

文章编号: 2095-4980(2014)01-0052-05

分段处理的反辐射被动导引抗有源诱偏策略

艾名舜

(第二炮兵工程大学 士官职业技术学院, 山东 青州 262500)

摘 要: 在反辐射导弹(ARM)对抗有源诱偏问题中, ARM 导引头所面临的信号环境非常复杂, 很难用某种单一的算法来实现抗诱偏。针对此问题, 提出一种分段处理的反辐射被动导引策略。基于对 ARM 抗诱偏过程中信号变化特点的分析, 整个导引过程分为 3 个导引段, 给出了各段中导引头的任务以及采用的信号处理算法。该策略的主要思想是将一个复杂问题分解为 3 个相对简单的子问题, 具有一定的科学性和可操作性, 仿真实验验证了所提策略的有效性和可行性。

关键词: 反辐射导弹; 有源诱偏; 被动导引; 分段处理策略

中图分类号: TN974

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0052

A sectional treatment strategy of anti-radiation passive guide for antagonizing active decoy

AI Ming-shun

(Sergeant Vocational and Technical College of Education, The Second Artillery Engineering University, Qingzhou Shandong 262500, China)

Abstract: In processing of antagonizing active decoy, the Anti-Radiation Missile(ARM) is faced with such a complex signal environment that there are few algorithms can deal with it. A sectional treatment strategy of anti-radiation passive guide is proposed. By analyzing the signal environment of the ARM, the guide procedure has been divided into three stages. Also the seeker's mission as well as the adopted signal processing algorithm in each stage is indicated. The principle of the proposed strategy is to divide a complex problem into three simple sub problems so that it is scientific and operable. The validity and feasibility of the strategy is verified by simulation.

Key words: Anti-Radiation Missile; active decoy; passive guide; sectional treatment strategy

反辐射导弹(ARM)对抗有源诱偏问题^[1-3]是目前导弹控制与制导领域研究的热点, 目前学术界普遍认可的解决方案包括采用多模复合制导^[4]导引头和采用基于阵列信号处理的被动导引头^[5]。相对而言, 多模复合制导可操作性较好, 但系统的复杂度以及制造和维护成本高, 因此系统复杂度较低的纯被动导引方案仍具有一定研究和应用价值。为解决抗诱偏问题, ARM 需要重点提高导引头的角度分辨力, 文献[6]研究了基于超分辨 DOA(Direction Of Arrival)估计的抗诱偏方法, 并验证了这类方法的可行性。然而分析发现, ARM 抗诱偏过程中的信号环境是动态的, 且难以用一种统一的信号模型来描述, 因此不能依靠单一的信号处理方法来解决抗诱偏问题。为此, 本文提出将 ARM 的攻击过程分为 3 个阶段, 针对每个阶段中信号环境的不同特点, 导引头采用不同的信号处理方法, 最终完成抗诱偏任务。

1 ARM 抗诱偏过程中的信号环境分析

雷达阵地上雷达与有源诱饵的分布如图 1 所示。雷达是定向辐射源, 诱饵可近似认为是全向辐射源, 诱饵辐射功率小于雷达波束主瓣的功率, 大于其旁瓣功率, 战术安排中往往将击毁诱饵作为抗诱偏的初步目标, 采用多波次的导弹攻击来摧毁整个雷达系统。

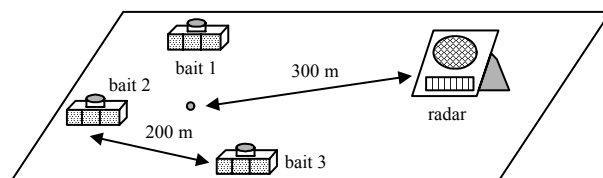


Fig.1 Distribution map of the radar and the baits
图 1 雷达及有源诱饵分布示意图

以诱饵群几何中心为原点建立坐标系,如图2所示。3个诱饵与雷达的坐标表示为 $(x_{b1}, y_{b1}, 0)$, $(x_{b2}, y_{b2}, 0)$, $(x_{b3}, y_{b3}, 0)$, $(x_r, y_r, 0)$, 反辐射导弹在地面系中的坐标表示为 (x_A, y_A, z_A) 。

假设 t_0 时刻弹目距离为 10 km, 之后导弹以固定的攻角 $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 60^\circ$ 飞向诱饵群中心, 在这个过程中, 3 个诱饵信号到达方向与导弹主轴的夹角变化如图3所示。

由图3可见, 随着弹目距离的减小, 各辐射源信号的到达角差异逐渐增加。图中的2条虚线将角度曲线分成3部分, 第1部分中3个信号到达角差异很小, 属于空-时-频域高度重叠信号; 第2部分中信号到达角出现了较明显的差异, 且变化平缓; 第3部分中信号到达角差异进一步增大, 而且角度变化速率较大, 以上3部分大致对应3个诱偏段。上述计算结果显示了多目标信号到达角的变化呈现一定的阶段性特征。

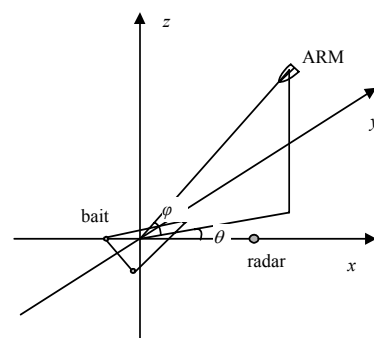


Fig.2 Origin of the Cartesian coordinate on the centre of the bait cluster
图2 以诱饵群中心为原点的直角坐标系

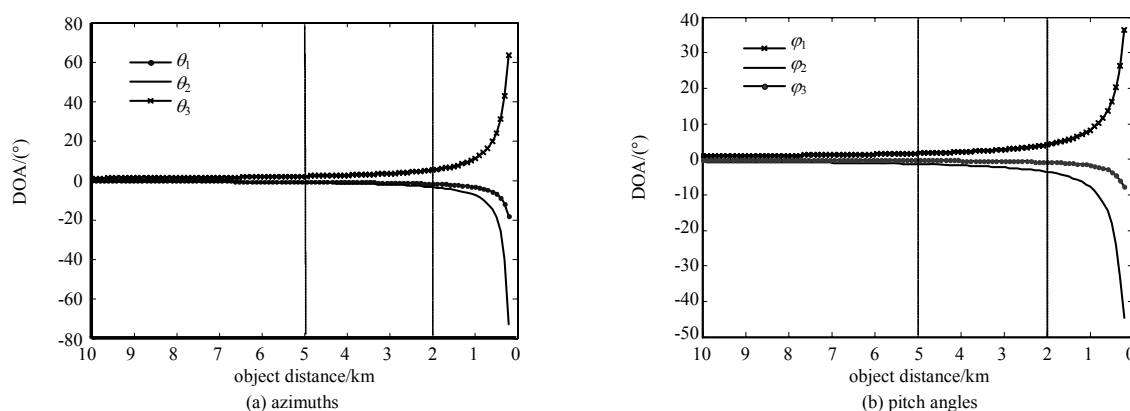


Fig.3 Curves of the azimuths and the pitch angles changed with the object distance
图3 方位角与俯仰角随目标距离的变化曲线

另外, 随着导弹不断接近目标区域, 导引头接收信号的信噪比也不断变化, 从这个角度来讲, 将 ARM 整个导引过程进行分段划分是合理的。

2 导引段之间的划分

2.1 各阶段导引头任务及采用的算法

根据以上分析, ARM 攻击过程中面临的信号环境变化呈现阶段性特点, 因此在不同阶段应采用不同的信号处理方法, 换句话说, 算法选择必须与信号环境相适应。首先将整个导引过程定性地分为3段: 第1导引段中信号信噪比较低, 且各目标信号到达角差异极小, 即使采用超分辨算法也不能区分多目标, 在此阶段中导引头的任务是保证导弹指向目标区域, 因此可采用低信噪比条件下稳定性较好的双波束比幅测向方法; 第2导引段信号信噪比有所增加, 且各目标信号到达角已出现较明显的差异, 此时采用超分辨算法有利于导引头尽早区分多目标并逐渐锁定一个目标; 末段导引段中信号信噪比很高, 但各目标信号到达角差异较大, 这个阶段中导引头的任务是对雷达阵地进行侦察, 考虑到此时多目标角度急剧变化, 采用一般超分辨算法容易造成参数估计的延迟误差, 因此应采用快速迭代算法实现对多目标信号到达角的跟踪。

需要说明的是, 对于一般的导弹攻击问题, 导弹锁定目标之后导引头即可关机, 但作为反辐射导弹抗诱偏问题, 导弹导引头应具备导引和侦察的双重能力。这是因为, 在有源诱偏的情况下, 通常需要多个波次的导弹攻击才能完全摧毁雷达阵地, 因而前一个波次的导弹应该为后续的攻击提供信息支持。理论上, 如果导引头在攻击末段能够获取目标的相对角度变化, 结合自身的位置信息就能对目标进行定位; 如果获取的信息能够通过数据链回传至导弹阵地, 将大大提高后续攻击的命中概率。

2.2 各阶段划分的依据分析

第2导引段是整个诱偏过程的核心, 在这个阶段中导引头应采用超分辨的 DOA 估计算法, 而所采用算法的性能是决定阶段划分的主要依据。

在初始导引段,各辐射源相对于导弹形成的张角很小,且信号的信噪比较低,从而导致导引头无法区分多目标。从阵列信号处理的角度来看,其表现为接收数据协方差矩阵的信号子空间维数为 1,此时超分辨算法不能发挥作用。如果将多目标信号到达角的差异达到超分辨 DOA 估计算法分辨力下限的时刻定义为“分离点”,那么该分离点即为初始导引段和第二导引段的划分界限,其标志是接收数据协方差矩阵的信号子空间维数大于 1。

假设某时刻开始导弹不再进行姿态修正,则导弹飞行方向与目标信号到达方向的偏差 $\Delta\theta$ 决定导弹落点的偏差,落点分布区域是以目标坐标为焦点的椭圆(如图 4 所示)。如果导弹有效杀伤半径 Δr 和导弹攻角 β 确定,使导弹落在有效杀伤半径之内所允许的偏差角 $\Delta\theta$ 应不大于门限 θ_{th} ,该门限可以表示成:

$$\theta_{th} = \arcsin \left(\frac{\Delta r \sin \beta}{\sqrt{\Delta r^2 + R^2 + 2R\Delta r \cos \beta}} \right) \quad (1)$$

这里令杀伤半径 Δr 等于落点区域最长的轴距,上式中门限 θ_{th} 是弹目距离 R 的减函数。

另一方面,导弹的主轴指向、角度估计和目标实际方向之间的关系可以表示为:

$$\begin{aligned} & \text{角度估计} \\ & \underbrace{\text{目标方向} + \text{角度估计误差} + \text{修正误差}}_{\Delta\theta} = \text{主轴指向} \end{aligned}$$

$\Delta\theta$ 包括导弹姿态修正误差和角度估计误差,两者分别由导弹控制系统和 DOA 估计算法的性能决定,因此两者是独立的。随着弹目距离的减小,导引头面临的信号环境越来越好,估计误差会逐渐减小,而稳定的角度估计将使修正误差收敛,因此 $\Delta\theta$ 逐渐减小;与此同时,门限 θ_{th} 将逐渐增大,因此以上 2 个参数的值将出现交叉,交叉点出现时可以认为目标已经被锁定。 $\Delta\theta$ 是由导引头所采用的算法性能决定,可以事先估计得到, θ_{th} 是根据弹目距离和攻角实时计算得到的,两者的交叉点即为第二导引段与末段导引段划分的分界点,此后导弹开始对目标角度进行跟踪。分段处理的流程图如图 5 所示。

3 仿真实验验证

3.1 实验条件设置

仿真实验条件设置与文献[7]相同,实验中初始导引段采用基于数字波束形成的双波束比幅测向,第二导引段和末段导引段分别采用文献[8]和文献[9]算法。

3.2 实验结果及分析

根据导弹的坐标和飞行方向可以计算导弹的预期落点,所谓“预期落点”是指假设导弹不再改变其飞行方向的情况下触地的位置。若 t 时刻导弹坐标为 (x_A, y_A, z_A) , 飞行方向为 (v_x, v_y, v_z) , 则预期落点 (x_0, y_0) 表示为:

$$\begin{cases} x_0 = x_A - z_A v_x / v_z \\ y_0 = y_A - z_A v_y / v_z \end{cases} \quad (2)$$

根据导弹预期落点的变化可以分析导弹姿态修正的情况,如图 6 所示。在初始诱偏段开始时导弹指向目标区

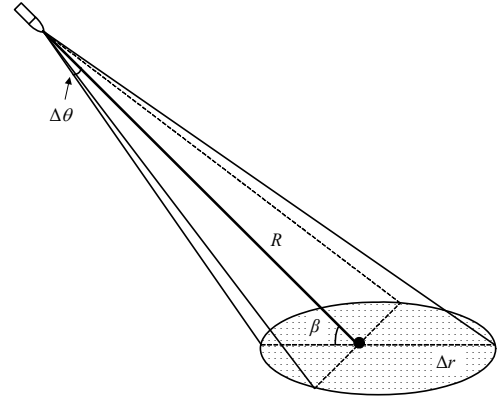


Fig.4 Relation schematic of the aiming error and the landing field
图 4 导弹指向偏差与落点区域的关系示意图

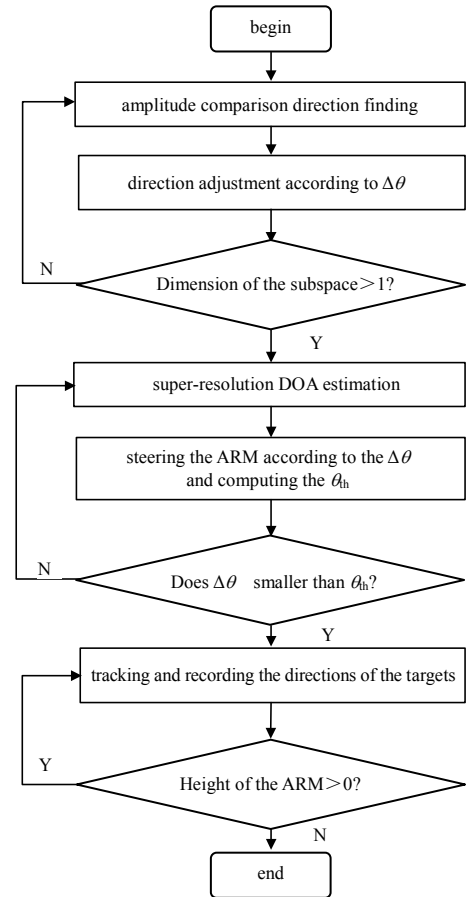


Fig.5 Flow sheet of the sectional treatment strategy
图 5 分段处理反辐射被动导引策略流程图

域以外,利用比幅测向的结果来修正导弹飞行方向,很快使导弹指向目标区域,之后导弹预期落点在三个目标之间的区域振荡。在初始诱偏段结束时,导弹指向三个诱饵的几何中心附近,见图 7,如果此时导引头关机或继续采用比幅测向,导弹将被诱偏,但是这一阶段导引头完成了目标搜索的工作,为接下来的多目标分辨创造了条件。

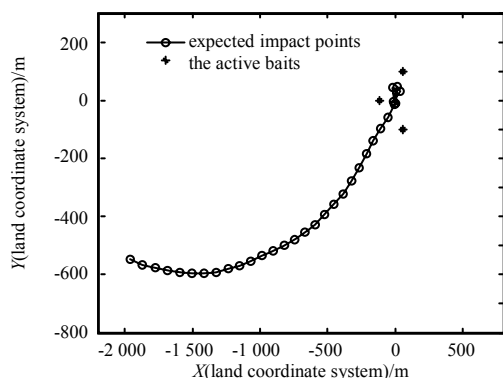


Fig.6 Trace of the expected impact points
图 6 导弹预期落点变化轨迹图

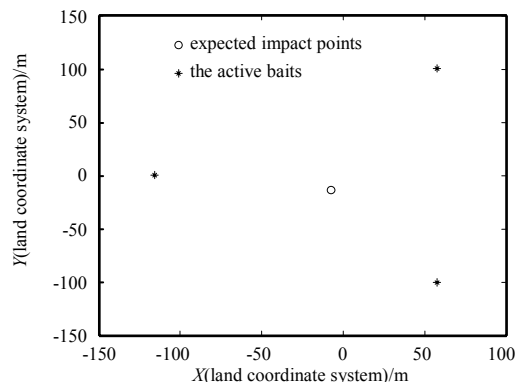


Fig.7 Expected impact points at the end of the first section
图 7 初始诱偏段结束时导弹预期落点

中间导引段采用的超分辨 DOA 估计算法,该算法具有较高的角度分辨力和估计精确度,因此可以使导弹导引头更早地区分多目标,并锁定其中一个目标。由于中间导引段开始时各目标到达角之间的差异仍较小,容易造成对目标数目的欠估计,因此输出角度并不能与目标一一对应,又因为导弹总是根据与主轴偏差最小的估计角度来修正姿态,从而使导弹最终锁定的目标是随机的。换句话说,即使在相同初始条件下,导弹最终锁定的未必是同一个目标,因此尽管导弹最终能够命中某个目标,但不能预测是哪一个。对实际情况而言,这种结果可以接受。

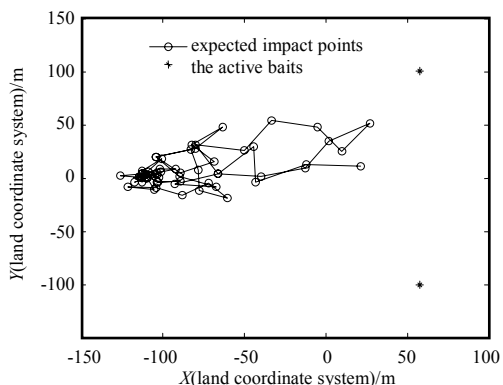


Fig.8 Trace of the expected impact points
图 8 导弹预期落点变化轨迹

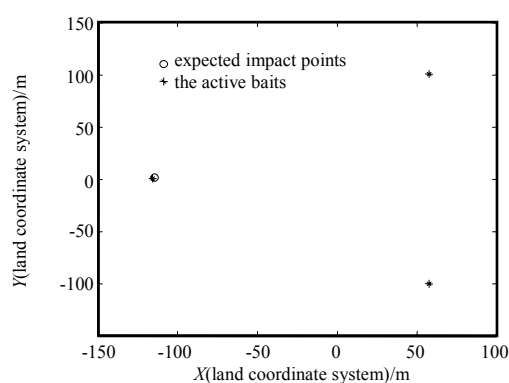


Fig.9 Expected impact points at the end of the second section
图 9 第二导引段结束时导弹预期落点

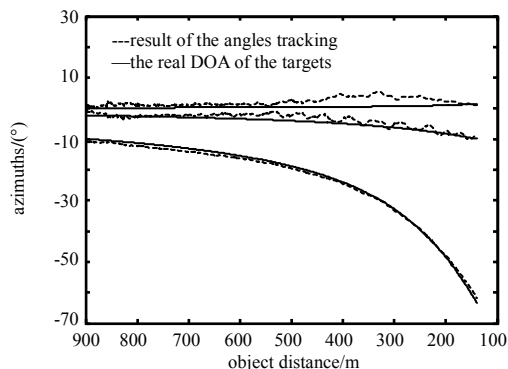


Fig.10 Results of pitch angle tracking in the last section
图 10 末段侦察段多目标俯仰角跟踪结果

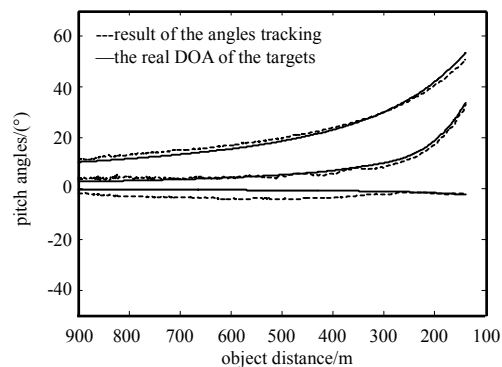


Fig.11 Results of azimuth tracking in the last section
图 11 末段侦察段多目标方位角跟踪结果

如图 8 所示,中间导引段中导弹预期落点从目标群的几何中心逐渐向一个目标移动,并最终锁定该目标。由图 9 可知,在中间导引段结束时,导弹预期落点非常接近一个目标,此时导弹姿态不再修正也可以摧毁该目标,从而达到抗诱偏的初步要求。

末段导引段是整个抗诱偏过程的结尾,持续时间较短,但是这个阶段中接收信号的信噪比很高,而且目标的可分性也很高,此时是对目标进行电子侦察的绝好时机。考虑到新型反辐射导弹应该具有“察打结合”的能力,所以应充分利用这个时机获取目标信息,为后继的战术决策提供信息支持。这个阶段中信号的特点是角度变化速率高,变化范围大,因此宜采用多源信号角度跟踪算法来估计信号角度变化。需要说明的是,在末段诱偏段不是对二维角度进行跟踪,而是对目标的俯仰角和方位角分别进行跟踪,这样使算法的运算效率更高,而角度的配对可以利用中间导引段最后的二维角度估计结果作为参考。

仿真实验结果显示(见图10~图11),采用角度跟踪算法能够有效估计快速变化的目标角度,将这些信息与导弹自身的运动轨迹相结合能够实现对多目标的定位,甚至还可以根据对诱饵定位的结果推断出雷达的具体位置,从而为后续的导弹攻击提供信息支持。

4 结论

在信号处理中,研究算法很重要,但在实际工程中,算法的运用策略往往比算法本身更值得研究。本文针对抗有源诱偏问题,研究了一种分段处理的反辐射被动导引策略。该策略的核心是将反辐射导弹抗有源诱偏的导引过程分为3个阶段,从而把抗诱偏问题分解为多个子问题,降低了解决问题的难度。3个导引段是以信号环境变化特点为基础,以采用的算法性能为依据,以实现反辐射导引头的任务需求为目标来划分的,具有一定的科学性和可操作性。仿真实验验证了分段处理策略的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] QIN Yuliang, YU Tao, DENG Bing, et al. Data Fusion Technique of IR/Passive Radar Multi-mode Guidance Seeker for Surface-to-air Anti-radiation Missile[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 333-337.
- [2] SI Xicai, CUI Donghuai, SI Weijian. Technology of ARM contradict LIP radar and bait[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(9): 1549-1552.
- [3] QU Zhiyu, SI Xicai, ZHU Xiao. New method for the anti radar missile to antagonize the non-coherent radar decoy[J]. Journal of Xidian University: Natural Science, 2009, 36(6): 1132-1138.
- [4] 徐春夷. 复合制导技术的现状与发展[J]. 制导与引信, 2008, 29(1): 17-22. (XU Chunyi. The Present State and Development of Compound Guidance Technology[J]. Guidance & Fuze, 2008, 29(1): 17-22.)
- [5] 庞伟正, 张积东. 超分辨测向在反辐射导弹制导中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 1996(3): 15-18. (PANG Weizheng, ZHANG Jidong. The application of the super-resolution direction finding in the anti-radiation missile guide[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 1996(3): 15-18.)
- [6] 刘义, 赵志超, 王雪松, 等. 反辐射导弹复合测角抗诱偏干扰方法[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2122-2127. (LIU Yi, ZHAO Zhichao, WANG Xuesong, et al. Approach of Anti-decoy Based on Complex Angle Measuring System[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2122-2127.)
- [7] 兰集, 马红光, 艾名舜. 反辐射导弹抗有源诱偏复合测向技术[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(6): 37-41. (LAN Ji, MA Hongguang, AI Mingshun. Approach of Anti-Decoy for Anti-Radiation Missile Based on Composite Direction Finding[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2011, 26(6): 37-41.)
- [8] 艾名舜, 马红光, 刘刚. 基于噪声子空间解析形式的快速 DOA 估计算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1071-1076. (AI Mingshun, MA Hongguang, LIU Gang. DOA Estimation Algorithm Base on Analytical Solution of Noise Subspace[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1071-1076.)
- [9] 艾名舜, 马红光, 刘刚. 一种多辐射源角度跟踪算法[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 984-989. (AI Mingshun, MA Hongguang, LIU Gang. Algorithm for Multiple Sources Angle Tracking[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(6): 984-989.)

作者简介:



艾名舜(1981-),男,济南市人,博士,讲师,研究方向为信号与信息处理.email:mingshunai@163.com.