

MIMO 雷达中的信号检测

肖文书

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘 要: 常规雷达系统越来越难于应对日益逼近的空间目标和隐身目标, MIMO 雷达已成为一个发展方向. 针对运动目标, 本文深入分析了充分统计量的概率密度函数, 讨论了四种工作模式的内涵, 研究了 MIMO 雷达工作于四种工作模式时的检测模型、方法及性能改善. 通过理论和仿真分析, 建议 MIMO 雷达系统采用单发多收工作模式, 并且, 接收站数量建议取 4 至 6.

关键词: MIMO 雷达; 信号检测; 分集增益; 充分统计量

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0626-06

Model of Signal Detection for MIMO Radar

XIAO Wen-shu

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

Abstract: Recently, it becomes difficult for normal radar system to detect the stealth targets and space objects, so the researchers have paid more attention to the MIMO radar. For moving targets, the probability density function of sufficient statistic is analyzed firstly; then, the meaning of four working mode is discussed; finally, based on four working mode, the MIMO radar system's detection method and performance are development. By theoretical analysis and simulation, we get the conclusions which are: MIMO working mode is suitable for MIMO radar system, and the number of receive station should be 4~6.

Key words: MIMO radar; signal detection; diversity gain; sufficient statistic

1 引言

伴随着越来越复杂的电磁环境和越来越精确的硬摧毁能力, 常规雷达系统越来越难于应对日益逼近的空间目标和隐身目标. 常规雷达系统实现上述目标探测的主要手段是使用大功率发射机和大口径天线. 然而, 庞大的天线和难于移动的固定阵地不能满足现代雷达“高机动”的发展要求. MIMO (Multiple Input Multiple Output) 雷达、多基地雷达技术的出现给人们带来了另一种思路^[1].

MIMO 雷达起源于 90 年代法国的稀布阵综合脉冲孔径雷达 (SIAR)^[2]. 在 2003 到 2004 年的雷达会议上, 学者们正式提出 MIMO 雷达的概念, 并设立专题讨论相关的理论问题^[2~7]. MIMO 雷达通过对多站接收的信号进行协同处理, 包括信号级相参或非相参处理, 来提高雷达系统抗目标“闪烁”性能、目标识别性能以及低截获性能等^[1,3,4].

目标检测是 MIMO 雷达技术中的一个重要方面, 许多学者开展了这一方面的研究^[1,4]. 文献[1]分析了 MIMO 雷达各种情况下的检测模型、方法和性能, 但没有

完整分析 MIMO 雷达的充分统计量概率密度函数; 文献[4]从 MIMO 雷达各种布站方式入手, 分析了紧致型 MIMO 雷达 (等价于相控阵雷达) 和分布式 MIMO 雷达对静止目标的检测模型和性能.

针对运动目标, 本文以文献[1,3,4]为基础, 首先分析了 MIMO 雷达信号模型, 然后从常规雷达理论出发, 深入分析了充分统计量的概率密度函数, 研究了 MIMO 雷达工作于四种工作模式时的检测模型、方法及性能改善, 并分析了四种工作模式的内涵. 文章对理论研究成果进行了仿真, 结果表明本文给出的结论合理、有效.

2 信号模型

沿用文献[4]中的目标模型, 如图 1 所示, 假设某运动目标由无穷多个散射点构成, 各散射点相互独立, 并随机、均匀分布于空间区域 $[x_0 - \Delta x/2, x_0 + \Delta x/2] \times [y_0 - \Delta y/2, y_0 + \Delta y/2]$ 内.

图中 $t_k, k=1, \dots, M$ 表示第 k 个发射站, 其坐标为 (tx_k, ty_k) , $r_l, l=1, \dots, N$ 表示第 l 个接收站, 其坐标为 (rx_l, ry_l) .

用 $\varepsilon(x, y)$ 表示散射点 $(x + x_0, y + y_0)$ ($(x, y) \in [-\Delta x/2, \Delta x/2] \times [-\Delta y/2, \Delta y/2]$) 的散射特性. $\varepsilon(x, y)$ 服从 0 均值的复高斯分布, 并且 $E\{|\varepsilon(x, y)|^2\} = 1$.

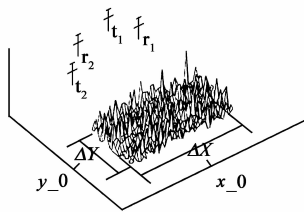


图1 目标模型

考虑到目标运动, 采用文献[4]类似推导方法可得第 l 个接收站接收到第 k 个发射站的信号 $r_{lk}(t)$ 为^[4]

$$r_{lk}(t) = \alpha_{lk} A s_k(t - \tau_{lk}) e^{-j2\pi f_{dlk} t} \quad (1)$$

其中 α_{lk} 为第 k 个发射站到第 l 个接收站之间的增益, 服从瑞利分布; f_{dlk} 表示目标相对于第 k 个发射站、第 l 个接收站的联合多普勒频率; $\tau_{lk} = \tau(tx_k, ty_k, x_0, y_0) + \tau(rx_l, ry_l, x_0, y_0)$. α_{lk} 和 τ_{lk} 的具体表达式参见文献[4].

根据不同 α_{lk} 之间的相关性, MIMO 雷达的布站方式可分为两种类型: “空间相干” 分布和 “空间非相干” 分布. 对此, 文献[1]和文献[4]均作了深入分析, 这里不再赘述.

文献[4] 利用窄带假设, 有

$$s_k(t - \tau_{lk}) \approx \exp(-j\Psi_k - j\Phi_l) s_k(t - \tau_{11}) \quad (2)$$

其中

$$\Psi_k = 2\pi f_c (\tau(tx_k, ty_k, x_0, y_0) - \tau(tx_1, ty_1, x_0, y_0))$$

$$\Phi_l = 2\pi f_c (\tau(rx_l, ry_l, x_0, y_0) - \tau(rx_1, ry_1, x_0, y_0))$$

对于紧致型 MIMO 雷达, 相对于与目标之间的距离, 各接收站和发射站之间的间距很小, 式(2)给出的近似是合理的; 但对于分布式 MIMO 雷达, 目标位于不同的距离门, 而式(2)忽略了这一概念, 更准确的表达式为

$$s_k(t - \tau_{lk}) = s_k(t) \otimes \delta(t - \tau_{lk}) \quad (3)$$

其中 \otimes 表示卷积.

将式(3)代入式(1), 并考虑到噪声, 可得第 l 个接收站的接收信号为

$$r_l(t) = A \sum_{k=1}^M \alpha_{lk} s_k(t) \otimes \delta(t - \tau_{lk}) e^{-j2\pi f_{dlk} t} + n_l(t) \quad (4)$$

3 检测模型

MIMO 雷达可以有四种工作模式: 单发单收、单发多收、多发单收、多发多收等, 下面具体分析每种工作模式的内涵、检测模型及其性能.

3.1 单发单收

MIMO 雷达工作于单发单收模式时, 各发射、接收站布阵方式严格满足 “空间相干” 分布条件, 各发射站信号形式相同, 与收发分离的相控阵雷达等价, 因此被称之

为 “单发单收”.

由于各发射、接收站布阵方式严格满足 “空间相干” 的条件, 因此有如下结论:

(1) $\alpha_{lk} = \alpha$, 且 α 服从瑞利分布;

(2) $f_{dlk} = f_d$, $\tau_{lk} = \tau_0$;

(3) 式(2)成立;

(4) 由于各发射信号形式相同, 因此各发射信号能量在目标处按相位叠加.

由上述结论, 结合式(2), 式(4)可改写为^[4]

$$\mathbf{r}(t) = A \alpha \mathbf{a}(x_0, y_0) \mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta) \mathbf{s}(t - \tau_0) e^{-2\pi f_d t} + \mathbf{n}(t) \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t), \dots, r_N(t)]^T,$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_N(t)]^T$$

式(8)中 $\tilde{\mathbf{b}}(\theta)$ 为阵列发射天线的导向矢量, 称 $\mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta)$ 为发射增益; $\tilde{\mathbf{a}}(\theta')$ 为阵列接收天线的导向矢量, 称 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta') \alpha(x_0, y_0)$ 为接收增益.

将各接收站接收相参积累后的信号为

$$\mathbf{r}(t) = \tilde{\mathbf{a}}(\theta')^H \mathbf{r}(t) \quad (6)$$

对 $\mathbf{r}(t)$ 按下式进行匹配滤波, 结果为

$$x(t) = \int \mathbf{r}(\tau) \mathbf{s}^*(t - \tau) e^{2\pi f_d t} d\tau \quad (7)$$

根据常规雷达检测理论, 如果采用包络检波, 充分统计量为:

$$T = \begin{cases} x(t) > \delta & H_1 \\ x(t) < \delta & H_0 \end{cases} \quad (8)$$

如果采用平方检波, 充分统计量为:

$$T = \begin{cases} |x(t)|^2 > \delta & H_1 \\ |x(t)|^2 < \delta & H_0 \end{cases} \quad (9)$$

对式(5)中某一固定的 α , 有

$$q = |x| \sim \begin{cases} (q/\sigma_{\text{out}}^2) \exp(-q^2/2\sigma_{\text{out}}^2) & H_0 \\ (q/\sigma_{\text{out}}^2) \exp(-(q^2 + A_{\text{out}}^2)/2\sigma_{\text{out}}^2) I_0(qA_{\text{out}}/2\sigma_{\text{out}}^2) & H_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $I_0(qA_{\text{out}}/2\sigma_{\text{out}}^2)$ 为一阶修正贝塞尔函数, $A_{\text{out}} = A \alpha \mathbf{a}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{a}}(\theta') \mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta)$,

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \|\mathbf{a}^H(x_0, y_0) \tilde{\mathbf{a}}(\theta') \sigma^2\|^2.$$

随机变量 $q = |x(t)|$ 与 $q' = |x(t)|^2$ 之间存在单调递增函数关系 $q'(q) = q^2$, 因此, 随机变量 $q(q')$ 的概率密度函数为 $P_{q'} = P_q(\sqrt{q'})/\sqrt{q'}$. 也就是

$$q' = |x|^2 \sim \begin{cases} (2\sigma_{\text{out}}^2)^{-1} \exp(-q'/2\sigma_{\text{out}}^2) & H_0 \\ (2\sigma_{\text{out}}^2)^{-1} \exp(-(q' + A_{\text{out}}^2)/2\sigma_{\text{out}}^2) I_0(\sqrt{q'} A_{\text{out}}/2\sigma_{\text{out}}^2) & H_1 \end{cases} \quad (11)$$

下面分析 MIMO 雷达工作于单发单收模式的检测性能。

单发单收模式下的 MIMO 雷达检测性能主要体现在发射增益 $\mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta)$ 和接收增益 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta) \mathbf{a}(x_0, y_0)$ 上. 具体信噪比改善为:

$$SNR_{\text{out}} = \frac{A_{\text{out}}^2}{2\sigma_{\text{out}}^2} = M^2 N \cdot SNR_0 \quad (12)$$

因此, MIMO 雷达工作于单发单收模式时, 可获得 $M^2 N$ 倍的信噪比改善.

称发射增益 $\mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta)$ 和接收增益 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta)^H \mathbf{a}(x_0, y_0)$ 为孔径增益, 因此单发单收工作模式主要获得孔径增益. MIMO 雷达工作于单发单收工作模式时, 本质上等价于相控阵雷达. 因此, 由常规雷达理论可知, 工作于单发单收工作模式时, MIMO 雷达一方面可以获得孔径增益; 另一方面, 由于目标运动而造成目标散射截面积(RCS)“闪烁”, 带来信噪比损失, 并且, 检测概率越大, 信噪比损失越大.

3.2 单发多收

MIMO 雷达工作于单发多收模式时, 各发射站布阵方式严格满足“空间相干”分布条件, 信号形式相同; 各接收站分布方式满足“空间非相干”的条件. 与由一个发射站雷达和多个接收站构成的多基地雷达系统等价, 因此被称之为“单发多收”.

MIMO 雷达工作于单发多收工作模式时, 各发射站布阵方式严格满足“空间相干”的条件, 并且各站发射信号形式相同, 有如下结论:

- (1) $\alpha_{lk} = \alpha_l$, 且 α_l 服从瑞利分布;
- (2) $f_{dlk} = f_{dl}$, $\tau_{lk} = \tau_l$;
- (3) 由于各发射信号形式相同, 因此各发射信号能量在目标处按相位叠加.

将不同接收通道中的接收信号进行时延补偿, 距离门对齐, 使 $\tau_l \approx \tau_0$, $l = 1, 2, \dots, N$.

经过时延补偿, 式(4)改写为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}(t) \mathbf{a}(x_0, y_0)^H \cdot \mathbf{A} \mathbf{b}(x_0, y_0)^H \tilde{\mathbf{b}}(\theta) s(t - \tau_0) + \mathbf{n}(t) \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{H}(t) = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_N),$$

$$c_i = \alpha_i \exp(-2\pi f_{dt} t).$$

对 $\mathbf{r}(t)$ 按下式进行匹配滤波

$$\mathbf{x}(t) = \int \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{r}(\tau) s^H(t - \tau) d\tau \quad (14)$$

其中 $\mathbf{R}_1 = \text{diag}(e^{2\pi f_{dt} t}, e^{2\pi f_{dt} t}, \dots, e^{2\pi f_{dt} t})$, 用于补偿多普勒频率的影响.

MIMO 雷达工作于单发多收模式时, 以式(14)为基础进行 Neyman-Pearson 检测.

根据文献[1]和文献[4], 可得似然比检测表达式为

$$T = \sum_{i=1}^M x_i^2(t) \begin{cases} > \delta & H_1 \\ < \delta & H_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$x_i(t) = \int e^{2\pi f_{dt} \tau} r_i(t) s^H(t - \tau) d\tau \quad (16)$$

由于各接收站分布满足“空间非相干”分布条件, 式(16)给出的 $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 相互统计独立, 同时出现衰落的可能性很小. 因此, MIMO 雷达工作于单发多收工作模式时, 可有效抑制由于目标“闪烁”引起的信噪比损失, 进而提高检测性能, 称之为分集增益^[3,4].

下面具体分析 MIMO 雷达的分集增益性能.

令 $v_i = q_i / \sigma^2$, 根据式(11), 有如下条件概率

$$f(v_i | A_1, \dots, A_N) = \begin{cases} \exp(-v_i/2)/2 & H_0 \\ \exp(-(v_i + SNR_i)/2) I_0(\sqrt{v_i SNR_i}) & H_1 \end{cases} \quad (17)$$

其中 SNR_i 表示各接收站输出信号信噪比.

由 α_i 服从瑞利分布, 因此 A_i 也服从瑞利分布, 密度函数如下

$$f(A_i) = (A_i/A_0^2) \exp(-A_i^2/2A_0^2) \quad (18)$$

其中 $A_i \geq 0$, $A_0 = \sum A_i/N$.

令 $v = \sum q_i / \sigma^2 = \sum v_i$, 当目标不存在时, 由式(17), 利用特征函数, 可得 v 的概率密度函数为

$$f_0(v) = [2^N \Gamma(N)]^{-1} (v)^{N-1} \exp(-v/2) \quad (19)$$

即自由度为 $2N$ 的 χ^2 分布.

当目标存在时, 由式(17), 同理可得 v 的条件概率密度函数为

$$f_1(v | A_1, \dots, A_N) = (v/SNR)^{(N-1)/2} \exp[-(v + SNR)/2] I_{N-1}((SNRv)^{1/2}) \quad (20)$$

其中 $SNR = \frac{\sum_{i=1}^N A_i^2}{\sigma^2}$, 表示各接收信号非相参积累后的信噪比. 即自由度为 $2N$ 的非中心 χ^2 分布. 因此检测概率为

$$P_d = \int_{\delta}^{\infty} \int_0^{\infty} f_1(v | A_1, \dots, A_M) f(A) dA dv = E[P_d(SNR)] \quad (21)$$

其中 A_i 服从瑞利分布, 式(18)给出了 A_i 概率密度函数, 设 $y = \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{A_0}\right)^2$, 随机变量 y 与信噪比 SNR 成正比. 可从式(18)出发, 可推导出随机变量 y 的概率密度函数.

根据随机变量 y 的概率密度函数, 检测概率为:

$$P_d = \int_0^{\infty} f(y) \int_{\delta}^{\infty} \frac{1}{2} \left(\frac{v}{\rho y}\right)^{(N-1)/2} \times \exp\left(-\frac{v + \rho y}{2}\right) I_{N-1}[(\rho y v)^{1/2}] dv dy \quad (22)$$

其中 $\rho = A_0^2/\sigma^2$ 为各接收信号的平均信噪比.

文献[8]给出了式(22)中 y 上积分的封闭表达式, 即

$$P_d = \int_{\delta/2(1+\rho)}^{\infty} [(N-1)!]^{-1} z^{N-1} \exp(-z) dz \quad (23)$$

经过分部积分, 得

$$P_d = \exp\left[\frac{-\delta}{2(1+\rho)}\right] \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{\delta}{2(1+\rho)}\right]^n / n! \quad (24)$$

对式(24)求导, 可得目标存在时, 可得 v 的概率密度函数为

$$f_1(v) = [(N-1)!]^{-1} \left(\frac{v}{2(1+\rho)}\right)^{N-1} \times \exp\left(-\frac{v}{2(1+\rho)}\right) / 2(1+\rho) \quad (25)$$

结论: 一方面, 由于发射站布阵满足“空间相关”的条件, 可以获得发射孔径增益, 大小为 M^2 倍; 另一方面, 各接收站布阵满足“空间非相关”的条件, 可以获得分集增益.

3.3 多发单收

MIMO 雷达工作于多发单收工作模式时, 各接收站满足“空间相干”分布条件, 这里“多发”有两重含义: 第一重含义, 各发射站满足“空间非相干”分布条件, 各站发射信号形式可以相同也可以不同; 第二重含义, 各发射站满足“空间相干”分布条件, 但各站发射信号形式不同, 在这种条件下, MIMO 雷达等价于综合脉冲孔径雷达^[9~11].

当“多发”取第一重含义时, 由电磁波传播互易特性可知, MIMO 雷达检测性能与单发多收工作模式类似, 具体参见 3.2 节, 单发多收工作模式的分析. 在这种情况下, MIMO 雷达可以获得两方面的性能: 即孔径增益和分集增益. 这里的孔径增益主要是接收孔径增益, 大小为 N 倍.

当“多发”取第二重含义时, MIMO 雷达的工作方式与 SIAR 相同, 发射波束在接收端形成, 主要获得孔径增益. 由于各站发射信号形式不同, 空间没有形成实际波束, 因此发射孔径增益大小为 M 倍, 接收孔径增益大小为 N 倍, 孔径增益共计 MN 倍, 但是, 由于目标“闪烁”, 导致信噪比损失.

3.4 多发多收

MIMO 雷达工作于多发多收模式时, 各发射、接收站均满足“空间非相干”分布条件, 与由多个发射站、多个接收站构成的多基雷达系统等价, 因此称之为“多发多收”.

工作于多发多收模式的 MIMO 雷达系统可以看作多个相互独立的工作于单发多收(或者多发单收)模式的 MIMO 雷达系统的线性叠加.

当目标不存在时, 充分统计量的概率密度为

$$f_0(v) = [2^{MN} \Gamma(MN)]^{-1} (v)^{MN-1} \exp(-v/2) \quad (26)$$

即服从自由度为 $2MN$ 的 χ^2 分布.

当目标存在时, 充分统计量的概率密度为

$$f_1(v) = [(MN-1)!]^{-1} \left(\frac{v}{2(1+\rho)}\right)^{MN-1} \times \exp\left(-\frac{v}{2(1+\rho)}\right) / 2(1+\rho) \quad (27)$$

MIMO 雷达工作于多发多收工作模式时, 主要获得分集增益, 而不能获得孔径增益.

3.5 性能分析

分集增益是 MIMO 雷达系统的一个重要特性, 本文所给出的结果是假设 MIMO 雷达系统布站完全满足“空间非相干”条件下分析得到的, 但是实际上不能完全保证. 因此 α_k 之间的相关性是影响分集增益的一个重要因素, 具体可参考文献[12].

MIMO 雷达工作于各种模式的性能改善如表 1 所示.

表 1 性能分析

工作模式	性能改善
单发单收	可获得孔径增益, $M^2 N$ 倍目标“闪烁”, 引起 SNR 损失
单发多收/多发单收	分集增益 + 孔径增益 M^2 (或 N) 倍
SIAR	孔径增益 MN 倍目标“闪烁”, 引起 SNR 损失
多发多收	分集增益

由表 1 可知: (1) 单发单收工作模式和 SIAR 工作模式的性能在表中已定量给出, 并且与单发单收工作模式相比, SIAR 工作方式的性能较差; (2) 单收多收工作模式、多发单收工作模式和多发多收工作模式的性能需要仿真分析才能定量给出.

4 仿真分析

孔径增益在阵列信号处理以及相控阵雷达理论中得到了深入仿真分析, 这里主要仿真分析分集增益.

图 2 给出了分集路径 M 不同时, 充分统计量的概率密度分布.

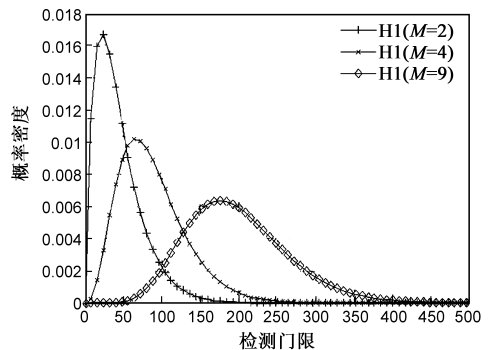


图2 MIMO雷达充分统计量的概率密度分布

由图 2 可知, 随着分集路径的增加, 目标检测越容

易,也就是获得分集增益。

由于 SIAR 工作模式与单发单收工作模式的性能差异表 1 已定量给出,并且单发多收工作模式和多发单收工作模式性能类似,因此,下面主要仿真单发多收工作模式和多发多收工作模式与单发单收工作模式之间的性能差异。分析条件:虚警概率为 10^{-6} ,检测概率分别为 0.9、0.8、0.5。分析结果如图 3、图 4、图 5 所示。

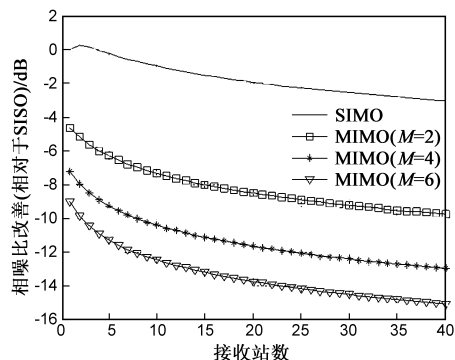


图3 $P_d=0.5$,相对于SISO的性能改善

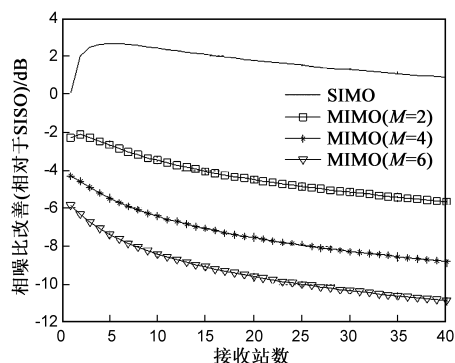


图4 $P_d=0.8$,相对于SISO的性能改善

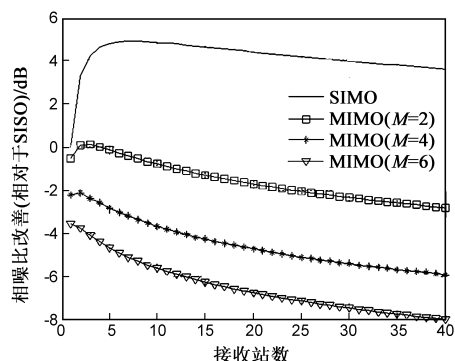


图5 $P_d=0.9$,相对于SISO的性能改善

综合表 1、图 3、图 4、图 5 可得如下结论:

(1) 当检测概率较大 ($P_d > 0.8$) 时,由于可同时获得孔径增益和分集增益,MIMO 雷达工作于单发多收模式(或者多发单收模式)获得的性能改善最大。

(2) 当检测概率较小 ($P_d = 0.5$),由于目标“闪烁”引起的检测 SNR 恶化以及分集增益较小,MIMO 雷达工作于单发单收模式获得的性能改善最大。

(3) 无论在何情况,SIAR 工作模式只能获得孔径增益,但不能补偿目标“闪烁”引起的 SNR 损失,所获得的性能改善相对而言较小。

(4) 综合考虑成本和性能改善两方面的考虑,MIMO 雷达工作于单发多收模式时,根据仿真结果,可初步认为接收站数量取 4 至 6 较为恰当。

5 结论

针对运动目标,本文重点分析了 MIMO 雷达工作于四种模式时充分统计量的概率密度函数、检测模型及其性能改善,主要有如下结论:

(1) 本文所给出的充分统计量的概率密度函数与常规雷达理论相符合,文献[1]给出的结论只是本文结论的一个特例;

(2) 由于发射机的稳定性、可靠性较接收机要差,并且需要消耗大量的电能,一般不建议采用多发单收的工作模式,而采用单发多收工作模式。因此,建议 MIMO 雷达系工作模式设置为在单发多收工作模式;

(3) 综合考虑成本和性能改善两方面的考虑,MIMO 雷达工作于单发多收模式时,根据仿真结果,综合考虑性能改善和成本,可初步认为接收站数量取 4 至 6 较为恰当,具体数量有待进一步理论分析。

参考文献:

- [1] V S Chernyak. Fundamentals of Multi-site Radar Systems[M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [2] Haimovich A, Rick Blum. MIMO radar: an idea whose time has come[A]. Proceedings of the IEEE Radar Conference[C]. Philadelphia: IEEE, 2004. 71 - 78.
- [3] Haimovich A, Blum R, Cimini R, et al. MIMO radar with widely separated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008. 25(1): 116 - 129.
- [4] Fishler E, Haimovich A, Blum R S, Cimini L J, et al. Spatial diversity in radars-models and detection performance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 823 - 838.
- [5] Robey F C, Coutts S, Weikle D, et al. MIMO radar theory and experimental results[A]. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. Pacific Grove, California: IEEE Computer Society, 2004. 300 - 304.
- [6] Jian Li, Luzhou Xu, Petre Stoica. Range compression and waveform optimization for MIMO radar: a Cramer-Rao Bound based study[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(1): 228 - 232.
- [7] Luzhou Xu, Jian Li. Iterative generalized-likelihood ratio test for MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(6): 2375 - 2385.

- [8] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 4th Edition. New York: Academic Press, 1965.
- [9] Chen Shuxuan, Chen Baixiao, Zhang Shouhong. Study of location based on T-R and T/R-R mode in bistatic radar[A]. CIE '06. International Conference on radar [C]. Shanghai: IEEE, 2006. 1 - 5.
- [10] 陈伯孝, 张守宏. 稀布阵综合脉冲孔径雷达一种新的测距方法[J]. 电子学报, 1997, 25(12): 116 - 118.
Chen Baixiao, Zhang Shouhong. A new method of distance measurement for sparse-array Synthetic Impulse and Aperture Radar[J]. Acta Eletronica Sinica, 1997, 25(12): 116 - 118. (in Chinese)
- [11] 陈伯孝, 张守宏. 稀布阵综合脉冲孔径雷达低距离副瓣与距离高分辨技术[J]. 电子学报, 1998, 26(9): 29 - 33.

- Chen Baixiao, Zhang Shouhong. Low-range-sidelobe and high-range-resolution techniques for sparse-array synthetic impulse and aperture radar[J]. Acta Eletronica Sinica, 1998, 26(9): 29 - 33. (in Chinese)
- [12] Antonio Maio. Design principles of MIMO radar detectors[J]. IEEE Transactions On AES, 2007, 43(3): 886 - 898.

作者简介:

肖文书 男, 1977 年生于湖南省沅江市, 高级工程师, 2006 年 6 月于南京大学无线电物理系获理学博士学位, 现供职于南京电子技术研究所, 承担国家重点国防预研课题一项, 主要研究方向为: 雷达系统设计、雷达系统理论、雷达信号处理等.

E-mail: simon_shawnju@163.com

(上接第 619 页)

参考文献:

- [1] 罗均, 谢少荣, 龚振邦. 面向 MEMS 的微细加工技术[J]. 电加工与磨具, 2001, (5): 1 - 6.
- [2] Daniel M Koller, Andreas Hohenau, et al. Three-dimensional SU-8 sub-micrometer structuring by electron beam lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2008, (85): 1639 - 1641.
- [3] 宋会英, 张玉林, 等. 电子束曝光中电子散射模型的优化[J]. 微细加工技术, 2005, (3): 14 - 19.
SONG Hui-ying, Zhang Yu-lin, et al. Optimization of the electron scattering model in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2005, (3): 14-19. (in Chinese)
- [4] T H P Chang. Proximity effect in electron-beam lithography [J]. J Vac Sci Technol., 1975, 12(6): 1271 - 1275.
- [5] 郝慧娟, 张玉林, 等. 电子束重复增量扫描生成三维结构的研究[J]. 半导体学报, 2006, 27(7): 1326 - 1330. HAO Hui-juan, Zhang Yu-lin, et al. Three dimensional fabrication by electron beam lithography using over lapped increment scanning [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(7): 1326 -

1330. (in Chinese)
- [6] 任黎明, 陈宝钦. 电子束曝光高斯分布束斑的 Monte Carlo 模拟[J]. 微细加工技术, 2001, (3): 60-62.
Ren Li-ming, Chen Bao-qin. Monte Carlo simulation of gauss distribution beam spot in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2001, (3): 60-62. (in Chinese)
- [7] Maurizio Dapor. Monte Carlo simulation of the interaction of electrons with supported and unsupported thin films[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, 2003, 202: 155 - 160.
- [8] C N B Udalagama, A A Bettiol, et al. A Monte Carlo study of the extent of proximity effects in e-beam and p-beam writing of PMMA[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 260: 384 - 389.
- [9] 宋会英, 张玉林, 于肇贤, 郝慧娟. 电子束光刻的快速邻近效应校正[J]. 微细加工技术, 2007, (3): 1-5.
SONG Hui-ying, Zhang Yu-lin, et al. Fast correction of proximity effect in electron beam lithography [J]. Microfabrication Technology, 2007, (3): 1 - 5. (in Chinese)