



电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

# 大规模阵列MIMO系统 波束优化设计方法研究

电子科技大学信息与通信工程学院 信息对抗技术专业

姓名：付鼎申（2022050909021） 指导老师：程子扬



信息与通信工程学院

School of Information and Communication Engineering



# 1 研究背景与问题提出

## 1.1 问题背景

### 强干扰检测弱目标

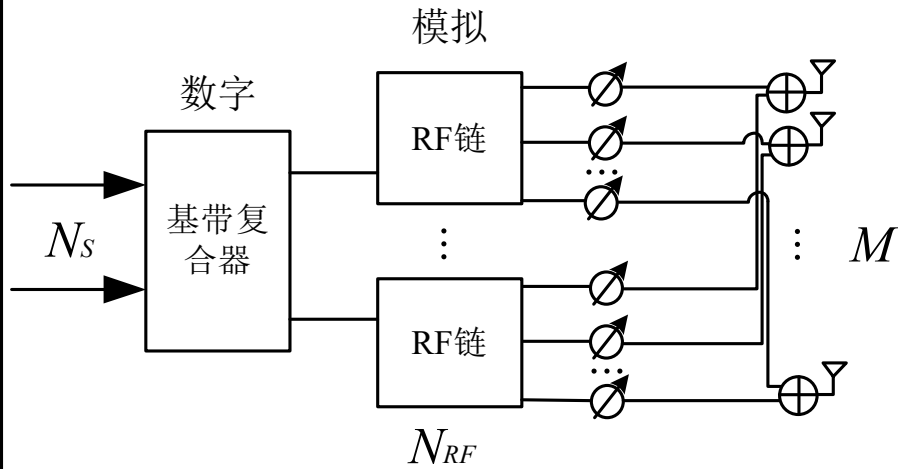
城市建筑、地物散射等**强烈而复杂**的杂波，**弱小目标**易被淹没



检测性能下降、参数估计不稳定

## 1.2 实现平台

### 大规模MIMO接收机



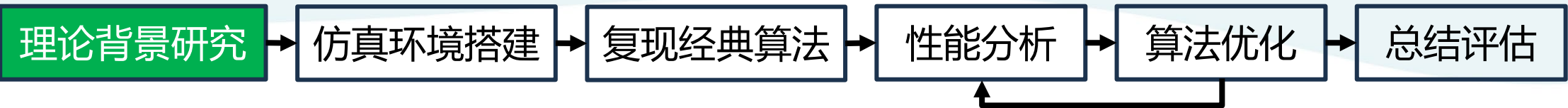
## 1.3 优化目标

### 设计/改进波束成形算法

问题：全数字**功耗高**  
全模拟**抗干扰差**

解决：**数模混合**波束成形技术  
实现：高性能、低成本的雷达感知

课题研究重点：在**强干扰环境**下，复现和改进设计**接收端**的**混合波束成形**算法



## 2 本文所完成的工作总结

### 2.1 任务书完成情况总述（论文基本结构）

| 任务书要求       | 对应的论文中完成的内容                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 文献综述与理论基础构建 | 第一章 <b>文献综述</b> ，第二章 <b>系统模型搭建</b> ，第三章 <b>各经典算法</b> 的基本原理              |
| 系统建模与算法设计   | 第二章建立 <b>ULA/NULA接收端模型</b> ，第三章 <b>复现经典算法</b> ，第四章提出 <b>TSC-OMP改进算法</b> |
| 仿真验证与性能分析   | 第三章 <b>经典算法局限性分析</b> ，第五章 <b>改进算法鲁棒性、复杂度分析</b>                          |

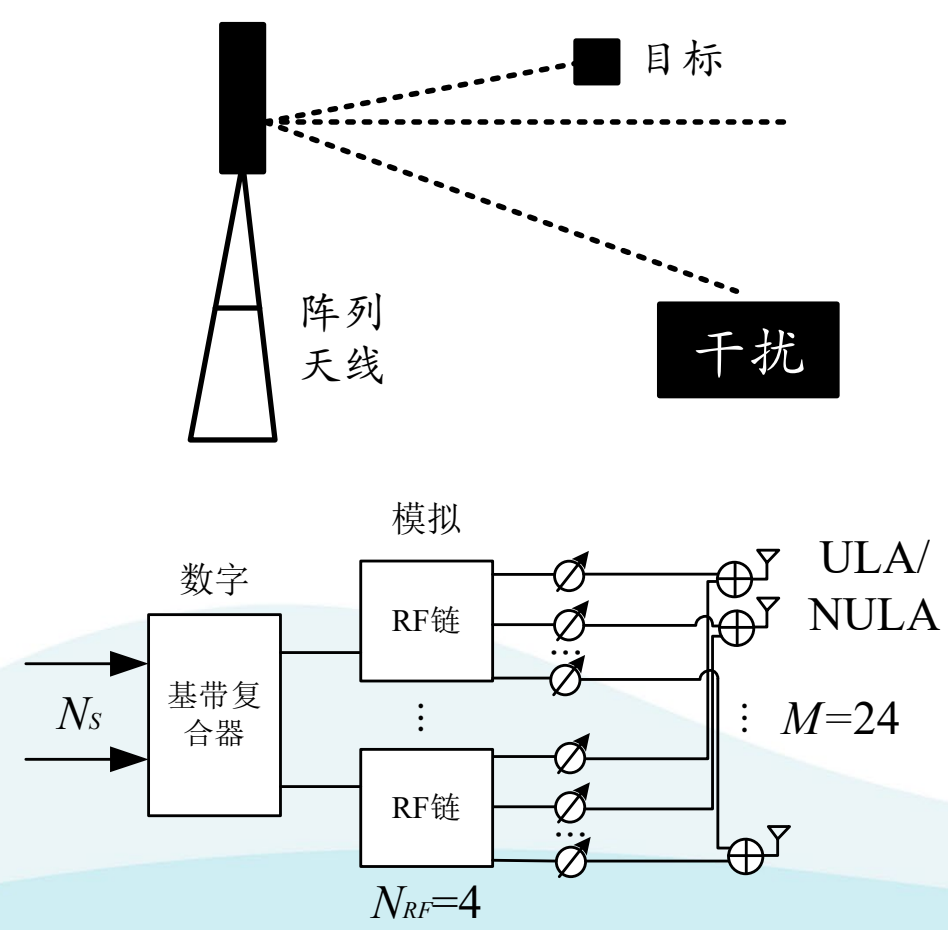




2 本文所完成的工作总结

2.2 系统模型搭建和仿真参数设置

2.2.1 系统模型图示



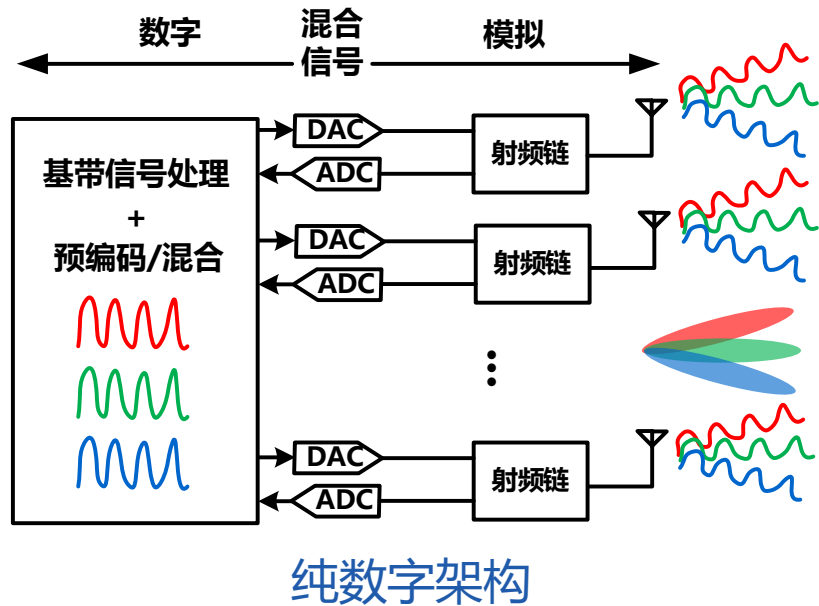
2.2.2 仿真平台参数设置（论文P20表3-2）

| 参数类别 | 参数名称  | ULA平台设置         | NULA平台设置                               |
|------|-------|-----------------|----------------------------------------|
| 阵列规模 | 阵元数   | 24              | 24                                     |
|      | 射频链数  | 4               | 4                                      |
| 阵列几何 | 阵元间距  | $0.5\lambda$    | 前12阵元43mm等间距, 中间63mm跳变, 后11阵元继续43mm等间距 |
|      | 目标角度  | 测试时 $5^\circ$   | 测试时 $5^\circ$                          |
| 场景参数 | 目标RCS | -30dB           | -30dB                                  |
|      | 干扰角度  | 测试时 $-15^\circ$ | 测试时 $-15^\circ$                        |
|      | 干扰RCS | 30dB            | 30dB                                   |
|      | 快拍数   | 100             | 100                                    |
|      | 噪声功率  | 1.0             | 1.0                                    |
|      | 干扰噪声比 | 30dB            | 30dB                                   |

2 本文所完成的工作总结

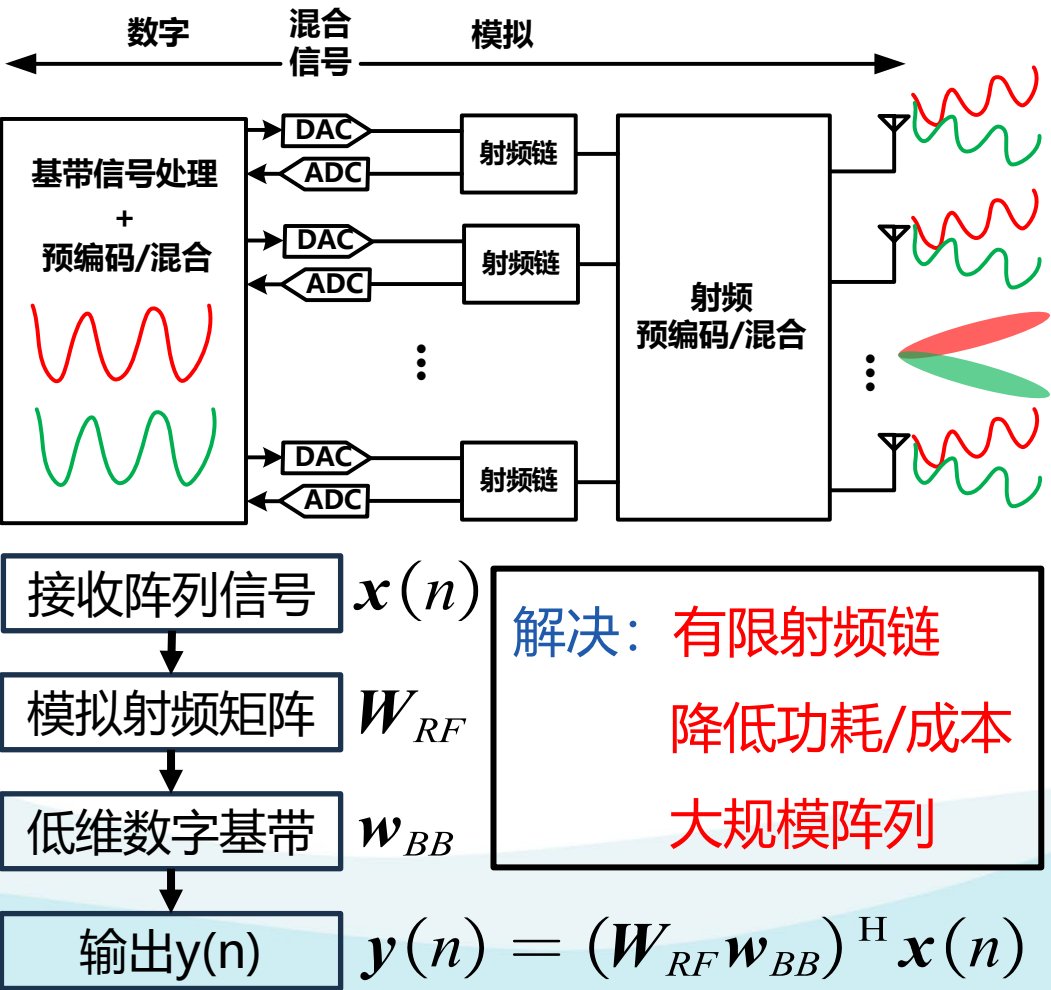
2.3 优化问题的模型构建

2.3.1 为什么需要混合架构



问题：每根天线配一个射频链  
硬件成本高、功耗大  
在大规模阵列中不现实

2.3.2 混合架构的优化方式

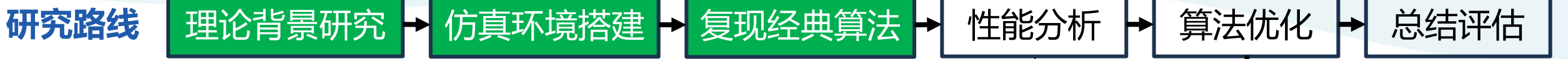


2.3.3 优化目标

最大化输出SINR

$$\text{SINR} = \frac{\text{目标输出功率}}{\text{干扰} + \text{噪声输出功率}}$$
$$\text{SINR} = \frac{P_s |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0)|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}}$$

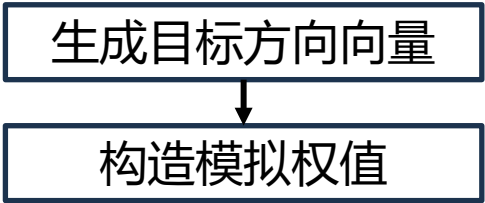
优化目标：让波束对目标方向响应尽量大，同时让干扰和噪声通过后的总能量尽量小。



## 2 本文所完成的工作总结

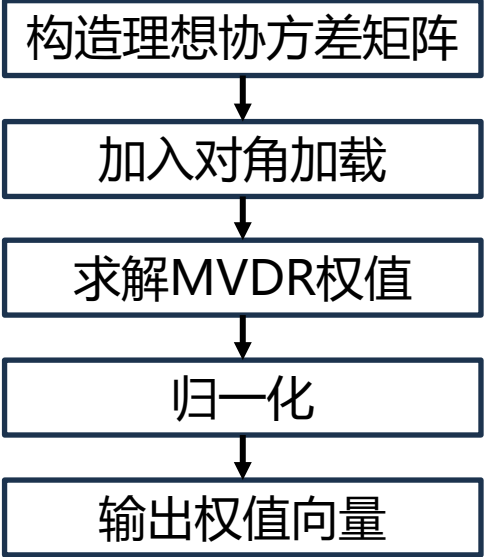
### 2.4 经典算法复现与性能分析

#### 2.4.1 纯模拟(ABF)



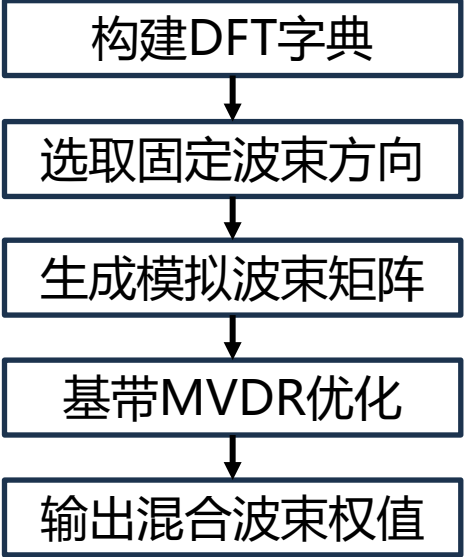
$$\boldsymbol{w} = \frac{1}{\sqrt{N}} \boldsymbol{a}(\theta)$$

#### 2.4.2 纯数字MVDR



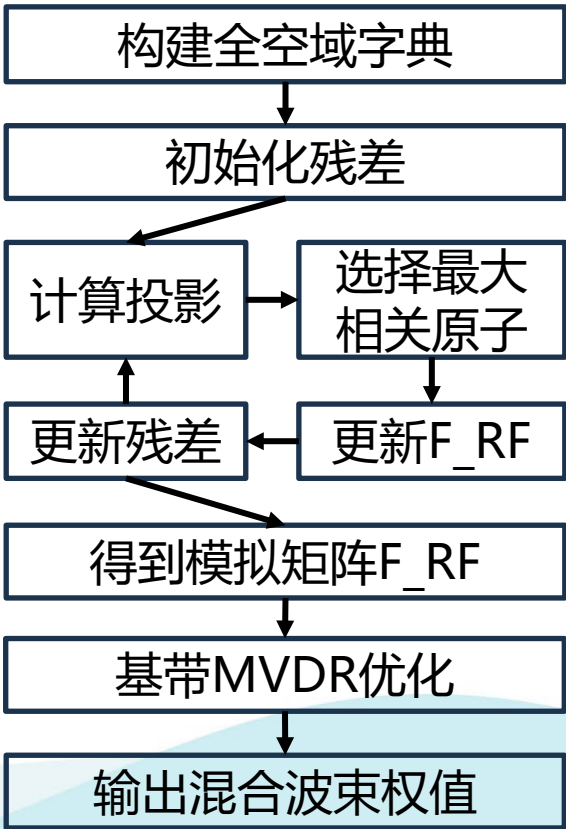
$$\boldsymbol{w} = \frac{\boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{a}(\theta_0)}{\boldsymbol{a}^H(\theta_0) \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{a}(\theta_0)}$$

#### 2.4.3 DFT-HBF



$$\boldsymbol{w} = \frac{\boldsymbol{F}_{RF}^{DFT} \boldsymbol{f}_{BB}}{\|\boldsymbol{F}_{RF}^{DFT} \boldsymbol{f}_{BB}\|}$$

#### 2.4.4 OMP-HBF

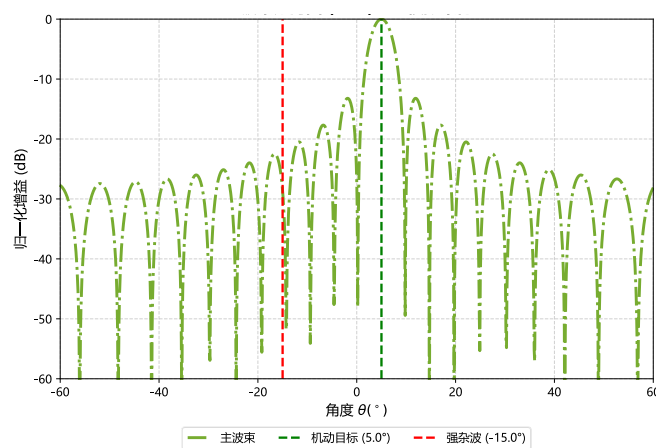




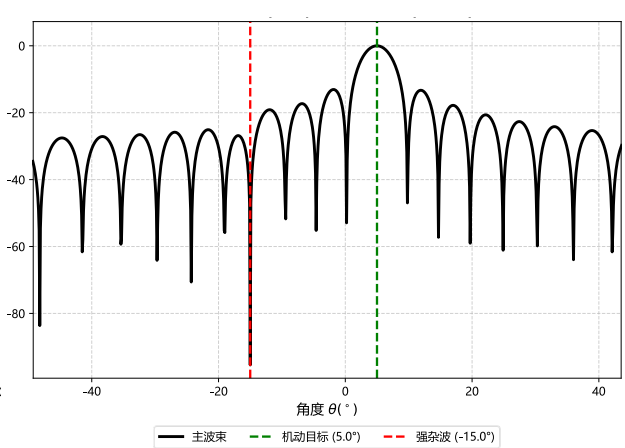
2 本文所完成的工作总结

2.4 经典算法复现与性能分析（方向图）

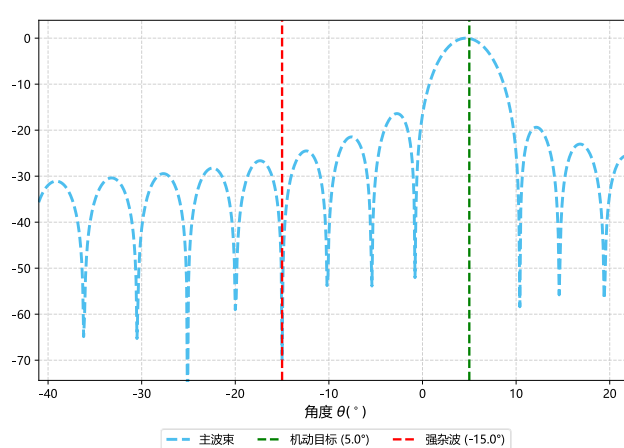
2.4.1 纯模拟ABF



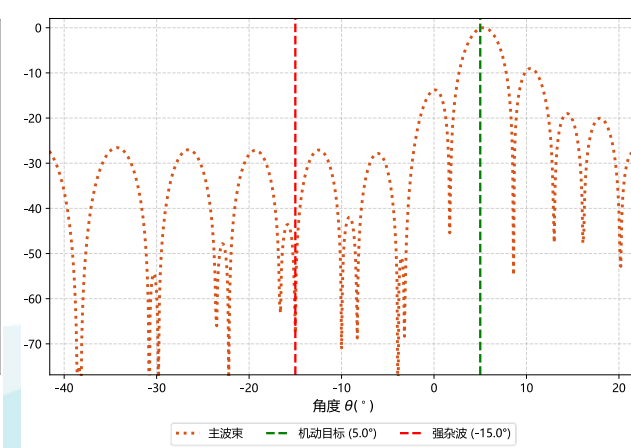
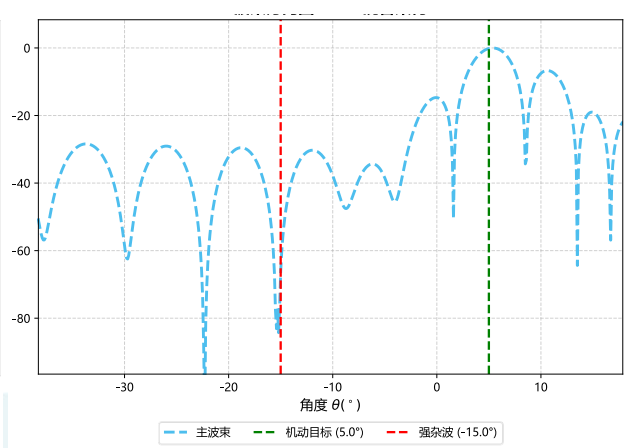
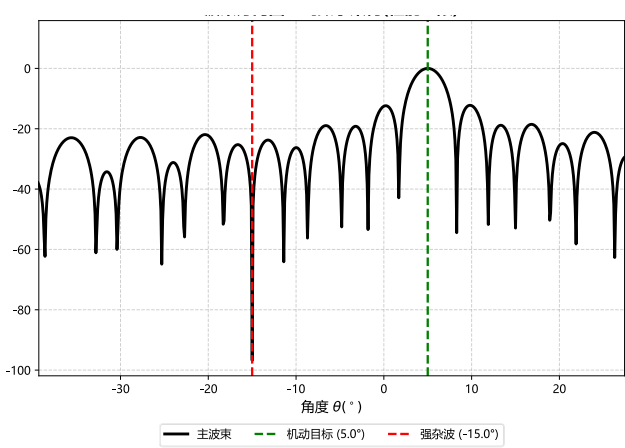
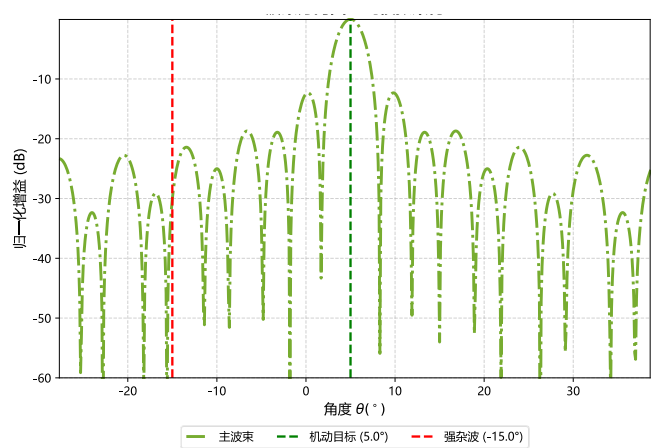
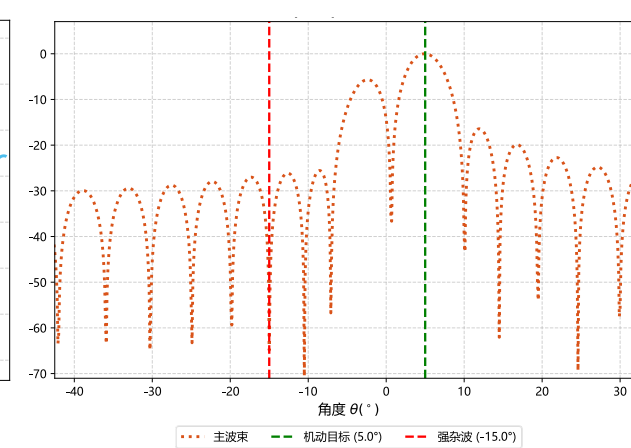
2.4.2 纯数字MVDR



2.4.3 DFT-HBF



2.4.4 OMP-HBF



性能下界

性能上界

低复杂度基线

稀疏重构基线

## 2 本文所完成的工作总结

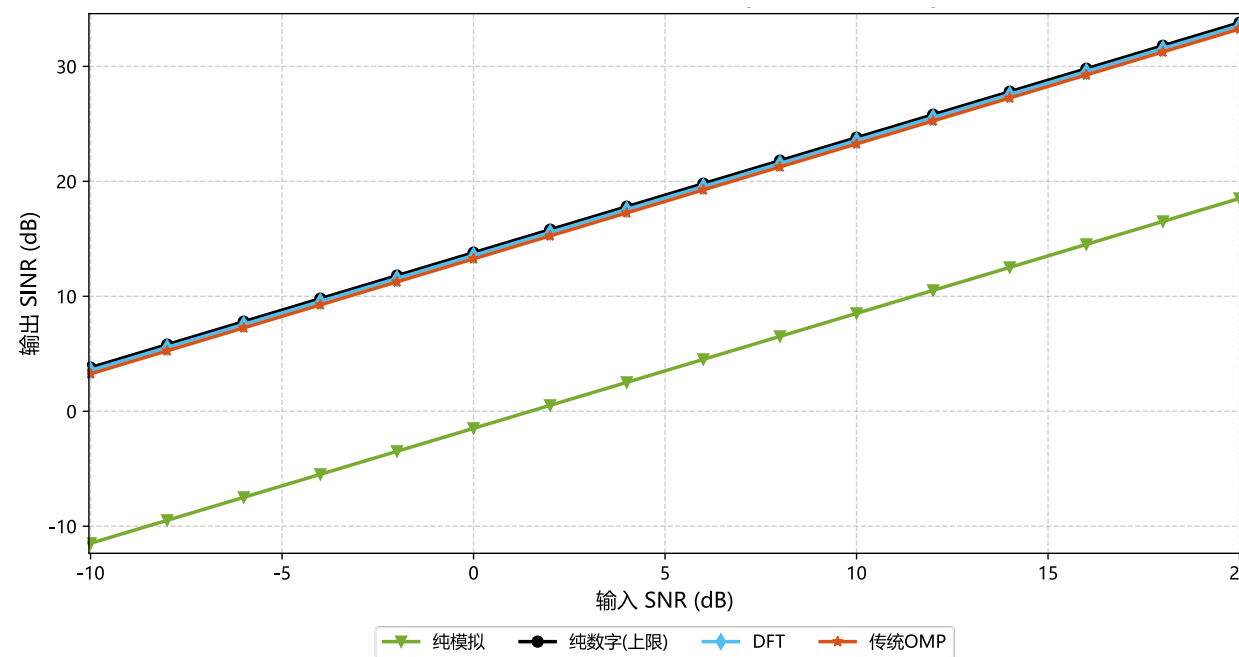
### 2.4 经典算法复现与性能分析 (SINR图)

#### 2.4.1 纯模拟ABF

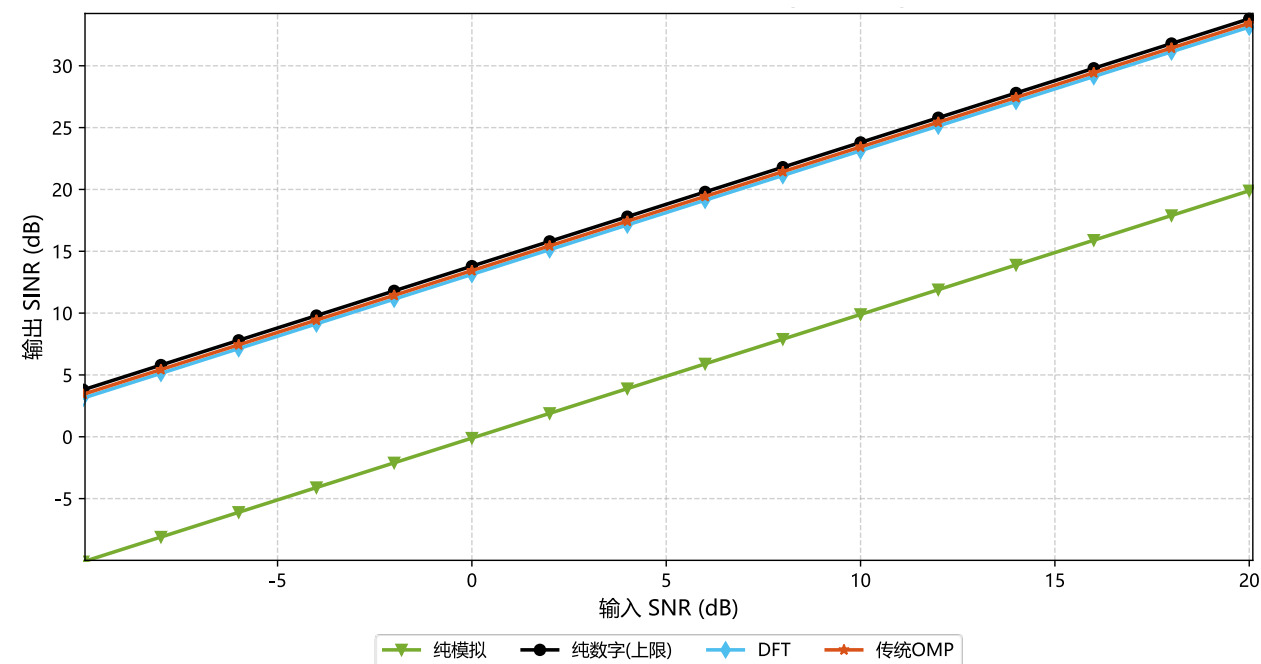
#### 2.4.2 纯数字MVDR

#### 2.4.3 DFT-HBF

#### 2.4.4 OMP-HBF



ULA



NULA



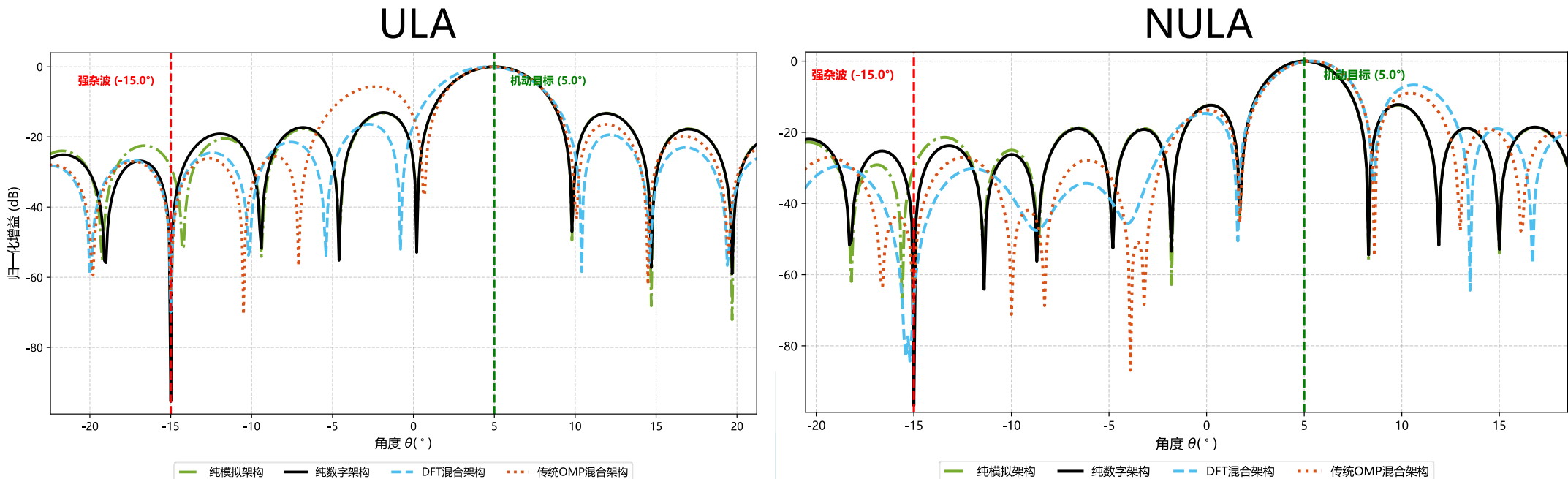


## 2 本文所完成的工作总结

### 2.4 经典算法复现与性能分析（局限性）

| 2.4.1 纯模拟ABF | 2.4.2 纯数字MVDR | 2.4.3 DFT-HBF | 2.4.4 OMP-HBF |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 结构最简单        | 干扰抑制效果最好      | 算法复杂度较低       | 提高了灵活性        |
| 但干扰抑制效果最差    | 但硬件代价高        | 但固定码本限制了灵活性   | 但全空域搜索复杂度高    |

**改进目标：** 结合DFT的思路，基于OMP混合波束成形算法进行优化改进

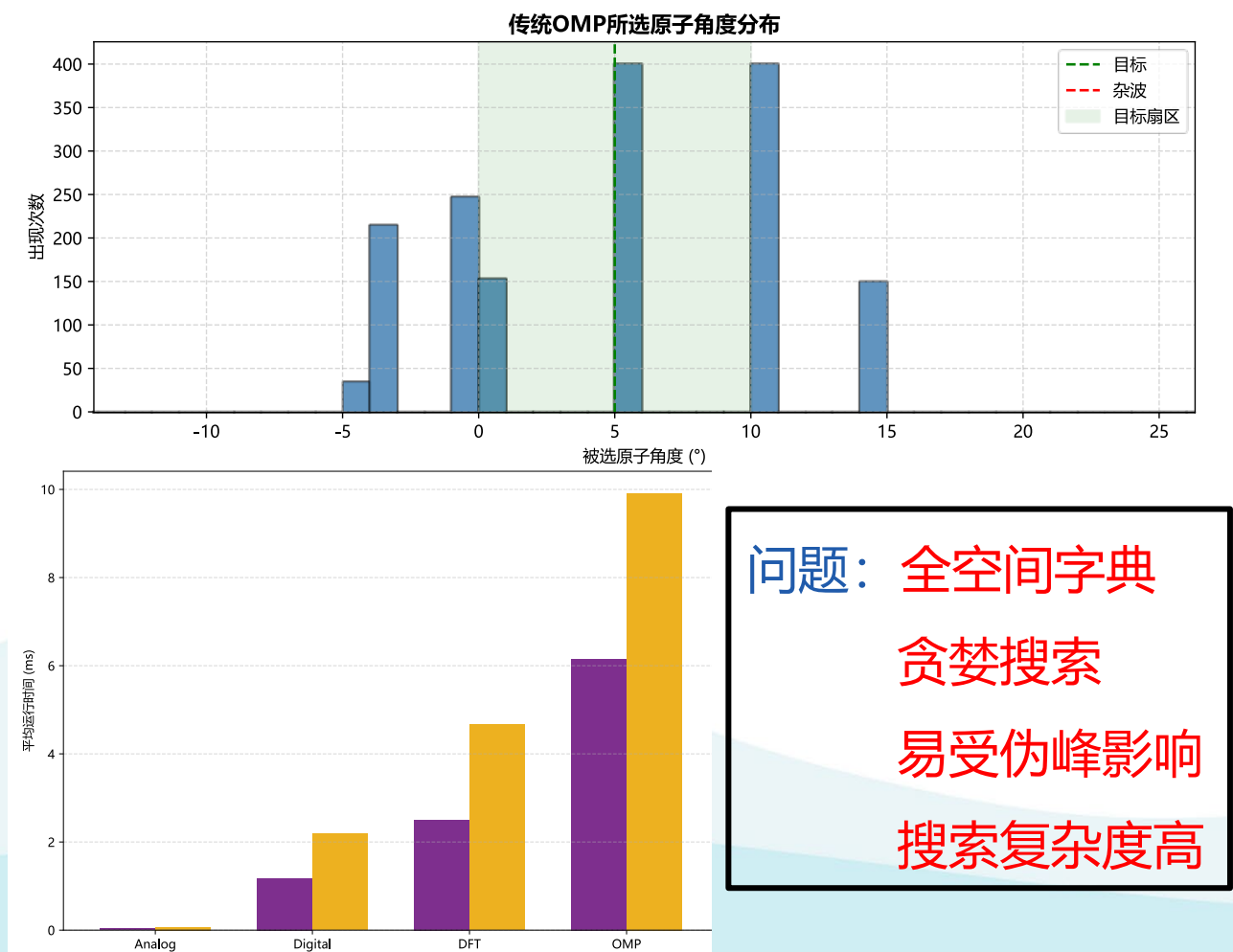




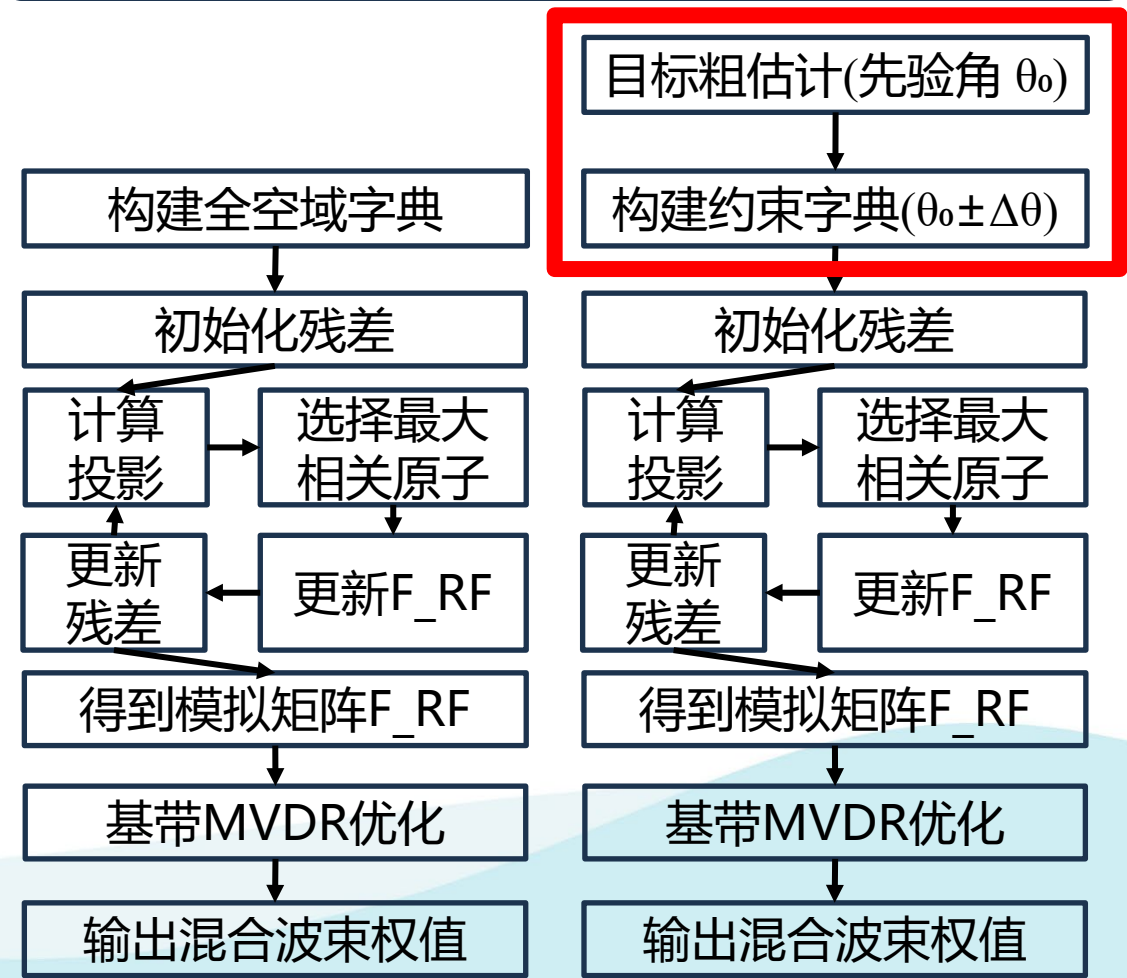
## 2 本文所完成的工作总结

### 2.5 算法优化改进尝试

#### 2.5.1 为什么要针对OMP-HBF算法进行改进



#### 2.5.2 TSC-OMP与OMP的对比

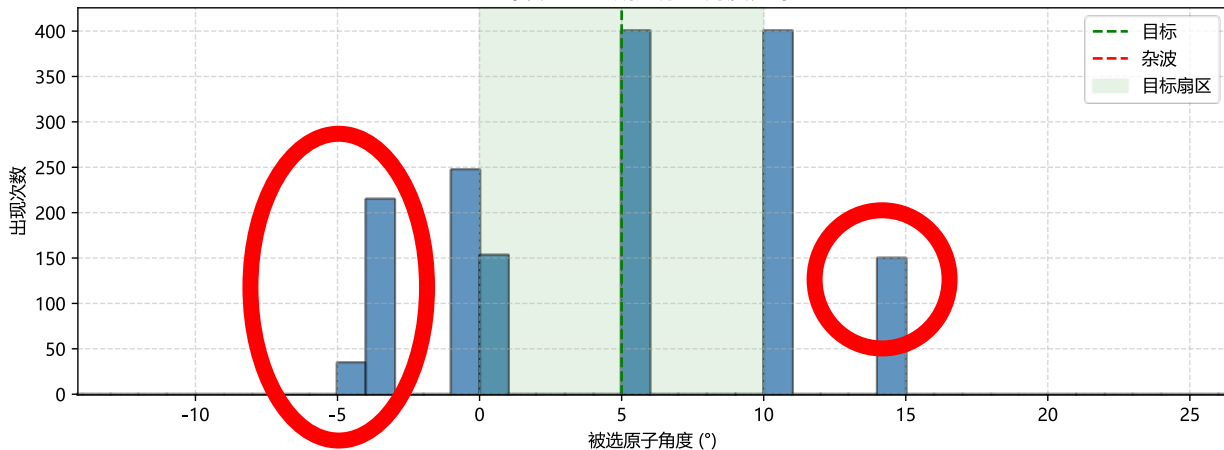


## 2 本文所完成的工作总结

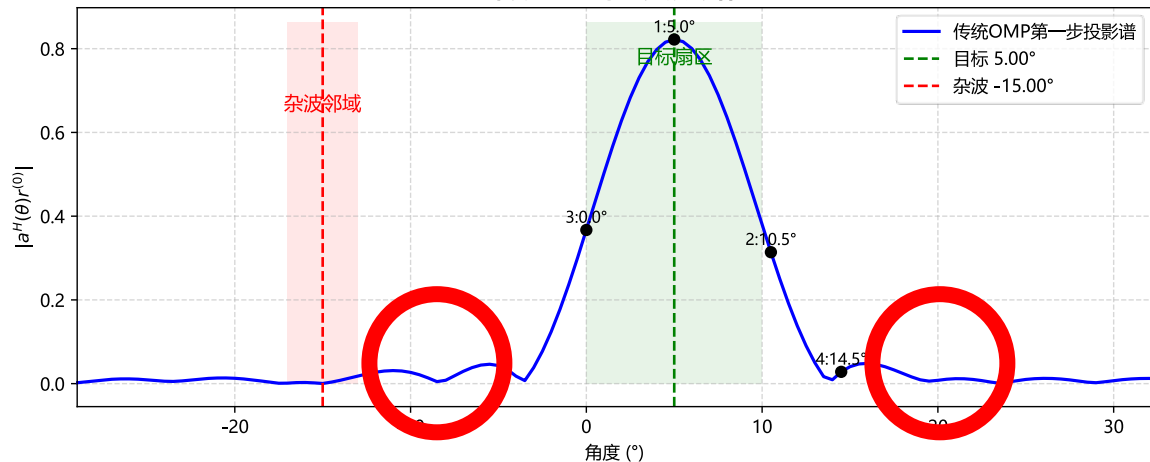
### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.1 分析1：风险抑制能力——改进算法是否降低了伪峰风险？

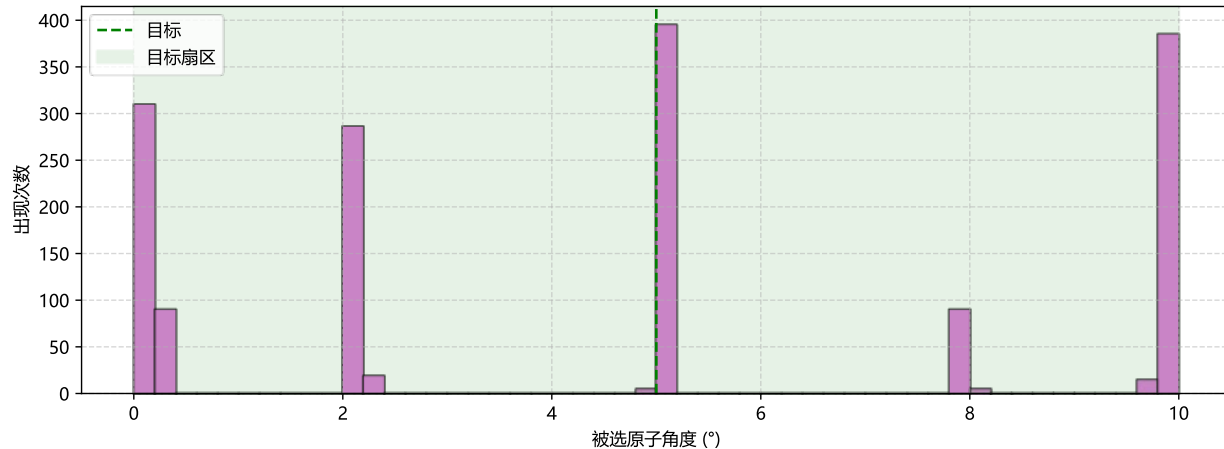
传统OMP所选原子角度分布



传统OMP第一步投影谱



TSC-OMP所选原子角度分布



结论：

传统OMP全空间投影谱中伪峰可能进入候选集

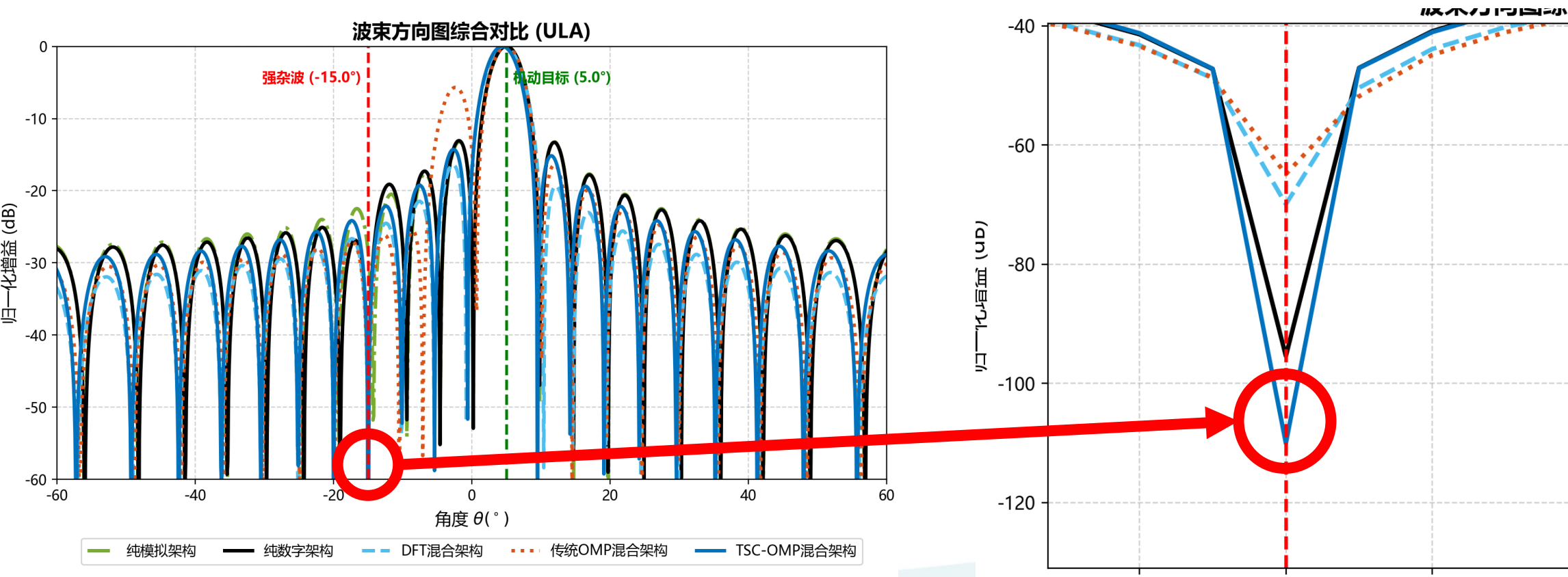
TSC-OMP局部字典约束降低扇区外原子进入概率



## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.2 分析2：波束方向图——改进的算法对干扰抑制的能力如何？

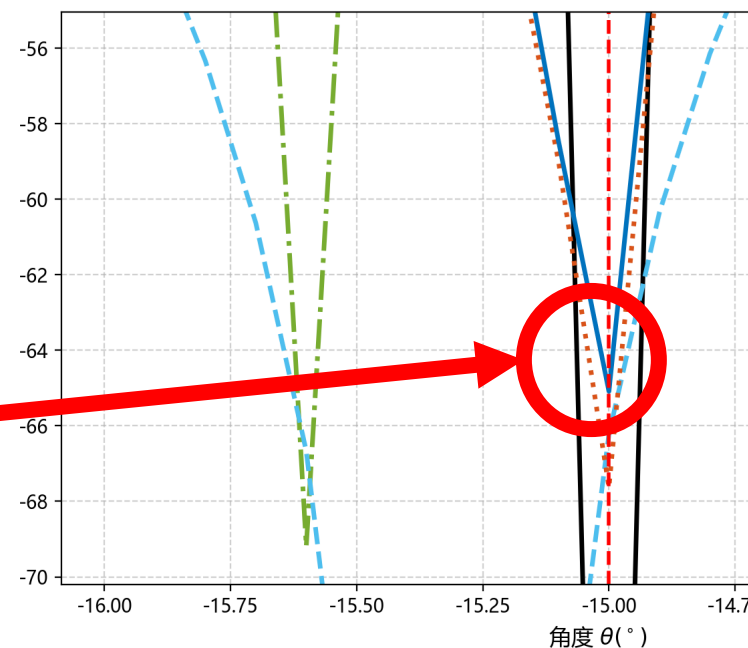
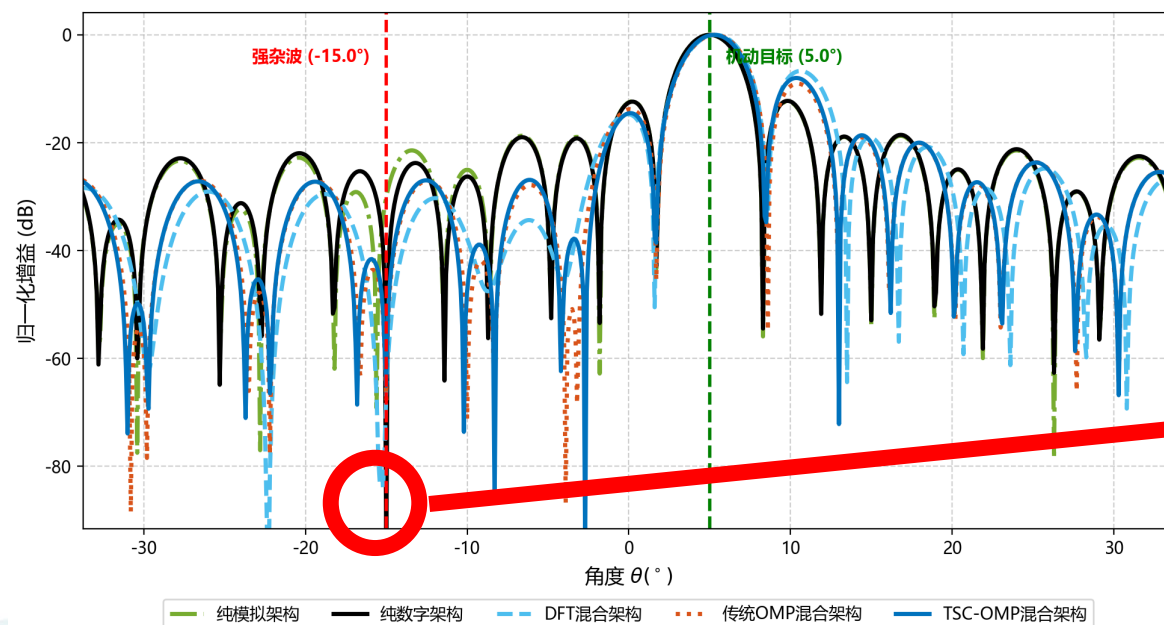


ULA下，TSC-OMP在干扰处打出了约-110dB的凹陷

## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.2 分析2：波束方向图——改进的算法对干扰抑制的能力如何？



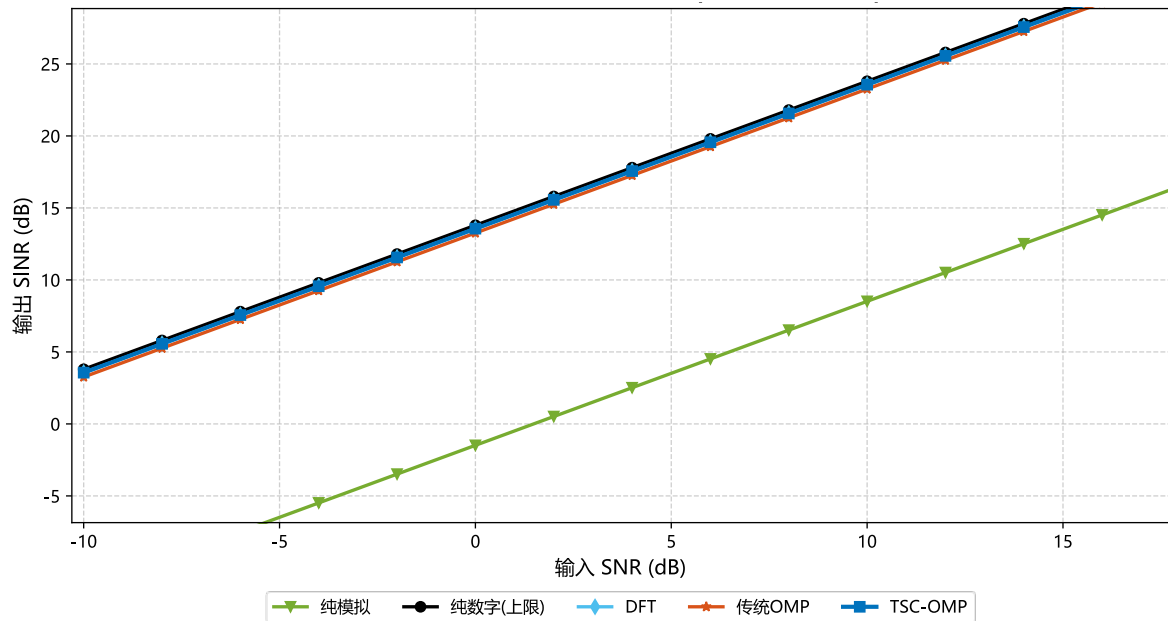
NULA下，TSC-OMP在干扰处打出了约-65dB的凹陷

**结论：TSC-OMP在两类阵列条件下均能实现目标方向能量聚焦和强干扰方向零陷抑制，但零陷深度也更依赖阵元位置分布（ULA条件下明显效果更好）**

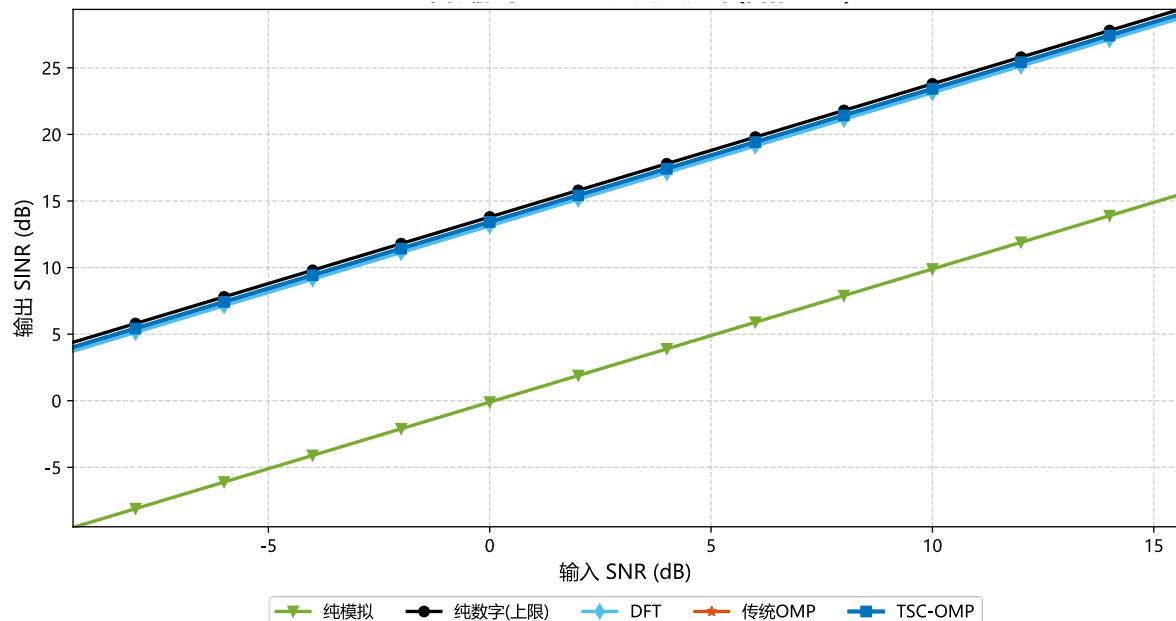
## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.3 分析3：输出SINR分析——改进算法的模拟射频矩阵的构造质量如何？



ULA



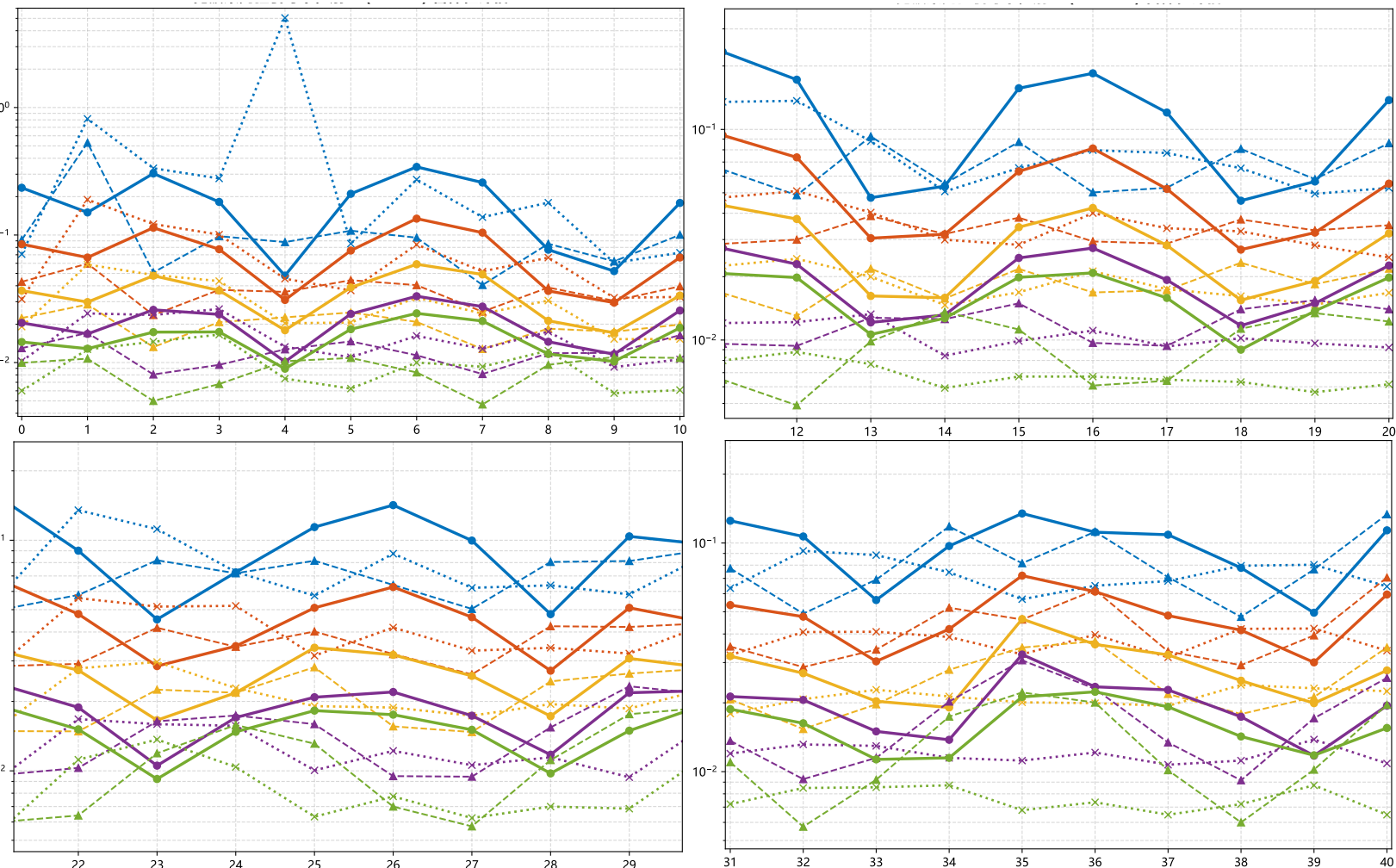
NULA

**结论：TSC-OMP改善了模拟射频矩阵的构造质量，使有限RF链在模拟域内更加集中地服务于目标附近的有效方向，从而提高了混合波束成形的整体抗干扰性能。**

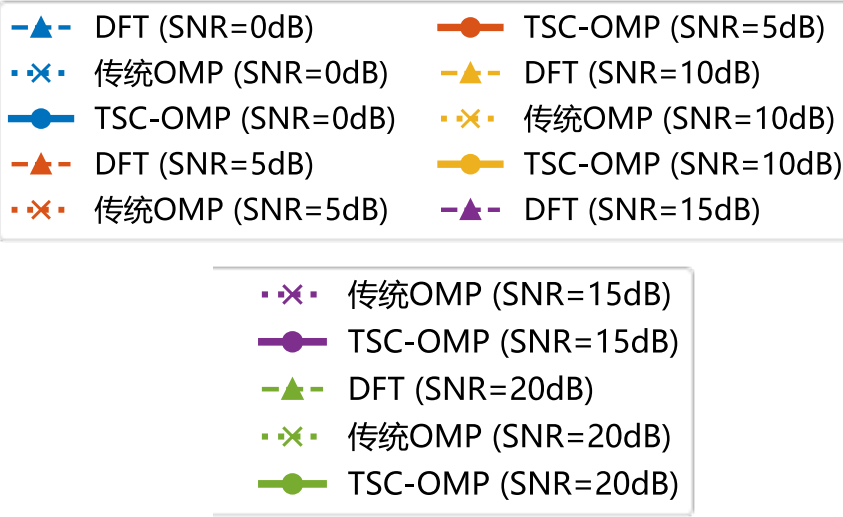
2 本文所完成的工作总结

2.6 改进算法的性能分析

2.6.4 分析4：机动目标测角RMSE分析——改进算法的测角精度如何？



机动目标0~40°，阵列ULA

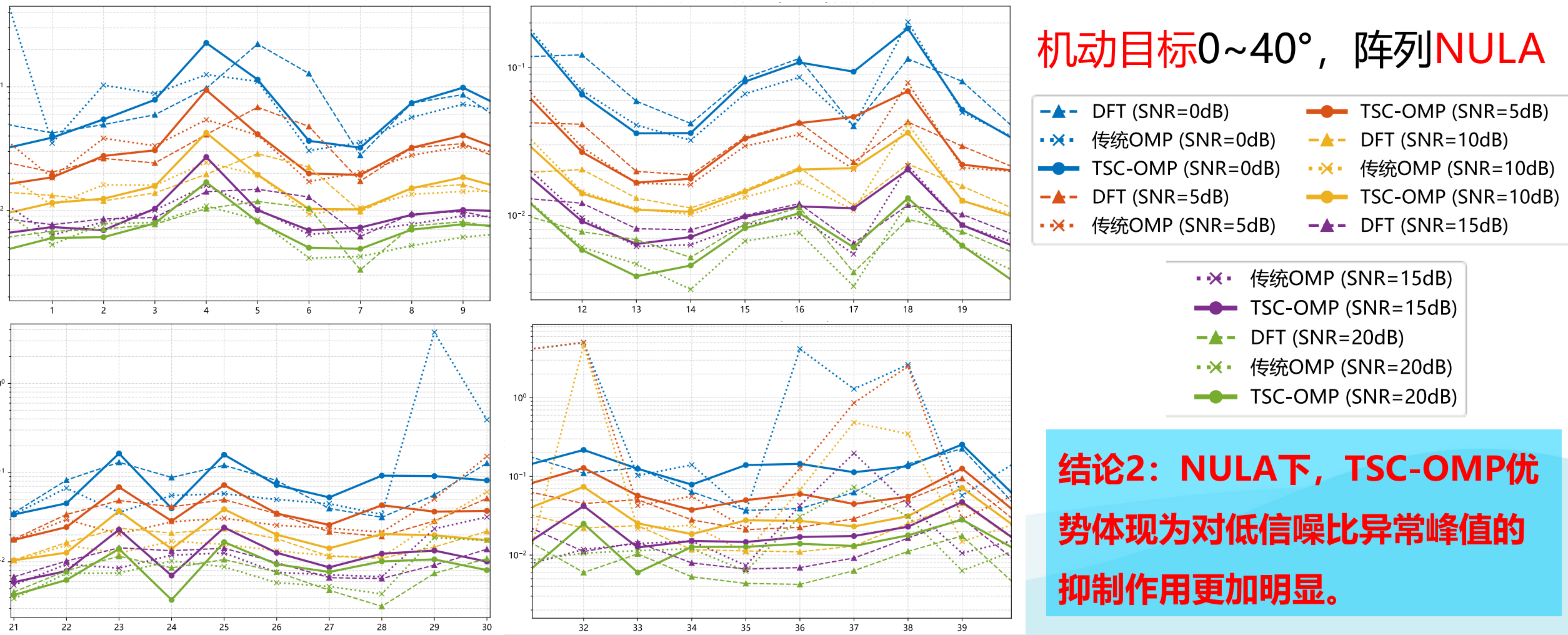


结论1：ULA下，TSC-OMP的优势主要体现为误差曲线更平滑、整体RMSE更低

2 本文所完成的工作总结

2.6 改进算法的性能分析

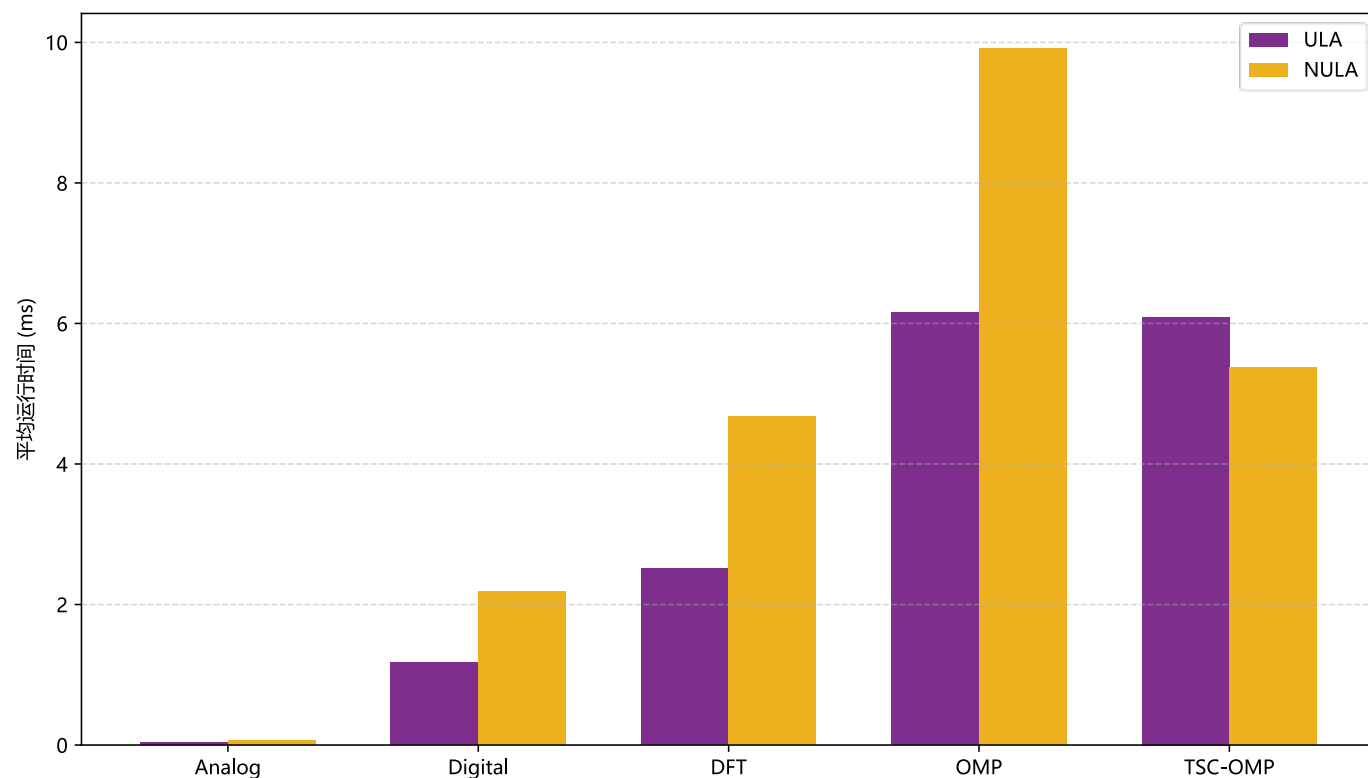
2.6.4 分析4：机动目标测角RMSE分析——改进算法的测角精度如何？



## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.5 分析5：复杂度分析



**结论：TSC-OMP的运行时间低于传统OMP，却仍高于DFT和纯数字架构，其复杂度改善主要体现在相对于OMP搜索框架的优化，而不是对所有架构都具有最低计算代价。**

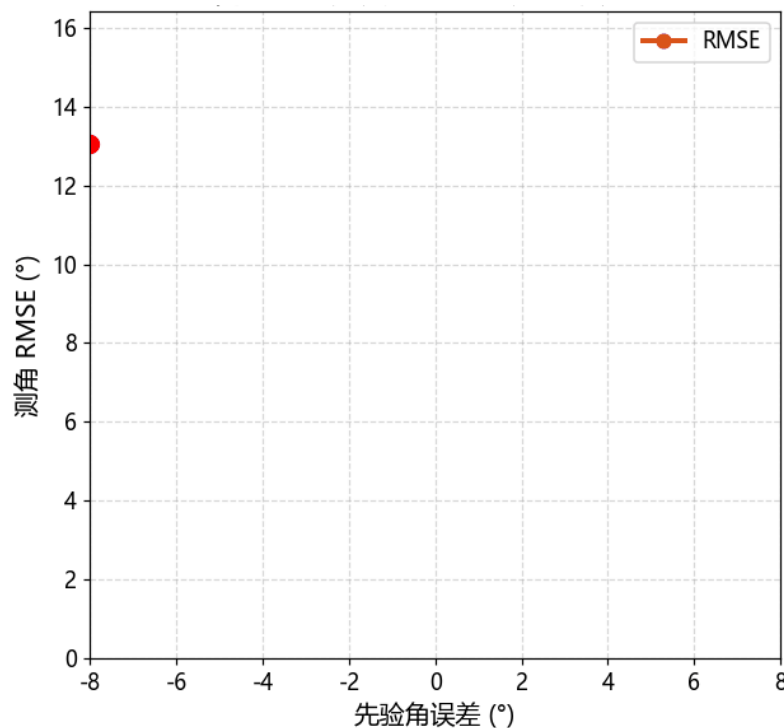
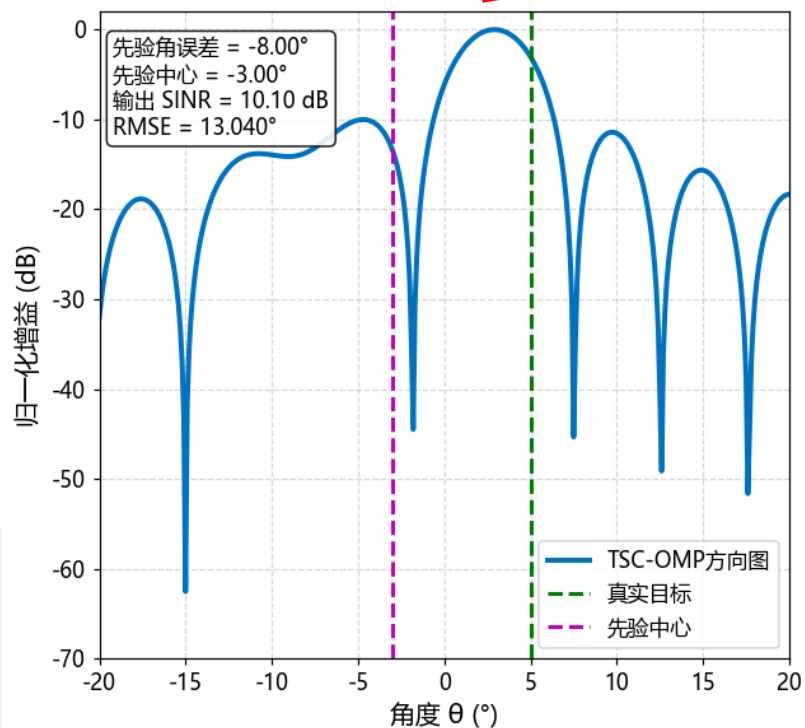
## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.6 分析6：改进算法的局限性分析

##### 对先验信息的依赖

TSC-OMP建立在粗先验的基础上，导致了该局限



**结论1：TSC-OMP的局限之一在于——越依赖先验，先验错了的时候，就越容易“找错地方”。**

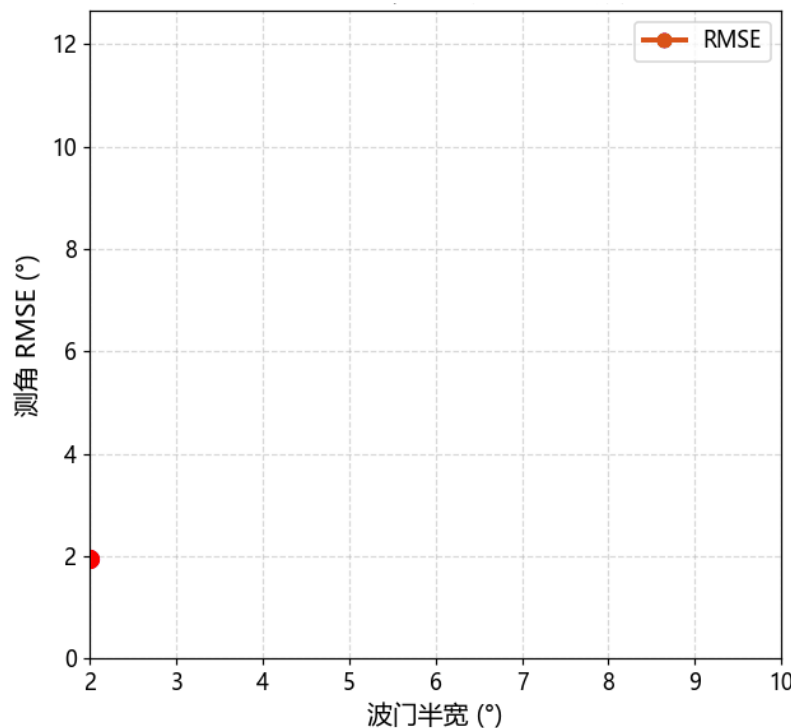
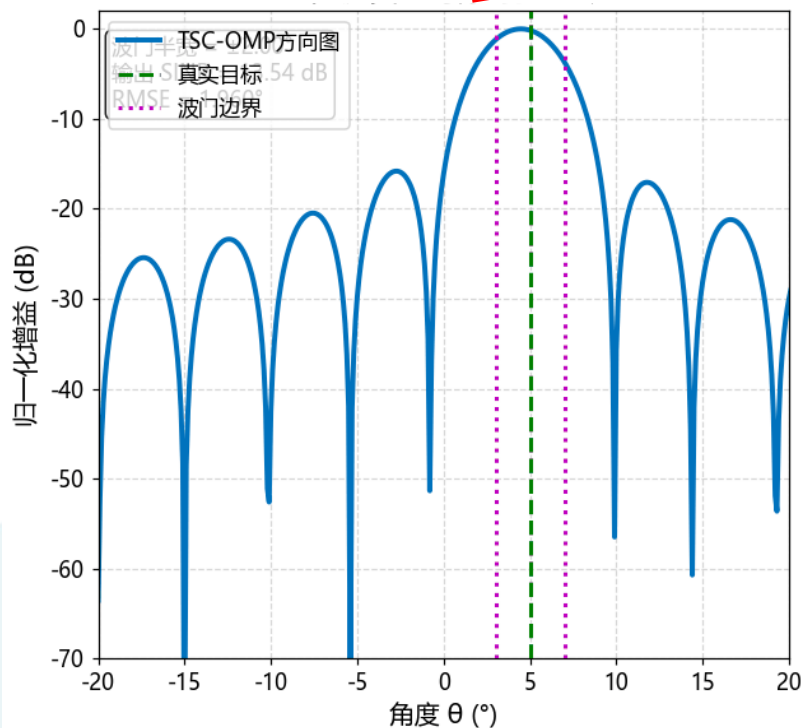
## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.6 分析6：改进算法的局限性分析

##### 对波门宽度的敏感度

TSC-OMP波门过窄/宽都会导致性能下降



**结论2：波门太窄时，目标偏一点，局部字典里没有足够好的原子来表示真实目标，性能就掉下去。波门太宽时，候选原子变多，搜索重新接近传统OMP的全空间搜索特征。**

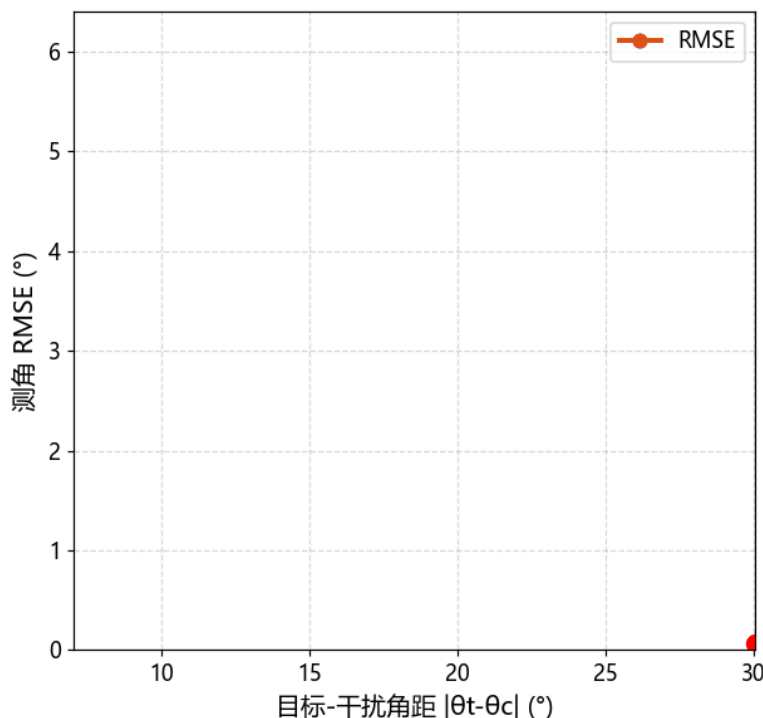
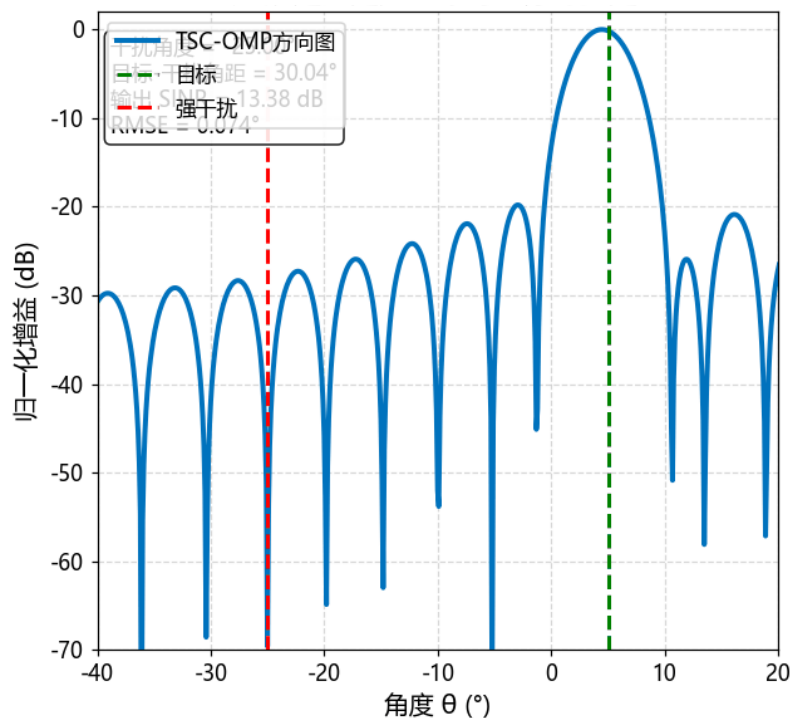


## 2 本文所完成的工作总结

### 2.6 改进算法的性能分析

#### 2.6.6 分析6：改进算法的局限性分析

##### 强干扰逼近时的性能退化

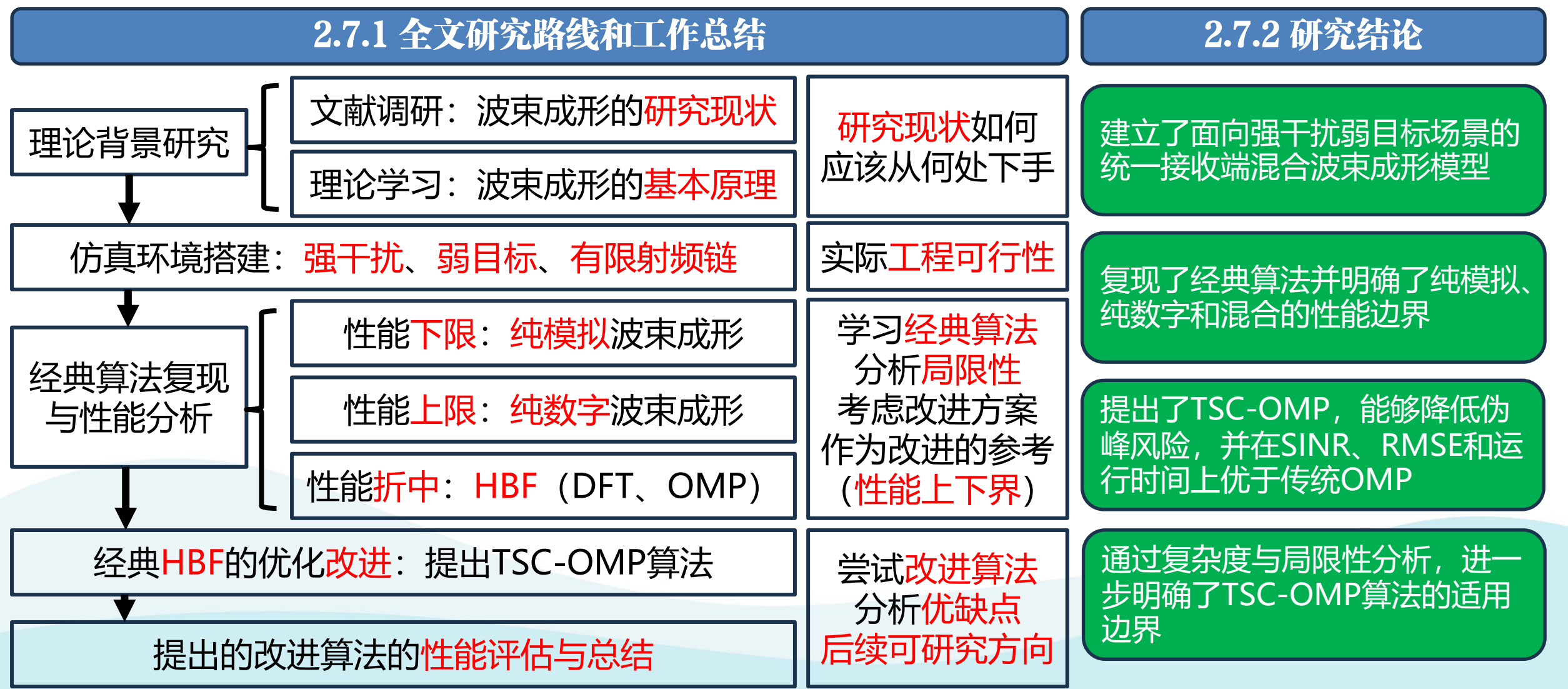


**结论3：在干扰和目标离得原来越近时，目标和干扰在角度上越来越难分，低维数字域求解更容易不稳定，导致了性能退化。**



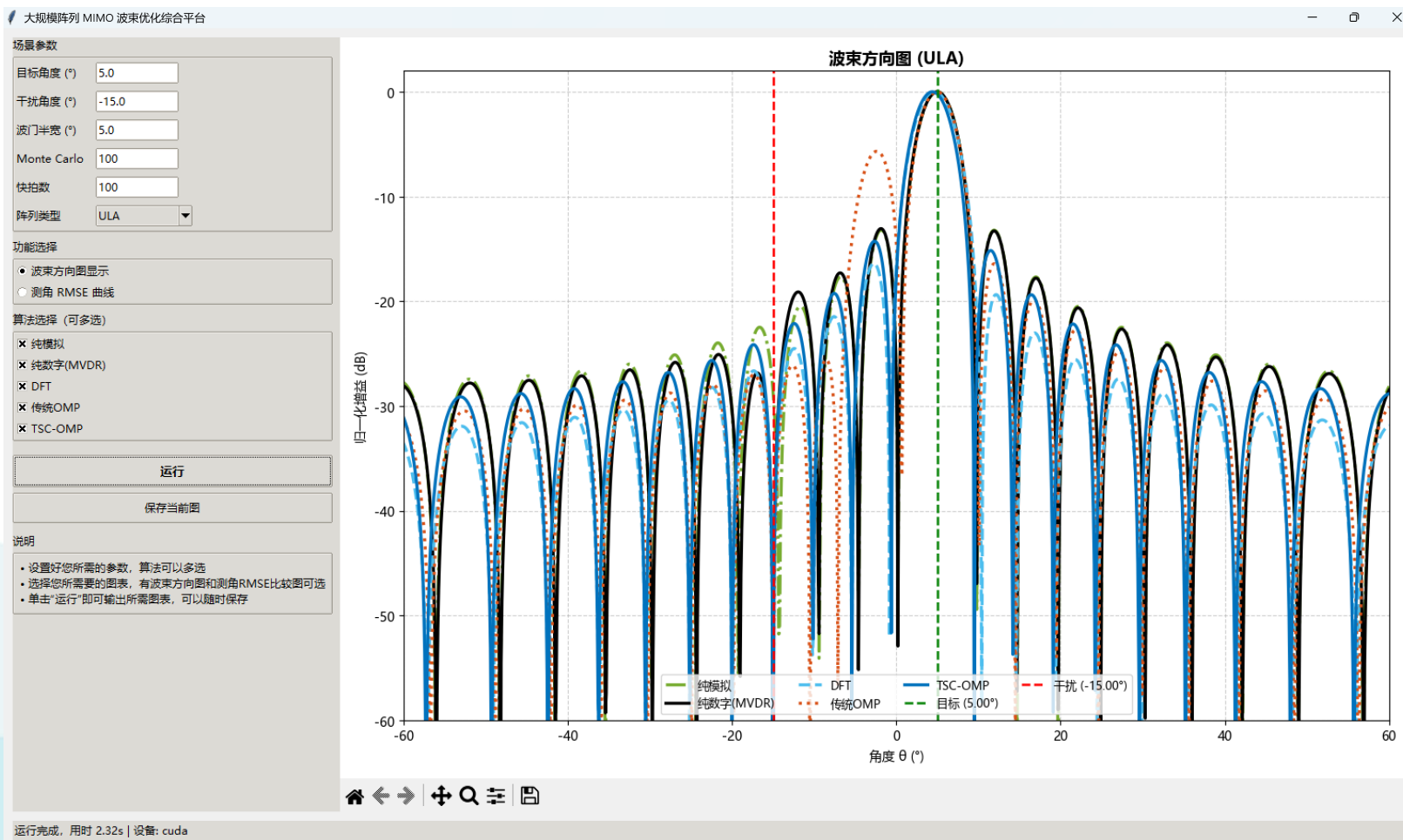
## 2 本文所完成的工作总结

### 2.7 全文工作总结



## 3 本文完成的其他工作

### 仿真平台的软件化（对前述Python的软件化封装）





谢谢  
THANKS