

## 基于双层规划的通信干扰兵力部署优化<sup>\*</sup>

沈楠<sup>1</sup>, 李新星<sup>2</sup>, 齐锋<sup>1</sup>

(1. 电子工程学院, 合肥 230037 2. 海司第四部, 北京 100841)

**摘要** 投掷式通信干扰机是未来通信对抗装备发展的一种趋势, 针对其压制无线战术通信的兵力部署优化问题, 引入“通信干扰压制概率”和“通信干扰效益”两个指标, 建立了基于双层规划的兵力部署优化模型, 上层规划以整体通信干扰效益最大化为目标, 下层为随机机会约束规划, 以通信干扰压制概率满足一定置信水平为约束, 以干扰机需求量最小化为目标。采用随机模拟、遗传算法和动态规划相结合的混合智能算法求解双层规划模型, 并通过算例分析验证了模型的有效性。

**关键词** 双层规划 投掷式通信干扰机 兵力部署 无线战术通信

中图分类号: TN978

文献标识码: A

## Research on Forces Disposition to Communication Jammers Based on Bilevel Programming

SHEN Nan<sup>1</sup>, LI Xin-xing<sup>2</sup>, QI Feng<sup>1</sup>

(1. Electronic Engineering Institute Hefei 230037, China 2. No. 4 Department of Navy Command, Beijing 100841, China)

**Abstract** ADEXJAM is the development trend of communication countermeasures equipment. In order to solve the problem of forces disposition of communication jammers to suppress radio tactics communication, the evaluation index of the probability and value of communication jam pressing are defined, the bilevel programming model of forces disposition to communication jammers is built. Its upper objective function is the benefit of communication jamming which should be maximized, its lower-level model is a Stochastic Chance-Constraint Programming with the constraint of the probability of jam pressing reached the threshold values, the objective of lower-level model is the demand to jammers which should be minimized. The bilevel programming model is solved by hybrid intelligent algorithm integrated random simulation, Genetic Algorithm and Dynamic Programming. The effectiveness of the model and algorithm is illustrated with the numerical example.

**Key words** bilevel programming ADEXJAM forces disposition radio tactics communication

### 0 引言

投掷式通信干扰机干扰距离近, 能以较小功率获得较高的干信比, 同时具有“数量多”的优点, 能近距离、广空域、宽频段、大数量压制无线战术通信的有效运行, 已成为通信对抗装备发展的一种趋势<sup>[1]</sup>。

投掷式通信干扰机压制无线战术通信的兵力部署问题是高效发挥其作战效能、实现科学辅助决

策的关键。目前, 国内外文献主要在分析投掷式通信干扰机作战效能<sup>[2-3]</sup>的基础上, 研究了对指挥、报知通信(单任务区域内单通信频段的单通信时段)实施投掷式干扰的兵力部署问题<sup>[4-5]</sup>, 建立了蜂窝状阵形的兵力部署模型, 对协同通信(单任务区域内单通信频段的单通信时段)实施投掷式干扰的兵力部署问题研究不多, 对整个战场指挥、报知、协同通信(多任务区域内多通信频段的多通信时段)的

收稿日期: 2015-05-15

修回日期: 2015-06-07

<sup>\*</sup> 基金项目: 电子工程学院博士生创新基金资助项目

作者简介: 沈楠(1982-)男, 江苏宜兴人, 博士, 讲师。研究方向: 电子对抗效能评估及战术计算。

投掷式干扰的兵力部署问题更是鲜有研究。

本文依据对无线战术通信实施投掷式干扰的典型任务,建立了通信干扰兵力部署的双层规划模型,上层规划是以对整个战场指挥、报知、协同通信干扰效益最大化为目标,下层规划是以通信干扰压制概率满足一定置信水平的约束条件下干扰机需求量最小化为目标。在求解兵力部署双层规划模型中,设计了随机模拟、遗传算法和动态规划相结合的混合智能算法,并通过算例分析验证了模型的有效性。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 作战任务描述

投掷式通信干扰机的典型任务<sup>[6-7]</sup>可描述为:在若干作战时段,对单个或多个作战地域上重要频段内的无线战术通信实施多批次、宽频段压制性干扰,使任务区域内的通信接收机受压制干扰而不能正常工作。

通过分析投掷式通信干扰的典型任务,其兵力部署问题可描述为:假设干扰目标分布于多个任务区域  $A_i$  中,每个任务区域的威胁程度分别为  $W_i^a$  ( $1 \leq i \leq N_A$ ),每个任务区域中存在多个通信频段  $F_{ij}$ ,每个通信频段的威胁程度分别为  $W_{ij}^f$  ( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{jF}$ ),每个通信频段在多个通信时段  $T_{ijk}$  上工作,每个通信时段的威胁程度分别为  $W_{ijk}^t$  ( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{jF}, 1 \leq k \leq N_{jT}$ );现有  $N_S$  类投掷式通信干扰机,每类共  $R_n$  部,对  $N_A$  个任务区域进行投掷式干扰,记投掷至第  $i$  ( $1 \leq i \leq N_A$ ) 个任务区域、第  $n$  ( $1 \leq n \leq N_S$ ) 种类型、第  $m$  ( $1 \leq m \leq M_{in}$ ) 批次的干扰机数量为  $R_{inm}$  部,有  $\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{m=1}^{M_{in}} R_{inm} = R_n$ ,记各类通信干扰机的

干扰频段为  $F_n$ ,假定各类干扰机的频段不重叠,干扰时段为  $T_{nm}$ 。

投掷式通信干扰兵力部署优化的目标为:在投掷式通信干扰机总量有限的情况下,实现对整个战场指挥、报知、协同通信干扰效益的最大化;对每个任务区域中单通信频段的多通信时段的压制概率满足一定置信水平,在此基础上最小化干扰机的需求量。

### 1.2 通信干扰压制概率计算模型

通信干扰压制概率是指投掷式通信干扰机和通信电台的战技性能、战场环境、无线电通信特征、干扰地域幅员、投掷时机、投掷数量和排布样式等条件确定的情况下,投掷式通信干扰机完成预期干扰任务的可能程度,是一个概率型指标,取值范围

为  $[0, 1]$ ,压制概率越大,说明其完成预期干扰任务的可能性越高,反之,就越低。其数学模型如下:

$$P_J = P_{inm}^a \cdot P_{inmj}^f \cdot P_{inmjk}^t = \frac{S_{inm}(R_{inm}) \cap A_i}{A_i} \cdot \frac{F_n \cap F_{ij}}{F_{ij}} \cdot \frac{T_{nm} \cap T_{ijk}}{T_{ijk}} \quad (1)$$

式中  $P_{inm}^a$  为投掷至第  $i$  个任务区域中第  $n$  类第  $m$  批干扰机(共  $R_{inm}$  部)的干扰压制区域( $S_{inm}$ )对第  $i$  个任务区域  $A_i$  ( $1 \leq i \leq N_A$ ) 的覆盖程度;

$P_{inmj}^f$  为投掷至第  $i$  个任务区域中第  $n$  类第  $m$  批干扰机(共  $R_{inm}$  部)的干扰频段( $F_n$ )对第  $j$  个通信频段  $F_{ij}$  ( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{jF}$ ) 的覆盖程度;

$P_{inmjk}^t$  为投掷至第  $i$  个任务区域中第  $n$  类第  $m$  批干扰机(共  $R_{inm}$  部)的干扰时段( $T_{nm}$ )对第  $j$  个通信频段的第  $k$  个通信时段  $T_{ijk}$  ( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{jF}, 1 \leq k \leq N_{jT}$ ) 的覆盖程度。

### 1.3 通信干扰效益计算模型

通信干扰效益是指投掷式通信干扰机被分配至各个通信目标后,获得的干扰收益。由通信目标的威胁程度和对目标的干扰压制概率共同决定,通信干扰效益越大,说明投掷式通信干扰机分配给干扰目标后,获得的干扰收益越大,反之,干扰收益越小。

干扰单个目标(单任务区域中单通信频段的多通信时段)时,单批次干扰机的干扰效益计算模型为:

$$E_{inm} = W \cdot P_J = \omega_i^a \cdot P_{inm}^a \cdot \omega_{ij}^f \cdot P_{inmj}^f \cdot \omega_{ijk}^t \cdot P_{inmjk}^t \quad (2)$$

式中  $E_{inm}$  为投掷至第  $i$  个任务区域中第  $n$  类第  $m$  批干扰机(共  $R_{inm}$  部)的通信干扰效益。

干扰多个目标(多任务区域中多通信频段的多通信时段)时,多批次干扰机的干扰效益计算模型为:

$$E = \sum_{i=1}^{N_A} \omega_i^a \cdot \sum_{n=1}^{N_S} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_{jF}} \omega_{ij}^f \cdot \sum_{k=1}^{N_{jT}} \omega_{ijk}^t \cdot P_{inmj}^f \cdot P_{inmjk}^t \cdot P_{inm}^a = \sum_{i=1}^{N_A} \omega_i^a \cdot \sum_{n=1}^{N_S} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_{jF}} \omega_{ij}^f \cdot \frac{S_{inm}(R_{inm}) \cap A_i}{A_i} \cdot \frac{F_n \cap F_{ij}}{F_{ij}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{jT}} \omega_{ijk}^t \cdot \frac{T_{nm} \cap T_{ijk}}{T_{ijk}} \quad (3)$$

式中  $E$  为投掷至多个任务区域中多种类型多批次干扰机的通信干扰效益。

1.4 基于双层规划的投掷式通信干扰兵力部署模型  
依据兵力部署问题描述,构建贴近作战的双层规划模型思路如下:

上层规划为干扰机总量有限时任务分配模型,决策变量为分配至各个目标的干扰机数量,规划目标为干扰机对整个战场指挥、报知、协同通信干扰

效益的最大化,约束条件为:分配至各个目标的干扰机数量之和小于干扰机总数;完成对各个目标的干扰任务。

下层规划为对单目标实施干扰时干扰机排布模型,由于通信接收机在任务区域内的位置具有不确定性,故采用随机规划构建下层模型,决策变量为各干扰机排布位置,规划目标为干扰机需求量的最小化,约束条件为对单个目标的压制概率满足一定的置信水平。

该兵力部署模型为下层多人无关联双层规划,上层规划将分配至各个目标的干扰机数量传递给下层规划,下层规划将完成各目标干扰任务时干扰机的最小需求量和排布传递给上层,投掷式通信干扰兵力部署模型如下:

$$\max E(R_{inn}) = \sum_{i=1}^{N_A} \omega_i^a \cdot \sum_{n=1}^{N_S} \sum_{m=1}^{M_{in}} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \omega_{ij}^f \cdot \sum_{k=1}^{N_{jT}} \omega_{jk}^t \cdot P_{innj}^f \cdot P_{innjk}^t \cdot P_{inn}^a(\eta_{inn}) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{m=1}^{M_{in}} R_{inn} = R_n & R_{inn} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\min f(\eta_{inn}) = \frac{n_{inn}^u}{R_{inn}} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Pr\{J_{inn}(\eta_{inn})/S_{inn} \geq K_{a_{inn}}\} \geq \alpha_{inn} \\ x_{r_{ijk}} \sim U(0, \text{length}) \\ y_{r_{ijk}} \sim U(0, \text{width}) \end{cases} \quad (7)$$

若下层规划约束条件式(7)的可行集为空集,则干扰压制该目标任务无法完成,此时干扰机的优化排布不存在,即: $\eta_{inn} = [-\frac{1}{-1} \quad \dots \quad -\frac{1}{-1}]$ ,同时定义惩罚函数如下:

$$f_{inn}^{cf}(\eta_{inn}) = 1 \quad (8)$$

式中: $R_{inn}$ 为分配给第*i*( $1 \leq i \leq N_A$ )个任务区域、第*n*( $1 \leq n \leq N_S$ )种类型、第*m*批次的干扰机的数量,上层规划的决策变量;

$\eta_{inn}$ 为第*i*( $1 \leq i \leq N_A$ )个任务区域、第*n*( $1 \leq n \leq N_S$ )种类型、第*m*批次的干扰机的排布;

$W_i^a$ 为第*i*个任务区域*A<sub>i</sub>*( $1 \leq i \leq N_A$ )的威胁程度;

$W_{ij}^f$ 为第*i*个任务区域中第*j*个通信频段*F<sub>j</sub>*( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{iF}$ )的威胁程度;

$W_{ijk}^t$ 为第*i*个任务区域中第*j*个通信频段的第*k*个通信时段*T<sub>ijk</sub>*( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{iF}, 1 \leq k \leq N_{jT}$ )的威胁程度;

$\eta_{inn}^u$ 为分配至第*i*个任务区域第*n*类第*m*批

(共*R<sub>inn</sub>*部,排布方案为 $\eta_{inn}$ )中干扰机的实际使用量;

$J_{inn}(\eta_{inn})/S_{inn}$ 为第*n*类第*m*批(共*R<sub>inn</sub>*部,排布方案为 $\eta_{inn}$ )干扰机被分配给第*i*个任务区域后,该区域中通信接收机输入端的干信比,数学模型如下:

$$J_{inn}/S_{inn} = \sum_{jam=1}^{R_{inn}} \frac{P_{jam}}{P_s} = \sum_{jam=1}^{R_{inn}} \frac{C \cdot ((x_{t_{ijk}} - x_{r_{ijk}})^2 + (y_{t_{ijk}} - y_{r_{ijk}})^2)^2}{((x_{jam_{ijk}} - x_{r_{ijk}})^2 + (y_{jam_{ijk}} - y_{r_{ijk}})^2)^2} \quad (9)$$

$$C = \frac{P_j \cdot G_j \cdot \gamma_j \cdot B_{rj}}{P_t \cdot G_t} \cdot \frac{1 + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \cdot (\frac{2 \cdot \pi \cdot H_j}{\lambda})^2}{1 + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \cdot (\frac{2 \cdot \pi \cdot H_t}{\lambda})^2} \quad \text{为常数}$$

数,其中*P<sub>j</sub>*为干扰机发射功率,*G<sub>j</sub>*为干扰天线主瓣增益, $\gamma_j$ 为极化损失,*B<sub>rj</sub>*为干扰信号进入接收机的比例, $\epsilon_r$ 为相对介电常数,*H<sub>j</sub>*为干扰天线高度,*P<sub>t</sub>*为发射机发射功率,*G<sub>t</sub>*为发射天线主瓣增益,*H<sub>t</sub>*为发射天线高度;

( $x_{r_{ijk}}, y_{r_{ijk}})$ ( $x_{t_{ijk}}, y_{t_{ijk}}$ )为第*i*个任务区域中第*j*个通信频段的第*k*个通信时段*T<sub>ijk</sub>*( $1 \leq i \leq N_A, 1 \leq j \leq N_{iF}, 1 \leq k \leq N_{jT}$ )中通信发射机和通信接收机的位置。

## 2 兵力部署模型的求解算法

投掷式通信干扰兵力部署的双层规划模型是一个NP-hard问题,求解算法<sup>[8-10]</sup>主要有下降算法、罚函数算法、禁忌搜索算法、遗传算法、信赖域算法和极大熵算法。通过分析该双层规划模型的特点,本文提出了随机模拟、遗传算法和动态规划相结合的混合智能算法求解模型,其算法流程如图1所示:

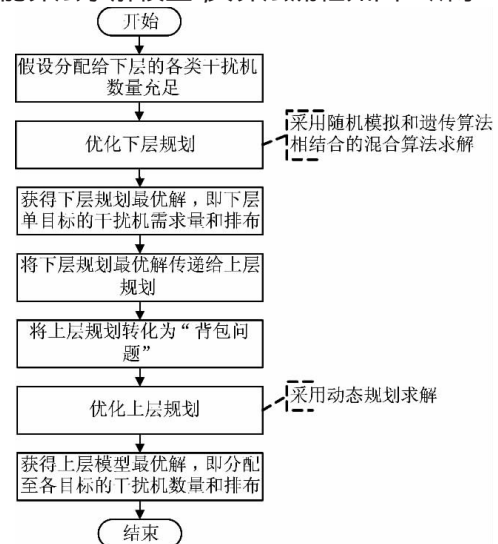


图1 兵力部署双层规划的求解算法流程图



2.1 下层模型的求解算法

采用基于随机模拟、遗传算法的混合智能算法<sup>[11]</sup>求解式(6)、式(7)描述的随机机会约束规划,用惩罚函数方法处理约束,即目标函数和惩罚式(8)的约束项一起形成适应度函数,求解步骤如下:

- 步骤 1 输入原始数据;
- 步骤 2 输入遗传算法要求的染色体(候选干扰单目标兵力部署方案)个数,以及交叉和变异概率;
- 步骤 3 采用随机方法产生一组干扰单目标的初始兵力部署方案,作为遗传算法的初始种群。对于种群中的每一个染色体采用随机模拟方法检验其是否满足机会约束,即根据部署方案计算通信接收机是否被干扰压制;
- 步骤 4 计算所有染色体对应的目标函数值,即干扰单目标的所有兵力部署方案的干扰机需求量;
- 步骤 5 以步骤 4 中求得的目标函数值为基础,对违反约束的染色体采用惩罚值计算各染色体的适应度;对满足约束条件的染色体,以步骤 4 中求得的目标函数值作为适应度;
- 步骤 6 采用轮盘赌方法对种群中的染色体进行选择操作;
- 步骤 7 对种群中的染色体进行交叉和变异操作,得到新一代的染色体,之后利用随机模拟方法检验是否满足机会约束;

- 步骤 8 重复步骤 4~步骤 7,达到给定的最大允许迭代次数为止;
- 步骤 9 以求解过程中发现最好的染色体作为干扰单目标的兵力部署最优方案。

2.2 上层模型的求解算法

通过分析上层规划的特点,可将其转化为“背包问题”,描述如下:对 $\sum_{i=1}^{N_d} \sum_{j=1}^{N_{JT}} N_{ijt}$ 个目标进行投掷式

通信干扰,已知第  $n$  种类型的干扰机总量为  $R_n$  部,对第  $i$  个区域第  $j$  个频段第  $k$  个时段的第  $m$  批次投掷需  $n_{imm}^u$  部干扰机,干扰效益为  $W_i^s \cdot W_{ijk}^t \cdot \alpha_{imm} \cdot \frac{T_{mm} \cap T_{ijk}}{T_{ijk}}$ ,问如何分配  $R_n$  部干扰机至多个区域的多时段,整体干扰效益最大?

该“背包问题”可用动态规划方法求解,最终获得整体通信干扰效益最大的干扰兵力部署方案。

3 算例分析

3.1 战术背景设定

投掷式通信干扰机对矩形区域  $A_1$ 、 $A_2$  内的指挥通信(通信发射机在任务区域外)和  $A_3$  的协同通信(通信发射机在任务区域内)实施压制干扰,战术背景设置如表 1 所示:

表 1 战术背景参数设置表

目标区域	区域威胁度	通信频段	频段威胁度	通信时段	时段威胁度	发射机位置	压制水平
$A_1$	0.35	48.300 MHz~48.304 MHz	1	14 30~14 45	0.65	(8 km, 17 km)	1
				14 55~15 23	0.35		
				14 10~14 27	0.7		
$A_2$	0.45	49.500 MHz~49.504 MHz	1	14 50~14 58	0.3	(8 km, 17 km)	1
				14 25~14 43	0.7		
$A_3$	0.2	48.835 MHz~48.839 MHz	1	14 53~15 18	0.3	(15 km, 2 km)	0.85

$A_1$  四个顶点的坐标为  $C_1(0 \text{ km}, 8 \text{ km})$ ,  $C_2(0 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ,  $C_3(10 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ,  $C_4(10 \text{ km}, 8 \text{ km})$ ,  $A_2$  四个顶点的坐标为  $C_5(11 \text{ km}, 13 \text{ km})$ ,  $C_6(11 \text{ km}, 7 \text{ km})$ ,  $C_7(17 \text{ km}, 7 \text{ km})$ ,  $C_8(17 \text{ km}, 13 \text{ km})$ ,  $A_3$  四个顶点的坐标为  $C_9(14 \text{ km}, 4 \text{ km})$ ,  $C_{10}(14 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ,  $C_{11}(17 \text{ km}, 0 \text{ km})$ ,  $C_{12}(17 \text{ km}, 4 \text{ km})$ ,通信接收机的位置 $(x_r, y_r)$ 在各区域中随机变化。

超短波通信电台的发射功率为 10 W,全向天线,天线高度 4 m,采用语音调频工作样式,接收机带宽为 10 kHz,通信干扰压制系数为 2。

投掷式通信干扰机的干扰功率为 8 W,持续干扰时间为 20 min,干扰频带为 48 MHz~50 MHz<sup>[7]</sup>,现有此类投掷式通信干扰机 60 部。

3.2 计算结果分析

根据下层规划的求解算法,区域  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  中通信干扰机排布如图 2~图 4 所示:

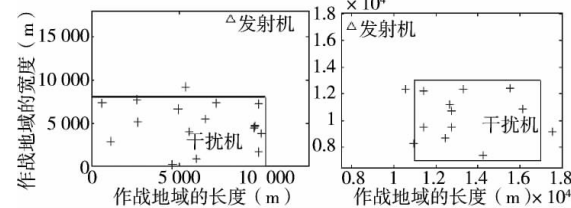


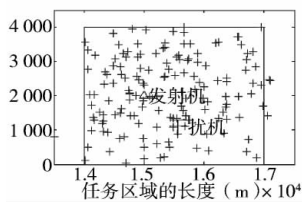
图 2 区域  $A_1$  中干扰机排布图

根据上、下层规划的求解算法,可算得投掷式通信干扰兵力部署如下页表 2 所示。

- 通过分析仿真结果,得出以下结论:
- 从下页表 2、图 2 和图 3 可以看出,基于随机

表 2 投掷式通信干扰兵力部署表

区域及威胁度	时段及威胁度	批次	各批次干扰时段	干扰兵力部署		单批干扰效益	整体干扰效益
				数量	排布		
$A_1(0.45)$	14:30~14:45(0.65)	1	14:30~14:50	16	见图 2	0.292 5	0.755
	14:55~15:23(0.35)	2	14:55~15:15 ;	16	见图 2	0.112 5	
			15:15~15:35	0	—	0	
$A_2(0.35)$	14:10~14:27(0.7)	1	14:10~14:30	13	见图 3	0.245	0.105
	14:50~14:58(0.3)	1	14:50~15:10	13	见图 3	0.105	
$A_3(0.2)$	14:25~14:43(0.7)	1	14:25~14:45	0	—	0	0
	14:53~15:18(0.3)	2	14:53~15:13 ;	0	—	0	
			15:13~15:33	0	—	0	

图 4 区域  $A_3$  中干扰机排布图

模拟、遗传算法的混合智能算法能有效地求解对单个目标实施投掷式干扰时兵力部署的随机机会约束规划模型,由于该随机机会约束规划的目标为最小化干扰机需求量、约束条件为在侦察到通信接收机位置之前,满足对通信接收机干扰压制概率不小于一定置信水平,因此,混合智能算法的解算结果为满足约束条件时,干扰机需求量最小的部署方案。

从图 2、图 3 可以看出,当对指挥通信实施投掷式干扰时,在任务区域内,干扰机的投掷密度随着其与发射机距离的增大而减小。这是因为与发射机距离较近时,接收机接收通信信号的功率较大,在满足干扰压制概率置信水平的条件下,干扰机需求量较大,因此投掷密度大;反之,投掷密度小。

从图 2~图 4 可以看出,在实现相同干扰压制概率的情况下,对协同通信实施投掷式干扰的干扰机密度较指挥通信大得多。这是因为协同通信的发射机在任务区域内部,与通信接收机的距离较指挥通信近,同时在发射机附近区域,接收机接收通信信号的功率很大,为实现相同的干扰压制概率,干扰机需求量较指挥通信大,因此投掷密度大。

从表 2 可以看出,在干扰资源有限的条件下,为实现整体干扰效益的最大化,优先干扰指挥通信,协同通信次之。这是因为指挥通信的威胁度高,在满足压制条件时干扰机需求量少,所以优先干扰指挥通信能高效发挥干扰机的整体干扰效益。

## 4 结论

本文在定义“通信干扰压制概率”和“通信干扰

效益”的基础上,引入双层规划和随机机会约束规划,建立了投掷式通信干扰机压制无线战术通信的兵力部署模型,设计了基于随机模拟、遗传算法和动态规划的求解方法,算例分析表明,所建立的模型和求解算法可以完成对单目标的通信干扰任务,同时最大化通信干扰兵力的整体干扰效益,为实现对无线战术通信实施投掷式干扰的辅助决策提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 王红星. 通信侦察与干扰技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006:128-135.
- [2] 沈楠,何俊,齐锋. 投掷式通信干扰机的战斗任务级效能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 80-82.
- [3] 唐克,杜涛,王存威. 无线电通信干扰弹作战效能研究[J]. 兵工自动化, 2009, 7(7): 63-65.
- [4] 李新星,赵伟,胡源. 炮射投掷式通信干扰机的空间排布及风飘修正计算[J]. 通信对抗, 2008, 28(2): 44-48.
- [5] 沈楠,何俊,齐锋. 投掷式干扰机压制地域通信网的作战运用研究[J]. 飞航导弹, 2010, 40(10): 45-49.
- [6] 葛海龙,宋颖风. 分布式通信干扰设备的应用及设计[J]. 无线电工程, 2004, 34(4): 29-31.
- [7] 曾庆红. 分布式通信对抗发展设想[J]. 通信对抗, 2008, 2(2): 13-15.
- [8] 李和成,王宇平. 几类非线性双层规划问题的混合遗传算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1168-1172.
- [9] 刘毅,李为民,邢清华. 基于双层规划的攻击无人机协同目标分配优化[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 579-583.
- [10] 周爱民,谭春桥. 双层规划模型及其算法研究综述[J]. 零陵学院学报, 2005, 26(2): 133-137.
- [11] 沈楠,何俊,齐锋. 基于随机规划的投掷式通信干扰兵力部署建模研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2011, 25(2): 53-59.