

空间相关多基地雷达分辨能力提高方法

闵涛, 赵锋, 肖顺平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对雷达密集多目标探测问题, 考虑一个单发多收多基地雷达系统, 在分析空间相关多基地雷达模糊函数的基础上, 通过传感器部署、波形选择这两种方法来改变模糊函数形状, 达到改善目标分辨性能的目的。文中以模糊函数 3-dB 投影面积值为指标, 对比空间非相关多基地雷达, 分析了不同传感器部署和波形选择情况下的目标距离分辨性能, 并给出了相应的仿真结果。研究成果不仅能用于对多基地雷达密集多目标探测性能的分析, 还能为多基地雷达布站、波形设计等提供一定的理论参考。

关键词: 多基地雷达; 空间相关; 模糊函数; 分辨力

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.10.10

Improvement of resolution of spatially coherent multistatic radar

MIN Tao, ZHAO Feng, XIAO Shun-ping

(Institute of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at radar detection of multiple unresolved targets, considering a multistatic radar system with single transmitter and multiple receivers, an ambiguity function for spatially coherent multistatic radar is analyzed, and then sensor geometrical configuration and waveform selection are used to shape the ambiguity function so as to improve the target resolution. The 3-dB projected contour area of the ambiguity function is used as a measurement to compare the range resolution performance of different sensor geometrical configurations and waveform selections with a spatially incoherent multistatic radar, and relevant simulation results are presented. The conclusion of this paper can be used in the analysis of the multistatic radar detection performance of multiple unresolved targets, and will supply the sensor placement and waveform design of multistatic radars with reference.

Keywords: multistatic radar; spatially coherent; ambiguity function; resolution

0 引言

模糊函数是用于分析各种雷达信号波形的一种重要工具。Woodward^[1]建立了单基地雷达信号模糊函数的理论, 描述了雷达信号区分两个邻近目标距离和径向速度的能力。除了衡量分辨率, 模糊函数还可对雷达系统的测量精度、测量模糊度及抗干扰性能等进行量化说明。双/多基地雷达是最早出现的雷达体制, 除了反隐身、抗干扰等传统优势^[2], 其在目标信息获取、工作方式、技术实现等方面体现出的多样性, 使得利用双/多基地雷达对密集多目标进行探测具备一定的优势。文献[3]提出了双基地雷达距离-速度模糊函数的概念, 分析了双基地雷达几何配置对测量参数的影响。文献[4]将模糊函数的概念扩展至多基地雷达。在随后的一些文献中, 文献[5-8]以模糊函数为工具对多基地雷达系统进行分析和设计, 通过波形选择、传感器部

署、接收机信号加权这三种方式及其联合使用来改善雷达系统的分辨性能, 但文献只研究了空间非相关多基地雷达, 对于空间相关的情况并没有考虑。文献[9-10]研究了空间相关和非相关多基地雷达的模糊函数, 在此基础上, 分析了单发多收多基地雷达不同几何配置、回波起伏的空间相关性对目标分辨性能的影响, 但没有考虑传感器最优布站和波形选择问题。

本文在上述研究工作的基础上, 考虑单发多收多基地雷达系统, 以空间相关多基地雷达模糊函数为分析工具, 重点关注系统的目标分辨性能, 通过波形选择、传感器部署对系统的参数进行选择来改变模糊函数的形状, 从而达到改善目标分辨能力的目的。文中以模糊函数 3-dB 投影面积值为指标, 对比空间非相关多基地雷达, 分析了不同传感器部署和波形选择情况下的目标距离分辨性能, 并给出了相应的仿真结果。

1 空间相关多基地雷达模糊函数

考虑如图 1 所示单发多收多基地雷达系统^[7], 包含一部发射机 T_x 和 m 部接收机 $R_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。接收机 R_i 接收到的来自一个目标的信号 $X_i(t)$ 的复数形式可表示为^[3]

$$X_i(t) = A_i s_0(t - t_{ai}) \cdot \exp [j2\pi(f_0 + f_{ai})(t - t_{ai})] + n_i(t) \quad (1)$$

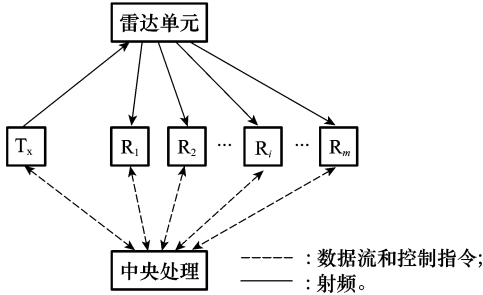


图 1 单发多收多基地雷达系统结构及处理流程示意图

式中, $s_0(t)$ 为发射信号的复包络, 假设发射信号波形为窄带, 则由于目标运动引起的“展宽”可忽略; f_0 为载频; t_{ai} 、 f_{ai} 分别为信号从发射机经过目标到第 i 部接收机的传播时延、多普勒频移; 接收机噪声 $n_i(t)$ 假设为互不相关的零均值高斯白噪声; $A_i = a_i \exp(j\varphi_i)$ 为回波信号的幅度, 考虑目标起伏为 Swerling I 型, 则目标由若干相等强度的散射点组成, 散射点都具有均匀分布的相位角, 观测间的目标散射面积电压值 a_i 服从瑞利分布, 相位 φ_i 为 $[-\pi, \pi]$ 间的均匀分布, 则 A_i 为零均值高斯变量^[9]。

由于目标包含多个散射点, 微小的相对运动就会改变目标的瞬时雷达截面积, 从而导致回波信号的起伏。在单/双基地雷达情况下, 雷达只有一个观测视角, 只需考虑回波信号起伏的时间统计特性; 但在多基地雷达情况下, 还需考虑多部接收机从不同视角观测时回波起伏的空间相关性^[9]。也就是说, 影响单基地雷达模糊函数的主要是发射信号的波形, 影响双基地雷达模糊函数的因素包含发射波形和传感器的几何配置, 而影响多基地雷达模糊函数的还包括多部接收机所观测回波的空间相关性, 这种特性主要体现在不同相位因子 φ_i 的相互关系上。根据文献^[9], 考虑空间相关和非相关两种回波信号模型。空间相关情况下, 所有的 $A_i = a_i \exp(j\varphi_i)$ 为相互关联的零均值复高斯随机变量, 则依据 Neyman-Pearson 准则, 经过相应最佳多基地检测器^[11], 单发多收多基地雷达系统的空间相关模糊函数可表示为^[9]

$$\chi_{Co} = \left(\sum_{i=1}^m \frac{A_{i1}^2}{N_i} \right)^{-1} \left| \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{A_{i1}^2}{N_i} \cdot \exp [j2\pi(f_0(t_{hi} - t_{ai}) + f_{hi}t_{hi} - f_{ai}t_{ai})] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t - t_{ai}) s_0^*(t - t_{hi}) \exp [j2\pi(f_{ai} - f_{hi})t] dt \right\} \right| \quad (2)$$

式中, $A_{i1} = a_i/a_1$ 为接收机 i 相对于接收机 1 的信号幅度比例因子; N_i 为第 i 部接收机回波信号的噪声谱密度; t_{hi} 、 f_{hi} 分别为信号从发射机经过目标到第 i 部接收机传播时延的假设值、多普勒频移的假设值。空间非相关情况下, 所有 $A_i = a_i \exp(j\varphi_i)$ 为互不相关的零均值复高斯随机变量, 则依据 Neyman-Pearson 准则, 经过相应最佳多基地检测器^[11], 空间非相关多基地雷达模糊函数可表示为^[9]

$$\chi_{InCo} = \left(\sum_{i=1}^m \frac{\bar{A}_{i1}^2}{N_i^2 (1 + E_i/N_i)} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\bar{A}_{i1}^2}{N_i^2 (1 + E_i/N_i)} \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t - t_{ai}) s_0^*(t - t_{hi}) \exp [j2\pi(f_{ai} - f_{hi})t] dt \right|^2 \right\} \quad (3)$$

式中, \bar{A}_{i1}^2 为接收机 i 相对于接收机 1 的平均信号功率; E_i 为接收机 i 处平均信号能量。

通过比较方程(2)、(3), 可以发现考虑多基地雷达系统空间相关性后带来的差异, 多部接收机从不同视角观测时回波信号的空间相关性主要就体现在方程(2)中的 $\exp [j2\pi(f_0(t_{hi} - t_{ai}) + f_{hi}t_{hi} - f_{ai}t_{ai})]$ 项上, 这些差异可进一步通过下文仿真结果来展示。多基地雷达模糊函数形状的改变可通过选择传感器几何配置和发射波形来实现, 下文将以模糊函数为工具进一步对优化布站和不同波形的分辨性能进行分析。

2 传感器部署分析

一般情况下, 多基地雷达系统的发射机和接收机的位置是固定的, 但在某些应用中, 部分或全部传感器是移动的, 比如传感器位于机载平台上时。由于多基地雷达目标回波时延和多普勒频移与其几何配置参数之间的非线性关系, 如何在实际的多基地雷达应用中合理配置传感器的位置, 以获取最佳系统性能, 需作进一步分析。模糊函数 3-dB 投影区的大小和形状, 决定了雷达的目标分辨性能。本文重点考虑多基地雷达的距离分辨力, 将模糊图表示在目标位置二维平面上, 此时假设的目标速度与真实目标速度相同, 以模糊函数 3-dB 投影面积为指标来衡量不同传感器部署和波形选择对多基地雷达距离分辨性能的影响^[7]。

考虑一个二维的多基地雷达系统, 包含 1 部发射机和 4 部接收机, 如图 2 所示^[7]。发射机坐标为 $(0, -500 \text{ m})$, 4 部接收机在圆周上对称部署, 目标 Tgt 位于原点, 目标速度为 20 m/s , 方向正西, 目标到发射机 T_x 和各部接收机 $R_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的距离相同, 均为 500 m 。假设接收机和发射机均为全向天线, 各个接收机的参数均相同, 包括噪声功率谱密度值。考虑两种传感器部署想定: (1) 各接收机位置不变, 发射机 T_x 沿图 2(a) 中所示方向从 R_1 点出发沿圆弧移动到 R_2 , 移动的弧度为 $\pi/2$; (2) 发射机 T_x 、接收机 R_3 、 R_4 位置均不变, 接收机 R_3 、 R_4 分别沿图 2(b) 中所示方向沿圆弧从点 $(0, 500 \text{ m})$ 向点 $(0, -500 \text{ m})$ 移动, 移动的弧度均为 π 。

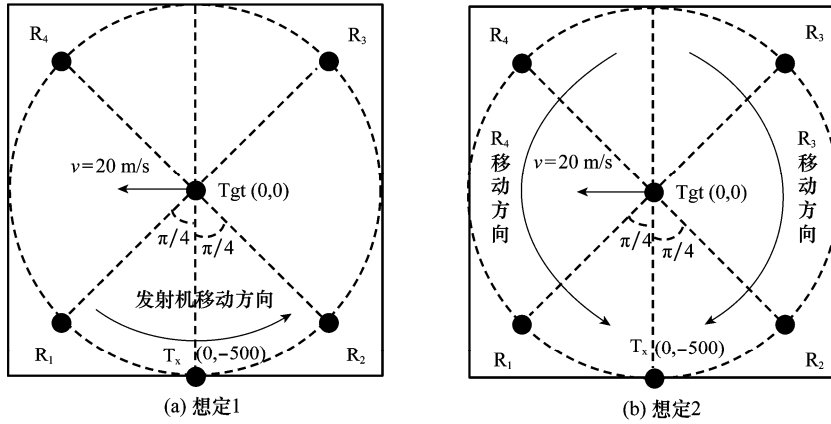


图 2 多基地雷达系统传感器部署示意图

发射波形考虑线性调频脉冲信号,脉宽为 10 ms,带宽为 1 GHz,载频为 5.6 GHz。幅度为 A ,脉宽为 T ,调频斜率为 μ 的线性调频脉冲信号的复包络可表示为

将信号幅度 A 归一化为 1,并不影响其模糊函数特性,则信号的双基地雷达模糊函数、空间相关多基地雷达模糊函数、空间非相关多基地雷达模糊函数分别可表示为

$$s_0(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi\mu t^2} = \begin{cases} A e^{j\pi\mu t^2}, & |t| < T/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{lmBi}} &= \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t-t_a) s_0^*(t-t_b) \exp[j2\pi(f_a - f_b)t] dt = \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}[(t-t_a)/T] \cdot \operatorname{rect}[(t-t_b)/T] \cdot \\ &\exp[j\pi\mu(t-t_a)^2] \cdot \exp[-j\pi\mu(t-t_b)^2] \cdot \exp[j2\pi(f_a - f_b)t] dt = \exp[-j\pi\mu(t_a^2 - t_b^2)] \cdot \\ &\int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}[(t-t_a)/T] \cdot \operatorname{rect}[(t-t_b)/T] \cdot \exp\{j2\pi[\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b]t\} dt = \\ \exp[-j\pi\mu(t_a^2 - t_b^2)] \cdot \exp\{j\pi[\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b](t_b + t_a)\} \cdot \frac{\sin\{\pi[\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b](T - |t_b - t_a|)\}}{\pi(\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b)} &= \\ \exp[j\pi(f_a - f_b)(t_b + t_a)] \cdot \frac{\sin\{\pi[\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b](T - |t_b - t_a|)\}}{\pi(\mu(t_b - t_a) + f_a - f_b)}, & |t_b - t_a| \leq T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{lmCo}} &= \left(\sum_{i=1}^m \frac{A_{i1}^2}{N_i}\right)^{-1} \left| \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{A_{i1}^2}{N_i} \exp[j2\pi(f_0(t_{hi} - t_{ai}) + f_{hi}t_{hi} - f_{ai}t_{ai})] \cdot \right. \right. \\ &\left. \left. \exp[j\pi(f_{ai} - f_{hi})(t_{hi} + t_{ai})] \cdot \frac{\sin\{\pi[\mu(t_{hi} - t_{ai}) + f_{ai} - f_{hi}](T - |t_{hi} - t_{ai}|)\}}{\pi(\mu(t_{hi} - t_{ai}) + f_{ai} - f_{hi})} \right\} \right|, & |t_{hi} - t_{ai}| \leq T \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{lmInCo}} &= \left(\sum_{i=1}^m \frac{\bar{A}_{i1}^4}{N_i^2(1 + E_i/N_i)}\right)^{-1} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\bar{A}_{i1}^4}{N_i^2(1 + E_i/N_i)} \cdot \right. \\ &\left. \left| \exp[j\pi(f_{ai} - f_{hi})(t_{hi} + t_{ai})] \cdot \frac{\sin\{\pi[\mu(t_{hi} - t_{ai}) + f_{ai} - f_{hi}](T - |t_{hi} - t_{ai}|)\}}{\pi(\mu(t_{hi} - t_{ai}) + f_{ai} - f_{hi})} \right|^2 \right\}, & |t_{hi} - t_{ai}| \leq T \end{aligned} \quad (7)$$

式中, t_a, f_a, t_b, f_b 分别为双基地雷达目标回波信号的传播时延、多普勒频移、传播时延的假设值、多普勒频移的假设值。

目标回波信号的传播时延和多普勒频移可通过目标的实际位置和速度得到

$$t_{ai} = (|\mathbf{R}_T| + |\mathbf{R}_{Ri}|) / c \quad (10)$$

$$f_{ai} = -\left(\frac{\mathbf{R}_T \mathbf{V}}{|\mathbf{R}_T|} + \frac{\mathbf{R}_{Ri} \mathbf{V}}{|\mathbf{R}_{Ri}|}\right) / \lambda \quad (11)$$

空间相关情况下,假设传感器部署变化时,不考虑目标双基地 RCS 的变化,信号幅度比例因子 A_{i1} 也不会随接收机 i 观测视角的不同而变化,由于每部接收机的噪声功率谱密度均相同,则相对信噪比 A_{i1}^2/N_i 只与传播损耗相关^[9]

$$A_{i1}^2/N_i \propto 1/(|\mathbf{R}_T|^2 |\mathbf{R}_{Ri}|^2) \quad (8)$$

式中, R_T 和 R_{Ri} 分别为目标到发射机和接收机 i 的距离。空间非相关情况下,假设信号能量相比噪声能量比较小,则方程(3)中的幅度加权因子有以下关系

式中, \mathbf{R}_T 和 \mathbf{R}_{Ri} 为目标到发射机和接收机 i 的距离矢量; \mathbf{V} 为目标速度矢量; λ 为发射信号波长。假设的传播时延 t_{hi} 和多普勒频移 f_{hi} 也可通过假设的目标位置和速度得到。

图 3 给出了图 2 中各传感器在初始位置时,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数及其 3-dB 投影。

图 3(a)和图 3(d)给出了 $T_x - R_1$ 双基地雷达模糊函数及其 3-dB 投影,双基地雷达模糊函数只有一条“脊背”,其

$$\frac{\bar{A}_{i1}^4}{N_i^2(1 + E_i/N_i)} \approx \bar{A}_{i1}^4/N_i^2 \propto 1/(|\mathbf{R}_T|^4 |\mathbf{R}_{Ri}|^4) \quad (9)$$

3-dB 投影是斜跨所关注区域的带状区域。由于分辨率有限,图 3(b)和图 3(c)无法体现空间相关和非相关多基地雷达模糊函数的区别,两者轮廓基本相同,多条“脊背”体现了多部双基地雷达共同作用的结果,同时“脊背”的条数也能反映多基地雷达中发射机-接收机对所组成双基地雷达的数量;而图 3(e)和图 3(f)中模糊函数 3-dB 投影区域则体现了两者的差异,表明考虑多基地雷达的空间相关性对于

改善雷达的目标距离分辨性能是有积极作用的。图 3(d)、图 3(e)和图 3(f)中 3-dB 投影区域的面积分别约为 8.5 m^2 、 0.03 m^2 、 0.005 m^2 ,结果表明,多基地雷达相比双基地雷达,空间相关多基地雷达相比空间非相关多基地雷达,目标距离分辨性能均得到了相当大的改善。

图 4、图 5 给出了传感器部署想定 1、2 情况下,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数 3-dB 投影面积值的变化曲线。

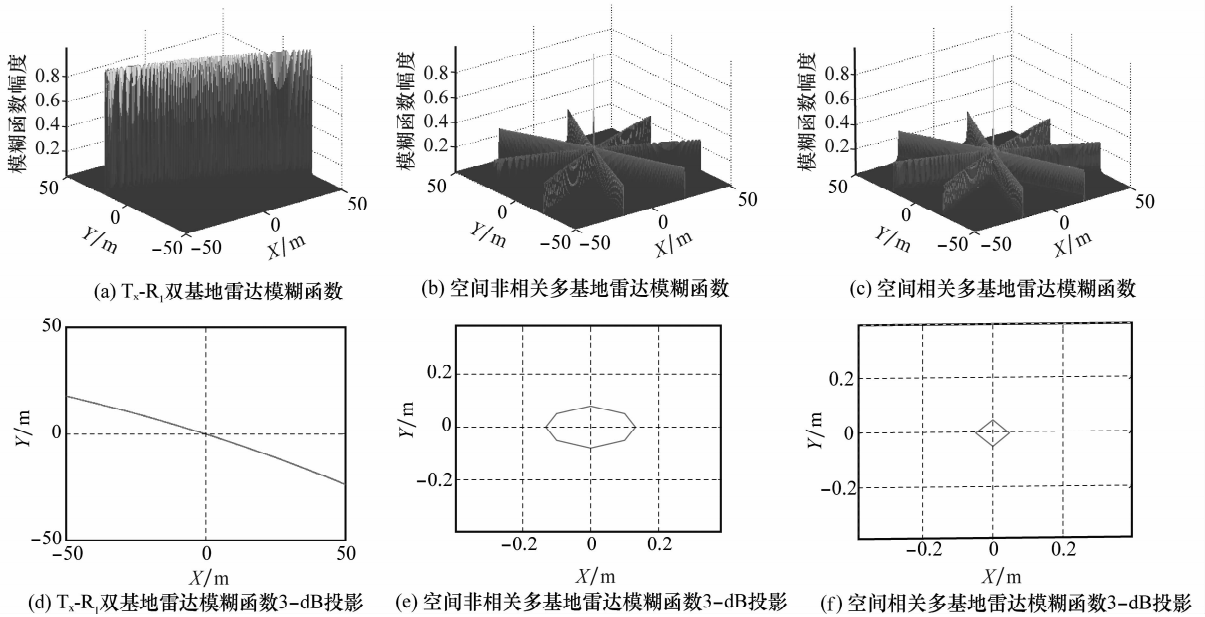
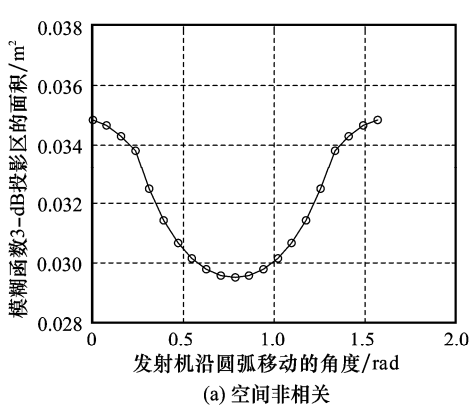
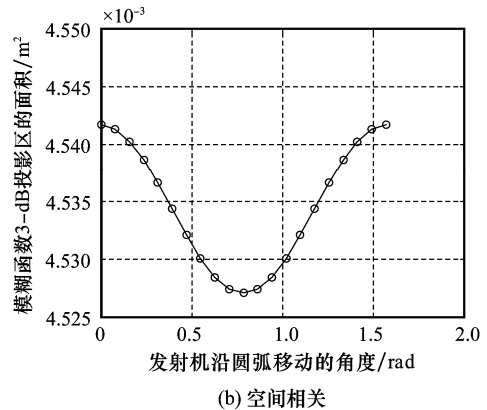


图 3 各个传感器在初始位置时,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数及其 3-dB 投影



(a) 空间非相关



(b) 空间相关

图 4 传感器部署想定 1,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数 3-dB 投影面积值变化曲线

图 4 显示,当发射机 T_x 处于接收机 R_1 位置时,目标位于双基地雷达 T_x-R_3 的基线上,这是双基地雷达分辨性能最差的区域,而且 T_x-R_1 退化为单基地雷达,导致总的多基地雷达分辨性能下降;当 T_x 位于接收机 R_2 位置时,也会出现相同的情况。当 T_x 位于 $(0, -500 \text{ m})$,也就是发射机沿圆弧移动的角度为 $\pi/4$ 时,最大程度避免了上述极端情况,各双基地雷达互相对称,此时分辨能力达到最佳。在发射机位置变化的过程中,空间相关和非相关情况的变化趋势是一致的,而前者的目标距离分辨性能比后者好。

图 5(a)显示,空间非相关情况下,接收机 R_3 、 R_4 分别沿图 2(b)中所示方向移动,当 R_3 、 R_4 均位于 $(0, 500 \text{ m})$ 时,投影区域面积明显大于其他位置,此时目标位于双基地雷达 T_x-R_3 和 T_x-R_4 的基线上,导致总的多基地雷达分辨性能下降;当 R_3 、 R_4 移动到发射机位置时,双基地雷达 T_x-R_3 和 T_x-R_4 均退化为单基地雷达,分辨性能有所下降; R_3 、 R_4 移动的过程中,分辨能力先逐渐变好又逐渐变差,分辨能力最佳点出现在接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度约为 1.9 rad 处。

图 5(b)显示,由于考虑到各接收机回波相位变化带来的影响,当 R_3 、 R_4 移动时,空间相关多基地雷达分辨性能变化情况没有空间非相关那样明显,其波动较大,但总体趋势还是降低的,曲线的包络和图 5(a)中曲线相似,分辨力最佳

点出现在接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度约为 3 rad 处。从图 5 中还可以看出,在接收机 3 和 4 位置变化的过程中,空间相关多基地雷达的距离分辨性能,比空间非相关情况都要好。

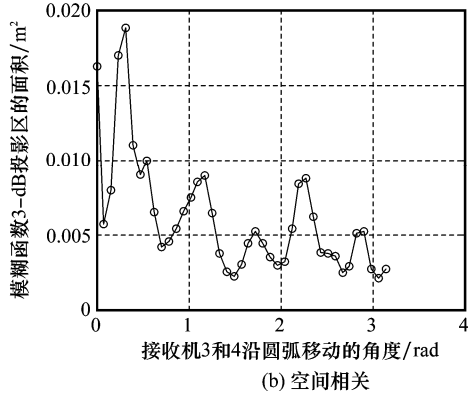
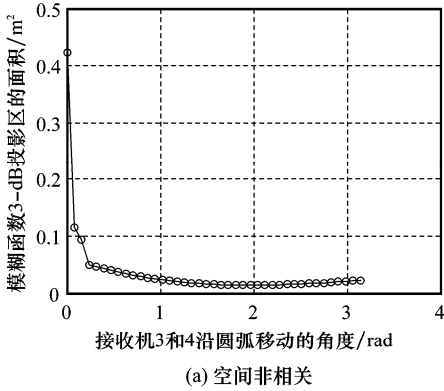


图 5 传感器部署想定 2,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数 3-dB 投影面积值变化曲线

图 6 给出了传感器部署想定 2 情况下,接收机 R_3 、 R_4 均位于(0,500 m)时,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数 3-dB 投影。空间非相关情况下,主瓣周围出现了诸多旁瓣,且旁瓣的幅度均超过了 3-dB,模糊函数 3-dB 投影是一个较大区域加上若干离散的小区域,此时的总投影区域面积最大,约为 0.423 m^2 ,主瓣投影区域面积约为 0.117 m^2 ;空间相关情况下,主瓣、旁瓣投影区域均减小,总投影区域面积约为 0.016 m^2 ,主瓣投影区域面积约为 0.007 m^2 。

图 7 给出了传感器部署想定 2 情况下,接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度为 $\pi/10$ 时,线性调频脉冲信号空间相关多基地雷达模糊函数 3-dB 投影。此时空间相关情况投影区域面积最大,虽然旁瓣投影消失,但总投影区域面积约为 0.019 m^2 ,大于接收机 3 和 4 沿圆弧移动角度为 0 处(见图 6(b))。此时考虑空间相关性,各接收机回波的相互作用导致多基地雷达目标距离分辨能力最差。

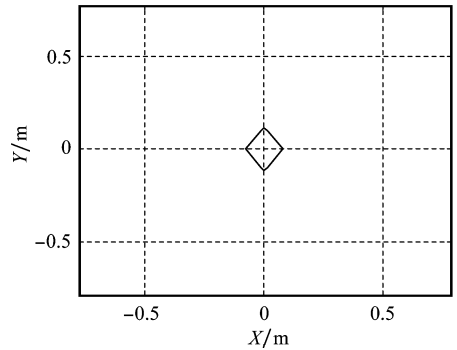
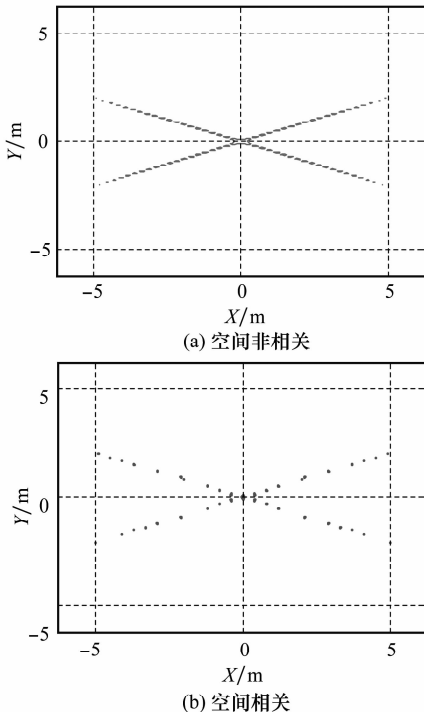


图 7 传感器部署想定 2,接收机 R_3 、 R_4 移动角度为 $\pi/10$ 时,线性调频脉冲信号空间相关多基地雷达模糊函数 3-dB 投影

以上分析表明,传感器移动导致目标位于多基地雷达系统中某双基地雷达基线上时,模糊函数旁瓣升高,主瓣 3-dB 投影区域也明显增大;空间相关情况的变化趋势则较复杂,相位因子的引入导致目标分辨性能的变化波动较厉害,但自始至终空间相关情况的分辨能力都是优于空间非相关情况的。

图 6 传感器部署想定 2,接收机 R_3 、 R_4 均位于(0,500)时,线性调频脉冲信号多基地雷达模糊函数 3-dB 投影

3 波形选择分析

雷达发射波形的选择是关乎其性能的一个重要因素,影响到目标检测、参数估计精度、分辨率、模糊度、抗干扰性能等。在第 2 节分析的基础上,发射信号进一步考虑单载频矩形脉冲信号,脉宽为 3 s,载频为 5.6 GHz。其他参数及传感器部署情况同第 2 节。单载频矩形脉冲信号是最简

单的雷达发射波形,其容易产生、便于处理,在雷达系统中使用比较普遍。幅度为 A 、脉宽为 T 的单载频矩形脉冲信号复包络可表示为

$$s_0(t) = A \text{rect}(t/T) = \begin{cases} A, & -T/2 < t < T/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

信号的双基地雷达模糊函数,空间相关、非相关多基地雷达模糊函数分别可表示为

$$\begin{aligned} \chi_{\text{spBi}} &= \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t-t_a) s_0^*(t-t_h) \exp[j2\pi(f_a - f_h)t] dt = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}[(t-t_a)/T] \cdot \text{rect}[(t-t_h)/T] \cdot \exp[j2\pi(f_a - f_h)t] dt = \\ & \exp[j\pi(f_a - f_h)(t_h + t_a)] \cdot \frac{\sin[\pi(f_a - f_h)(T - |t_h - t_a|)]}{\pi(f_a - f_h)}, \quad |t_h - t_a| \leq T \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{spCo}} &= \left(\sum_{i=1}^m \frac{A_{i1}^2}{N_i} \right)^{-1} \left| \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{A_{i1}^2}{N_i} \exp[j2\pi(f_0(t_{hi} - t_{ai}) + f_{hi}t_{hi} - f_{ai}t_{ai})] \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \exp[j\pi(f_{ai} - f_{hi})(t_{hi} + t_{ai})] \cdot \frac{\sin[\pi(f_{ai} - f_{hi})(T - |t_{hi} - t_{ai}|)]}{\pi(f_{ai} - f_{hi})} \right\} \right|, \quad |t_{hi} - t_{ai}| \leq T \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\text{spInCo}} &= \left(\sum_{i=1}^m \frac{\bar{A}_{i1}^4}{N_i^2(1 + \bar{E}_i/N_i)} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\bar{A}_{i1}^4}{N_i^2(1 + \bar{E}_i/N_i)} \cdot \right. \\ & \left. \left| \exp[j\pi(f_{ai} - f_{hi})(t_{hi} + t_{ai})] \cdot \frac{\sin[\pi(f_{ai} - f_{hi})(T - |t_{hi} - t_{ai}|)]}{\pi(f_{ai} - f_{hi})} \right|^2 \right\}, \quad |t_{hi} - t_{ai}| \leq T \end{aligned} \quad (15)$$

图 8 给出了各个传感器在初始位置时,单载频矩形脉冲信号多基地雷达模糊函数及其 3-dB 投影。

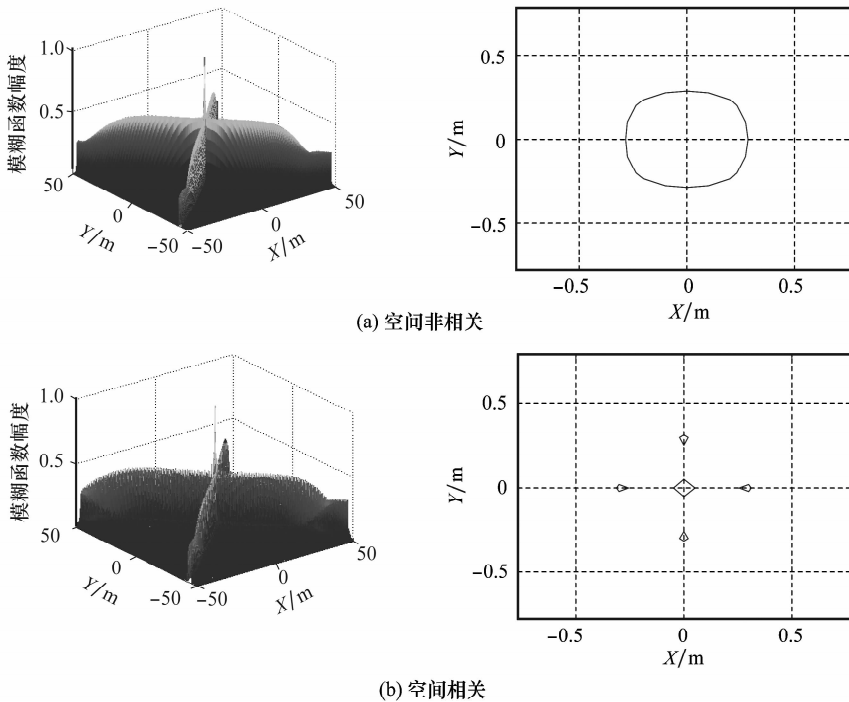


图 8 各个传感器在初始位置时,单载频矩形脉冲信号多基地雷达模糊函数及其 3-dB 投影

相比空间非相关情况,空间相关多基地雷达模糊函数图的各条“脊背”由很多“毛刺”组成,而且其主瓣 3-dB 投影较小,同时还有几个旁瓣的高度也超过了 3 dB,但这些旁

瓣都在空间非相关多基地雷达模糊函数主瓣 3-dB 投影区域内。图 8(a)、图 8(b)中 3-dB 投影区域的面积分别约为 0.269 m²、0.009 m²,空间相关多基地雷达的目标分辨能力

得到了相当大的改善。

图 9、图 10 给出了不同波形条件下,传感器部署想定 1、2 情况下多基地雷达模糊函数 3-dB 投影面积值的变化曲线。

从图 9、图 10 中均可以看出,发射机或接收机位置变化过程中,在其他条件相同情况下,线性调频脉冲信号的目标分辨率,比单载频矩形脉冲信号都要好;空间相关情况的分辨率比空间非相关情况都要好。

图 9 表明,单载频矩形脉冲信号目标分辨率的变化趋势,与线性调频脉冲信号相同。 T_x 位于 $(0, -500\text{ m})$,也就是发射机沿圆弧移动的角度为 $\pi/4$ 时,分辨能力达到最佳。在发射机位置变化的过程中,空间相关和非相关情况的变化趋势是一致的。

图 10 中,接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度为 0 或 π 时,单载频矩形脉冲信号 3-dB 投影面积值都要明显大于线性调频脉冲信号。空间非相关情况下,单载频矩形脉冲信号的目标距离分辨能力变化规律与线性调频脉冲信号相似,分辨能力最佳点出现在接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度约为 1.9 rad 处;空间相关情况下的分辨性能变化规律同样比较复杂,分辨能力最佳点出现在接收机 3 和 4 沿圆弧移动的角度约为 $\pi/2$ 处。

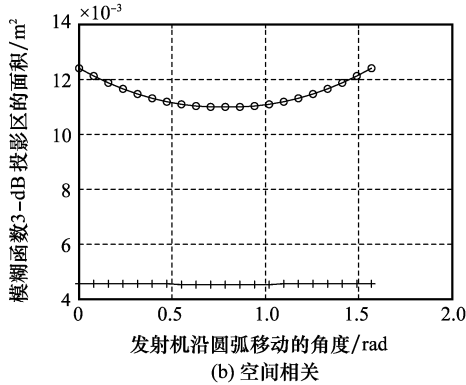
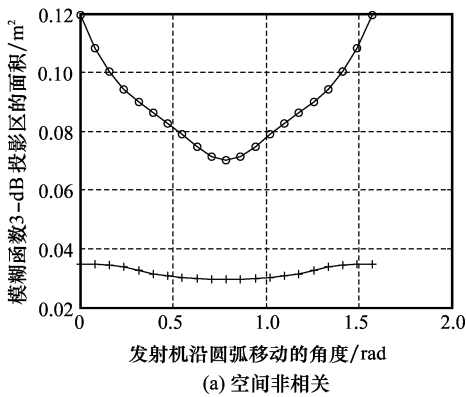
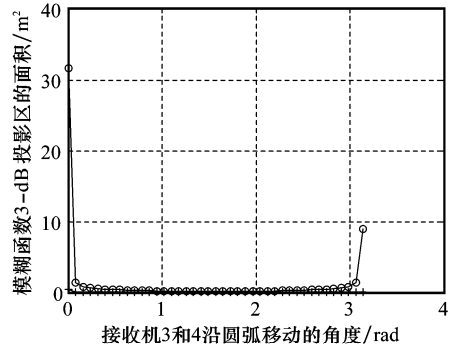
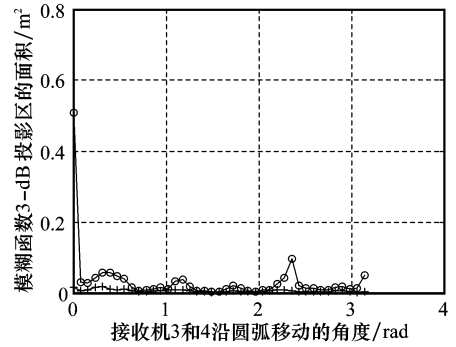


图 9 传感器部署战情 1,不同波形条件下多基地模糊函数 3-dB 投影面积值变化曲线



(a) 空间非相关



(b) 空间相关

—○—: 单载频矩形脉冲信号; —×—: 线性调频脉冲信号。

图 10 传感器部署战情 2,不同波形条件下多基地模糊函数 3-dB 投影面积值变化曲线

通过上述各图中不同条件下的仿真结果对比分析可发现,多基地雷达系统的目标距离分辨能力,相比系统中某一发射机-接收机对组成的双基地雷达,有了很大的提高;空间相关信息的引入,有效改善了多基地雷达系统的目标距离分辨性能;在传感器部署时,需尽量避免使目标位于某一发射机-接收机对组成的双基地雷达的基线上或其附近,否则会极大降低多基地雷达的分辨性能;同时,也要避免双基地雷达退化为单基地雷达;就本文考虑的单载频矩形脉冲信号和线性调频脉冲信号对比而言,不管在空间相关还是非相关情况下,线性调频脉冲信号均具有更好的目标距离分辨性能。在实际的多基地雷达系统应用中,应综合考虑以上因素以获取最佳的目标分辨性能。

4 结 论

提高雷达对密集多目标的探测能力是当前雷达技术领域所面临的前沿课题和紧迫任务。本文考虑单发多收多基地雷达系统,以空间相关和非相关多基地雷达模糊函数为分析工具,通过波形选择、传感器部署这两种方式来改变模糊函数形状,达到改善目标分辨性能的目的,仿真结果显示本文的方法是有效的。本文采用的信号形式仅考虑了单载频矩形脉冲信号和线性调频脉冲信号,还可对一些常用的

雷达信号如 Baker 码信号、Frank 码信号等进行分析。在单发多收多基地雷达系统分析研究的基础上,考虑多基地雷达系统包含多个发射机和多个接收机的情况,是可以进一步拓展的工作。本文的研究成果,不仅能用于对多基地雷达密集多目标探测性能的分析,还能为多基地雷达布站、波形设计等提供一定的理论参考,进一步完善多基地雷达理论体系。

参考文献:

- [1] Woodward P M. *Probability and information theory with application to radar*[M]. London: Pergamon Press, 1964.
- [2] 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, 1996: 19-22. (Yang Z Q, Zhang Y S, Luo Y J. *Bistatic (multistatic) radar systems* [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 1996: 19-22.)
- [3] Tsao T, Slamani M, Varshney P K, et al. Ambiguity function for a bistatic radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(3): 1041-1051.
- [4] Weiner D D, Wicks M C, Capraro G T. Waveform diversity and sensors as robots in advanced military systems[C]// *Proc. of the 1st International Waveform Diversity and Design conference*, 2004.
- [5] Bradaric I, Capraro G T, Weiner D D, et al. Multistatic radar systems signal processing[C]// *Proc. of the IEEE Conference on Radar*, 2006:106-113.
- [6] Bradaric I, Capraro G T, Zulch P. Signal processing and waveform selection strategies in multistatic radar systems[C]// *Proc. of the International Waveform Diversity and Design Conference*, 2007: 307-311.
- [7] Bradaric I, Capraro G T, Wicks M C. Sensor placement for improved target resolution in distributed radar systems[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2008:1-6.
- [8] Bradaric I, Capraro G T, Brady S H, et al. Multistatic measurements in a controlled laboratory environment[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2010:266-270.
- [9] Derham T, Doughty S, Baker C, et al. Ambiguity functions for spatially coherent and incoherent multistatic radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 230-245.
- [10] Adjrad M, Woodbridge K. A framework for the analysis of spatially coherent and incoherent multistatic radar systems[C]// *Proc. of the 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications*, 2011: 155-158.
- [11] Conte E, D'Addio E, Farina A, et al. Multistatic radar detection: synthesis and comparison of optimum and suboptimum receivers[J]. *IEE Proceedings for Communications, Radar and Signal Processing*, 1983, 130(6): 484-494.