

远距离干扰模式下电子战飞机有效配置区域的确定

(海军航空工程学院, 烟台, 264001)

摘要:本文基于雷达干扰方程, 推导出了远距离干扰模式下电子战飞机有效配置区的简单计算模型, 并进行了仿真分析。得出远距离干扰情况下电子战飞机有效配置区主要取决于雷达主瓣宽度, 受电子战飞机偏离雷达最大增益方向的角度影响很小, 从而为电子战飞机作战运用提供了简单运算模型和决策依据。

关键词:远距离干扰; 电子战飞机; 配置区

0 引言

所谓的有效配置区, 是指电子战飞机配置在此区域内, 电子干扰机能有效干扰压制敌雷达探测, 满足其他作战平台实施作战行动的区域^[1]。实际战斗部署时, 指挥员只要在这个区域中选定电子战飞机的飞行航线, 就能完成干扰掩护任务。因此电子战飞机有效配置区的研究, 在航空电子对抗作战指挥中非常重要。

确定电子战飞机的战斗配置和飞行航线, 必须考虑掩护攻击机编队和敌方舰载(机载)雷达的位置, 双方武器装备的性能、使用特点, 以及是否有利于完成干扰任务、机动和防护等诸方面因素。因此电子战飞机的有效干扰区域是各约束条件所限定的一个区域集合之交。文献[2-6]研究了已知干扰机与敌雷达的位置下, 干扰扇面和干扰暴漏区的分析与估算。文献[7-9]研究了不同战术情况下干扰机的配置问题。本文依据基于雷达干扰方程和电子战飞机远距离干扰模式, 推导出了电子战飞机有效配置区的简单计算模型, 并进行了仿真分析, 得出电子战飞机有效配置区域主要取决于雷达主瓣宽度, 受电子战飞机偏离雷达最大增益方向的角度影响很小。

1 远距离电子干扰飞机配置方式

远距离支援干扰是指由电子战飞机组成干扰编队, 位于敌对空火力杀伤范围之外对敌施放干扰, 掩护己方攻击机编队突袭。实施远距离支援干扰时, 电子战飞机比攻击机编队提前数分钟到达指定空域施放干扰, 压制敌预警雷达、对空武器和机载拦截武器控制雷达等电子装备, 待被掩护编队返航后返航。

在攻击机编队实施突击的过程中, 电子战飞机对敌雷达目标的最小干扰距离(即雷达的烧穿距离)应小于攻击机编队距雷达的最小战术距离(有时定义为攻击飞机的投弹距离)。为拓展掩护区域的范围, 电子战飞机编队通常位于敌对空武器射程之外, 其阵位应尽量靠近被攻击目标。

电子战飞机通常采用跑道形、环形或其它形状的干扰航线, 其飞行高度视情而定, 如图 1 所示。

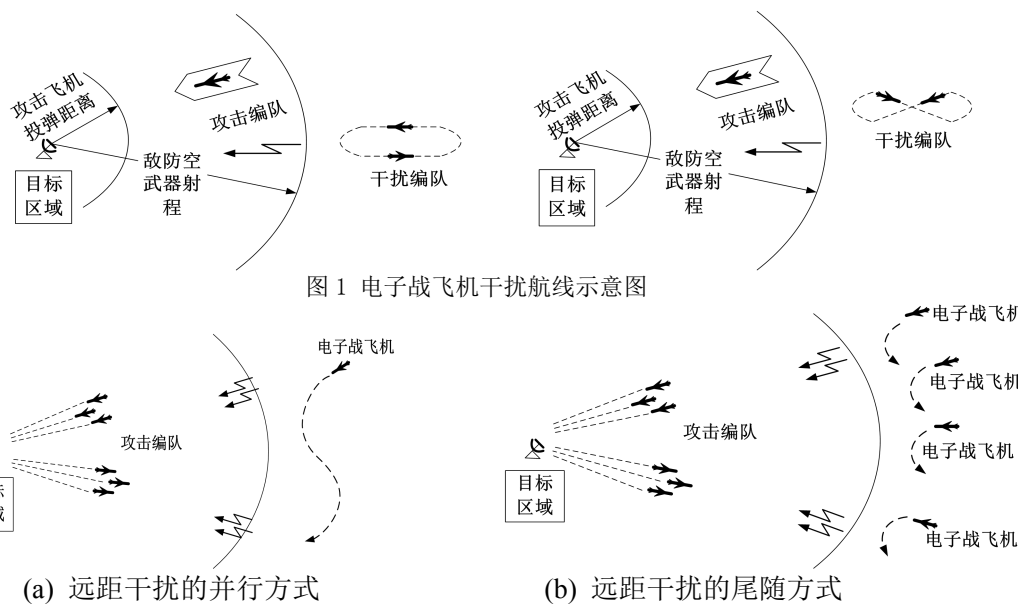


图 2 电子干扰飞机配置方式

电子干扰飞机与攻击机编队的相对位置有两种常用的配置方式, 分别为远距干扰的并行方式和尾随方式, 如图 2 所示。并行方式主要是为了有效地对付敌战斗机攻击, 它可以使电子战飞机在敌战斗机雷达上

形成的干扰扇面相互衔接,使其不容易区分多个目标,也不容易截击电子战飞机;尾随方式主要是为了既能掩护攻击编队进入,又能接应其退出。

电子战飞机无论哪种配置方式,前提是必须能有效地保护作战飞机完成任务,这就限定了电子战飞机活动区域。

2 电子战飞机有效配置区域的确定

假设雷达、电子战飞机和目标的对应关系如图3所示。雷达接收目标回波信号功率为 P_r ,则^[1]

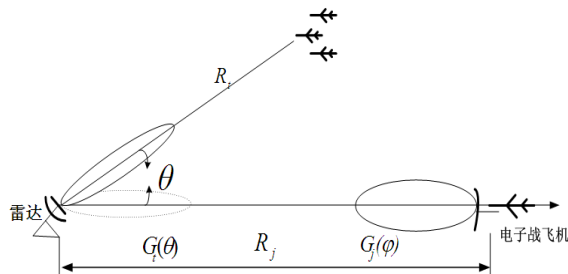


图3 雷达、电子战飞机和目标的对应关系

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_r^4 L_s} \quad (3-1)$$

式中, P_t 为雷达发射功率, G_t 为雷达天线主瓣增益, λ 为雷达信号波长, σ 为被探测目标有效雷达散射面积, R_r 为雷达与目标间距离, L_s 为雷达信号传输损耗因子。

进入雷达接收机输入端的干扰信号功率为 P_{rj} 。

$$P_{rj} = \frac{P_j G_j G_t(\theta) \lambda^2 \gamma_j B_r}{(4\pi)^2 R_{jr}^2 L_j B_j} \quad (3-2)$$

式中, P_j 为干扰机发射功率, γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化损失, R_{jr} 为干扰机到雷达的距离, L_j 为干扰机传输损耗因子, G_j 为干扰机主瓣增益, $G_t(\theta)$ 为雷达接收天线的增益函数, θ 为干扰信号离开雷达最大增益方向的角度。

当 $P_{rj}/P_s \geq K_j$ 时,则干扰信号能压制雷达目标回波信号,即电子战飞机干扰效果有效。其中 K_j 为干扰压制系数,是电子干扰的技术指标。由(3-1)、(3-2)式可得

$$\frac{P_j G_j G_t(\theta) \lambda^2 \gamma_j B_r}{(4\pi)^2 R_{jr}^2 L_j B_j} \bigg/ \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_r^4 L_s} \geq K_j \quad (3-3)$$

$$\frac{P_j G_j}{P_t G_t} \cdot \frac{B_r}{B_j} \cdot \frac{4\pi \cdot \gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{L_s}{L_j} \cdot \frac{R_r^4}{R_{jr}^2} \cdot \frac{G_t(\theta)}{G_t} \geq K_j \quad (3-4)$$

对(3-4)式进一步简化可得

$$R_{jr}^2 \cdot \frac{G_t}{G_t(\theta)} \leq C \cdot R_r^4 \quad (3-5)$$

式中 C 为

$$C = \frac{P_j G_j}{P_t G_t} \cdot \frac{B_r}{B_j} \cdot \frac{4\pi \cdot \gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{L_s}{L_j} \cdot \frac{1}{K_j} \quad (3-6)$$

对确定电子战飞机、攻击飞机(或攻击编队)和雷达目标,且传输损耗因子比随距离变化不大,干扰压制系数为定值时, C 可近似为常数。

2.1 雷达接收天线增益的分析计算

设雷达接收天线的方向图函数为 $F(\theta)$,当雷达天线的口径 d 比波长 λ 大4~5倍时, $F(\theta)$ 可近似用下式表示 $F(\theta) = \sin(\frac{\pi d}{\lambda} \theta) / \frac{\pi d}{\lambda} \theta$,则天线相对增益可表示为 $\frac{G_t(\theta)}{G_t} = F^2(\theta)$ 。

当 $\theta = 0$ 时, $\frac{\pi d}{\lambda} \theta = 0$, $\frac{G_t(0)}{G_t} = F^2(0) = 1$, $G_t(0) = G_t$ 即为主瓣的增益。当 $\frac{\pi d}{\lambda} \theta = n\pi$, $n = 1, 2, 3 \dots$ 时,

$\sin(\frac{\pi d}{\lambda}\theta) = 0$ ，所以 $G_t(\theta) = 0$ ，这是旁瓣的零点。旁瓣的最大值可以近似地认为出现在 $\sin(\frac{\pi d}{\lambda}\theta) \approx 1$ 处，因此旁瓣相对增益可用下列函数表示为^[10]

$$\frac{G_t(\theta)}{G_t} = (\sin(\frac{\pi d}{\lambda}\theta) / \frac{\pi d}{\lambda}\theta)^2 \approx \frac{1}{(\frac{\pi d}{\lambda}\theta)^2} \quad (3-7)$$

天线波束的半功率宽度 $\theta_{0.5}$ 与天线口径 d 及波长 λ 关系式为 $\theta_{0.5} = K \frac{\lambda}{d}$ ，其中 K 表示口径场分布的值。将这些参数代入(3-7)式可得

$$\frac{G_t(\theta)}{G_t} \approx \frac{1}{(\frac{\pi K}{\theta_{0.5}}\theta)^2} = k \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta}\right)^2 \quad (3-8)$$

式中 $k = \frac{1}{(K\pi)^2}$ ，关于 k 的取值视天线而定。对大多数雷达天线来讲， $K = 0.88 \sim 1.4$ ，则 $k = 0.052 \sim 0.13$ 。

一般取 $k = 0.04 \sim 0.1$ 比较适宜。

从实测天线方向图可知，对大多数雷达天线，当 $\theta > \pi/3$ 以后，旁瓣电平不再按 θ^2 的反比下降，可认为不变。另外上式也不适合 $\theta < \theta_{0.5}$ 的情况，在主瓣范围内就按主瓣值计算。因此，对实际使用的雷达接收天线增益可用如下简化等效式(3-9)表示^[11]。

$$G_t(\theta) = \begin{cases} G_t & 0 \leq |\theta| \leq \theta_{0.5}/2 \\ k \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta}\right)^2 G_t & \theta_{0.5}/2 < |\theta| \leq \pi/3 \\ k \left(\frac{\theta_{0.5}}{\pi/3}\right)^2 G_t & \pi/3 < |\theta| \leq \pi \end{cases} \quad (3-9)$$

2.2 电子战飞机有效配置区域绘制

首先确定攻击编队战术上距敌雷达的最小距离，一般可设定为攻击机对目标的最近发射导弹的距离（或导弹的发射距离），不妨设为 R_{min} 。并且要求电子战飞机的配置满足在大于 R_{min} 的空间内，雷达不能发现攻击机编队。也就是电子战飞机在有效配置区的最小的最小干扰距离小于 R_{min} 。

再次建立以雷达为极点，雷达与攻击机编队中心的连线为极轴的坐标系，在该极坐标系中给出满足(3-5)式函数 $f(R_{jr}, \theta)$ 。

$$f(R_{jr}, \theta) \Rightarrow R_{jr}^2 \cdot \frac{G_t}{G_t(\theta)} \leq C \cdot R_t^4 \quad (3-10)$$

把(3-9)代入(3-10)，且令 $R_t = R_{min}$ ，可得

$$\begin{cases} R_{jr} \leq \sqrt{C \cdot R_{min}^4} & 0 \leq |\theta| \leq \theta_{0.5}/2 \\ R_{jr} \cdot \theta \leq \sqrt{C \cdot R_{min}^4} \cdot k^{1/2} \cdot \theta_{0.5} & \theta_{0.5}/2 < |\theta| \leq \pi/3 \\ R_{jr} \leq \sqrt{C \cdot R_{min}^4} \cdot k^{1/2} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{\pi/3} & \pi/3 < |\theta| \leq \pi \end{cases} \quad (3-11)$$

曲线 $f(R_{jr}, \theta)$ 围成的区域就是电子战飞机的配置区域，可由 (3-11)式在极坐标可绘出。不妨设：

$$R_{jrmax} = \sqrt{C \cdot R_{min}^4}, \quad R_{jr} \cdot \theta = \sqrt{C \cdot R_{min}^4} \cdot k^{1/2} \cdot \theta_{0.5}, \quad R_{jr0} = \sqrt{C \cdot R_{min}^4} \cdot k^{1/2} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{\pi/3}.$$

显然， $f(R_{jr}, \theta)$ 由三段曲线连成。如设定雷达的工作频率在 S 波段， $P_t G_t = 4.4 \times 10^9 \text{ W}$ ，半功率角 $\theta_{0.5} = 2^\circ$ ；电子战飞机干扰功率 $P_j G_j = 4 \times 10^6 \text{ W}$ ；掩护目标（攻击机）的雷达有效截面积 $\sigma = 10 \text{ m}^2$ ；且取 $\frac{B_r}{B_j} = \frac{1}{2}$ ， $\gamma_j = 0.5$ ，

$\frac{L_s}{L_j} = 2$ ， $K_j = 3$ ， $k = 0.06$ ；攻击机最近投弹距离 $R_{min} = 120 \text{ km}$ 。则 $f(R_{jr}, \theta)$ 函数的仿真图如图 4 所示。

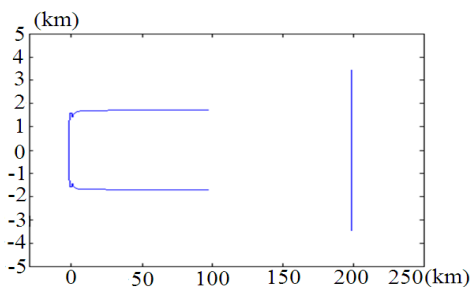


图 4 电子战飞机的配置区仿真图

从仿真图中可以见配置区域不连续。原因是 $|\theta| = \theta_{0.5}/2$ 时, $R_{jr} = \sqrt{C \cdot R_{tmin}^4} = R_{jrmax}$, 而在 $|\theta| = \theta_{0.5}/2 + \delta$ (δ 是无限小量) 时, $R_{jr} = \sqrt{C \cdot R_{tmin}^4} \cdot 2k^{1/2} = 2k^{1/2} \cdot R_{jrmax}$, 两值相差 $2k^{1/2}$ 倍, 不妨设为 $R_{jr1} = 2k^{1/2} \cdot R_{jrmax}$ 。也就是在 $|\theta| = \theta_{0.5}/2k$ 这点, θ 角度的一点变化就会引起 R_{jr} 很大的变化。对图 4 修改处理就得电子战飞机的配置区域, 如图 5 所示, 近似为喇叭型, 局部的变化可忽略。

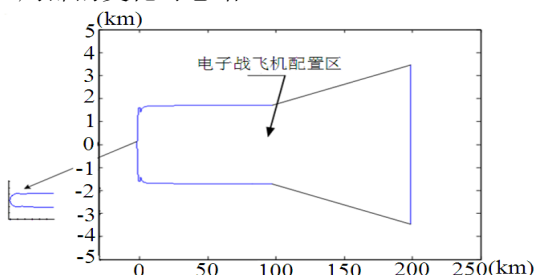


图 5 电子战飞机配置区修正图

如果再考虑战术上要求电子战飞机抵近干扰目标的最近距离小于 R_{ahmin} , 电子战飞机的实际配置区域为 $R_{jr} \geq R_{ahmin}$ 曲线与函数 $f(R_{jr}, \theta)$ 曲线的交集区。如果 $R_{jr1} < R_{ahmin} \leq R_{jrmax}$, 交集区为图 6(a)所示的阴影区域; 如果 $R_{ahmin} \leq R_{jr1}$, 交集区为图 6(b)所示的阴影区域, 在阴影区域中配置电子战飞机, 就能确保对攻击机飞机的干扰掩护。如果 $R_{ahmin} > R_{jrmax}$, 无交集区, 电子战飞机不能确保对攻击机飞机的干扰掩护。

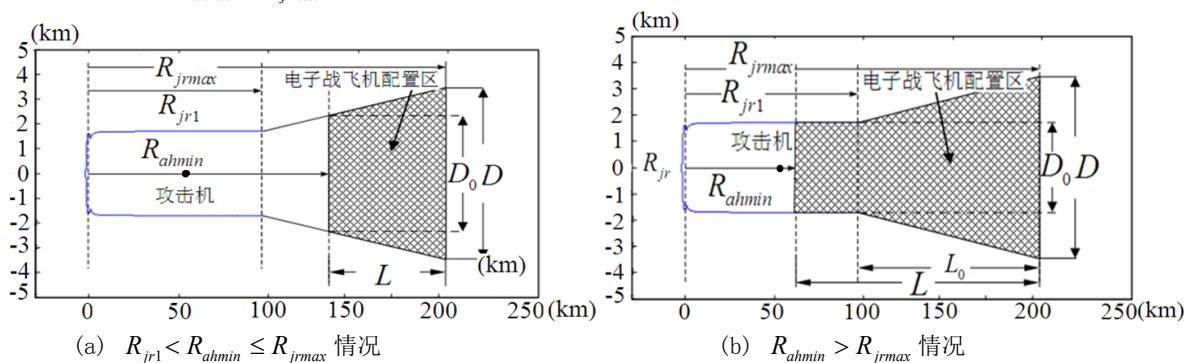


图 6 电子战飞机的实际配置区

2.3 电子战飞机有效配置区计算

由以上分析可知, 计算有效配置区就是求取图 6 阴影的大小 (长度、宽度和面积), 可用如下公式近似计算。且 θ 角度的变化对有效配置区影响不大, 可忽略。

如果 $R_{jr1} < R_{ahmin} \leq R_{jrmax}$, 如图 6(a), 则

$$\begin{cases} L = R_{jrmax} - R_{ahmin} \\ D = 2R_{jrmax} \cdot \sin\left(\frac{\theta_{0.5}}{2}\right) \approx 2R_{jrmax} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{2} = R_{jrmax} \cdot \theta_{0.5} \\ D_0 = 2R_{ahmin} \cdot \sin\left(\frac{\theta_{0.5}}{2}\right) \approx 2R_{ahmin} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{2} = R_{ahmin} \cdot \theta_{0.5} \\ S = L \times \frac{D + D_0}{2} \end{cases} \quad (3-12)$$

如果 $R_{ahmin} \leq R_{jr1}$, 如图 6(b), 则

$$\begin{cases} L = R_{j_{rmax}} - R_{ahmin} \\ L_0 = R_{j_{rmax}} - R_{jr1} \\ D = 2R_{j_{rmax}} \cdot \sin\left(\frac{\theta_{0.5}}{2}\right) \approx 2R_{j_{rmax}} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{2} = R_{j_{rmax}} \cdot \theta_{0.5} \\ D_0 = 2R_{jr1} \cdot \sin\left(\frac{\theta_{0.5}}{2}\right) \approx 2R_{jr1} \cdot \frac{\theta_{0.5}}{2} = R_{jr1} \cdot \theta_{0.5} \\ S = L_0 \times \frac{D+D_0}{2} + (L-L_0) \times D_0 \end{cases} \quad (3-13)$$

3 实例分析

假设雷达、电子战飞机干扰设备、攻击机 RCS 等技术参数与上相同，并入(3-6)式得：

$$C = \frac{4 \times 10^6}{4.4 \times 10^9} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 0.5}{10} \cdot 2 \cdot \frac{1}{3} = 1.9 \times 10^{-4}$$

假设攻击机最近投弹距离 $R_{min} = 150km$ ；敌火力杀伤范围（电子战飞机最近抵近距离） $R_{ahmin} = 300km$ 。

把 C 的值和 R_{min} 代入 $R_{j_{rmax}} = \sqrt{C \cdot R_{min}^4}$ 得： $R_{j_{rmax}} = 310km$ ，代入 $R_{jr1} = \sqrt{C \cdot R_{min}^4} \cdot 2k^{1/2}$ 得： $R_{jr1} = 151.8km$ 。

因 $R_{jr1} < R_{ahmin} \leq R_{j_{rmax}}$ ，可把 $R_{j_{rmax}}$ 、 R_{ahmin} 代入式(3-12)得：

$$\begin{cases} L = R_{j_{rmax}} - R_{ahmin} = 310km - 300km = 10km \\ D \approx R_{j_{rmax}} \cdot \theta_{0.5} = 310 \times \frac{\pi}{180} \cdot 2 = 10.8(km) \\ D_0 \approx R_{ahmin} \cdot \theta_{0.5} = 300 \times \frac{\pi}{180} \cdot 2 = 10.5(km) \end{cases}$$

所以电子战飞机配置区的面积为

$$S \approx L \times \frac{D+D_0}{2} = 10 \times \frac{10.8+10.5}{2} = 106.5(km^2)$$

假设攻击机最近投弹距离 $R_{min} = 180km$ ；敌火力杀伤范围（电子战飞机最近抵近距离） $R_{ahmin} = 200km$ 。则： $R_{j_{rmax}} = 446.6km$ ， $R_{jr1} = 218km$ 。

因 $R_{ahmin} \leq R_{jr1}$ ，可把 $R_{j_{rmax}}$ 、 R_{ahmin} 、 R_{jr1} 代入(3-13)得： $L = 246.6km$ ， $L_0 = 228.6km$ ， $D \approx 15.6(km)$ ， $D_0 \approx 7.6(km)$ 。电子战飞机配置区的面积为 $S \approx L_0 \times \frac{D+D_0}{2} + (L-L_0) \times D_0 = 2788(km^2)$ 。

假设攻击机最近投弹距离 $R_{min} = 100km$ ，敌火力杀伤范围（电子战飞机最近抵近距离）为

$R_{ahmin} = 300km$ ，则 $R_{j_{rmax}} = 138km$ 。因 $R_{ahmin} > R_{j_{rmax}}$ ，电子战飞机在火力杀伤范围外配置，不能确保对攻击机飞机的干扰掩护。

4 结束语

本文提出了电子战飞机远距离干扰时有效配置区的确定问题。基于雷达干扰方程，推导出了电子战飞机有效配置区的简单计算模型，并进行了仿真分析。在远距离干扰情况下，电子战飞机有效配置区近似为喇叭型，其有效配置区主要取决于雷达主瓣宽度，受电子战飞机偏离雷达最大增益方向的角度影响很小，可忽略不计。从而为电子战飞机作战运用提供了简单运算模型和决策依据。

参考文献

- [1] 邵国培,曹志耀,何俊等. 电子对抗作战效能分析[M]. 解放军出版社, 1998
- [2] 申绪润,王国玉,汪连栋,等. 电子干扰飞机对抗警戒雷达组网系统的效果评估[J]. 系统仿真学报,2008,20(4):998-1001
- [3] 刘洪彪,骆,李鑫. 远距离支援干扰机对典型雷达抗干扰措施研究[J]. 舰船电子对抗,2010,34(2):6-8,13
- [4] 朱锦辉,付建国,孙健. 干扰机压制雷达网作战效果评估及仿真[J]. 舰船电子工程,2009(12):114-117
- [5] 葛津华,王红军,刘正文,等. 多部干扰机支援干扰压制区建模与效果仿真[J]. 舰船电子对抗,2010,33(4):33-35,39
- [6] 刁华伟,党立坤,张建科. 电子战飞机远距离支援干扰有效区分分析与仿真[J]. 舰船电子工程,2010,30(6):99-101
- [7] 陈中起,于雷,周中良,冯国强. 突击作战中干扰机编队协同决策研究[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(2):307-312
- [8] 刘豫,马彪,刘金伟. 炮射投掷式雷达干扰机投掷区的仿真与确定[J]. 舰船电子工程,2011,31(2):105-108
- [9] 阮旻智,李庆民等. 基于多阶段多指标的编队干扰方案协同决策研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(6):1404-1408
- [10] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京: 国防工业出版社,2008:199-200
- [11] 王国玉,汪连栋,王国良,等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2004:84-86