

编队飞行射频辐射的风险计算模型及优化策略

冯博宇, 王 璞¹

(空军工程大学装备管理与安全工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 通过对飞机机载雷达与截获接收机的电子对抗机理及飞机编队模型的分析, 研究编队飞行射频辐射的风险计算模型及优化策略。以施里海尔截获因子为飞机与截获接收机电子对抗风险指标, 将该因子拓展到2个飞机的简单编队情形, 比较不同编队的射频辐射风险。建立适当的参考坐标系, 给出多个飞机的编队射频辐射风险的施里海尔截获因子的计算模型。以编队的施里海尔截获因子为性能指标, 建立编队射频辐射风险最小的优化模型。分析性能指标的特点, 由基本不等式可知, 编队内飞机在飞行空域位置的方差越小, 射频辐射风险越小, 以此为基础建立多机编队射频辐射风险控制的简化模型。最后仿真12机编队的情形, 给出近似最优的编队配置。

关键词 飞机编队; 机载雷达; 截获接收机; 施里海尔截获因子

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.004

中图分类号 V218 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0016-05

射频辐射风险的研究是飞机射频隐身技术研究的关键环节^[1-2], 文献[2]针对用施里海尔(Schleher)截获因子^[3]评价飞机射频隐身性能的不足做了改进, 用信号截获率表征飞机射频隐身特性, 对影响信号截获率的因素进行分析与计算, 给出飞机实现射频隐身的途径与方法。大量研究表明: 不但飞行器上的机载天线等传感器孔径的分布、形状特征及工作方式对飞机隐身效果产生影响^[1,4], 编队飞行状态下的射频辐射风险的影响也是举足轻重的。飞机编队飞行可以提高执行任务的成功率和抗突发事件的能力, 在侦察、干扰以及对地攻击等方面具有单机无法比拟的优势^[5-7], 但对其射频辐射风险研究还未见报道。本文基于文献[2,6], 综合评估飞机编队的射频辐射风险和截获接收机的截获风险, 建立计算模型, 给出控制整体编队射频辐射风险的简化性能指标和随机优化模型。

1 射频辐射风险概述

考虑如下雷达距离方程^[8]

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} A_e \quad (1)$$

式中: G_t 为天线发射增益; P_t 为天线辐射的功率; σ 为雷达目标截面积; $4\pi R^2$ 表示雷达波信号能量在传播路径上的发散程度; A_e 为有效接收孔径面积; P_r 为接收功率。实际上, $P_t G_t / 4\pi R^2$ 是离雷达距离 R 处的功率密度, $\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2}$ 表示单位面积上雷达接收到的功率。

将雷达作用距离 R_{\max} 定义为 P_r 等于雷达最小可检测功率 S_{\min} 时雷达的作用距离, 当 $P_r > S_{\min}$ 时, 即可

¹ 收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171199); 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201102y13)

作者简介: 冯博宇(1989-), 女, 陕西富平人, 硕士生, 主要从事安全风险评估与管控研究。

E-mail: huizi0429@sohu.com

探测到目标。由于 G_r 与 A_e 的关系为: $G_r = 4\pi A_e / \lambda^2$, λ 是信号的波长。因此雷达作用距离 R_{\max} 也可表示为:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \quad (2)$$

式中: S_{\min} 是雷达系统在一定发现概率下的固有性能, $S_{\min} = kT_0 B_n F_n D_0$, 其中, 波尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; t_0 为标准室温 290 K; B_n 为雷达接收机噪声带宽, $B_n \approx 1/\tau$; F_n 为接收机的噪声系数; D_0 为雷达监测因子。

以上只是雷达方程的简单形式, 由于忽略了电磁波传播衰减的影响等许多因素, 与实际情况偏差太大。对于特定的目标, 雷达目标散射截面积在不同的角度上不是恒定值, 所以还需考虑系统损失和传播损失等因素, 最基本的雷达方程以功率形式可表示为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma L_2}{(4\pi)^3 R^4 L_{RT} L_{RR}} \quad (3)$$

式中: G_r 为天线接收增益; L_{RT} 为机载雷达发射机和发射天线之间的损耗; L_{RR} 为机载雷达接收机和接收天线之间的损耗; L_2 为双向大气衰减因子。由 $P_r = S_{\min}$ 可得:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma L_2}{(4\pi)^3 R^4 L_{RT} L_{RR}} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma L_2}{(4\pi)^3 kT_0 B_n F_n D_0 L_{RT} L_{RR}}, R_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma L_2}{(4\pi)^3 kT_0 B_n F_n D_0 L_{RT} L_{RR}} \right)^{1/4} \quad (4)$$

截获接收机截获距离^[2]为:

$$R_I = \left(\frac{P_t G'_t G_t L_1 \lambda^2}{(4\pi)^2 L_{RT} L_{IR} \delta_i} \right)^{1/2} = \left(\frac{P_t G'_t G_t L_1 \lambda^2}{(4\pi)^2 L_{RT} L_{IR} kT_0 F_t B_t P_{ti}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: G'_t 为发射天线在截获接收机方向上的增益; G_t 为截获接收机天线增益; L_1 为单程损耗; L_{IR} 为截获接收机和天线之间的损耗; 若截获接收机截获到机载雷达发射信号的主瓣, 则 $G_t = G'_t$, 若截获到旁瓣, 则 G'_t 为发射天线旁瓣在截获接收机方向上的增益。截获接收机的灵敏度 $\delta_i = kT_0 F_t B_t P_{ti}$, 其中: F_t 为截获接收机的噪声系数; B_t 为截获接收机的带宽; P_{ti} 为截获接收机所需的输入信噪比。

若截获接收机接收到来自机载雷达的信号功率 P_t 等于截获接收机的检测门限功率。令截获接收机的灵敏度和机载雷达接收机的灵敏度之比为 δ , 即得到施里海尔 (Schleher) 截获因子^[2]

$$\alpha = \frac{R_I}{R_{\max}} = R_{\max} \left(\frac{1}{\delta} \frac{4\pi G'_t G_t L_1 L_{RR}}{\sigma G_t G_r L_2 L_{IR}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

如果 $\alpha < 1$, 则射频隐身性能较好, 且 α 越小, 飞机射频隐身性能越好。

2 基本编队的射频辐射风险

编队战术通常是以基本的双机或四机为“单元”, 按照层级的概念建立起大规模的飞机编队。本文以双机僚机左翼队形 (LFW) 和四指队形 (FF) 为研究对象, 见图 1^[5,9]。

先计算双机小编队的射频辐射风险。设长机、僚机对应的各参数分别为 $P_t^{(i)}$ 、 $G_t^{(i)}$ 、 $G_r^{(i)}$ 、 λ_i 、 σ_i 、 $L_2^{(i)}$ 、 $B_n^{(i)}$ 、 $F_n^{(i)}$ 、 $D_0^{(i)}$ 、 $L_{RT}^{(i)}$ 、 $L_{RR}^{(i)}$ 等, $i = 1, 2$, 两机的机载雷达都处于发射状态, 即不考虑静默的情形。也不考虑天线扫描

方式的捷变性, 单机的施里海尔截获因子分别为 $\alpha_i = \frac{R_I}{R_{\max}^{(i)}}$, $i = 1, 2$, 假设单个飞机射频隐身性能较好, 即 $\alpha_1 < 1$ 且 $\alpha_2 < 1$, 研究编队的射频隐身问题。假设截获接收机截获长机和僚机的事件是相互独立的, 至少截获其中之一则截获编队的事件发生, 则 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2$ 。以双机僚机左翼队形 (LFW) 为例, 设双机同时做逆时针飞行执行探测任务, 截获接收机截获到长机机载雷达发射信号的主瓣, 即 $G_t = G'_t$, 长机和僚机的位置关系

见图 2, 此时截获接收机将可能截获到僚机机载雷达发射信号的副瓣, 设僚机发射信号主瓣方向与截获接收机方向的夹角为 θ_1 ($0 < \theta_1 < \pi$), 则 G'_t 为僚机的发射天线旁瓣在截获接收机方向上的增益, 其与 θ_1 有关^[10], 不妨设为 $G'_t(\theta_1)$, 当 $\theta_1 = 0$ 时最大, 即 $G'_t(\theta_1) \leq G'_t(0)$, 截获接收机的截获距离变为:

$$R_I(\theta_1) = \left(\frac{P_t G'_t(\theta_1) G_t L_1 \lambda^2}{(4\pi)^2 L_{RT} L_{IR} kT_0 F_t B_t P_{ti}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

在不考虑天线扫描方式的捷变性的条件下, 定义施里海尔截获因子分别为 $\alpha_1(0) = R_I(0)/R_{\max}^{(1)}$, $\alpha_2(\theta_1)$

$= R_l(\theta_1)/R_{\max}^{(2)}$, 截获接收机相对于整个编队的施里海尔截获因子为 $\alpha = \alpha_1(\theta_1) + \alpha_2(\theta_1) - \alpha_1(\theta_1)\alpha_2(\theta_1)$ 。将 θ_1 更换为 θ_2 即可得到僚机右翼队形(RFW)的施里海尔截获因子, 见图2。由于 $\theta_2 > \theta_1$, 则 $R_l(\theta_2) < R_l(\theta_1)$, 故在图2情形下双机同时做逆时针飞行时, 僚机右翼队形(RFW)的施里海尔截获因子小于僚机左翼队形(LFW)。如果截获接收机截获到僚机机载雷达发射信号的主瓣, 则不难证明右翼队形(RFW)仍然优于左翼队形(LFW)。反之, 在双机同时做顺时针飞行时, 结果恰好相反。对四指队形(FF)来说, 当编队做逆时针飞行执行任务时, 左手队形优于右手, 当顺时针飞行执行任务时恰好相反。

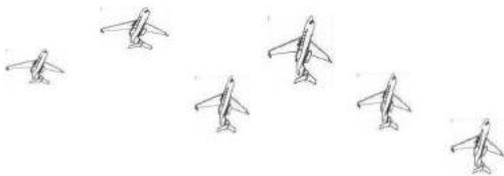


图1 僚机左翼队形和四指队形(左手)

Fig. 1 Left follower wing for two aircrafts and five fingers for five aircrafts (left hand)

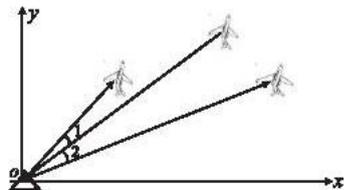


图2 僚机左(右)翼队形、与截获接收机

Fig. 2 Left (or right) follower wing for two aircrafts and intercepting receiver

3 一般编队的射频辐射风险及优化策略

设 N 架飞机形成编队, 不考虑天线扫描方式的捷变性, 以地面无源探测系统为例, 以地面截获接收机的坐标位置为原点, 赤道面为 xy 面, 0° 经度为 x 轴, 90° 经度为 y 轴, 北极轴为 z 轴, 建立坐标系。设第 i 架飞机在某时刻的飞行坐标为

$$x_i = R_i \cos \varphi_i \cos \theta_i, \quad y_i = R_i \cos \varphi_i \sin \theta_i, \quad z_i = R_i \sin \varphi_i \quad (8)$$

式中: R_i 表示与截获接收机的距离; φ_i 表示纬度; θ_i 表示经度。若天线主瓣方向与截获接收机主瓣方向的方向余弦为 $b_0 = (\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0)$, 而第 i 架飞机所在坐标的方向余弦为 $a_i = (\cos \varphi_i \cos \theta_i, \cos \varphi_i \sin \theta_i, \sin \varphi_i)$, 则其夹角为:

$$\omega_i = \arccos \frac{a_i b_0}{\|a_i\| \|b_0\|} = \arccos(a_i b_0) = \arccos(\cos \varphi_i \cos \theta_i \cos \alpha_0 + \cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \beta_0 + \sin \theta_i \cos \gamma_0) \quad (9)$$

截获接收机的截获距离为 $R_l(\omega_i)$, 假设施里海尔截获因子 $\alpha_i < 1$, 编队的施里海尔截获因子可定义为:

$$\alpha = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \alpha_i) = 1 - \prod_{i=1}^N (R_{\max}^{(i)} - R_l(\omega_i)) / R_{\max}^{(i)}$$

假设编队飞机的垂向高度期望值为 h , 误差为 Δh , 飞机之间水平面距离的最小值为 d , 最大值为 D , 不难得到最优编队策略应满足的优化问题为:

$$\min \left(1 - \prod_{i=1}^N (R_{\max}^{(i)} - R_l(\omega_i)) / R_{\max}^{(i)} \right) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } d^2 \leq (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq D^2, h - \Delta h \leq z_i \leq h + \Delta h, i, j = 1, 2, \dots, N$$

式中决策变量为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, N$ 。要求解上面的优化问题是很困难的, 必须寻求一种简化的近似求解方法。因为飞行过程中各飞机机载雷达天线的主瓣与飞行航向有关, 位置不断变化, 因此夹角 ω_i 是随机的, $R_l(\omega_i)$ 也是随机变量。故公式(10)的目标函数可以归结为求其数学期望最小或下式:

$$\max E \left(\prod_{i=1}^N \frac{(R_{\max}^{(i)} - R_l(\omega_i))}{R_{\max}^{(i)}} \right) = \left(\prod_{i=1}^N \frac{(R_{\max}^{(i)} - E(R_l(\omega_i)))}{R_{\max}^{(i)}} \right)$$

假设编队各飞机机载雷达的性能基本一致, 即最大作用距离 $R_{\max}^{(i)}$ 基本相等, 截获接收机的截获距离的数学期望 $E(R_l(\omega_i))$ 存在, 则 $\prod_{i=1}^N [R_{\max}^{(i)} - E(R_l(\omega_i))]$ 近似为某个常值, 由基本不等式:

$$\sqrt[N]{\prod_{i=1}^N (R_{\max}^{(i)} - E(R_l(\omega_i)))} \leq \prod_{i=1}^N (R_{\max}^{(i)} - E(R_l(\omega_i))) / N$$

可知, 当且仅当各数学期望 $E(R_l(\omega_i))$ 近似相等时 $\prod_{i=1}^N R_{\max}^{(i)} - R_l(\omega_i) / R_{\max}^{(i)}$ 最大, 编队的射频辐射风险最小,

即整个飞行过程中随机变量 ω_i 的方差越小,编队的射频辐射风险越小。

假设飞机编队在某设定大小的区域内(与飞行过程无关),飞行过程中队形所在区域的大小基本保持不变,不妨设该区域为 $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, h - \Delta h \leq z_i \leq h + \Delta h$,各飞机在该区域的编队位置为 $(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, N$,令 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$,为使得编队内各飞机的几何位置与整体编队的中心位置的方差尽可能小,可得如下确定型优化问题:

$$\min \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{ (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2 \} \tag{11}$$

$$\text{s. t } d^2 \leq (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq D^2$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, h - \Delta h \leq z_i \leq h + \Delta h, j = 1, 2, \dots, N$$

求解公式(11) 可得到飞行编队的近似最优配置,且公式(11) 很容易求解。

4 仿真算例

设 12 架飞机形成编队,其机载雷达性能基本相似,飞行过程中编队队形基本保持不变,编队所设定的水平区域大小为 $16 \leq x \leq 24, 206 \leq y \leq 26$,单位为 km,要求飞机垂向的高度期望值为 $h = 10 \text{ km}$,相邻飞机的高度误差为 $\Delta h = 1 \text{ km}$,飞机之间水平面距离的最小值 $d = 2 \text{ km}$,最大值 $D = 9 \text{ km}$,利用 LINGO 软件求解公式(11) 可得到编队的近似最优配置,见表 1。

表 1 12 个飞机编队的近似最优配置

Tab.1 Approximate optimization scheme for 12 aircrafts formation

序号	x/km	y/km	z/km	序号	x/km	y/km	z/km
1	16.877 5	24.000	10.5	7	20.136 2	25.175 2	10.5
2	17.556 0	22.118 6	9.5	8	20.814 7	23.293 8	9.5
3	18.234 5	20.237 2	10.5	9	21.493 2	21.412 4	10.5
4	18.167 6	25.528 3	9.5	10	22.104 8	24.822 1	9.5
5	18.846 1	23.646 9	10.5	11	22.783 3	22.940 7	10.5
6	19.524 6	21.765 5	9.5	12	23.461 8	21.059 3	9.5

从不同角度得到的飞机编队的近似最优配置所对应的图像如图 3 所示。

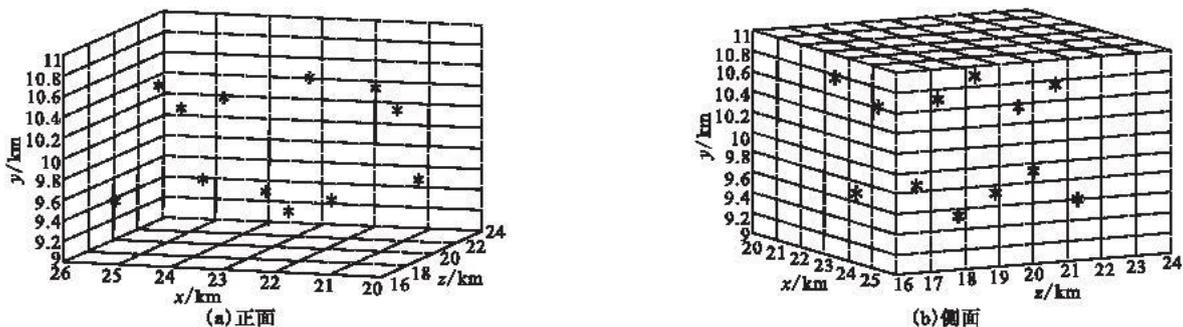


图 3 12 个飞机编队的近似最优配置

Fig.3 Approximate optimization scheme for 12 aircrafts formation

按照图 3 所示的编队队形可使随机变量 $\prod_{i=1}^N (R_{\max}^{(i)} - R_i(\omega_i)) / R_{\max}^{(i)}$ 的数学期望值近似最优(最大),因此,在飞行过程中编队队形基本保持不变的前提下,整体射频辐射风险的数学期望值将较小。

5 结论

本文以施里海尔截获因子为指标,研究了飞机基本队形编队的射频辐射风险问题,对一般的编队问题定义了整体的综合施里海尔截获因子,进一步考虑各机载雷达主瓣方向与截获接收机方向夹角的随机性得到了使得截获风险最小的随机优化模型,分析模型的特点简化了模型的求解方法。然而,编队的射频辐射风险问题非常复杂,应该考虑的问题和策略很多,本文只对编队的几何层面对射频辐射风险做了初步的研究,考

虑的其它因素很少。实际上根据战术需要,还需考虑编队内不同的飞机在某时间和位置采用静默、天线扫描方式捷变、飞行环境利用^[10]等战术安排以及机载雷达性能不同,执行任务的属性不同(例如机间链通信、指挥)等因素。任务属性不同,编队模式配置亦不同,本文作者将在后期继续这方面的研究工作。

参考文献(References):

- [1] 朱良成,张丽星,张红霞. 飞行器射频隐身技术的发展与应用[J]. 航空科学技术,2010,5:12-14.
ZHU Liangcheng, ZHANG Lixing, ZHANG Hongxia. Application and development on RF stealth of aircraft [J]. Aeronautical science & technology, 2010, 5: 12-14. (in Chinese)
- [2] 杨红兵,周建江,汪飞,等. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J]. 航空学报,2010,31(10):2040-2045.
YANG Hongbing, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, et al. Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2010, 31(10): 2040-2045. (in Chinese)
- [3] Schleher D C. LPI radar: factorfiction [J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 2006, 21(5): 3-6.
- [4] David Lynch, Jr. 射频隐身导论[M]. 西安:西北工业大学出版社,2009
David Lynch, Jr. Introduction to RF stealth [M]. Xi an: Northwestern polytechnical university press, 2009. (in Chinese)
- [5] 夏庆军,张安,张耀中. 大规模编队空战队形优化算法[J]. 控制理论与应用,2010,27(1):1418-1422.
XIA Qingjun, ZHANG An, ZHANG Yaozhong. Formation-optimizing algorithm for large-scale air combat [J]. Control theory & applications, 2010, 27(1): 1418-1422. (in Chinese)
- [6] Norman H M Li, Hugh H T Liu. Formation UAV flight control using virtual structure and motion[C]//2008 American control conference. Seattle, Washington:[s. n.], 2008: 1782-1787.
- [7] Meir P, John J D A, Andrew W P. Tight formation flight control [J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 2001, 24(2): 246-254.
- [8] 杰里 L·伊依伏斯. 现代雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社,1991.
Jerry L Eaves, Edward K Reedy. Principles of modern radar[M]. Beijing: Electronics industry Press, 1991. (in Chinese)
- [9] 洪晔,缪存孝,雷旭升. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究[J]. 机器人,2010,32(4):505-509.
HONG Ye, MIAO Cunxiao, LEI Xusheng. Formation method and flight test of multiple UAVs based on leader-follower pattern [J]. Robot, 2010, 32(4): 505-509. (in Chinese)
- [10] Lu X F, Fletcher D W, Don T, et al. Detection probability estimation of directional antennas and omni-directional antennas [J]. Wireless pers commun, 2010, 55: 51-63.

(编辑:徐敏)

The Risk Computation Model and Optimal Strategy for Radio Frequency Radiation on Aircraft Formation

FENG Bo-yu, WANG Ying

(School of Equipment Management and Security Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The risk computation model and optimal strategy for radio frequency (RF) radiation on aircraft formation is investigated by analyzing the model of aircraft formation and the mechanism of electronic counter measures (ECM) between aircraft airborne radar and intercepting receiver. Regarding Schleher intercept factor as the risk index of ECM between aircraft and intercepting receiver, the factor is extended to the simple formation in the case of two aircraft, and the RF radiation risks of different formations are also compared. The computation model of Schleher intercept factor of RF radiation risk in the case of multiple aircrafts is presented by establishing the appropriate reference coordinate system. Regarding Schleher intercept factor of aircraft formation as the performance index, a stochastic optimal model is established for minimizing the RF radiation risk of aircraft formation. By analyzing the characters of performance index and using the basic inequality, the conclusion that the less the variance of the positions of aircraft formation in the flight airspace is, the less risk the RF will have can be obtained. Based on the conclusion, a simplified model of risk control of RF radiation in the case of multiple aircraft formation is established. Finally, the formation scheme of approximate optimization is proposed by the computer simulation in the case of 12-aircraft formation.

Key words: aircraft formation; airborne radar; intercepting receiver; Schleher intercept factor