



# 本科毕业设计论文

# 基于Wi-Fi的室内近场成像

答辩人: 任振裕 (11812214)

专业: 通信工程

指导老师: 王锐 副教授

院系: 电子与电气工程系

日期: 2022年5月28日

# 目录



新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future

- 一、国内外研究现状
- 二、基于Wi-Fi的室内近场成像
  - 系统模型
  - 理想仿真成像结果
- 三、考虑频偏消除的成像仿真
  - CSI频偏模型及CSI频偏消除方法的调研
  - 结合CSI共轭相乘和PARAFAC算法的频偏消除成像
  - 仿真结果及对比
- 四、应用前景：分布式成像
- 五、基于数控导轨的简单实测成像
  - 实验场景一：N=32对目标/信源成像
  - 实验场景二：N=64对目标成像
- 六、总结与展望

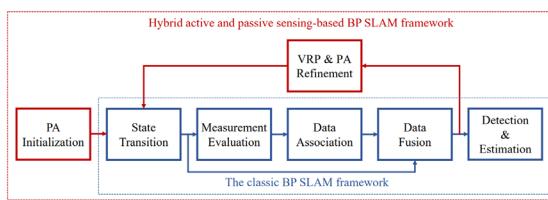
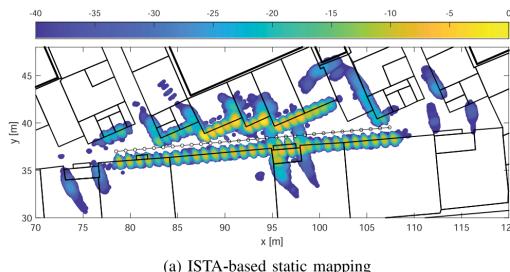
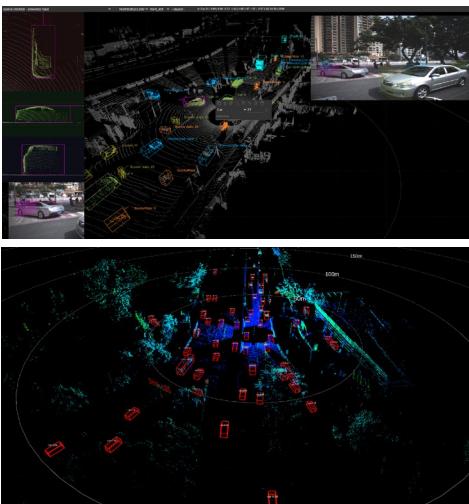
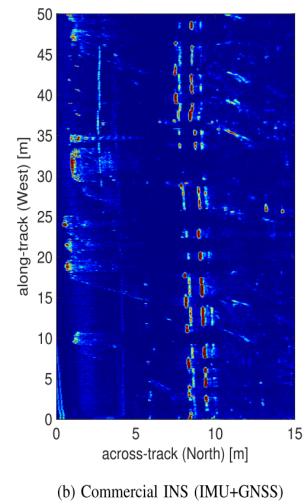
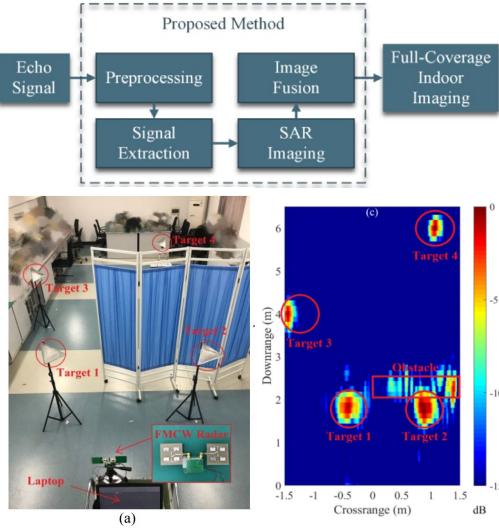


# 一、国内外研究现状

# 国内外研究现状



新 · 益求新  
Change for excellence  
Innovation for future



## (Radar-Based)

Demo: SAR 成像<sup>[1]</sup>

## (Sensor Fusion-Based)

Demo: 自动驾驶中IMU结合GNSS  
多传感器融合成像<sup>[2]</sup>

## (Lidar/Camera-Based SLAM)

Demo: SUSTechPoints<sup>[3]</sup> by  
departments of CS and SDIM

## (ISAC-based / mmWave-Based)

Demo: Range-Angle Chart<sup>[4]</sup>, Belief  
Propagation Based Radio SLAM<sup>[5]</sup>

[1] J. Yan et al., "Full-Coverage Indoor SAR Imaging with a Vehicle-based FMCW Radar System," 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS, 2018, pp. 135-137, doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439145.

[2] D. Tagliaferri et al., "Navigation-Aided Automotive SAR for High-Resolution Imaging of Driving Environments," in IEEE Access, vol. 9, pp. 35599-35615, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062084.

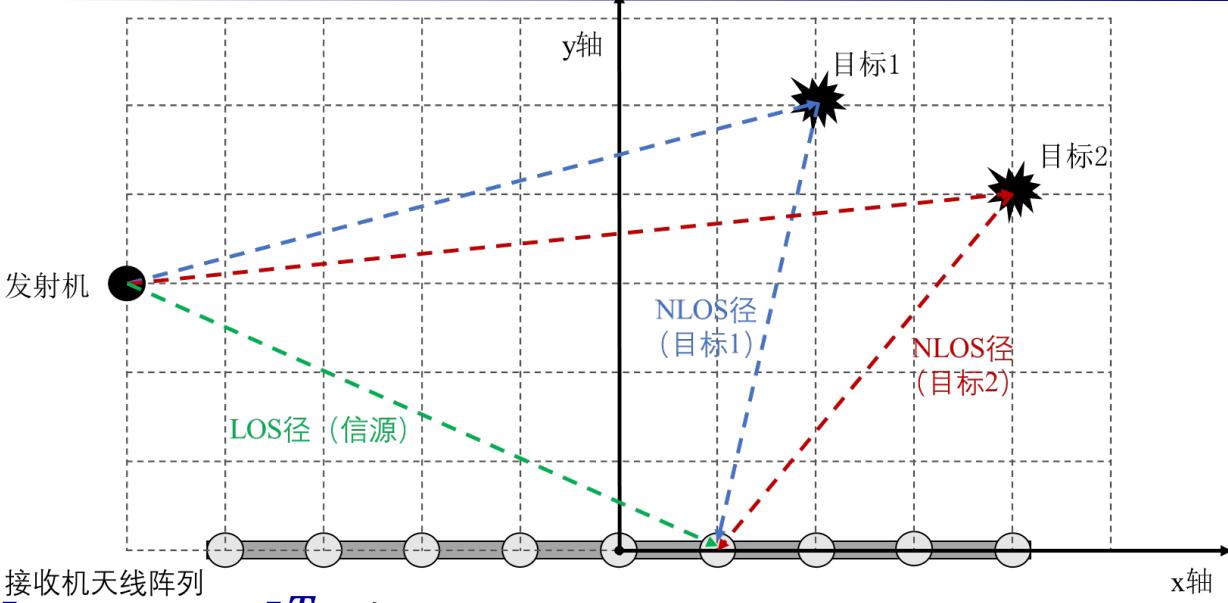
[3] <https://github.com/naurril/SUSTechPOINTS>

[4] C. Baquero Barneto et al., "Millimeter-Wave Mobile Sensing and Environment Mapping: Models, Algorithms and Validation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 4, pp. 3900-3916, April 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3146003.

[5] J. Yang, C. -K. Wen and S. Jin, "Hybrid Active and Passive Sensing for SLAM in Wireless Communication Systems," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, doi: 10.1109/JSAC.2022.3156630.



## 二、基于Wi-Fi的室内近场成像



- 接收信号CSI:  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$ , 其中:

$$y_n = \underbrace{\alpha_0(n)e^{-j2\pi\frac{d_0(n)}{\lambda}}}_{\text{LOS径}} + \underbrace{\alpha_1(n)e^{-j2\pi\frac{D_1+d_1(n)}{\lambda}} + \dots + \alpha_L(n)e^{-j2\pi\frac{D_L+d_L(n)}{\lambda}}}_{\text{NLOS径}} = \sum_{l=0}^L \alpha_l e^{-j2\pi\frac{D_l+d_l(n)}{\lambda}}.$$

- 匹配矩阵: 对于每一个网格点 $(x, y)$ , 都有一个匹配向量 $\hat{\mathbf{y}}$ :

$$\hat{\mathbf{y}} = [e^{\frac{j2\pi\hat{d}(1)}{\lambda}}, \dots, e^{\frac{j2\pi\hat{d}(N)}{\lambda}}]^T, \quad \hat{d}(n) = \sqrt{(x - z_n)^2 + y^2}.$$

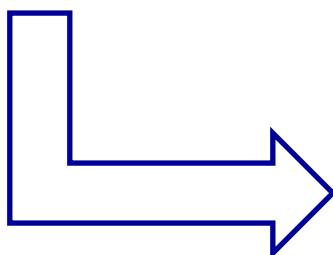
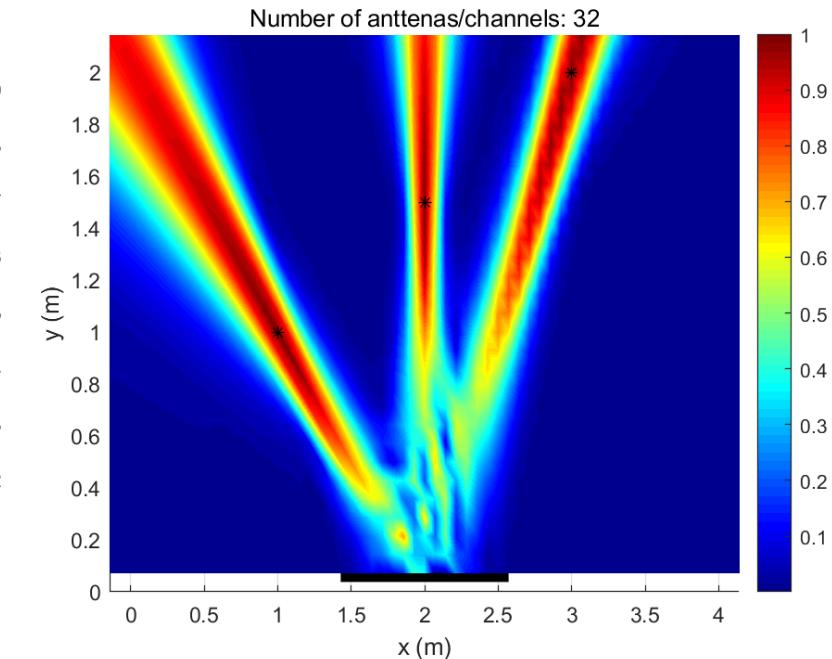
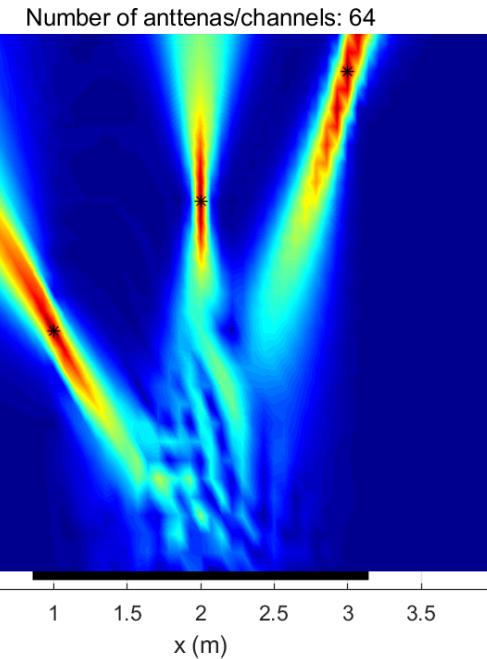
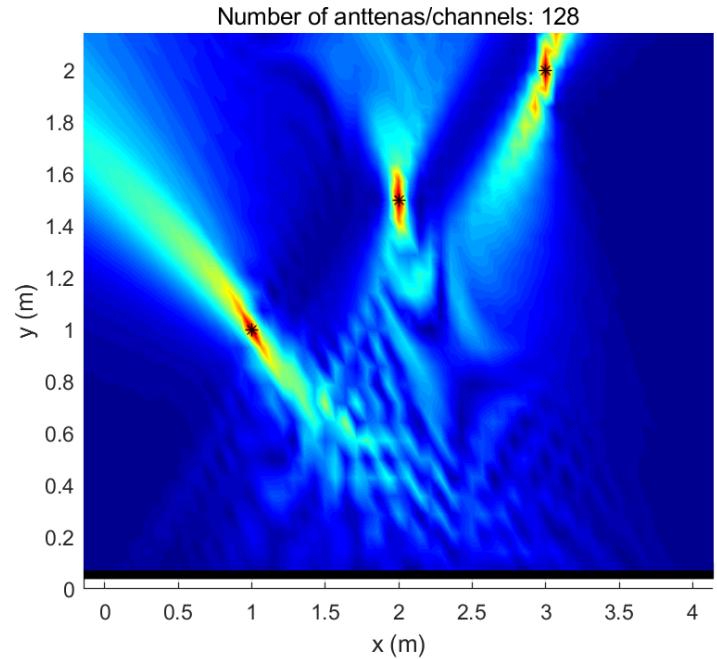
- 匹配结果:

- 对空间中每一个网格点计算:  $|\mathbf{y}_{match}| = |\mathbf{y}^T \mathbf{y}|$ 。如 $\hat{d}(n) = d_i(n)$ , 则目标*i*在该位置出现峰值。

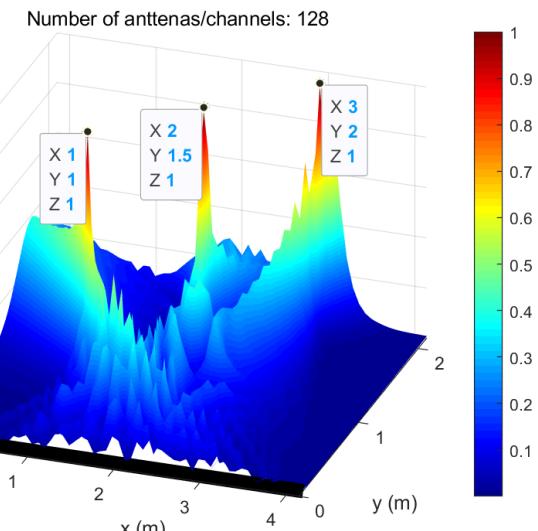
# 理想仿真成像结果



新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future



最理想的结果

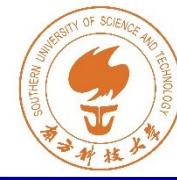


参数	值
是否考虑对信源（发射机）成像	否，仿真多径没有设置 LOS 径
是否考虑 CSI 频偏的影响	否，该小节测试理想成像的结果
成像目标数量	3
成像目标的位置	(1米, 1米), (2米, 1.5米), (3米, 2米)
工作频点	4.2GHz
工作带宽	20MHz
子载波数目	256
发射机位置	(2米, 0米)
接收机天线阵元数 $N$	32, 64, 128
接收机天线阵元间隔	半波长 (约 3.57 厘米)
接收机位置	类似图 1, 阵列中心位于原点



### 三、考慮頻偏消除的成像仿真

# CSI频偏模型及CSI频偏消除方法



- 实际通信系统中的CSI受采样频率偏移 (SFO: Sampling Frequency Offset)，以及包检测误差 (PDD: Packet Detection Delay) 以及载波频率偏移 (CFO: Carrier Frequency Offset) 等影响<sup>[6]</sup>。

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} e^{-j\theta_{offset}(t)} = \mathbf{y} e^{-j\{2\pi f[\theta_{SFO}(t)+\theta_{PDD}(t)]+2\pi\theta_{CFO}(t)\}}$$

- 本文考虑两种CSI频偏情形。

- (情形一) 类似SAR的情形:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} e^{-j\theta_{offset}(t)}$$

$$= \mathbf{y} \odot [e^{-j\{2\pi f[\theta_{SFO,1}(t)+\theta_{PDD,1}(t)]+2\pi\theta_{CFO,1}(t)\}}, \\ \dots, e^{-j\{2\pi f[\theta_{SFO,N}(t)+\theta_{PDD,N}(t)]+2\pi\theta_{CFO,N}(t)\}}]^T.$$

这里  $\odot$  表示点乘。

- (情形二) 一个巨大的接收阵列情形:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} e^{-j\{2\pi f[\theta_{SFO}+\theta_{PDD}]+2\pi\theta_{CFO}\}}$$

- 频偏消除的方法<sup>[6]</sup>:

- 基于相位 “相减” 的方式。

- 两路 CSI 信号共轭相乘(本文使用的方法)。

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 \times \tilde{\mathbf{y}}_2^H = (\mathbf{y}_1 e^{-j\theta_{offset}(t)}) \times (\mathbf{y}_2 e^{-j\theta_{offset}(t)})^H$$

- 两路 CSI 信号相除。

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 / \tilde{\mathbf{y}}_2 = (\mathbf{y}_1 e^{-j\theta_{offset}(t)}) / (\mathbf{y}_2 e^{-j\theta_{offset}(t)})$$

- 基于线性拟合的方法。

$$\rho^*, \beta^* = \arg \min_{\rho, \beta} \sum_{r,f} (\Theta_{r,f} + 2\pi f \rho + \beta)^2$$

其中， $\Theta_{r,f}$  为测量的CSI相位，经过拟合可得：

$$\rho^* \approx \theta_{SFO} + \theta_{PDD} \text{ 和 } \beta^*/(2\pi) \approx \theta_{SFO}.$$

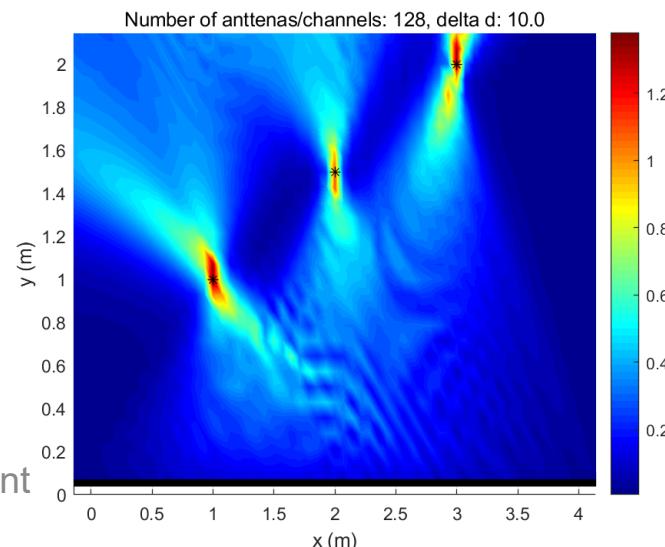
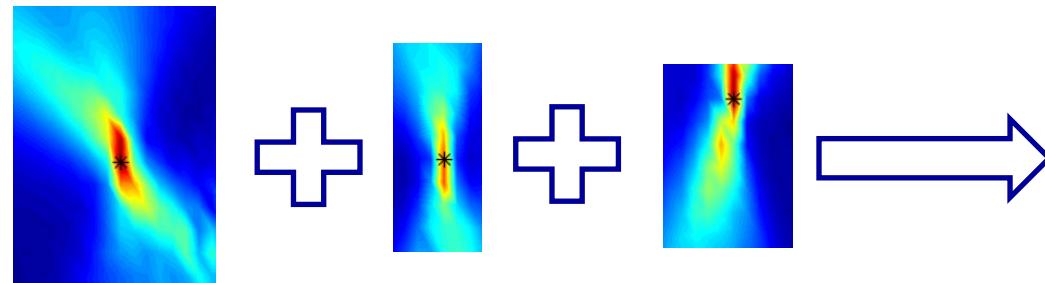
- 利用PARAFAC（平行因子分析）中的COMFAC算法<sup>[7]</sup>估计每一条多径CSI：

$$\tilde{Y}_1(i, j, k) = \sum_{l=1}^L \tilde{Y}_1^l(i, j, k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{A}_1(i, l) \mathbf{B}_1(j, l) \mathbf{C}_1(k, l) + \mathbf{E}_1(i, j, k)$$

$$\tilde{Y}_2(i, j, k) = \sum_{l=1}^L \tilde{Y}_2^l(i, j, k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{A}_2(i, l) \mathbf{B}_2(j, l) \mathbf{C}_2(k, l) + \mathbf{E}_2(i, j, k)$$

$$l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, P; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, F - P + 1$$

- COMFAC算法使用Nikos D. Sidiropoulos的代码<sup>[8]</sup>。
- 对每一条多径利用共轭相乘的方式消除频偏，分别成像再叠加。



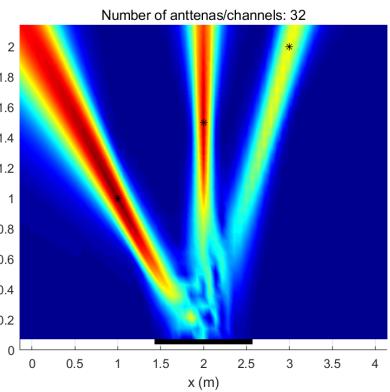
[7] Bro, Rasmus, N. D. Sidiropoulos, and G. B. Giannakis. "A fast least squares algorithm for separating trilinear mixtures." Int. Workshop Independent Component and Blind Signal Separation Anal. 1999.

[8] <http://www.ece.umn.edu/~nikos/comfac.m>

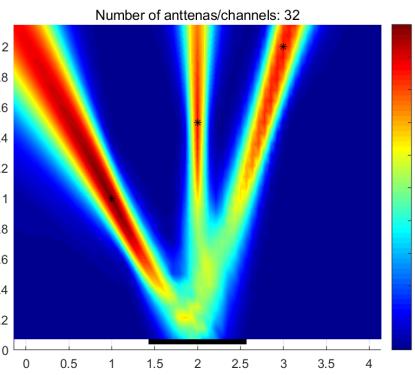
# 仿真结果对比

N=32, 仿真参数详细设置, 其余情况仿真见论文。

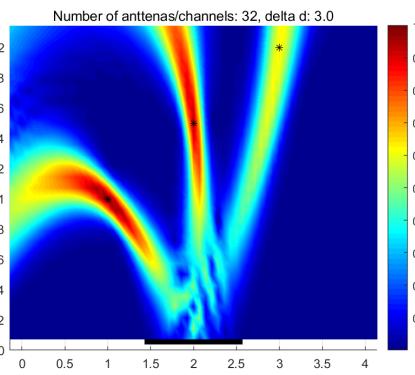
直接成像



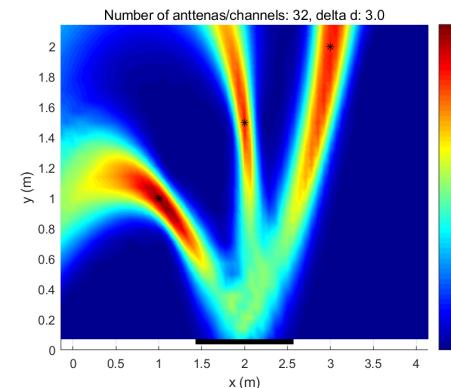
PARAFAC成像



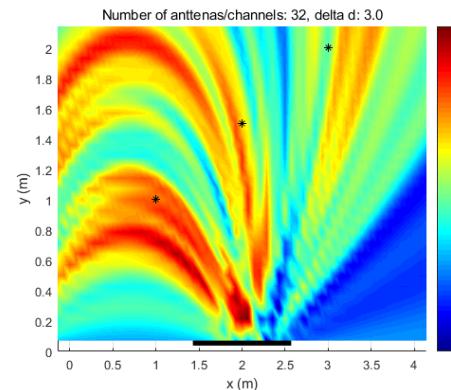
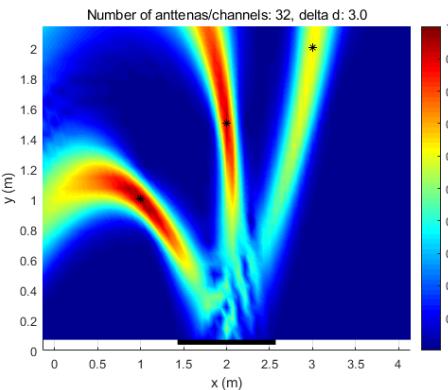
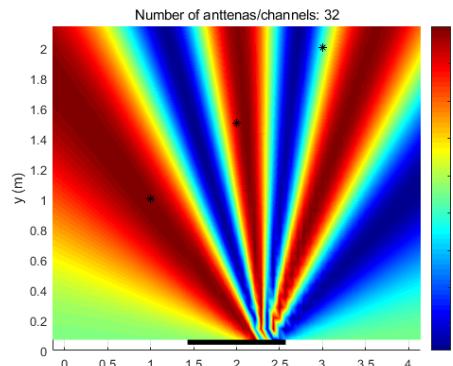
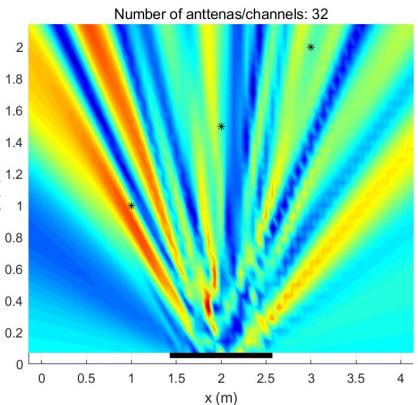
共轭相乘成像



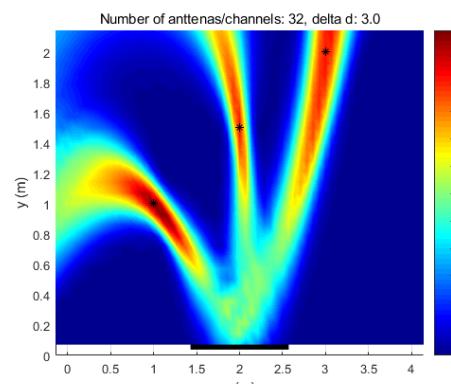
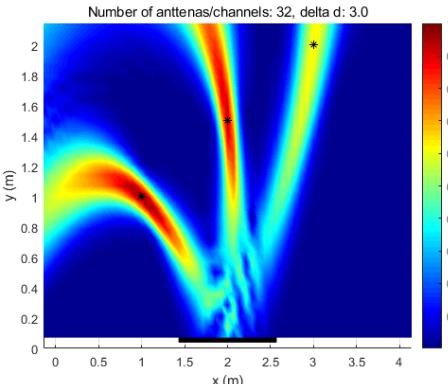
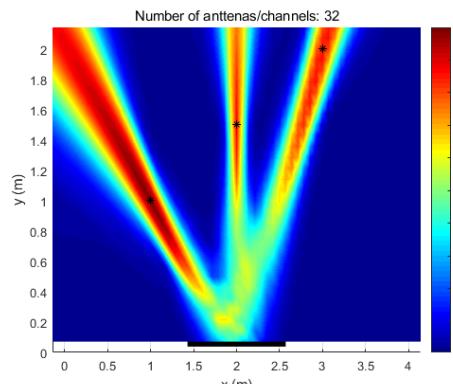
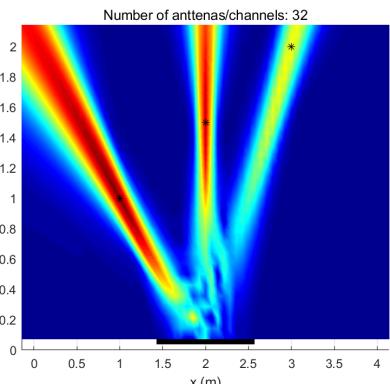
共轭相乘+PARAFAC成像



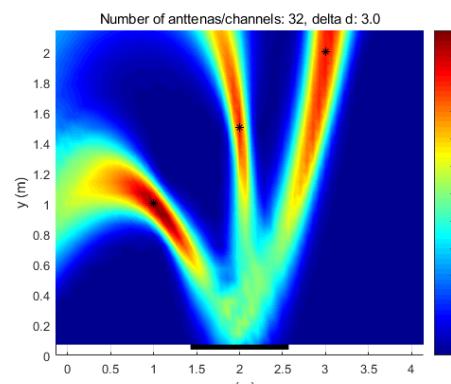
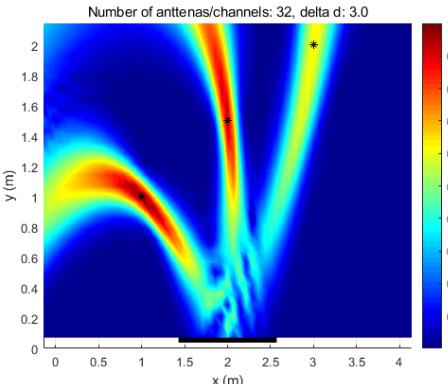
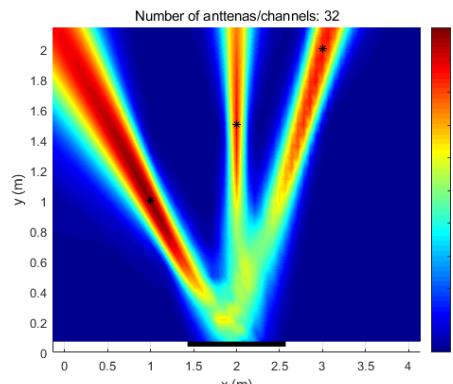
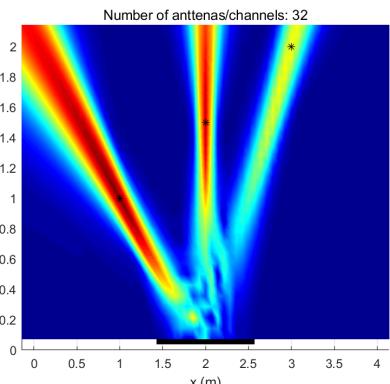
未添加频偏



情形一频偏



情形二频偏



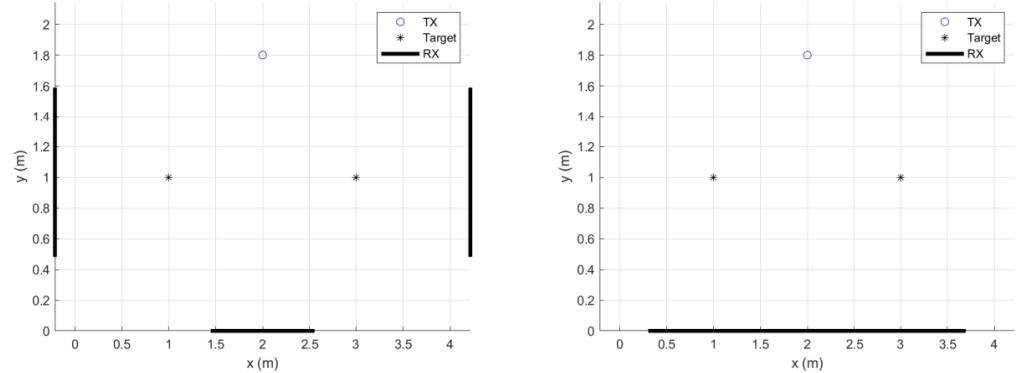


## 四、应用前景：分布式成像

# 应用前景：分布式成像

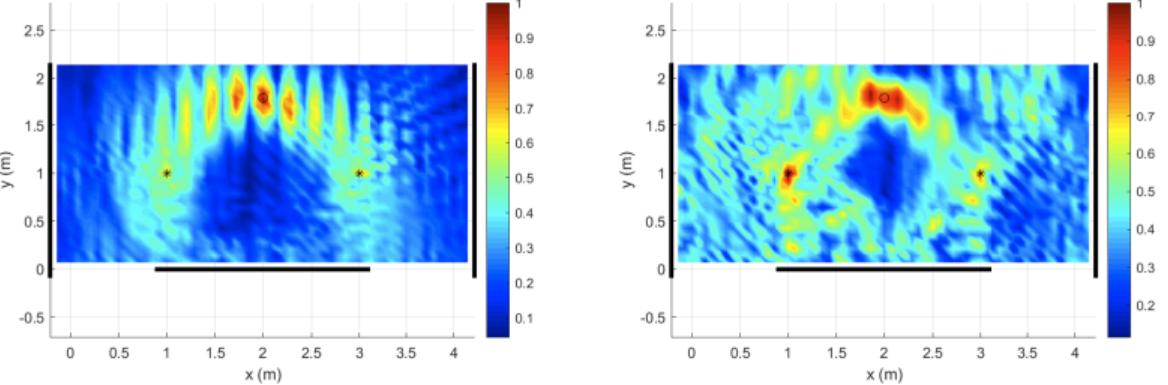


新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future



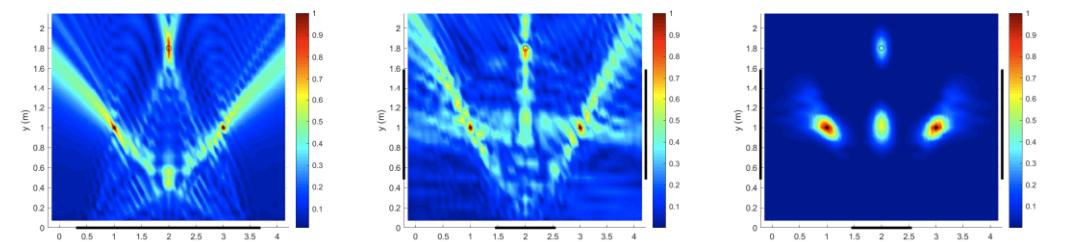
a) 3个 $N = 32$ 接收机阵列分布式成像      b) 对比: 单个 $N = 96$ 接收机阵列成像

图 6 分布式成像仿真场景

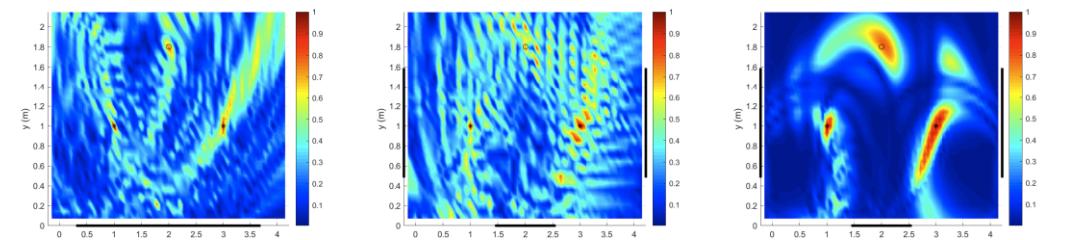


a) 无频偏 每个子阵列分别加汉明窗

b) 情形二频偏 每个子阵列分别加汉明窗

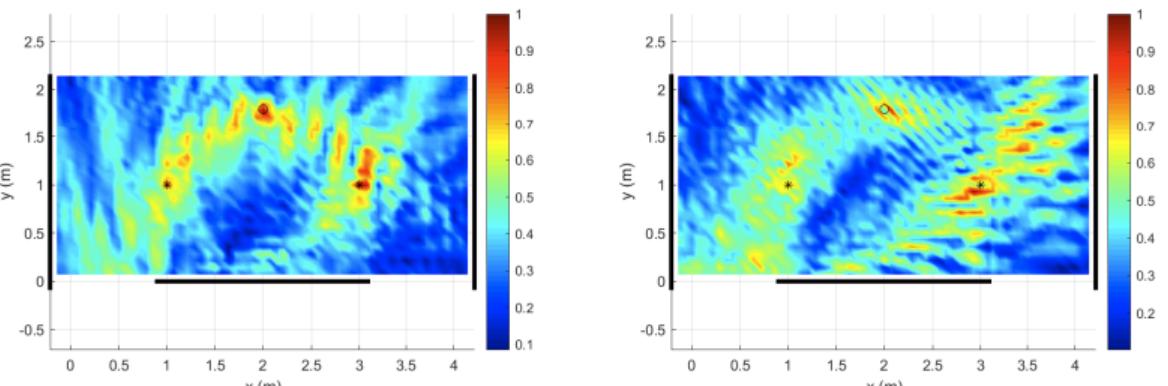


a) 未添加频偏 单阵列成像      b) 未添加频偏 三个分布式阵列合并为单阵列      c) 未添加频偏 三个分布式阵列分别成像再相乘



d) 情形二频偏 单阵列成像      e) 情形二频偏 三个分布式阵列合并为单阵列      f) 情形二频偏 三个分布式阵列分别成像再相乘

图 7 分布式成像仿真结果



c) 无频偏 子阵列串联后整体加窗

d) 情形二频偏 子阵列串联后整体加窗

图 8 结合 PARAFAC 算法的分布式成像仿真结果



## 五、基于数控导轨的简单实测成像

# 基于数控导轨的简单实测成像



新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future

- 实验平台：

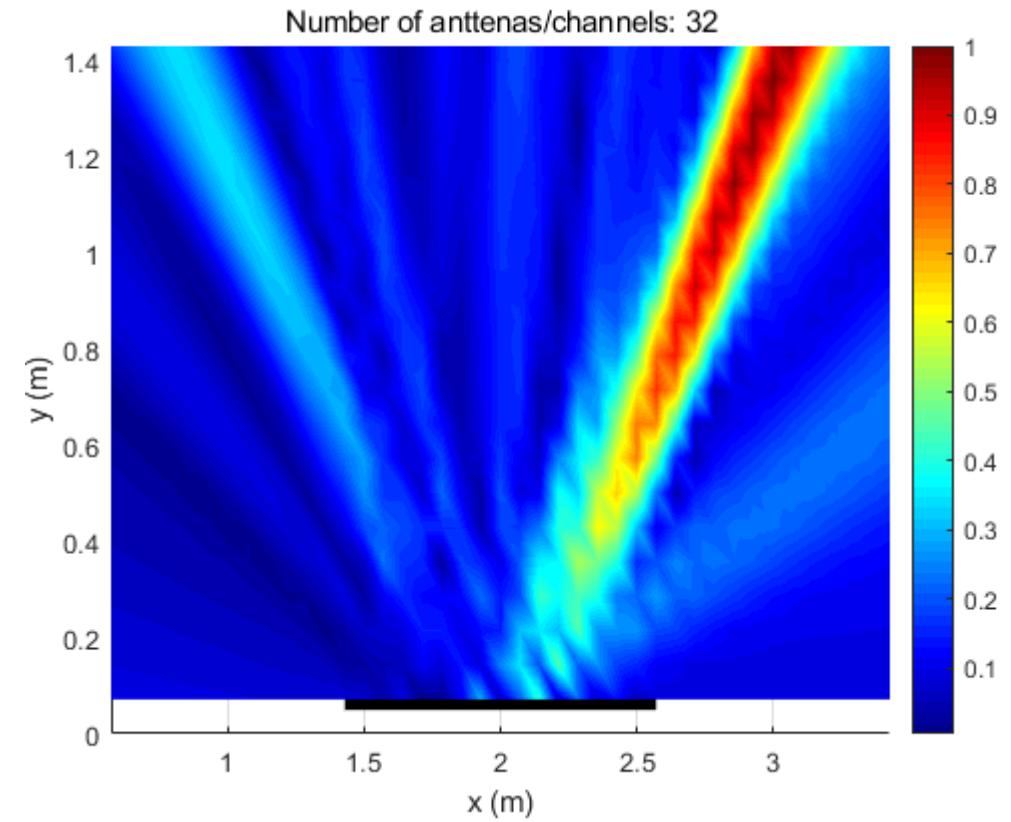
- (Channel Sounding) 利用MATLAB中的WLAN Toolbox以及AD9361发送IEEE 802.11ac中的NDP波形，通过NDP中的长训练序列 (LTF) 进行信道估计，进而得到CSI。
- 数控轨道搭载天线移动，模拟一个巨大的线阵。



# 实验场景一：N=32对目标/信源成像



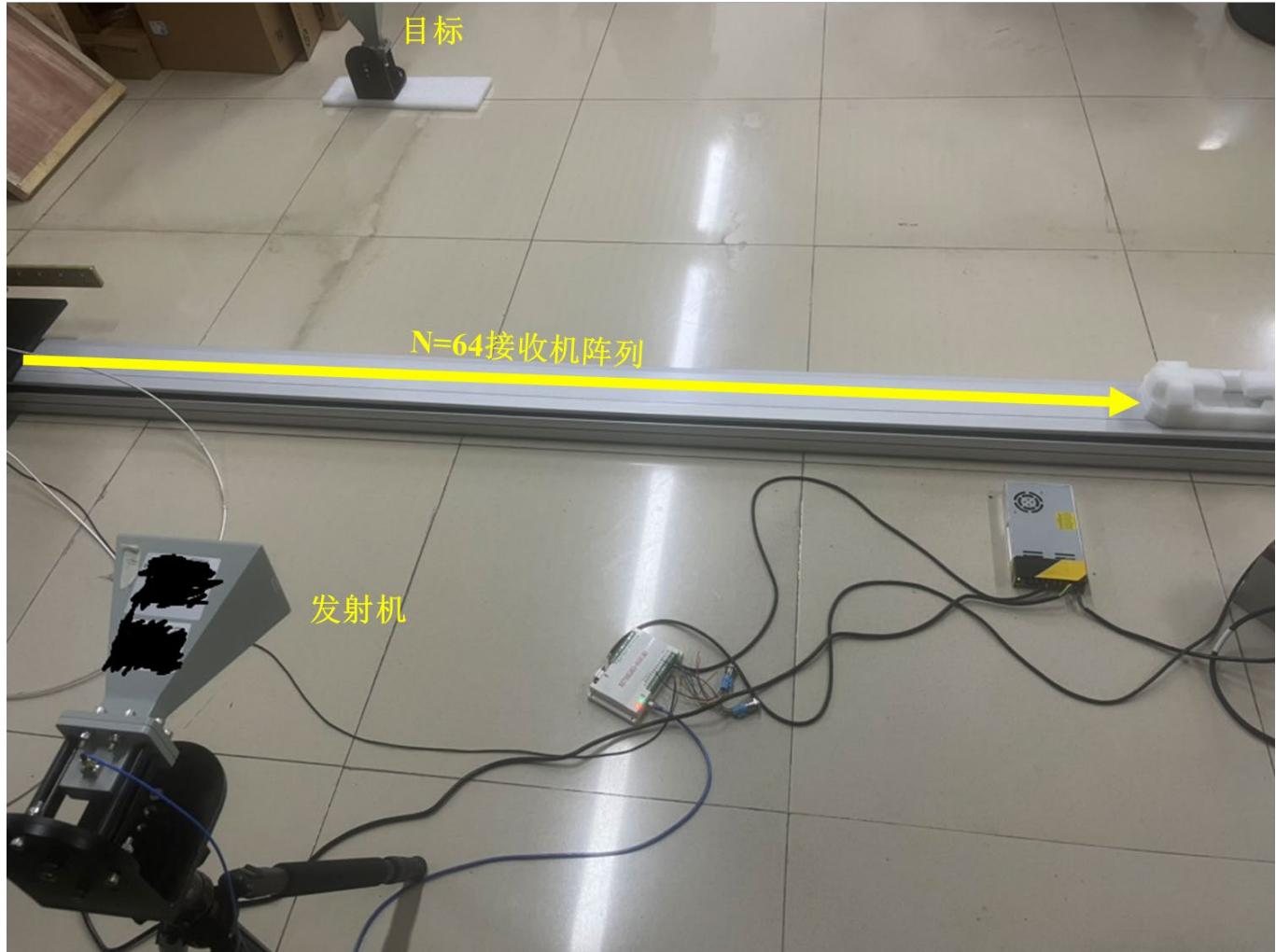
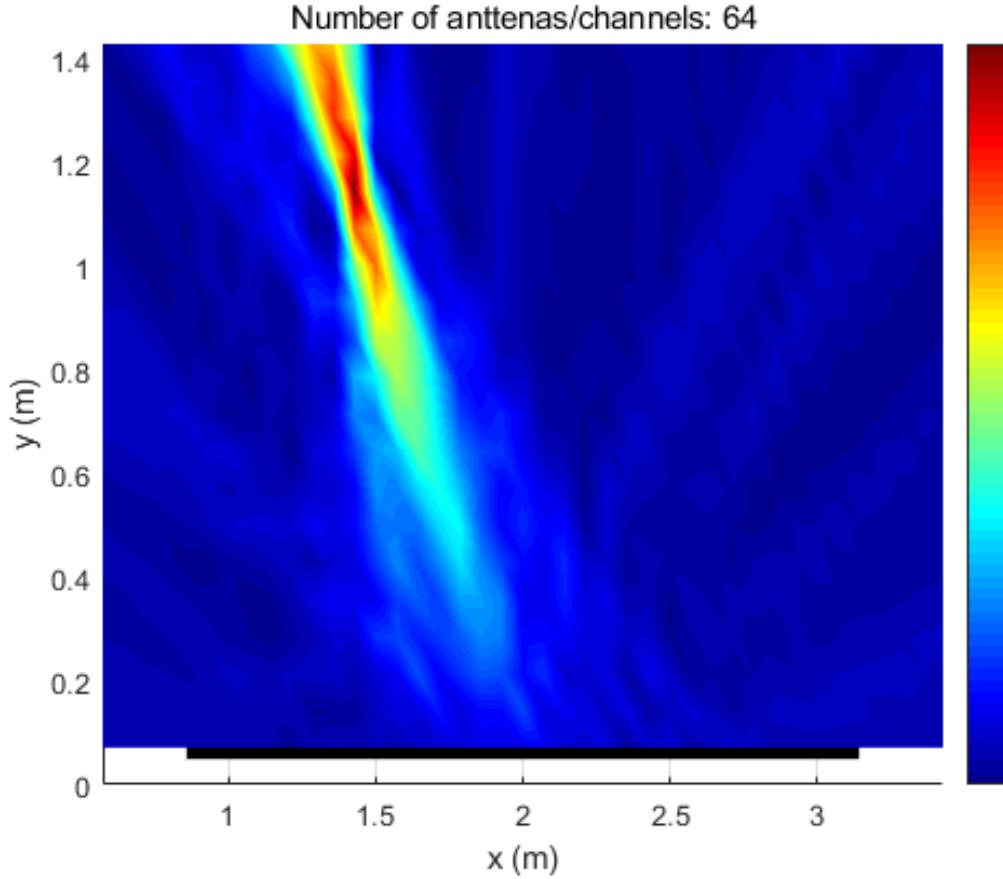
新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future



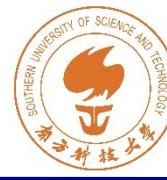
# 实验场景二：N=64对左侧目标成像



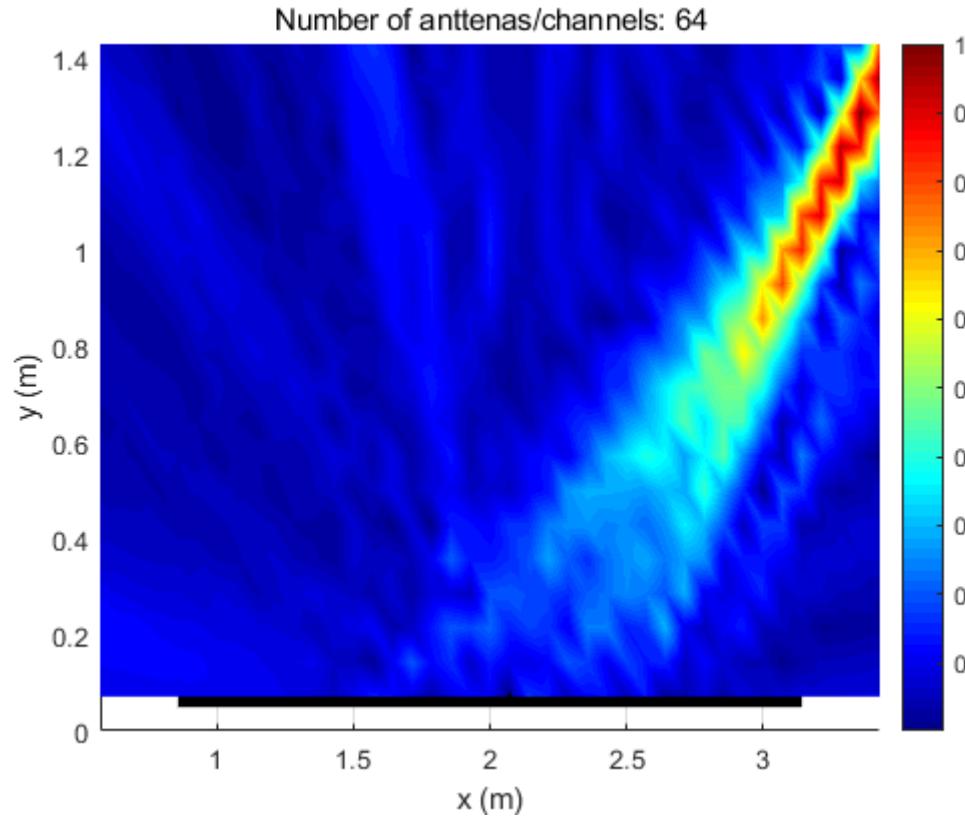
新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future



# 实验场景二：N=64对右侧目标成像



新·益求新  
Change for excellence  
Innovation for future





## 六、总结与展望



## ● 总结:

- 本文提出了一种基于Wi-Fi 被动感知的室内近场成像技术，通过阵列信号的相干、近场匹配滤波来实现室内对信源和反射物的探测、定位与成像。

## ● 展望与改进:

- 本文成像时仅使用了一个子载波上的信息进行匹配成像，可以探索多载波对成像的增益。
- 实验部分可以尝试更加复杂的情形。
- 可以探索更加有效的频偏消除方式。
- 本文直接采用网上开源的PARAFAC算法，可以对其数学原理进行深入探索以提高性能。

请老师批评与指正!