基于 RGPO 的编队 ECAVs 协同航迹欺骗

高 彬 毛士艺 孙进平

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于动力学模型分析了多机协同控制下的航迹欺骗技术,利用配备有电子欺骗技术的电子战飞行器(ECAVs, Electronic Combat Air Vehicles),对敌方的防空系统中的雷达网实施电子攻击行动来达到欺骗干扰效果. 对搭载距离拖引干扰(RGPO, Range Gate Pull-Off)技术的 ECAVs 在防空雷达网中的作战运用及协同策略进行了研究,空间模型包括单架 ECAV 对单部雷达以及多架 ECAV 对雷达组网两种情形. 基于 ECAV、雷达和虚假航迹点三者共线关系,削减搜索空间,解决动力约束下 ECAVs 轨迹规划约束最优化难题,算法高效快捷,可实时完成 ECAVs 轨迹规划.

关 键 词: 电子战飞行器; 距离拖引干扰; 虚假航迹; 路径规划

中图分类号: TN 974; TN 972^{+}.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1343-04

Cooperative generation of phantom radar track using a team of ECAVS based on RGPO

Gao Bin Mao Shiyi Sun Jinping

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The technology of track deception for cooperative control of multiple electronic combat air vehicles(ECAVs) was analyzed by kinetics model. ECAVs were used to generate phantom radar tracks in multiple radar air defense network. Two-dimensional analyses of scenarios were provided involving single ECAV deceiving single radar and multiple ECAVs deceiving an integrated network of radars using range gate pull-off (RGPO) deception. According to the collinearity constraint request for ECAV, radar and phantom track, and through reducing finite dimensional searches to one dimensional parameter searches, the proposed algorithms were computationally attractive, and the ECAVs track programming problem under kinematic constraints can be realized real time computations amenably.

Key words: electronic combat air vehicle(ECAV); range gate pull-off(RGPO); phantom track; path planning

海湾战争后,世界上掀起一股发展军用电子战无人机的热潮,电子干扰型无人机主要是配备雷达干扰装备,飞临目标区上空对敌方雷达网实施近距离压制性干扰或欺骗性干扰任务,以掩护攻击机群的安全突防[1]. 如美国在海湾战争中使用的“先锋”、“苍鹰”等干扰型无人机. 本文就搭载有距离波门拖引干扰技术的电子战飞行器(ECAVs, Electronic Combat Air Vehicles)在单部或多部雷达防空网中的作战运用及协同策略进行研究. 电子协同攻击问题是当前的一个研究热点. 文献[2-3]认为在规定区域内的协同路径控制问题其时就是一个为了使得花费时间、燃料消耗、威胁接触等最小而任务履行最好、任务持续时间最长、覆盖面积最大化等的约束最优化问题. 电子协同攻击的实施算法与这些研究中所定义的约束最优化问题相类似.

收稿日期: 2010-06-29; **网络出版时间**:2011-11-23 15:05; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1505.002

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1505.002.html

作者简介: 高 彬(1977-),男,山东济南人,博士后,gaobin@ee.buaa.edu.cn.

距离波门拖引是对雷达选通波门进行捕获和欺骗,最终使其跟着欺骗信号移离真实目标. 首先,干扰脉冲捕获雷达跟踪波门,然后实施波门拖引[4],从而使得雷达丢失跟踪对象,被迫重新转入搜索,也可以设置雷达陷阱,使雷达跟踪波门保持在远离目标位置上.

对组网雷达,ECAVs 编队可以利用主瓣距离欺骗干扰来产生一条虚假航迹. ECAVs 在具体实施后拖干扰技术时,在战术配置上,需要将 ECAVs 部署于敌方防空雷达网和所掩护飞行目标中间,并使 ECAVs 尽量靠近雷达网;使产生的虚假目标航迹控制在敌方雷达的烧穿距离范围之内. 首先对单部 ECAV 对单部雷达实施欺骗进行建模分析,然后考虑 ECAV 和虚假航迹运动参数对虚假航迹和 ECAV 运行轨迹的影响,就 ECAVs 欺骗组网雷达进行二维场景分析,得出在指定虚假航迹起始和终止点情况下的 ECAVs 运动轨迹模型.

1 基本模型

设一电子战飞行器了解对方雷达的脉冲捷变特性、位置及其最大作用距离,且该电子战飞行器未被发现,该架 ECAV 可以对雷达实施距离欺骗干扰. 仅仅利用距离欺骗干扰来欺骗雷达,要求该架 ECAV 处于雷达的主瓣之中;当然,此时产生的虚假目标也将位于雷达与 ECAV 的连接视线上. 这样,虚假目标轨迹就是 ECAV 距离延迟和连接视线偏离雷达的方位值的函数. 图 1 给出了 3 架 ECAV 如何利用距离延迟技术协同工作产生虚假航迹来欺骗一个由 3 部雷达组成的雷达网的示意图.

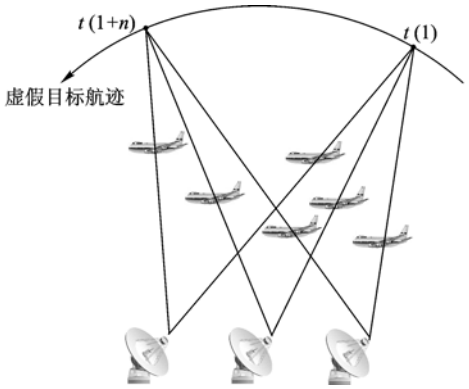
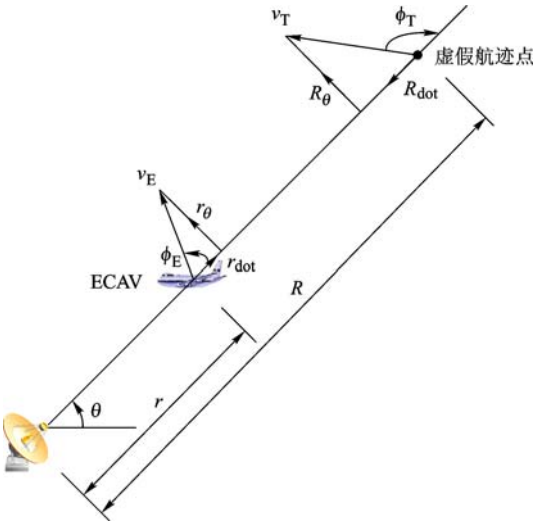


图 1 对雷达网产生虚假航迹的协同主瓣距离欺骗干扰

图 1 中给出了虚假航迹上的 2 个点迹,分别在 $t(1)$时刻和 $t(1+n)$时刻,2 点阐明了空间几何关系对 ECAV 路径的影响. 根据图 1 可知,ECAVs 路径规划问题演变为需要得到一条相干虚假航迹,且满足 ECAVs 自身动力约束条件的问题.

假设 ECAV 的数量与雷达网中雷达数量相等,那么一架 ECAV 实施主瓣欺骗干扰的固有轨迹限制可以通过自由度来评定. 任何一个虚假航迹点在 x-y 坐标面中拥有 2 个自由度,可用 R 和 θ 或者 v_T 和 ϕ_T 来表示,如图 2 所示. 同样地,对于任何一架自由的 ECAV 来说,其在 x-y 坐标面中亦拥有 2 个自由度,也可用 r 和 θ 或者 v_E 和 ϕ_E 来表示. 这样,一架 ECAV 要产生一既定的虚假航迹必须满足 θ 和自由度的约束条件,可通过设定 ECAV 的 r,v_E 或者 ϕ_E 等参量来限定其自由度. 下面对 v_E,ϕ_E 和 v_T 等参量的边界取值范围对 ECAV 的飞行动力约束进行探讨.



v_E—ECAV 速度;ϕ_E—ECAV 航向;v_T—虚假航迹点速度;ϕ_T—虚假航迹点航向;r—ECAV 与雷达的距离;R—虚假航迹点与雷达的距离;θ—ECAV 与虚假航迹点连线偏离雷达水平线夹角.

图 2 ECAV 与虚假航迹参量及其关系示意图

2 匀速 ECAV 条件下协同轨迹建模

在主瓣欺骗下 ECAV 的自由度受到其恒定速度的限制. 给定一条时间相依的虚假航迹和一架 ECAV 的初始位置,需要 ECAV 的飞行轨迹来满足设定的虚假航迹.

对 ECAV 和虚假航迹点建立极坐标,据其几何关系和时间关系,得到如下基本方程[5]:

$$\dot{r} = \cos\phi_E \qquad r(0) = r_0 \tag{1}$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{r}\sin\phi_E \qquad \theta(0) = 0 \tag{2}$$

$$\dot{R} = \alpha\cos\phi_T \qquad R(0) = 1 \tag{3}$$

$$\dot{\theta} = \alpha\frac{1}{r}\sin\phi_T \qquad \theta(0) = 0 \tag{4}$$

不失一般性,可令 θ 取负值. 根据式(1)和式(2)可得下面方程:

$$\dot{r} = \sqrt{1-(r\dot{\theta})^2} \quad r(0) = r_0 \tag{5}$$

$$\dot{r} = -\sqrt{1-(r\dot{\theta})^2} \quad r(0) = r_0 \tag{6}$$

从上面两个方程式中可以看出,ECAV 与雷达的距离值 r 须满足下面的不等式关系:

$$r(t) < \frac{1}{\dot{\theta}} \quad \forall t \tag{7}$$

如果 $r\dot{\theta}$ 小于 1,该架 ECAV 就可以按照一恒定飞行速度运动,并通过式(5)和式(6)得到其恰当的 $\dot{r}$ 值.

最后,根据图 3 所示的极坐标中恒速恒航向虚假航迹的几何关系,可得如下方程[5]:

$$R(t) = \sqrt{1+\alpha^2t^2-2\alpha t\cos\psi} \tag{8}$$

$$\theta(t) = \arcsin\left(\frac{\alpha t\cos\psi}{R(t)}\right) \tag{9}$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{\alpha\sin\psi}{1+\alpha^2t^2-2\alpha t\cos\psi} \tag{10}$$

依据上式可以得 $r(t)$ 与 $\theta(t)$ 的图形关系.

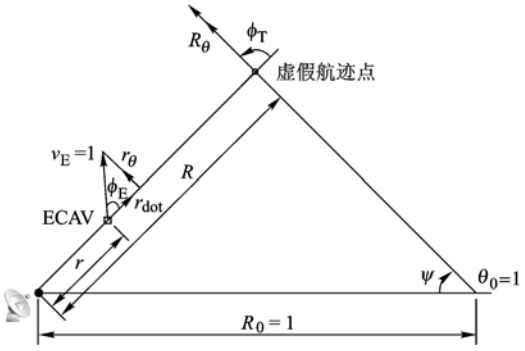


图 3　恒速 ECAV 和恒速恒航向虚假航迹之间的变量关系

3　动力约束条件下 ECAVs 协同轨迹

下面分析在考虑 ECAV 动力约束时,ECAVs 的轨迹规划建模问题. 并基于以下假设:起初,每架 ECAV 处在与所欺骗的相应雷达的连线上,以满足协同形成初始虚假航迹点的要求;地面雷达部署位置、ECAVs 初始运动参数、虚假航迹起始和终止航迹点等已知,且仿真过程中,地面雷达部署固定不变;利用主瓣欺骗干扰技术实施拖引干扰产生虚假航迹.

该类问题属于约束最优化问题,是典型的两点边值问题(TPBVP, Two-Point Boundary Value Problem)[6]. 众所周知,TPBVP 问题计算难度大,计算强度高,一般需要进行大量的迭代计算. 对 TPBVP 实现实时解决方案基本不可能. 这里通过削减搜索空间,力求减轻计算强度,尽可能实现实时求解功能.

考虑 ECAVs 和虚假航迹点的运动特性,考虑 ECAVs 和虚假航迹点的速度变化率和角度变化率,对其添加边界条件[7]:

$$\dot{r}_{\min} \leqslant \dot{r} \leqslant \dot{r}_{\max}, \omega_{\min} \leqslant \dot{\theta} \leqslant \omega_{\max}, \dot{R}_{\min} \leqslant \dot{R} \leqslant \dot{R}_{\max}$$

从而,ECAVs 运动速度 W 和虚假航迹点的运动速度 V 可以表征为

$$W = [W_{\min}, W_{\max}] \qquad W_{\min}, W_{\max} > 0$$

$$V = [V_{\min}, V_{\max}] \qquad V_{\min}, V_{\max} > 0$$

可得 ECAV 和虚假航迹的运动方程为

$$\pm\sqrt{\dot{r}^2+(r\dot{\theta})^2} = W$$

$$\pm\sqrt{\dot{R}^2+(R\dot{\theta})^2} = V$$

下面分析该问题在二维空间上的解,考虑 ECAVs 和虚假航迹点的水平速度约束条件,该约束条件将使得它们的可行的飞行速度扇区为一个环形区域[7],如图 4 所示.

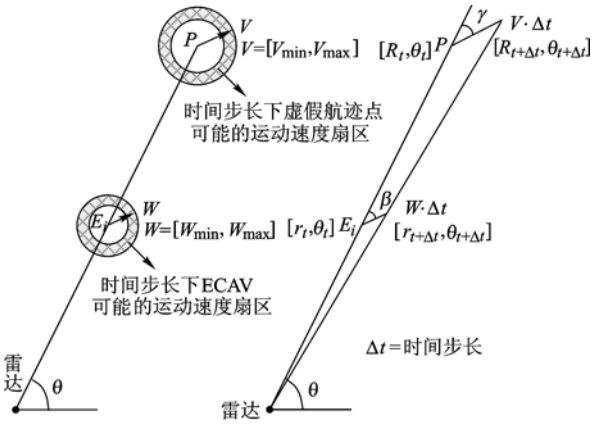


图 4　ECAV 和虚假航迹点的飞行速度扇区示意图

据 ECAV、雷达和虚假航迹点三者的共线关系以及 ECAV 与雷达和虚假航迹点之间的距离关系,对虚假航迹点可飞行速度扇区造成了很大影响,具体影响可分 3 种情况进行分析:

当 $\frac{r_t}{R_t}\frac{V_{\min}}{W_{\max}} > 1$ 时,虚假航迹点可行的运动速度扇区属于 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 且被分割成 2 个分离的部分,考虑充要条件后,其扇区范围变为一扇角是 $2\gamma_0$ 的 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 连通区域;当 $\frac{r_t}{R_t}\frac{V_{\max}}{W_{\max}} < 1$ 时,虚假航迹点可行的运动速度扇区属于 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 连通区域的一部分,考虑充要条件后,其扇区范围变为一扇角是 $2\gamma_0$ 的 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 连通区域;当 $\frac{r_t}{R_t}\frac{V_{\min}}{W_{\max}} < 1$ 且 $\frac{r_t}{R_t}\frac{V_{\max}}{W_{\max}} > 1$ 时,虚假航迹点可行的运动速度扇区为整个 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 连通区域.

上面分析的是一部 ECAV 的情形,对于多部 ECAV 处理方法与此相同. 只不过要把每一部 ECAV 所产生的十字交叉阴影区进行交集处理. 现在 ECAVs 编队彼此通信的信息量大大减少,只需 2 个信息,也就是 γ_0 及其方位就可以确定虚假航迹点可行的运动速度区域.

4 仿真分析

图 5、图 6 中给出了 4 架 ECAV 如何协同运动对 4 部雷达组成的雷达网实施欺骗干扰,驱使雷达网跟踪 ECAVs 所产生的一条虚假航迹的情形. 虚假航迹的起始和终止点以及雷达部署位置和 ECAVs 的起始部署位置如图所示;考虑水平速度边界和转弯半径,设虚假航迹的最小转弯半径为 6 km,每架 ECAV 的最小转弯半径为 2 km;图中虚假航迹的速度设置为 300 ± 40 m/s 和 400 ± 40 m/s;ECAV 速度为 130 ± 15 m/s 和 100 ± 15 m/s. 为使得虚假航迹从一个航迹点移动到下一个航迹点,一直到最终的航迹点,每一架ECAV彼此需

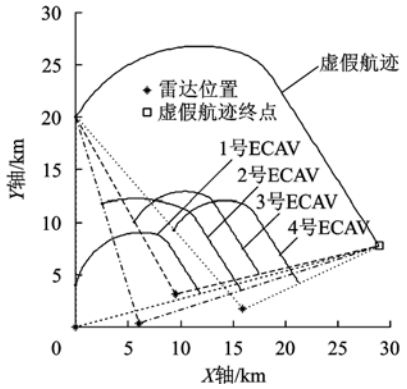


图 5 4 对 4 作战态势图(300 ± 40,130 ± 15)

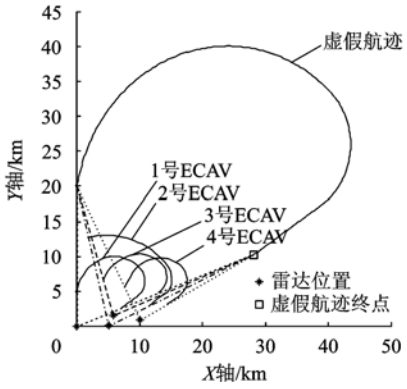


图 6 虚假航迹终点变动后的态势图
(400 ± 40,100 ± 15)

要进行关于自身运动特性的信息交流,确保使产生的航迹协同一致.

图 5 中虚假航迹由两部分构成,前部弧,后部为直线段,而 ECAVs 们的轨迹也表现出相类似的趋向特征,在 ECAVs 运动到允许它们产生一直线段式的虚假航迹的拐点处以后,它们的运行轨迹也趋向为一直线. 从图 6 中可看出,虚假航迹终点设置对虚假航迹的定量影响,所得仿真结果贴近实际.

5 结 束 语

本文考虑 ECAV 和虚假航迹的动力约束条件,基于 ECAVs 飞行动力学模型,利用空间共线几何特性有效缩减了 ECAVs 的轨迹规划搜索空间,实现了 ECAVs 的 TPBVP 实时解算. 后续要研究信息通信延迟补偿和三维建模等问题.

参考文献(References)

[1] Mears M J. Cooperative electronic attack using unmanned air vehicles[C]//Proceedings of 2005 American Control Conference. Portland: AIAA, 2005: 3339 - 3347

[2] Pachter Meir, Chandler Phillip, Larson Reid, et al. Concepts for generating coherent radar phantom tracks using cooperating vehicles[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island: AIAA, 2004: 16 - 19

[3] Xu Yunjun. Real-time optimal coherent phantom track generation via the virtual motion camouflage approach[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Toronto, Ontario: AIAA, 2010: 2 - 5

[4] 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, USA: IEEE, 2007: 653 - 661

[5] Purvis Keith, Chandler Phillip, 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

[6] Shima T, Chandler P, Pachter M. Decentralized estimation for cooperative phantom track generation[J]. Lectore Notes in Economics and Mathematical Systems, 2007, 588: 339 - 350

[7] Maithripala D H A, Jayasuriya S, Mears Mark 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): 709 - 715

(编 辑:娄 嘉)