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4: 43-46 [DOI: 10.1109/LAWP.2005.844117]
- Yavuz M E and Teixeira F L. 2008. Space-frequency ultrawideband time-reversal imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(4): 1115-1124 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.915755]
- Yousefina M, Ebrahimzadeh A, Dehmollaian M and Madannejad A. 2018. A time-reversal imaging system for breast screening: theory and initial phantom results. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65(11): 2542-2551 [DOI: 10.1109/TBME.2018.2807799]
- Yu L L, Lai T, Zhao Y J and Chen J H. 2013. Joint estimation scheme of spaceborne synthetic aperture radar imaging parameters. *Journal of Remote Sensing*, 17(5): 1206-1222 (于龙龙, 赖涛, 赵拥军, 陈建宏). 2013. 星载 SAR 成像参数联合估计方法. *遥感学报*, 17(5): 1206-1222 [DOI: 10.11834/jrs.20132229]

Comparison of performance of radar imaging under condition of obscured by random media

YI Tieyan^{1,2}, CHEN Kunshan¹, LIU Yu¹

1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Radar imaging of objects obscured by random media is an important issue because of its wide application in the fields of geography, medicine, and the military. However, the echo signals from the observed target(s) may be severely distorted because of the presence of random media (e. g., vegetation, atmospheric turbulence, biological tissues, or walls), thereby eventually degrading imaging

quality. To obtain higher resolution, imaging technology that works in the millimeter wave or even a higher frequency band is desirable. However, the electromagnetic wave in this frequency band is more heavily affected by random media and is more susceptible to attenuation, which hinders the application of millimeter wave radar remote sensing. This limitation further highlights the urgency of research on the imaging of objects obscured by random media. Therefore, evaluating and improving the imaging performance fully and ultimately are especially important.

Synthetic Aperture Radar (SAR) technology has been widely used in many fields, especially for remote sensing, since its introduction in the 1950s. Scholars have proposed different imaging algorithms and used the obtained data to analyze the dielectric properties and geometric characteristics of the observed target (e.g., INSAR, POL-SAR, POL-INSAR, and TOMO-SAR). Alternatively, some imaging technology employs the time symmetry of the field (electromagnetic or acoustics) wave equation and the reciprocity of the Green's function to locate and imaging the targets. In particular, the Time Reversal (TR) method allows us to selectively focus on different targets separately, whereas the Time Reversal-Multiple Signal Classification (TR-MUSIC) method improves the imaging resolution greatly. However, current studies are often limited to a specific field, and research on the comparison of the performance of different methods is relatively rare. Therefore, in this paper, these typical radar imaging methods are selected to evaluate their performance toward imaging the target obscured by random media. Given that the target is obscured by random media, describing the effects caused by random media on the propagation of the electromagnetic wave is necessary. According to the radiation transfer equation, the attenuation of electromagnetic waves caused by random medium is related to optical thickness, which is equal to the sum of the scattering and absorption thickness. The model will be used to describe the interaction of electromagnetic waves with random media. For quantitative evaluation, 3 dB beam-width and the geometric location of a point target response are used.

Although the results in the three methods are all degraded by the presence of random media, TR-MUSIC performs the best followed by SAR and TR. The effects of scattering thickness is the main factor that causes imaging degradation, whereas the degradation caused by absorption thickness is very weak. In summary, this phenomenon is due to the clutter enhancement from random media when the scattering thickness increases, while the effects of absorption thickness correspond to the energy of electromagnetic waves being absorbed. Among the three techniques, TR and TR-MUSIC can suppress the grating lobes better than SAR does under a sparse array, and TR-MUSIC delivers the best imaging performance.

Considering the advantages of TR-MUSIC in the performance and the side lobe suppression, we focus on improving its performance further. Based on theoretical analysis, some centrally located array elements are removed to undermine clutters, and better imaging results are obtained for TR-MUSIC.

Key words: radar imaging, random medium, comparative analysis, Synthetic Aperture Radar (SAR), time reversal imaging

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 41531175 ;41590853)