

基于零和竞争理论的雷达网干扰功率分配方法

李仙茂^{1,2},董天临¹,黄高明²

(1. 华中科技大学 电子与信息工程学院,湖北 武汉 430074;2. 海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:针对雷达网总体最佳干扰的问题,为解决干扰机干扰功率对雷达网中不同雷达的最佳分配问题,提出采用零和竞争理论(TPZS)对干扰功率在各雷达进行分配。通过对干扰矢量、发射矢量等进行扩展的方法,将矢量变换成矩阵,并采用基于互信息理论的TPZS进行计算,可针对不同距离、不同压制系数等情况计算干扰机出对网中各雷达的干扰功率分配,在干扰总功率一定的条件下,将干扰功率合理分配到网中所有雷达上。通过实例仿真说明在大部分情况下,要达到同等有效干扰,对比基于互信息的TPZS干扰功率分配法和采用常规的比例分配法,前者所需干扰总功率远低于后者,网中雷达差异性越大,就越能体现出TPZS方法的优越性。

关键词:雷达网;有源干扰;功率分配;互信息;零和竞争理论;矢量扩展

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

Distribution Method of Jamming Power to Radar Net Based on Two-person Zero-sum Game

LI Xianmao^{1,2}, DONG Tianlin², HUANG Gaoming¹

(1. College of Electronics and Info. Eng., Huazhong Univ. of Sci. and Technol., Wuhan 430074, China;

2. College of Electronics Eng., Naval Eng. Univ., Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to jam overall radar net best, address the problem that the radar jammer power is allocated optimally to all radars in radar net, a two-person zero-sum game theory (TPZS) was proposed to distribute jamming power to radars. By the expansion of jamming vector, emission vector and other vectors, the vectors were transformed to matrixes. Jammer jams each radar in network by certain powers by calculations with TPZS theory based on mutual information, the power distribution can be calculated in the case of different distances, different suppression coefficient of the radars. Under the condition that the total power of jammer is limited, the jamming power can distributed to the radars in network reasonably. Simulation showed that in most cases the needful jamming power of TPZS is more less than regular proportion method in the condition that the radar net can be jammed effectively. For the jammer, radars in network are different more big, the TPZS method can embodies its superiority more.

Key words: radar net; active jamming; power distribution; mutual information; two-person zero-sum game; vector expand

雷达网是一个多部雷达相互合作、紧密关联的整体。同一区域的目标可被雷达网中的多部雷达同时探测,为阻止雷达网对此区域目标的探测,只干扰雷达网中的部分雷达是不够的,只要其中有一部雷达没有被有效地干扰,则相应区域中的目标仍然能被雷达网探测到。所以,必须做到对雷达网中所有雷达的有效干扰才能掩护此区域中的目标,即对于雷达网干扰的有效性取决于所有雷达受干扰的总体

情况^[1-3]。而干扰机的有源干扰资源和干扰功率有限,为达到对雷达网整体干扰的最佳效果,必须研究干扰功率对网中雷达的分配^[4]。新型的干扰机即有源相控阵(多波束)干扰机的出现使干扰资源的这种灵活分配成为可能^[5]。分配合理可使网内所有雷达都受到合适干扰效果,网所有雷达都不能有效地发现目标,才能取得总体的有效干扰^[6-8]。

现有的干扰功率分配方法主要有以下几种:文

收稿日期:2015-06-07

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA7014061);国家自然科学基金资助项目(61372165)

作者简介:李仙茂(1975—),男,博士生,高级工程师。研究方向:MIMO雷达、雷达有源干扰。E-mail:xianmao916@163.com

网络出版时间:2016-5-13 10:41 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160513.1041.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

献[9]采用 Lanchester 平方律的扩展模型,在干扰功率总量恒定约束条件下,给出协同电子干扰的最优功率分配策略。文献[10]采用作战优势最大化的干扰功率分配。文献[9-10]的方法都是用于多部干扰机干扰多部雷达,各干扰机的功率不可变的情况。典型的方法是根据侦察接收机接收到的雷达信号功率大小,按比例分配干扰功率^[11]。以上方法存在的问题是不能对雷达网的干扰进行功率的最佳分配。

作者拟采用零和竞争理论^[12-14]解算获得干扰机的最佳能量分配方案,可实现一部有源相控阵(多波束)干扰机对一个雷达网的整体有效干扰。并且,该方法具有很高的干扰功率利用效率,在干扰功率有限的条件下,该方法比现有的方法可更有效地干扰整个雷达网。

1 雷达网干扰分析

一般雷达网中能同时探测某个区域的雷达数量为2~4部,假设这几部雷达的工作频率不同,发射功率不同,抗干扰措施也不同。假定干扰机可以同时对付多部雷达采用最佳的干扰样式,只是总的干扰功率有限,这时将干扰功率平均分配给不同的雷达,其效果不是最佳的。对不同雷达达到相同的干扰效果需要同时考虑雷达发射功率、信号调制样式、抗干扰措施、雷达离干扰机的距离以及雷达离目标的距离等。雷达的受干扰程度一般可以通过干信比表示,考虑压制干扰的情况,雷达的抗干扰性能可通过压制系数体现。当雷达接收的干扰功率 P_{vj} 与目标回波功率 P_{rs} 之比超过压制系数 K^j 时干扰有效,其干扰方程表示如下:

$$\frac{P_{vj}}{P_{rs}} = \frac{P^j G^j}{P^i G^i} \cdot \frac{4\pi\gamma_j}{\sigma_{RCS}} \cdot \frac{R_t^4}{R_j^2} \cdot \frac{G^{j'}}{G^i} \geq K^j \quad (1)$$

式中: P^j 为干扰发射功率; G^j 为干扰天线增益; P^i 为雷达的发射功率; G^i 为雷达天线主瓣方向上的增益; $G^{j'}$ 为当雷达天线主瓣对准目标时,其在干扰方向上的增益; R_t 为目标至雷达的距离; R_j 为干扰机至雷达的距离; σ_{RCS} 为目标有效反射面积; γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化系数,通常取 $\gamma_j = 0.5$ 。

假设雷达网中有 n_i 部雷达,对于第 i 部雷达,当干信比达到压制系数 K_i^j 时,干扰有效,但是,当不能满足对所有雷达的干扰都达到相应的 K_i^j 时,可通过控制对第 i 个雷达采用 $P_i^j G_i^j$ 的有效干扰功率,使各雷达分别受到某一程度的干扰,即干信比达到 $\alpha_i K_i^j$,

选取合适的 $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_i}]$ 使雷达网的整体探测能力降到最低。这就要求干扰机对干扰功率进行合理分配。

对于被保护目标 Q ,其被雷达网合成探测的概率 P_Q 为^[15-17]:

$$P_Q = 1 - (1 - P_{d1})(1 - P_{d2}) \cdots (1 - P_{dn_i}) \quad (2)$$

式中, $P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn_i}$ 为雷达网第1部雷达到第 n_i 部雷达的发现概率。

雷达检测目标基于 Neyman-Pearson 准则,其对目标发现概率的大小取决于信噪比。单部雷达对目标的发现概率为:

$$P_{di} = \exp\left(-\frac{4.75}{\bar{n}S_{Ni}}\right), i = 1, 2, \dots, n_i \quad (3)$$

式中, S_{Ni} 为各雷达的信噪比, \bar{n} 为雷达对目标一次扫描的平均脉冲积累数。干扰条件下以信干比 S_{ji} 代替信噪比 S_{Ni} 代入式(3)^[13-14],得:

$$P_{di} = \exp\left(-\frac{4.75}{\bar{n}S_{ji}}\right), i = 1, 2, \dots, n_i \quad (4)$$

在干扰条件下,雷达对目标发现概率降低,图1为单部雷达发现概率与信噪比的关系。

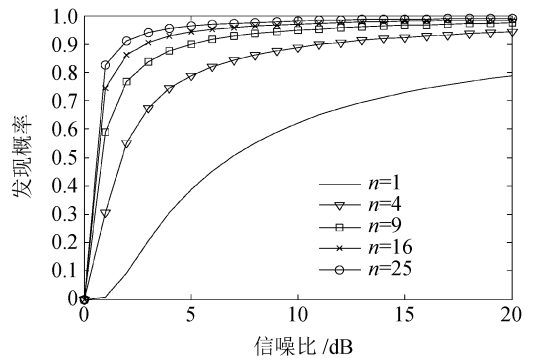


图1 单部雷达发现概率与信噪比的关系

Fig. 1 Relationship between radar detection probability and signal-to-noise ratio

2 基本理论

2.1 互信息理论

互信息是信息论中一个中心概念,描述了某个变量取值对另一个变量取值的确定能力。其值越大,表明2个变量间的确定能力越强。具体概念定义如下:

定义(互信息) 设 X, Y, Z 为3个不相交的属性变量,称:

$$I(X; Y) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^q p(x_i, y_j) \ln \left(\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right)$$

为 X, Y 的互信息。

$$I(\mathbf{X};\mathbf{Y}|\mathbf{Z}) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^s p(x_i, y_j, z_k) \ln \left(\frac{p(x_i, y_j | z_k)}{p(x_i | z_k) p(y_j | z_k)} \right) \quad (5)$$

为给定 \mathbf{Z} 的条件下, \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的互信息(条件互信息)。式中, r, q, s 为 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ 的状态个数, $p(x_i, y_j, z_k)$ 为 $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ 的状态为 (x_i, y_j, z_k) 时的概率。

定理 互信息 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y})$ 和 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}|\mathbf{Z})$ 具有如下性质:

1) 对称性。即 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}) = I(\mathbf{Y};\mathbf{X})$ 和 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}|\mathbf{Z}) = I(\mathbf{Y};\mathbf{X}|\mathbf{Z})$ 。

2) 非负性。即: $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}) \geq 0$ 和 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}|\mathbf{Z}) \geq 0$ 。当且仅当 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 条件独立时有 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}) = 0$ 。同理,在给定条件 \mathbf{Z} ,当且仅当 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 条件独立时有 $I(\mathbf{X};\mathbf{Y}|\mathbf{Z}) = 0$ 。

2.2 比例分配法

雷达对抗干扰(ECM)以雷达对抗侦察(ESM)为基础,对雷达网的侦察可分别获得雷达网中不同雷达信号到达ESM接收机的信号强度。根据强雷达信号分配强干扰功率,弱雷达信号分配小干扰功率的原则,线性按比例地分配干扰机的干扰功率,即为比例分配法。此处只要求测得雷达的信号强度,单部ESM接收机就可完成。后续需要雷达位置信息,可通过先使用多个ESM侦察站对各雷达进行无源定位(即“无源雷达”),以获得雷达网各雷达的位置信息。干扰机和ESM侦察站不要求是一一对应的关系,多站ESM定位的结果可用于支持单部干扰机的工作。由于定位误差相对 R_i 和 R_j 是一个较小的量,因此,定位误差对功率分配算法影响较小。到达ESM接收机的雷达信号功率 $P_{r,s,i}, i = 1, 2, \dots, n_t$,理论计算式为:

$$P_{r,s,i} = \frac{G_r P_u G_{ti} \lambda_i^2}{(4\pi)^2 R_{ti}^2}, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (6)$$

式中, P_u 为雷达网中第 i 部雷达发射功率, G_{ti} 为雷达网第 i 部雷达的天线增益, G_r 为干扰机的接收天线增益, λ_i 为雷达网第 i 部雷达工作波长, R_{ti} 为目标到第 i 部雷达的距离。

按接收机接收的信号强度等比例地发射干扰功率,第 i 个雷达分配的干扰功率为:

$$P_{j,i} = \frac{P_{r,s,i}}{n_t} \cdot P_b, i = 1, 2, \dots, n_t \quad (7)$$

式中, P_b 为干扰机的最大功率(即总功率)。

3 基于零和竞争理论(TPZS)的干扰功率分配

设雷达网接收到的信号为: $\mathbf{X} = \text{diag}([x_1, x_2, \dots, x_{n_t}])$, $x_i = s_i h_i + j_i + n_i, i = 1, 2, \dots, n_t$,则:

$$\mathbf{X} = \mathbf{S}\mathbf{H} + \mathbf{J} + \mathbf{N} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{H} = \text{diag}([h_1, h_2, \dots, h_{n_t}])$ 为路径增益矩阵; $\mathbf{S} = \text{diag}([s_1, s_2, \dots, s_{n_t}])$ 为雷达发射信号矩阵; $\mathbf{J} = \text{diag}([j_1, j_2, \dots, j_{n_t}])$ 为干扰信号矩阵; $\mathbf{N} = \text{diag}([n_1, n_2, \dots, n_{n_t}])$ 为噪声信号矩阵。 \mathbf{J} 独立于 \mathbf{H} 和 \mathbf{N} ,是独立同分布的,服从 $\text{CN}(0, \mathbf{R}_b)$; \mathbf{N} 是独立同分布的,服从 $\text{CN}(0, \mathbf{R}_n)$ 。雷达网和干扰机是一对相互对抗的两组实体。前者控制矩阵 \mathbf{S} ,后者控制矩阵 \mathbf{J} 。这是一个零和竞争(TPZS),一方赢,则另一方输。

3.1 雷达网干扰中的互信息理论应用

采用互信息准则,雷达网需要从接收信号 \mathbf{X} 和路径增益 \mathbf{H} 中抽取互信息^[14]:

$$I(\mathbf{X};\mathbf{H}|\mathbf{S}) = h(\mathbf{X}|\mathbf{S}) - h(\mathbf{J} + \mathbf{N}) \quad (9)$$

式中,干扰与噪声和信号独立。在一个独立的有杂波的环境中, $h(\mathbf{X}|\mathbf{S})$ 为条件下的微分熵,因为 \mathbf{S} 是非随机的,可以写成:

$$\begin{aligned} h(\mathbf{X}|\mathbf{S}) &= - \int f(\mathbf{X}, \mathbf{S}) \ln f(\mathbf{X}|\mathbf{S}) d\mathbf{X} d\mathbf{S} = \\ &= - \int f(\mathbf{X}|\mathbf{S}) \ln f(\mathbf{X}|\mathbf{S}) d\mathbf{X} = \\ &= - \mathbf{E} \{ \ln f(\mathbf{X}|\mathbf{S}) \} \end{aligned} \quad (10)$$

对于给定条件 \mathbf{S} 情况下, \mathbf{X} 概率密度函数(pdf)为:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{X}|\mathbf{S}) &= \frac{1}{\pi^{n_t K} \det^{n_t}(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)} \times \\ &= \exp \{ - \text{tr} [(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{X}\mathbf{X}^H] \} \end{aligned} \quad (11)$$

该条件下的微分熵 $h(\mathbf{X}|\mathbf{S})$ 被改写为:

$$\begin{aligned} h(\mathbf{X}|\mathbf{S}) &= \mathbf{E} \{ n_t K \ln \pi \} + \\ &= \mathbf{E} \{ n_t \ln \det(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n) \} + \\ &= \mathbf{E} \{ \text{tr} [(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{X}\mathbf{X}^H] \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \{ \text{tr} [(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{X}\mathbf{X}^H] \} &= \\ \text{tr} [(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{E}(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)] &= \\ n_t \text{tr} [\mathbf{I}_K] & \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $K = n_t$,因此有:

$$h(\mathbf{X}|\mathbf{S}) = c + n_t \ln [\det(\mathbf{A}_h^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)] \quad (14)$$

环境中存在杂波和干扰, $h(\mathbf{J} + \mathbf{N})$ 为杂波和干扰的微分熵, 可以写成:

$$h(\mathbf{J} + \mathbf{N}) = -E\{\ln[f(\mathbf{J} + \mathbf{N})]\} \quad (15)$$

此外, 定义 $c \triangleq n_t K \ln \pi + n_t K$ 是一个常量, 而且

$$f(\mathbf{J} + \mathbf{N}) = \frac{1}{\pi^{n_t K} \det^{n_t}(\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)} \times \exp\{-\text{tr}(\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)^{-1}(\mathbf{J} + \mathbf{N})(\mathbf{J} + \mathbf{N})^H\} \quad (16)$$

可得到相似的结论:

$$h(\mathbf{J} + \mathbf{N}) = c + n_t \ln[\det(\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)] \quad (17)$$

将式(14)和(17)代入式(9), 可得:

$$I_b \triangleq I(\mathbf{X}; \mathbf{H} | \mathbf{S}) = n_t \ln \frac{\det(\mathbf{A}_b^2 \mathbf{S} \mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)}{\det(\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)} \quad (18)$$

3.2 零和竞争法干扰功率分配

干扰矩阵 \mathbf{J} 为进入雷达接收机的有效干扰信号, 可用从干扰机发射一定功率的干扰信号, 并经过损耗和雷达接收天线增益后的信号强度来表示, 为方便后续计算, 通过对角矩阵方式, 将矢量扩展为矩阵:

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} \mathbf{T} \quad (19)$$

式中:

$$\mathbf{B} = \text{diag}([\sqrt{P_1^j}, \sqrt{P_2^j}, \dots, \sqrt{P_{n_t}^j}]);$$

$$\mathbf{T} = \text{diag}([\frac{1}{4\pi R_1^j} \sqrt{\frac{\lambda^2 G_1^j G_1^{t'} \gamma_1^j}{K_1^j}}, \dots, \frac{1}{4\pi R_{n_t}^j} \sqrt{\frac{\lambda^2 G_{n_t}^j G_{n_t}^{t'} \gamma_{n_t}^j}{K_{n_t}^j}}]).$$

雷达网发射信号矩阵:

$$\mathbf{S} = \text{diag}([\frac{G_1^t}{4\pi} \sqrt{P_1^t}, \frac{G_2^t}{4\pi} \sqrt{P_2^t}, \dots, \frac{G_{n_t}^t}{4\pi} \sqrt{P_{n_t}^t}]) \quad (20)$$

目标对雷达照射的反射回波和目标信号路径传输损耗, 形成对角阵:

$$\mathbf{H} = \frac{\lambda \mathbf{G}_t}{\mathbf{R}_t \mathbf{R}_t} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{RCS}}}{(4\pi)^3}} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{R}_t = \text{diag}([R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{t_{n_t}}])$ 为目标到雷达的距离; $\mathbf{G}_t = \text{diag}([G_{t1}, G_{t2}, \dots, G_{t_{n_t}}])$ 为雷达天线增益; $\lambda = \text{diag}([\lambda_{t1}, \lambda_{t2}, \dots, \lambda_{t_{n_t}}])$ 为雷达工作波长; $\sigma_{\text{RCS}} = \text{diag}([\sigma_{t1}, \sigma_{t2}, \dots, \sigma_{t_{n_t}}])$ 为同一目标相对雷达的反射面积。

采用互信息(MI)理论, 设 I_b 为雷达网获取目标信息的总量, 雷达网通过接收信号 \mathbf{X} 和通道增益矩阵 \mathbf{H} 抽取 MI, 其中, \mathbf{H} 为对角矩阵, 其对应的特征值

矩阵为 $\mathbf{A}_b = \text{diag}([\sigma_1^b, \sigma_2^b, \dots, \sigma_{n_t}^b])$ 。雷达网控制 \mathbf{S} 使 I_b 达到最大, 在此应用环境中 \mathbf{S} 是固定的值, 干扰机则控制 \mathbf{J} 使 I_b 达到最小, 得到所需的干扰功率分配矩阵 \mathbf{B} 。

根据式(18)得:

$$I_b = n_t \ln \frac{\det(\mathbf{A}_b^2 \mathbf{S} \mathbf{S}^H + \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)}{\det(\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_n)} \quad (22)$$

显然, I_b 是由雷达网和干扰机的策略对 $(\mathbf{S}, \mathbf{R}_b)$ 决定的。一方的最佳策略与另一方的策略有关。在此应用环境中, 雷达网的策略当成是固定的。

雷达信号 \mathbf{S} 的子空间为 n_t , 其特征值矩阵 $\mathbf{\Gamma}_s = \mathbf{A}_s$, 其中, $\mathbf{A}_s = \text{diag}([\sigma_1^s, \sigma_2^s, \dots, \sigma_{n_t}^s])$ 。令噪声空间 \mathbf{N} 的特征值矩阵为 $\mathbf{A}_n = \text{diag}([\sigma_1^n, \sigma_2^n, \dots, \sigma_{n_t}^n])$, 干扰信号 \mathbf{B} 的特征值矩阵 $\mathbf{A}_b = \text{diag}([\sigma_1^b, \sigma_2^b, \dots, \sigma_{n_t}^b])$ 。干扰路径损耗 \mathbf{T} 的特征值矩阵为 $\mathbf{A}_t = \text{diag}([\sigma_1^t, \sigma_2^t, \dots, \sigma_{n_t}^t])$, 且 $\mathbf{A}_j = \mathbf{A}_b \mathbf{A}_t$, 基于平衡的 MI 矩阵定义如下^[12]:

$$\bar{I}_b = n_t \ln[\det(\mathbf{A}_b^2 \mathbf{\Gamma}_s \mathbf{P}_1 (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{P}_1^T + \mathbf{I}_K)] \quad (23)$$

式中, \mathbf{P}_1 确定选择的子空间。这样雷达信号和干扰功率分配就设计成为一个 TPZS 竞争对, 干扰机通过策略使 \bar{I}_b 最小化。在这种情况下, 干扰机分配给各雷达干扰功率使得 \bar{I}_b 最小, 在干扰功率限制条件下, 表达式为:

$$\min_{\mathbf{A}_b} \bar{I}_b, \quad \text{s. t. } \text{tr}(\mathbf{A}_b) = \text{tr}(\mathbf{B} \mathbf{B}^H) \leq P_b \quad (24)$$

式中, P_b 为干扰机的最大限制功率(即总功率)。上述方法在计算中, 因为确定发射信号矩阵 \mathbf{S} 和通道增益矩阵 \mathbf{H} , 需要已知干扰机到各雷达的距离、各雷达的发射功率、发射天线增益, 以及目标(自卫干扰时的干扰机装载平台)的反射面积。在此情况下, 假设 $\bar{\mathbf{P}}_1$ 已知, $\bar{\mathbf{A}}_s = \text{diag}([\bar{\sigma}_1^s, \bar{\sigma}_2^s, \dots, \bar{\sigma}_{n_t}^s])$, 式(24)可演变如下:

$$\min_{\bar{\sigma}_i^b} \sum_{i=1}^{n_t} \ln\left(\frac{\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^b)^2}{\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^t + \bar{\sigma}_i^n} + 1\right), \quad \text{s. t. } \sum_{i=1}^{n_t} \bar{\sigma}_i^b \leq P_b \quad (25)$$

式中, $\bar{\sigma}_i^b$ 和 $\bar{\sigma}_i^n$ 对应第 i 个选定的干扰-噪声子空间, 不必要一一对应于 σ_i^b 和 σ_i^n 。式(25)的结果是 n_t 个式(26)函数的总和。

$$f_1(\bar{\sigma}_i^b, \bar{\sigma}_i^n) = \ln\left(\frac{a_i}{\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^t + \bar{\sigma}_i^n} + 1\right), \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (26)$$

为了简化表达式,令 $a_i \triangleq \bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2 > 0$,则有:

$$\frac{\partial f_1(\bar{\sigma}_i^b, \bar{\sigma}_i^n)}{\partial \bar{\sigma}_i^b} = \frac{-a_i \sigma_i^1}{a_i(\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n) + (\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n)^2} < 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 f_1(\bar{\sigma}_i^b, \bar{\sigma}_i^n)}{\partial^2 \bar{\sigma}_i^b} = \frac{(\sigma_i^1)^2 [a_i^2 + 2a_i(\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n)]}{[a_i(\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n) + (\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n)^2]^2} > 0 \quad (28)$$

因为 $a_i, \bar{\sigma}_i^b, \bar{\sigma}_i^n, \sigma_i^1$ 都是大于零的值,所以不等式(27)、(28)成立,式(27)、(28)说明 $f_1(\bar{\sigma}_i^b, \bar{\sigma}_i^n)$ 是一个单调上升严格凸的函数。故式(25)有一个唯一的最佳解,可以通过式(29)得到:

$$L = \sum_{i=1}^{n_1} \ln\left(\frac{a_i}{\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 + \bar{\sigma}_i^n} + 1\right) + \lambda_2' \left(\sum_{i=1}^{n_1} \bar{\sigma}_i^b - P_b\right) \quad (29)$$

求 L 对 $\bar{\sigma}_i^b$ 微分,并令微分表达式等于零,可以得到如下结果:

$$\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 = \pm \sqrt{\frac{a_i \sigma_i^1}{\lambda_2'} + \frac{(a_i)^2}{4}} - \bar{\sigma}_i^n - \frac{a_i}{2} \quad (30)$$

$$\bar{\sigma}_i^b \sigma_i^1 = \pm \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2 \sigma_i^1}{\lambda_2'} + \frac{[\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2]^2}{4}} - \bar{\sigma}_i^n - \frac{\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2}{2} \quad (31)$$

式中, $\bar{\sigma}_i^b$ 为功率的特征值,只能是正值,故可去掉负值的部分,得到其最佳值为:

$$\bar{\sigma}_i^b = \frac{1}{\sigma_i^1} \left(\sqrt{\frac{\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2 \sigma_i^1}{\lambda_2'} + \frac{[\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2]^2}{4}} - \bar{\sigma}_i^n - \frac{\bar{\sigma}_i^s (\sigma_i^h)^2}{2} \right)^+ \quad (32)$$

式中: $\lambda_2' > 0$ 满足 $\sum_{i=1}^{n_1} \bar{\sigma}_i^b = P_b$;右上方加号表示括号中为正值时有效,作为 $\bar{\sigma}_i^b$ 的值;为负值时无效,不作为 $\bar{\sigma}_i^b$ 的值。由于子空间由雷达确定,干扰只能通过调整其分配功率来适应,以达到对雷达网的最佳干扰效果。

4 仿真分析

雷达网中有4部雷达可同时探测一个目标所在的区域,目标平台上有1部多波束干扰机,为使整个雷达网都不能发现目标,多波束干扰机需要同时干扰雷达网中的4部雷达,其对抗示意图如图2所示。

设雷达1~4的发射功率分别为50、78、90、100 kW,天线增益分别为32、36、38、42 dB。以自卫干扰为例,一部干扰机对雷达网所有雷达进行压制性干扰,雷达到干扰机的距离分别为62、28、38、16 km,雷

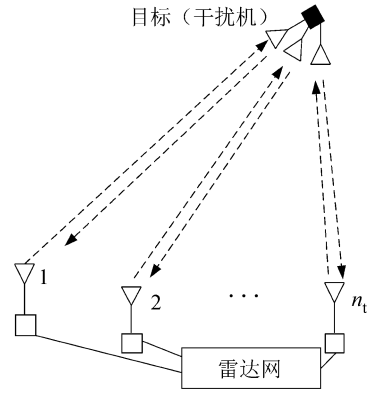


图2 多波束干扰机对雷达网的干扰示意图

Fig.2 Sketch map of multiple beams jammer jamming to radar net

达对干扰机的压制系数分别为4.5、5.2、6.2、4.8。

分别采用比例法和零和竞争理论对干扰机的功率进行分配,在不同干扰总功率情况下,达到最佳干扰时对各雷达分配的干扰功率,如图3、4所示,其中,噪声干扰功率取为0.1倍目标回波功率。仿真中互信息量主要表征的是雷达网获取信息的相对量大小,是用于调整参数的参照量,其绝对值没有太大的意义。

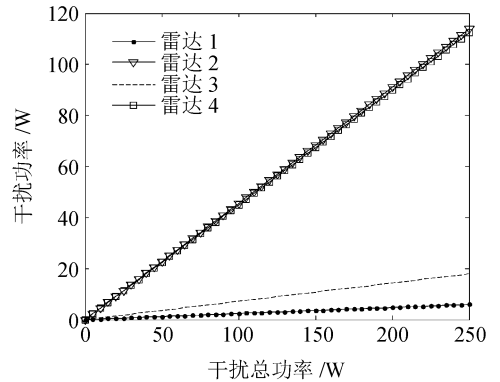


图3 比例法干扰机分配给各雷达的干扰功率

Fig.3 Jamming power distribution to each radar by prorate method

对两种不同方法,雷达网各雷达的发现概率随干扰总功率的变化情况是不一样的,如图5、6所示。雷达网达到有效干扰时所需的功率有很大的不同,雷达网总体发现概率随干扰总功率的变化快慢不同,如图7所示。可见雷达网总的发现概率的下降程度与干扰功率的分配有密切的关系。雷达网内的各雷达的发现概率下降程度越一致,其总的发现概率下降越快;否则,总的发现概率下降就越慢。由图7可知,相比于典型比例法,采用互信息的零和竞争理论方法分配的干扰功率,可使雷达网总的发现概率下降快得多。在达到有效干扰情况下,本文方法

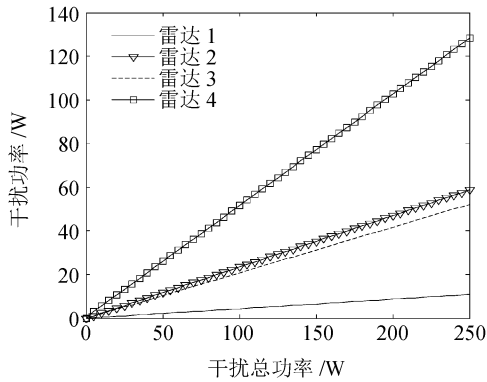


图 4 互信息法干扰机分配给各雷达的干扰功率

Fig. 4 Jamming power distribution to each radar by mutual information(MI) method

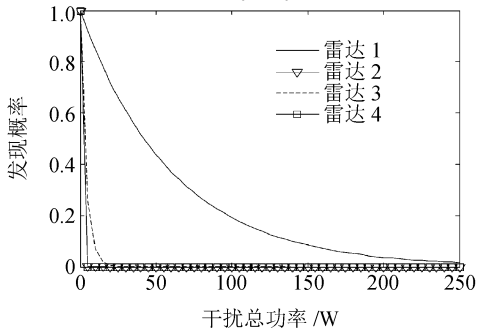


图 5 比例法各雷达发现概率随干扰总功率的变化

Fig. 5 Each radar detection probability varying with all jamming power in prorate method

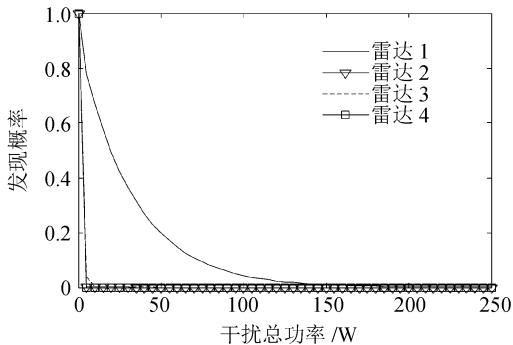


图 6 互信息法各雷达发现概率随干扰总功率的变化

Fig. 6 Each radar detection probability varying with all jamming power in MI method

所需的干扰功率远低于典型比例法。

5 结论

采用的基于互信息的零和竞争理论方法用于雷达网的干扰功率分配比起传统的方法具有很大的优越性和实用性。原因是零和竞争理论采用的互信息可以系统、全面地表征雷达网整体的探测效果,而干扰方基于零和竞争的干扰资源分配目标就是要降低雷达获得信息总量(即整体探测效能),因此,本文方法具有很强的针对性,能准确统筹干扰资源分配,

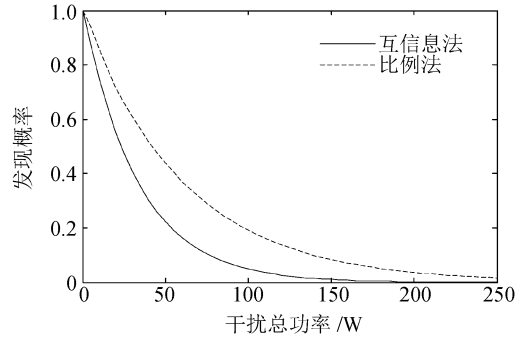


图 7 雷达网发现概率随干扰总功率的变化

Fig. 7 Detection probability of radar net varying with all jamming power

总体干扰效果好。但是,本文方法要求干扰机是多波束干扰机,且不同波束的干扰功率可自由分配。本文方法主要用于压制性干扰的功率分配。针对多部干扰机组合使用干扰雷达网的功率分配问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Ouyang Xiaon. Study on technology of jamming power management to multi-threat signal[D]. Xi'an: Electronics Science and Technology University, 2003. [欧阳小安. 对多威胁信号的干扰功率管理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.]
- [2] Liu Xin, Zhong Weizhi, Jing Qingfeng, et al. Cooperative detection and communication model of multi-channel cognitive radio[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(2): 121 - 126. [刘鑫, 仲伟志, 井庆丰, 等. 多信道认知无线电协作检测与通信模型[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(2): 121 - 126.]
- [3] Xie Yupeng, Tan Xuezi, Ma Lin, et al. A joint spectrum allocation algorithm in cognitive radio system[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(2): 117 - 121. [谢玉鹏, 谭学治, 马琳, 等. 认知无线电系统的一种联合频谱分配算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(2): 117 - 121.]
- [4] Cao Xin, Liu Jia. Research on Interference programming for the marine formation radar network based on immune genetic algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(Suppl): 110 - 113. [曹鑫, 刘佳. 基于免疫遗传算法的海上编队雷达网干扰规划研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊): 110 -

113.]
- [5] Li Chao, Zhou Jinquan. The allocation of jamming resource for phased array jammer to air defence radar nets [J]. *Electronics and Information Countermeasure Technology*, 2009, 24(3): 48 - 51. [李潮, 周金泉. 相控阵干扰机干扰防空雷达网资源分配 [J]. *电子信息对抗技术*, 2009, 24(3): 48 - 51.]
- [6] Xu Zhenhai, Wang Xuesong, Xiao Shunping, et al. Optimum allocation of barrage jamming power in netted radar countermeasure [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(6): 655 - 711. [徐振海, 王雪松, 肖顺平, 等. 雷达组网对抗中遮盖干扰功率优化分配 [J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(6): 655 - 711.]
- [7] Tu Yongjun, Li Jing, Li Chunsheng, et al. Jamming resource allocation algorithm in radar net based on particle swarm optimization [J]. *Modern Defence Technology*, 2009, 37(6): 101 - 104. [涂拥军, 李静, 厉春生, 等. 基于粒子群算法的雷达网干扰资源分配技术研究 [J]. *现代防御技术*, 2009, 37(6): 101 - 104.]
- [8] Park K H, Wang Tian, Alouini M S, et al. On the jamming power allocation for secure amplify-and-forward relaying via cooperative jamming [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(9): 1741 - 1750.
- [9] Wan Kaifang, Gao Xiaoguang, Liu Yu. Optimal power partitioning for cooperative electronic jamming based on Lanchester with variable efficiency factors [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(7): 1544 - 1547.
- [10] Fu Zhaowang, Yu Lei, Kou Yingxin, et al. Electronic jamming power assignment method in cooperative air combat of mixed formation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(6): 1171 - 1175.
- [11] Lee K, Kwon H M, Ding Yanwu, et al. Jamming effects on distributed AF SIMO wireless relay networks under power constraints [C] // *Proceedings of the 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation*. Washington, DC: IEEE, 2011: 334 - 339.
- [12] Amariuca G T, Wei Shuangqing, Kannan R. Minimax and maxmin solutions to Gaussian jamming in block-fading channels under long term power constraints [C] // *Proceedings of the 2007 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems*. Baltimore, MD: IEEE, 2007: 312 - 317.
- [13] Song Xiufeng, Willett P, Zhou Shengli, et al. The power game between a MIMO radar and jammer [C] // *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Kyoto: IEEE, 2012: 5185 - 5188.
- [14] Song Xiufeng, Willett P, Zhou Shengli, et al. The MIMO radar and jammer games [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(2): 687 - 699.
- [15] Wan Anmin, Lu Jing. The characteristics of radar netting and design of anti-jamming capability [J]. *Fire Control & Command Control*, 2001, 26(3): 41 - 44. [王安民, 陆静. 雷达组网的特点及其抗干扰设计 [J]. *火力指挥与控制*, 2001, 26(3): 41 - 44.]
- [16] Li Changjin, Chen Yongguang, Shen Yang, et al. Analysis & simulation for detection performance of netted-radar in EW [J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(1): 14 - 17. [李昌锦, 陈永光, 沈阳, 等. 电子战环境下组网雷达检测性能分析与仿真 [J]. *火力指挥与控制*, 2007, 32(1): 14 - 17.]
- [17] Liu Qing, Wang Xinghua, Wang Xing, et al. A study on methods of active barrage jamming power assignment based on multi-targets [J]. *Fire Control and Command Control*, 2012, 37(5): 164 - 166. [刘清, 王兴华, 王星, 等. 多目标的有源压制干扰功率分配方法 [J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(5): 164 - 166.]

(编辑 赵婧)