

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.007

统计 MIMO 雷达的多目标定位和速度估计方法*

陈金立^{1,**}, 陈 宣², 朱艳萍¹, 龙伟军³

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 解放军理工大学 理学院, 南京 211101;
3. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016)

摘要:在多目标情况下,统计多输入多输出(MIMO)雷达需要对不同观测通道中估计出的目标参数进行配对,才能完成多个目标定位及其速度估计。针对这一问题,对统计 MIMO 雷达提出了一种映射搜索配对法来实现在不同观测通道中的目标距离延时和多普勒频率估计值的配对,从而获得目标位置及其速度估计值。仿真结果表明,该方法在目标雷达散射截面(RCS)闪烁情况下能对多个目标进行有效定位和速度估计。

关键词:统计 MIMO 雷达;搜索配对;多目标定位;速度估计

中图分类号:TN957.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1006-06

A Method for Multi-Target Localization and Velocity Estimation in Statistical MIMO Radar

CHEN Jin-li¹, CHEN Xuan², ZHU Yan-ping¹, LONG Wei-jun³

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;
3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: When the statistical multiple-input multiple-output (MIMO) radar is exploited for multi-target localization and velocity estimation, the estimated parameters in the multiple observation channels have to be paired for every target. A mapping search pairing method is proposed in this paper, by which the estimated target distance delays and the estimated Doppler frequencies are paired. Then the positions and velocities of targets are solved from the successfully paired parameters. The simulation results demonstrate that the proposed method effectively accomplishes localization and velocity estimation of the multiple targets with the radar cross section (RCS) scintillations.

Key words: statistical MIMO radar; search pair; multi-target localization; velocity estimation

1 引言

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达是一种新体制雷达,它是基于 MIMO 通信技术基础上提出来的,结合多信号处理技术和多天技术,有着广泛的应用前景。目前研究的 MI-

MO 雷达主要分为紧凑型 MIMO 雷达^[1-3]和统计 MIMO 雷达^[4-6]两类:紧凑型 MIMO 雷达的发射和接收阵元间距小,与传统相控阵雷达类似,它利用波形分集和多通道相参处理技术能提高雷达角度分辨力和参数估计性能;统计 MIMO 雷达与多基地雷达类似,收发阵元采用大间隔布置,能够利用空间分集技术来对抗目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)

* 收稿日期:2013-03-27;修回日期:2013-06-05 Received date:2013-03-27;Revised date:2013-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071164,61071163,61271327);江苏省高校自然科学基金研究项目(11KJB510008)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61071164,61071163,61271327); The Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province(11KJB510008)

** 通讯作者: chen820803@yahoo.cn Corresponding author: chen820803@yahoo.cn

闪烁。

参数估计问题是 MIMO 雷达信号处理中的主要任务, 紧凑式 MIMO 雷达的角度参数估计问题已经被广泛研究^[1-3,7-8], 然而由于统计 MIMO 雷达在多个通道中的信号是相互独立的, 不具备类似于紧凑式 MIMO 雷达的相参特性, 因此增加了统计 MIMO 雷达的参数估计难度。文献[4]提出了 MIMO 雷达空间分集的概念和方法, 并分析了统计 MIMO 雷达的检测性能。文献[5]提出统计 MIMO 雷达若采用相参信号处理能实现对目标的超分辨定位, 然而由于收发阵元的空间分集导致不同观测通道的相位是随机变化的, 而不是只与目标的距离延时有关, 因此不同观测通道的相位是难以实现相参的。文献[9]提出利用双频发射技术来有效消除观测通道中随机变化的相位, 在统计 MIMO 雷达能有效实现目标的相参定位。针对统计 MIMO 雷达在各个观测通道中的随机变化相位导致其相参信号处理实现困难的问题, 文献[10]提出了一种非相参信号处理的方法来有效实现目标的定位和跟踪。然而文献[9-10]提出的方法只适用于单目标的情况, 在多目标情况下会失效。由于统计 MIMO 雷达同时从多个观测通道中能获得相同目标的多个测量参数, 因此当多目标情况时需要针对不同观测通道中估计出的目标参数进行配对, 才能完成多目标的定位及其速度估计。本文提出了一种映射搜索配对法对在不同观测通道中的目标距离延时估计值进行配对, 并把相同距离延时配对所对应搜索点的位置取均值作为真实目标的位置估计值, 再由距离延时和多普勒频率估计值的对应关系实现多普勒频率的配对, 最后由目标位置估计值以及多普勒频率测量值来求解目标的速度, 仿真结果验证了该方法的有效性。

2 统计 MIMO 雷达的回波信号模型

假设 MIMO 雷达系统由 M 个发射阵元和 N 个接收阵元组成, 各个发射阵元发射相互正交的相位编码信号, 可表示为 $\{S_m\}_{m=1}^M$ 。每个接收阵元接收目标的散射信号并独立地测量目标参数。为了使整个雷达系统能够工作在发射和接收分集的状态, 则各发射阵元之间的间距、接收阵元之间的间距(统一用 d 表示)应满足如下约束条件^[4]:

$$d \geq \lambda R / D \quad (1)$$

式中, λ 是雷达载波波长, R 是目标离发射阵元或接收阵元的距离, D 是目标切向尺寸。

假设在观测区域内存在 P 个目标, 那么 M 个发射阵元的发射信号分别经 P 个目标散射后形成雷达回波, 则第 n ($n = 1, 2, \dots, N$) 个接收阵元在第 l 个回波脉冲信号可表示为

$$r_n[(l-1)K+k] = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M b_{mn}^{(p)} S_m[(l-1)K+k - \text{tr}_{mn}^{(p)}] \cdot \exp(j2\pi f_{dmn}^{(p)} t_l) \quad (2)$$

式中, K 为单个脉冲的相位编码长度; $b_{mn}^{(p)}$ 为发射阵元 m - 目标 p - 接收阵元 n 通道中的目标散射系数; $\text{tr}_{mn}^{(p)}$ 表示发射阵元 m - 目标 p - 接收阵元 n 的“距离和”所对应的距离延时。如果 $R_m^{(p)}$ 、 $R_n^{(p)}$ 分别表示目标 p 离发射阵元 m 和接收阵元 n 的距离, 则

$$\text{tr}_{mn}^{(p)} = (R_m^{(p)} + R_n^{(p)}) / c$$

其中, c 为光速, t_l 为对应第 l 个脉冲的慢时间。假设目标 p 的速度为

$$V^{(p)} = [V_x^{(p)} \quad V_y^{(p)}]^T$$

其中, $[\cdot]^T$ 表示矢量的转置。那么目标 p 的多普勒频率 $f_{dmn}^{(p)}$ 可表示^[11]

$$f_{dmn}^{(p)} = \frac{1}{\lambda} [V_x^{(p)} (\cos\theta_{R_n}^{(p)} + \cos\theta_{T_m}^{(p)}) + V_y^{(p)} (\sin\theta_{R_n}^{(p)} + \sin\theta_{T_m}^{(p)})] \quad (3)$$

3 统计 MIMO 雷达的参数估计及配对方法

第 n 个接收阵元在第 l 个回波脉冲信号分别与 M 个发射信号进行匹配滤波, 其中 $y_{mn}(l)$ 表示第 n 个接收阵元在第 l 个回波脉冲信号与第 m 个发射阵元信号进行匹配滤波的输出, 可表示为

$$y_{mn}(l, \tau) = \sum_{k=1}^K r_n[(l-1)K+k] \cdot S_m[(l-1)K+k-\tau] = \sum_{p=1}^P b_{mn}^{(p)} \exp(j2\pi f_{dmn}^{(p)} t_l) \cdot \sum_{k=1}^K S_m[(l-1)K+k - \text{tr}_{mn}^{(p)}] \cdot S_m[(l-1)K+k-\tau] + \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^M b_{in}^{(p)} \exp(j2\pi f_{din}^{(p)} t_l) \cdot \sum_{k=1}^K S_i[(l-1)K+k - \text{tr}_{in}^{(p)}] \cdot S_m[(l-1)K+k-\tau] \quad (4)$$

式中, τ 表示参考信号即第 m 个发射阵元信号的延时。由于不同发射阵元的信号相互正交, 则式(4)中第二项近似等于零, 那么式(4)可简化为

$$y_{mn}(l, \tau) \approx \sum_{p=1}^P b_{mn}^{(p)} \exp(j2\pi f_{dmn}^{(p)} t_l) \cdot \sum_{k=1}^K S_m[(l-1)K + k - \text{tr}_{mn}^{(p)}] \cdot S_m[(l-1)K + k - \tau] \quad (5)$$

显然,当 $\tau = \text{tr}_{mn}^{(p)}$ 时, $y_{mn}(l, \tau = \text{tr}_{mn}^{(p)})$ 输出极大值,可近似表示为

$$y_{mn}(l, \tau = \text{tr}_{mn}^{(p)}) \approx Kb_{mn}^{(p)} \exp(j2\pi f_{dmn}^{(p)} t_l) \quad (6)$$

从式(6)可知,在 $\tau = \text{tr}_{mn}^{(p)}$ 时匹配滤波输出 y_{mn} 在慢时间域呈以目标多普勒频率 $f_{dmn}^{(p)}$ 调制的正弦规律变化,因此对式(6)在慢时间域进行 FFT 处理即可估计出目标 p 的多普勒频率 $f_{dmn}^{(p)}$ 。因此,通过匹配滤波-FFT 联合处理可以估计出从发射阵元 m 到接收阵元 n 所对应观测通道(简称通道 mn)中的目标距离延时和多普勒频率,把雷达从通道 mn 中测量得到的目标参数用一个集合表示,即为 $C_{m \times n} = \{(\text{tr}_{mn}^{(1)}, f_{dmn}^{(1)}), (\text{tr}_{mn}^{(2)}, f_{dmn}^{(2)}), \dots, (\text{tr}_{mn}^{(P)}, f_{dmn}^{(P)})\}$ 。统计 MIMO 雷达利用发射信号的正交性可形成 MN 个相互独立的观测通道,则有可能产生 MN 个测量参数的集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$,只有对不同观测通道中估计出的目标参数进行配对,才能完成多目标的定位及其速度估计。

下面采用映射搜索配对法对在不同观测通道中的目标距离延时估计值进行配对。映射搜索配对方法其实把测量得到的距离延时映射到二维的矩形搜索区域内实现目标配对的方法,如图 1 所示。

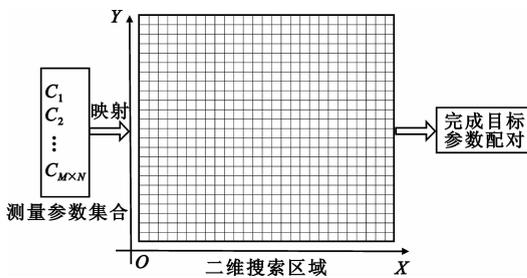


图 1 映射搜索配对方法流程图

Fig.1 Process diagram for mapping search pairing method

假设点 (x, y) 为矩形搜索区域内的一个搜索点,根据该搜索点位置确定一组距离延时配对组合的样本集,即

$$g_{m \times n}(x, y) = \text{ceil}\{\lceil \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2} + \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2} \rceil / ct_b\} t_b, \quad m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中, $\text{ceil}\{\cdot\}$ 表示取整; (x_m, y_m) 为发射阵元 m 的坐标位置; (x_n, y_n) 为接收阵元 n 的坐标位置; $g_{m \times n}$ 表示发射阵元 m -搜索点 (x, y) -接收阵元 n 的距离延时。由于相位编码雷达测量得到的距离延时为码元宽度 t_b 的整数倍,因此 $g_{m \times n}(x, y)$ 也取为码元宽度 t_b 的整数倍。把 $g_{m \times n}(x, y)$ 与测量参数集合 $C_{m \times n}$ 中距离延时测量值进行比较,如果 $g_{m \times n}(x, y) \in C_{m \times n}$,则该搜索点 (x, y) 的输出幅度值自动加 1,即 $\zeta(x, y) = \zeta(x, y) + 1$,其中搜索点 (x, y) 初始幅度值为零, m 从 $1 \sim M$ 之间取值, n 也从 $1 \sim N$ 之间取值。

下面根据 ζ 值的不同来对距离延时进行配对。

(1)如果目标的回波信号在 MN 个观测通道都没有发生衰弱现象,即该目标存在 MN 个距离延时测量值,分别分布在测量参数集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中。那么在邻近该目标位置处某些搜索点的输出幅度 $\zeta = MN$,将这些输出幅度 $\zeta = MN$ 搜索点对应的距离延时组合 $g_1, g_2, \dots, g_{M \times N}$ 认为是目标在 MN 个观测通道中的距离延时配对。

(2)如果目标的回波信号在 1 个观测通道出现衰弱的现象,那么能测得的该目标的距离延时个数 $MN - 1$,此时在测量参数集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中去除(1)中已经配对好的距离延时,然后再次进行上述映射搜索,并将这些输出幅度 $\zeta = MN - 1$ 搜索点对应的距离延时组合认为是真实目标的距离延时配对。

(3)如果目标的回波信号在 2 个观测通道出现衰弱的现象,那么能测得的该目标的距离延时个数 $MN - 2$,在测量参数集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中继续去除(1)和(2)中已经配对好的距离延时,再进行映射搜索,将输出幅度 $\zeta = MN - 2$ 搜索点对应的距离延时组合认为是真实目标的距离延时配对。依次类推,一直当测量参数集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中的距离延时测量值为空时,停止映射搜索配对。

把相同距离延时配对所对应的搜索点位置取均值作为真实目标位置的估计值,再由距离延时和多普勒频率估计值的对应关系实现多普勒频率的配对。估计出第 p 个目标的位置坐标后,可以计算得到该目标在发射阵元 m 和接收阵元 n 的视角 $\theta_m^{(p)}$ 和 $\theta_n^{(p)}$,根据式(3)和目标在不同观测通道中的多普勒频率估计值,能够求解出目标运动速度 $\mathbf{V}^{(p)} = [V_x^{(p)} \quad V_y^{(p)}]^T$,即

$$\mathbf{V}^{(p)} = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{F} \quad (8)$$

其中:

$$F = \begin{bmatrix} f_{R1,1}^{(p)} \\ f_{R1,2}^{(p)} \\ \vdots \\ f_{RM,N}^{(p)} \end{bmatrix},$$

$$Q = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \cos\theta_{R1}^{(p)} + \cos\theta_{T1}^{(p)} & \sin\theta_{R1}^{(p)} + \sin\theta_{T1}^{(p)} \\ \cos\theta_{R2}^{(p)} + \cos\theta_{T1}^{(p)} & \sin\theta_{R2}^{(p)} + \sin\theta_{T1}^{(p)} \\ \vdots & \vdots \\ \cos\theta_{RN}^{(p)} + \cos\theta_{TM}^{(p)} & \sin\theta_{RN}^{(p)} + \sin\theta_{TM}^{(p)} \end{bmatrix}.$$

4 仿真分析

假设统计 MIMO 雷达的发射阵元数 $M = 3$,其坐标分别为 $(0,9)\text{km}$ 、 $(0,0)\text{km}$ 、 $(0,-9)\text{km}$,接收阵元数 $N = 2$,其坐标位置分别为 $(4.5,0)\text{km}$ 、 $(-4.5,0)\text{km}$ 。各个发射阵元发射相互正交的相位编码信号,相位编码的码元宽度为 $t_b = 1\ \mu\text{s}$,单个脉冲内的相位编码长度 $K = 22$,用于进行 FFT 处理的脉冲个数 $L = 1\ 024$,载波频率为 $10\ \text{GHz}$ 。设置映射搜索配对方法中的矩形搜索区域大小为 $50\ \text{km} \leq x \leq 90\ \text{km}$; $50\ \text{km} \leq y \leq 90\ \text{km}$,其中 X 轴和 Y 轴的搜索步长都为 $0.15\ \text{km}$ 。假设在雷达观测区域内存在 5 个目标,

目标的位置坐标和速度设置见表 1。该统计 MIMO 雷达可形成 $M \times N = 6$ 个独立通道来观测目标,假设一些目标在某些观测通道中会出现较为严重的衰弱现象,即在有些通道中某些目标的参数是无法测量,这能比较真实地模拟实际环境,从而可以得出可靠的结论。

表 1 目标参数设置

Table 1 Target parameter setting

目标序号	位置坐标/km	速度矢量/(m/s)
1	(65, 58)	(100,100)
2	(56,63)	(200,100)
3	(80,70)	(-156, -150)
4	(68.3,82.5)	(120,130)
5	(67,62)	(-100, -200)

利用匹配滤波-FFT 联合处理方法从 6 个观测通道中分别估计目标的距离延时和多普勒频率,测量参数集合如表 2 所示,其中距离延时的单位为码元宽度 t_b ,多普勒频率的单位为 kHz ,集合中每组测量参数表示为(距离延时,多普勒频率)。由于一些目标在某些观测通道中会出现较为严重的衰弱现象,因此不同观测通道中所估计出的目标参数的数量是不一样的,即集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中的元素个数是不一致的。

表 2 统计 MIMO 雷达测量参数的集合

Table 2 The collections of measurement parameters in statistics MIMO radar

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
(531, 13.938)	(570, 9.454 8)	(619, -14.16)	(702, -14.293)	(573,13.982)	(613,9.454 8)
(551,9.410 4)	(598, -13.982)	(576,13.583)	(551,14.160)	(593,9.454 8)	(596,13.805)
(683, 11.807)	(705,11.807)	(591,9.454 8)	(702, 11.852)	(724,12.101)	(741,14.907)
(679, -14.338)	(553,13.760)		(574,9.410 4)	(620, -13.805)	(748, 11.807)
	(698, -14.382)			(721, -14.338)	(641, -13.982)

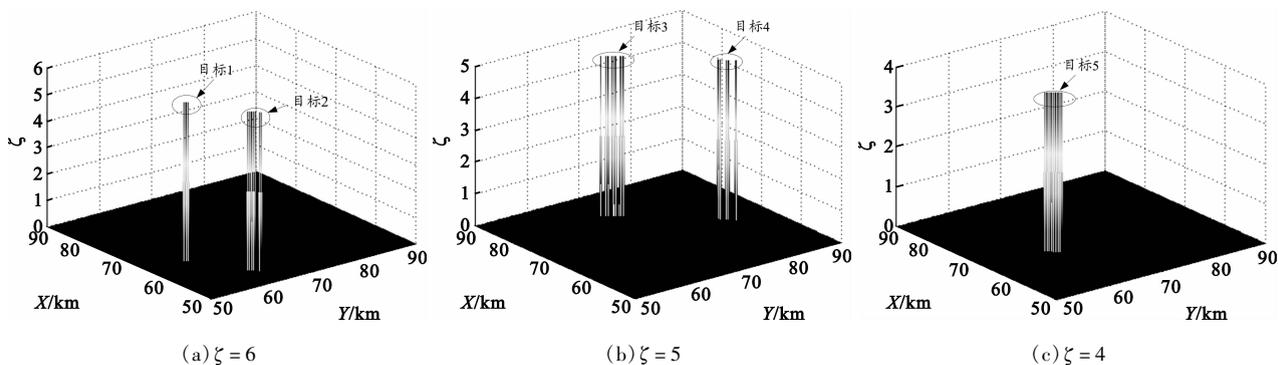


图 2 映射搜索配对在 ζ 取不同值时所对应的搜索点

Fig.2 The search points corresponded to the mapping search pairing method with different ζ

采用映射搜索配对法对集合 $C_1, C_2, \dots, C_{M \times N}$ 中的距离延时进行配对, 映射搜索配对方法在 ζ 取不同值时所对应的搜索点位置如图2所示, 那么由这些搜索点可以确定的距离延时配对组合如表3所示, 其中 $tr_{m,n}$ ($m = 1, 2, 3; n = 1, 2$) 表示目标在发射阵元 m - 接收阵元 n 观测通道中的距离延时, “X” 表示由于观测通道严重衰弱以致目标的距离延时无法检测。按照距离延时配对关系可以容易得到目标多普勒频率的配对关系, 见表4, 其中“X”表示该项对应的多普勒频率检测不到或不能确定属于哪个目标的。把对应同一组距离延时配对的搜索点位置取平均作为真实目标位置的估计值, 并根据式(8)求得目标的速度。最终的目标位置和速度估计结果如表5所示。

表3 距离延时配对输出
Table 3 The pairs for estimated distance delay

序号	$tr_{1,1}$	$tr_{2,1}$	$tr_{3,1}$	$tr_{1,2}$	$tr_{2,2}$	$tr_{3,2}$
1	551	570	591	574	593	613
2	531	553	576	551	573	596
3	679	698	X	702	721	741
4	683	705	X	702	724	748
5	X	598	619	X	620	641

表4 多普勒频率的配对输出(序号与表2对应)
Table 4 The pairs for estimated Doppler frequency (the serial number corresponds to that in Table 2)

序号	$f_{d1,1}$	$f_{d2,1}$	$f_{d3,1}$	$f_{d1,2}$	$f_{d2,2}$	$f_{d3,2}$
1	9.410 4	9.454 8	9.454 8	9.410 4	9.454 8	9.454 8
2	13.938	13.760	13.583	14.160	13.982	13.805
3	-14.338	-14.382	X	X	-14.338	14.907
4	11.807	11.807	X	X	12.101	11.807
5	X	-13.982	-14.160	X	-13.805	-13.982

表5 目标的位置坐标和速度矢量的估计值
Table 5 The estimation for the location coordinates and velocity vectors of targets

序号	位置坐标/km	解得速度矢量 [V_x V_y]/(m/s)
1	(65.38, 57.73)	(102.2, 98.5)
2	(55.81, 63.20)	(196.6, 104.2)
3	(80.55, 69.40)	(-153, -152.6)
4	(68.825, 82.08)	(117.2, 133.1)
5	(66.8, 62.15)	(-96.3, -202.5)

从表3~5可知, 统计 MIMO 雷达利用映射搜索配对方法能够对在不同观测通道中的多目标测量参数进行准确配对, 并且目标的位置和速度估计精度较高。在仿真中设置了3个目标的回波信号在不同观测通道中发生了不同程度的衰弱现象, 虽然在发生衰弱现象的观测通道上检测不到目标, 但是可以借助目标在其他观测通道上的回波信号把目标较正确地检测出来, 因此本文提出的映射搜索配对方法仍能继承统计 MIMO 雷达抑制目标 RCS 闪烁的能力。

5 结 论

针对统计 MIMO 雷达完成多目标定位时需要针对不同观测通道中目标测量参数进行配对的问题, 本文提出了一种映射搜索配对法来实现目标距离延时和多普勒频率估计值的准确配对。文中把相同距离延时配对所对应的搜索点位置取均值作为真实目标位置的估计值, 并利用目标位置估计值和多普勒频率求解目标的运动速度。仿真结果表明, 该方法在继承统计 MIMO 雷达抑制目标 RCS 闪烁能力的基础上, 能对目标距离延时和多普勒频率等参数进行准确配对, 而且其位置和速度估计值的精度也较高。统计 MIMO 雷达的发射和接收阵元间距较大, 其发射阵元和接收阵元要求在时间和相位上同步才能正确测量目标参数, 然而本文提出方法是在时间和相位完全同步的假设基础上进行研究的, 因此统计 MIMO 雷达的时间和相位同步问题是下一步工作研究的重点。

参考文献:

- [1] Bekkerman I, Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 3873 - 3883.
- [2] Li J, Stoica P. MIMO radar with colocated antennas [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 24(5): 106 - 114.
- [3] Boyer R. Performance bounds and angular resolution limit for the moving colocated MIMO radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1539 - 1552.
- [4] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Radar. Pacific Grove, California: IEEE, 2004: 71 - 78.
- [5] Haimovich A M, Blum, R S, Leonard J, et al. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116 - 129.
- [6] He Q, Blum R S, Godrich H, et al. Target velocity estimation and antenna placement for MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(12): 6163 - 6173.

rated antennas[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 79 – 100.

- [7] Guo Y D, Zhang Y S, Tong N N. Beam-space ESPRIT algorithm for bistatic MIMO radar[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 876 – 878.
- [8] Zhang X, Xu Z, Xu L, et al. Trilinear decomposition-based transmit angle and receive angle estimation for multiple-input multiple-output radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(6): 626 – 631.
- [9] Jin M, Liao G S, Li J. Target localisation for distributed multiple-input multiple-output radar and its performance analysis [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(1): 83 – 91.
- [10] Niu R X, Blum R S, Varshney P K, et al. Target localization and tracking in noncoherent multiple-input multiple-output radar systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1466 – 1489.
- [11] Li S, Zeng T, Long T, et al. Maneuvering target tracking based on multistatic system Doppler measurements [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2002: 1484 – 1487.

作者简介:



陈金立(1982—),男,浙江宁波人,2010年获博士学位,现为讲师,主要研究方向为MIMO雷达信号处理;

CHEN Jin-li was born in Ningbo, Zhejiang Province, in 1982. He received the Ph.D. degree in 2010. He is now a lecturer. His research concerns MIMO radar signal processing.

Email: chen820803@yahoo.cn

陈宣(1982—),女,江苏南通人,2011年获博士学位,现为讲师,主要研究方向为物理电子学;

CHEN Xuan was born in Nantong, Jiangsu Province, in 1982. She received the Ph.D. degree in 2011. She is now a lecturer. Her research concerns physical electronics.

朱艳萍(1980—),女,河南开封人,2005年获硕士学位,现为讲师、博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

ZHU Yan-ping was born in Kaifeng, Henan Province, in 1980. She received the M.S. degree in 2005. She is now a lecturer and currently working toward the Ph.D. degree. Her research concerns radar signal processing.