

基于广义模糊函数的 MIMO SAR 分辨特性分析*

周伟¹, 陈浩文¹, 刘永祥¹, 凌永顺²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:多发多收合成孔径雷达(MIMO SAR)是近年来发展起来的一种新型雷达体制。与传统 SAR 相比, MIMO SAR 综合利用了波形分集和空间分集优势, 如何衡量系统的分辨特性以及模糊特性成为亟待解决的问题。本文将模糊函数概念推广到 MIMO SAR 性能分析中, 通过数学推导获得了广义模糊函数的解析表示, 结果表明 MIMO SAR 系统分辨率不仅取决于发射波形参数以及合成孔径长度, 还与发射波形集的正交性以及收发天线阵列流形密切相关, 仿真实验验证了系统模型的有效性和相应分析的正确性。

关键词: 广义模糊函数; MIMO 雷达; 合成孔径雷达; 空间分辨率

中图分类号: TN95 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2013)06-0077-05

Resolution analysis of MIMO SAR based on generalized ambiguity function

ZHOU Wei¹, CHEN Haowen¹, LIU Yongxiang¹, LING Yongshun²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In recent years, a new SAR concept based on Multi-Input Multi-Output (MIMO) configuration has drawn much attention. Firstly, a review was made about the development in the field under discussion. Then, the generalized ambiguity function of the conventional SAR into MIMO SAR case was extended. Next, a detailed analysis shows that the resolution of MIMO SAR not only depends on the parameters of the waveform and synthetic aperture length, but also depends on the array geometry of the multiple transmitters and multiple receivers. Simulations with a variety of parameter combinations demonstrate the derivation and analysis.

Key words: generalized ambiguity function; multi-input multi-output radar; synthetic aperture radar; spatial resolution

随着多发多收(Multi-Input Multi-Output, MIMO)雷达^[1-2]研究的兴起, 结合 MIMO 技术的合成孔径雷达系统在解决常规 SAR 面临的方位向高分辨与测绘带宽相互制约、慢速运动目标难以检测等实际问题上具有潜在的体制优势, 成为当前 SAR 系统发展的主要方向之一。

分辨率是衡量 SAR 系统性能的重要指标。常规 SAR 系统分辨率与信号带宽、合成孔径尺寸之间有明确的对应关系^[3]。对于双/多站 SAR, 系统分辨率还与收发天线的几何构型密切相关。文献[4]提出等值线梯度法计算双站 SAR 的地面分辨率; 文献[5]利用上述方法分析了多种成像模式下双站 SAR 系统分辨率; 文献[6]从回波统计特性出发, 通过推导目标三维位置和散射系数估计的克拉美罗限分析系统极限分辨率; 文献[7]针对单发多收的分布式小卫星 SAR 系统, 将

数据样本投影到两个“特征传感器”上, 从而十分方便地分析系统分辨率以及旁瓣结构。上述方法虽然考虑了阵列构型对系统分辨率的影响, 但对于采用波形分集的 MIMO SAR 而言, 多波形之间的相关特性对系统分辨率以及模糊效应的影响还缺乏严格的理论表述。

模糊函数是衡量波形在距离-多普勒域上分辨能力的重要工具之一, 文献[3]表明模糊函数思想同样适用于 SAR 分辨特性的分析, 称为 SAR 广义模糊函数(Generalized Ambiguity Function, GAF)。广义模糊函数反映了 SAR 系统全局分辨特性, 不仅能够刻画系统二维空间分辨率, 即模糊函数的主瓣宽度, 还能描述系统的模糊特性。本文以刻画 MIMO SAR 系统分辨特性为目的, 详细推导了 MIMO SAR 的广义模糊函数, 获得了系统分辨率与发射波形、收发阵列流形等参数之间的解析关系。

* 收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(61025006); 国家自然科学基金资助项目(60872134)

作者简介: 周伟(1985—), 男, 安徽亳州人, 博士研究生, E-mail: eric_zhou@nudt.edu.cn;

刘永祥(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: lyx_bible@sina.com

1 历史回顾

Woodward 提出的模糊函数^[8]是衡量雷达系统分辨率的重要工具,反映了系统对距离-多普勒域相邻目标的分辨能力。文献[3]将传统模糊函数概念推广到 SAR 领域,定义为空间上相邻点目标回波信号的相关函数;文献[9]推导了双/多站 SAR 模糊函数,获得了系统分辨率与发射波形以及几何构型之间的定量关系;文献[10]进一步推导了三维 SAR 广义模糊函数的表达式;文献[11]针对分布式小卫星 SAR 系统,推导了单发多收 SAR 的广义模糊函数;作者在文献[12]中初步推导了 MIMO SAR 模糊函数,本文在此基础上进行了扩展。

假设发射信号为 $s(t)$, $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ 为场景中任意散射点的位置矢量,散射系数为 $\rho(\mathbf{x})$ 。忽略噪声和干扰的影响,场景回波可表示为

$$r(t) = \int \rho(\mathbf{x}) s(t - \tau; \mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

其中 τ 为目标到 SAR 天线相位中心的双向时延。

场景散射系数通过二维匹配滤波器估计,即

$$\hat{\rho}(\mathbf{x}) = \int r(t) s^*(t - \tau_0; \mathbf{x}_0) dt \quad (2)$$

其中 τ_0 为参考点 \mathbf{x}_0 对应的信号时延, $(\cdot)^*$ 表示信号共轭变换。

将式(1)代入式(2),则基于匹配滤波的散射系数估计表示为

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(\mathbf{x}) &= \int s^*(t - \tau_0; \mathbf{x}_0) \int \rho(\mathbf{x}) s(t - \tau; \mathbf{x}) d\mathbf{x} dt \\ &= \int \rho(\mathbf{x}) \int s(t - \tau; \mathbf{x}) s^*(t - \tau_0; \mathbf{x}_0) dt d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3)$$

文献[3]将第二个积分项定义为 SAR 广义模糊函数,即

$$\chi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \int s(t - \tau; \mathbf{x}) s^*(t - \tau_0; \mathbf{x}_0) dt \quad (4)$$

从形式上,GAF 可看作场景中任意点目标回波信号与参考点回波信号的相关函数。

如果将发射信号表示为指数函数形式,即 $s(t) = g(t) \exp(j\omega_c t)$,则 GAF 可表示为

$$\chi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \iint g(t_f) g^*(t_f - \tau_d) \cdot \exp(-j\omega_c \tau_d) dt_f dt_s \quad (5)$$

其中 $g(t)$ 为信号复包络, ω_c 为信号载频, t_f 和 t_s 分别表示信号的快、慢时间, $\tau_d(t_s) = \tau(t_s) - \tau_0(t_s)$ 为点目标 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}_0 相对时延差。进一步推导^[13],单站 SAR 模糊函数可表示为

$$|\chi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)| = |\text{sinc}(B_r \tau_0) \text{sinc}(T_s f_{d0})| \quad (6)$$

其中 $\text{sinc}(\mathbf{x}) = \sin(\pi \mathbf{x}) / \pi \mathbf{x}$, B_r 为发射信号带宽, T_s 为合成孔径时间。

上式表明,单站 SAR 模糊函数可表示为两个辛克函数的乘积,分别刻画了系统距离向和方位向分辨率。需要指出的是,SAR 广义模糊函数与传统模糊函数区别如下:第一,与传统模糊函数定义在距离-多普勒域上不同,SAR GAF 定义在空间域,系统分辨率通常采用归一化模糊函数主瓣峰值 $1/\sqrt{2}$ 处的椭圆切面表征;第二,传统模糊函数最大值出现在 $\chi(0,0)$,而 GAF 的最大值出现在目标的真实位置。

2 MIMO SAR 信号模型

建立地面固定参考坐标系 $O - XYZ$,同时引入另外两个坐标系:第一个坐标系为随平台运动的传感器坐标系 $O_p - x'y'z'$,其中原点 O_p 为天线阵列参考相位中心, x' 轴为平台运动方向,水平面内垂直于平台运动方向为 y' 轴,垂直于水平平面为 z' 轴,平台高度为 h ,速度为 v_p ,平台与场景中心最小距离在水平面上的投影为 y_c 。 M 个发射天线和 N 个接收天线围绕参考相位中心分散放置。第 m 个发射天线和第 n 个接收天线的空间坐标分别用 \mathbf{p}_m 和 \mathbf{q}_n 表示。第二个坐标系为固定的场景坐标系 $O_s - xyz$,其中 O_s 为成像场景中心,其余轴平行于传感器坐标系。场景坐标系可看作传感器坐标系经过平移得到,两个坐标系通过矢量 $\mathbf{r}_p(t_s) = [v_p t_s, -y_c, h]^T$ 相关联。上述几何关系如图 1 所示。

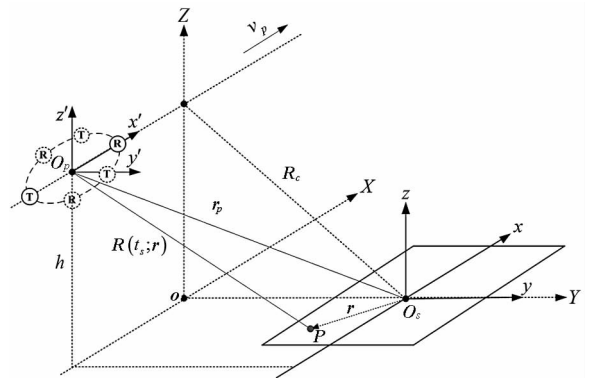


图 1 MIMO SAR 成像几何关系

Fig. 1 The imaging geometry of MIMO SAR

假设系统发射总能量为 E ,第 m 个天线发射的信号表示为

$$s_m(t) = \sqrt{E/M} p_m(t) \exp(j2\pi f_c t) \quad (7)$$

其中 $p_m(t)$ 为信号复包络, f_c 为载频。

为避免发射信号相互耦合,多个发射波形的相关函数通常满足以下条件:

$$\int_{T_p} p_m(t) p_{m'}^*(t + \tau) dt = \begin{cases} 1, & m = m' \\ c_{mm'}, & m \neq m' \end{cases} \quad (8)$$

其中 τ 为任意的时间延迟, T_p 为脉冲宽度, $c_{mm'}$ 为发射波形之间的互相关输出, 如果信号为理想正交集, 则 $c_{mm'} = 0$ 。

对于分布式场景而言, 第 n 个天线的接收信号是由所有发射信号经场景内全部散射点反射的回波相参合成, 可表示为

$$E_{r,n}(t, \mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \int \alpha_{mn}(\mathbf{x}) \rho_{mn}(\mathbf{x}) s_m(t - \tau_{mn}) d\mathbf{x} \quad (9)$$

其中

$$\tau_{mn}(t_s; \mathbf{x}) = \frac{R_{T,m}(t_s; \mathbf{x}) + R_{R,n}(t_s; \mathbf{x})}{c} \quad (10)$$

$$R_{T,m}(t_s; \mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{r}_p(t_s) - \mathbf{p}_m\| \quad (11)$$

$$R_{R,n}(t_s; \mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{r}_p(t_s) - \mathbf{q}_n\| \quad (12)$$

其它参数说明如下: $\alpha_{mn}(\mathbf{x})$ 是由第 m 个发射天线和第 n 个接收天线波束方向图, 以及收发天线与散射点距离共同决定的系统增益, $\rho_{mn}(\mathbf{x})$ 为第 $(m - n)$ 个收发组合对应的目标散射系数。假设目标相对于所有收发组合具有相同的散射特性, 且各收发组合的天线增益也近似相等, 因此有 $\alpha_{mn}(\mathbf{x}) \approx \alpha(\mathbf{x})$, $\rho_{mn}(\mathbf{x}) \approx \rho(\mathbf{x})$ 成立。

在每个接收通道构建一组匹配滤波器实现信号分离。第 m 个匹配滤波器的响应函数为 $s_m^*(-t)$, 所以第 n 个接收通道对应于第 m 个发射信号的匹配滤波输出可表示为

$$E_{r,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \int \alpha(\mathbf{x}) \rho(\mathbf{x}) \cdot$$

$$\int \sum_{m'=1}^M s_{m'}[t - \tau_{m'n}(\mathbf{x})] s_m^*[t - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)] dt d\mathbf{x} \quad (13)$$

与传统 SAR 系统广义模糊函数类似, 第 m 个天线发射和第 n 个天线接收形成的广义模糊函数表示为

$$\begin{aligned} \chi_{mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \int \sum_{m'=1}^M s_{m'}[t - \tau_{m'n}(\mathbf{x})] s_m^*[t - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)] dt \\ &= \chi_{A,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) + \chi_{C,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\chi_{A,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \int s_m[t - \tau_{mn}(\mathbf{x})] s_m^*[t - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)] dt \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \chi_{C,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \int s_{m'}[t - \tau_{m'n}(\mathbf{x})] s_m^*[t - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)] dt \\ & \quad (16) \end{aligned}$$

分别表示自相关模糊函数和互相关模糊函数。

由式(14)可见, 第 n 个接收通道回波经过第 m 个匹配滤波器的输出可分解为与发射信号 $s_m(t)$ 相匹配的信号自相关分量, 以及由信号非理想正交导致的信号互相关分量。

本文主要研究基于匹配滤波方法成像、图像域融合的处理策略, 系统输出为所有收发组合的相参合成, 即

$$\begin{aligned} E_r(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int \alpha(\mathbf{x}) \rho(\mathbf{x}) \chi_{mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) d\mathbf{x} \\ &= \int \alpha(\mathbf{x}) \rho(\mathbf{x}) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \chi_{mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (17)$$

显然, MIMO SAR 系统匹配输出取决于所有收发组合的模糊函数之和, 即

$$\chi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \chi_{mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \right| \quad (18)$$

上述定义与文献[14]中的复合模糊函数定义类似, 但在研究对象、定义域上都存在显著差别。

3 广义模糊函数

将式(7)代入式(15), 第 n 个接收通道关于第 m 个发射信号的自相关模糊函数表示为

$$\begin{aligned} \chi_{A,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \iint P_m[t_f - \tau_{mn}(\mathbf{x})] P_m^*[t_f - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)] w_a(t_s) \\ & \quad \cdot \exp\{-j2\pi f_c[\tau_{mn}(\mathbf{x}) - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)]\} dt_f dt_s \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $w_a(t_s)$ 为方位向波束图。当 $M = N = 1$ 时, 上式简化为单站 SAR 模糊函数^[3]。

由帕斯瓦定理, 式(19)也可表示为距离频域的形式, 即

$$\begin{aligned} \chi_{A,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \iint |P_m(f)|^2 \exp(-j2\pi f \tau_{d,mn}) \\ & \quad \cdot w_a(t_s) \exp(-j2\pi f_c \tau_{d,mn}) df dt_s \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $P_m(f)$, $f \in [-B_r/2, B_r/2]$ 为第 m 个发射信号的谱密度函数; $\tau_{d,mn} = \tau_{mn}(\mathbf{x}) - \tau_{mn}(\mathbf{x}_0)$ 为第 $(m - n)$ 个收发组合的时延差。

由于不存在完全正交的波形集, 匹配滤波器输出结果不仅包含与发射信号匹配自相关输出, 还包括与其它波形的互相关输出, 将式(7)代入式(16), 可得

$$\begin{aligned} \chi_{C,mn}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \sum_{m=1, m \neq m'}^M \int_{-T_s/2}^{T_s/2} c_{mm'}(\tau_{d,m'n}) \exp(-j2\pi f_c \tau_{d,m'n}) dt_s \\ & \quad (21) \end{aligned}$$

互相关模糊函数输出抬高了系统响应的副瓣

电平,使得 SAR 系统的积分旁瓣比升高。在实际应用中,通过波形优化设计能够将信号互相关输出限制在较低的水平,因此在后续分析中将忽略互相关输出对系统的影响。

假设目标经过方位向波束中心的时刻为 t_c , 将时延差函数在 $t_s = t_c$ 泰勒展开,即

$$\tau_{d,mn}(t_s; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \tau_{d,mn}(t_c; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0) + \frac{\partial \tau_{d,mn}(t_s; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0)}{\partial t_s} \Big|_{t_s=t_c} \cdot (t_s - t_c) + o(t_s^2) \quad (22)$$

为方便表示,常数项和一次项分别定义为:

$$\hat{\tau}_{d,mn} \triangleq \tau_{d,mn}(t_c; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \quad f_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}}) \triangleq \frac{\partial \tau_{d,mn}(t_s; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0)}{\partial t_s} \Big|_{t_s=t_c} \quad (23)$$

其中 $\vec{\mathbf{x}} \triangleq \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ 表示目标 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}_0 的相对矢量。忽略二次以上的高阶项,时延差函数可近似为

$$\tau_{d,mn}(t_s; \mathbf{x}, \mathbf{x}_0) \approx \hat{\tau}_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}}) + f_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}}) \cdot t_s \quad (24)$$

MIMO SAR 系统广义模糊函数的自相关分量表示为

$$\begin{aligned} \chi_A(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_{-B_r/2}^{B_r/2} |P(f)|^2 \exp(-j2\pi f \hat{\tau}_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}})) df \cdot \\ &\int_{-T_s/2}^{T_s/2} w_a(t_s) \exp(-j2\pi f_c [\hat{\tau}_{d,mn} + f_{d,mn} t_s]) dt_s \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{r,m}(\hat{\tau}_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}})) g_{a,mn}(f_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}})) \\ &\times \exp(-j2\pi f_c \hat{\tau}_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}})) \end{aligned} \quad (25)$$

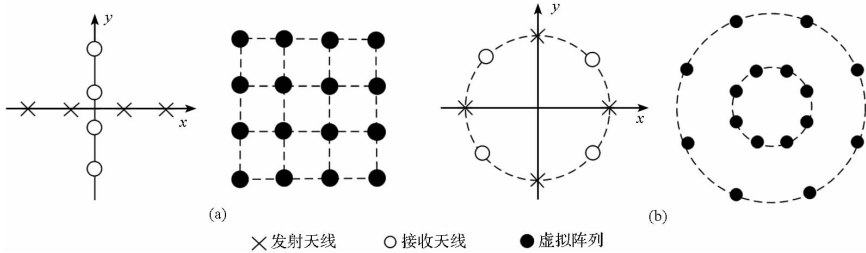


图 2 两种 MIMO SAR 阵列构型

Fig. 2 Two kinds of MIMO SAR array manifold

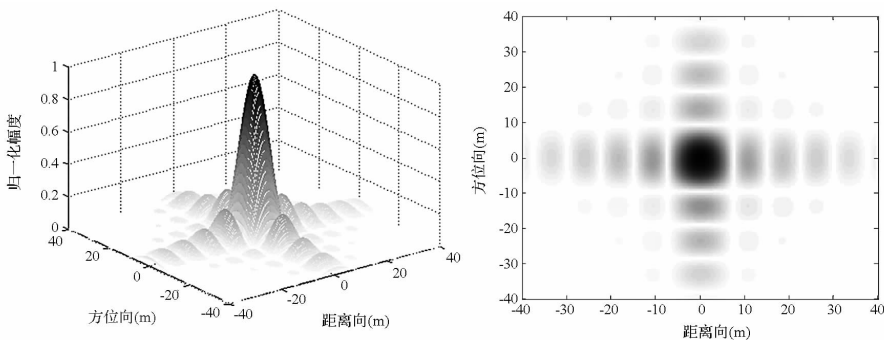


图 3 第一种几何构型 MIMO SAR 模糊函数

Fig. 3 The GAF of MIMO SAR with the first array manifold

其中 $g_r(t)$ 和 $g_a(t)$ 分别为信号功率谱 $|P(f)|^2$ 的逆傅里叶变换和方位向波束方向图 $w_a(t_s)$ 的傅里叶变换。

当天线之间间隔远远小于雷达到场景的距离时,收发组合之间的时延差导致的目标距离向偏移可以近似忽略不计,即 $\hat{\tau}_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}}) \approx \hat{\tau}_d(\vec{\mathbf{x}})$ 。综上推导,MIMO SAR 的广义模糊函数可表示为:

$$\chi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \text{sinc}(B_r \tau_d(\vec{\mathbf{x}})) \text{sinc}(f_d(\vec{\mathbf{x}}) T_s) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp(-j2\pi f_c \tau_{d,mn}(\vec{\mathbf{x}})) \quad (26)$$

上述研究表明,MIMO SAR 模糊函数可表示为单站 SAR 模糊函数与虚拟等效阵列空间模糊函数的乘积。

4 仿真实验

为验证本文建立的理论模型,分别以两种典型的 MIMO SAR 阵列构型展开分析:第一,同平台相参 MIMO SAR 系统,发射和接收阵列分别为相互垂直的均匀线性阵,各个天线阵列相隔较小,如图 2(a) 所示;第二,分布式 MIMO SAR 系统,发射和接收阵列分布在同一个圆形轨道上,天线阵列间隔在几百米~几千米的量级,由于星载平台与场景中心通常相距几百千米之上,目标相对于所有收发组合具有近似相同的散射特性,因此本文的模型依然适用,如图 2(b) 所示。

图3给出了发射和接收阵列互相垂直情况下的 MIMO SAR 模糊函数。由仿真结果可以看出,当 MIMO 阵列天线间隔较小时,阵列构型对于系统分辨率影响较小,分辨特性由常规 SAR 模糊函数决定,即信号带宽和合成孔径时间。图4给出

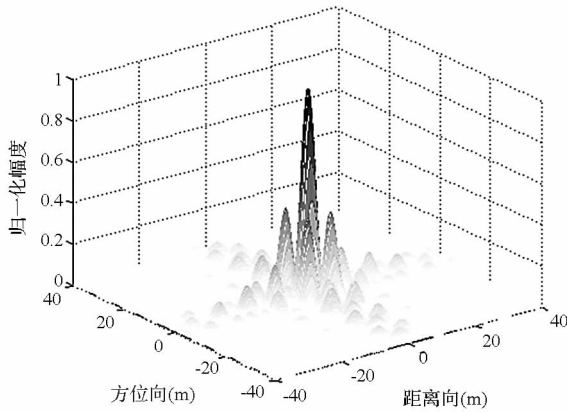
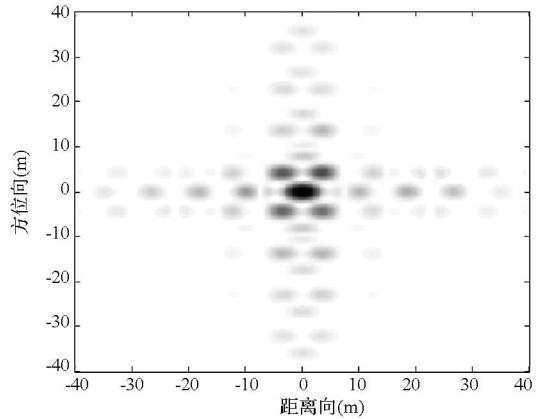


图4 第二种几何构型 MIMO SAR 模糊函数

Fig. 4 The GAF of MIMO SAR with the second array manifold

了分布式 MIMO SAR 模糊函数,当 MIMO 阵列间隔较大时,空间模糊函数主瓣变窄,分辨特性主要由阵列几何构型决定。作为 MIMO SAR 的特例,文献[11]对分布式卫星模糊函数的研究也验证了这一结论。



5 结束语

系统分辨特性是 SAR 系统重要的技术指标。与常规 SAR 相比,MIMO SAR 综合利用了波形分集和空间分集优势,因此传统的单通道分析方法难以准确刻画该体制 SAR 的分辨特性。广义模糊函数是分析常规单站 SAR 系统分辨特性的重要手段,能够很好地反映 SAR 系统的成像性能。本文建立了 MIMO SAR 系统信号处理的数学模型,引入了广义模糊函数概念,通过数学推导获得了 MIMO SAR 广义模糊函数的解析表达式。理论分析和实验研究表明,MIMO SAR 系统分辨率不仅取决于发射波形的带宽和合成孔径长度,还与发射/接收天线的阵列流形密切相关。本文的研究成果为 MIMO SAR 系统阵列构型以及波形集优化设计提供了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] Li J, Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 106-114.
- [2] Haimovich A M, Blum R S, Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116-129.
- [3] Skolnik M. Radar handbook[M]. New York: McGraw Hill, 1990, Chapter 21.4.
- [4] Cardillo G P. On the use of the gradient to determine bistatic SAR resolution[C]//Proceedings on Antennas and Propagation Society International Symposium, 1990: 032-1035.
- [5] Moccia A, Renga A. Spatial resolution of bistatic synthetic aperture radar: impact of acquisition geometry on imaging performance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3487-3503.
- [6] Linnehan R, Brady D, Schindler J, et al. On the design of SAR aperture using CRB[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 43(1): 344-355.
- [7] Goodman N A, Stiles J M. Resolution and synthetic aperture characterization of sparse array radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 921-935.
- [8] Woodward P M. Probability and information theory with applications to radar [M]. Norwood, MA: Artech House, 1980.
- [9] Zeng T, Cherniakov M, Long T. Generalized approach to resolution analysis in BSAR [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronics Systems, 2005, 41(2): 461-474.
- [10] Gao X, Zhang X L, Jun S. Resolution analysis of airborne 3-D SAR via generalized ambiguity function[C]//The 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2011:1-4.
- [11] 李俐,王岩飞,张冰尘. 编队卫星 SAR 的模糊函数分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(3): 512-516.
LI Li, WANG Yanfei, ZHANG Bingchen. Ambiguity function of formation flying satellites SAR system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(3): 512-516. (in Chinese)
- [12] Zhou W, Chen H W, Jiang W D, et al. Generalized ambiguity function analysis of MIMO SAR [C]//The 11th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2012: 1724-1728.
- [13] Daout F, Schmitt F, Ginolhac G, et al. Multistatic and multiple frequency imaging resolution analysis - application to GPS-based multistatic radar [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronics System, 2012, 48(4): 3042-3057.
- [14] Guey J C, Bell M R. Diversity waveform sets for delay-Doppler imaging [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1998, 44(4): 1504-1522.