(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108712188 A
(43)申请公布日 2018.10.26

(21)申请号 201810512020.5

(22)申请日 2018.05.25

(71)申请人 电子科技大学
地址 611731 四川省成都市高新西区西源大道2006号

(72)发明人 吴明明　高玉兰　肖悦

(74)专利代理机构 成都点睛专利代理事务所（普通合伙）51232
代理人 孙一峰

(51)Int.Cl.
H04B 1/69(2011.01)
H04B 1/7097(2011.01)
H04B 1/713(2011.01)
H04B 1/715(2011.01)

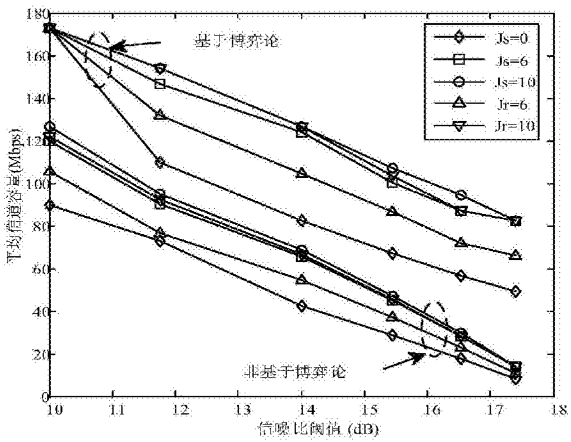
权利要求书2页　说明书5页　附图1页

(54)发明名称

基于博弈论的智能抗干扰方法

(57)摘要

本发明属于通信抗干扰技术领域，具体来说是基于博弈论的智能抗干扰方法。本发明涉及扩跳频技术(DS/FH)、双矩阵博弈技术(Bimatrix Games)和纳什均衡(Nash Equilibrium)等技术。本发明基于博弈论，在带宽可动态调整的部分频带智能干扰场景下，为应用DS/FH技术的通信链路制定动态智能抗干扰策略即扩频增益和跳频增益分配策略组合的概率分布，以解决传统“静态”DS/FH技术在应对智能干扰时抗干扰效果欠佳的不足，达到更为优化的抗干扰性能。



CN 108712188 A

1.基于博弈论的智能抗干扰方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1、确定应用DS/FH技术的通信链路纯策略集I＝{$i_1,i_2,...,i_n$}，$i_k \in \mathbb{N}_+$，$i_1<i_2...<i_n$，第k种纯策略i_k属于正整数集$\mathbb{N}_+$，其动态选择策略组合的概率分布，即混合策略记为$x^T=[x_1, x_2,...x_n]_{1\times n}$，$x_k \geqslant 0$，$x^T \cdot 1=1$；

敌对干扰机的纯策略集J＝{$j_1,j_2,...j_m$}，$j_k \in \mathbb{N}_+$，$j_1<j_2...<j_m$，第k种纯策略j_k属于正整数集$\mathbb{N}_+$，其动态选择策略组合的概率分布记为$y^T=[y_1,y_2,...y_m]_{1\times m}$，$y_k \geqslant 0$，$y^T \cdot 1=1$；

以及相应的干扰功率约束阈值j_{ave}；

S2、计算通信链路的收益矩阵B，以及敌对干扰机的收益矩阵A，建立对抗双方纳什均衡处的混合策略方程组

$$\underset{x \in X^n}{maximize}\, x^T B y^*$$

$$s.t.\begin{cases} 1^T \cdot x - 1 = 0 \\ -x \le 0 \end{cases}$$

$$\underset{y \in Y^n}{maximize}\, x^{*T} A y$$

$$s.t.\begin{cases} 1^T \cdot y - 1 = 0 \\ j^T \cdot y \ge j_{ave} \\ -y \le 0 \end{cases}$$

智能抗干扰动态策略即为同时满足上述方程组的最优解x^*；

S3、根据S2方程组推导在给定的线性约束条件下此双矩阵博弈纳什均衡解存在的充要条件，利用KKT条件可得充要条件如下：

$$\begin{cases} 1^T \cdot x^* - 1 = 0 \\ -x^* \le 0 \\ By^* - \alpha \cdot 1_{n\times 1} \le 0 \\ x^{*T} B y^* - \alpha = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} 1^T \cdot y^* - 1 = 0 \\ -j_{k_2} + j_{ave} \le 0 \\ -y^* \le 0 \\ A^T x^* - v \cdot j_{m\times 1} - \beta \cdot 1_{m\times 1} \le 0 \\ x^{*T} A y^* - v \cdot j_{ave} + \beta = 0 \\ v(j_{k_2} - j_{ave}) = 0 \end{cases}$$

其中，α、ν、β为对应于不同约束条件的KKT乘子，R表示实数集；满足上述充要条件的混合策略x^*即为通信链路应对动态干扰下的智能抗干扰策略；若不存在满足充要条件的可行解则回到S1，调整纯策略集或约束条件；否则，进行下一步；

S4、对于双矩阵博弈过程$\varsigma = (A, B, i, j, j_{ave})$，建立与其对应的二次规划方程

$$\underset{x,y,\alpha,v,\beta}{maximize}\, x^T (A+B) y - \alpha - v j_{ave} - \beta$$

$$s.t.\begin{cases} A^T x + v \cdot j_{m\times1} - \beta \cdot 1_{m\times1} \le 0 \\ By - a \cdot 1_{n\times1} \le 0 \\ -j^T \cdot y + j_{ave} \le 0 \\ 1^T x - 1 = 0 \\ 1^T y - 1 = 0 \\ x, y, v \ge 0 \end{cases}$$

其中，(x^*,y^*)是ς的纳什均衡解，当且仅当存在参数$v^*\geqslant0$，$\alpha^*,\beta^*\in R$使$(x^*,y^*,v^*,\alpha^*,\beta^*)$为二次规划方程的全局最优解时成立；

S5、基于MATLAB的二次规划工具箱，输入S4建立的二次规划方程，输出智能抗干扰策略，发射端据此设计动态策略DS/FH发送方案。

基于博弈论的智能抗干扰方法

技术领域

[0001] 本发明属于通信抗干扰技术领域，具体来说是基于博弈论的智能抗干扰方法。本发明涉及扩跳频技术(DS/FH)、双矩阵博弈技术(Bimatrix Games Theory)和纳什均衡(Nash Equilibrium)等理论框架。

背景技术

[0002] 扩跳频技术(Direct Sequence&Frequency Hopping,DS/FH)以其优良的抗干扰性能成为通信抗干扰领域的主流技术之一。相较于单一直扩、跳频方式，虽然扩跳频在技术实现上更为复杂，但在抗干扰能力、通信容量、传输速率等性能上具备更大优势。DS/FH混合扩频技术综合了DS方式信号抗多径干扰，保密性好和FH方式难以追踪的优点，是一种极具研究价值和应用价值的混合扩频方式。然而，传统的DS/FH技术研究通常假定敌方具有“静态”的干扰策略而制定相应的对抗策略及进行相关性能分析。由于此类抗干扰技术仅考虑己方可采取的抗干扰措施而忽略敌方可能采取的“动态”智能干扰策略，系统实际抗干扰性能较预估性能有所下降，从而影响系统通信效果。在智能干扰场景下，敌对干扰机可根据对方的“静态”抗干扰策略“动态”调整干扰策略，以达到最佳干扰效果。由于通信对抗中固有的对敌方策略的不可知性，己方很难预知敌方具体干扰策略。因此，在智能干扰场景下传统的应用“静态”策略的DS/FH技术很难达到良好的抗干扰性能。

[0003] 博弈论主要研究具有竞争性质的不同个体间的相互作用过程，考虑竞争过程中个体间的预测行为和实际行动，制定相应的优化策略。鉴于通信对抗双方的竞争性，博弈论成为在智能干扰场景下分析动态抗干扰策略问题的有效数学工具。按照博弈双方是否具有约束力的合作协议，博弈论模型可分为合作博弈和非合作博弈，考虑到通信对抗双方的敌对竞争性质，本发明自然地选择非合作博弈模型来分析改进的DS/FH技术动态策略选择问题。非合作博弈中依据博弈双方是否具有完全相对的目标即一方收益的受损是否等于另一方的获得收益，可分为零和博弈和双矩阵博弈(非零和博弈)。考虑到通信对抗双方具有不完全相对的目标，例如一方目标为最小化误码率，另一方目标为最小化通信速率，使用双矩阵博弈来分析智能抗干扰策略，这使得本发明方法更切合实际且扩展其应用范围。博弈过程在纳什均衡处达到稳定状态，纳什均衡是一种策略的概率组合，使得一方的动态策略是对另一方动态策略的最优反应，任何一方都无法通过单方面改变自身策略以达到更优的收益。

发明内容

[0004] 本发明基于博弈论，在带宽可动态调整的部分频带智能干扰场景下，为应用DS/FH技术的通信链路制定动态智能抗干扰策略，即扩频增益和跳频增益分配策略组合的概率分布，以解决传统“静态”DS/FH技术在应对智能干扰时抗干扰效果欠佳的问题，从而达到更优的抗干扰性能。

[0005] 改进的DS/FH智能抗干扰方法通过调整扩频增益和跳频增益分配策略的概率分布

来应对敌方的部分频带智能干扰策略。具体地，假设通信链路的总带宽固定为W，某一种扩频增益和跳频增益分配策略可表示为$k*B_s=W/i$，其中i对应于原信号带宽为B_s，扩频增益为k时的跳频信道数量。部分频带智能干扰策略可表示为$j*B_n=W$，其中j对应于部分频带干扰带宽为B_n时的干扰频段数量。则干扰机的目的是通过动态调整j值来最大化平均干扰成功率，而智能抗干扰策略可通过动态选择i值，即制定不同i值的概率分布来最大化平均信道容量，以达到最优的抗干扰效果。

[0006] 基于双矩阵博弈解决智能抗干扰动态策略选择问题，可以保证所制定的动态策略是对动态干扰策略的最优反应。具体地，博弈双方分别为应用DS/FH技术的通信链路和应用部分频带智能干扰的敌对干扰机。通信链路智能抗干扰策略的纯策略集记为$I=\{i_1,i_2,...,i_n\}$，$i_k\in\mathbb{N}_+$，$i_1<i_2...<i_n$，第k种纯策略i_k属于正整数集$\mathbb{N}_+$；其动态选择策略组合的概率分布，即混合策略可记为$x^T=[x_1,x_2,...x_n]_{1\times n}$，$x_k\geqslant 0$，$x^T\cdot 1=1$；敌对干扰机的部分频带智能干扰策略的纯策略集记为$J=\{j_1,j_2,...j_m\}$，$j_k\in\mathbb{N}_+$，$j_1<j_2...<j_m$，第k种纯策略$j_k$属于正整数集$\mathbb{N}_+$；其动态选择策略组合的概率分布记为$y^T=[y_1,y_2,...y_m]_{1\times m}$，$y_k\geqslant 0$，$y^T\cdot 1=1$。当部分干扰频段与通信链路所使用的跳频信道频段完全不重叠，即通信链路仅受高斯白噪声影响，则信道信噪比为$\frac{S}{N}=\frac{P_s}{N_w\cdot W/i_k}$，其中$P_s$为信号发送功率固定值，$N_w$表示高斯白噪声功率谱密度；当部分干扰频段与通信链路所使用的跳频信道频段有重叠时，记重叠部分带宽为B_r，则信道信噪比为$\frac{S}{N}=\frac{P_s}{N_w\cdot W/i_k+B_r\cdot N_j}$，其中$N_j$表示部分频带干扰信号功率谱密度。在干扰纯策略为$j_{k_2}$与抗干扰纯策略为$i_{k_1}$时，相应平均干扰成功率即干扰收益矩阵第$k_1$行第$k_2$列元素$A_{k_1k_2}$为

[0007] $$A_{k_1k_2}=\sum_{u=1}^{i_{k_1}}\sum_{v=1}^{j_{k_2}}I_{u,v}P_{u,v}$$

[0008] $$I_{u,v}=\begin{cases}1,\ \text{if }(\frac{S}{N})_{u,v}<(\frac{S}{N})_{thr}\\ 0,\ \text{else}\end{cases}$$

[0009] 其中，$P_{u,v}$表示通信链路选择第u个跳频信道干扰机选择第v个干扰频段时的组合概率，假设其服从均匀概率分布；$I_{u,v}$为一整型变量，代表干扰是否成功，如对应信噪比$(\frac{S}{N})_{u,v}$小于设定阈值$(\frac{S}{N})_{thr}$则代表干扰成功，值置1，否则，置为0。相应的通信链路收益矩阵元素$B_{k_1k_2}$为

[0010] $$B_{k_1k_2}=\sum_{u=1}^{i_{k_1}}\sum_{v=1}^{j_{k_2}}C_{u,v}\cdot P_{u,v}.$$

[0011] $$C_{u,v}=\begin{cases}W\big/i_{k_1}\cdot log(1+(\frac{S}{N})_{u,v}),\ \text{if }(\frac{S}{N})_{u,v}\geq(\frac{S}{N})_{thr}\\ 0,\qquad \text{else}\end{cases}$$

[0012] 其中，考虑到对通信质量的要求，通信链路应保证信噪比不低于某一阈值。因此，

考虑当通信链路信噪比低于阈值时,接受端无法正确译码,其信道容量为零。

[0013] 通信链路的目标函数为$B(x,y)\triangleq x^T By$,敌对干扰机的目标函数为$A(x,y)\triangleq x^T Ay$。智能抗干扰策略即可表示为$\underset{x\in X^n}{\text{maximize}}\, B(x,y)$,$\forall y\in Y^m$. Y^m表示m维向量空间。结合实际场景,为敌对干扰机增加干扰功率约束,分别考虑严格约束$j_{k_2}\geq j_{ave}$和松弛约束$j^T\cdot y\geq j_{ave}$,j_{ave}表示功率约束所对应的策略约束阈值。其中严格约束是对干扰纯策略集的限制,要求所使用的纯策略对应的干扰功率值不大于设定干扰功率阈值;松弛约束是对干扰混合策略的约束,要求混合策略对应的平均干扰功率不大于设定平均干扰功率阈值。

[0014] 本发明的技术方案是:

[0015] S1、确定应用DS/FH的通信链路纯策略集$I=\{i_1,i_2,...,i_n\}$,$i_k\in\mathbb{N}_+$,$i_1<i_2...<i_n$和敌对干扰机的纯策略集$J=\{j_1,j_2,...j_m\}$,$j_k\in\mathbb{N}_+$,$j_1<j_2...<j_m$,以及相应的干扰功率约束阈值j_{ave}。

[0016] S2、计算通信链路的收益矩阵B,以及敌对干扰机的收益矩阵A,建立对抗双方纳什均衡处的混合策略方程组

[0017] $$\underset{x\in X^n}{\text{maximize}}\, x^T By^*$$

[0018] $$\text{s.t.}\quad\begin{cases}1^T\cdot x-1=0,\\-x\leq 0,\end{cases}$$

[0019] $$\underset{y\in Y^n}{\text{maximize}}\quad x^{*T}Ay$$

[0020] $$\text{s.t.}\quad\begin{cases}1^T\cdot y-1=0,\\j^T\cdot y\geq j_{ave},\\-y\leq 0,\end{cases}$$

[0021] 智能抗干扰动态策略即为同时满足上述方程组的最优解x^*。

[0022] S3、根据S2方程组推导在给定的线性约束条件下此双矩阵博弈纳什均衡解存在的充要条件,利用KKT条件可得充要条件如下表

[0023] TABLE I

[0024]

通信链路	干扰机
$1^T\cdot x^*-1=0$ (I.1) $-x^*\le 0$ (I.2)	$1^T\cdot y^*-1=0$ (II.1) $-j_{k_2}+j_{ave}\le 0$ (II.2) $-y^*\le 0$ (II.3)
$By^*-\alpha\cdot 1_{m\times 1}\le 0$ (I.3)	$A^Tx^*-v\cdot j_{m\times 1}-\beta\cdot 1_{m\times 1}\le 0$ (II.4)
$x^{*T}By^*-\alpha=0$ (I.4)	$x^{*T}Ay^*-v\cdot j_{ave}+\beta=0$ (II.5) $v(j_{k_2}-j_{ave})=0$ (II.6)
$\alpha\in R$	$v\ge 0,\beta\in R$

[0025] 其中，α、v、β为对应于不同约束条件的Lagrangian乘子，R表示实数集。满足TABLE I的混合策略x^*即为通信链路应对动态干扰下的智能抗干扰策略。若不存在满足充要条件的可行解则回到S1，调整纯策略集或约束条件；否则，进行下一步。

[0026] S4、对于双矩阵博弈过程$\varsigma=(A,B,i,j,j_{ave})$，建立与其对应的二次规划方程

[0027] $$\underset{x,y,\alpha,v,\beta}{\text{maximize}}\ x^T(A+B)y-\alpha-vj_{ave}-\beta$$

[0028] $$\text{s.t.}\begin{cases}A^Tx+v\cdot j_{m\times 1}-\beta\cdot 1_{m\times 1}\le 0\\ By-a\cdot 1_{n\times 1}\le 0\\ -j^T\cdot y+j_{ave}\le 0\\ 1^Tx-1=0\\ 1^Ty-1=0\\ x,y,v\ge 0\end{cases}$$

[0029] 其中，(x^*,y^*)是ς的纳什均衡解，当且仅当存在参数$v^*\geqslant 0$，$\alpha^*,\beta^*\in R$使$(x^*,y^*,v^*,\alpha^*,\beta^*)$为二次规划方程的全局最优解时成立。

[0030] S5、基于MATLAB的二次规划工具箱(Quadprog Toolbox)，输入S4建立的二次规划方程，输出智能抗干扰策略。发射端据此设计动态策略DS/FH发送方案。

[0031] 本发明的技术方案，通过动态调整DS/FH的扩频增益和跳频增益的分配策略来应对实施动态干扰策略的智能部分频带干扰，建立双矩阵博弈与二次规划方程间的对应关系来解得相应智能抗干扰策略。本发明的有益效果是：基于博弈论，分析建立通信对抗双方的双矩阵博弈模型，设计动态策略DS/FH发送方案，解决传统方式在应对动态干扰策略时性能欠佳的问题，使得系统抗干扰性能达到。

附图说明

[0032] 图1是不同约束条件下通信链路平均信道容量与信噪比阈值关系仿真图，其中J_s

表示严格约束干扰功率阈值，J_r表示松弛约束干扰功率阈值；图2是不同干扰类型不同算法下通信链路性能对比，“MDP”表示通信链路使用非智能策略，“BGT”表示通信链路使用智能策略，“Random attack”表示干扰机使用非智能干扰策略，“Intelligent attack”表示干扰机使用智能干扰策略。

具体实施方式

[0033]　下面结合附图和实例，详细描述本发明的技术方案：

[0034]　本例中，设可利用的总带宽W＝200M；通信链路固定发射信号功率值P_s＝0.1W；敌对干扰机固定干扰信号功率谱密度$N_j=10^{-8}$W/HZ；信道高斯白噪声的功率谱密度$N_w=10^{-10}$W/HZ，通信链路纯策略集I＝{2,4,6,8,10,12}；干扰机纯策略集J＝{2,4,6,8,10,12}。

[0035]　具体步骤如下：

[0036]　步骤1：输入给定参数，在信噪比阈值$(\frac{S}{N})_{thr}$下分别计算不同策略组合下通信链路收益矩阵元素$B_{k_1k_2}$，以及敌对干扰机收益矩阵元素$A_{k_1k_2}$，得到双方收益矩阵A和B，建立纳什均衡处的方程组；

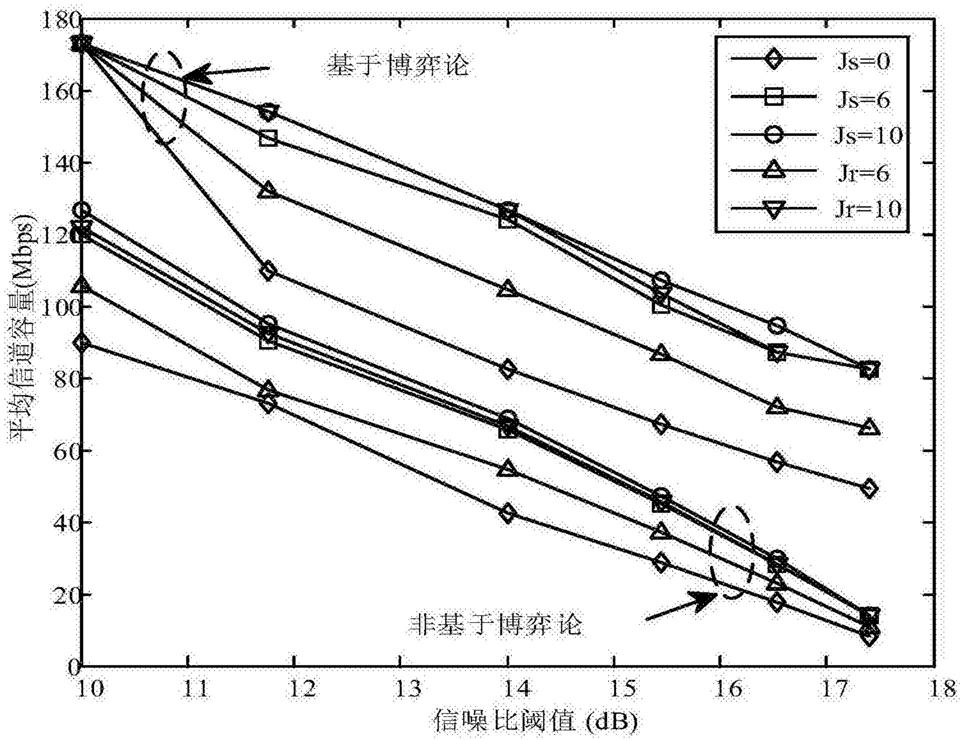
[0037]　步骤2：依据TABLE I推导纳什均衡解存在的充要条件，验证所给参数满足条件则进行下一步；

[0038]　步骤3：根据给定参数的双矩阵博弈过程，建立与其对应的二次规划方程组，并化为标准形式；

[0039]　步骤4：将步骤3得到的标准形式的二次规划问题输入到MATLAB的二次规划工具箱中，求解得到智能抗干扰策略；

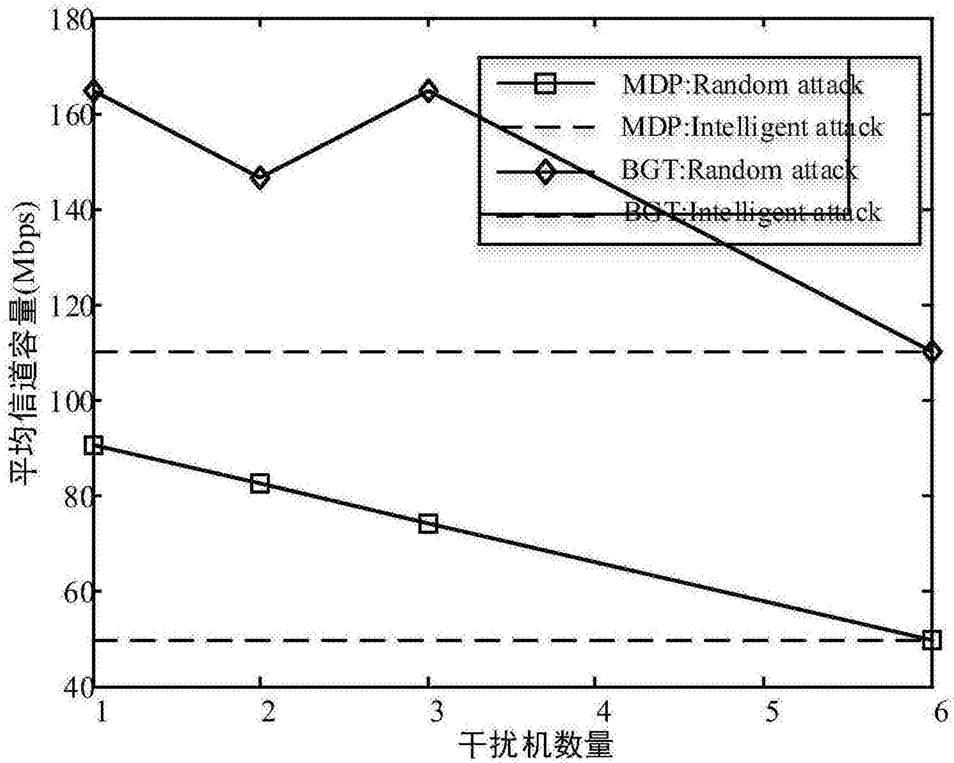
[0040]　步骤5：发射端根据步骤4求解结果设计动态策略DS/FH发送方案。

[0041]　通过仿真图可以看出，在不同干扰功率约束及不同信噪比阈值约束条件下，基于博弈论的智能抗干扰方法无论在应对智能干扰或非智能干扰下的平均信道容量均比传统的非智能抗干扰方法要高，说明本发明提升了DS/FH系统的抗干扰效果。



基于博弈论
Js=0
Js=6
Js=10
Jr=6
Jr=10
平均信道容量(Mbps)
非基于博弈论
信噪比阈值 (dB)

图1



MDP:Random attack
MDP:Intelligent attack
BGT:Random attack
BGT:Intelligent attack
平均信道容量(Mbps)
干扰机数量

图2