

一种基于回波相关的无源合成孔径雷达成像方法

张璇 汪玲*

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

摘要: 利用机会照射源的无源雷达因为可以解决频带拥挤和具有良好的电子对抗性能,是雷达领域的一个研究热点。鉴于大多数机会照射源发射窄带或超窄带的连续波信号,该文研究采用窄带连续波信号的无源合成孔径雷达(SAR)成像。通过不同接收机回波之间进行相关,建立成像的数据模型,并给出一种滤波反投影(FBP)成像算法,详细分析了影响该成像方法分辨率的因素。通过仿真实验,验证了基于回波相关和FBP的无源SAR成像方法。该方法无需发射机位置信息,适用于任意载机飞行轨迹。

关键词: 无源雷达;合成孔径雷达;成像;滤波反投影;多普勒

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1511-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00704

An Echo-correlation Based Passive Imaging Method for Synthetic Aperture Radar

Zhang Xuan Wang Ling

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Due to the capability of solving the band crowd and good performance in electromagnetic countermeasure, passive radar using illuminators of opportunity is an active research area in recent years. Taking into account the fact that most illuminators of opportunity transmit narrowband or ultra-narrowband Continuous Wave (CW) waveforms, a novel image formation method is presented for passive synthetic aperture radar (SAR) using narrowband CW waveforms. First, the data model is built up for imaging by correlating the signals received from different airborne receivers. Then an image formation method is presented using the Filtered-BackProjection (FBP) technique. Various potential factors that influence the quality of the imaging are analyzed. Finally, numerical simulations demonstrate the performance of the echo-correlation-and-FBP based passive SAR imaging method. This method does not require a priori knowledge about the transmitter locations and is applicable to the case where the radars are travelling along arbitrary flight trajectories.

Key words: Passive radar; SAR; Imaging; Filtered-BackProjection (FBP); Doppler

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)通过发射大时间带宽积信号获得距离高分辨,利用平台运动等效合成大天线孔径实现方位向高分辨,已广泛应用于军用和民用领域。无源雷达由于其优越的隐蔽性、灵活性一直是雷达领域的热点。近年来,城市区域广播台、电视台、移动通信基站等民用机会照射源的数目迅速增加,为基于机会辐射源的无源雷达提供了更为广阔的发展前景^[1-4]。

考虑到多数机会照射源,如广播台和电视信号基站传输带宽较窄,甚至为单一频率的连续波信号,因此本文以单频连续波信号为例,探讨窄带连续波

体制下的无源合成孔径雷达成像算法。有别于传统SAR,利用窄带连续波信号的无源SAR成像依靠该类信号所提供的高多普勒分辨率进行成像。

本文研究一种利用机会照射源的无源合成孔径雷达成像算法^[5-6]。假设有多个接收机,将从一个接收机接收到的信号经过时间平移后与另一个接收机接收到的经过时间平移和尺度变换后的信号做相关,该相关数据正是场景辐射率在无源等多普勒线上的投影,然后对相关信号进行滤波反投影重建场景辐射率^[7]。现有的无源雷达系统均建立在已知发射机位置和波形的假设下^[1-4,8-10],而该无源成像方法不需要发射机位置和波形的先验信息。此外该方法还具备以下优势:(1)不要求接收天线具有良好的方向性;(2)适用于静止或运动的机会照射源;(3)适用于一个或多个机载接收机;(4)适用于接收平台飞行轨迹任意和非平坦地形的非理想成像环境。

2011-07-08 收到, 2012-02-17 改回

国家自然科学基金(61001151)资助课题

*通信作者: 汪玲 tulip_wling@nuaa.edu.cn

本文首先在第2节中建立回波信号模型,并在此基础上建立用于成像的回波相关模型;在第3节中采用滤波反投影方法重建场景辐射率,分析影响成像质量的因素;第4节中通过仿真实验对本文给出的无源SAR成像方法进行验证;第5节为结论。

2 基于回波相关的成像信号模型

如图1所示,假设场景中有一对机载接收机,分别沿轨迹 $\gamma_1(t)$ 和 $\gamma_2(t)$ 飞行,固定的单频机会辐射源位于 \mathbf{T} ,发射信号为单频连续波 $e^{-i\omega_0 t}$,地面场景反射率为 $\rho(\mathbf{z})(\mathbf{z} \in \mathbb{R}^2)$,则雷达回波信号表示为

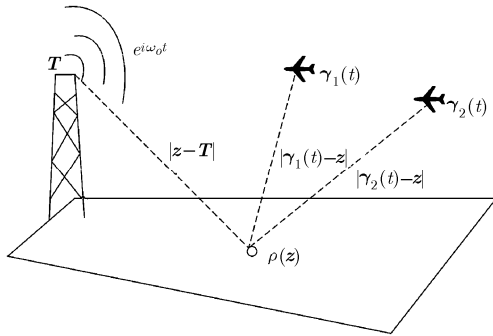


图1 无源SAR成像算法的几何关系示意图

$$S_i(t) \approx \int \frac{e^{-i\omega_0[t-(|\gamma_i(t)-z|+|z-T|)/c_0]}}{(4\pi)^2 |\gamma_i(t)-z| |z-T|} \omega_0^2 A'(z) \rho(z) dz, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

其中 c_0 代表电磁波速率, ω_0 为载频, $A'(z)$ 为与发射和接收天线方向性图有关的幅度分量

$$A'(z) = J_{tr}(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{T}) J_{rc}(\hat{\mathbf{z}} - \gamma_i(t)), \quad i=1, 2 \quad (2)$$

其中 J_{tr} 和 J_{rc} 分别为发射和接收天线波束方向性图, $\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{z}/|\mathbf{z}|$ 表示在 $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^3$ 方向上的单位向量。

将一对接收机接收到的回波信号按下式相关:

$$C_{12}(\tau', \tau, \mu) = \int S_1(t + \tau') S_2^*(\mu t + \tau) \phi(t) dt \quad (3)$$

其中 τ 和 τ' 为时间平移量, μ 为尺度变化因子, $\phi(t)$ 为窗函数,它决定了参与成像的信号长度,*表示复共轭。如果只有一个接收机,可对该接收机在不同时刻接收到的回波信号做自相关,即得到 C_{11} 。

将式(1)代入式(3)中,假设场景反射率 $\rho(\mathbf{z})$ 和发射天线方向性图 J_{tr} 均满足统计独立条件,进行以下非相干近似^[10]:

$$C_\rho(\mathbf{z}, \mathbf{z}') = E[\rho(\mathbf{z})\rho^*(\mathbf{z}')] = R_\rho(\mathbf{z})\delta(\mathbf{z} - \mathbf{z}') \quad (4)$$

$$C_{J_{tr}}(\omega_0, \mathbf{z}, \mathbf{z}', \mathbf{T}) = E[J_{tr}(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{T}) J_{tr}^*(\hat{\mathbf{z}}' - \mathbf{T})] = R_{J_{tr}}(\omega_0, \mathbf{z}, \mathbf{z}', \mathbf{T})\delta(\mathbf{z} - \mathbf{z}') \quad (5)$$

其中 R_ρ 为场景辐射率, $R_{J_{tr}}$ 为机会辐射源发射功率。

对式(3)做必要近似,并对 \mathbf{z}' 做积分,整理后得

$$E[C_{12}(\tau', \tau, \mu)] = \int e^{-i\varphi_{12}(\mathbf{z}, t, \tau', \tau, \mu)} A_{12}(\mathbf{z}, t, \tau', \tau, \mu) R_\rho(\mathbf{z}) dz dt \quad (6)$$

其中

$$\varphi_{12}(\mathbf{z}, t, \tau', \tau, \mu) = \omega_0 t \left[1 - \frac{(\overline{\gamma_2(\tau)} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau)}{c_0} \right] \cdot [S_{12}(\tau', \tau, \mathbf{z}) - \mu] \quad (7)$$

$$A_{12}(\mathbf{z}, t, \tau', \tau, \mu) = \frac{\omega_0^4}{(4\pi)^4} \frac{e^{-i\omega_0[\tau' - \tau - (|\gamma_1(t+\tau') - \mathbf{z}| - |\gamma_2(\mu t + \tau) - \mathbf{z}|)/c_0]}}{|z - \mathbf{T}|^2 |\gamma_1(t + \tau') - \mathbf{z}| |\gamma_2(\mu t + \tau) - \mathbf{z}|} \cdot J_{rc}(\hat{\mathbf{z}} - \gamma_1(t)) J_{rc}^*(\hat{\mathbf{z}} - \gamma_2(t)) R_T(\mathbf{z}) \phi(t) \quad (8)$$

$$S_{12}(\tau', \tau, \mathbf{z}) = \frac{1 - \frac{(\overline{\gamma_1(\tau')} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_1(\tau')}{c_0}}{1 - \frac{(\overline{\gamma_2(\tau)} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau)}{c_0}} \approx 1 + \left[\frac{(\overline{\gamma_2(\tau)} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau) - (\overline{\gamma_1(\tau')} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_1(\tau')}{c_0} \right] \quad (9)$$

令 $S_{12}(\tau', \tau, \mathbf{z}) = \mu$,两边同乘以 ω_0 ,整理后得到

$$\frac{\omega_0}{c_0} \left[\frac{(\overline{\gamma_1(\tau')} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_1(\tau') - (\overline{\gamma_2(\tau)} - \mathbf{z}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau)}{c_0} \right] = (1 - \mu)\omega_0 \quad (10)$$

式(10)中,方括号内的项代表两无源接收机在视线方向上的速率之差,乘以系数 ω_0/c_0 后,等号左侧项为两接收机正投影成像多普勒频率之差,因此定义其为在频率 ω_0 下的无源多普勒因子,并定义满足式(10)的点 \mathbf{z} 所形成的曲线为无源等多普勒线,即 $F_{12}(\tau', \tau, \mu) = \{\mathbf{z}: S_{12}(\tau', \tau, \mathbf{z}) = \mu\}$ 。式(7)中无源等多普勒线上的点均满足: $S_{12}(\tau', \tau, \mathbf{z}) = \mu \Rightarrow \varphi_{12} = 0$,因此相关回波信号实质上是场景辐射率 R_ρ 在无源等多普勒线上的投影。信号经过相关处理后,相位 φ_{12} 不包括任何与发射机有关的参量,使基于该相关信号模型成像不需要发射机相关信息。

在合作与非合作机会辐射源情况下,回波相关信号模型的表达形式是一致的,如式(6)所示。不同的是在合作情况下发射机的功率确定已知,式(5)中 R_T 由发射机的实际功率代替。

3 滤波反投影(FBP)的成像方法

由于相关回波信号 C_{12} 是场景辐射率在无源等多普勒线上的投影,可以通过将相关数据反投影回无源等多普勒线以重建场景辐射率。设重建场景辐射率为 $\tilde{R}_\rho(\mathbf{z})$,则

$$\tilde{R}_\rho(\mathbf{z}) = \int \mathcal{K}_{12}[E[C_{12}]](\mathbf{z}, \tau') d\tau' = \int L_{12}(\mathbf{z}, \mathbf{z}', \tau') R_\rho(\mathbf{z}') dz' d\tau' \quad (11)$$

其中

$$\mathcal{K}_{12}[E[C_{12}]](z, \tau') = \int e^{i\varphi_{12}(z, t, \tau', \tau, \mu)} Q_{12}(z, \tau', \tau, \mu) \cdot E[C_{12}(\tau', \tau, \mu)] dt d\tau d\mu \quad (12)$$

为滤波反投影算子。 Q_{12} 为滤波器：

$$L_{12}(z, z', \tau') = \int e^{i[\varphi_{12}(z, t, \tau', \tau, \mu) - \varphi_{12}(z', t', \tau', \tau, \mu)]} Q_{12}(z, \tau', \tau, \mu) A_{12}(z', t, \tau', \tau, \mu) dt' d\tau d\mu \quad (13)$$

为 \mathcal{K}_{12} 的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)。

对式(13)中 $dt'd\mu$ 的积分应用驻定相位原理^[7],

令 $\partial_{t', \mu} \Phi_K = 0$, 计算得到满足驻定相位点的等式

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{1 - (\overline{\gamma_1(\tau') - z'}) \cdot \dot{\gamma}_1(\tau') / c_0}{1 - (\overline{\gamma_2(\tau) - z'}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau) / c_0} = S_{12}(\tau', \tau, z') \\ t' &= t \frac{1 - (\overline{\gamma_2(\tau) - z'}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau) / c_0}{1 - (\overline{\gamma_2(\tau) - z'}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau) / c_0} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

积分后, 式(13)变为

$$L_{12}(z, z', \tau') = \int e^{-i\omega_0[1 - (\overline{\gamma_2(\tau) - z'}) \cdot \dot{\gamma}_2(\tau) / c_0][S_{12}(\tau', \tau, z') - S_{12}(\tau', \tau, z)]} \cdot Q_{12}(z, \tau', \tau, S_{12}) A_{12}(z', t, \tau', \tau, S_{12}) dt d\tau \quad (15)$$

在 $z = z'$ 处进行线性展开, 即 $S_{12}(\tau', \tau, z')$

$-S_{12}(\tau', \tau, z) \approx \nabla_z S_{12}(\tau', \tau, z) \cdot (z' - z)$, PSF为

$$L_{12}(z, z', \tau') = \int e^{-it\Xi_{12}(\tau', \tau, z)(z' - z)} \cdot Q_{12}(z, \tau', \tau) A_{12}(z, t, \tau', \tau) dt d\tau \quad (16)$$

而

$$\Xi_{12}(\tau', \tau, z) = \frac{\omega_0}{c_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \partial\psi(z)/\partial z_1 \\ 0 & 1 & \partial\psi(z)/\partial z_2 \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{1}{|\overline{\gamma_1(\tau') - z}|} \dot{\gamma}_{1,\perp}(\tau') - \frac{S_{12}(\tau', \tau, z)}{|\overline{\gamma_2(\tau) - z}|} \dot{\gamma}_{2,\perp}(\tau) \right] \quad (17)$$

其中 $\gamma_i = [\gamma_i^{z_1}, \gamma_i^{z_2}, \gamma_i^{\psi(z)}]^T$, $\psi(z)$ 为地形因子, $\dot{\gamma}_{i,\perp}$ 表示接收机速率在与其视线垂直的平面上的投影。

式(17)做变量代换 $(t, \tau) \rightarrow \xi_{12} = t\Xi_{12}(\tau', \tau, z)$ 得

$$L_{12}(z, z', \tau') = \int_{\Omega_{12, \tau', z}} e^{-i\xi_{12}(z' - z)} Q_{12}(z, \tau', \xi_{12}) \cdot \eta(z, \tau', \xi_{12}) A_{12}(z, \tau', \xi_{12}) d\xi_{12} \quad (18)$$

其中 $\eta(z, \tau', \xi_{12})$ 是变量代换产生的雅克比(Jacobi)行列式。观察式(11), 为了较好重现场景辐射率, 选择滤波器 Q_{12} 的最佳准则是使 $L(z, z', \tau')$ 为Delta函数, 即 $L(z, z', \tau') \approx \delta(z - z')$ 。令

$$Q_{12}(z, \tau', \tau) = \left| \eta(z, \tau', \xi_{12}) \right|^{-1} \left| A_{12}(z, t, \tau', \tau, \mu) \right|^{-1} \quad (19)$$

从而在幅度上补偿 $A_{12}(z, t, \tau', \tau, \mu)$ 以及变量代换后产生的 $\eta(z, \tau', \xi_{12})$ 。在式(18)中,

$$\Omega_{12, \tau', z} = \left\{ \xi_{12} = t\Xi_{12}(\tau', \tau, z) \mid A_{12}(z, t, \tau', \tau, \mu) \neq 0, (t, \tau', \tau) \in (\mathbb{R}^+, \mathbb{R}, \mathbb{R}) \right\} \quad (20)$$

表示在某一固定时间平移量 τ' 下由机载接收机采集的部分数据采集空间。式(18)中, 由于积分范围 $\Omega_{12, \tau', z}$ 的限制, 成像PSF是理想Delta函数的带限近似。数据采集空间越大, PSF越逼近理想的Delta函数, 即分辨率越高。观察式(20), 部分数据采集空间大小取决于由 ξ_{12} 矢量组成的集合的大小, 即取决于 ξ_{12} 方向的多样性及其模值。观察式(17)和式(20), ξ_{12} 与信号积累时间 t 和发射信号载频 ω_0 , 载机位置 $\gamma_i(\tau')$ 和速度 $\dot{\gamma}_{i,\perp}(\tau')$ 等有关, 由此推断影响重建图像质量的主要因素有: 机载接收机的飞行参数(速度和轨迹等)、照射源发射信号频率、信号积累时间(即窗函数长度)等。另一方面, 该方法本质是利用发射波形的多普勒分辨率, 成像是回波相关数据向无源等多普勒线的反投影, 最终成像结果可以看作由不同 τ', τ, μ 对应的无源等多普勒线的交集构成。因此无源等多普勒线的宽度决定了最终成像的分辨率, 而其宽度亦取决于接收机轨迹、发射信号的载频和信号积累时间等因素。

4 仿真

仿真场景大小为 $22 \times 22 \text{ km}^2$, 离散为 128×128 像素点, 其中像素点[1,1]和像素点[128,128]分别对应于场景[0,0,0] km和[22,22,0] km处。假设机会照射源 \mathbf{T} 位于[0,0,6.5] km, 发射频率为 f_0 的单频信号。一对机载接收机分别沿轨迹 $\gamma_1(s) = \gamma_c(s)$ ($\gamma_c(s) = (11 + 11 \cos(s), 11 + 11 \sin(s), 6.5) \text{ km}$)和 $\gamma_2(s) = \gamma_c(s - \pi/6)$ 匀速飞行, 速率 $v = 220 \text{ m/s}$, 时间平移量 τ 的采样频率为 $f_\tau = 0.627 \text{ Hz}$ 。窗函数为汉宁窗, 长度为 L_ϕ 。

在场景的[11.6,5.8,0] km处, 设置一个反射率为1的散射点, 对应于图2(a)中的像素点[68,34]; 在场景中设置若干个的具有单位反射率的分布目标, 对应于图2(b)中的 $344 \times 344 \text{ m}^2$ 的方形区域。

在点目标的成像中, 设定如下仿真参数: (1) $f_0 = 800 \text{ MHz}$, $L_\phi = 33 \text{ ms}$; (2) $f_0 = 0.4 \text{ MHz}$, $L_\phi = 33 \text{ ms}$; (3) $f_0 = 800 \text{ MHz}$, $L_\phi = 2.64 \text{ ms}$ 。发射机均为合作式, 且重建PSF时 $\tau' = 0 \text{ s}$ 。仿真结果成功验证了信号载频 f_0 、窗函数长度 L_ϕ 对成像性能的影响图4相较于图3, 载频 f_0 降低, 成像效果变差。因此利用具有较高载波频率的机会照射源信号成像质量较好。图5相较于图3窗函数长度减少, 重建场景中的背景杂波增强, 图像对比度下降。因此, 信号积累时间越长, 成像质量越好。

在分布式目标的成像中, 设定如下仿真参数:

(1)合作机会照射源, $\tau' = 235.6194 \text{ s}$; (2)合作机会照射源, 在 $\tau' \in [0, 314.1593] \text{ s}$ 内均匀取16个 τ' 的数

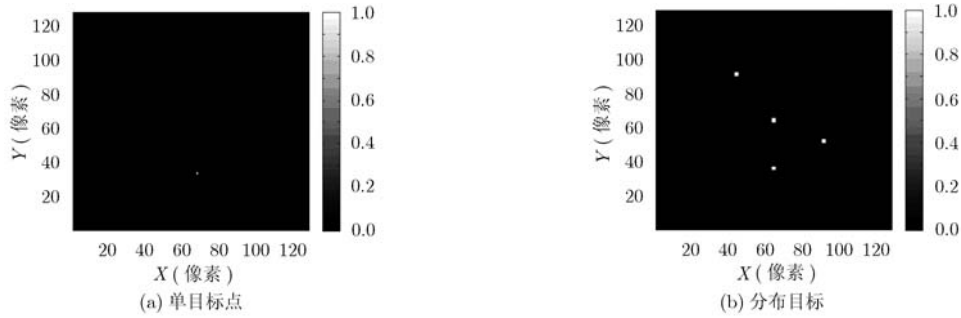


图 2 仿真采用的目标点

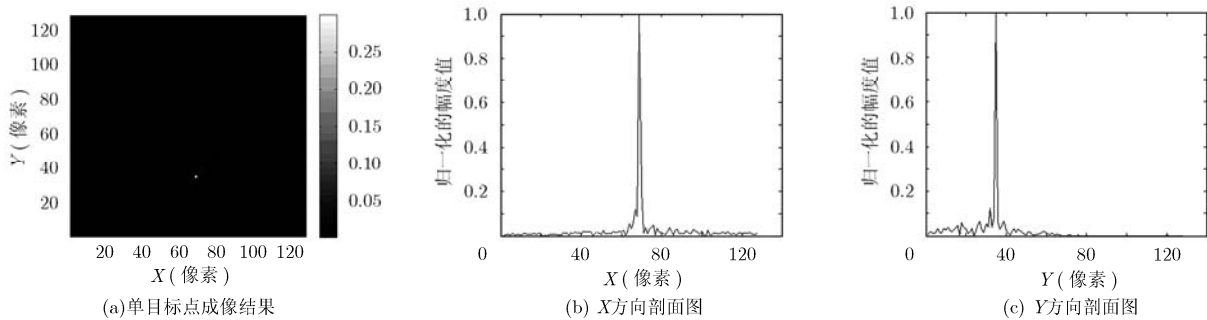


图 3 合作机会照射源发射频率为 800 MHz 的 CW 信号，窗函数长度为 33 ms, $\tau' = 0$ s 时的成像结果

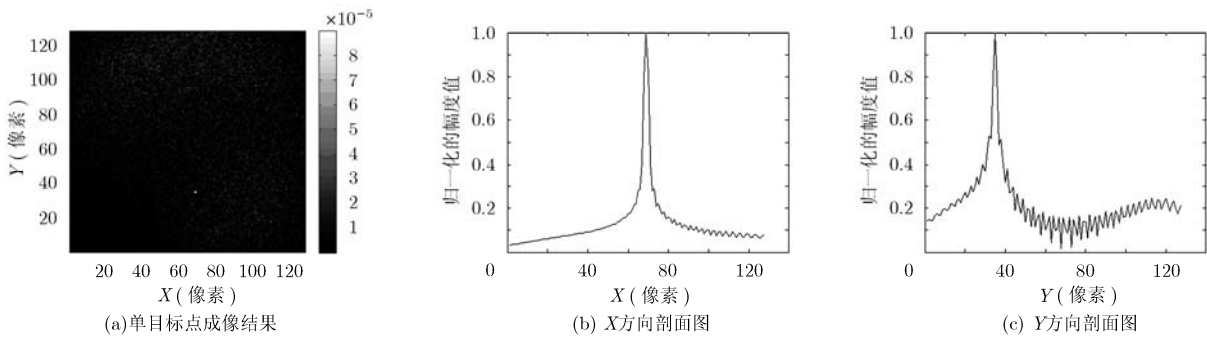


图 4 合作机会照射源发射频率为 0.4 MHz 的 CW 信号，窗函数长度为 33 ms, $\tau' = 0$ s 时的成像结果

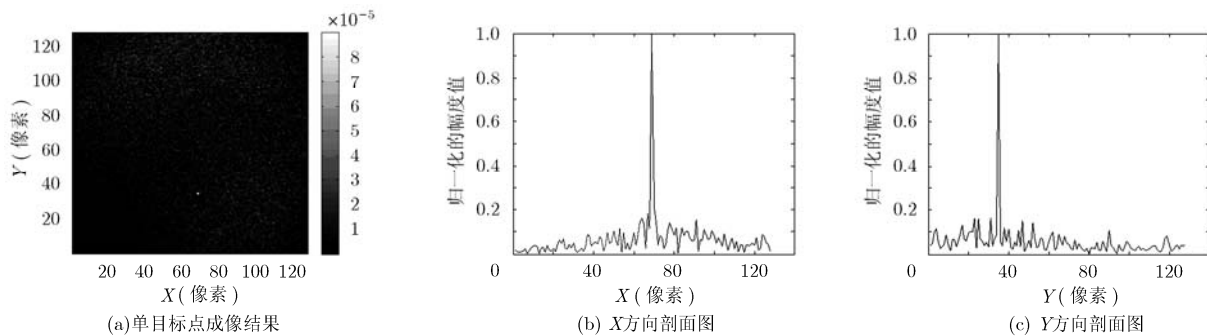


图 5 合作机会照射源发射频率为 800 MHz 的 CW 信号，窗函数长度为 2.64 ms, $\tau' = 0$ s 时的成像结果

据叠加成像；(3)非合作机会照射源，在 $\tau' \in [0, 314.1593]$ s 内均匀取 16 个 τ' 的数据叠加成像。发射机载频和窗函数长度均相同。比较图 6(a)和图 6(b)发现：多个时刻重建图像叠加能够得到优于某一固定时刻的成像结果。这是由于多个时刻采集到的数据形成的数据采集空间要远大于某一时刻的部

分数据采集空间，如图 6(a)，图 6(b)右下角所示。图 6(c)说明：利用非合作机会照射源，分布目标能被重建在正确的位置，但是由于无法正确补偿距离衰减项，目标幅度随距离衰减而减弱，使距照射源较近的目标亮度高于远离照射源的目标亮度，如图中标注所示。

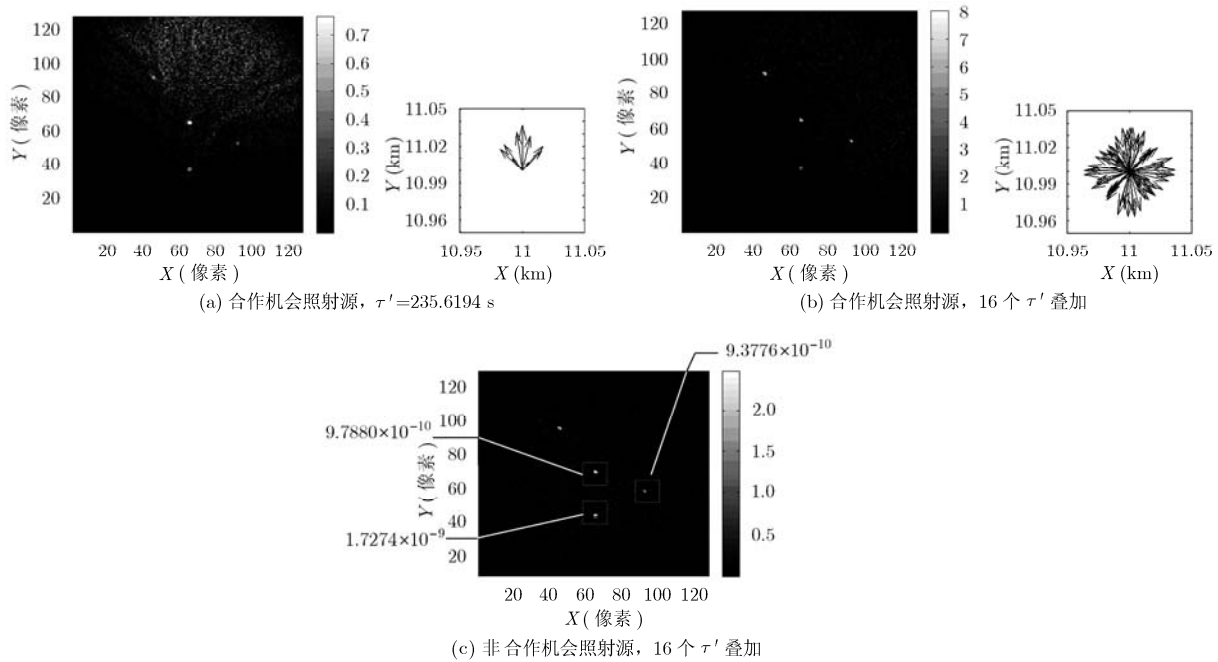


图6 机会照射源发射频率为 800 MHz 的 CW 信号, 窗函数长度为 67 ms 时的分布目标成像结果
(注: 图 6(a), 6(b)右下角为场景中心目标点的部分数据采集空间示意图)

5 结束语

本文讨论了一种新的基于回波相关和滤波反投影的无源合成孔径雷达成像算法。该算法建立了基于回波相关的成像数据模型, 并对相关数据进行滤波反投影, 重建场景辐射率。通过对数据采集空间的分析得出影响成像质量的主要因素: 发射信号的载频、信号积累时间、接收机飞行轨迹等。多组仿真验证了该成像算法的可行性和理论分析的正确性。本文讨论的场景中机会照射源位置固定且信号为单频连续波的特殊情况, 经扩展, 该算法也适用于存在多个固定或运动的机会照射源的场景, 发射信号也不局限于单频 CW 波形。这些研究将在下一步工作中展开。

致谢 感谢美国伦斯勒理工学院 Birsan Yazici 教授的指导和建议。

参考文献

- [1] Canini F, Di Lallo A, Timmoneri L, *et al.* Use of Digital-Television terrestrial(DTV) signals for passive radars[C]. Radar Symposium (IRS), 2010 11th International, Vilnius, Lithuania, June 2010: 1-4.
- [2] Chetty K, Woodbridge K, Guo Hui, *et al.* Passive bistatic WiMAX radar for marine surveillance[C]. Proc. of 2010 IEEE Radar Conference, Washington DC, USA, May 2010: 188-193.
- [3] Sun Hong Bo, Tan D K P, Lu Yi Long, *et al.* Applications of passive surveillance radar system using cell phone base station illuminators[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010, 25(3): 10-18.
- [4] Chetty K, Smith G, Guo Hui, *et al.* Target detection in high clutter using passive bistatic WiFi radar[C]. Proc. of 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, California USA, May 2009: 1-5.
- [5] Yarman C E and Yazici B. Synthetic aperture hitchhiker imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(11): 2156-2173.
- [6] Yarman C E, Wang L, and Yazici B. Doppler synthetic aperture hitchhiker imaging[J]. *Inverse Problems*, 2010, 26(6): 65-66.
- [7] Natterer F and Wubbeling F. *Mathematical Methods in Image Reconstruction*[M]. Philadelphia, PA, SIAM, 2001: 81-99.
- [8] Brown J, Woodbridge K, Stove A, *et al.* Air target detection using airborne passive bistatic radar[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(20): 1396-1397.
- [9] Olsen K E, Woodbridge K, and Andersen I A. FM based passive bistatic radar target range improvement — Part II[C]. Radar Symposium (IRS), 2010 11th International, Vilnius, Lithuania, June 2010: 1-8.
- [10] Barrett H H and Myers K J. *Foundations of Image Science*[M]. NJ, Hoboken: Wiley-Interscience, 2004, Chapter7-8.

张 璇: 女, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为无源雷达成像。

汪 玲: 女, 1977 年生, 副教授, 研究方向为合成孔径成像、无源成像、分布式孔径成像。