



北京交通大学  
BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY



# 基于空间功率合成的 协作干扰技术研究

答辩人：范新

时 间：2018年06月





1

选题背景和意义

2

研究内容

3

协作干扰方案

4

功率分配方案

5

总结与展望



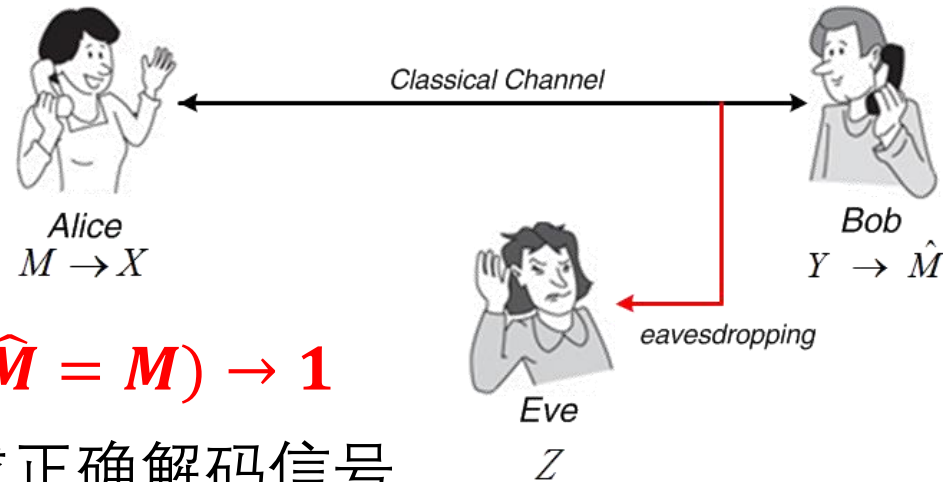
# 研究背景与意义

## • 为什么研究物理层安全？

- 无线网络广播特性，用户隐私极易泄漏；
- 异构网络及IoT应用的普及，存在着大量的“低端”设备；
- 具有超级计算能力的窃听者使得传统基于密码学的安全策略未必有效。

## • 什么是物理层安全？

- **可靠性**：合法接收者能够无差错的接收信号，即  $\Pr(\hat{M} = M) \rightarrow 1$
- **安全性**：窃听者无法接收或正确解码信号（基于无线信道特征），即  $I(Z, M) \rightarrow 0$



物理层安全为传统基于密码学安全策略提供一种有益的补充



# 研究背景与意义

## • 物理层安全研究现状

- 信道策略：基于物理信道特征生成的密钥实现安全传输；
- 编码策略：使用扩频或安全编码技术实现抗干扰与防窃听；
- 信号策略：在不影响合法接收者接收质量的前提下，降低窃听者的接收质量，如波束成形，人工噪声。

## • 存在的问题及挑战

- 大多基于窃听者信道状态信息（CSI）已知的情况展开研究

不准确的信道估计



信道状态信息可能会有误差

如果窃听者被动窃听



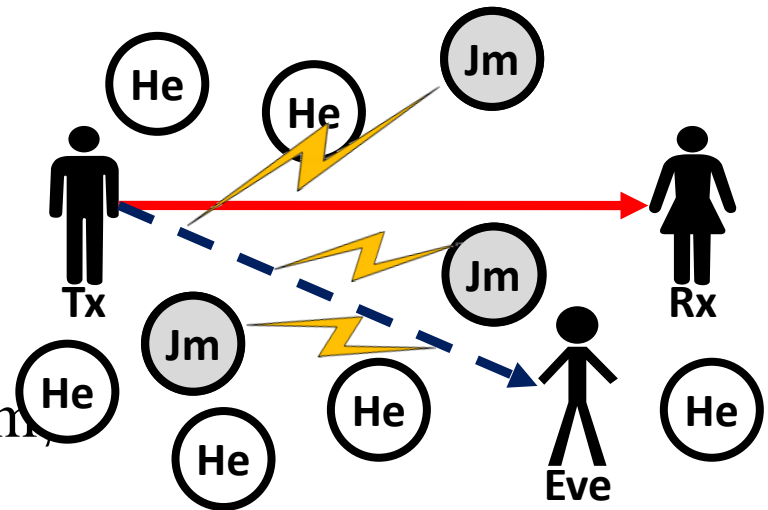
得不到任何窃听者的信道信息

如何设计窃听者CSI未知的物理层安全策略？

# 研究内容

## • 系统模型

- Tx向Rx发送隐私信息
- Eve可能窃听该信息
- 从候选协助者He中选取干扰器Jm, 干扰窃听者



**安全目标：降低窃听者SINR，同时不影响合法接收者的 SINR**

协作干扰策略

电磁信号  
空间功率合成

存在性

唯一性

最优功率分配

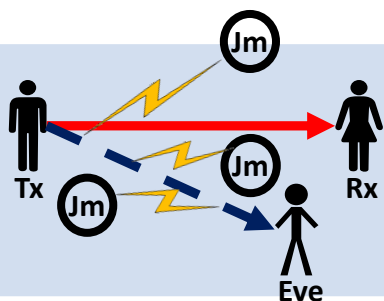
最恶劣位置

优化问题建模

波浪之字搜索求解



# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

零解的唯一性

- **定理3-1:** 考虑一个两个协作 $J_m$ 的系统，合成功率密度与两个干扰信号的幅度的平方有如下的正比例关系：

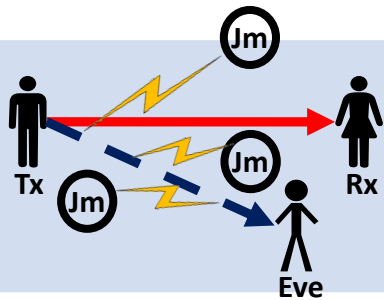
$$P_r \propto A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\phi)$$

其中， $\Delta\phi = \varphi_2 - \varphi_1 + \beta(r_2 - r_1)$ 是相应的相位差。

- **注:** 通过进一步数学推导，也可以得出这样的结论：多个（两个或两个以上）干扰器场景下，合成功率密度同样正比于多个干扰信号的叠加幅度的平方。



# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

零解的唯一性

- **定理3-2:** 对于两个Jm的协作干扰系统，若两Jm的合成功率密度在Rx处为0，则两个Jm的电流和初始相位应满足以下条件：

相位条件:  $\Delta \phi = (2k + 1)\pi \quad k \in \mathbb{Z}$

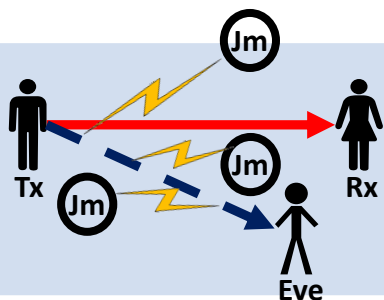
幅度条件:  $\frac{I_1}{r_1} = \frac{I_2}{r_2}$

- 通过以上的分析，可以得出一组基础解系：

$$\alpha^* = (I_1, I_2, \varphi_1, \varphi_2) = (I_1, \frac{r_2}{r_1} I_1, \varphi_1, \Delta \phi + \varphi_1 + \beta(r_1 - r_2))$$



# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

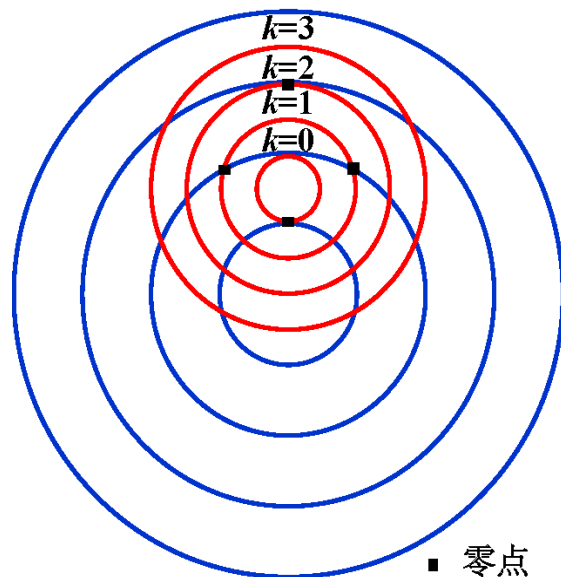
零解的唯一性



- 根据**定理3-2**中零解的两个存在性条件，可以求出合成功率密度为零的目标点与两个 $J_m$ 之间的距离 $r_1$ 和 $r_2$ ，需要分别满足下列关系：

$$\begin{cases} r_1 = \frac{(2k+1)\pi + \varphi_1 - \varphi_2}{\beta(I_2 - I_1)} I_1 \\ r_2 = \frac{(2k+1)\pi + \varphi_1 - \varphi_2}{\beta(I_2 - I_1)} I_2 \end{cases} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

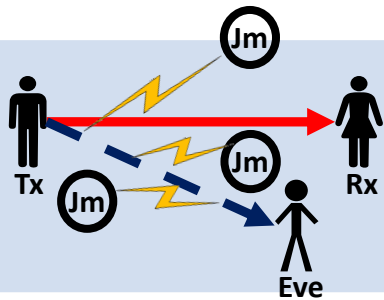
- 假如以两个 $J_m$ 的位置为圆心，画两个分别以半径 $r_1$ 和 $r_2$ 的圆，则两圆的交点位置即为零点的位置。







# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

零解的唯一性



## • Rx与两个Jm共线场景

- Case1: Rx位于两个Jm之间



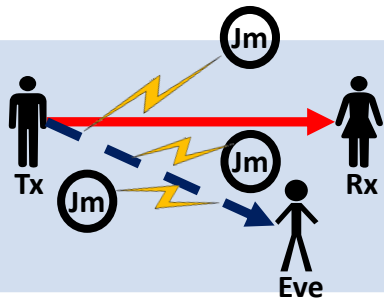
- **定理3-3:** 假设Rx位于两个Jm之间, 对于某一个 $k = k^*$ , 当以两个Jm所在位置为圆心、 $r_1$ 和 $r_2$ 为半径的两圆在Rx处外切时, 那么两圆随着 $k$ 的改变 (增大或减小) 不存在其它的交点, 当且仅当下列条件成立:

$$\lambda > \lambda_{ext} = d_{Jm_1, Jm_2} + d_{Rx, Jm_1} - d_{Rx, Jm_2}$$

其中,  $d_{Rx, Jm_2} > d_{Rx, Jm_1}$ 。



# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

零解的唯一性

## • 两个Jm共线场景

- Case2: Rx位于两个Jm一侧



Rx



Jm<sub>1</sub>



Jm<sub>2</sub>

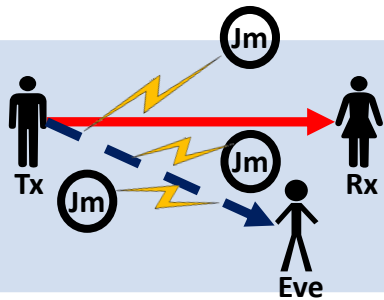
- **定理3-4:** 假设Rx位于两个Jm的一侧, 对于某一个 $k = k^*$ , 当以两个Jm所在位置为圆心、 $r_1$ 和 $r_2$ 为半径的两圆在Rx处内切时, 那么两圆随着 $k$ 的改变 (增大或减小) 不存在其它的交点, 当且仅当下列条件成立:

$$\lambda > \lambda_{int} = d_{Rx, Jm_2} - d_{Rx, Jm_1} - \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} d_{Jm_1, Jm_2}$$

其中,  $d_{Rx, Jm_2} > d_{Rx, Jm_1}$ 。



# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

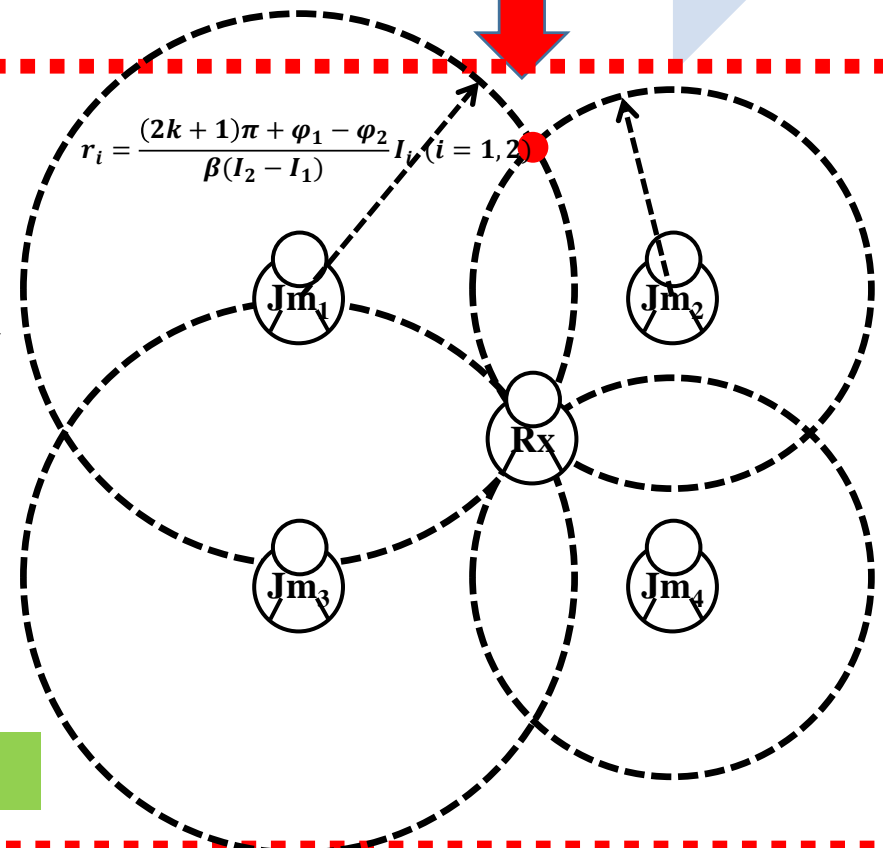
零解的唯一性

## • Rx与两个Jm不共线场景

- **定理3-5:** 在Rx与两个Jm不共线且两个Jm的参数满足**定理3-2**的情况，当半径分别为 $r_1$ 和 $r_2$ 的两圆相交于Rx处时，随着 $k$ 的变化（增大或者减小），两圆不存在其它的交点，当且仅当下面的条件成立：

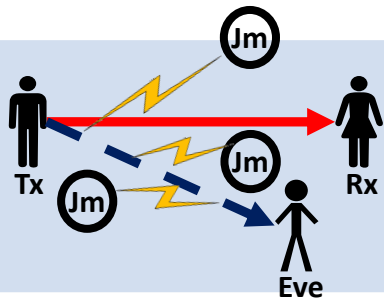
$$\lambda > \max(\lambda_{ext}, \lambda_{int})$$

特殊情形：Rx位于两个Jm的垂直平分线上





# 协作干扰方案



分析参数

零解的存在性

零解的唯一性



## • 其它情况

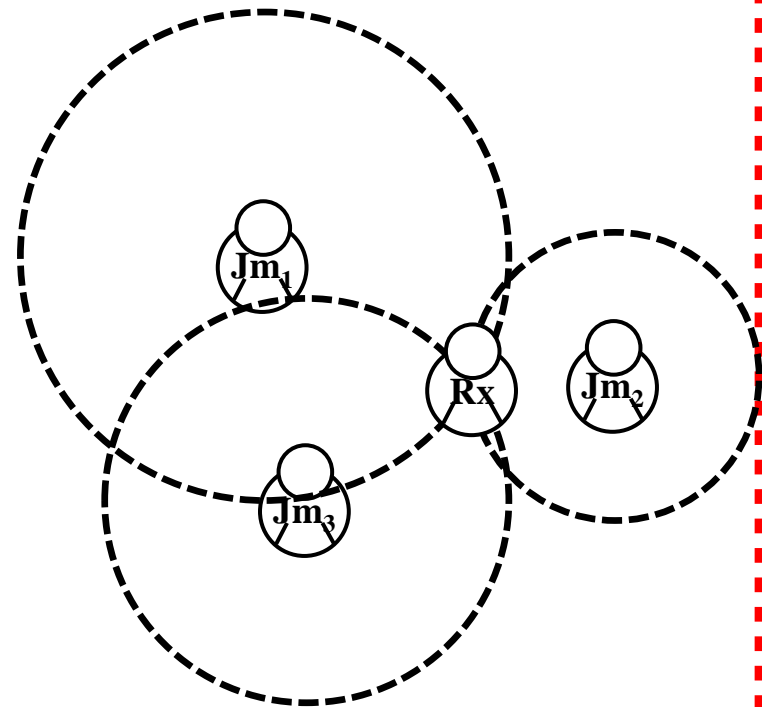
- 如三个Jm的协作干扰系统，同样可以根据旋转矢量法则得到唯一零解。这里，直接给出这种情况下的相应的结论，如下：

$$\begin{cases} A_3^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\varphi_{2,1} \\ \varphi_3 + \beta d_{Rx,Jm_3} - \varphi = (2k+1)\pi \end{cases}$$

其中，

$$\varphi = \arctan \frac{A_1 \sin(\beta d_{Rx,Jm_1} + \varphi_1) + A_2 \sin(\beta d_{Rx,Jm_2} + \varphi_2)}{A_1 \cos(\beta d_{Rx,Jm_1} + \varphi_1) + A_2 \cos(\beta d_{Rx,Jm_2} + \varphi_2)},$$

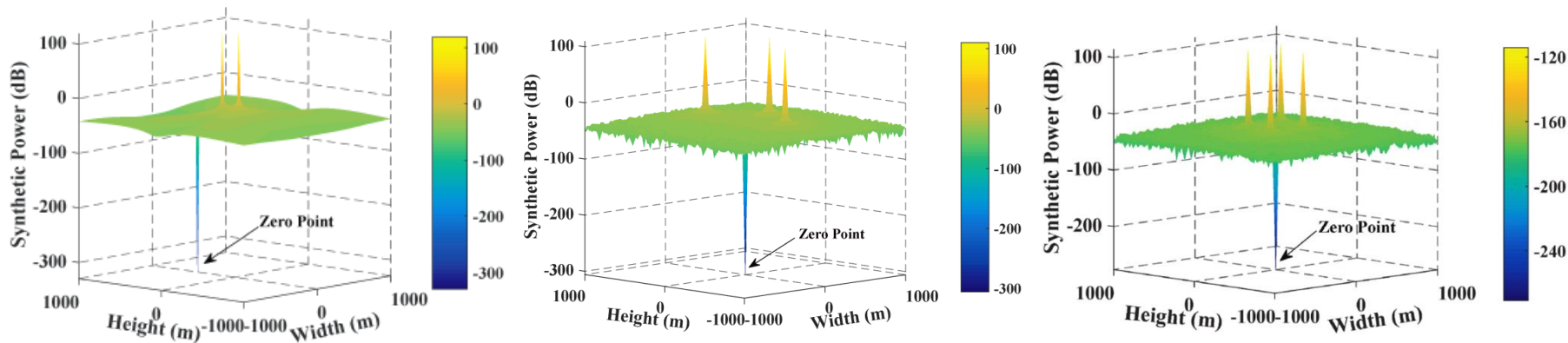
$$\varphi_{2,1} = \varphi_2 - \varphi_1 + \beta(d_{Rx,Jm_2} - d_{Rx,Jm_1}).$$





# 协作干扰方案

- 主要结果
- 分析了固定区域内两个、三个、四个干扰器的空间功率合成的解的结果

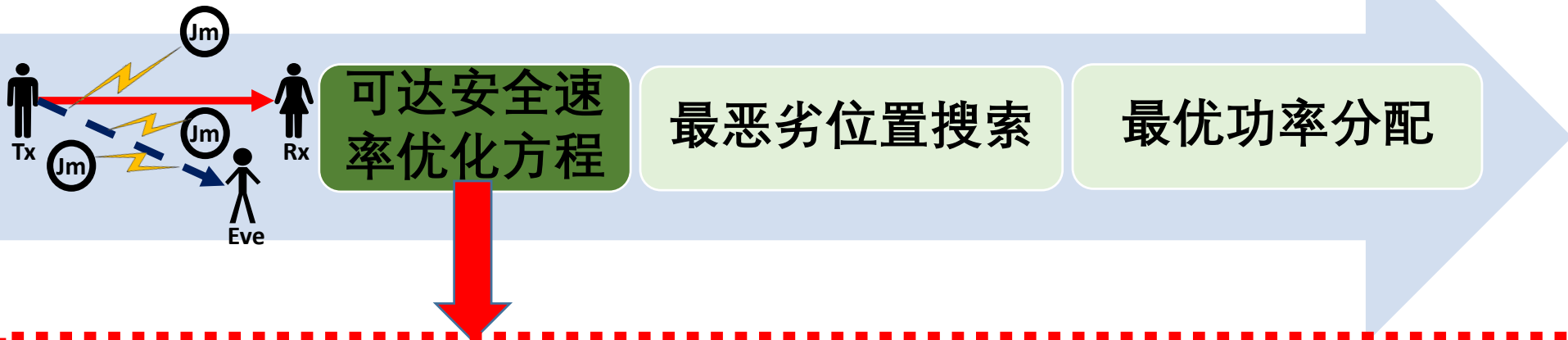


- 根据以上内容发表了一篇CCF C类国际会议论文

**Xin Fan**, Liang Huang, Yan Huo, Chunqiang Hu, Yuqi Tian, Jin Qian, "Space Power Synthesis-Based Cooperative Jamming for Unknown Channel State Information", 12th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications (WASA 2017), 2017, June 19-21, Guilin, China (**EI会议, CCF: C类, 对应学位论文第三章内容**)



# 功率分配方案



## • 物理层安全评价指标:

- 安全速率:  $C_S = \begin{cases} C_B - C_E, & C_B > C_E \\ 0, & C_B \leq C_E \end{cases}$

其中,  $C_B = \log_2(1 + \gamma_B)$ ,  $C_E = \log_2(1 + \gamma_E)$

## • 最差可达安全速率优化问题:

- P1:  $\max_{J \in \mathbb{J}} \max_{I_{Tx}, I_{Jm_i}} \min_{e \in \mathbb{E}} C_{J,e}(I_{Tx}, I_{Jm_1}, \dots, I_{Jm_n})$

## • 对于选定J, P1 可以简化为:

- P2:  $\max_{I_{Tx}, I_{Jm_i}} \min_{e \in \mathbb{E}} C_{J,e}(I_{Tx}, I_{Jm_1}, \dots, I_{Jm_n})$



# 功率分配方案

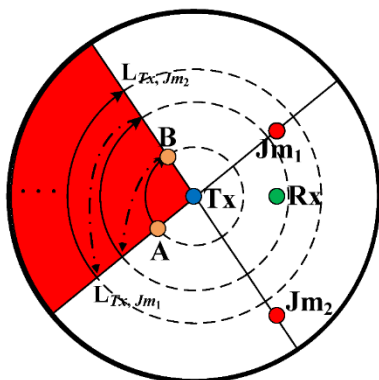


• 给定功率分配下,

• **P3:**  $\min_{(x_{Ev}, y_{Ev}) \in \mathbb{E}} C(x_{Ev}, y_{Ev})$

• 求解找到最差窃听器位置

- 一种缩小搜索区域的方法
- 一种波浪形之字搜索方法

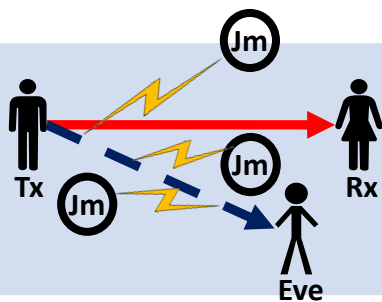


步骤:

1. 初始化  $r^* = r$ , 和  $y_{Ev}^* = y_{Ev}$ ;
2. 根据公式 (4.11), 计算  $C(r^*, y_{Ev}^*)$ ;
3. **While**  $r \leq R$  **do**
4.   根据  $r$  更新  $y_A$  和  $y_B$ ;
5.   重新设置  $y_{Ev} = y_A$ ;
6.   在搜索区域  $y_A \leq y_{Ev} \leq y_B$  上, 通过一维搜索算法解决问题 **P5**, 从而得到可行解  $(r, y_{Ev}^{(r)})$ ;
7.   计算差值:  $\Delta C = C(r^*, y_{Ev}^*) - C(r, y_{Ev}^{(r)})$ ;
8.   **If**  $\Delta C < 0$  **then**
9.     令  $(r^*, y_{Ev}^*) = (r, y_{Ev}^{(r)})$ ;
10.   **End if**
11.   设置  $r = r + \Delta r$ .
12. **End while**
13. **Return**  $(r^*, y_{Ev}^*)$



# 功率分配方案



可达安全速率优化方程

最恶劣位置搜索

最优功率分配

- 定理4-2：当仅考虑窃听者的信干比（Signal-to-Interference-Ratio, SIR），即忽略AWGN功率 $\sigma_E^2$ 的情况下，对于不同功率分配，最差窃听者位置始终不变。

- 功率分配优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{I_{Tx}, I_{Jm_1}, I_{Jm_2}} C(I_{Tx}, I_{Jm_1}, I_{Jm_2}) \\ & \text{s.t.} \quad I_{Tx}^2 + I_{Jm_1}^2 + I_{Jm_2}^2 \leq I_{\max}^2 \end{aligned}$$

- 启发式模拟退火算法
- 一种一维搜索算法

1. 初始化  $m = 0, t = t_0$ 。
2. While  $t > t_{\min}$  or  $i \leq l$
3. 在  $(I_{Tx}^{i-1}, I_{Jm_1}^{i-1}, I_{Jm_2}^{i-1})$  附近随机扰动产生新的解  $(I_{Tx}^i, I_{Jm_1}^i, I_{Jm_2}^i)$ ；
4. 计算两次目标函数的差值：  $\Delta C = C(I_{Tx}^{i-1}, I_{Jm_1}^{i-1}, I_{Jm_2}^{i-1}) - C(I_{Tx}^i, I_{Jm_1}^i, I_{Jm_2}^i)$ ；
5. If  $\Delta C < 0$  then
6. 令  $(I_{Tx}^{i-1}, I_{Jm_1}^{i-1}, I_{Jm_2}^{i-1}) = (I_{Tx}^i, I_{Jm_1}^i, I_{Jm_2}^i)$ ；
7.  $m = 0$ ；
8. Else
9. 以概率  $\exp(\frac{\Delta C}{t})$  令  $(I_{Tx}^{i-1}, I_{Jm_1}^{i-1}, I_{Jm_2}^{i-1}) = (I_{Tx}^i, I_{Jm_1}^i, I_{Jm_2}^i)$
10.  $m = m + 1$ ；
11. End if
12. If  $m > m_{\max}$  then
13. 令  $(I_{Tx}^*, I_{Jm_1}^*, I_{Jm_2}^*) = (I_{Tx}^{i-1}, I_{Jm_1}^{i-1}, I_{Jm_2}^{i-1})$ ；
14. Break
15. End if
16. 令  $t = \rho t$ ；
17. End while
18. Return  $(I_{Tx}^*, I_{Jm_1}^*, I_{Jm_2}^*)$

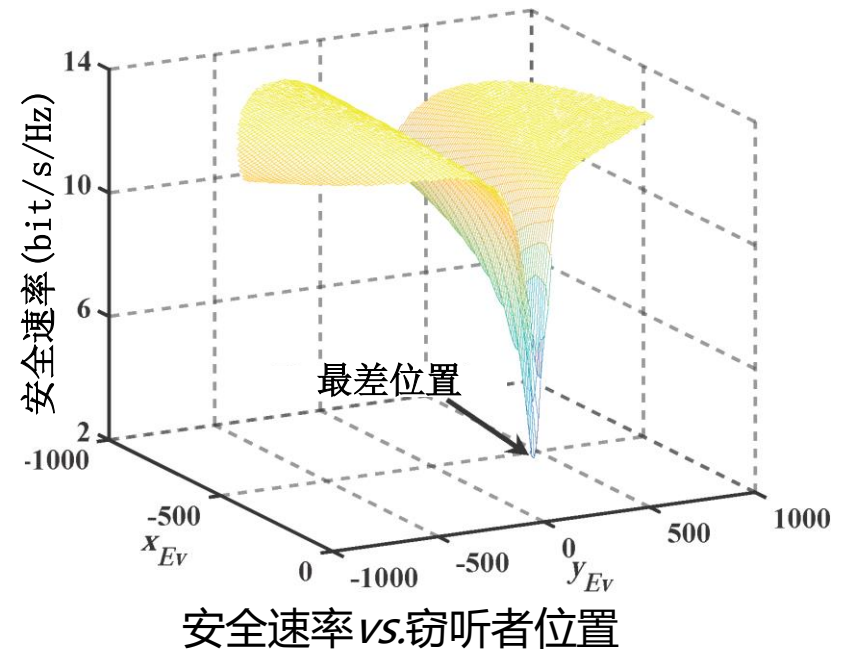
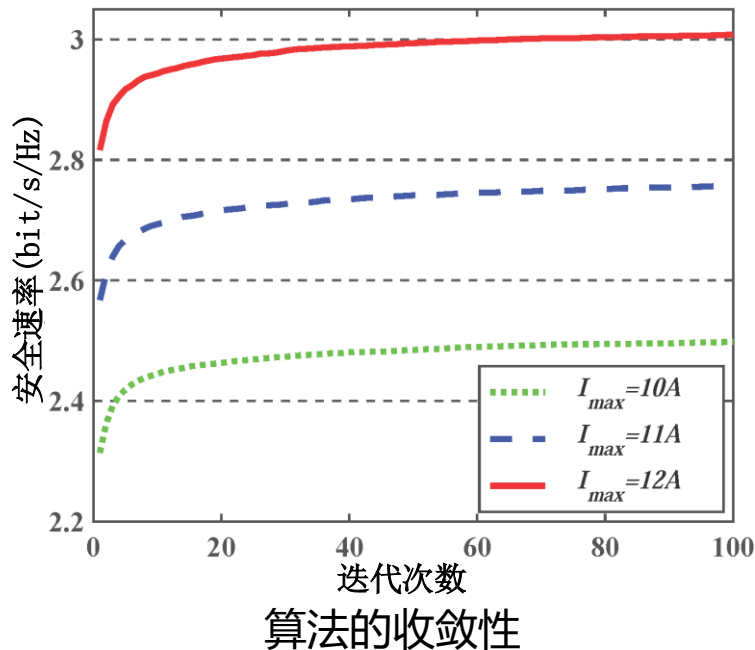




# 功率分配方案

## • 主要结果

### • 部分仿真实验结果

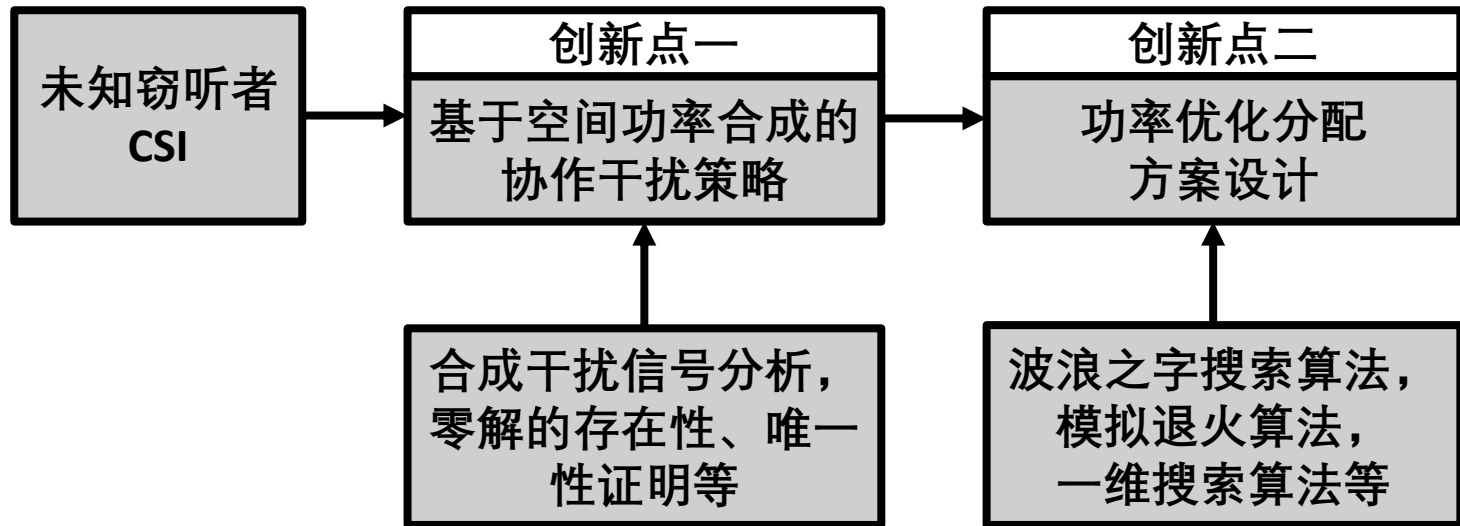


### • 根据以上内容发表了一篇A2区SCI期刊论文

Huang L, Fan X, Huo Y, et al. A Novel Cooperative Jamming Scheme for Wireless Social Networks Without Known CSI[J]. IEEE Access, 2017, PP(99):1-1. (SCI期刊, IF: 3.244, 对应学位论文第四章内容)



## • 工作总结



## • 不足之处

- 未考虑小尺度衰落、未考虑三维空间、未考虑多用户、未考虑多天线、未考虑移动场景。



## • 已发表论文

- **Fan X**, Huang L, Huo Y, et al. Space Power Synthesis-Based Cooperative Jamming for Unknown Channel State Information [C]// International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Springer, Cham, 2017:483-495.  
(EI会议, CCF: C类, 对应学位论文第三章内容)
- Huang L, **Fan X**, Huo Y, et al. A Novel Cooperative Jamming Scheme for Wireless Social Networks Without Known CSI [J]. IEEE Access, 2017, PP(99):1-1.  
(An2区SCI期刊, IF: 3.244, 对应学位论文第四章内容)
- Luwei Wei, Tao Jing, **Xin Fan**, Yingkun Wen, Yan Huo. The Secrecy Analysis over Physical Layer in NOMA-enabled Cognitive Radio Networks [C]. IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2018). ISTP/EI会议
- Mi Xu, Tao Jing, **Xin Fan**, Yingkun Wen, Yan Huo. Secure Transmission Solutions in Energy Harvesting Enabled Cooperative Cognitive Radio Networks [C]. IEEE Wireless Communications & Networking Conference (IEEE WCNC 2018). ISTP/EI会议
- Yanyan Zhang, Liang Huang and **Xin Fan**. Failure Feature Extraction of Analogue Active Filter Based on Attenuation Sensitivity [C]. IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IEEE IMCEC 2018). ISTP/EI会议



北京交通大学  
BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY



**谢谢各位老师  
请老师批评指正！**

