0254-6124/2019/39(6)-816–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XIA Mingfei, HU Shengbo, MO Jinrong, SHI Yanfeng, YAN Tingting, LEI Tao, QIN Chanchan. Effects of geometry configurations on ambiguity function for cluster flight netted radar (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(6): 816-823. DOI:10.11728/cjss2019.06.816

簇飞行网络雷达几何构型对模糊函数的影响 *

夏明飞[1,2] 胡圣波[1] 莫金容[1] 施燕峰[1]
鄢婷婷[1] 雷 涛[1] 秦婵婵[1]

1(贵州师范大学智能信息处理研究所 贵阳 550025)

2(西昌卫星发射中心 西昌 615000)

摘 要 提出了集分离航天器与网络雷达为一体的簇飞行网络雷达概念. 通过引入双基地雷达模糊函数, 给出簇飞行网络雷达模糊函数定义和计算步骤, 研究了雷达几何构型和簇飞行雷达之间相对有界基线对模糊函数的影响. 数值计算结果表明: 与单基地雷达模糊函数相比, 网络雷达模糊函数主瓣宽度明显变窄, 簇飞行模式下可变基线对雷达模糊函数的影响不大; 雷达模糊函数应主要考虑目标飞行速度和接收距离变化的影响. 最后, 给出了簇飞行网络雷达模糊函数的一种上界.

关键词 簇飞行, 距离有界, 模糊函数, Jensen 不等式, 近圆轨道

中图分类号 P 236, TN 95

Effects of Geometry Configurations on Ambiguity Function for Cluster Flight Netted Radar

XIA Mingfei[1,2] HU Shengbo[1] MO Jinrong[1] SHI Yanfeng[1]
YAN Tingting[1] LEI Tao[1] QIN Chanchan[1]

1(*Institute of Intelligent Information Processing, Guizhou Normal University, Guiyang* 550025)

2(*Xichang Satellite Launch Center, Xichang* 615000)

Abstract Network radar is composed of several space-separated, independent and cooperative radars. Compared with traditional single base station radar and dual base station radar, network radar has many advantages. In this paper, the concept of cluster flight netted radar integrated of the cluster flight spacecraft and the netted radar is proposed. The geometry of bistatic radar, the geometry of near-circular orbit cluster flight bistatic radar and the topology model of near-circular orbit cluster flight netted radar are calculated. The definition and calculation steps of the ambiguity function for the cluster flight netted radar are given using the ambiguity function for the conventional bistatic radar. The effects of geometry configuration and the variable baseline on ambiguity function

* 国家自然科学基金项目资助 (61561009)
2018-07-05 收到原稿, 2019-04-02 收到修定稿
E-mail: boyxmfei@126.com

are presented. The numerical calculation shows that the main lobe width of the ambiguity function of the netted radar is obviously narrowed compared with the single radar, and the variable baseline has little influence on the radar ambiguity function. The radar ambiguity function is mainly affected by the target flight speed and the distance. Finally, an upper bound of ambiguity function of cluster flight netted radar is given.

Key words Cluster flight, Distance bounded, Ambiguity function, Jensen Inequality, Near circular orbit

0 引言

作为一种分布式雷达, 网络雷达由多个空间分离、相互独立且相互协作的雷达组成. 相对于传统的单基站雷达和双基站雷达, 网络雷达具有很多优势: 由于采用多个雷达, 通过优化设计网络雷达几何结构, 可以优化覆盖区域, 满足特定覆盖需要; 可以获得空间分集增益, 增加系统灵敏度, 具有抗隐身能力; 系统的抗毁性和可靠性较高, 不会由于个别雷达故障或损坏而导致系统崩溃 [1−4]. 近年来分布式天基雷达已列入多个国家的重点发展计划 [5−7].

簇飞行航天器因其灵活、响应快、成本低和生命周期长等优点 [8], 已成为分布式空间网络领域研究的热点. 实现簇飞行航天器与网络雷达的融合, 将在空间对地观测等领域发挥重要作用. 因此, 本文提出了集簇飞行航天器与网络雷达为一体的簇飞行网络雷达概念.

模糊函数是由 Woodward 提出的分析和评估单基站雷达目标检测能力的重要工具 [9,10]. 在此基础上, Rendas 等 [11] 提出了更具有普遍意义并可应用于参数估计的模糊函数概念. 相关研究结果均表明, 由于回波时延与探测距离呈线性关系, 且多普勒频移与目标径向速度也呈线性关系, 模糊函数取决于雷达发射信号的形状, 而与雷达系统几何位置无关. 但是对于双基地雷达, 由于时延–多普勒频移平面与距离–速度平面之间的变换不是线性的, 导致双基地雷达模糊函数更复杂, 并与雷达系统几何位置密切相关, 即与发射机、目标、接收机组成的三角形几何关系密切相关 [12,13]. 多基地雷达概念提出后 [14], 多基地雷达模糊函数也得到研究 [15,16]. 其中, 通过双基地模糊函数对叠加的方法, 研究了单发射机–多接收机配置的雷达模糊函数 [15]. 研究结果表明, 多基地雷达模糊函数不但取决于雷达波形、雷达系统几何位置, 还取决于加权系数. 随着无线通信技术的发展, 多发射天线、多接收天线的 MIMO 新体制雷达研究得以进一步发展 [17−19]. 根据天线是否共地, MIMO 雷达可分为天线空间分离和共地两类 [20,21]. 其中, 天线空间分离的 MIMO 雷达可以获得空间分离增益和复用增益, 降低目标漏检率 [20,22]. 从提高雷达检测性能方面看, 此类雷达模糊函数的研究值得关注 [22,23].

通常网络雷达工作模式包括多个单基地雷达、多个双基地雷达以及其组合三种模式 [24,25]. 与多基站雷达及 MIMO 雷达相比, 网络雷达几何结构更灵活, 基线长度多样. 因此, 网络雷达模糊函数更复杂, 大多采取多个双基地雷达模式分析, 主要研究网络几何结构对模糊函数的影响 [24,25]. 对于簇飞行网络雷达, 航天器 (卫星) 节点间几何结构松散且相对距离有界 [26,27], 尽管降低了定轨难度, 但是节点间基线可变, 增加了簇飞行网络雷达模糊函数的复杂性. 因此, 基于经典的双基地雷达几何模型, 本文建立了近圆轨道簇飞行双基地雷达模型, 分析了近圆轨道簇飞行网络雷达模糊函数, 研究了几何构型对网络雷达模糊函数的影响.

1 双基地雷达几何

为描述双基地网络雷达几何构型, 建立如图 1 所示北向坐标系统 [12]. 图 1 中北向坐标系统是限制在发射机、接收机和目标构成的双基地雷达平面的二维坐标系统. 雷达基线长度为 L; 发射机和接收机的目标视角分别为 θ_{T} 和 θ_{R}; β 为双基地三角形的顶角, $\beta=\theta_{\mathrm{T}}-\theta_{\mathrm{R}}$, 当目标位于基线以北时, $\beta\in[0,\pi]$, 而当目标位于基线以南时, $\beta\in[-\pi,0]$; R_{T} 和 R_{R} 分别为发射机和接收机到目标的距离.

利用余弦定理, 计算得到的雷达电磁波总传输距离为

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{R}}+\sqrt{R_{\mathrm{R}}^2+L^2+2R_{\mathrm{R}}L\sin\theta_{\mathrm{R}}}. \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{T}}=\begin{cases}\arcsin\dfrac{R_{\mathrm{R}}\sin\theta_{\mathrm{R}}+L}{\sqrt{R_{\mathrm{R}}^2+L^2+2R_{\mathrm{R}}L\sin\theta_{\mathrm{R}}}},\\ \quad -\dfrac{\pi}{2}\leqslant\theta_{\mathrm{T}}\leqslant\dfrac{\pi}{2};\\ \pi-\arcsin\dfrac{R_{\mathrm{R}}\sin\theta_{\mathrm{R}}+L}{\sqrt{R_{\mathrm{R}}^2+L^2+2R_{\mathrm{R}}L\sin\theta_{\mathrm{R}}}},\\ \quad \dfrac{\pi}{2}\leqslant\theta_{\mathrm{T}}\leqslant\dfrac{3\pi}{2}.\end{cases} \tag{2}$$

对应的传输时延

$$\boldsymbol{\tau}(R_{\mathrm{R}},\theta_{\mathrm{R}},L)=\frac{R_{\mathrm{R}}+\sqrt{R_{\mathrm{R}}^2+L^2+2R_{\mathrm{R}}L\sin\theta_{\mathrm{R}}}}{c}. \tag{3}$$

式中, c 为电磁波传输速度.

记载频为 ω_c, 目标飞行速度为 v, 则双基地雷达多普勒频移为

$$f_{\mathrm{b}}=\frac{\omega_c v\cos\Phi}{\pi c}\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{R_{\mathrm{R}}+L\sin\theta_{\mathrm{R}}}{2\sqrt{R_{\mathrm{R}}^2+L^2+2R_{\mathrm{R}}L\sin\theta_{\mathrm{R}}}}}, \tag{4}$$

2 近圆轨道簇飞行雷达模糊函数

2.1 双基地雷达几何

簇飞行是一种分离航天器架构, 节点间几何结构松散而相对距离有界. 在整个任务生命周期内, 节点间相对距离的典型值范围为 100 m 至 100 km [26−28]. 簇飞行网络雷达基线长度也在该范围内, 并且在分析近圆轨道双基地簇飞行网络雷达几何构型时可不考虑地球曲率的影响. 假设目标在平行于地面的平面内飞行, 建立如图 2 所示三维近圆轨道双基地簇飞行网络雷达几何构型 [12].

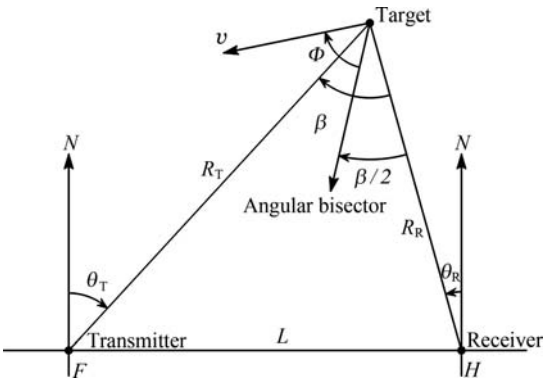

图 1 双基地雷达几何构型

Fig. 1 Bistatic radar geometry

模糊函数的传输时延和多普勒频移可分别表示如下:

$$\tau=\frac{|\boldsymbol{R}_{\mathrm{T}}|+|\boldsymbol{R}_{\mathrm{R}}|}{c}, \tag{5}$$

$$f_{\mathrm{b}}=\frac{1}{\lambda}\Big[\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{R}_{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{R}})\Big]=\frac{1}{\lambda}\Big[\frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{V}}{|\boldsymbol{R}_{\mathrm{T}}|}+\frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{R}}\cdot\boldsymbol{V}}{|\boldsymbol{R}_{\mathrm{R}}|}\Big]. \tag{6}$$

2.2 网络雷达拓扑模型

为便于分析, 考虑由 M_{T} 个发射机和 1 个共同的接收机组成簇飞行网络雷达系统. 在图 2 模型的基础上, 构建如图 3 所示 3D 网络雷达拓扑模型. 与图 2 相比, 图 3 仅增加了一个发射机, 便于将双基地雷达模型移至网络雷达场景 [12].

此外, 网络雷达系统需要解决两个主要问题. 一是发射机与接收机的时间同步, 该问题可通过高精度的卫星授时解决. 以北斗卫星为例, 其授时精度为 10 ns 量级, 且网络雷达系统发射机、接收机距离对授时信号的时延可忽略不计, 可以认为发射机与接收机时间严格同步. 二是进行正交波形选择, 以减少信号间的相互干扰.

关于正交波形选择的研究很多, 这里采用一种正交步进频率波形 [29], 有

$$u_i(t)=\sqrt{\frac{1}{T_{\mathrm{e}}}}\mathrm{rect}(t)\exp[\mathrm{j}\,2\pi(f_c+c_i\Delta f)t],\quad i=1,2,\cdots,M_{\mathrm{T}}. \tag{7}$$

式中:

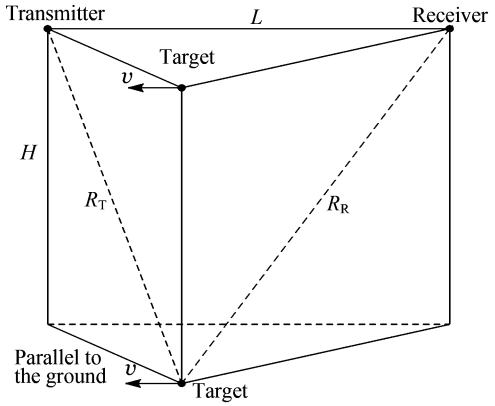

图 2 近圆轨道簇飞行双基地雷达几何构型

Fig. 2 Bistatic radar geometry for the near-circular orbit cluster flight

$$\mathrm{rect}(t)=\begin{cases}1, & 0\leqslant t\leqslant T_{\mathrm{e}},\\ 0, & \text{其他};\end{cases}$$

f_c 为基频, $c_i\Delta f$ 为第 i 个波形频率步进增量. 可以证明, $\forall i$, 当

$$\Delta f(l-i)T_e\in Z,\quad l=1,2,\cdots,M_{\mathrm{T}}$$

且 $i\neq l$ 时, 波形相互正交.

2.3 网络雷达模糊函数

解决收发同步和波形正交两个主要问题后, 可以将网络雷达处理为序列相连的双基地雷达, 网络雷达模糊函数可表示为双基地雷达模糊函数的加权和, 其计算步骤如下.

第 1 步 计算每一对双基地雷达模糊函数.

$$|\chi_i(R_{\mathrm{R}_i},\theta_{\mathrm{R}_i},L_i,v,\Phi_i,\omega_c)|^2=\left|\int_{-\infty}^{\infty}u_i(t)u_i^*(t-\tau_i)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,2\pi f_{bi}t}\mathrm{d}t\right|^2. \tag{8}$$

式中, $*$ 表示复共轭.

第 2 步 计算加权因子. 如果采用 Neyman-Pearson 接收机, 可根据接收信噪比确定加权因子. 记接收机接收到第 i 个发射机的信噪比为 ρ_i, 则对应的加权系数为 [30]

$$w_i=\frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{M_{\mathrm{T}}}\dfrac{\rho_i^2}{2(2+\rho_i)}}\frac{\rho_i^2}{2(2+\rho_i)}, \tag{9}$$

且 $\sum\limits_{i=1}^{M_{\mathrm{T}}}w_i=1$.

第 3 步 计算网络雷达的模糊函数. 由于系统是相干的, 网络雷达的模糊函数为

$$|\chi|^2=\left|\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{T}}}w_i\chi_i\right|^2. \tag{10}$$

如果采用式 (7) 所示空间正交步进频率波形, 第 i 个发射–接收机对的模糊函数为

$$\chi_i(R_{\mathrm{R}},\theta_{\mathrm{R}_i}),L,v,\Phi_i,\omega_c)=\begin{cases}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi f_{\mathrm{b}_i}(T_{\mathrm{e}}-\tau_i)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_c+c_i\Delta f)\tau_i}\cdot\\ \qquad\dfrac{\sin\pi f_{\mathrm{b}_i}(T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|)}{\pi f_{\mathrm{b}_i}(T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|)}\Big(\dfrac{T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|}{T_{\mathrm{e}}}\Big), & |\tau_i|\leqslant T_{\mathrm{e}};\\ 0, & |\tau_i|>T_{\mathrm{e}}.\end{cases} \tag{11}$$

$$|\chi_i(R_{\mathrm{R}},\theta_{\mathrm{R}_i}),L,v,\Phi_i,\omega_c)|^2=\begin{cases}\Big[\dfrac{\sin\pi f_{\mathrm{b}_i}(T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|)}{\pi f_{\mathrm{b}_i}(T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|)}\Big(\dfrac{T_{\mathrm{e}}-|\tau_i|}{T_{\mathrm{e}}}\Big)\Big]^2, & |\tau_i|\leqslant T_{\mathrm{e}};\\ 0, & |\tau_i|>T_{\mathrm{e}}.\end{cases} \tag{12}$$

3 数值分析

3.1 双基地雷达模糊函数

从式 (3) 和式 (4) 可见, 时延–多普勒频移平面与距离–速度平面之间呈非线性关系, 并完全取决于雷达几何构型, 这也决定了双基地雷达模糊函数的复杂性. 考虑单脉冲雷达情形. 假设脉冲宽度为 40 μs, 脉冲周期为 100 μs, 载频为 3×10^8 rad·s^{-1}, 基线长度为 100 km, 目标沿图 1 所示双基地雷达三角形顶角的角平分线以 600 m·s^{-1} 速度飞行, 目标距接收机的初始距离为 100 km. 图 4 是 θ_{R} 为 90° 的目标飞行场景, 图 5 为对应的雷达模糊函数; 图 6 是 θ_{R} 为 −45° 的目标飞行场景, 图 7 为对应的雷达模糊函数.

比较图 5 与图 7 可以看到: 两种双基地雷达场景大部分参数相同, 但其几何拓扑明显不同. 虽然两种模糊函数都是单峰形状, 但图 5 中单峰主要集中

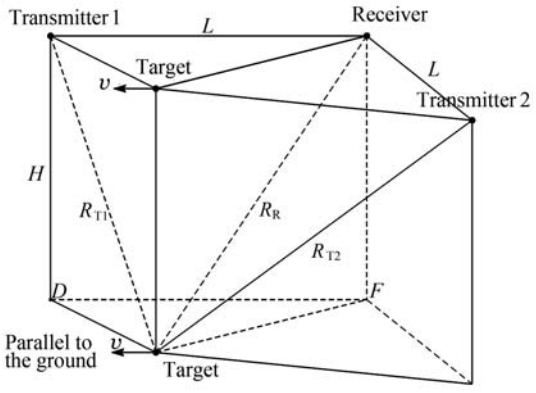

图 3 3D 近圆轨道簇飞行网络雷达拓扑

Fig. 3 Network radar topology of 3D near-circular orbit cluster flight



图 4 $\theta_{\mathrm{R}}=90°$ 时的目标飞行场景

Fig. 4 Target flight scene at $\theta_{\mathrm{R}}=90°$

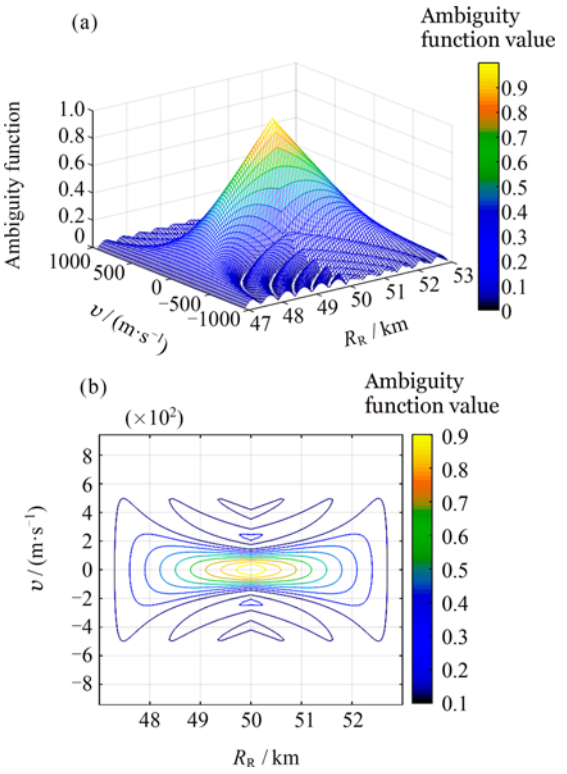

图 5 $\theta_R = 90°$ 时的双基地雷达模糊函数

Fig. 5 Bistatic radar ambiguity function at $\theta_R = 90°$

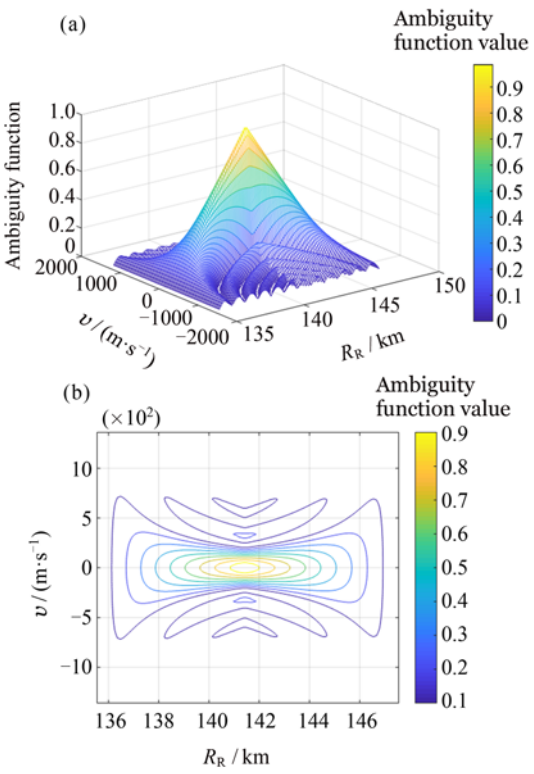

图 7 $\theta_R = -45°$ 时的双基地雷达模糊函数

Fig. 7 Bistatic radar ambiguity function at $\theta_R = -45°$

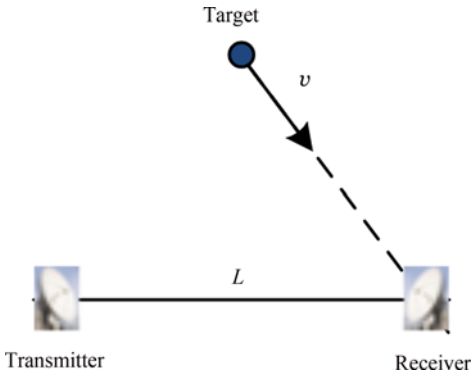

图 6 $\theta_R = -45°$ 时的目标飞行场景

Fig. 6 Target flight scene at $\theta_R = -45°$

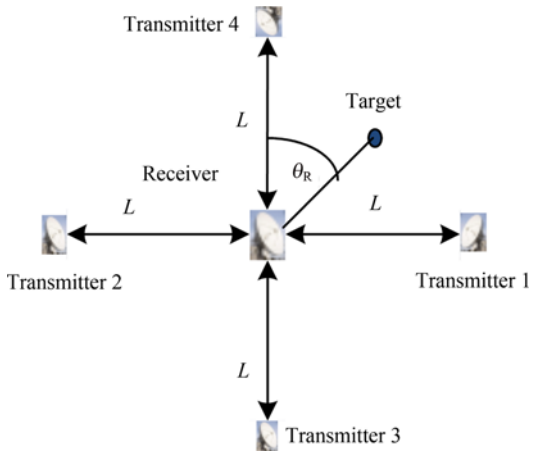

图 8 4 个发射机和 1 个接收机近簇飞行网络雷达场景

Fig. 8 Near cluster flight network radar scene with four transmitters and one receiver

在 47~53 km 接收距离和 −1000~1000 m·s^{-1} 飞行速度组成的平面上, 图 7 中单峰主要集中在 135~147 km 接收距离和 −1300~1300 m·s^{-1} 飞行速度组成的平面上. 这说明图 5 的测距和测速分辨率更高, 且双基地雷达几何拓扑直接影响模糊函数.

3.2 几何构型对网络雷达模糊函数的影响

考虑 4 个发射机和 1 个接收机的场景, 如图 8 所示. 图 8 中 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4$, 从而 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1/4$. 同样假设脉冲宽度为 40 μs, 脉冲周期为 100 μs, 载频为 3×10^8 rad·s^{-1}, 目标沿图 1 所示双基地雷达三角形顶角的角平分线以 600 m·s^{-1} 速度飞行, 目标距接收机距离为 200 km. 其他参数设置为: $\theta_R = -45°$, $D_{min} = 1$ km, $D_{max} = 100$ km.

3.2.1 基线长度

当只考虑基线长度的影响时, 由式 (1)、式 (4) 和

式 (12) 可知, 在以上场景下, 4 对双基地雷达模糊函数实际上只有发射机 1–接收机对、发射机 2–接收机对两种情况, 如图 9 和 10 所示.

通过计算可以发现, 尽管雷达基线长度变化高达 100 倍, 但是模糊函数变化限制在 0.02 以内, 即基线变化对雷达模糊函数影响不大. 这也表明簇飞行模式对雷达模糊函数影响不大. 此外, 由于簇飞行模式与目标飞行速度无关, 可以认为目标飞行速度对簇飞行模式几何拓扑影响更大. 因此, 簇飞行几何构型对网络雷达模糊函数的影响主要考虑目标飞行速度和接收距离的变化.

3.2.2 网络雷达模糊函数的界

根据 3.2.1 节中分析, 可得图 8 场景下分别沿与发射机距离和目标飞行速度所在轴的截面. 由于 4 个发射机–接收机对的模糊函数形状相似, 这里只选择发射机 1–接收机对的雷达模糊函数截面, 如图 11 所示. 图 12 为网络雷达模糊函数的截面. 比较图 11 与图 12 可以发现, 网络雷达模糊函数主瓣宽度明显变窄, 测距和测速分辨率明显提高. 从数值分析结果看, F 是关于 $f_{\rm b}$ 和 τ 的上凸函数. 根据 Jensen 不等式, 下式成立:

$$|\chi|^2=\left|\sum_{i=1}^{M_{\rm t}}w_i\chi_i\right|^2\leqslant\sum_{i=1}^{M_{\rm t}}|w_i\chi_i|^2. \tag{13}$$

图 13 给出网络雷达模糊函数与其上界的关系. 从图 13 可看出, 式 (13) 成立. 根据目标探测需求, 从理论上能够确定合适的航天器节点之间距离, 并实施航天器轨道控制.

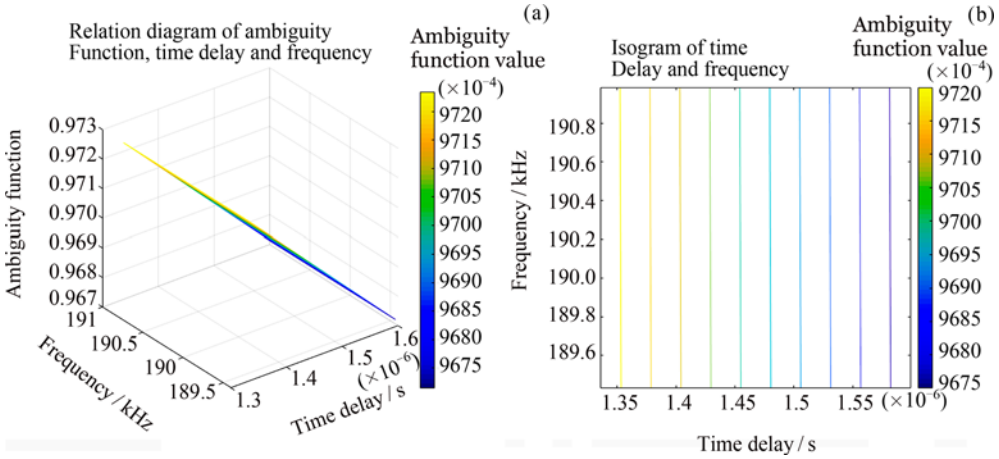

图 9 发射机 1–接收机对模糊函数

Fig. 9 Ambiguity function of transmitter 1-receiver pair

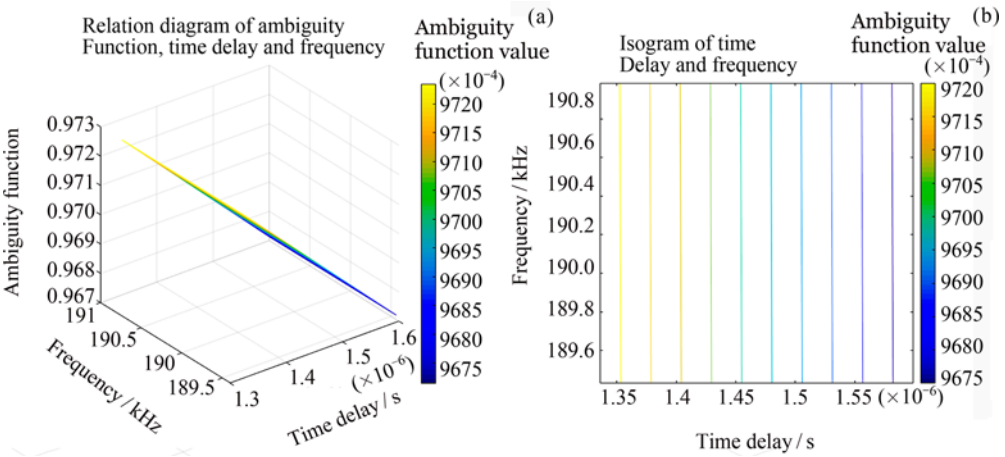

图 10 发射机 2–接收机对模糊函数

Fig. 10 Ambiguity function of transmitter 2-receiver pair

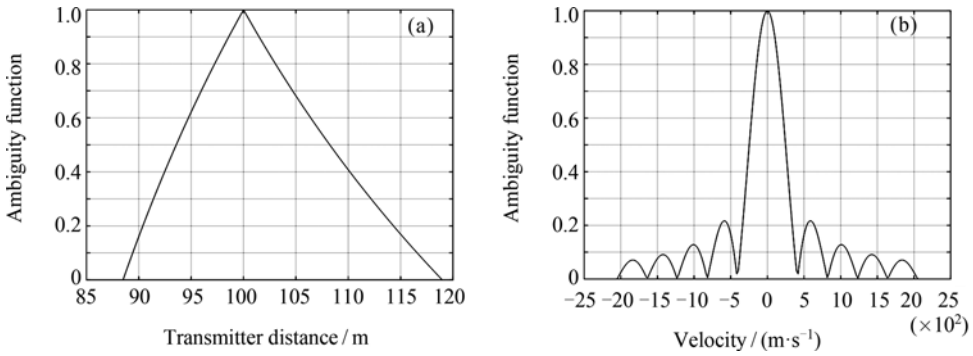

图 11 单台模糊函数截面

Fig. 11 Section diagram of single radar fuzzy function

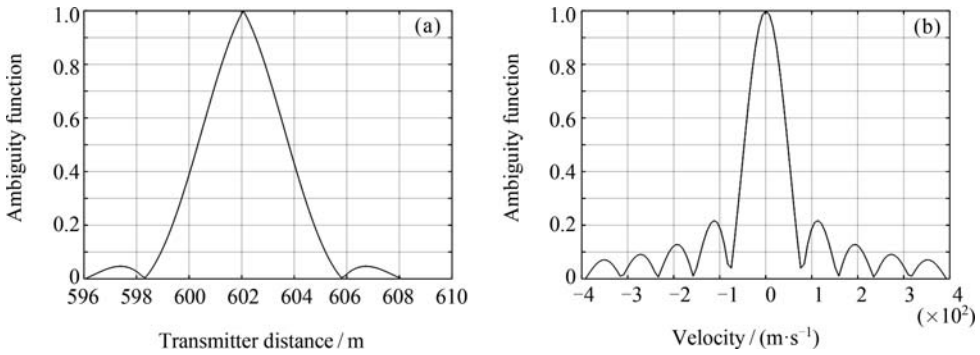

图 12 网络雷达模糊函数截面

Fig. 12 Sectional diagram of network radar fuzzy function

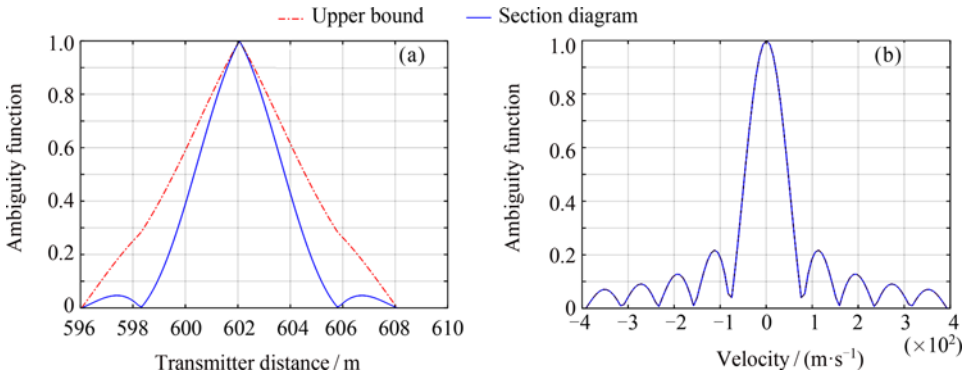

图 13 网络雷达模糊函数及其上界

Fig. 13 Network radar fuzzy function and its upper bound

4 结论

提出了簇飞行网络雷达的概念. 通过建立近圆轨道簇飞行网络雷达几何模型, 利用双基地雷达模糊函数, 给出簇飞行网络雷达模糊函数的定义和计算步骤, 研究了簇飞行网络雷达几何构型基线对模糊函数的影响. 数值计算结果表明, 簇飞行模式下基线对雷达模糊函数的影响不大, 雷达模糊函数应主要考虑目标飞行速度和接收距离的影响. 与单台雷达模糊函数相比, 网络雷达模糊函数性能得到明显改善. 最后给出了簇飞行网络雷达模糊函数的一种上界. 簇飞行雷达集中了簇飞行航天器与网络雷达优势, 可在空间对地观测等领域发挥重要作用.

参考文献

[1] BAKER C, HUME A. Netted radar sensing [J]. *IEEE Aero. El. Sys. Mag.*, 2003, **18**(2): 3-6

[2] HURLEY S, KHAN M. Netted radar: network communications design and optimization [J]. *Ad. Hoc. Network*, 2011, **9**: 736-751

[3] LI Mingliang, JIANG Qiuxi, PENG Zhenwei. Target location and tracking of network radar [J]. *Fire Control Command Control*, 2012, **37**(7): 77083 (李明亮, 姜秋喜, 彭振伟. 基于网络雷达的目标定位跟踪 [J]. 火力与指挥控制, 2012, **37**(7): 77083)

[4] DENG H, HIMED B. Target detection using orthogonal netted radar system [C]//Proceedings of IET International Conference on Radar Systems 2007. Edinburgh: Institution of Engineering and Technology, 2007: 1-5

[5] LI Yan, ZHANG Qingjun, LIU Yadong, *et al.* Analysis of moving target indication based on distributed space radar [J]. *Spacecraft Eng.*, 2015, **4**(3): 64-68 (李延, 张庆君, 刘亚东, 等. 分布式天基雷达动目标检测性能分析 [J]. 航天器工程, 2015, **4**(3): 64-68)

[6] BEN De, LONG Weijun. Key technology of space-based radar [J]. *J. Data Acquis. Process.*, 2013, **28**(4): 391-396 (贲德, 龙伟军. 天基雷达的关键技术 [J]. 数据采集与处理, 2013, **28**(4): 391-396)

[7] CHEN Rong. Development of American space-based early warning radar system [J]. *Natl. Defense Sci. Technol.*, 2014, **35**(2): 76-83 (陈荣. 美国天基预警雷达系统发展 [J]. 国防科技, 2014, **35**(2): 76-83)

[8] KANDHALU A, RAJKUMAR R. QoS-based resource allocation for next-generation spacecraft networks [C]// Proceedings of the IEEE 33rd Real Time Systems Symposium, San Juan: IEEE, 2012

[9] WOODWARD P M. Probability and Information Theory, with Applications to Radar [M]. New York: Pergamon Press, 1953

[10] DERHAM T, DOUGHTY S, BAKER C, *et al.* Ambiguity function spatially coherent and incoherent multistatic radar [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2010, **46**(1): 230-245

[11] RENDAS M J D, MOURA J M F. Ambiguity in radar and sonar [J]. *IEEE Trans. Sign. Proc.*, 1998, **46**(2): 294-305

[12] TENG Y, DOUGHTY S. Netted Radar Theory and Experiment [C]//Proceedings of Information, Decision and Control 2007. Adelaide: IEEE, 2007

[13] TSAO T, SLAMANI M, VARSHNEY P, *et al.* Ambiguity function for a bistatic radar [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1997, **33**(3): 1041-1051

[14] WEINER D, WICKS M, CAPRARO G. Waveform diversity and sensors as robots in advanced military systems [C]//Proceedings of the 1st International Waveform Diversity and Design Conference 2004. Edinburgh: IEEE, 2004

[15] BRADARIC I, CAPRARO G T, WICKS M C. Multistatic ambiguity function a tool for waveform selection in distributed radar systems [C]//Proceedings of International Waveform Diversity and Design Conference 2009. Kissimmee: IEEE, 2009

[16] URKOWITZ H, HAUER C, KOVAL J. Generalized resolution in radar systems [J]. *Proc. IRE*, 1962, **50**: 2093-2105

[17] ROSSI M, HAIMOVICH A M, ELDAR Y C. Spatial compressive sensing for mimo radar [J]. *IEEE Trans. Sign. Proc.*, 2014, **64**(2): 419-430

[18] FISHLER A. Spatial diversity in radars models and detection performance [J]. *IEEE Trans. Sign. Proc.*, 2006, **54**(3): 823-838

[19] HAIMOVICH A, BLUM R, CIMINI L. MIMO radar with widely separated antenna [J]. *IEEE Sign. Proc. Mag.*, 2007, **25**(1): 116-129

[20] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas [J]. *IEEE Sign. Proc. Mag.*, 2007, **24**(5): 106-114

[21] CHITGARHA M, RADMARD M. MIMO radar signal design to improve the MIMO ambiguity function *via* maximizing its peak [J]. *Signal Proc.*, 2016, **18**: 139-152

[22] WANG B. The nature of bistatic and multistatic radar [C]//Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar 2001. Beijing: IEEE, 2001

[23] CHEN Y, LU X, QING H, *et al.* On study of the application of ATM switches in netted-radar systems [C]// Proceedings of NAECON 1997. Ohio: IEEE, 1997

[24] PAPOUTSIS I, BAKER C J, GRIFFITHS H D. Netted radar and the ambiguity function [C]//Proceedings of Radar Conference 2005. Arlington: IEEE, 2005: 883-888

[25] TENG Y, BAKER C. Comparison of the 2D and 3D netted radar ambiguity function [C]//Proceedings of the 3rd European Radar Conference 2006. Manchester: IEEE, 2006: 112-115

[26] ZIMMERMAN F, GURFIL P. Optimal target states for satellite cluster flight control on near-circular orbit [J]. *J. Guid. Control Dynam.*, 2015, **38**(3): 1-9

[27] MAZAL L, GURFIL P. Cluster flight for fractionated spacecraft [J]. *Adv. Astronaut. Sci.*, 2011, **140**: 1545-1564

[28] MAZAL L, GURFIL P. Cluster-keeping algorithms for the SAMSON project [C]//Proceedings of the 63rd International Astronautical Congress 2012. Naples: IAF, 2012: 1-5

[29] CHEN H, LI X, YANG J, *et al.* Effects of geometry configurations on ambiguity properties for bistatic MIMO radar [J]. *Prog. Electromagn. Res. B*, 2011, **30**: 117-133

[30] BRADARIC I, CAPRARO G, WEINER D. Multistatic radar systems signal processing [C]//Proceedings of IEEE Conference on Radar 2006. New York: IEEE Radar Conference, 2006: 106-113