

紫外无线光通信关键技术与应用

国防科技大学信息通信学院 黎飞宇

联系方式：13121927691

个人情况简介



➤ 基本信息:

出生日期: 1994/09 籍贯: 江西赣州

➤ 学术经历:

2011-2015, 重庆邮电大学 通信工程学院通信工程专业 本科

2016-2021, 北京邮电大学 信息光子学与光通信学院 电子科学与技术 硕博

2021-至今, 国防科技大学信息通信学院 讲师

➤ 科研方面:

研究方向: 紫外光无线保密通信、光隐蔽安全通信 (微波光子、量子)

关键技术: 物理层链路、信号处理和MIMO技术等

目录

CONTENTS



研究背景及进展



项目组相关工作



应用问题及思考

1.1 研究背景

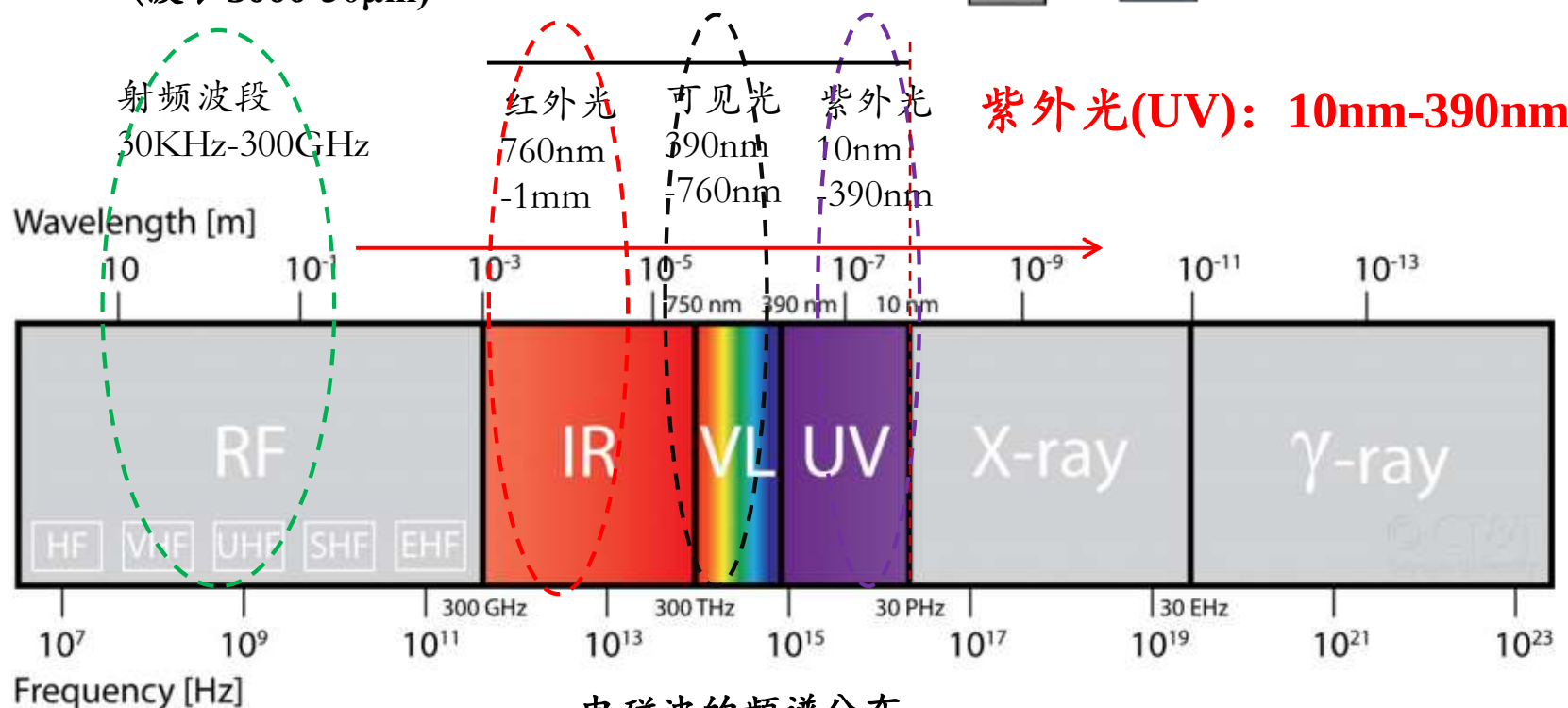
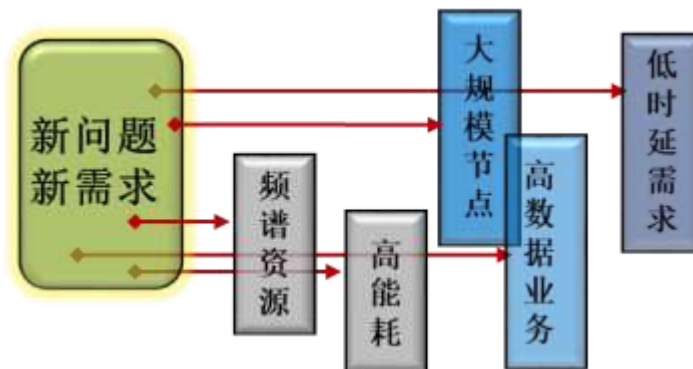
□ 无线通信的频谱分布

2/3/4G波段:800-2600MHz

5G波段:2.6-4.9GHz

毫米波:30GHz-300GHz

太赫兹(THz):0.1-10THz
(波长3000-30 μ m)



1.1 研究背景

□ 无线光通信 (OWC)



IRC直视长距离高速率



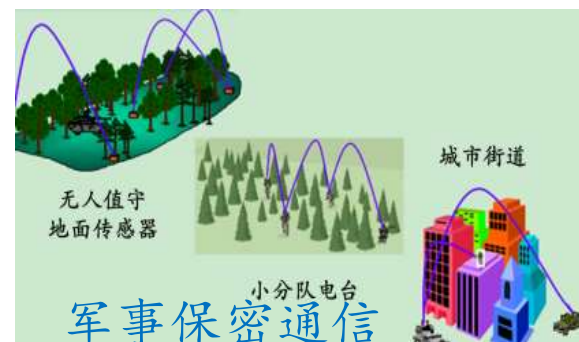
红外卫星通信

VLC灵活易扩展



室内可见光通信

UVC的非视距全地形通信保密

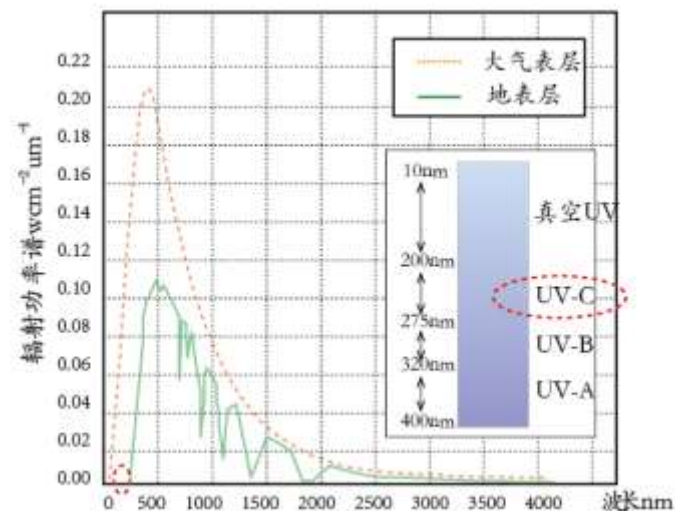
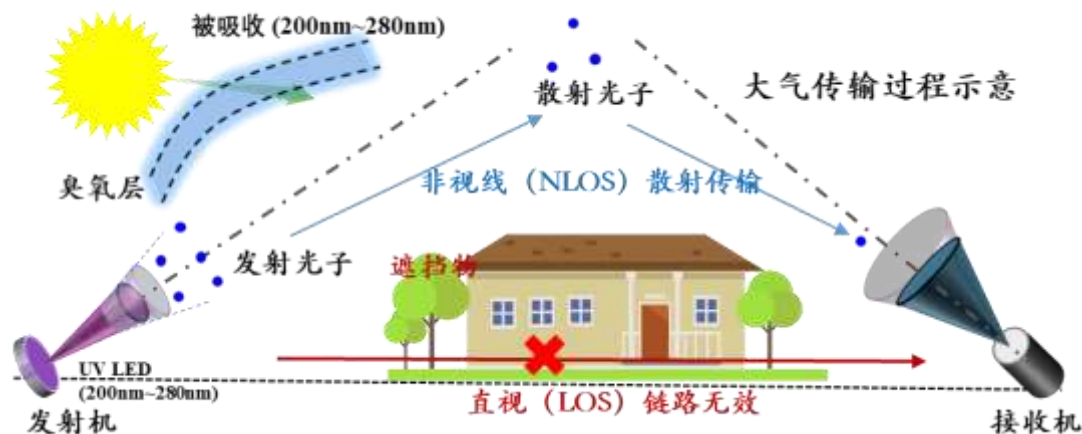


复杂环境紫外光通信

1.1 研究背景

□ 紫外光通信 (UVC) 技术简介及其优势特性

紫外光C波段 (UV-C) : 200nm-280nm		
机制	特性	优点
臭氧层吸收	日盲效应	低背景噪声
散射通信	非视线传输	全地域全天候
强大气吸收	四次方衰减 (短距离)	高保密

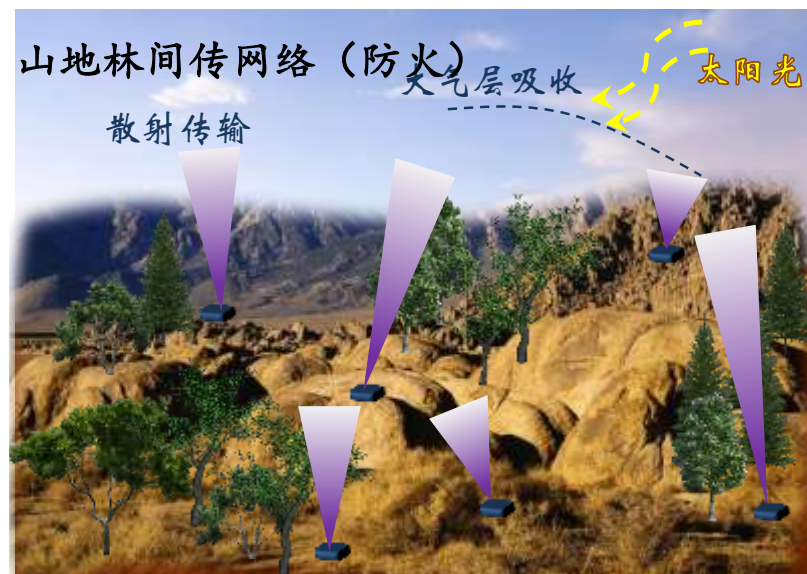
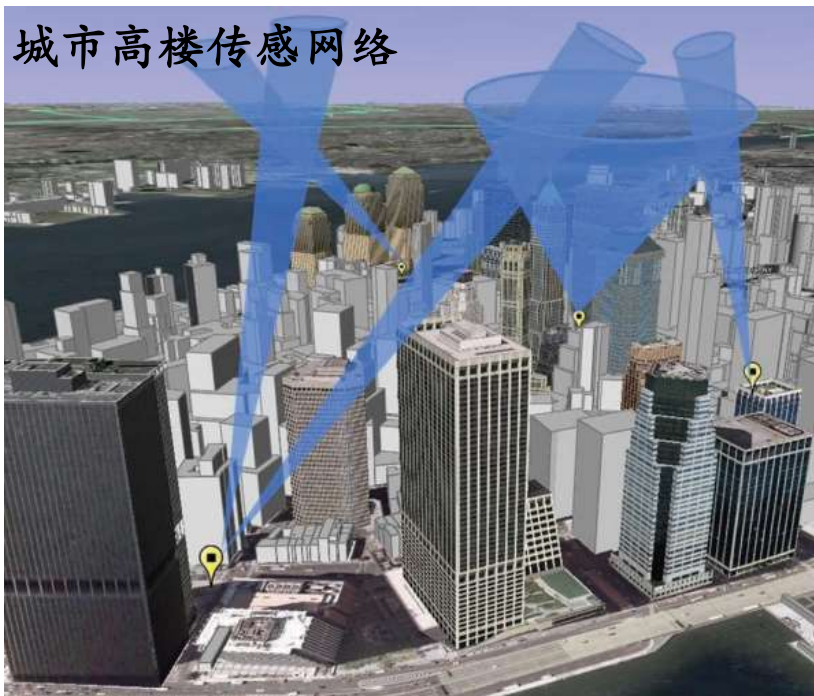


1.1 研究背景

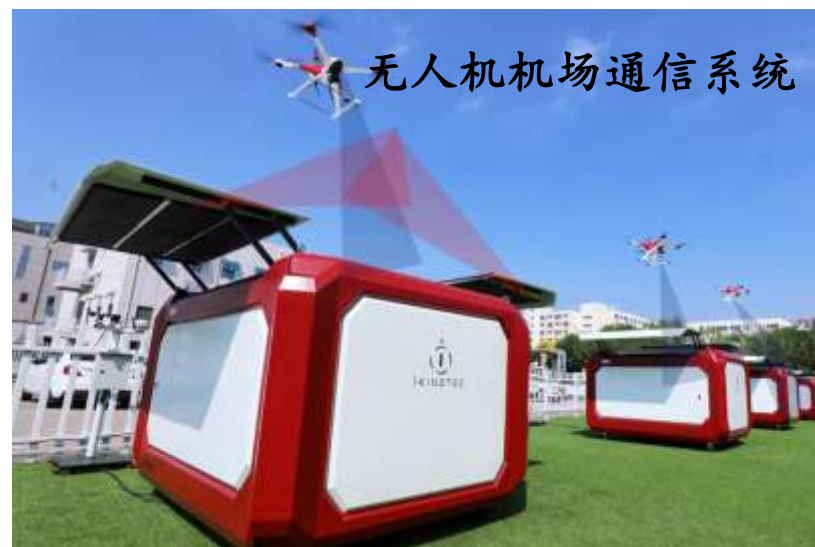
□ 应用场景 商用民用

- ❖ 无人机电力线紫外电晕的漏电检测
- ❖ 工厂悬浮物环境污染监测
- ❖ 无人机辅助降落
- ❖ 及其它潜在的应用场景

城市高楼传感网络



无人机机场通信系统



1.1 研究背景

□ 应用场景 军事保密通信

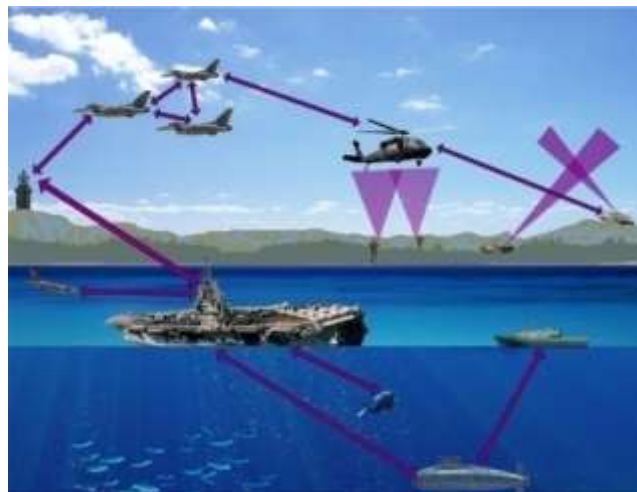
无线电静默或抗电磁干扰的隐秘移动通信

复杂金属腔体内通信
(航母/军舰/潜艇)

舰面调度
野战车
队反恐
小队
机群编队



陆海空多部队协同



1.2研究进展

□ 国外研究

- 从上世纪60年代中、后期，美国军方根据现代战争的实际要求，最早开始了紫外光通信的原理和基础研究
- 70~80年代，美、日、法、荷、德、前苏联等国开展了大量的实验研究，LOS自由空间最大通信距离达到3km，NLOS可达到1km。
- 海军装备：GTE公司2000年为美军研制出在聚光方式下通信距离为2~10km、数据速率为4800bit/s时，误码率达到 1×10^{-6} 的紫外光通信系统。

1.2研究进展

- 2000年以后，美国DAPAR（国防预先研究计划局）启动了两个针对紫外器件的国家计划：SUVOS（半导体紫外光源）和DUVAP（半导体光电探测器）。

➤ 开始采用固体器件，通信距离在数百米级，速率百K级

机构\参数	时间	紫外光源	紫外探测器	距离	信息传输速率	误码率
美国麻省理工大学	2006	紫外LED阵列 波长：275nm	通道倍增管（CPM）；APD	NLOS: 100m	100kbps	6×10^{-5}
美国加利福尼亚大学	2010	紫外LED阵列 波长：259nm； 功率：50mW；	Perkin Elmer 公司 APD；日本滨松倍增管	NLOS: 100m	400kbps	1×10^{-5}
英国航太系统公司	2009	紫外LED阵列 波长：270nm； 功率：411mW；	photomultiplier tube（PMT）	LOS: 600m； NLOS: 80m	28.8kbps	1×10^{-5}
雅典大学	2014	50mW, 250nm	-	NLOS: 100m	10kbps	1×10^{-3}

- 截止2023年可考文献，近年国外还有其他国家相关研究机构开展研究

➤ 包括：英国、土耳其、以色列和沙特阿拉伯等

1.2 研究进展

□ 国内研究

- 北京理工大学1999年研制出国内第一套自由空间紫外光通信LOS原理样机，城市环境下直视通信方式信号传输距离1.1km
- 2002年以后，国防科技大学也开始了类似的研究，论文显示采用异步串行方式进行数据传输，实现通信距离1.6km
- 2008年北京理工大学与北京邮电大学在“863计划”支持下，开展了紫外光通信技术民用化研究，实现了语音/数据双向通信及组网
- 2019年北京邮电大学与北京理工大学在“国家自然科学基金”和“国防预研项目”支持下，开展了移动高速可靠通信系统的研究，实现400m链路速率1Mbps。
- 截止2023年可考文献，国内还有其他研究单位开展研究
 - 包括：中电集团34所、中国科学院空间科学与应用研究中心、重庆大学、成都电子科技大学、解放军理工大学、上海光机所、海军工程大学、华中科技大学、第二炮兵指挥学院、西安理工、清华大学、西安电子科技大学等

1.2研究进展

□UVC系统性能

❖ UVC NLOS 系统:

发射功率: 5mw-400mw 通信距离: ~1030m

误码率: 10^{-6} - 10^{-3} 传输速率: ~1Mbps

❖ LOS UVC系统:

50cm, 10Gbps

UVC NLOS系统: 通信距离/通信速率/可靠性等

各类紫
外光通
信系统
性能对
比

年份	单位	速率	距离	(N)LOS	光源	探测器	调制	BER
1990	TITAN Systems	1.2 Mbps	1 km	NLOS (2°)	汞氙灯 (25 W)	PMT (17°)	PPM	-
2004	MIT 林肯实验室	2 kbps	80 m	LOS	LED (, 0.9 mW)	PMT	PPM	0.11
2009	BAE SYSTEMS	28.8 kbps	80 m	NLOS	LED (441 mW)	PMT	PPM	10^{-3}
2012	北京邮电大学	2.4 kbps	90 m	LOS	LED (43mW)	PMT (30°)	OOK\PPM	10^{-4}
2014	北京邮电大学	250 kbps	11 m	NLOS (30°)	LED (15 mW)	PMT (30°)	OOK	10^{-3}
2017	阿卜杜拉国王科技大学	71 Mbps	8 cm	LOS	LED (190 μW)	APD	QAM-OFDM	3.8×10^{-3}
2017	中国科学技术大学	400 kbps	500 m	NLOS (1.15°)	激光器 (,200 mW)	PMT	OOK	10^{-5}
2018	中国科学技术大学	1 Mbps	1 km	NLOS (1°)	激光器 (120 mW)	PMT	OOK	-
2019	斯特拉斯克莱德大学	1 Gbps	30 cm	LOS	LED (196 μW)	APD	QAM-OFDM	3.8×10^{-3}
2021	复旦大学	2 Gbps	50 cm	LOS	LED (854 μW)	APD	QAM-OFDM	3.8×10^{-3}
2021	中国科学院大学	300 kbps	200 m	LOS	LED (40mW)	PMT	OOK	8.8×10^{-3}
2022	中国科学技术大学	20 Mbps	20 m	LOS	LED (4 mW)	PMT	OOK	0.02
2022	斯特拉斯克莱德大学	10 Gbps	50 cm	LOS	LED (0.38 mW)	APD	QAM-OFDM	3.8×10^{-3}
2022	清华大学	500 kbps	75 m	LOS	LED (15mW)	PMT (30°)	OOK	3.8×10^{-3}

1.2研究进展

□光源

三类光源:

低/中压汞灯或氙气闪光灯: 早期UVC

激光器 (LD) : 长距离 (短高速) LOS UVC

发光二极管(LED): 百米量级 NLOS UVC

UV LED: 具有尺寸小、噪声低、寿命长、低压驱动以及开/关的高灵敏度带来的高调制带宽等优点

波长 (nm)	功率输出 (mw)	驱动电流 (mA)
265	12	350
265	30	350
265	90	350
265	150	850
275	30	350
280	25	350
285	30	350
285	45	350

深紫外LED输出功率对比表

阵列式LEDs



高功率发射光源 (W量级)



1.2研究进展

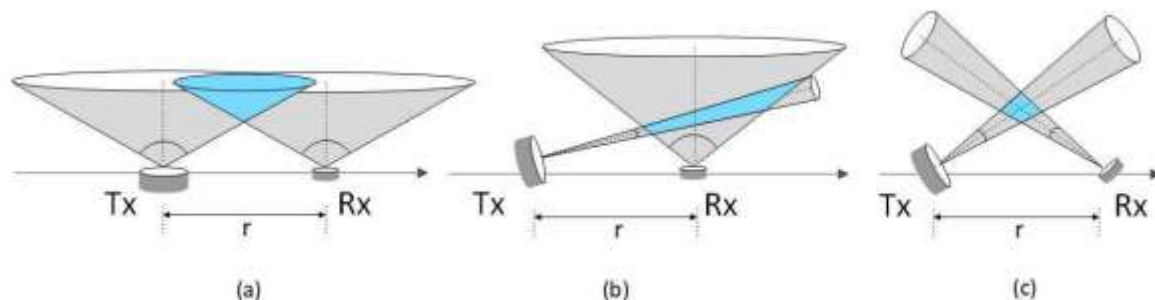
□ 探测器

分类	优点	缺点	适用场景
APD	量子效率高 体积小 工作电压低 使用方便	增益低 暗电流 噪声大 (技术不成熟)	数米范围的 LOS链路 (未来趋势)
CPM	可成像 探测灵敏度高 角分辨率高	产量低 价格昂贵 (实用性较差)	高性能场景 (应用研究少)
PMT	稳定性高 响应速度快 弱光信号灵敏 高增益	体积大 功耗大 工作电压高 价格贵	百米到数千米的NLOS弱 光子检测场景 (主要使用)

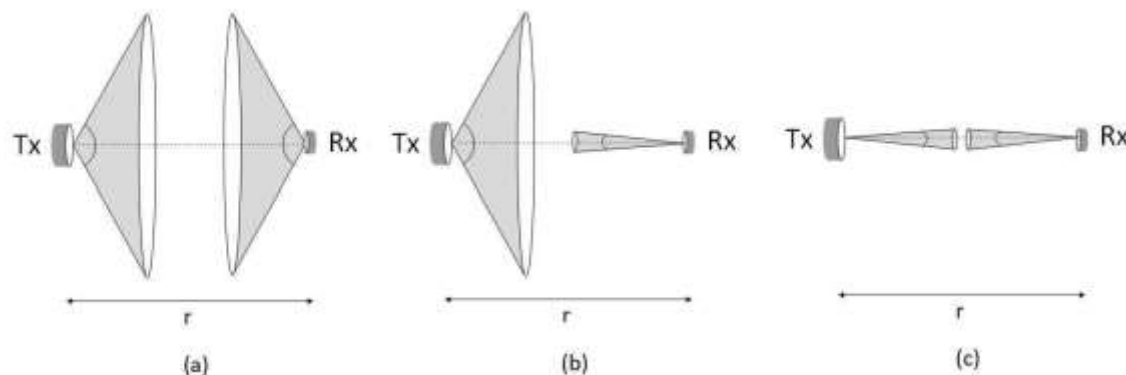
1.2研究进展

□ 信道链路模型

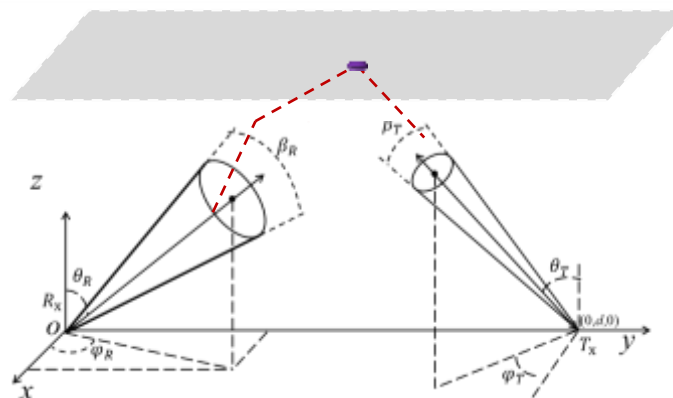
① NLOS链路：能量需求
↑ 对准需求↓、带宽↑



② LOS链路：能量需求↑
对准需求↓、带宽↑



③ 弥散直视链路和反射辅助链路等



1.2研究进展

□信道链路模型

分类	原理	适用场景	优缺点分析
解析几何的分析模型	基于空间几何的数学上能量积分表征	单散射模型	严格的数学表征计算简单，需要特殊的参数配置，近似估计适用性差、无法计算多散射的分量
蒙特卡罗数值仿真模型	基于光子大气传输过程概率抽样模拟	适用各种场景（复杂）	适用于各种几何参数配置，准确性高、计算复杂度也高
经验模型与函数近似拟合	实验测量的数据的函数近似拟合	配套的实验平台（获取传输性能的数据）	计算简单快速、相对准确，可推广性差，需要建立庞大的数据库
大气湍流模型	随机大气介质的传输特性分析	远距离大气扰动	分析大气湍流的影响

UVC NLOS信道模型分类及特点对比

1.2研究进展

□ 信号处理

信号调制：IM/DD的UVC一般采用简单易实现的OOK,PPM,副载波的QPSK项目组在硬件平台已实现。

调制类型	调制方式	优点	缺点
基于振幅	OOK	容易实现	性能差，能耗更高
基于时间	PPM	功率效率比OOK更好	峰值功率高，时隙同步
基于时间	DPIM,DH-PIM,DPPM	性能比OOK好，但比PPM差。	实现复杂度高
基于相位	Subcarrier PSK	与OOK和PPM相比，性能提高	信号处理相对复杂
基于波长	SAC	能够对抗码间串扰，提供比OOK更高的速率和更大的范围。	盲段频带窄，对不同波段的紫外光的分离很难实现
基于偏振	Polarization-modulation	有潜力实现比单强度调制系统更高的数据速率。	理论阶段

1.2研究进展

□ 信号处理

性能增强技术

分类	性能增强技术	目的
SIMO 空间分集	EGC	补偿各PMT之间的信道差异，提高系统误码率
	MRC	多抗湍流
信道编码	RS、Turbo、LDPC、Polar编码	增加接收功率，减少码间串扰和误码率 信道纠错（提升系统可靠性）
MIMO技术	空时编码MIMO	增加接收功率，减少码间串扰和误码率
	空间复用MIMO	通信速率的提升
其他	频谱感知与检测相结合	改善传输调度
	光束整形	提高接收信号强度。

1.2研究进展

□ 组网移动：移动性和系统可靠性的冲突，需要针对具体的场景需求配置

分类	特点和优点	缺点
多跳连接	中继传输扩大通信距离简单易实现	移动性差，中断概率高
自组织网络 (ad-hoc)	全向接收、自组织易实现、环境适用性强	移动性中等，全向天线对接收信号的功率要求高
移动覆盖Mesh网络	多天线技术、移动支持性强	多节点，复杂高成本、需要对应的多址接入管理（TDMA、CMDA）

目录

CONTENTS

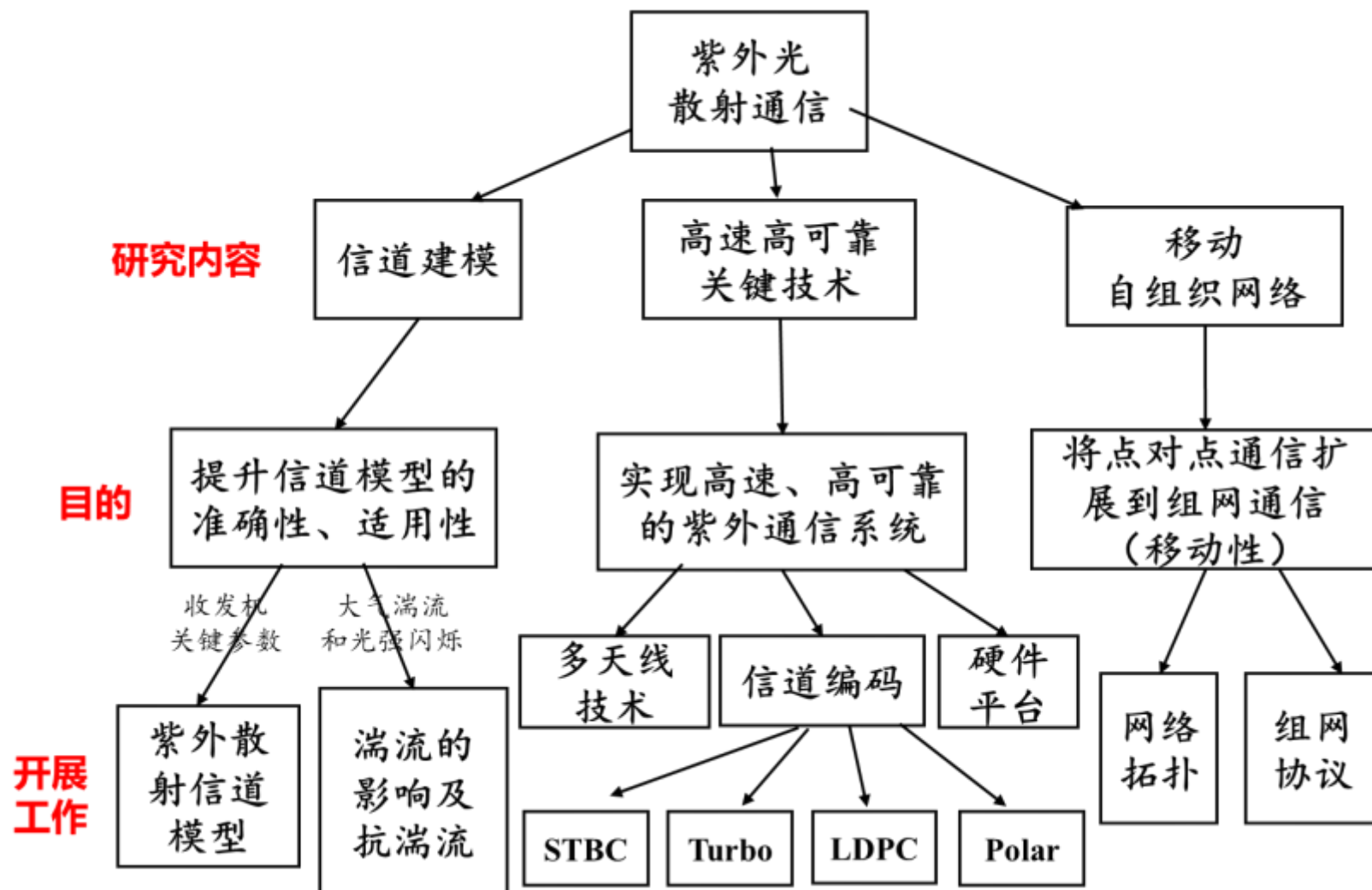
 **1 研究背景和国内外进展**

 **2 项目组相关工作**

 **3 技术应用及思考**

1.2总体情况

□ 项目组总体研究框架



1.2 总体情况

紫外光链路的时变空变：

信道衰落：

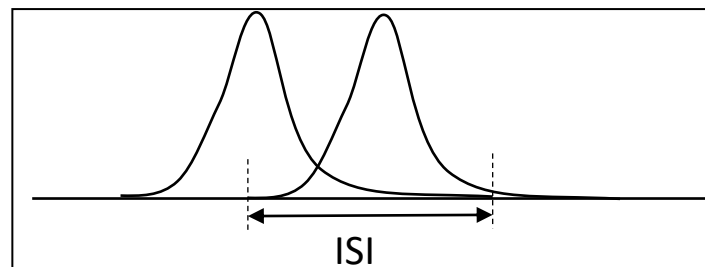
❖ 快衰落

- ❖ 大气信道能量衰减严重、多径散射导致码间干扰。

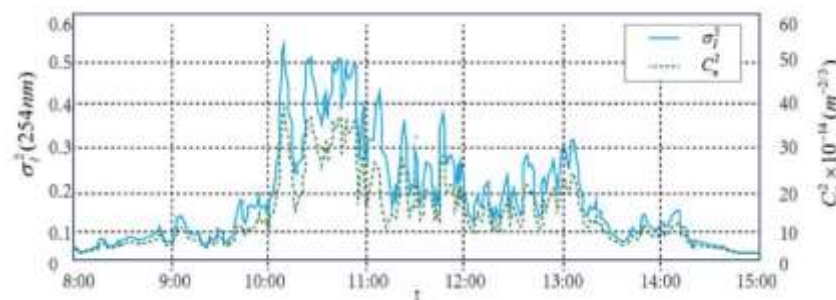
❖ 慢衰落

- ❖ 大气湍流引起光强起伏造成信道时变

节点移动：链路中断



多径散射所导致的码间干扰



大气湍流引起的光强起伏

主要问题：高误码、低速率、移动性等

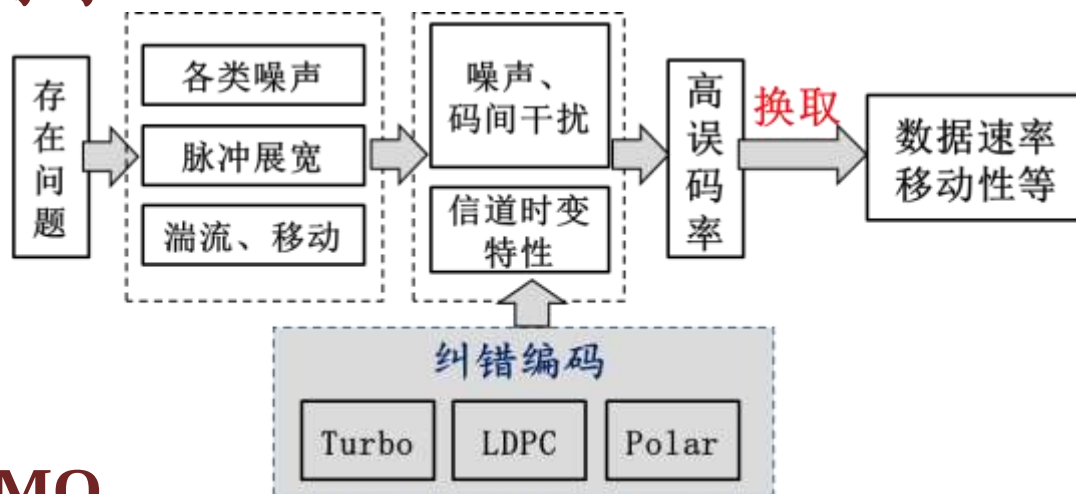
1.2总体情况

□ 方案

❖ 信道纠错编码

误码率↑ 数据速率↓ (编码冗余)

散射信道带宽受限 ISI (本质问题)



❖ 紫外光MIMO

充分开发信道空间资源

避免ISI 克服带宽受限



1.2总体情况

□ 紫外光MIMO

❖ 主要作用

提升系统的可靠性

抗湍流、提升速率、保密性

❖ 存在问题

1、以分集接收SIMO为主

速率提升有限

2、MIMO研究较少(在算法上)

未考虑信道空间相关性

或信道结构不合理

不同方式的多天线		作用
SIMO	MRC和EGC	补偿各PMT之间的信道差异，提高系统误码率
	选择性MRC	捕捉典型工作距离的室内环境中的移动效应
	光学成像接收阵列	速率提升50%
	大气湍流信道	减弱湍流的影响
MISO	发射分集	增加接收功率和保密性
MIMO	Alamouti编码	减少误码率
	SOPP-OSTBC编码	减少误码率

总结：UVC MIMO研究欠缺、空间复用方案空白、数据速率提升有限，具备重要研究价值。

2.2 研究内容

□ 主要工作

- 1、两套硬件系统平台
- 2、紫外信道空间相关性
- 3、两种紫外光MIMO方案
- 4、一种紫外光组网方案

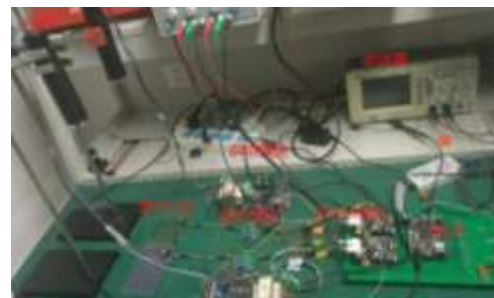
❖ 1.两套实验系统平台：

- ❖ 搭建室外 400m 1Mbps NLOS 紫外光链路
分析误码
- ❖ 设计室内 2×2 VBLAST MIMO UVC 方案
验证“相关性”为干扰



❖ 2.紫外MIMO信道基础理论：

- ❖ 分类讨论了湍流和窄带紫外光MIMO，发现信道结构问题
- ❖ 指出相关性定义上的缺陷，重新阐述了紫外光信道相关性
- ❖ 推导了紫外光MIMO信道容量

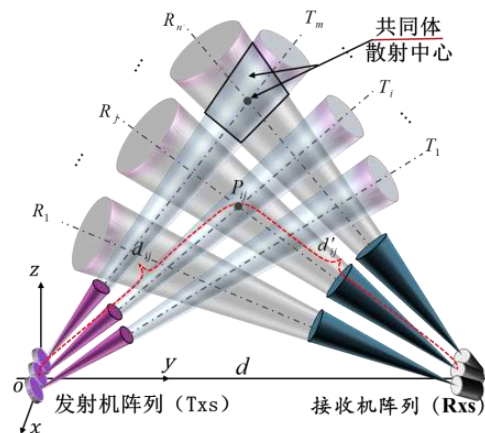


$$\rho\langle g_i, g_j \rangle = \frac{\text{Cov}(\ln g_i, \ln g_j)}{\sqrt{\text{Var}(\ln g_i) \text{Var}(\ln g_j)}}$$

$$C_{UV} = E_H \left\{ \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{P_T}{N_0 N_t} H H^H \right) \right] \right\}$$

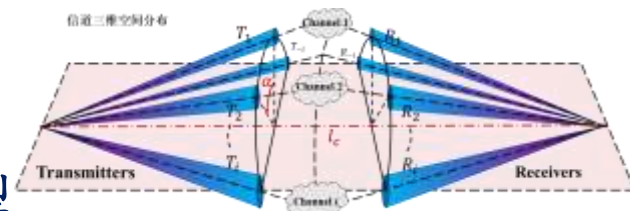
❖ 3. 基于湍流信道提出了仰角分离的高容量MIMO方案:

- ❖ 推导了湍流NLOS信道相关性公式
- ❖ 提出分段相关表征方法并数值仿真验证
- ❖ 仿真结论表明获得信道容量提升、抗湍流抗噪声干扰



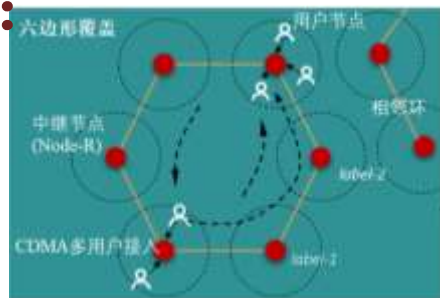
❖ 4. 基于窄带信道提出了旋转角对称的高速率MIMO方案:

- ❖ 建立了非共面空间分割复用MIMO架构
- ❖ 提出简化误码分析的高斯等效PMT信号检测模型
- ❖ 提出低干扰方案, 仿真结果表明获得更高速率提升或降低天线对准



❖ 5. 提出环形 UVC CDMA 多用户移动组网方案:

- ❖ 完成了节点配置和中继、上下行链路等基础网络配置
- ❖ 分析了节点有效覆盖范围和多用户CDMA误码性能



2.2.1 紫外光大气散射理论与实验平台

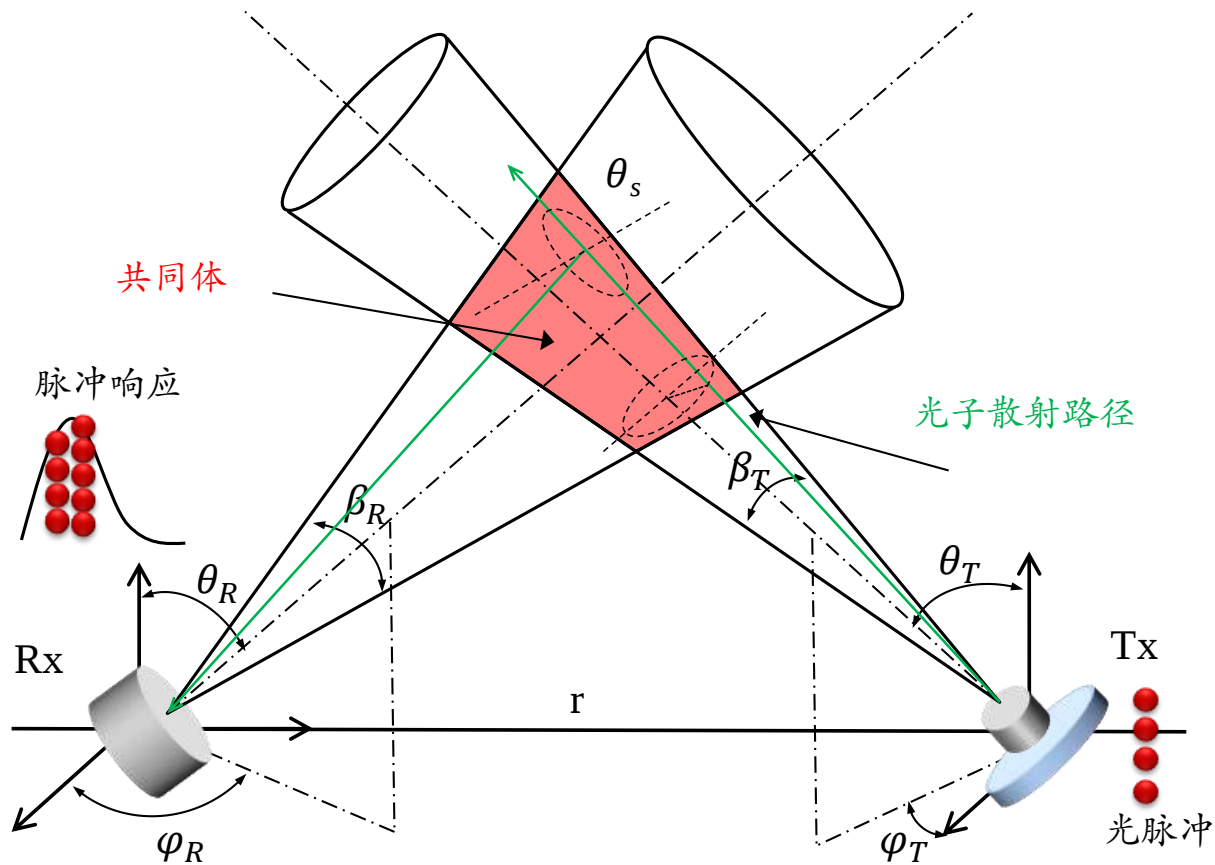
❖ 1) 紫外光散射链路

- ❖ 蒙特卡罗信道模型
- ❖ 信道特性参数：时间响应和路径损耗
- ❖ 无码间干扰的窄带等效信道
- ❖ 400m 1Mbps 室外场单链路UVC误码测试

❖ 2) 紫外光MIMO

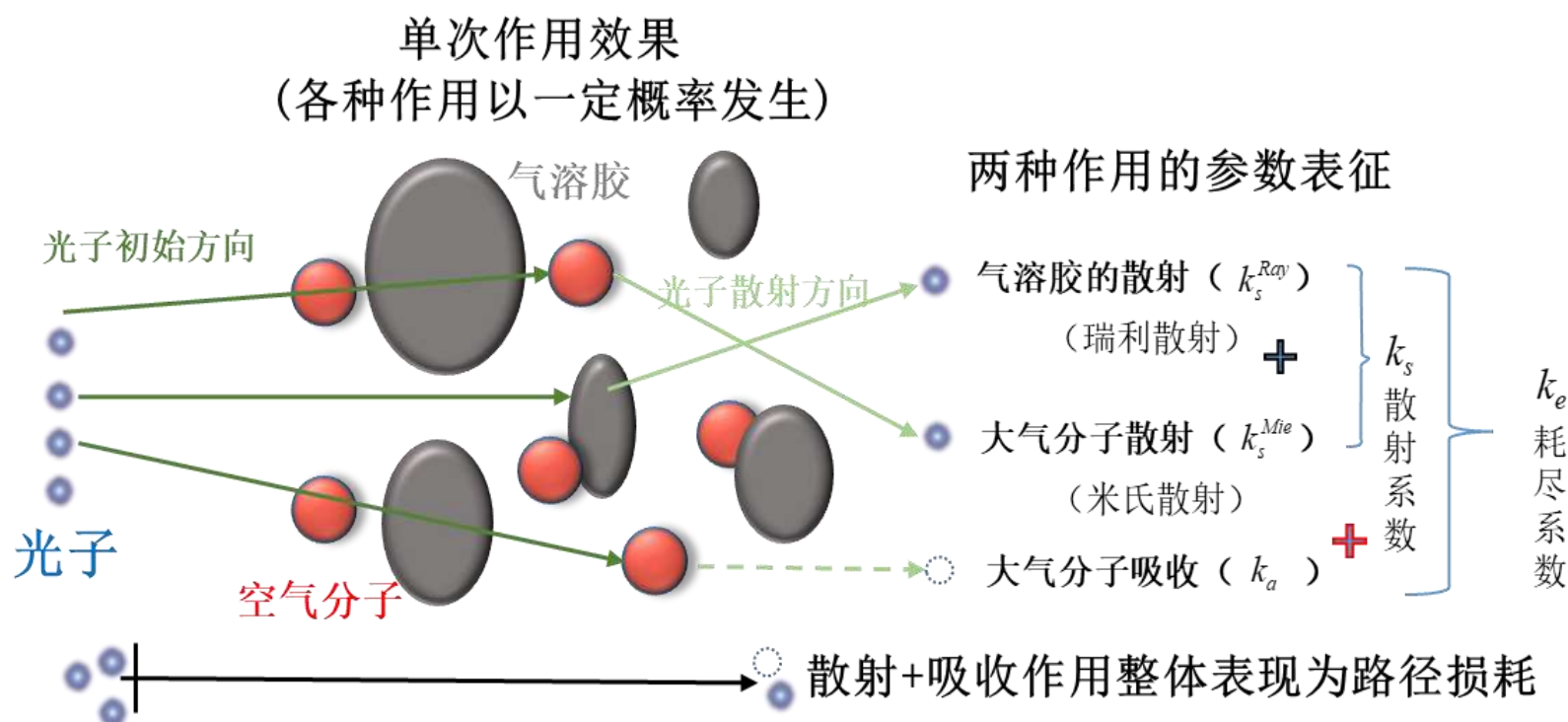
- ❖ 信道结构和信道相关性
 - 阵列式紫外光MIMO信道：相关性存在问题
 - 信道空间相关性：射频MIMO、湍流紫外、窄带等效信道
 - 紫外光 2x2 MIMO VBLAST室内验证实验
- ❖ MIMO信道容量推导

(1) 紫外光大气散射链路

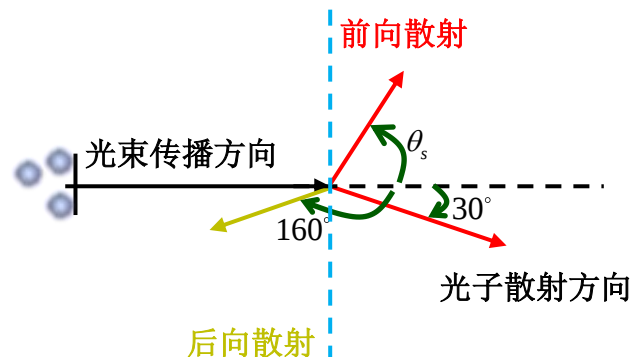


紫外光单散射示意图

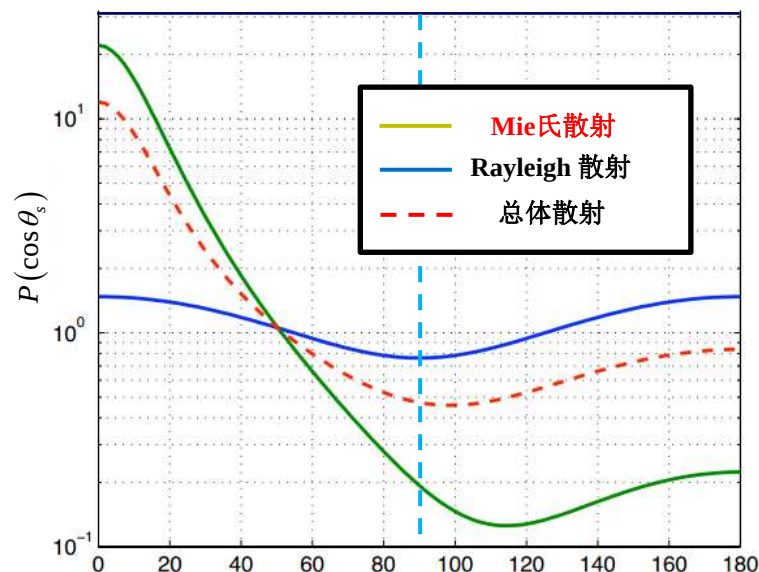
(1) 紫外光大气散射链路



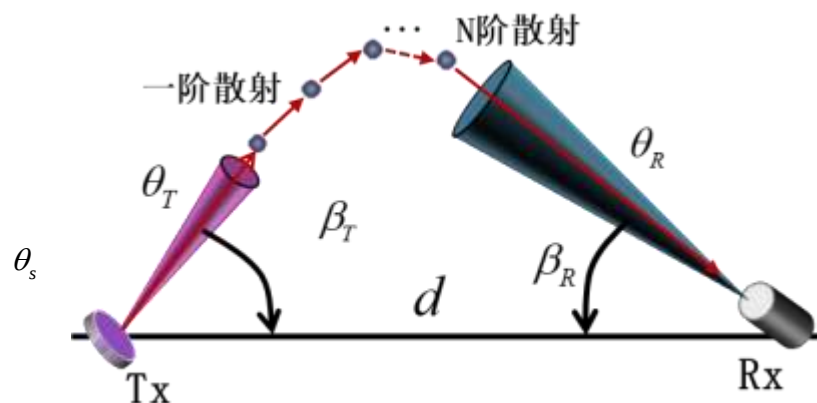
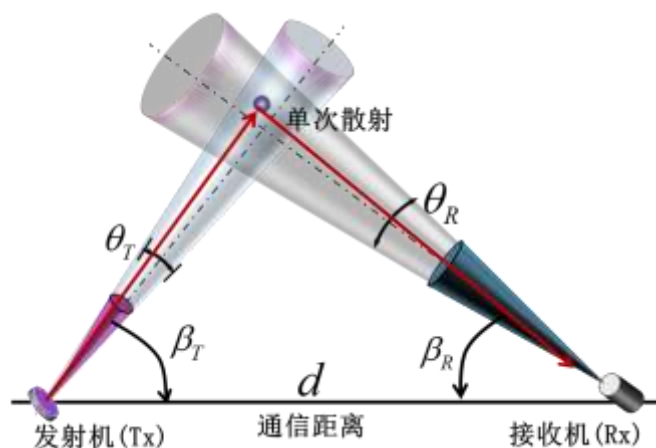
(1) 紫外光大气散射链路



光子单次散射示意图



散射特性函数曲线



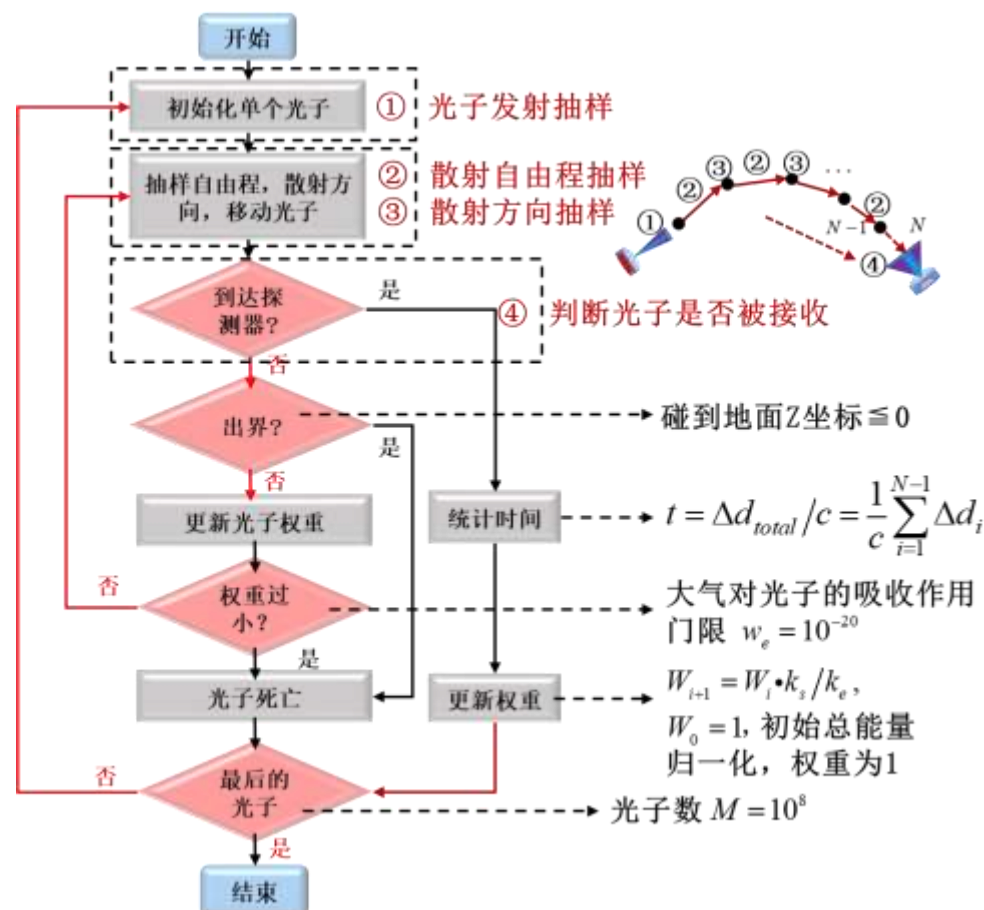
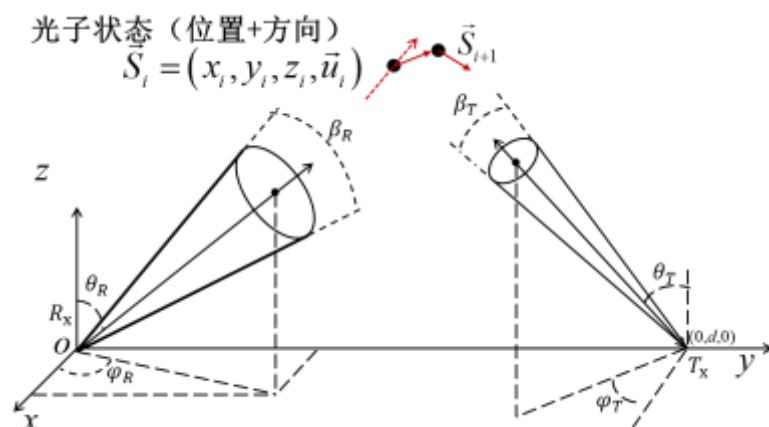
(1) 紫外光大气散射链路

蒙特卡罗信道模型

适用性广、准确性高

光子状态跟踪

大量光子分布的随机概率模拟紫外大气信道



随机抽样、状态更新、接收判定

(1) 紫外光大气散射链路

□ 蒙特卡罗信道

信道的特性表征

❖ 时间响应

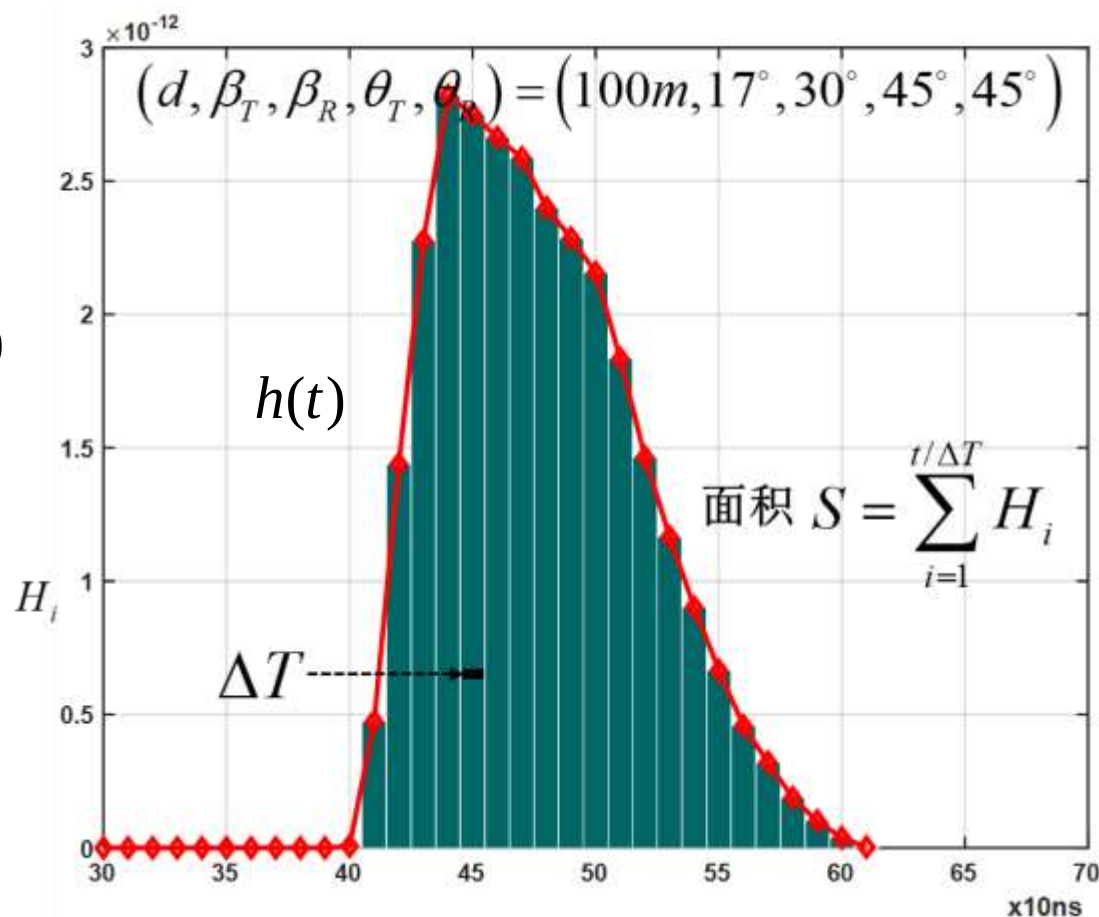
$$h(t) = \sum H_i \delta(t - i\Delta T)$$

分布信息

❖ 路径损耗

$$\begin{aligned} PL &= 10 \log_{10} \left(\sum H_i \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\int_0^t h(t) dt \right) \end{aligned}$$

能量信息



(1) 紫外光大气散射链路

窄带等效信道

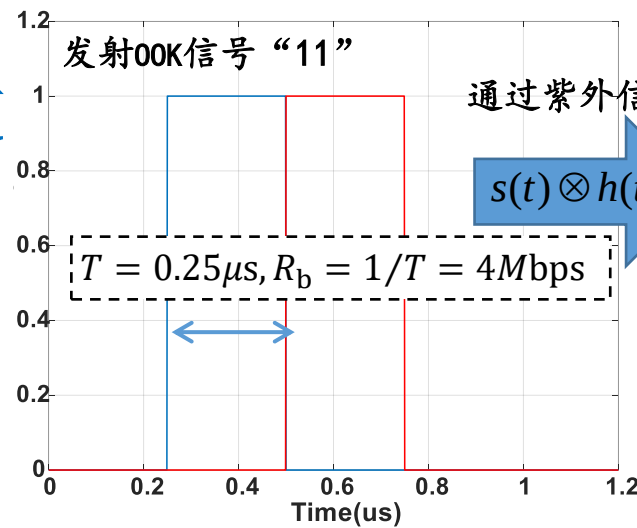
码间干扰 (ISI)

窄带等效信道 ($1/T_s \leq B_c$)

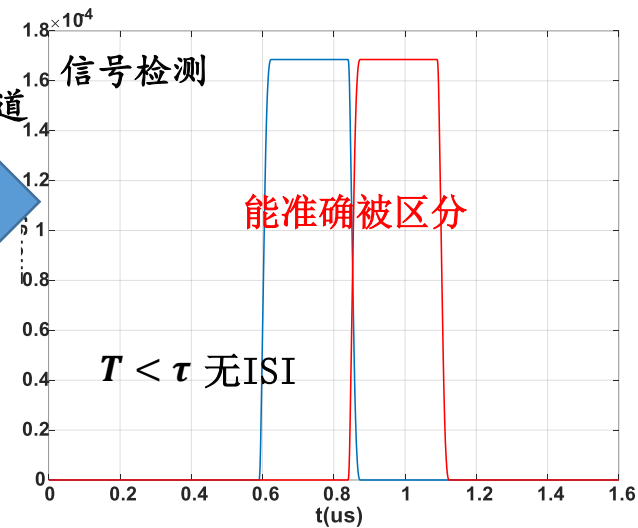
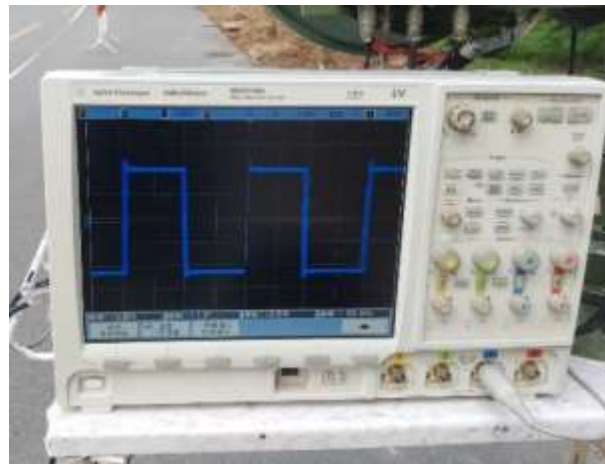
无ISI, 不关注时域分布

关注路径损耗 (能量)

速率 $\uparrow$ ISI $\uparrow$



200m 256kbps速率的信号波形

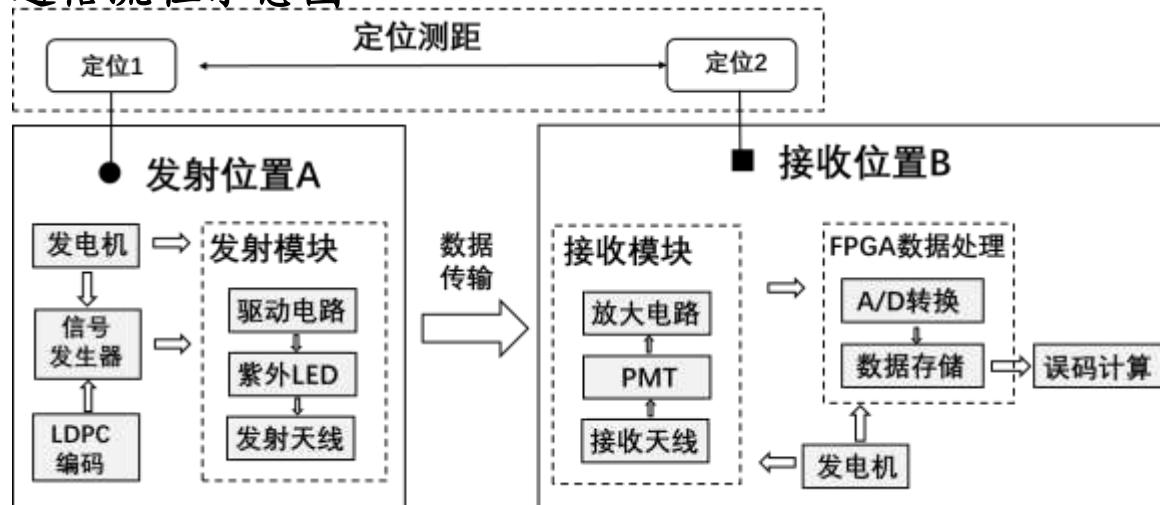


200m, 1Mbps 速率的脉冲展宽信号波形

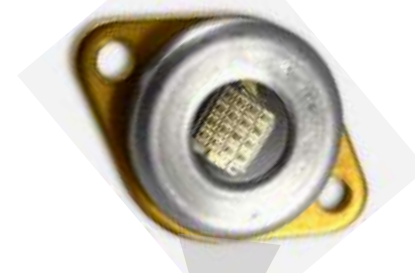


(1) 紫外光大气散射链路 □ 外场链路测试平台

通信流程示意图



阵列式LEDs
UVCLEAN265HS-50



实物设备展示



接收端

发射端



□ 外场链路测试

❖ 测试结果:

1、400m 1Mbps

2、 $10^{-3} \rightarrow 10^{-7}$ (LDPC)

纠错编码改善效果

❖ 实际场景

测试内容	BER要求	距离(m)	传输速率	发射仰角	BER(不编码)	BER(LDPC)
误码率测试	$\leq 10^{-3}$	200	256kbps	22	1.23e-3	$< e^{-7}$
		200	256kbps	15	$< e^{-7}$	$< e^{-7}$
		200	256kbps	12	$< e^{-7}$	$< e^{-7}$
		300	256kbps	15	1.72e-3	$< e^{-7}$
		300	256kbps	10	$< e^{-7}$	$< e^{-7}$
		400	256kbps	5	$< e^{-7}$	$< e^{-7}$
		400	1Mbps	5	1.20 e-3	$< e^{-7}$



(2) 紫外光MIMO信道

□ 均匀分布阵列式UVC MIMO

❖ 定义的相关性

的共同体重叠程度
(能量占比)

❖ 存在的问题

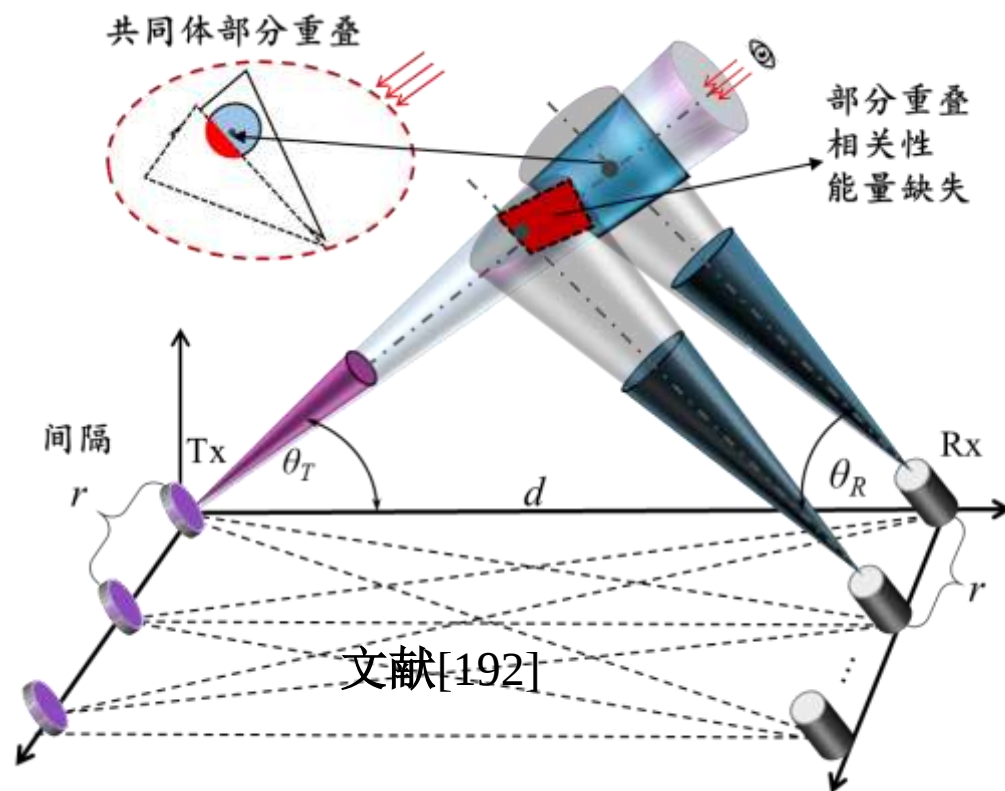
1、低能效:

相关性↓ 能量利用率↓

2、不实际:

距离50m 间隔8m

相关性0 单链路系统



总结：相关性的定义存在问题

(2) 紫外光MIMO信道

□ 信道空间相关性

❖ 射频MIMO的相关性

数学表征→两个随机变量的相关性

物理意义→信号波簇到达角（相位）

$$\rho_{i_2 j_2}^{i_1 j_1} = \left\langle |h_{i_1 j_1}|^2, |h_{i_2 j_2}|^2 \right\rangle = \frac{\text{cov}\left(|h_{i_1 j_1}|^2, |h_{i_2 j_2}|^2\right)}{\sqrt{D\left(|h_{i_1 j_1}|^2\right)} \sqrt{D\left(|h_{i_2 j_2}|^2\right)}}$$

❖ 紫外光MIMO的区别

检测模式：强度调制直接检测（IM/DD）

紫外信道随机性如何体现？

(2) 紫外光MIMO信道

□ UVC湍流随机信道

❖ SIMO空间相关性

随机性：大气湍流

相关性：路径重叠

增益或能量表征：

$$\rho\langle g_i, g_j \rangle = \frac{\text{Cov}(\ln g_i, \ln g_j)}{\sqrt{\text{Var}(\ln g_i) \text{Var}(\ln g_j)}}$$

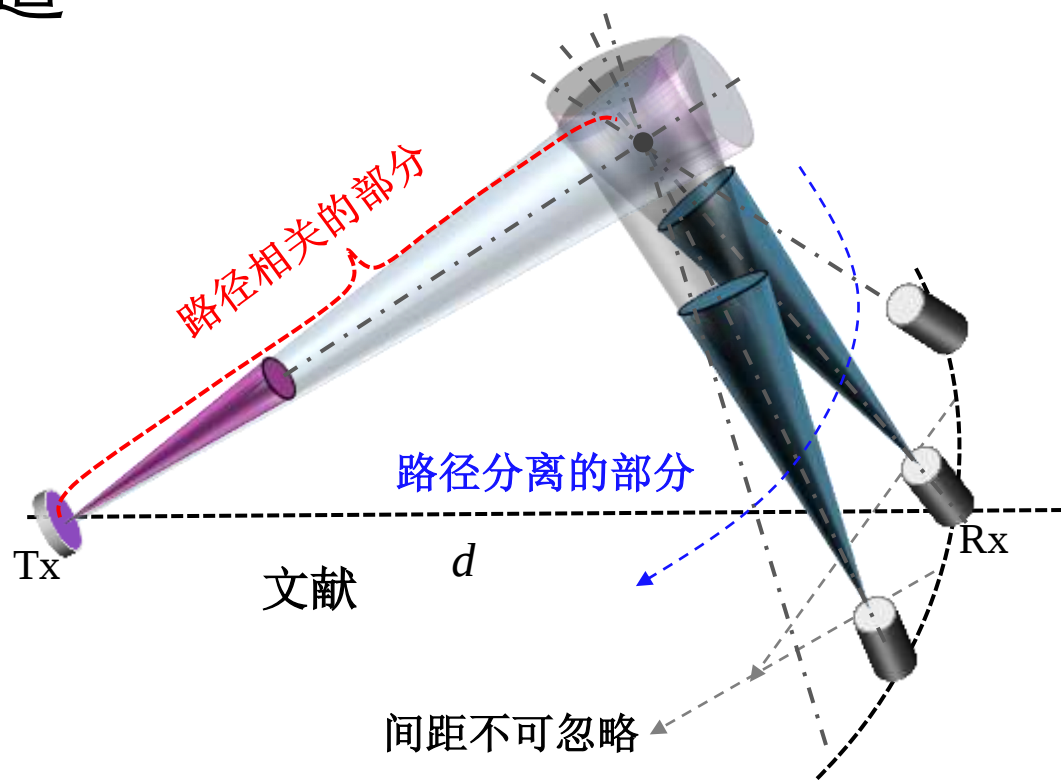
❖ 存在的问题

1、不实用：

保证光学接收天线间距

2、结构问题：

无法拓展到MIMO



总结：需要探索新的UVC MIMO结构

(2) 紫外光MIMO信道

□ 窄带等效UVC信道

❖ 信道相关性

随机性: 随机噪声

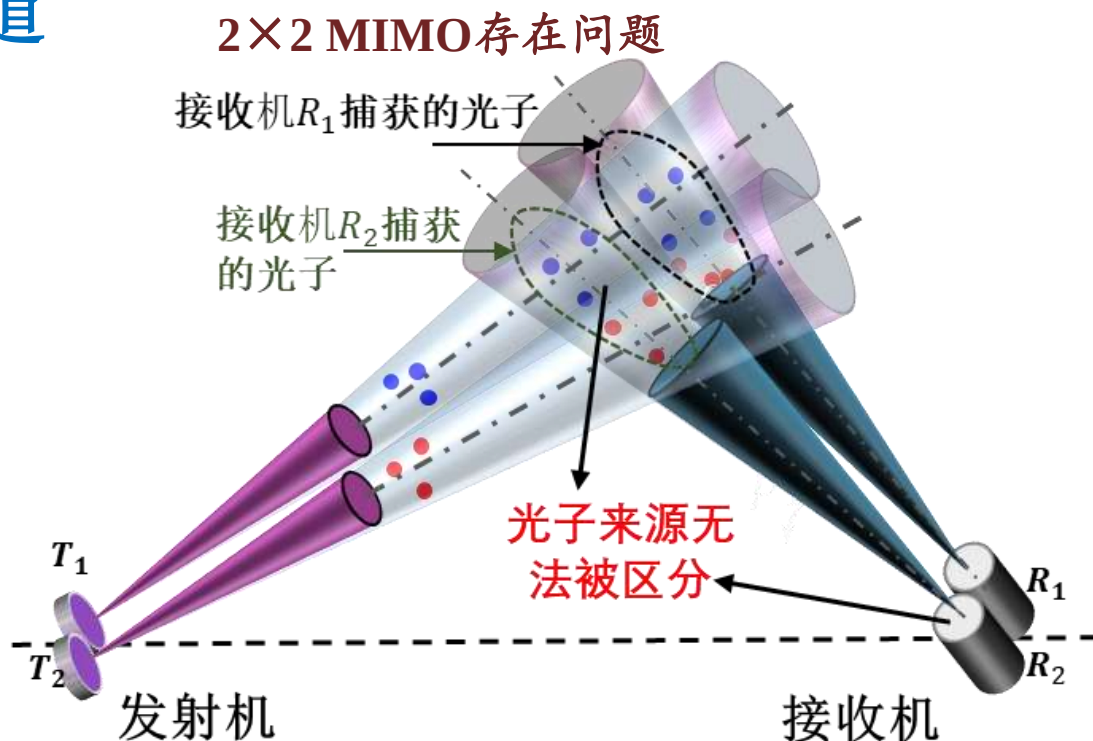
定义: (已有)共同体重叠
或接收能量比;

(我们)信道独立

单个探测器噪声随机独立
实际SIMO系统有效

❖ 区分信号/干扰

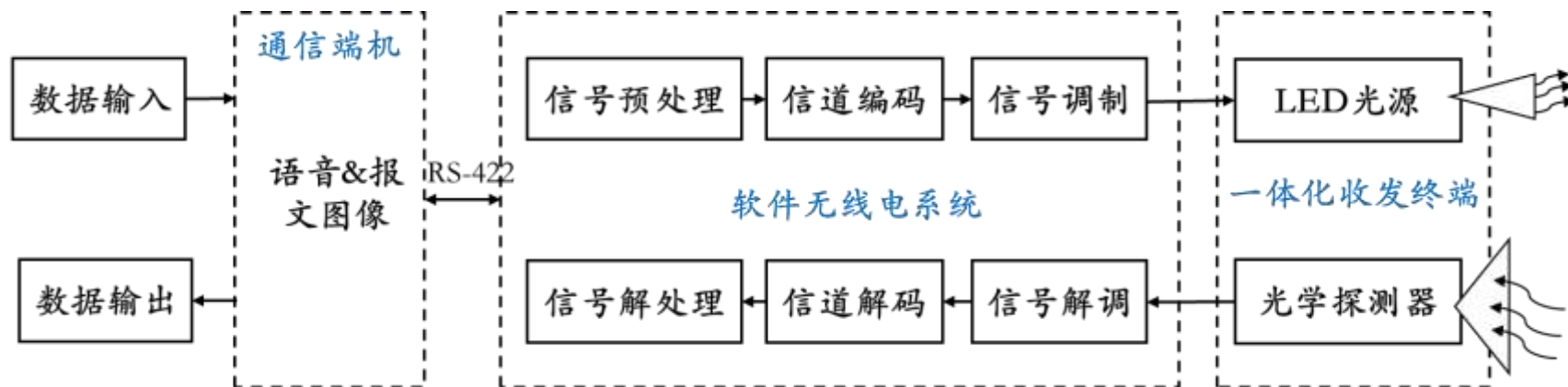
光子来源无法区分



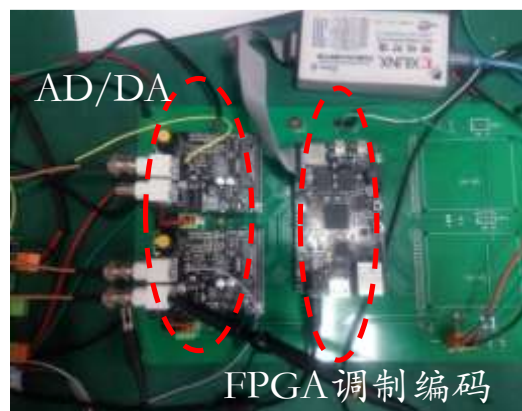
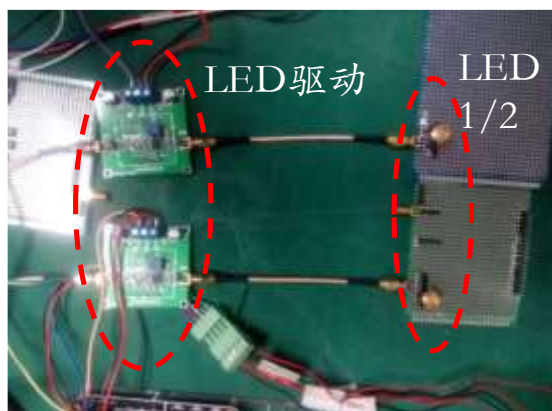
新问题: 重叠是相关性or干扰?

□ 室内验证平台

收发一体化的UVC系统组成



通信距离1.2m 2x2 MIMO UVC系统



(2) 紫外光MIMO信道

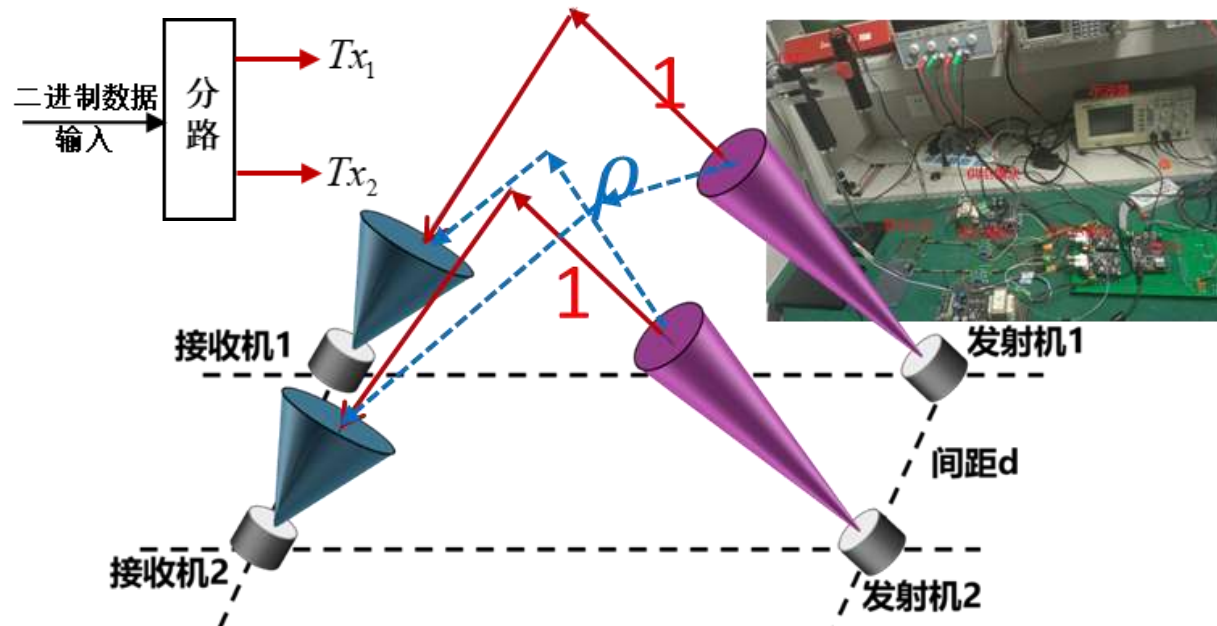
□ 紫外光MIMO V-BLAST实验

❖ 阵列分布式

假设是相关性

间距 $d \rightarrow$ 相关性 ρ

$$H_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix}$$



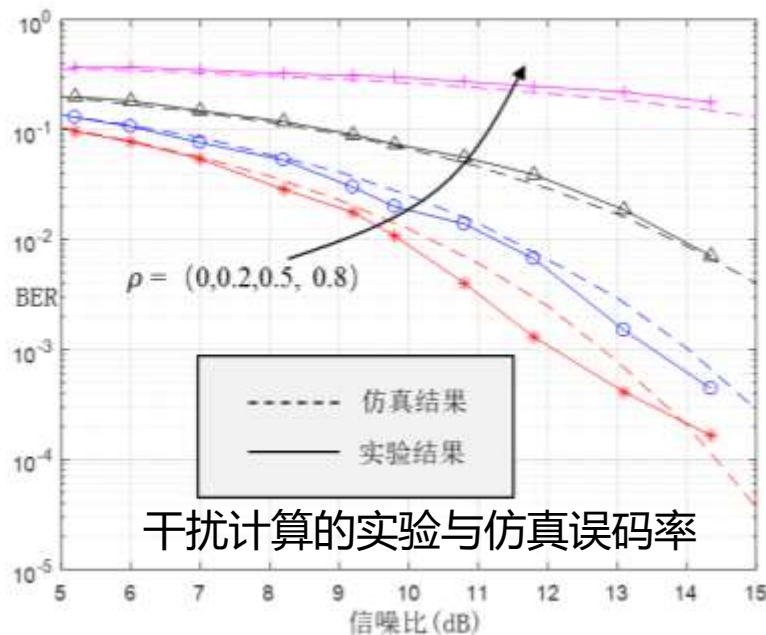
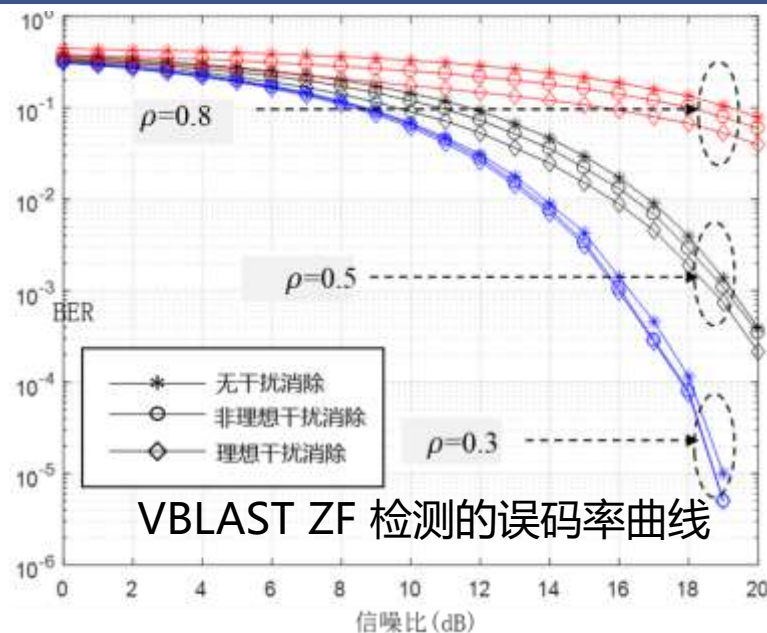
仿真与实验

参数	值
LED发射功率	3mw
波长	260nm
光束角和视场角	45°, 30°
通信距离	1.2m

主要结果

- 1、相关性(干扰) $\uparrow$ BER $\uparrow$ 干扰消除 $\uparrow$
- 2、 $\rho \uparrow$, BER恶化严重, 与相关性不符

结论：窄带等效信道下参数 ρ 是干扰



(2) 紫外光MIMO信道

□ MIMO信道容量推导

❖ 信道矩阵

$$H = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N_r} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N_t1} & x_{N_t2} & \cdots & x_{N_tN_r} \end{bmatrix}$$

❖ 射频MIMO

$$C = \max_{f(x)} I(x; y)$$

最大互信息

❖ 紫外MIMO

信息论

UV随机信道: $C_{UV} = E_H \left\{ \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{P_T}{N_0 N_t} H H^H \right) \right] \right\}$

区别: 信道系数是否随机

特征值分解

UV窄带信道: $C_{UV} = \sum_{i=1}^{N_r} \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{N_0 N_t} \lambda_i \right)$

2.2.2 仰角分离的高容量紫外光MIMO

❖ (1) 信道框架结构

- ❖ 仰角分离的MIMO信道的几何配置

❖ (2) 信道空间相关性

- ❖ 湍流NLOS信道及相关性定义
- ❖ MIMO信道相关性的分类讨论
- ❖ 分段相关表征方案及其验证

❖ (3) 性能仿真分析

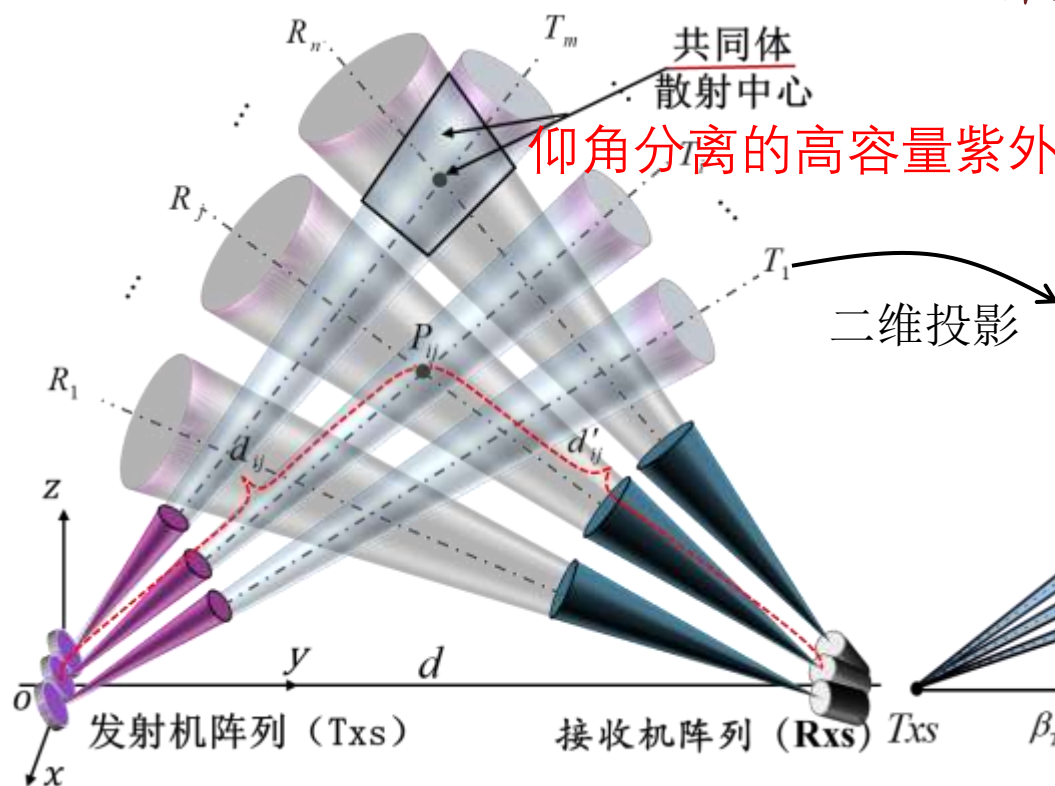
- ❖ 收发仰角 vs 相关性
- ❖ 相关性 vs 信道容量
- ❖ 湍流强度 vs 信道容量
- ❖ 信噪比 vs 信道容量

(1) 信道模型

□ $m \times n$ MIMO 湍流信道模型

❖ 三维几何分布

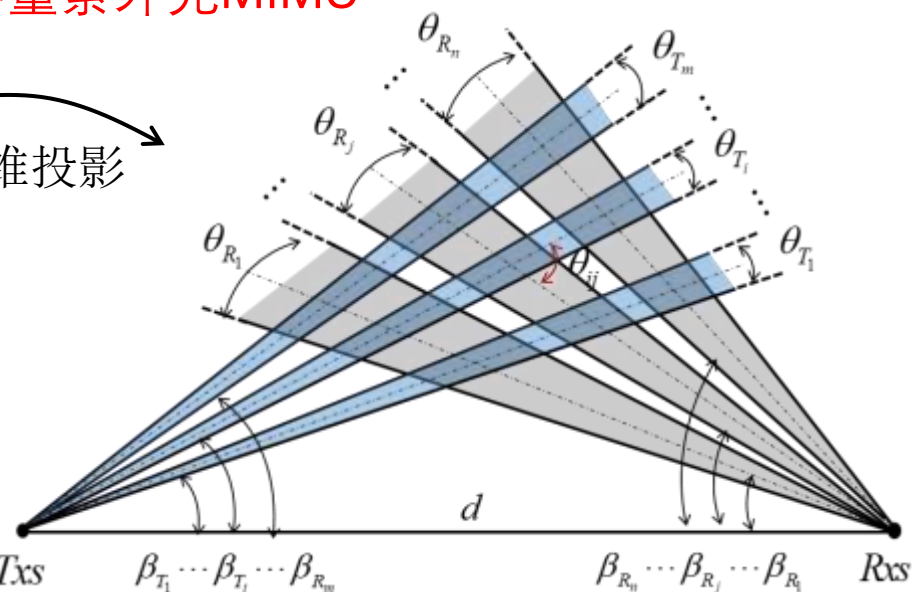
改变仰角达到路径分离



❖ 主要参配置

仰角、视场角、光束角、距离

仰角分离的高容量紫外光MIMO



(2) 信道空间相关性

□ 湍流信道表征

❖ **NLOS信道表征** 两条独立的LOS

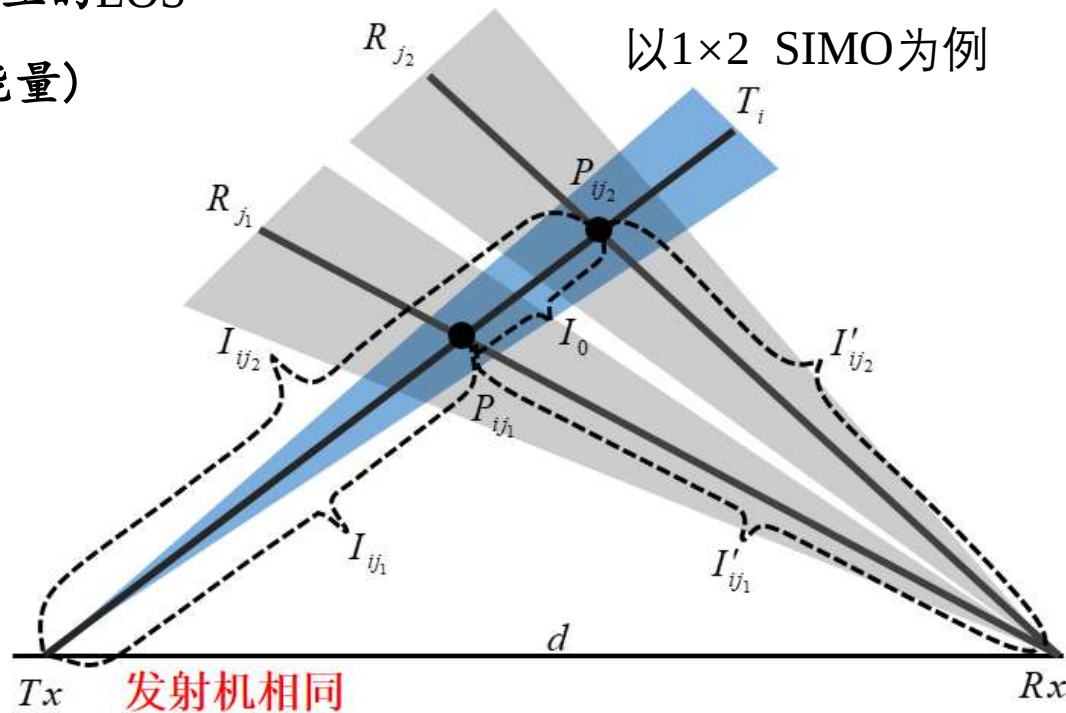
I: LOS链路增益(信号幅度或能量)

$g_{ij} = I_{ij} I'_{ij}$: NLOS 链路增益

❖ **相关性的表征**

$$\begin{aligned}\rho\langle g_{ij_1}, g_{ij_2} \rangle &= \frac{\text{Cov}(\ln g_{ij_1}, \ln g_{ij_2})}{\sqrt{\text{Var}(\ln g_{ij_1}) \text{Var}(\ln g_{ij_2})}} \\ &= \frac{\sigma_{ij_1}^2}{\sqrt{(\sigma_{ij_1}^2 + \sigma_{ij_1}'^2)(\sigma_{ij_2}^2 + \sigma_{ij_2}'^2)}}\end{aligned}$$

σ_{ij}^2 : 光强方差 随机性

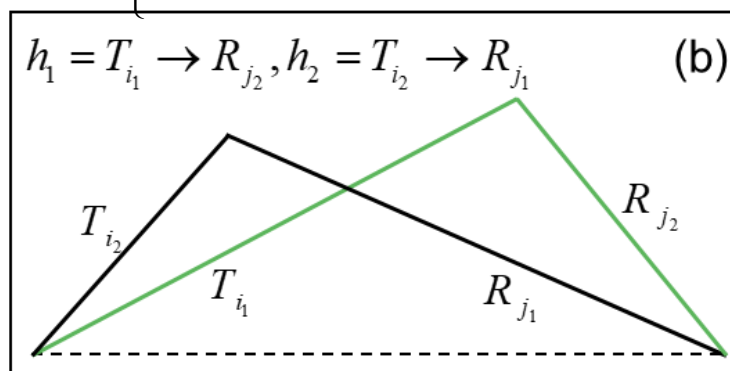
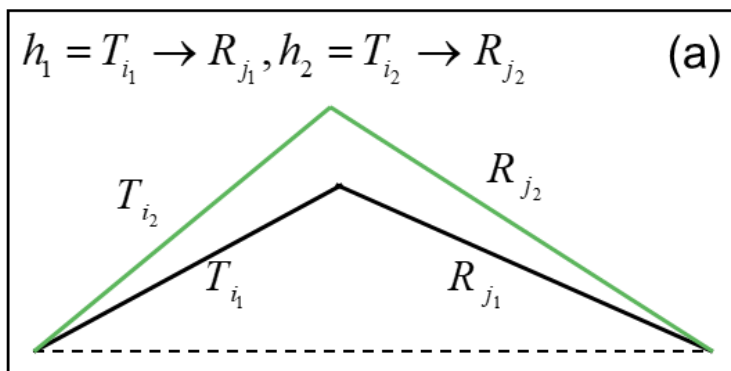


□ MIMO信道相关性

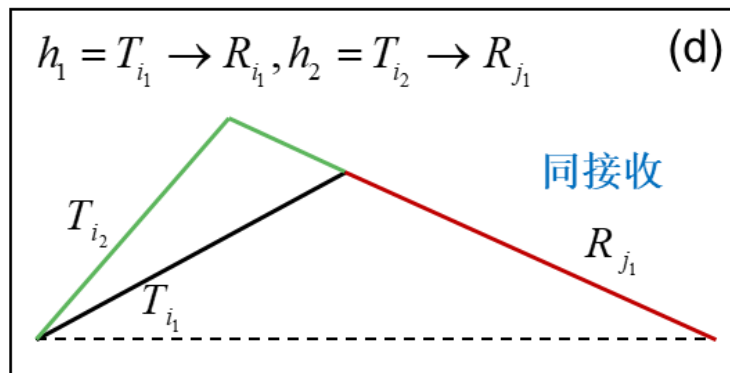
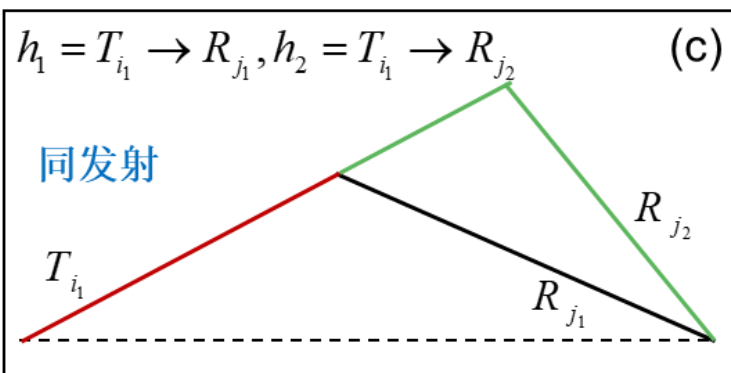
❖ 任意两条信道

$$\rho\langle g_{i_1 j_1}, g_{i_2 j_2} \rangle = \begin{cases} \frac{\sigma_{ij_1}^2}{\sqrt{(\sigma_{ij_1}^2 + \sigma_{ij_1}'^2)(\sigma_{ij_2}^2 + \sigma_{ij_2}'^2)}}, & \text{when } i_1 = i_2 = i \\ \frac{\sigma_{ij}^{\prime 2}}{\sqrt{(\sigma_{i_1 j}^2 + \sigma_{i_1 j}'^2)(\sigma_{i_2 j}^2 + \sigma_{i_2 j}'^2)}}, & \text{when } j_1 = j_2 = j \\ 0, & \text{other.} \end{cases}$$

Case1: 收发机都不同, 独立信道 $h_1 h_2$

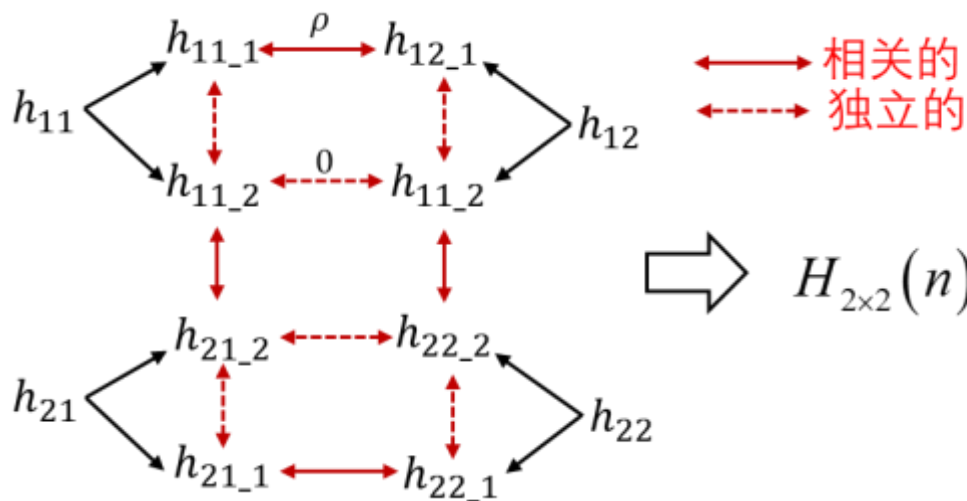


Case2: 收发机一端相同, 相关信道 $h_1 h_2$



(2) 信道空间相关性

□ 分段相关的方案



以2×2 MIMO为例

$$\Rightarrow H_{2 \times 2}(n) = \begin{Bmatrix} h_{11}(n) & \overset{\rho_{11,12}}{\longleftrightarrow} h_{12}(n) \\ \overset{\rho_{11,21}}{\longleftrightarrow} h_{21}(n) & \overset{\rho_{12,22}}{\longleftrightarrow} h_{22}(n) \end{Bmatrix}$$

相邻位置都存在相关性
无法直接生成随机系数

❖ 信道系数序列产生

$$h_{ij}^{NLOS} = \frac{h_{ij-1} + h_{ij-2}}{E(h_{ij-1} + h_{ij-2})}, \quad \hat{h}_{12-1}(n) = \rho / \sqrt{c} h_{11-1}(n) + \sqrt{1 - \rho^2} h_{12-1}(n),$$

相关化信道系数

$$\begin{cases} h_{11}(n) = \frac{h_{11-1}(n) + h_{11-2}(n)}{E(h_{11-1}(n) + h_{11-2}(n))} \\ h_{12}(n) = \frac{\hat{h}_{12-1}(n) + h_{12-2}(n)}{E(\hat{h}_{12-1}(n) + h_{12-2}(n))} \end{cases}$$

□ 方案验证

结果验证：

- 1、信道系数分布匹配
- 2、信道空间相关性与理论值误差小（伪随机）

结论：该方案能有效表征相关性

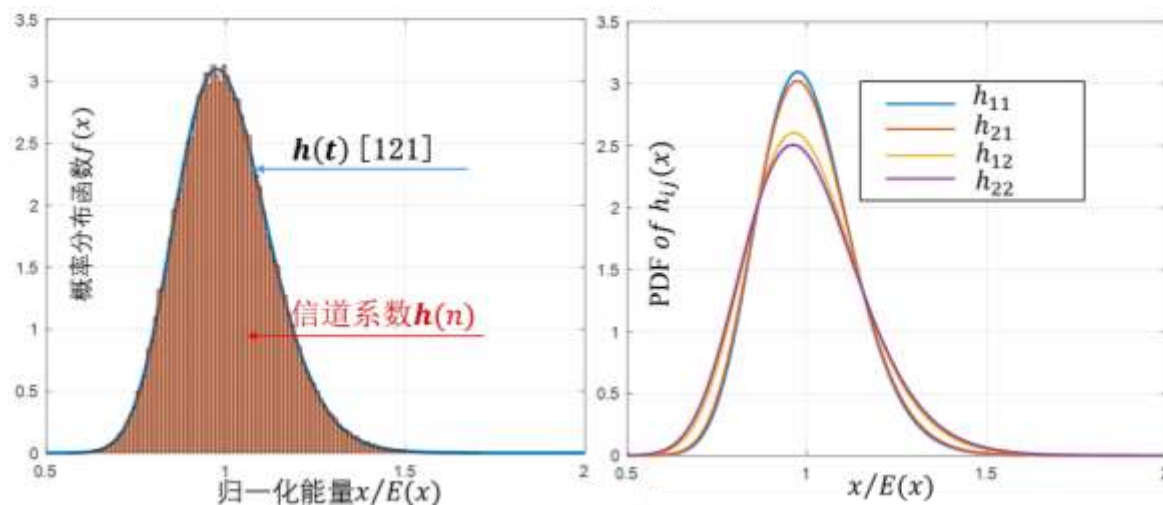


表 3-2 2×2 MIMO 信道相关性的数值表

信道组合	理论数值	仿真数值	误差范围
	ρ_t	ρ_s	$\Delta\rho$
(h_{11}, h_{12})	0.4173	0.4179	0.0003
(h_{11}, h_{21})	0.4876	0.4874	0.0002
(h_{11}, h_{22})	0	0.0024	0.0024
(h_{12}, h_{22})	0.2570	0.2657	0.0002
(h_{21}, h_{12})	0	0.0004	0.0004
(h_{21}, h_{22})	0.3596	0.3603	0.0007

(3) 性能分析

□ 收发仰角vs相关性

1、接收机相同

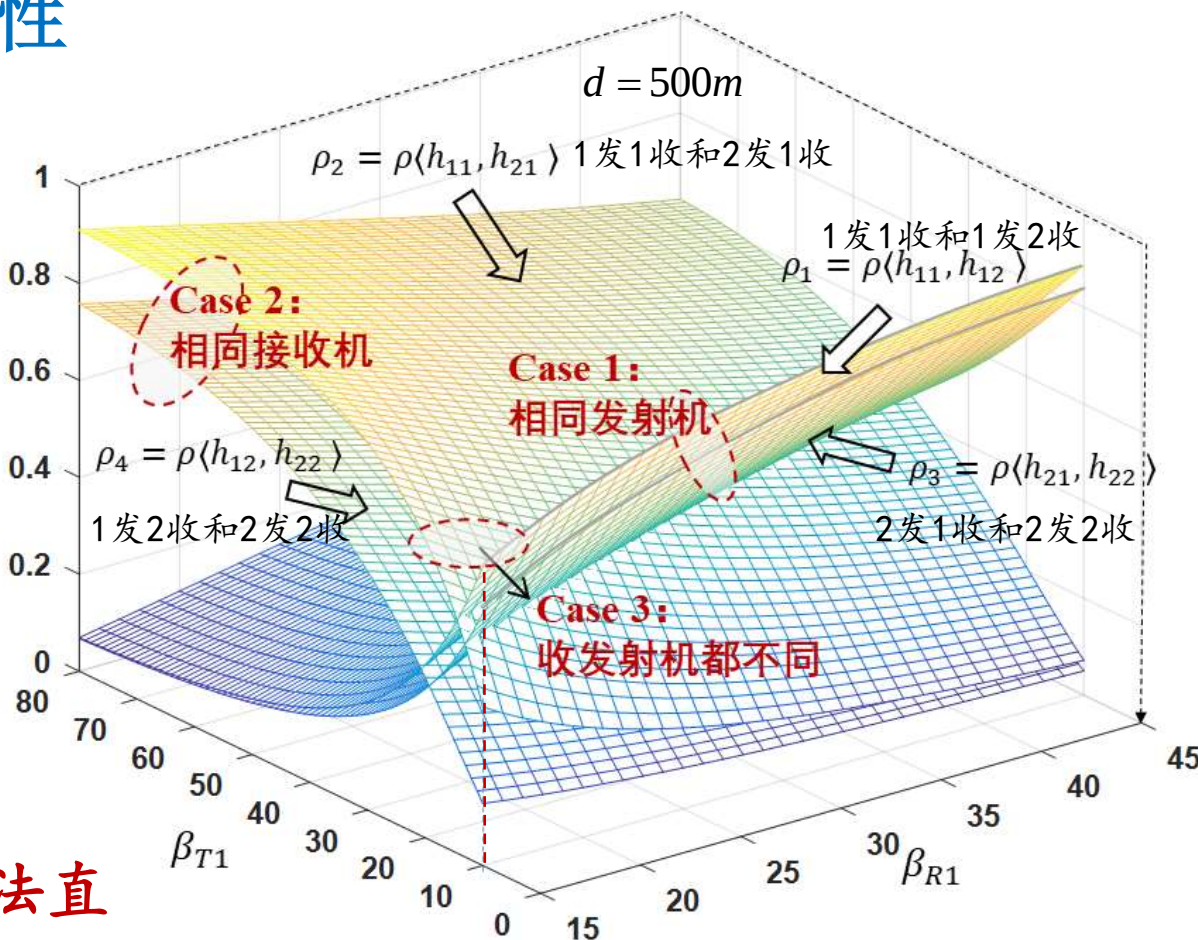
$$\beta_T \uparrow \rho_2, \rho_4 \uparrow \quad \rho_1, \rho_3 \downarrow$$

2、发射机相同

$$\beta_R \uparrow \rho_1, \rho_3 \uparrow \quad \rho_2, \rho_4 \downarrow$$

3、其它组合

$$\rho_1, \rho_2 \text{ 或 } \rho_3, \rho_4 \text{ 趋势相反}$$



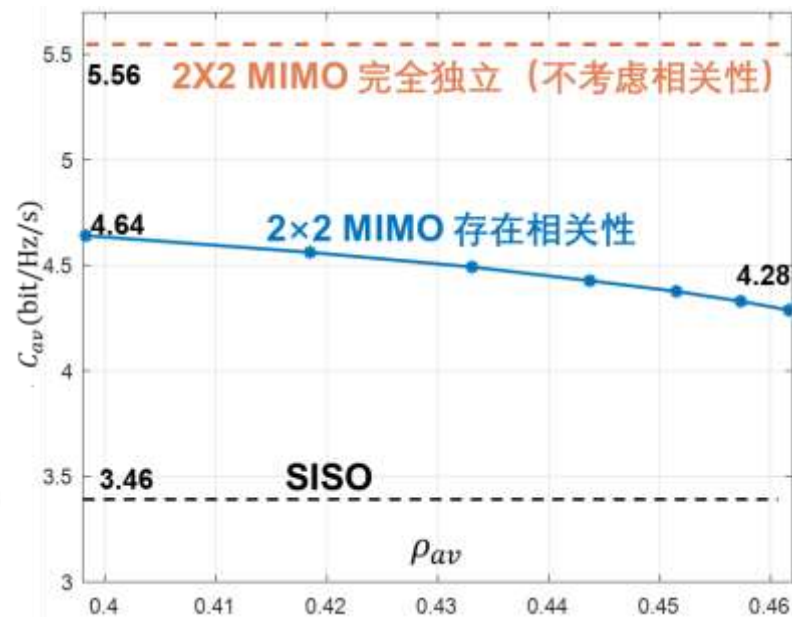
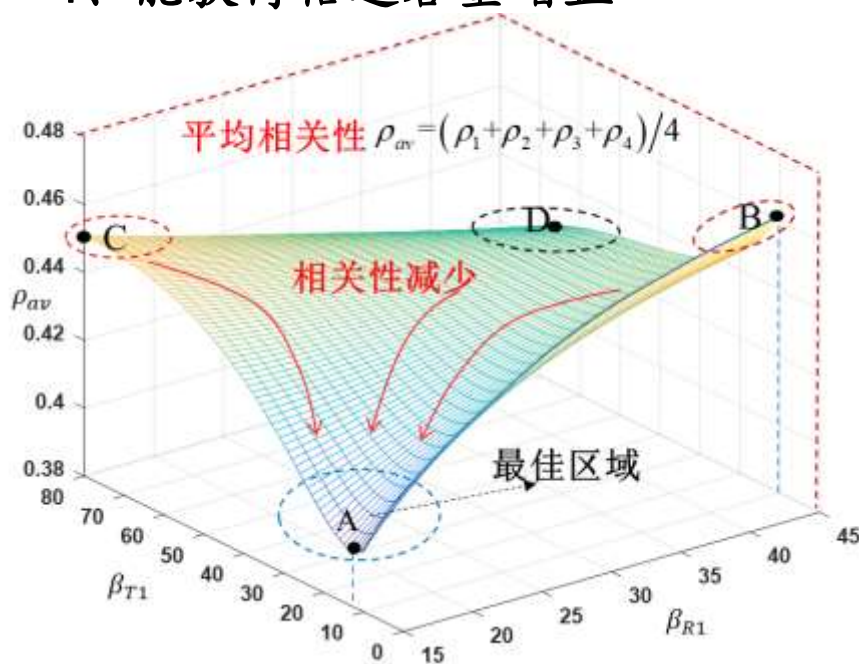
问题：单个变化无法直观评估系统性能

(3) 性能分析

□ 相关性vs信道容量

- 1、存在不可消除相关性
- 2、相关性 $\uparrow$ 信道容量 $\downarrow$
- 3、小仰角为最佳配置
- 4、能获得信道容量增益

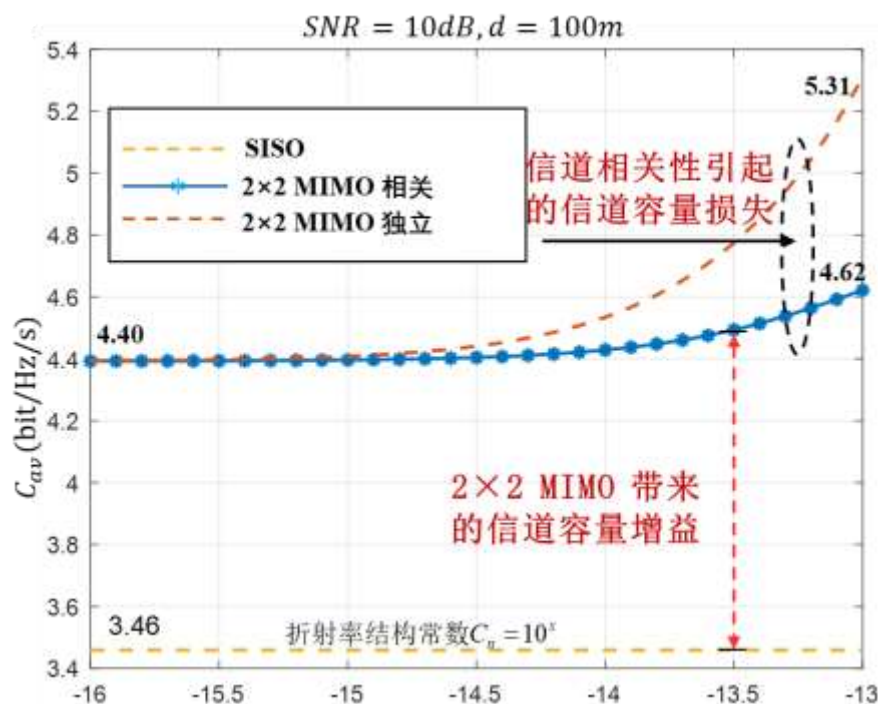
位置	发射机		接收机		ρ_{av}	P_0^{NLOS}	C_{av} bit/Hz/s
	β_{T1}	β_{T2}	β_{R1}	β_{R2}			
A	13°	16°	15°	30°	0.3964	95.46 dB	4.64
B	10°	13°	45°	60°	0.4617	96.37	4.28
C	80°	83°	15°	30°	0.4499	101.68	4.43
D	80°	83°	45°	60°	0.4243	102.26	4.52



(3) 性能分析

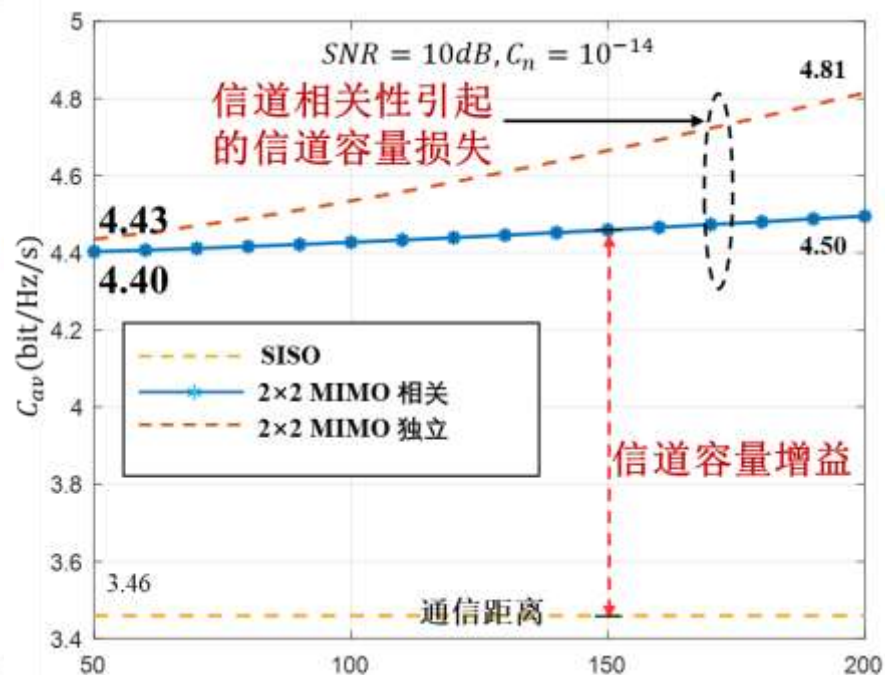
□ 湍流强度 vs 信道容量

$C_n \uparrow$ or $d \uparrow$: 湍流强度 $\uparrow$



MIMO vs SISO:

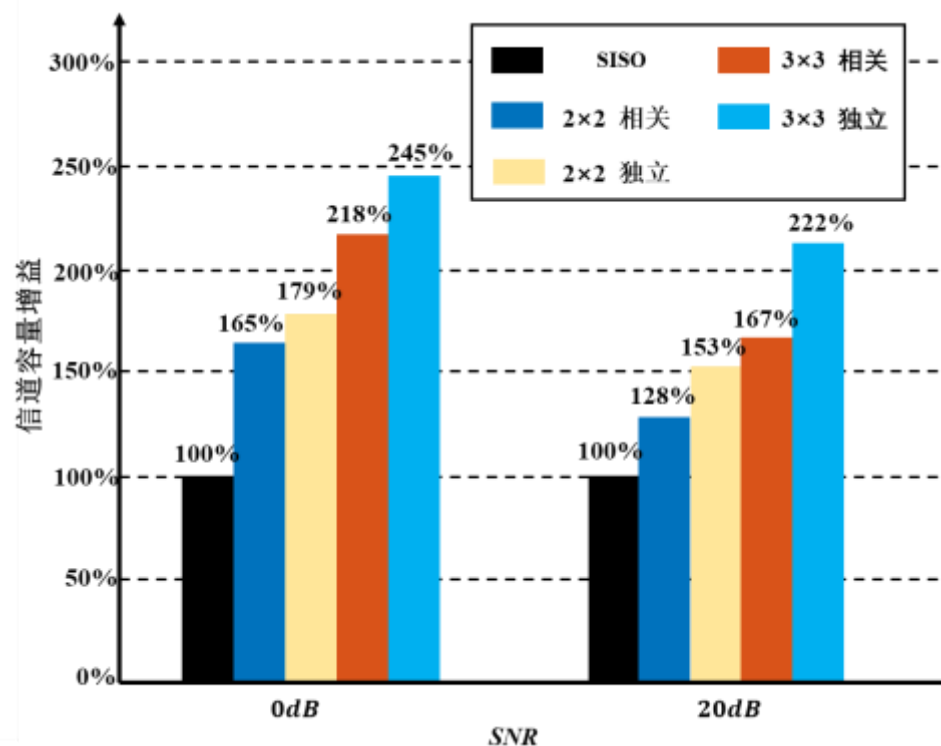
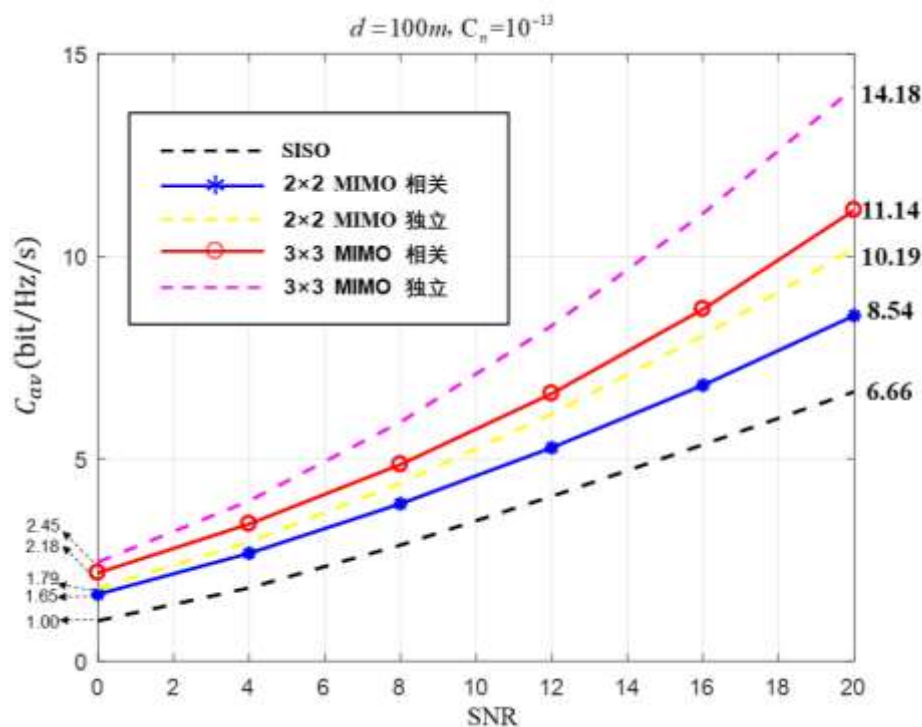
- 1、获得更高信道容量
- 2、具备抗湍流效果
- 3、相关性损害信道容量



(3) 性能分析

□ 信噪比vs信道容量

- 1、天线数量 $\uparrow$ 信道容量 $\uparrow$
- 2、相比SISO 均获得信道容量增益
- 3、低SNR的增量更大、能抗噪声随机



2.2.3非共面对称的高速率紫外光MIMO

❖ (1) 信道框架结构

- ❖ 基于离轴角的非共面信道隔离
- ❖ 基于旋转角的对称式非共面MIMO

❖ (2) 信号检测模型

- ❖ 高斯等效近似信号检测
- ❖ 等效检测模型的准确性验证
- ❖ 误码率计算与数值分析方案验证

❖ (3) 性能仿真分析

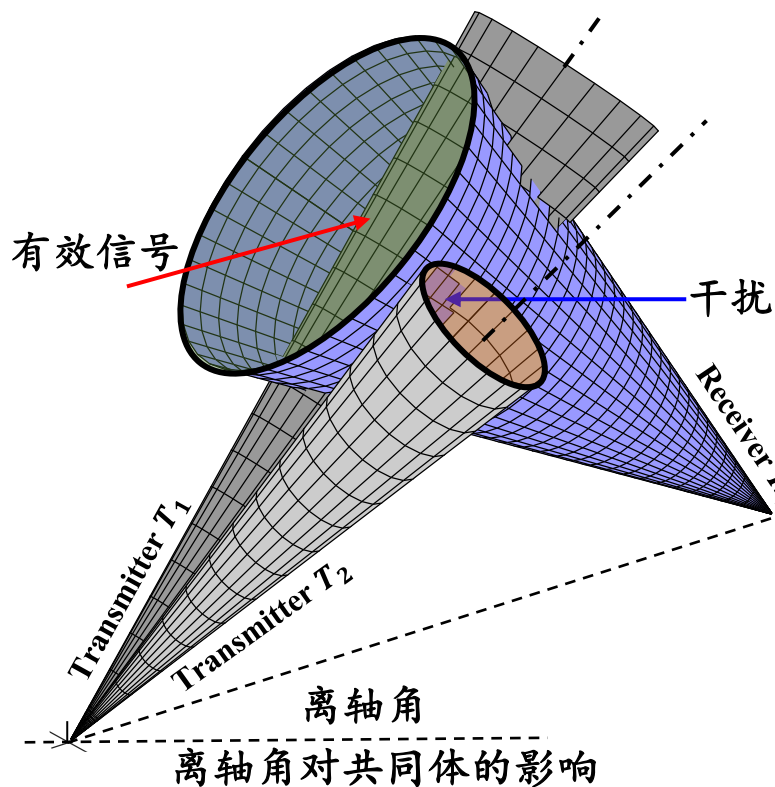
- ❖ 收发机的参数配置 vs 干扰系数
- ❖ 干扰系数 vs BER
- ❖ 低干扰方案下的最大数据速率与天线对准需求

(1) 信道框架结构

□ 想法来源

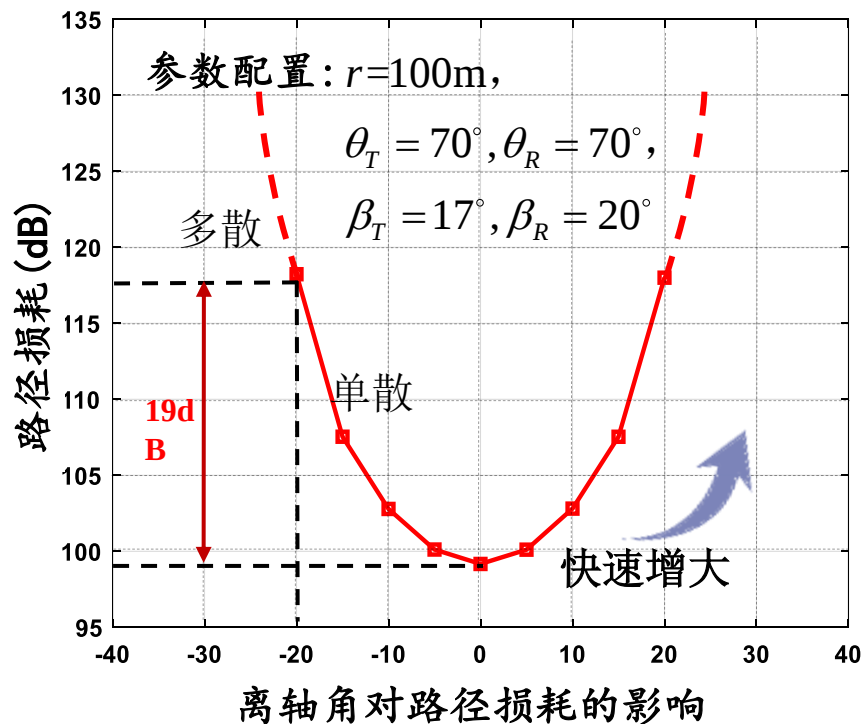
❖ 离轴角的信道分离

有阵列式效果无隔离缺陷



离轴角 $\varphi \rightarrow 20^\circ$ 完全分离：

共同体 $V=0$ 19dB 差值



(1) 信道框架结构

□ 信道的空间分隔

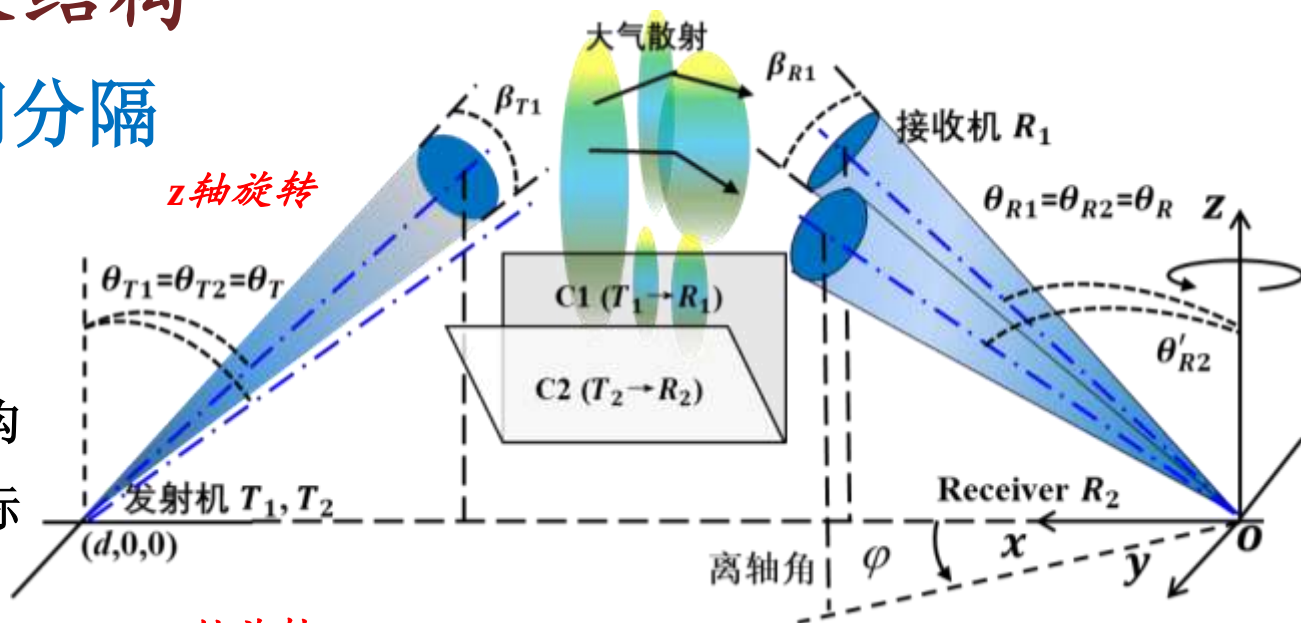
❖ 离轴角方案

优于阵列式

但信道不对称结构

不利于分析和实际

配置

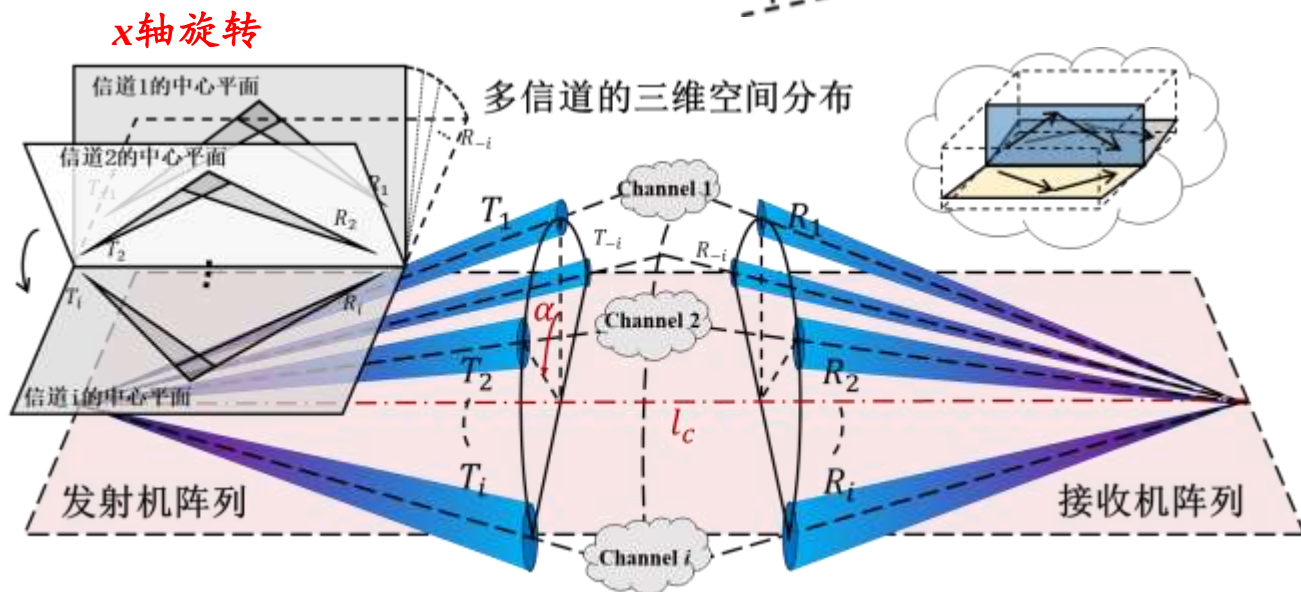


❖ 旋转角方案

非共面对称

易分析和实际实现

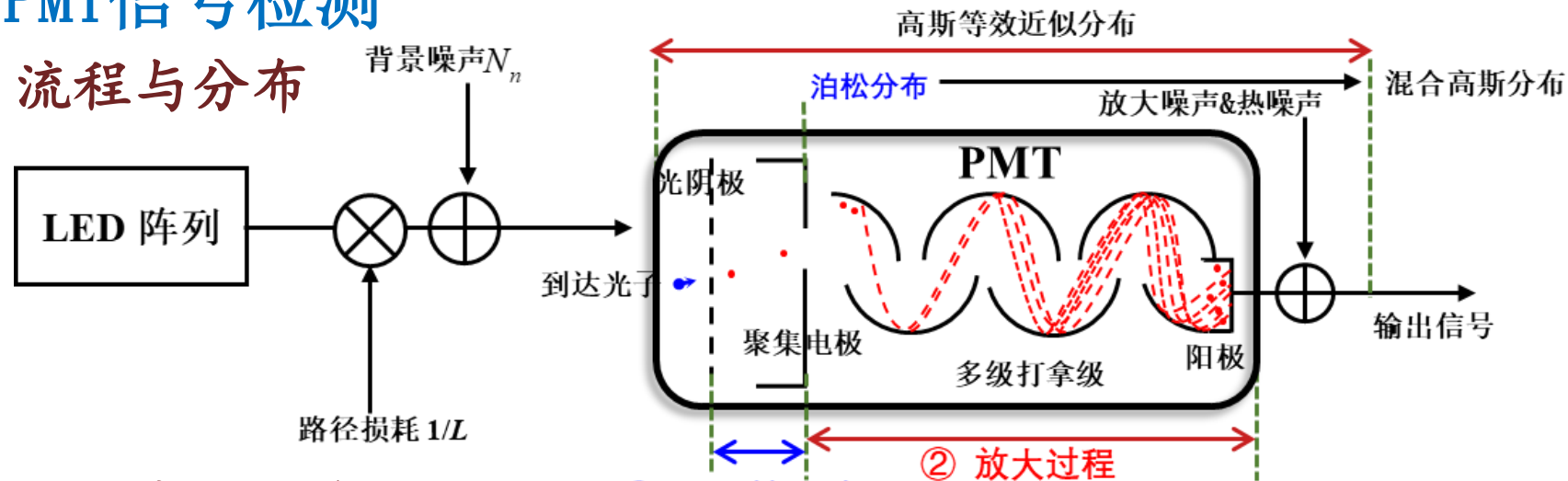
信道空间利用率高



(2)信号检测模型

□PMT信号检测

❖ 流程与分布



❖ 混合高斯分布 (MGD)

$$p_z(z|\lambda) = \sum_{j=0}^{\infty} P_k(j|\lambda) G(z, jAe, j\sigma^2 + \delta_n^2) \quad \text{泊松分布条件上的高斯噪声混合}$$

❖ 高斯等效近似(GAD)

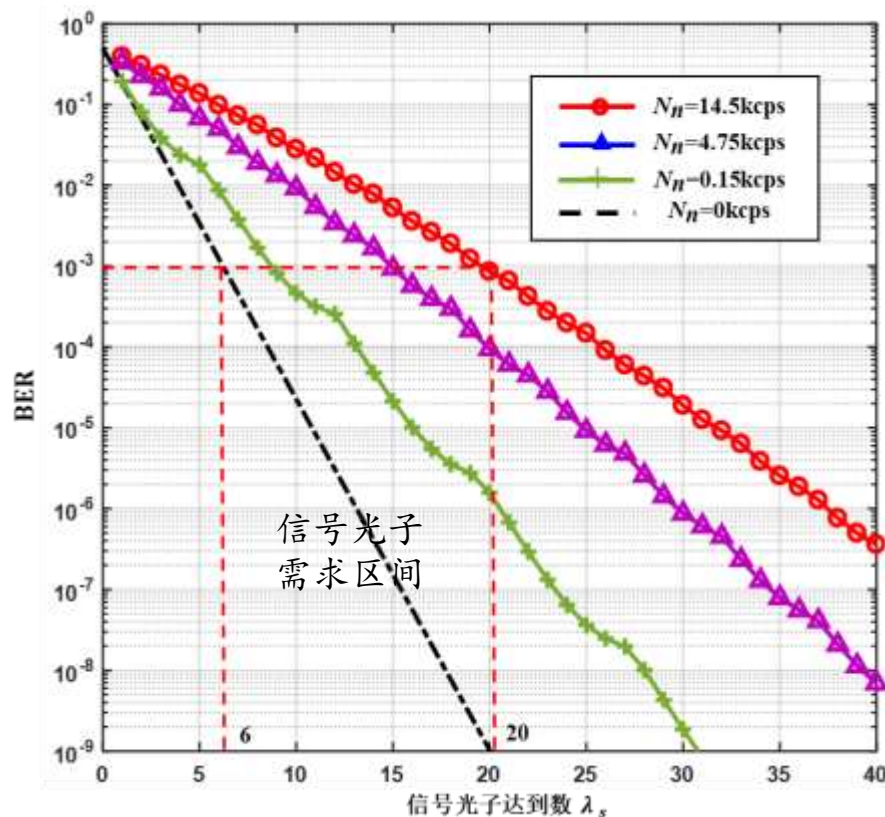
本征函数分析

$$p_z(z|\lambda) \approx G(z, \lambda Ae, \lambda A^2 e^2 + \lambda \sigma^2 + \sigma_n^2) \quad \text{近似表征 (误码率} \checkmark \text{ 计算量} \downarrow \text{)}$$

(2)信号检测模型

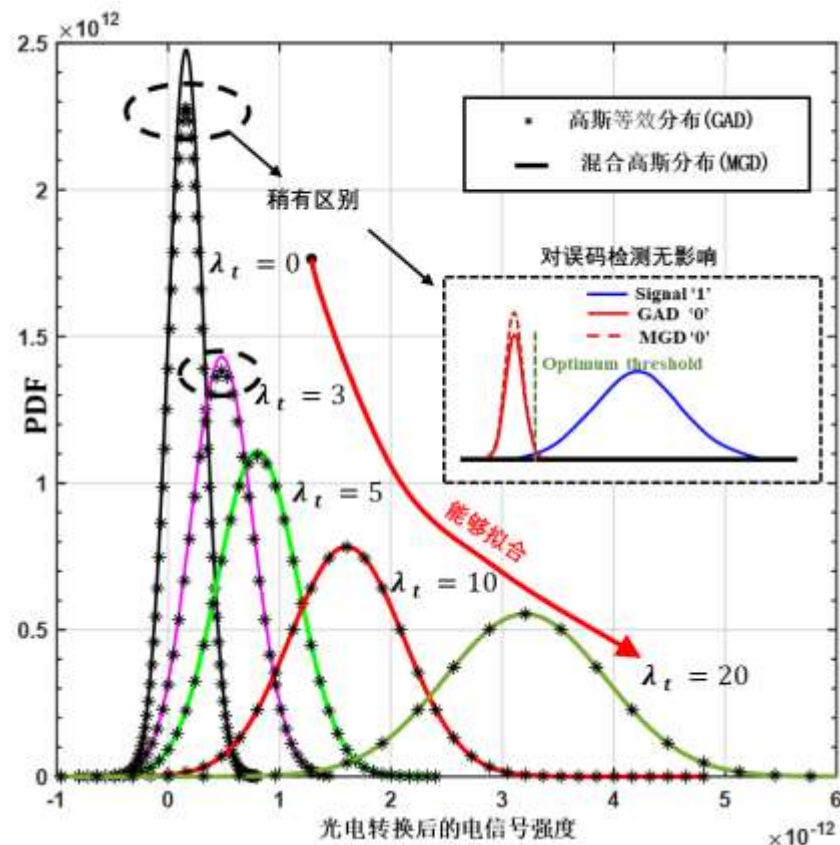
□模型仿真验证

$N_n \uparrow \text{BER} \uparrow$
 $\text{BER}=10^{-3}$ 信号光子 6~20
 中午最差 $\lambda_s \geq 20$



结论：模型准确有效

小的 λ PDF有区别 检测无误
 $\lambda \uparrow$ 效果 $\uparrow$ PDF拟合一致



(2)信号检测模型

□ 误码率计算

理论计算 $p_z^1(z_{th} | (\lambda_s + \lambda_n)) = p_z^0(z_{th} | \lambda_n)$

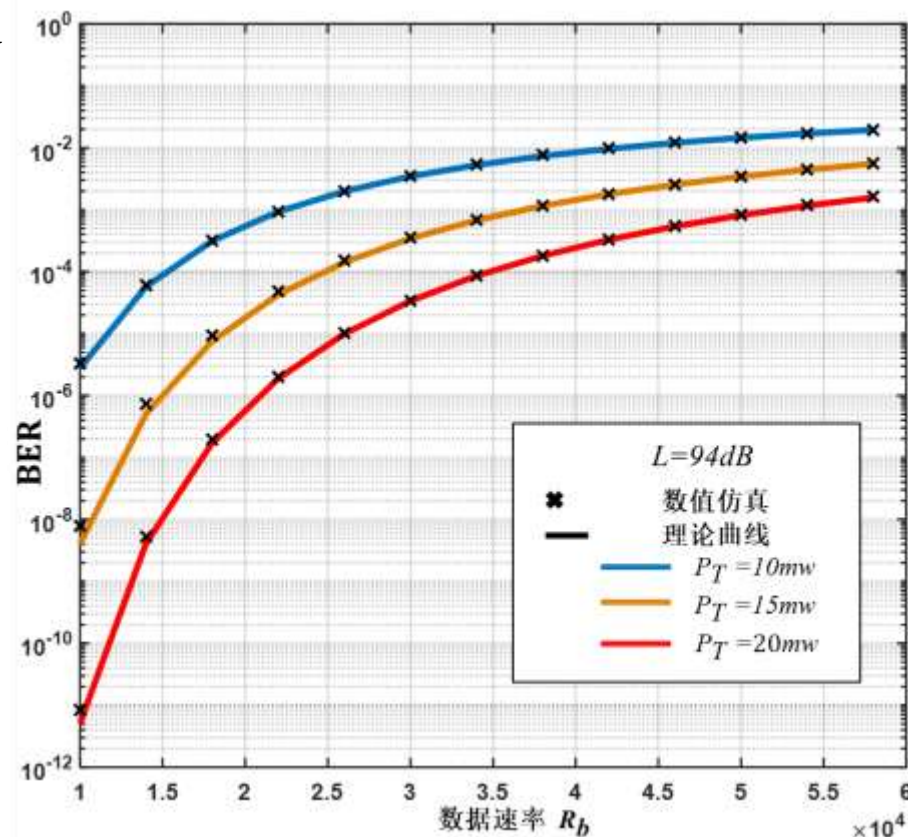
数值仿真
$$\begin{cases} z(m, j) = y(m, j) \oplus s(m, j) \\ P_b = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N z(m, j) / NM \end{cases}$$

❖ 仿真结果

- 1、数值仿真与理论曲线结果匹配
- 2、数据速率 $\uparrow$ BER $\uparrow$
- 3、发射功率 $\uparrow$ BER $\downarrow$

结论：数值仿真方案有效

参数	符号	数值
背景噪声计数率	N_n	14.5kcps
滤光片效率	η_f	0.2
PMT 量子效率	η_p	0.3
负载电阻	R_L	5M Ω
环境温度	T^0	300K
仿真次数	M	10^8



(3)性能仿真分析

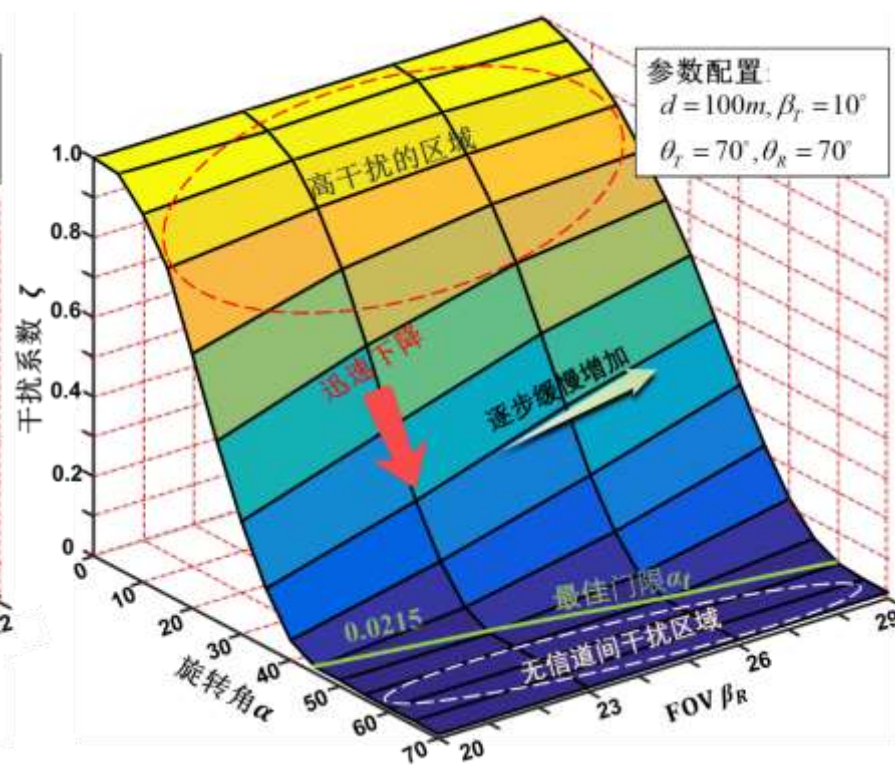
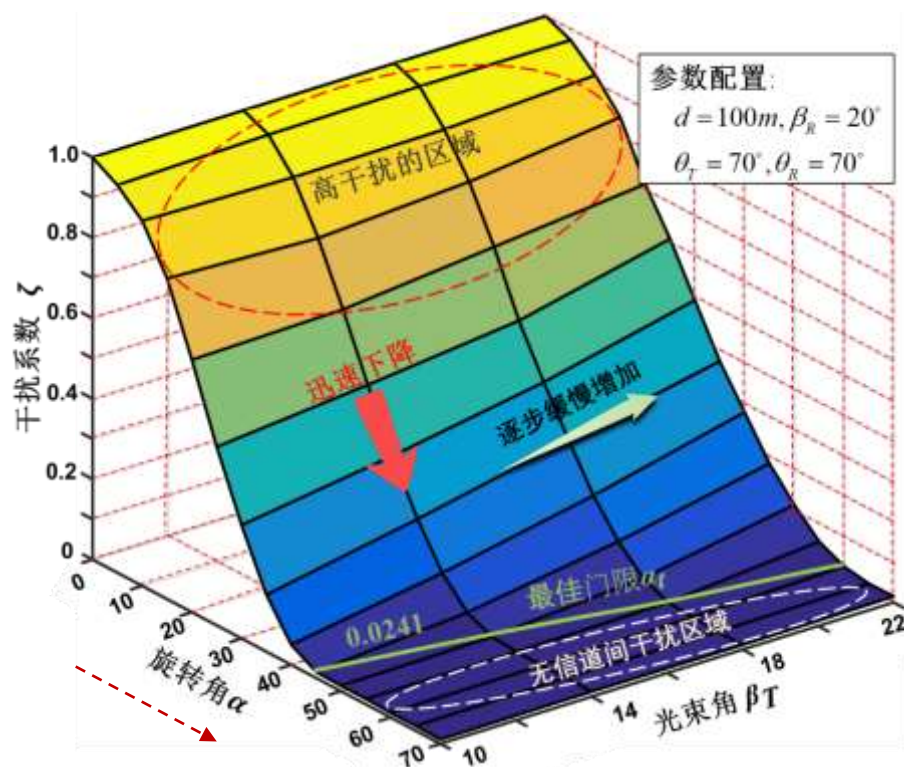
□收发机配置参数vs干扰系数

$\alpha \uparrow$ 干扰系数 $\downarrow$

❖ 光束角和FOV的影响

$\beta_T \beta_R \uparrow$ 干扰系数 $\nearrow$ 截止旋转角 $\nearrow$

$\beta_T \beta_R$ 小分离效果更好 干扰系数门限 0.02



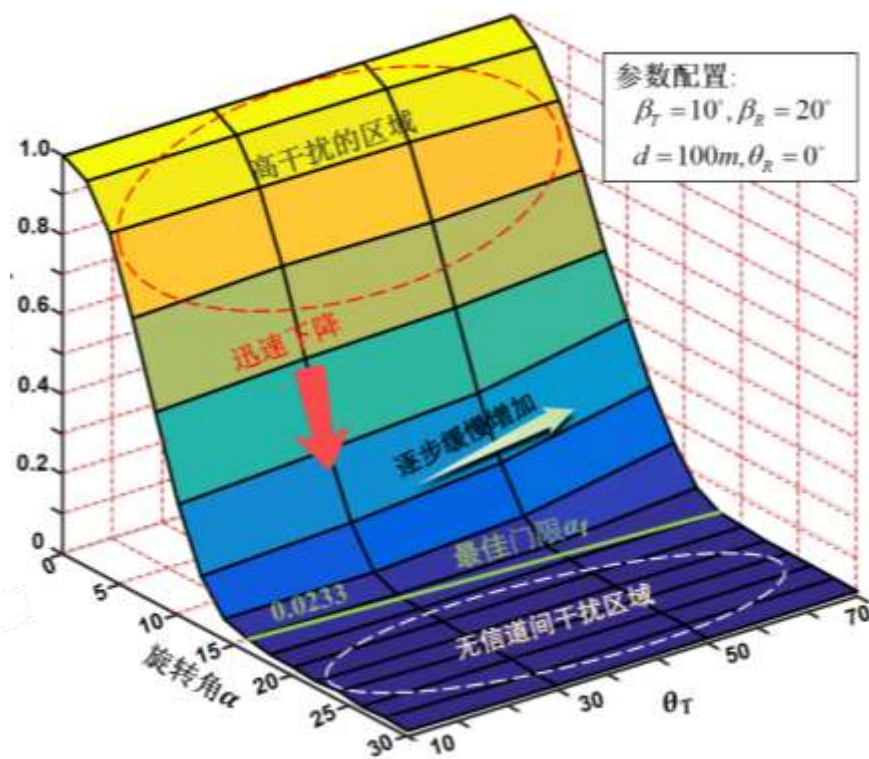
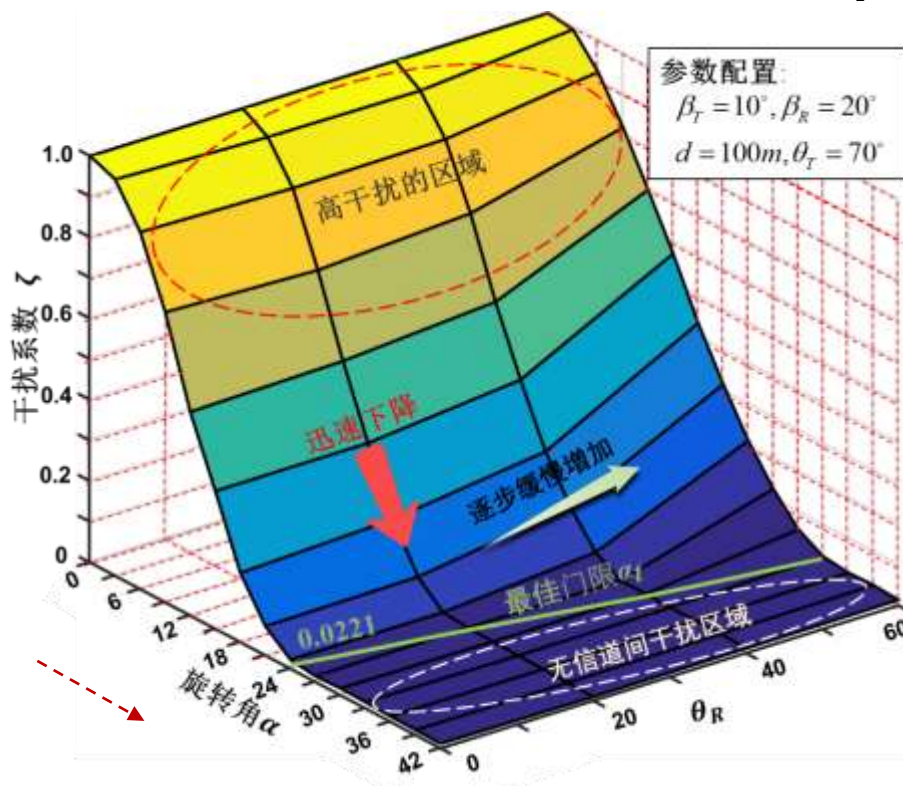
(3)性能仿真分析

□收发机配置参数vs干扰系数

❖收发机倾角的影响

$\theta_T \ \theta_R \uparrow$ 干扰系数 $\nearrow$ 截止旋转角 $\searrow$

小 $\theta_T \ \theta_R$ 分离效果好 垂直接收 ($\theta_R=0$)



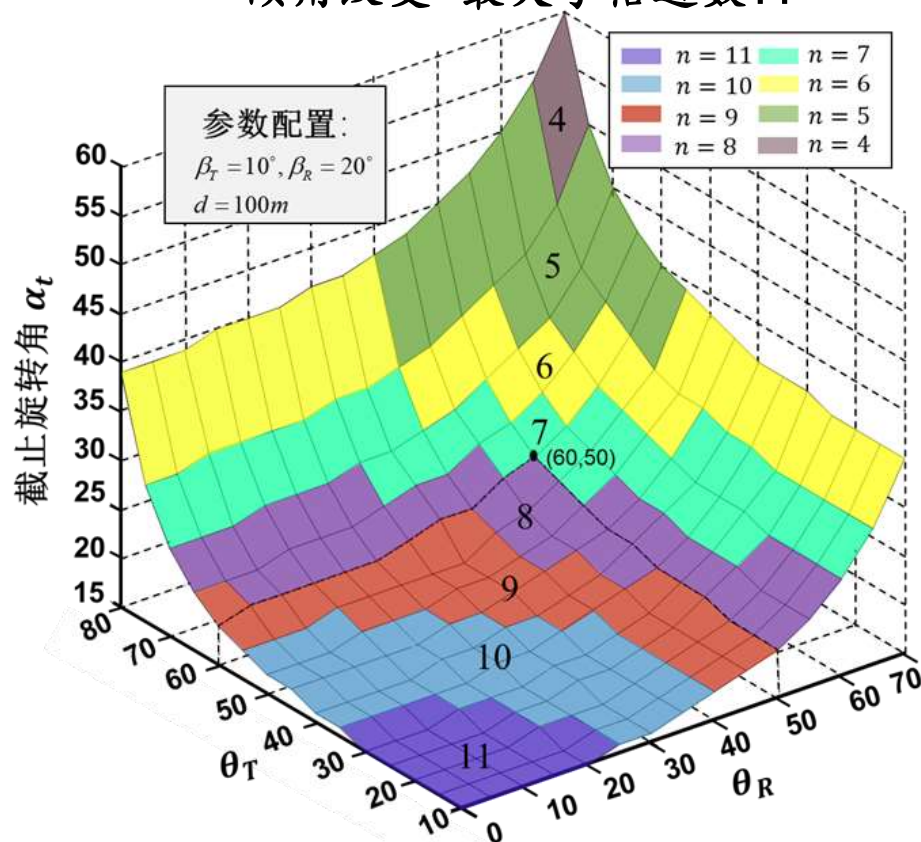
(3)性能仿真分析

□收发机配置参数vs干扰系数

◆可容纳最大独立信道数

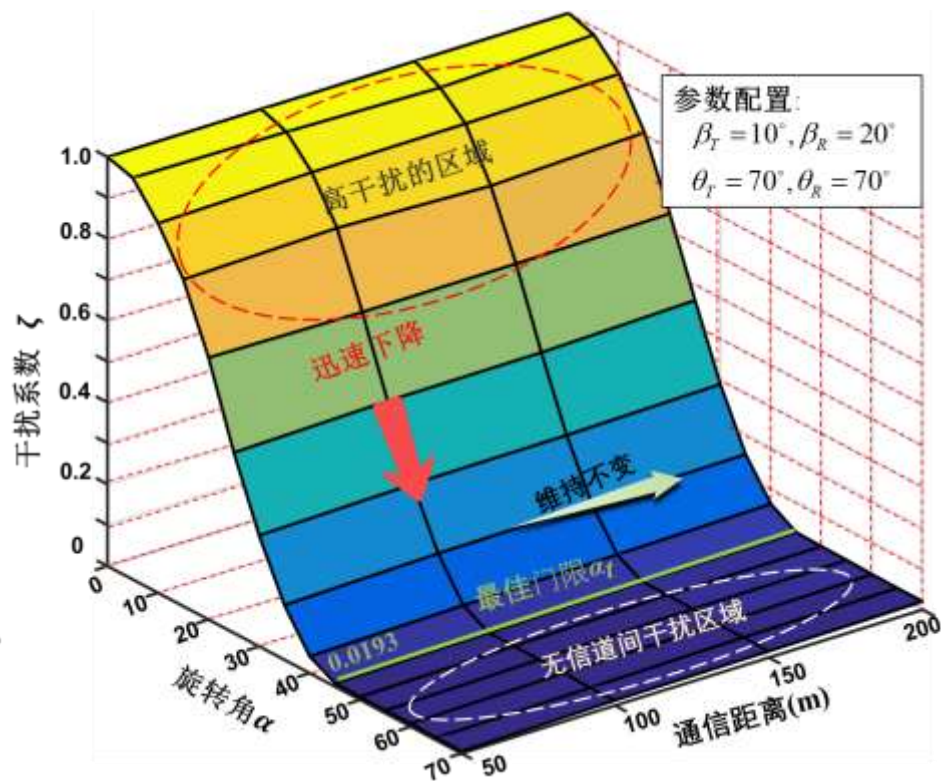
$$\beta_T = 10^\circ, \beta_R = 20^\circ$$

倾角改变 最大子信道数11



◆通信距离的影响

距离无影响，旋转角效果明显



(3)性能仿真分析

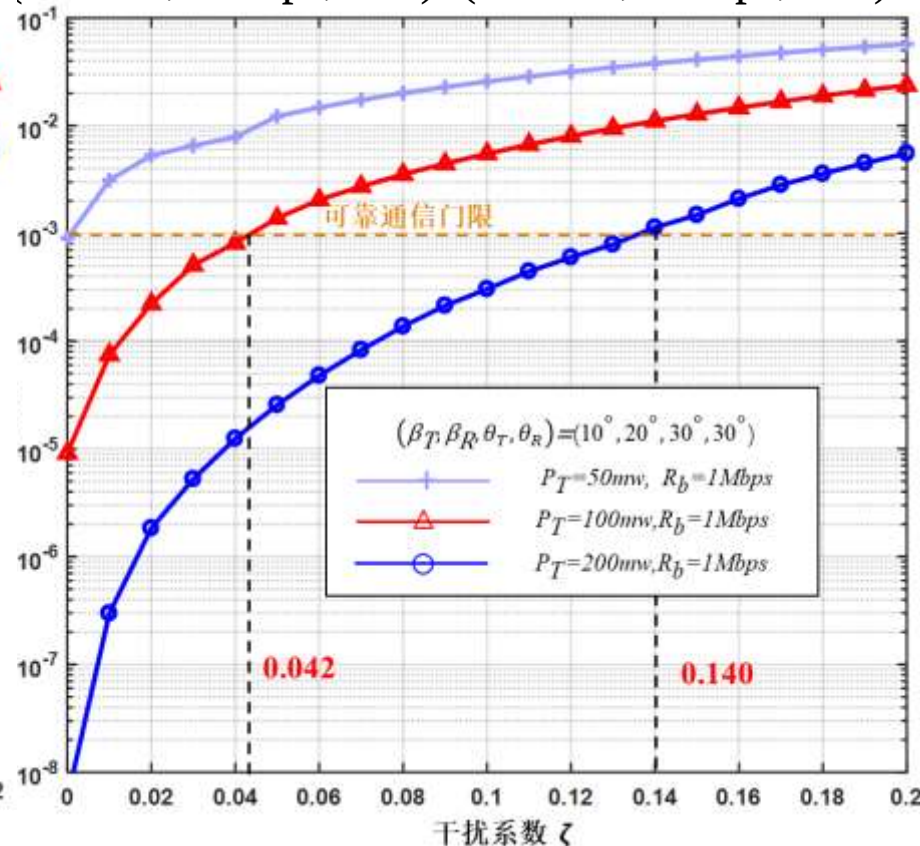
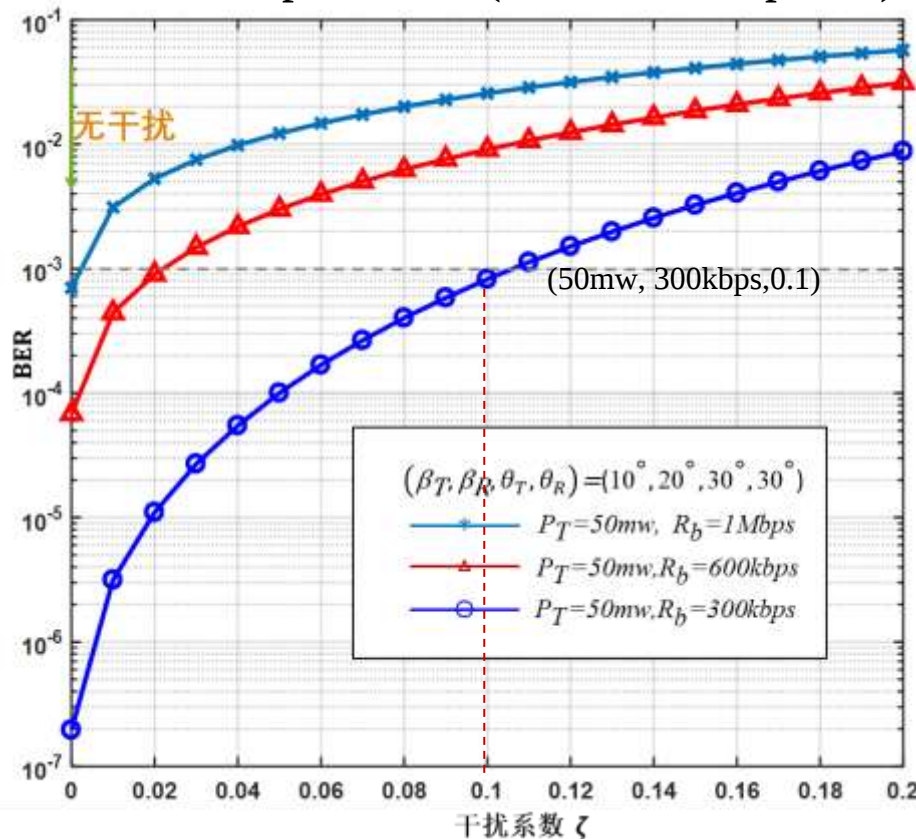
干扰系数vs BER

$R_b \uparrow$ BER $\uparrow$ $\zeta \uparrow$ BER $\uparrow$

降低速率或提升发射功率 具备抗干扰的能力

$P_T \uparrow$ BER $\downarrow$ 抗干扰 $\uparrow$

50mw 1Mbps $10^{-3} \rightarrow (50\text{mw}, 300\text{kbps}, 0.1)$ (100mw, 1Mbps, 0.04) (200mw, 1Mbps, 0.14)



(3)性能仿真分析

□低干扰方案

速率为核心：发射功率↑

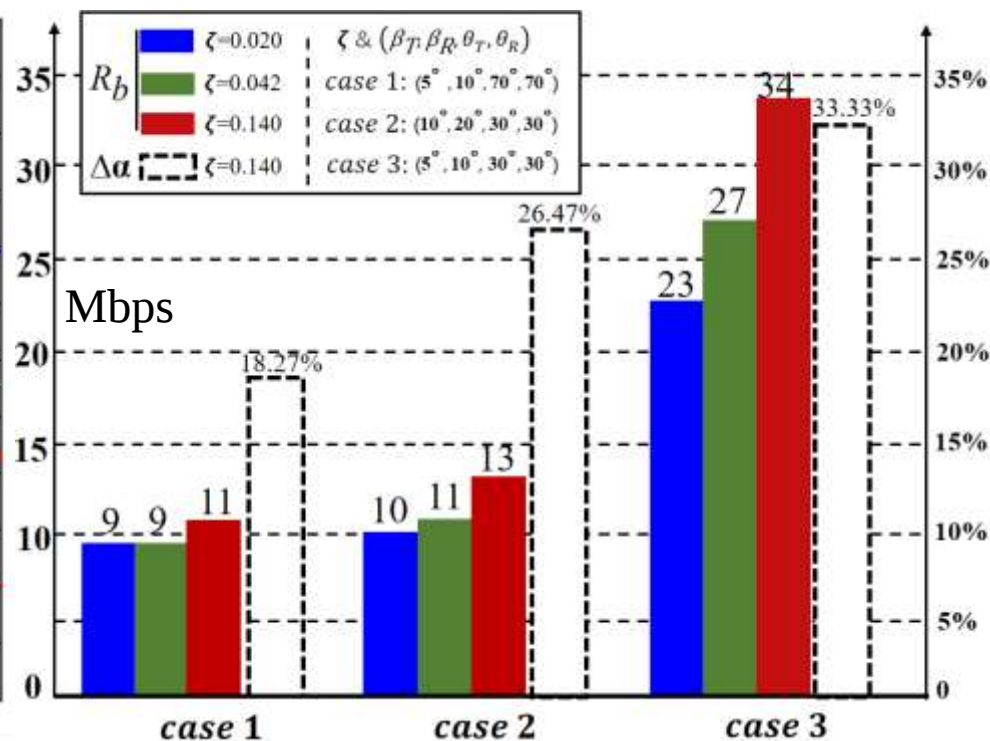
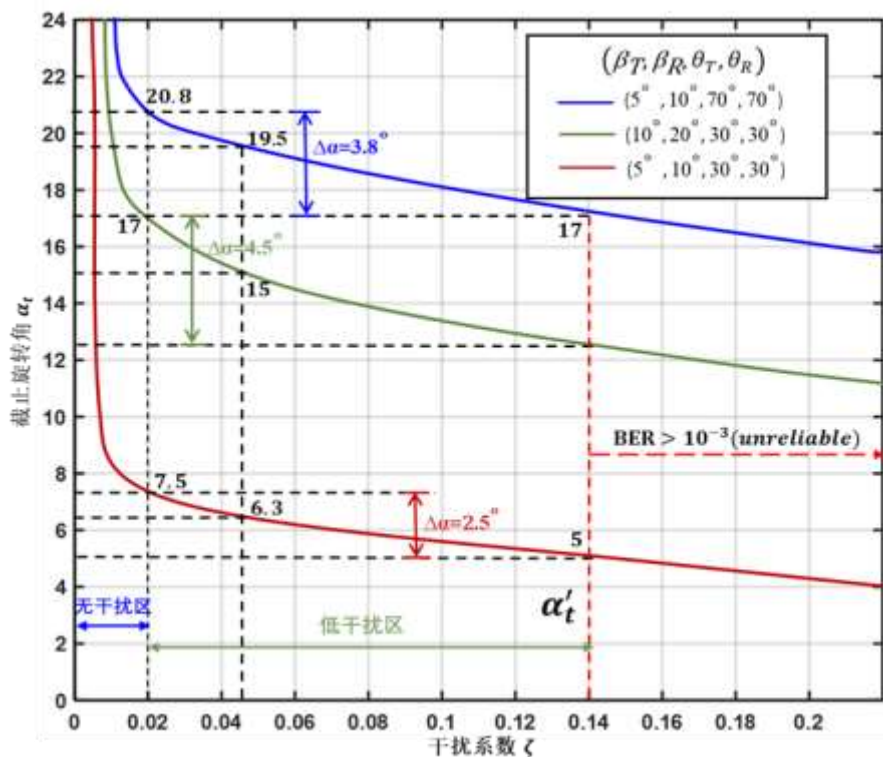
允许低干扰 (10^{-3}) 截止旋转角↓

子信道数量↑ 速率↑

❖ 最大速率&对准需求

无干扰27Mbps低干扰 34Mbps

or 1/3的对准需求(截止旋转角)



2.2.4 环形拓扑UVC CDMA安全组网

❖ 1) 环形网络拓扑结构

- ❖ 环形拓扑的优势：三种拓扑的对比
- ❖ 环形网络的框架：中继节点、用户节点和覆盖方式

❖ 2) 环形拓扑关键配置 (点+线→网)

- ❖ 中继节点配置：全向接收
- ❖ 多用户分布：功率控制
- ❖ 三种链路配置：
中继链路 (TDM)、上行链路 (CDMA)、下行链路 (MIMO)

❖ 3) 性能仿真分析

- ❖ 不同条件下的中继节点覆盖范围
- ❖ 多用户CDMA的信号检测与误码性能

(1) 环形网络拓扑

□ UVC组网移动方案

❖ 组网需求 远距离覆盖 移动支持 多用户业务

❖ 三种拓扑 环状vs蜂窝状vs中继辅助 两种环状覆盖模式

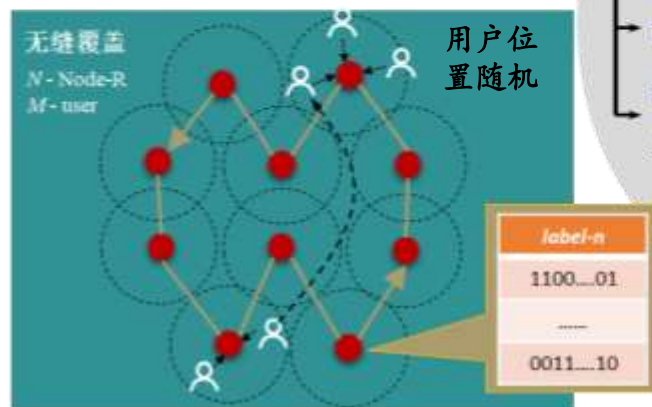
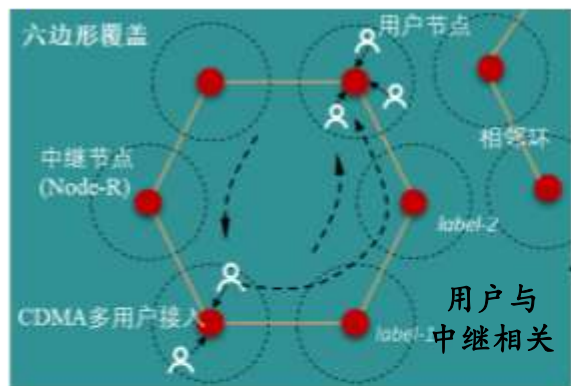
❖ 三种链路

中继链路：
节点→节点

上行链路：
用户→节点

下行链路：
节点→用户

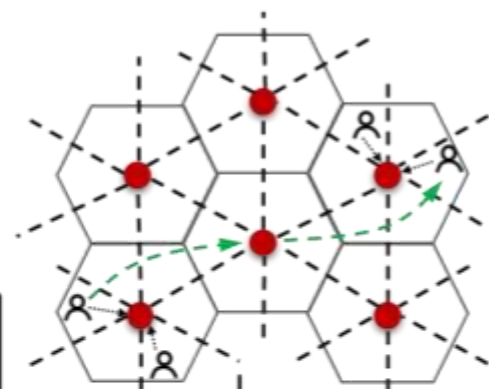
(a) 环状网络拓扑



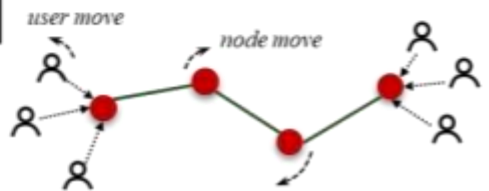
优缺对比

- 灵活的网络管理
- 移动支持
- 非全连接的节点
- 大规模的多用户接入

(b) 蜂窝状网络拓扑



(c) 中继辅助拓扑



2.2.4 环形拓扑UVC CDMA安全组网

链路配置

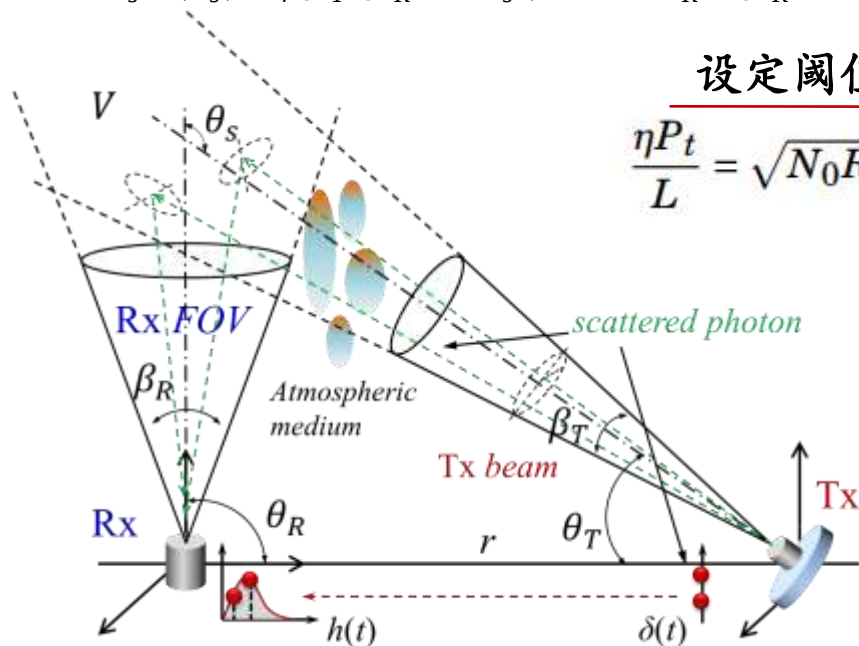
❖ 中继链路（远距离）

与用户数据TDM 避免干扰

❖ 上行链路（多用户接入）

CDMA 全向接收 路径损耗

$$L = \frac{96d \sin \theta_T \sin^2 \theta_R (1 - \cos(\beta_T / 2)) e^{[k_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R) / \sin \theta_s]}}{k_s P(\theta_s) A_r \beta_T^2 \beta_R \sin \theta_s (12 \sin^2 \theta_R + \beta_R^2 \sin^2 \theta_T)}$$



设定阈值

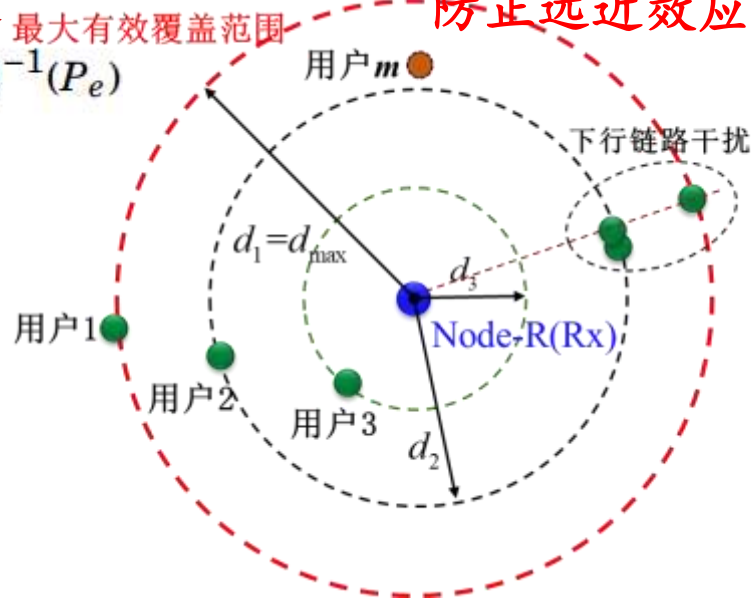
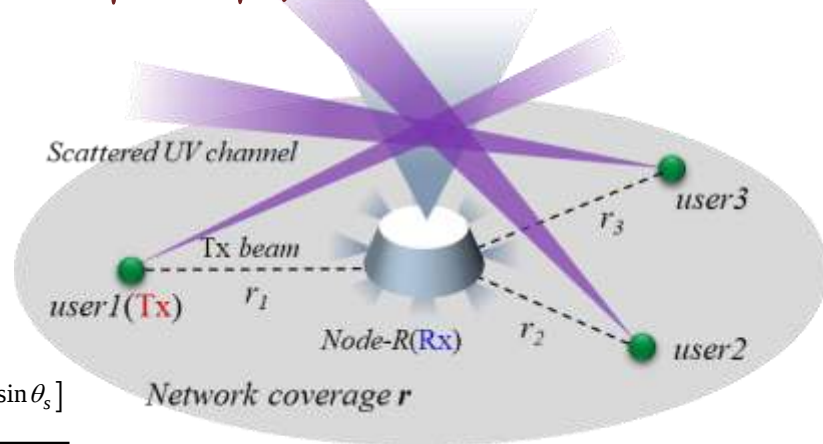
$$\frac{\eta P_t}{L} = \sqrt{N_0 R_b} Q^{-1}(P_e)$$

❖ 多用户分布

功率控制：

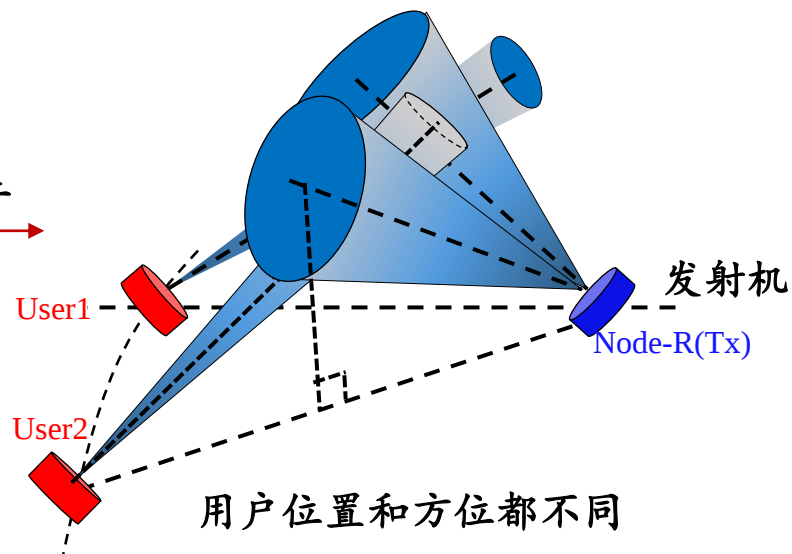
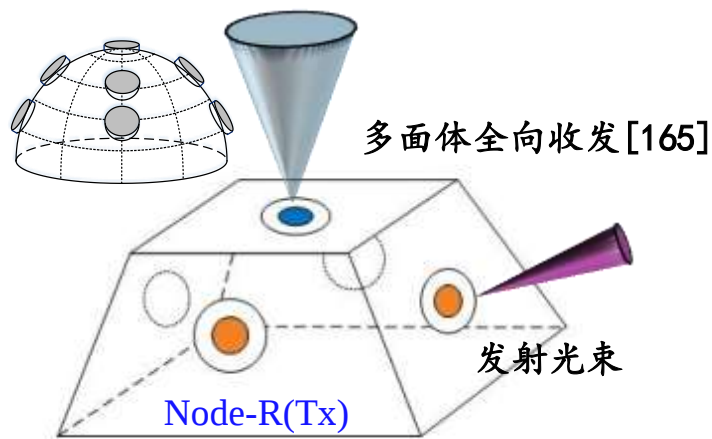
防止远近效应

❖ 中继节点配置

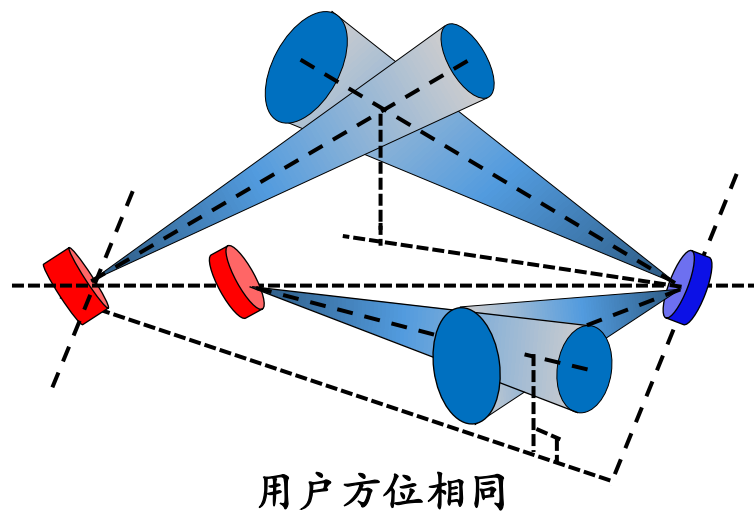
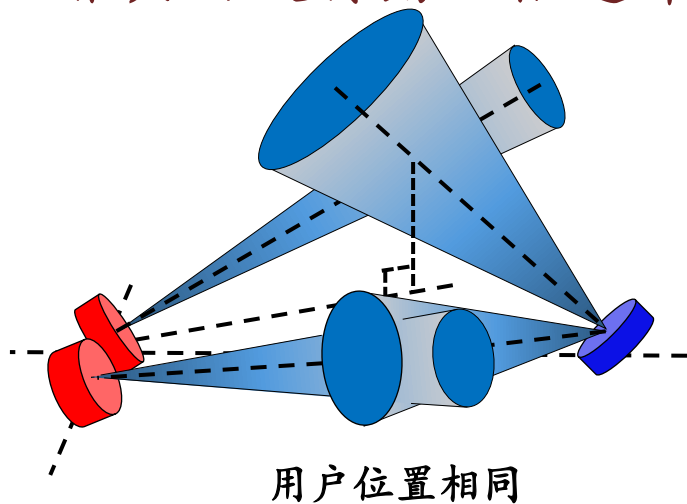


□ 下行链路

❖ 基于方位角的多天线

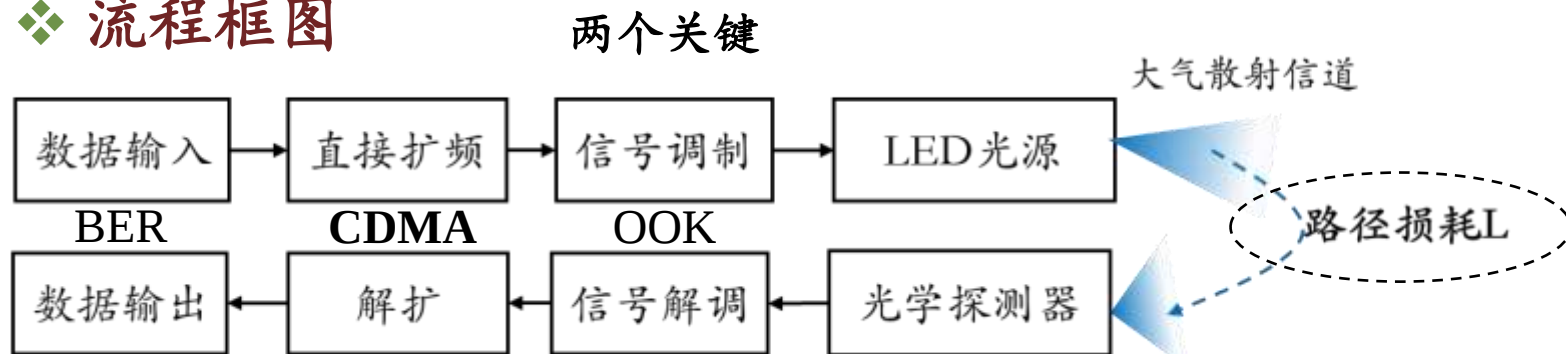


❖ 非共面旋转角→信道冲突



□ 关键参数

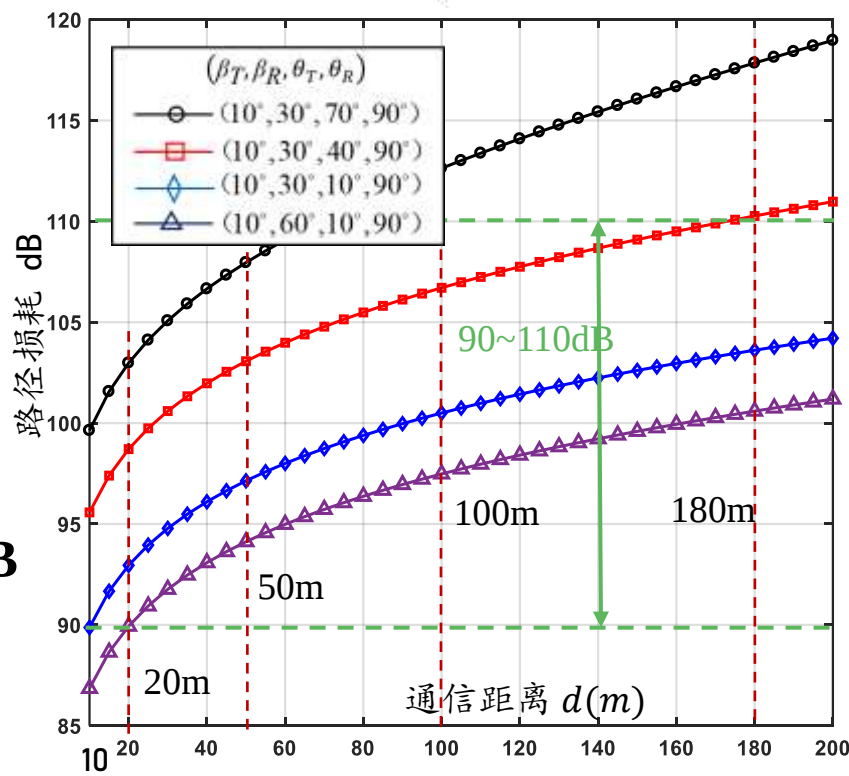
❖ 流程框图



❖ 路径损耗

1、发射仰角 $\uparrow$ $L \uparrow$
 FOV $\uparrow$ $L \downarrow$
 通信距离 $\uparrow$ $L \uparrow$

2、 $d=20\sim 180\text{m} \rightarrow L=90\sim 110\text{dB}$



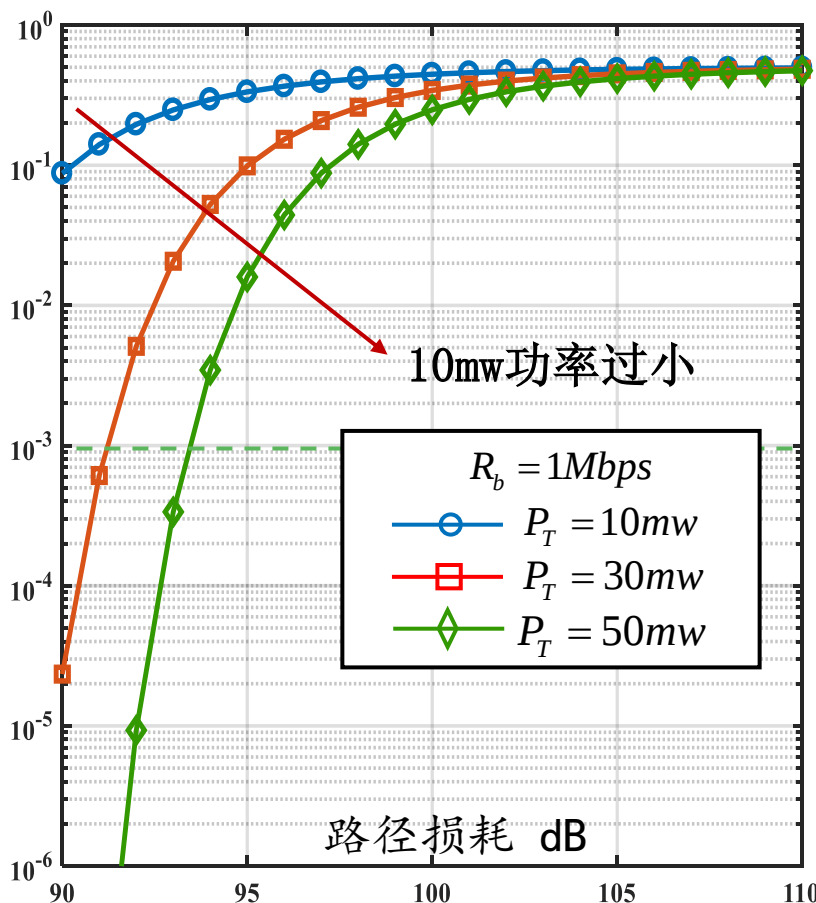
2.2.4 环形拓扑UVC CDMA安全组网

□ 关键参数

❖ 发射功率 选取合适功率

1Mbps

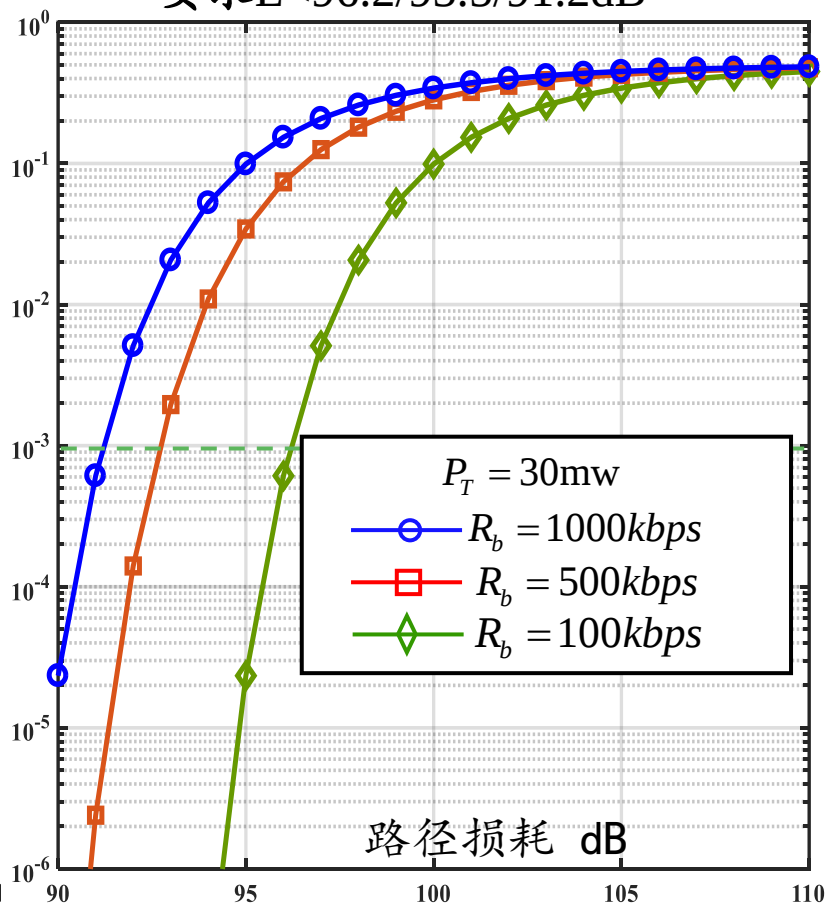
功率大致范围要求 $P_t > 10\text{mw}$



❖ 传输速率

30mw, 100/500/1000kbps,

要求 $L < 96.2/93.5/91.2\text{dB}$



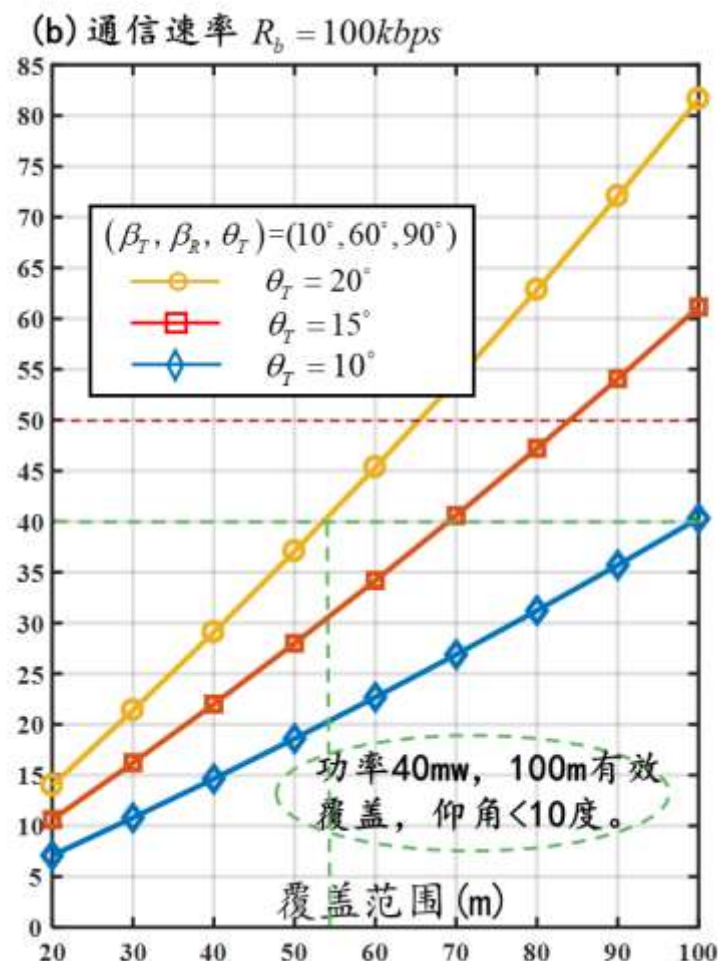
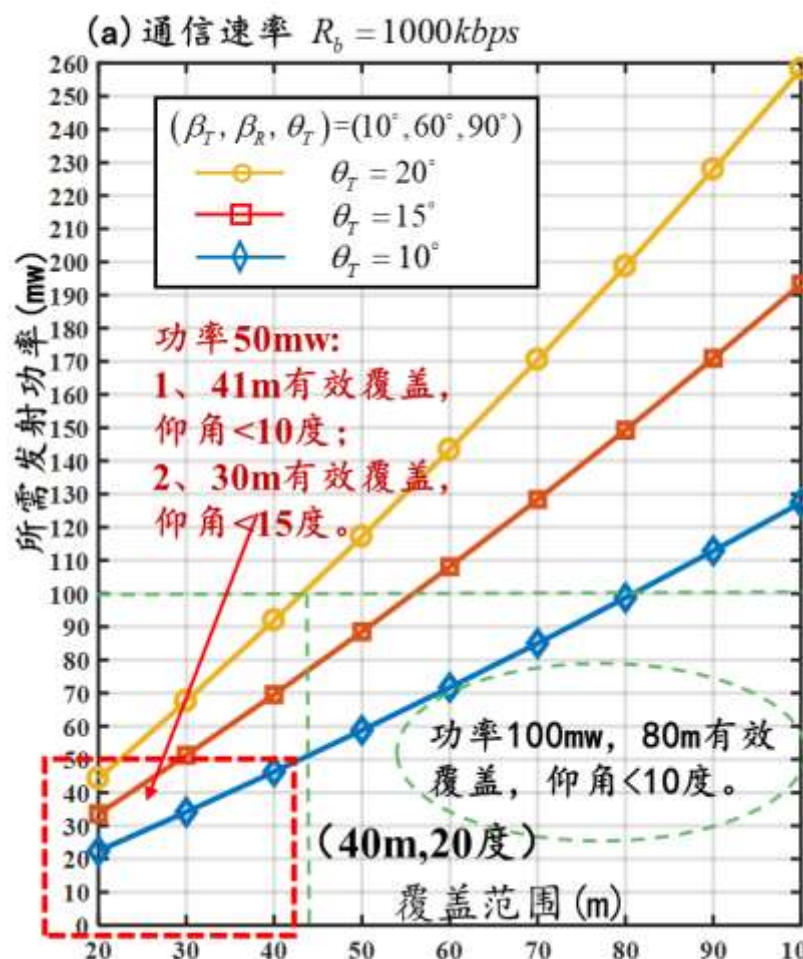
2.2.4 环形拓扑UVC CDMA安全组网

□ 关键参数

❖ 通信速率vs 覆盖范围

$$Pe = 10^{-3}$$

- 1、1Mbps 100mw $\rightarrow$ 80m, $\theta_T < 10$ or (40m, $\theta_T < 20$)
- 2、1Mbps 50mw $\rightarrow$ 41m, $\theta_T < 10$ (30m, $\theta_T < 15$)
- 3、100kbps 40mw $\rightarrow$ 100m, $\theta_T < 10$ (53m, $\theta_T < 20$)



目录

CONTENTS

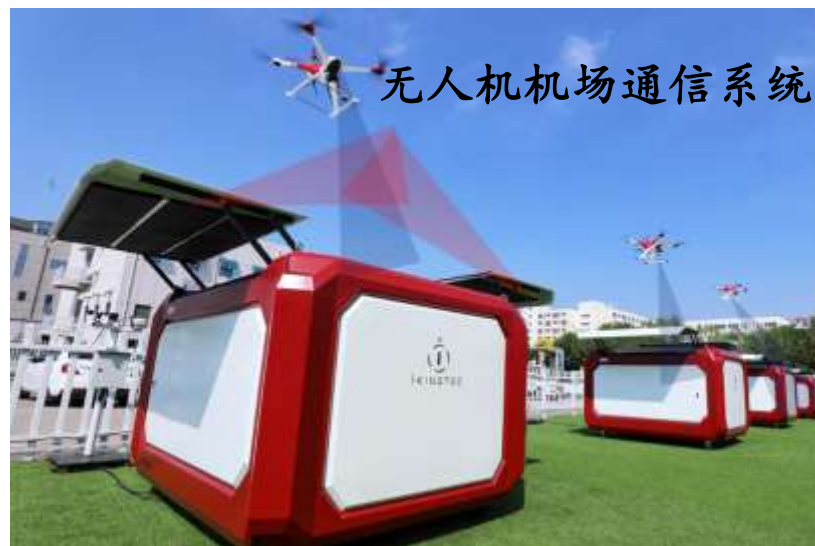
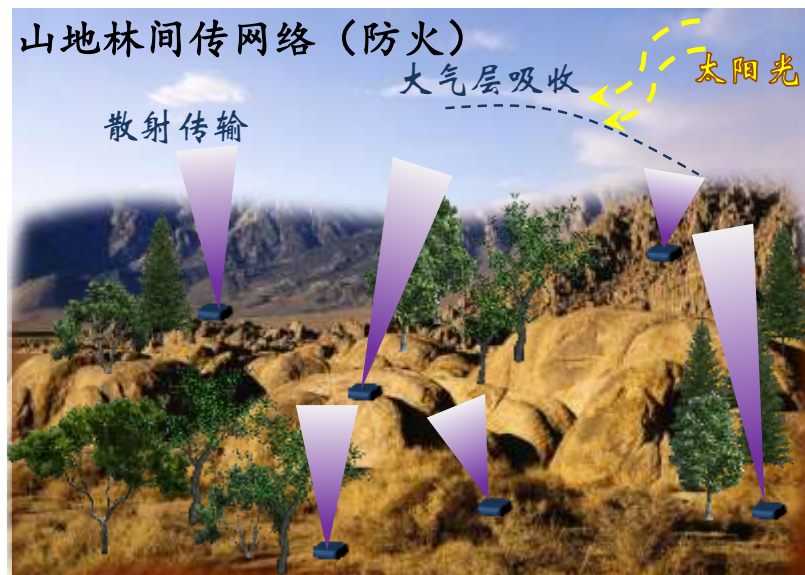
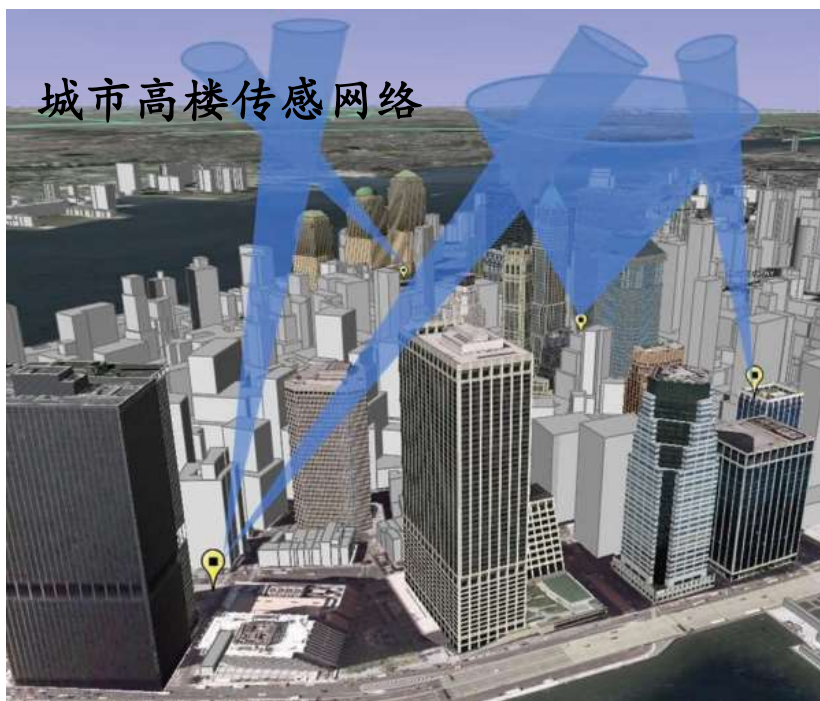
 **1 研究背景和国内外进展**

 **2 项目组相关工作**

 **3 技术应用及思考**

□ 应用场景 商用民用

- ❖ 无人机电力线紫外电晕的漏电检测
- ❖ 工厂悬浮物环境污染监测
- ❖ 无人机辅助降落
- ❖ 及其它潜在的应用场景



□ 应用场景

军事保密通信

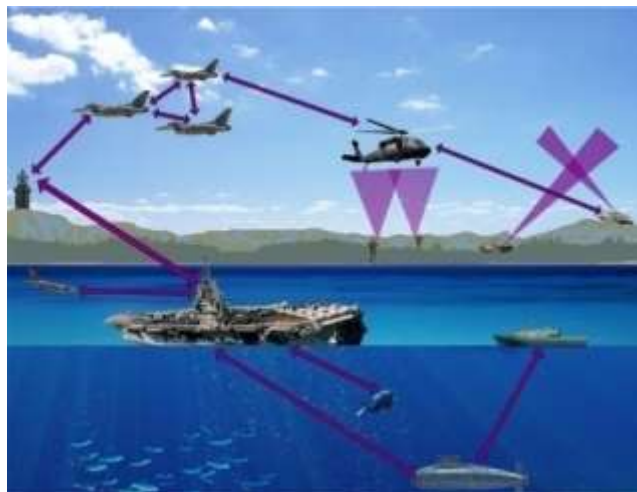
无线电静默或抗电磁干扰的隐秘移动通信

复杂金属腔体内通信
(航母/军舰/潜艇)

舰面调度
野战车
队反恐小队
机群编队



陆海空多部队协同



航母/军舰/潜艇

□ 往应用方面落地推进

❖ 理论探索上：

- 1、实际信道测量方面（大气建模）
- 2、光量子
- 3、偏振这一块
- 4、信号处理

❖ 需求拓展上：融合其它技术

- 1、短距离、抗干扰或保密需求的无人机通信场景
 - 紫外光NLOS链路节点定位（距离和方位测定）
 - 紫外光NLOS链路的移动性（多天线vs小型化）
 - UVC 理论在无人机集群组网的应用
- 2、室内的场景
- 3、多光谱检测（成像）
- 4、控制信道（密钥）

