

文章编号: 1672-2892(2010)03-0265-04

多机协同控制下的航迹欺骗技术

范振宇, 王磊, 苏建春

(中国电子科技集团公司 第51研究所, 上海 201802)

摘要: 随着数据融合技术的普遍应用, 雷达组网系统很容易识别对单部雷达的航迹欺骗。为了能够有效欺骗雷达组网, 本文介绍了多机协同控制下的航迹欺骗技术: 装备有电子对抗措施(ECM)的隐身电子战斗机(ECAV)通过采用距离延迟技术来欺骗雷达, 使得雷达在其更远处进行定位, 从而探测到一种被称为幻影的假目标, 在经过一连串虚假定位后便产生了虚假航迹; 介绍了通过 ECAV 编队协作来产生具有空间、时间相关的虚假航迹的工作原理, 给出了假目标的运动方程和约束条件, 并提出了解决该技术问题的一些方法。经仿真验证, 该技术具有一定的可行性和实用性。

关键词: 组网雷达; 协同控制; 虚假航迹

中图分类号: TN955⁺.3

文献标识码: A

Technology of track deception for cooperative control of multiple Electronic Combat Air Vehicles

FAN zhen-yu, WANG Lei, SU Jian-chun

(The 51st Research Institute of CETC, Shanghai 201802, China)

Abstract: With the extensive application of data fusion technology, it is quite easy for the network of radars to identify track deception against single radar. The stealthy Electronic Combat Air Vehicles(ECAV) equipped with Electronic Counter Measures(ECM) can deceive a radar by using range delay deception technique. This make the radar detect a fake target called phantom beyond the ECAV location. Phantom track is generated by using sequential location of phantom. The important feature of generating phantom track is its kinematic and dynamic constraints. These constraints restrict the freedom of phantom. This paper presents a technology used by the cooperative control of a team of ECAV to deceive network of radars through the generation of a space-time coherent phantom track. The equation of motion and the constraints of the phantom are given. Some approaches to solve the technical problems are described. Simulation results of the optimal control algorithm prove the feasibility and practicability of this method.

Key words: radar network; cooperative control; phantom track

“防空压制”和“防空摧毁”是对抗敌方一体化防空系统的主要作战形式。对雷达实施航迹欺骗是“防空压制”的主要手段之一。然而, 现代防空情报网中的雷达多数具有联网功能, 数据融合技术在雷达组网中的普遍应用, 使得常规的假目标欺骗干扰在多部雷达情报信息综合相关处理时易于被识别, 因而降低或失去欺骗作用。因此, 要使干扰机发出的假目标具有一定的欺骗作用, 至少应使假目标在雷达威力范围内组网雷达显示器上都能观察到, 且其空间位置应有一定的相关性, 即位于目标运动形成的同一航线上, 与真实目标有较好的逼真度, 只有这样才能形成有效的航迹欺骗^[1]。采用具有航迹特征的雷达假目标产生技术可以产生完全可控的假目标干扰航迹, 且多部雷达看来其地理航线基本一致。只要假目标的目标特征与真实目标相似, 就不可能被剔除, 从而增大敌情报系统的虚警率, 扰乱其指挥决策和火力攻击。

单机机动计划问题已被广泛研究了多年, 但自动多机系统的协同运动计划还是个很新的课题。国外近年来一直在积极研究多机协同航迹欺骗的工作机理, 并努力探索适用的飞行航迹最优控制算法。文献[2-3]提出了一种新的航迹欺骗方法, 即利用多架隐身无人机, 在敌防空雷达前方空域作一定规则的协同飞行, 并在接收到雷达信

号后发射具有距离延迟量的干扰信号，将防空雷达的波束指向诱导到真实电子战斗机(ECAV)位置以外的设定空域，从而达到掩护己方空中力量突防的目的。近两年来，国内雷达对抗领域的科研人员也陆续开展了这类课题的仿真研究工作。

1 基本原理

雷达可以通过接收目标反射回的无线电波来探测目标的存在。通过计算往返时间和比较发射脉冲与移动目标的频率，可以确定目标的距离和距离变化率^[4]。假设 ECAV 可以截获雷达发射脉冲并能适当对其回波进行延迟，那么就会使雷达看到一个真实 ECAV 距离之外的假目标。然而随着雷达组网技术的广泛应用，简单形式的距离延迟法因组网雷达站会对目标和目标航迹进行相关处理，以识别这些距离延迟引起的航迹欺骗而无法实施距离欺骗^[5]，因此，采用距离门拖引技术的难点就在于如何欺骗整个雷达组网，让它们只看到一条时间和空间相关的虚假航迹。这必然涉及到如何使所有从雷达到与其协作的 ECAV 间的连线交汇于一个共同点，并在空间形成一条连贯的轨迹。

图 1 以 4 架 ECAV 组成的编队为例，示出了该航迹欺骗技术的工作原理^[5]。4 部雷达共享目标信息，每部侦察一架 ECAV。首先，每架 ECAV 都在其雷达到假目标位置的连线上，ECAV 通过延迟雷达信号来产生假目标。然后，4 架 ECAV 调整其航线，以确保其能持续待在每个假目标位置到雷达的连线上。这样，4 架 ECAV 通过相互协作就产生了一条简单的、相关的虚假航迹。

图 1 的示例可以进一步推广到 n 机 n 雷达航迹欺骗的场景。在这种场景下， n 部地面雷达共享关于 n 架 ECAV 和假目标的信息，每部 ECAV 指定一部雷达。

要想在多部雷达上形成设定空间上的假目标干扰，首要问题是要在单部雷达上形成任意设定航线的假目标航迹点。因此本文以单机单雷达为例介绍航迹欺骗原理。

将运动方程拓展到三维，主要的 ECAV 和假目标参数的定义及其相互关系如图 2 所示。其中， r 和 R 分别是雷达到 ECAV 和假目标的径向距离。 x, y 和 z 表示笛卡尔坐标系的位置坐标。 α 和 β 是飞机速度矢量的方位角和航道倾角。 θ 和 ϕ 分别是雷达到 ECAV 和假目标的方位角和仰角。下脚标 E 和 p 分别表示 ECAV 和假目标。

1.1 假目标运动学特性

笛卡尔坐标系中，假目标的基本运动学方程如下：

$$\dot{x}_p = v_p \cos \beta_p \cos \alpha_p \quad (1)$$

$$\dot{y}_p = v_p \cos \beta_p \sin \alpha_p \quad (2)$$

$$\dot{z}_p = v_p \sin \beta_p \quad (3)$$

式中 v_p 表示虚假目标的速度。

采用旋转矩阵^[6]将笛卡尔坐标系方程转换到极坐标系中：

$$\begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \cos \phi \dot{\theta} \\ R \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \phi \cos \theta & -\sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ v_p \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ v_p \sin \beta_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

得到如下方程：

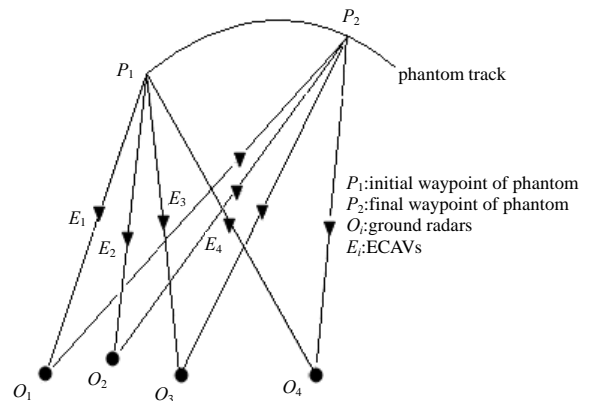


Fig.1 Phantom track generation through a team of four ECAVs
图 1 由 4 架 ECAV 组成的编队产生虚假航迹原理图

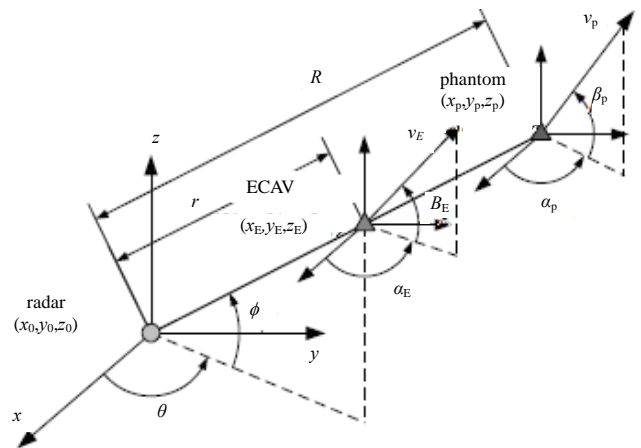


Fig.2 ECAV, phantom variables and relations
图 2 ECAV 和假目标参数及其关系

$$\dot{R} = v_p \left(\cos \phi \cos \theta \cos \beta_p \cos \alpha_p + \cos \phi \sin \theta \cos \beta_p \sin \alpha_p + \sin \phi \sin \beta_p \right) \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_p}{R \cos \phi} \left(-\sin \theta \cos \beta_p \cos \alpha_p + \cos \theta \cos \beta_p \sin \alpha_p \right) \quad (6)$$

$$\dot{\phi} = \frac{v_p}{R} \left(-\sin \phi \cos \theta \cos \beta_p \cos \alpha_p - \sin \phi \sin \theta \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \phi \sin \beta_p \right) \quad (7)$$

1.2 ECAV 运动学特性

笛卡尔坐标系中的 ECAV 基本运动学方程与假目标的类似, 方程式如下:

$$\dot{x}_E = v_E \cos \beta_E \cos \alpha_E \quad (8)$$

$$\dot{y}_E = v_E \cos \beta_E \sin \alpha_E \quad (9)$$

$$\dot{z}_E = v_E \sin \beta_E \quad (10)$$

通过旋转矩阵将运动学方程转换为极坐标方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r \cos \phi \dot{\theta} \\ r \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \phi \cos \theta & -\sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \cos \beta_E \cos \alpha_E \\ v_E \cos \beta_E \sin \alpha_E \\ v_E \sin \beta_E \end{bmatrix} \quad (11)$$

转换结果如下:

$$\dot{r} = v_E \left(\cos \phi \cos \theta \cos \beta_E \cos \alpha_E + \cos \phi \sin \theta \cos \beta_E \sin \alpha_E + \sin \phi \sin \beta_E \right) \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_E}{R \cos \phi} \left(-\sin \theta \cos \beta_E \cos \alpha_E + \cos \theta \cos \beta_E \sin \alpha_E \right) \quad (13)$$

$$\dot{\phi} = \frac{v_E}{R} \left(-\sin \phi \cos \theta \cos \beta_E \cos \alpha_E - \sin \phi \sin \theta \cos \beta_E \sin \alpha_E + \cos \phi \sin \beta_E \right) \quad (14)$$

由于 ECAV 必须位于雷达与假目标的连线上, ECAV 只有一维的自由度, 因此, 对于作战飞机的运动方程而言, 只要有一个方程和一个控制输入量就够了, 由此可以导出如下方程:

$$\tan \beta_E = \frac{\cos \phi \sin \phi \cos (\alpha_E - \theta) \dot{\theta} + \sin (\alpha_E - \theta) \dot{\phi}}{\cos^2 \phi \dot{\theta}} \quad (15)$$

$$\dot{r} = r \dot{\theta} \left(\cos^2 \phi \cos (\alpha_E - \theta) + \tan \beta_E \frac{\cos \phi \sin \phi}{\sin (\alpha_E - \theta)} \right) \quad (16)$$

通过一连串虚假定位产生虚假航迹的重要特点是其受制于运动学原理。这些约束条件^[7]限制了假目标的自由度。最后, 问题就归结为寻求产生虚假航迹的控制输出量。由于虚假航迹的初始点和终点已设定, 因此该问题就成为一个有运动方程和约束条件、求解 TPBVP(Two-Point Boundary Value Problem)的优化控制问题^[8]。

2 仿真试验

进行仿真前, Maithripala 博士^[3]在其学位论文中针对该问题做出了如下假设:

- 1) 该航迹欺骗问题仅局限于平面;
- 2) 除指定初始点和终点外, 并未指定虚假航迹;
- 3) 虚假航迹和 ECAV 编队均受运动学原理约束;
- 4) 假目标速度需大于 ECAV 速度;
- 5) ECAV 编队质量忽略不计, 且其状态完全可观测;
- 6) 所有的 ECAV 最初都与其要欺骗的雷达及虚假航迹初始航迹点共线;
- 7) ECAV 编队已经知晓基地雷达的部署位置;

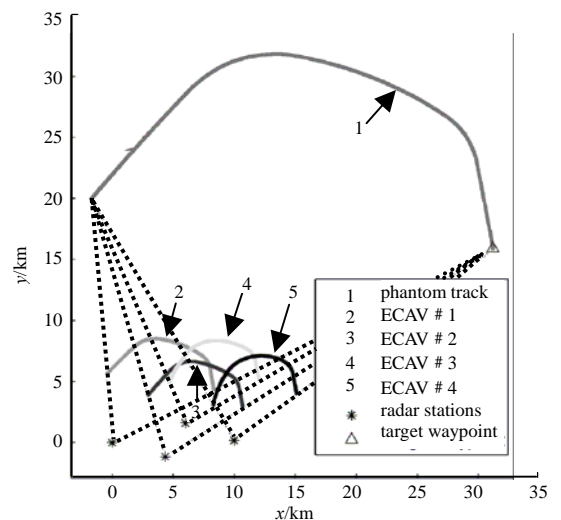


Fig.3 Simulation results of a coherent phantom track generated from a team of 4 ECAVs engaging four radars
图3 四架 ECAV 欺骗 4 部雷达产生相关虚假航迹的仿真结果

8) 虚假航迹的产生通过主瓣欺骗,采用距离门拖引技术实现。

由于通过 ECAV 编队的协作产生虚假航迹的基本方法是逐点产生虚假航迹点,以确保 ECAV 在这个渐进过程中的每一步都有可行的航迹点存在,因此文献[8-9]推导出了存在可行飞行航迹的充分必要条件以及相应的地速和加速度边界,然后采用次级控制将这些瞬时航迹点连接起来,产生最后可供 ECAV 飞行的路线。

求解 TPBVP 是项极其艰难的工作,且计算量巨大。为此文献[8]提出了一种计算量适中,且能适应实时计算的算法。这套算法实际上是有限维搜寻法,可以被进一步缩减至一维参数的搜索法。该算法对问题进行了降维处理,即由两维坐标表述。虽然实际控制是由 ECAV 实现的,但解决该问题的方法是描述一条虚假航迹,能够确保 ECAV 在产生这条航迹时所做的控制是可行的。同时在保持各 ECAV 间的通信信息最少的条件下,考虑到节省计算量,对各参量进行了离散化^[8]。该算法的独特之处在于,虚假航迹是作为算法求解的一部分而产生的,这样就在 ECAV 的初始条件设置和航迹产生过程中提供了很大的自由度。图 3 示出了采用此算法对 4 架 ECAV 组成的编队进行航迹欺骗的仿真结果。

3 结论

本文介绍了采用多架 ECAV 编队协同控制产生虚假航迹,对地面组网雷达进行欺骗的技术。这种欺骗主要由距离延迟欺骗技术来实现。为了满足采用优化控制算法对计算复杂度的基本限制,文中介绍的算法放弃了最优化,而采用了同样能进行协同控制,且可以满足实时运算的次优化算法。仿真结果验证了多部雷达产生相关假目标航迹的原理和算法,具有一定的可行性和实用性。采用空间位置相关的假目标对组网雷达进行欺骗干扰,不容易被组网雷达的数据融合系统所识别和剔除,因而具有重要的军事意义^[10]。

参考文献:

- [1] 孙龙祥,赵波,邱卫军,等. 一种具有航迹特征的雷达假目标产生技术[J]. 雷达科学与技术, 2005,3(4):198-202. (Sun Long-xiang,Zhao Bo,Qiu Wei-jun,et al. A technique for Generating the Radar's False Target with Signature of Flight Path [J]. Radar Science and Technology, 2005,3(4):198-202.)
- [2] Lee Il-Hyoung,Bang Hyochoong. Optimal Phantom Track Generation for Multiple Electronic Combat Air Vehicles[C]// International Conference on Control, Automation and Systems.in COEX,Seoul,Korea:[s.n.], 2008:29-33.
- [3] Maithripala D H A,Jayasuriya S,Mears M J. Phantom Track Generation Through Cooperative Control of Multiple ECAVs Based on Feasibility Analysis[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2007,129(5):708-715.
- [4] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999. (Zhao Guo-qing. Radar Electronic Warfare[M]. Xi'an:Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 1999.)
- [5] 周续力. 对组网雷达的多目标航迹欺骗[J]. 火力与指挥控制, 1995(1):1-5. (Zhou Xu-li. Multiple-Target Track Deception Jamming Against netted Radar[J]. Fire Control and Command Control, 1995(1):1-5.)
- [6] Purvis Keith B,Chandler P R,Pachter M. Feasible Flight Paths for Cooperative Generation of a Phantom Radar Track[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics, 2006,29(3):653-661.
- [7] Beard R W,McLain T W. Multiple UAV Cooperative Search under Collision Avoidance and Limited Range Communication Constraints[C]// Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control. Maui,HI:[s.n.], 2003:25-30.
- [8] Shima T,Chandler P,Pachter M. Decentralized estimation for cooperative phantom track generation[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 2007,588:339-350.
- [9] Purvis K B,Astrom K J,Khammash M. Online Control Strategies for Highly Coupled Cooperative UAVs[C]// Proceedings for the American Control Conference.New York:[s.n.], 2007:3961-3966.
- [10] 周续力. 对搜索警戒雷达的多目标航迹欺骗[J]. 电子信息对抗技术, 2007,11(6):43-45. (Zhou Xu-li. Multiple-Target Track Deception Jamming Against Surveillance and Warning Radar[J]. Electronic Warfare Technology, 2007,11(6):43-45.)

作者简介:



范振宇(1977-),女,内蒙古自治区乌海市人,硕士,从事电子对抗技术情报研究.email: jilly88@yeah.com.

王磊(1977-),男,呼和浩特市人,副教授,从事电子对抗技术总体设计。

苏建春(1984-),男,福建省莆田市人,讲师,从事电子对抗技术情报研究。