

第十三期川渝前沿论坛

非视距紫外光通信信道建模

曹天 博士研究生

清华大学电子工程系

caot19@mails.tsinghua.edu.cn



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

汇报日期：2023年05月11日

- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

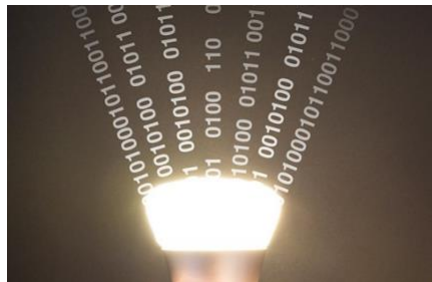
■ 无线射频通信 → 无线光通信

➤ 频谱资源紧张、用户需求激增^[Ericsson'2022]

	2022年	2028年末（预计）
5G用户数	8.7亿	50亿
移动数据量 (GB/月/台)	15	46
固定无线接入数	1亿 (5G约占19%)	3亿 (5G约占80%)

✓ 研究更高频谱效率的技术

✓ 新的频谱资源



无需频谱
许可，抗
电磁干扰

■ 非视距紫外光通信概述

根据光的不同波长，无线光通信可分为：[Vavoulas'2019, Hamza'2018]

视距传输

可见光通信：380-780nm

- 通信与照明一体化

自由空间光通信：1550nm

- 大气窗口、人眼安全、器件成熟

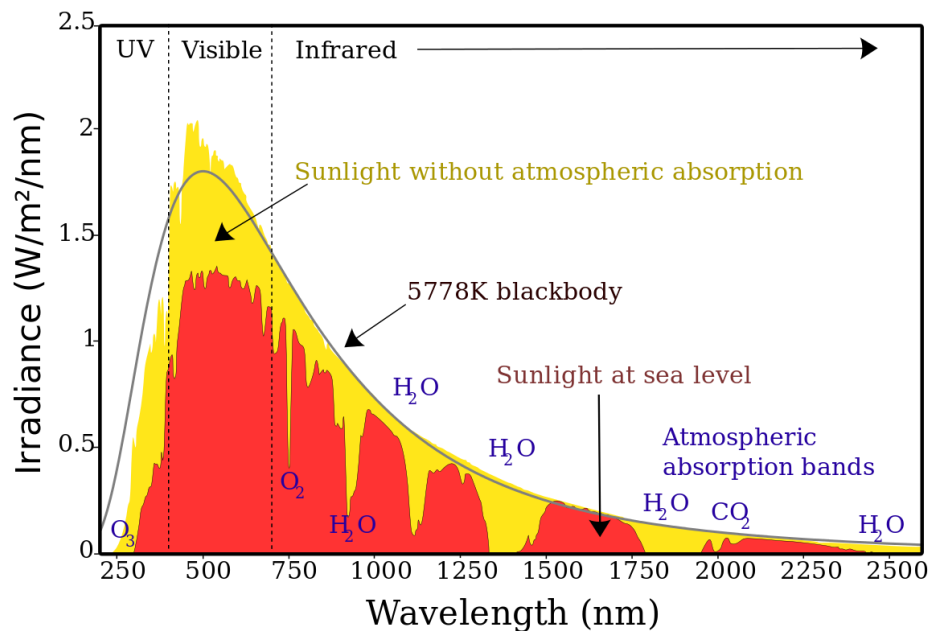


紫外光通信：200nm-280nm:

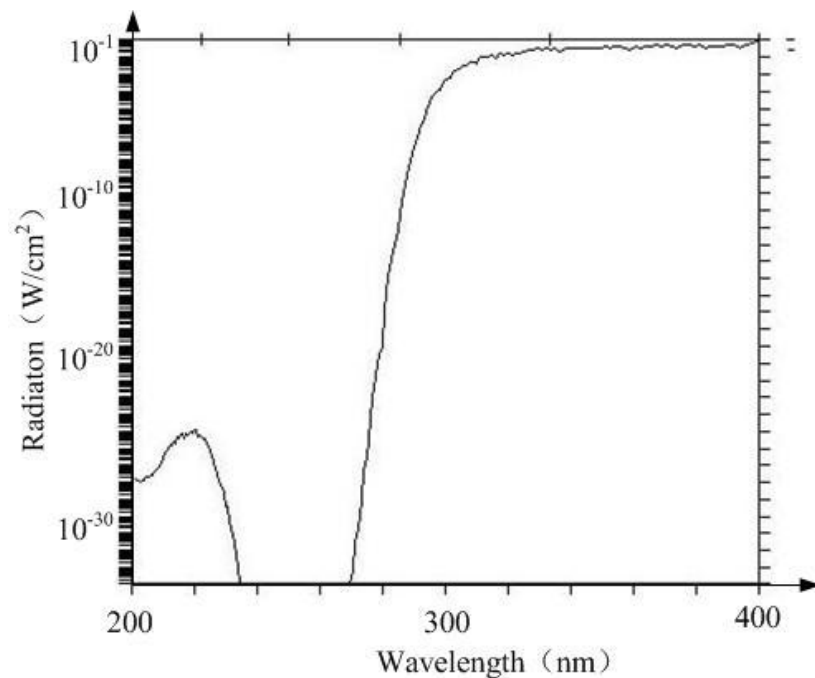
- 臭氧层吸收：“日盲” → 低背景噪声
- 分子+气溶胶粒子：散射强 → 非视距通信
消光强 → 安全通信

■ 非视距紫外光通信概述

Spectrum of Solar Radiation (Earth)



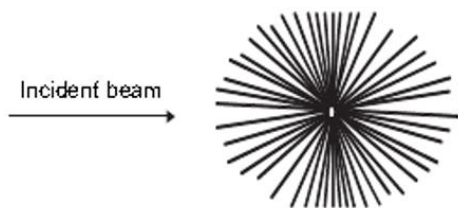
太阳光辐射光谱 [高新宇'2022]



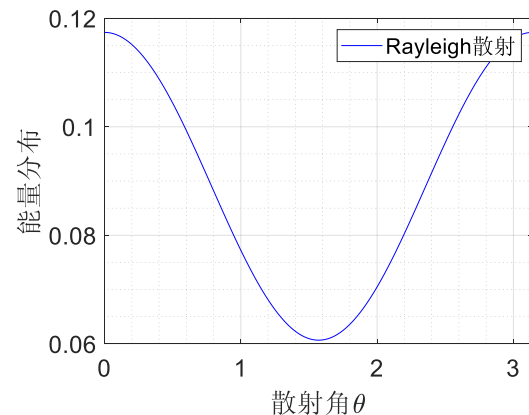
地表太阳光中紫外波段 [Tang'2008]
辐照分布

由于臭氧层的存在，到达地表的太阳辐照中200-280nm的光功率极低（日盲），接收机可获得极低的背景噪声。

■ 非视距紫外光通信概述

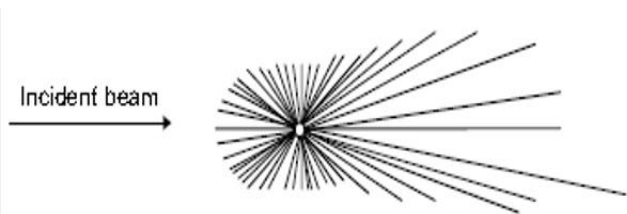


266nm紫外光
Rayleigh散射
能量分布

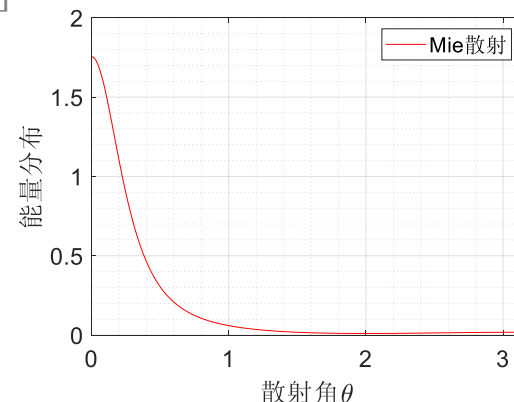


Rayleigh散射 (分子散射) $\lambda \gg \rho_d$ [Andrews'2005]

Rayleigh散射相函数 $P_r(\mu) = \frac{3 [1 + 3\gamma + (1 - \gamma) \mu^2]}{16\pi (1 + 2\gamma)}$ [Bucholtz'1995]



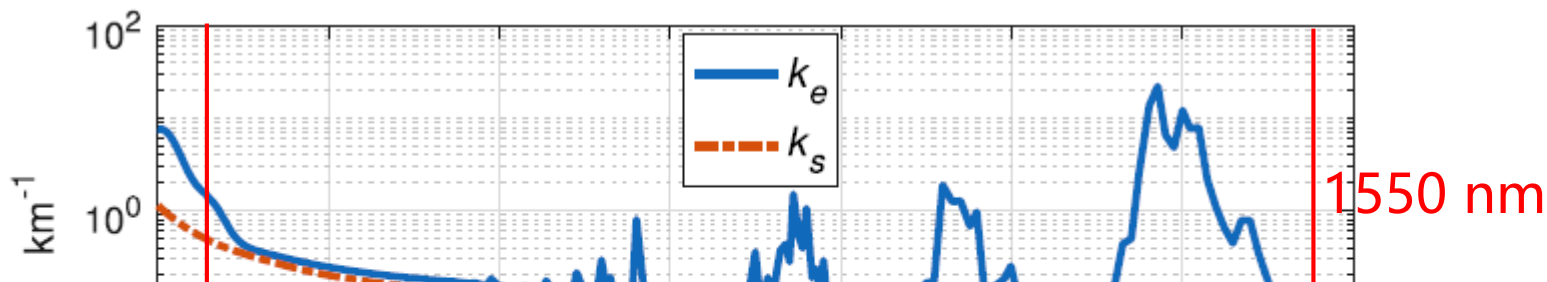
266nm紫外光
Mie散射能量
分布



Mie散射 (气溶胶散射) $\lambda \sim \rho_d$ [Andrews'2005]

Mie散射相函数
Generalized Henyey-Greenstein $P_m(\mu) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} + \frac{f(3\mu^2 - 1)}{2(1 + g^2)^{3/2}} \right]$ [Zachor'1978]

■ 非视距紫外光通信概述



非视距紫外光通信常用于
短距离通信场景（百米左右），
可实现**全向通信**。

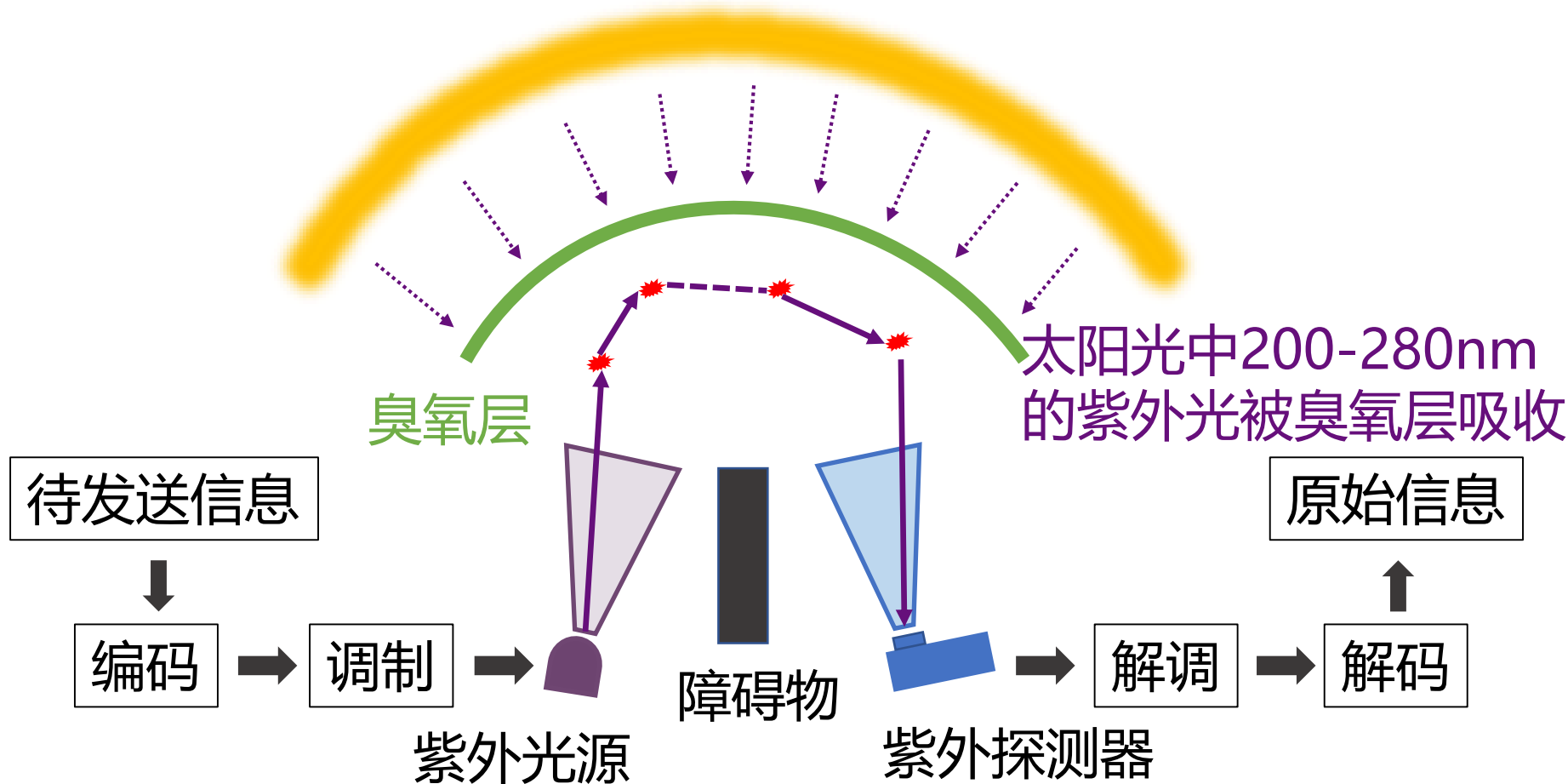
传输1km的大气损耗：
 $1 - \exp(-k_e d) \approx 0.78$

$k_s \approx 0.5 \text{ km}^{-1}$ **散射更强**

传输1km的大气损耗：
 $1 - \exp(-k_e d) \approx 0.04$

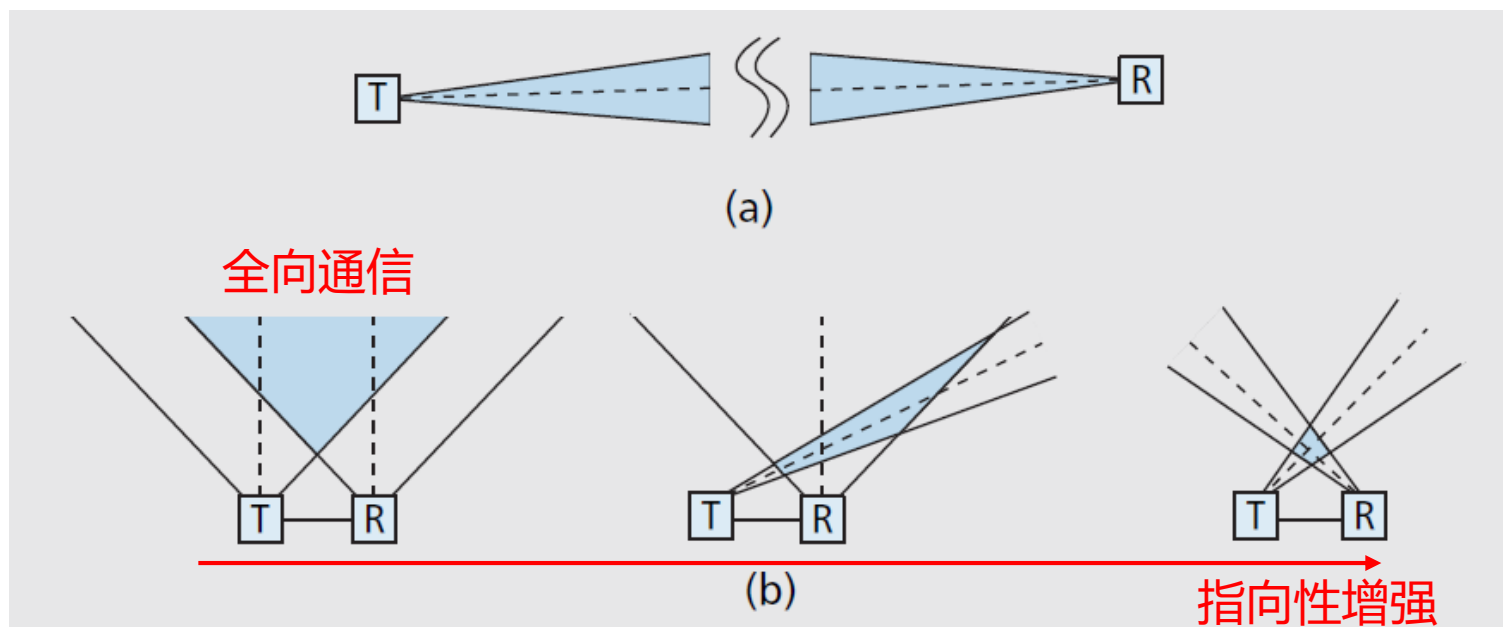
$k_s \approx 0.03 \text{ km}^{-1}$

■ 非视距紫外光通信系统



非视距紫外光通信系统示意图

■ 视距与非视距通信系统设置



通信系统几何结构设置: (a) 视距 (LOS) ; [Xu'2008]
(b) 非视距 (NLOS)

- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

■ 非视距紫外光通信信道模型

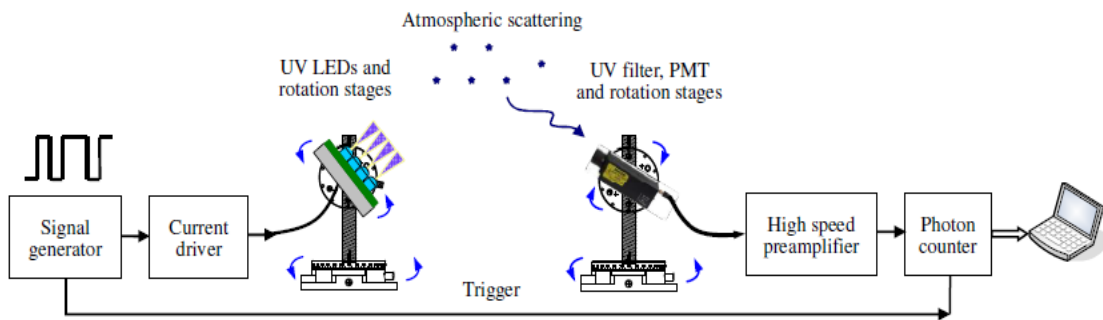
信道模型分类

- 对实验结果进行拟合的**经验模型**
- 基于蒙特卡洛方法的**多次散射模型**
- 具有解析表达式的**单次散射模型**

➤ **经验模型** [Chen'2009]

$$L = \xi r^\alpha \exp(\beta r)$$

- 优点：形式简单
- 缺点：可扩展性差

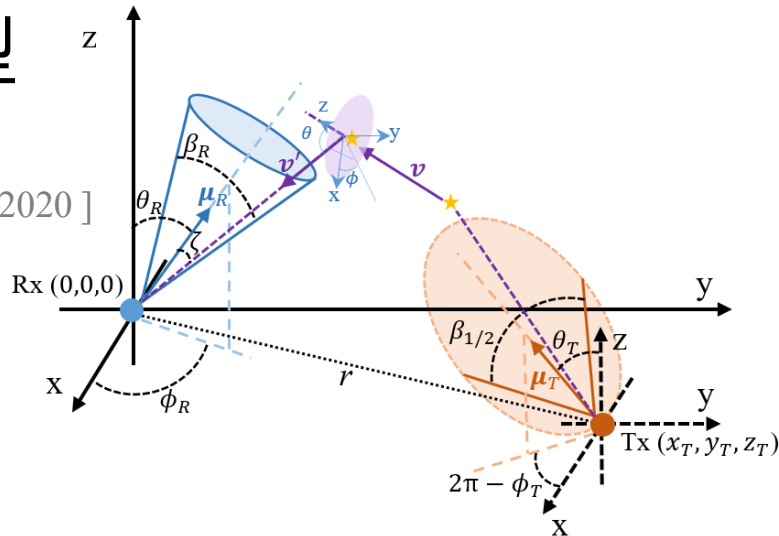


非视距紫外光通信路损测试平台示意图 [Chen'2009]

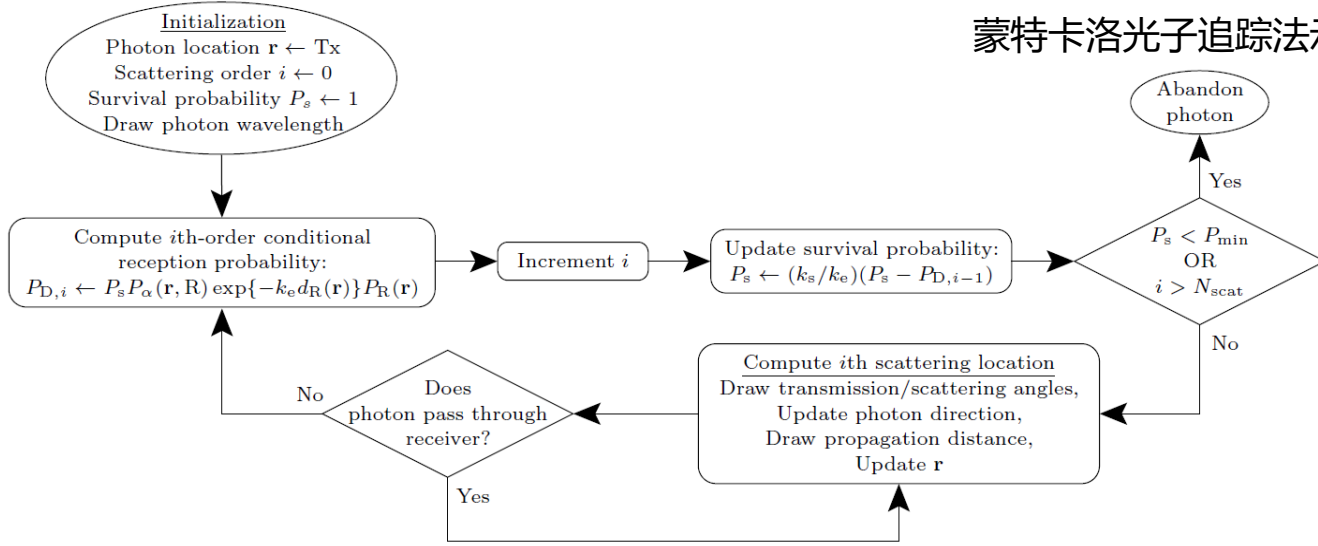
■ 非视距紫外光通信信道模型

➤ 多次散射模型 [Ding'2009, Drost'2011, Yuan'2020]

- 优点：与实验结果吻合度高
- 缺点：计算耗时



蒙特卡洛光子追踪法示意图

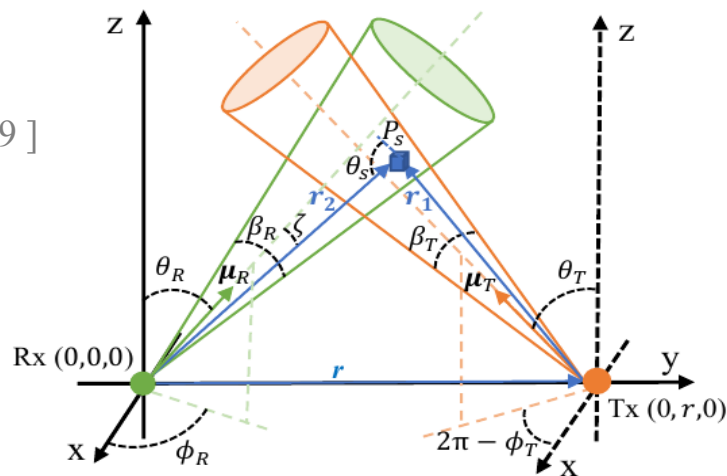


蒙特卡洛光子追踪法流程图 [Drost'2011]

■ 非视距紫外光通信信道模型

- 单次散射模型 { 收发轴线共面 [Reilly'1979, Luetngen'1991, Wu'2019]
收发轴线非共面 [Elshimy'2011, Zuo'2012]

- 优点：形式较为简单，特定场景有简化表达式 [Wang'2015, Wu'2019]
- 缺点：要求光源束散角与接收机视场角之间存在公共区域



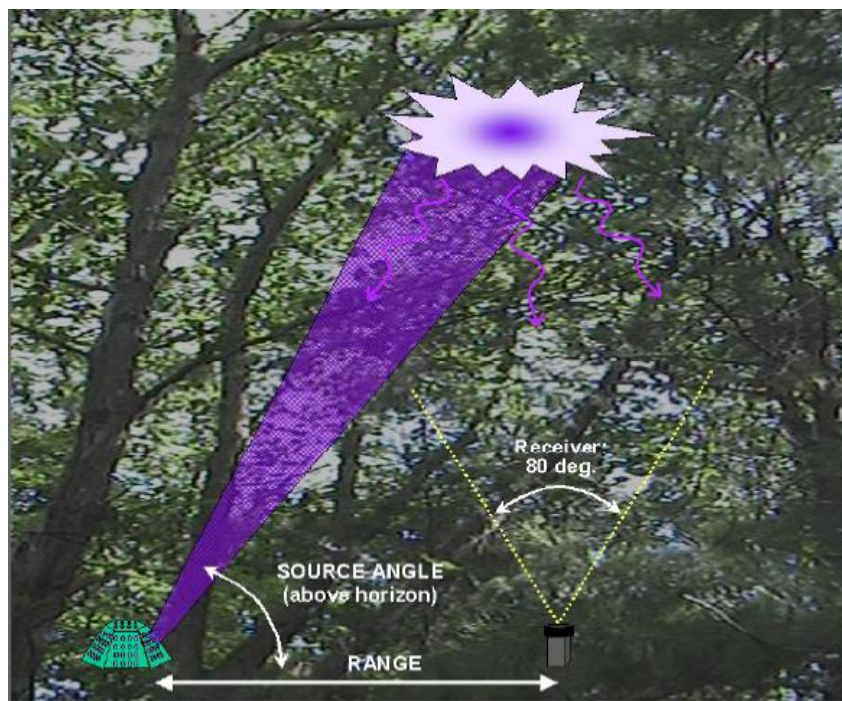
非视距紫外光通信单次散射路径示意图

$$L = \frac{1}{\iiint_V \frac{A_r k_s \cos \zeta P(\cos \theta_s) \exp[-k_e(r_1 + r_2)]}{\Omega_T r_1^2 r_2^2} dv}$$

■ 非视距紫外光通信信道模型

➤ 通过**散射和反射**同时实现非视距传输

文献[Siegel'2004] 中提及树冠的**反射**有利于**提高接收端的信号强度**



丛林部署的紫外光非视距通信设备经过树冠反射示意图 [Siegel'2004]

■ 非视距紫外光通信信道模型

非视距传输方式

研究现状总结

报告的工作

路损无闭式或闭式精
度不高

单次路损**闭式**

散射

光束均匀辐照

LED单次路损

改善
信道

信道脉冲响应理论表
达式均在椭球坐标系

球坐标系单次
信道脉冲响应

散射+反射

仅有实验报道

多次**仿真模型**

单次**理论模型**

- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

单次散射信道模型

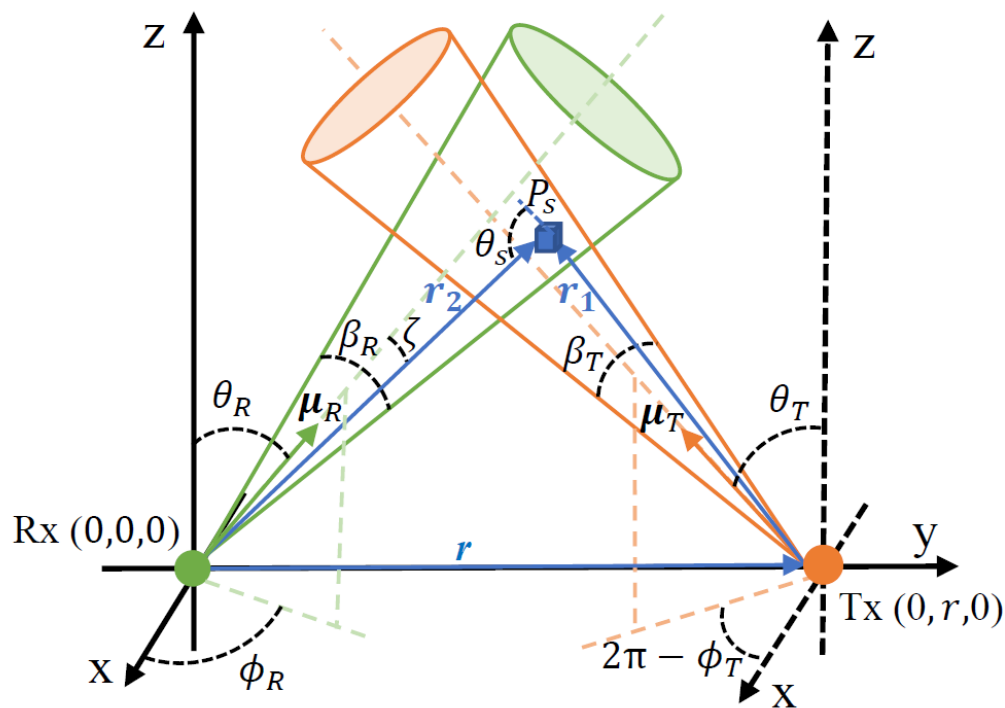


清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

■ 单次散射信道概述

➤ 光子从发送端出射后仅经过一次散射到达接收端



r	收发之间的距离
r_1	发送端到散射元的距离
r_2	接收端到散射元的距离
β_T, β_R	发射机束散角, 接收机视场角
θ_T, θ_R	发射机与接收机倾斜角
ϕ_T, ϕ_R	发射机与接收机方位角
P_s	散射元
θ_s	散射角
μ_T, μ_R	收发轴线单位向量

单次散射信道模型



■ 单次散射信道模型

➤ 接收端收到的能量微元 [Zuo'2012]

$$dQ_R = \frac{Q_T A_r k_s C P(\mu) \exp[-k_e(r_1 + r_2)]}{\Omega_T r_1^2 r_2^2} dv$$

光源辐照功率在束
散角内均匀分布

其中 $\Omega_T = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\beta_T}{2}\right) \right]$

发送端立体角

$$P(\mu) = \frac{k_{s,r}}{k_s} P_r(\mu) + \frac{k_{s,m}}{k_s} P_m(\mu)$$

散射相函数

$$P_r(\mu) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\mu^2]}{16\pi(1 + 2\gamma)}$$

$$P_m(\mu) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} + \frac{f(3\mu^2 - 1)}{2(1 + g^2)^{3/2}} \right]$$

$$C = \cos \zeta$$

散射元与接收端轴线的
夹角的余弦值

$$Q_T$$

发送端脉冲能量

$$k_s, k_e$$

散射系数, 消光系数

$$A_r$$

探测器有效探测面积

$$k_{s,r}$$

瑞利散射系数

$$k_{s,m}$$

米散射系数

■ 单次散射信道模型

- 在公共散射体积(CSV)内积分，到达接收端总能量

$$Q_R = \int_{\text{CSV}} dQ_R$$

三重积分，上下
限确定复杂

- 路径损耗

$$PL = -10\log_{10} \left(\frac{Q_R}{Q_T} \right)$$

球坐标系下无精确的单次散射信道脉冲响应理论模型

单次散射信道模型



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

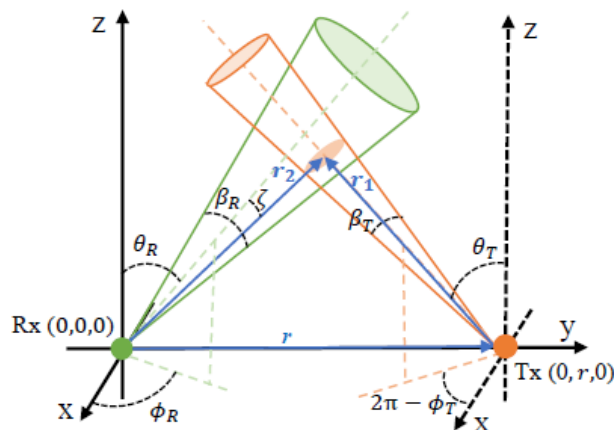
- 本部分三个研究子内容
 - 单次散射路径损耗近似模型
 - 基于紫外LED 的单次散射路径损耗模型
 - 单次散射信道脉冲响应模型

单次散射信道模型

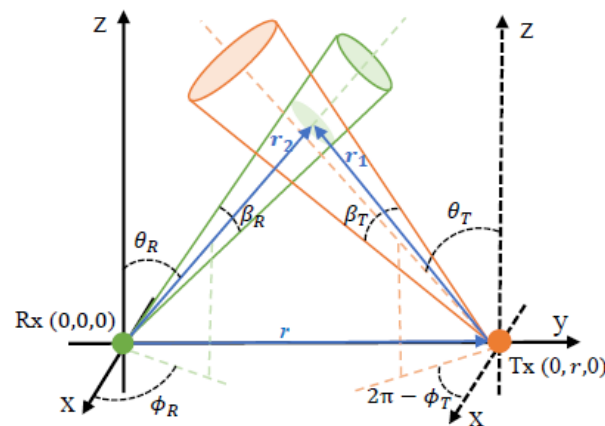


子内容1：单次散射路径损耗近似模型

窄光束
 $\beta_T \leq \beta_R$



窄视场
 $\beta_R < \beta_T$



$$PL = \begin{cases} -10 \log_{10} [D_{r_1} \sum_{k=1}^n w_k f_{r_1}(S_{r_1} + D_{r_1} t_k)], & \beta_T \leq \beta_R \\ -10 \log_{10} [D_{r_2} \sum_{k=1}^n w_k f_{r_2}(S_{r_2} + D_{r_2} t_k)], & \beta_R < \beta_T \end{cases}$$

$$f_{r_1}(r_1) = \frac{A_r k_s \cos \zeta(r_1) P(\cos \theta_s(r_1)) \exp[-k_e(r_1 + r_2)] \tan^2 \frac{\beta_T}{2}}{2 \left(1 - \cos \frac{\beta_T}{2}\right) r_2^2}$$

$$f_{r_2}(r_2) = \frac{A_r k_s P(\cos \theta_s(r_2)) \exp[-k_e(r_1 + r_2)] \tan^2 \frac{\beta_R}{2}}{2 \left(1 - \cos \frac{\beta_T}{2}\right) r_1^2}$$

$$D_{r_1} = \frac{r_1^{\max} - r_1^{\min}}{2}$$

$$S_{r_1} = \frac{r_1^{\max} + r_1^{\min}}{2}$$

$$D_{r_2} = \frac{r_2^{\max} - r_2^{\min}}{2}$$

$$S_{r_2} = \frac{r_2^{\max} + r_2^{\min}}{2}$$

$$w_k = \frac{1}{(1 - t_k)[P'_n(t_k)]^2}$$

$$t_k \text{ 为 } n \text{ 阶勒让德多项式 } P_n(t) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dt^n} [(t^2 - 1)^n] \text{ 的第 } k \text{ 个根}$$

■ 子内容1：单次散射路径损耗近似模型

仿真参数：

参数符号	参数名称	参数值
$k_{s,r}$	瑞利散射系数	$0.24 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
$k_{s,m}$	米散射系数	$0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
k_a	大气吸收系数	$0.9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
g	散射相函数参数	0.017
f	散射相函数参数	0.5
γ	散射相函数参数	0.72
A_r	探测面积	$1.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

误差量化：

根均方误差（root-mean-square error, RMSE）定义如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\text{PL}_{\text{cmp}}(x_i) - \text{PL}_{\text{ref}}(x_i)]^2}{N}}$$

结果对比：

- ① 精确的单次散射模型[Zuo'2012]；
- ② 蒙特卡洛仿真模型[Yuan'2020]；
- ③ 最新提出的单次散射近似模型[Wu'2019]（球冠模型）。

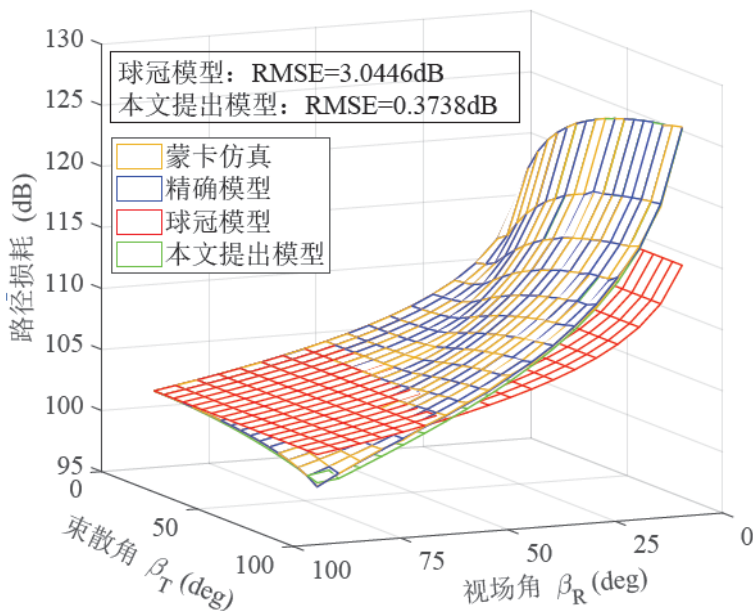
单次散射信道模型



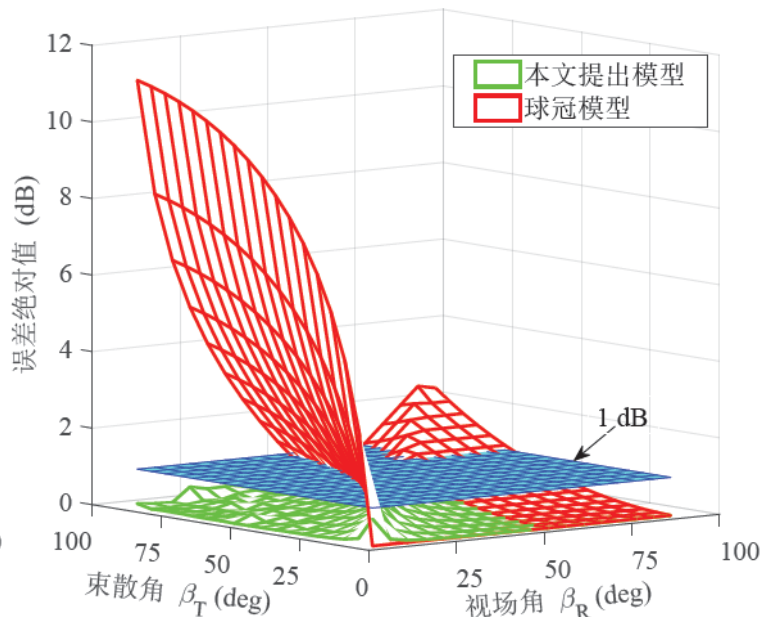
清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

子内容1：单次散射路径损耗近似模型



(a)非视距紫外光通信路径损耗与发送端束散角和接收端视场角之间的关系



(b)近似模型相对精确模型误差的绝对值

参数:

$$r = 100m \quad \phi_T = -90^\circ \quad \phi_R = 90^\circ \quad \theta_T = \theta_R = 45^\circ$$

在CPU为3.7GHz和内存为16GB的电脑上测试了不同模型计算时间。蒙卡仿真: 8077.51s, 精确模型: 14.55 s, 球冠模型: 0.11s, 本文提出模型: **0.13s**, 约为精确模型的**0.89%**。

单次散射信道模型



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

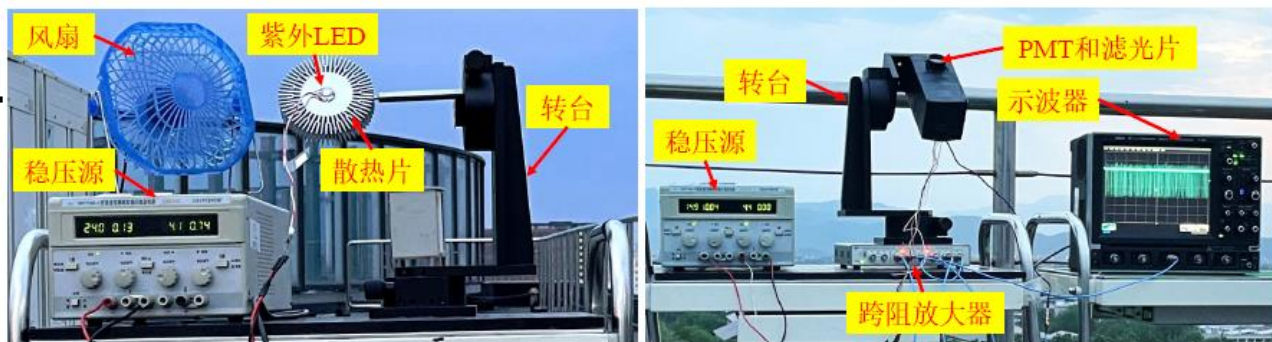
电子工程系
Department of
Electronic Engineering

■ 子内容1：单次散射路径损耗近似模型

➤ 非视距紫外光通信路径损耗测量实验平台

透镜封装深紫外LED模组

半波全宽：15nm
中心波长：265nm，
束散角约为60°
光功率约50mW



(a)系统发送端照片

(b)系统接收端照片

PMT

滨松光子公司R7154

量子效率：25%

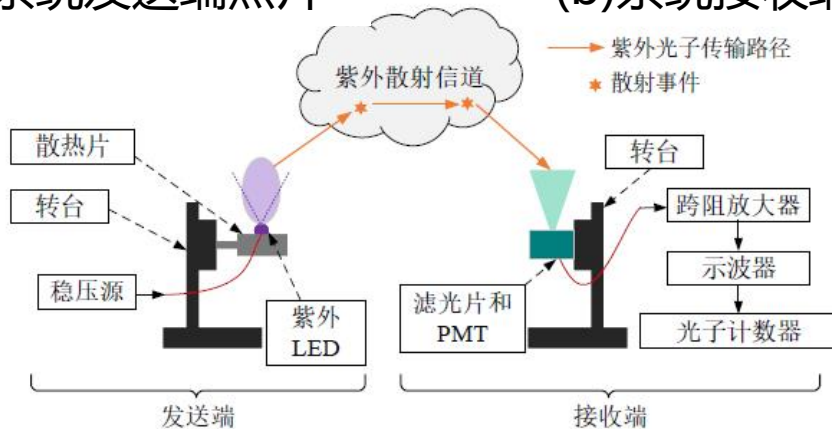
日盲带通滤光片

中心波长266nm，带宽 $\pm 4\text{nm}$

透过率：5%

跨阻放大器

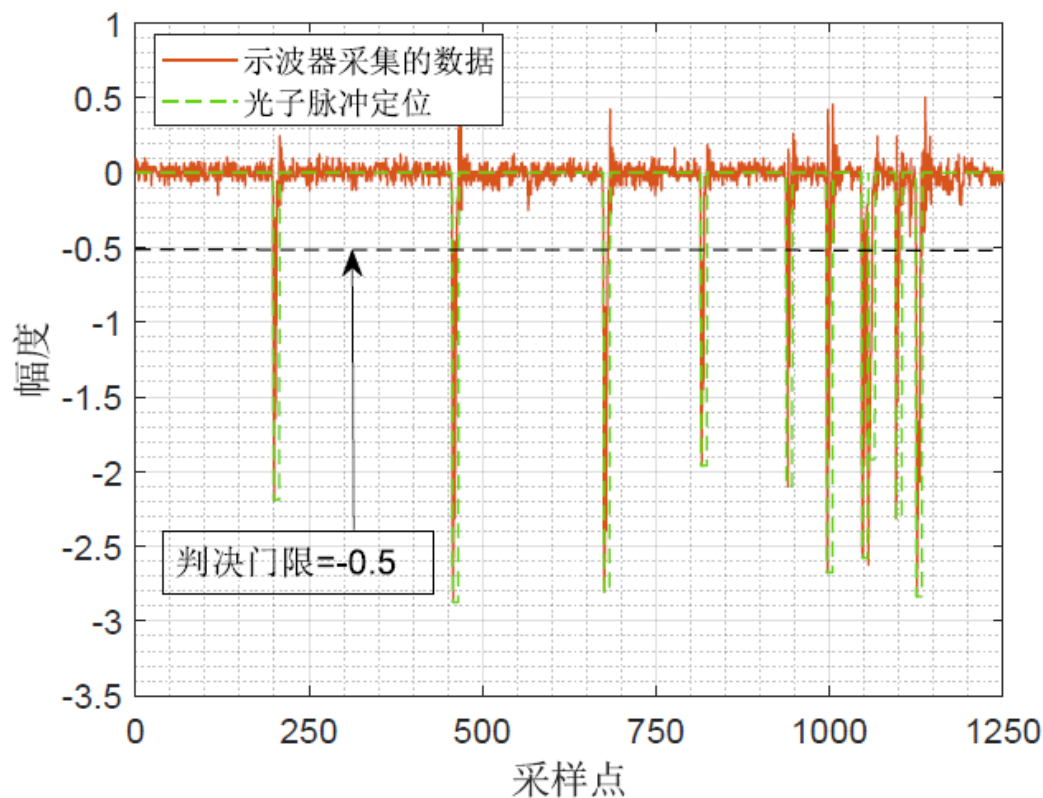
350MHz带宽



(c)系统示意图

■ 子内容1：单次散射路径损耗近似模型

➤ 光子计数法



光子计数示意图

实验中路径损耗计算方法

$$PL_{\text{exp}} = -10\log_{10} \frac{\frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N} - \Lambda_b T}{P_T T \eta / (h\nu)}$$

Λ_b	背景光子到达率
T	观测时间
P_T	发送端光功率
η	系统总效率
h	普朗克常数
ν	光频率

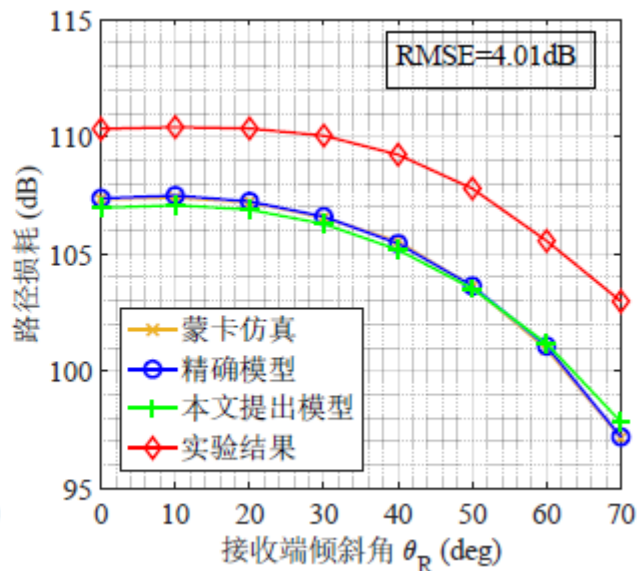
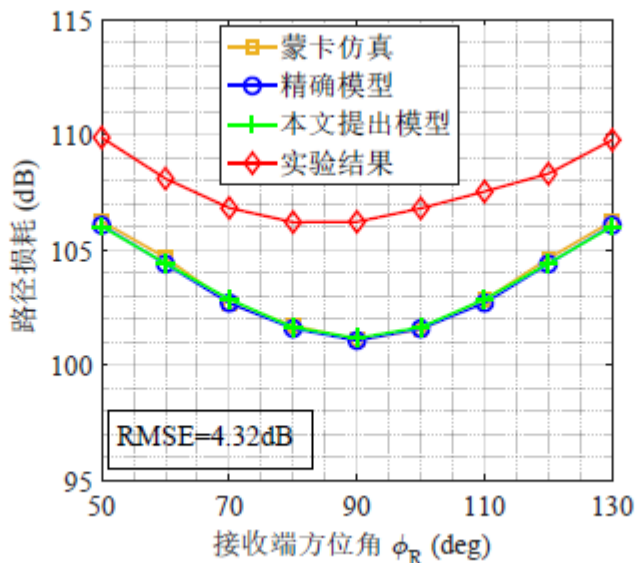
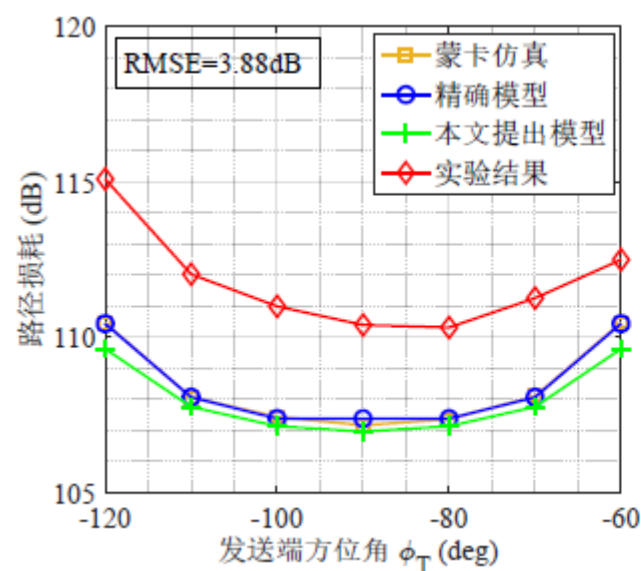
单次散射信道模型



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

子内容1：单次散射路径损耗近似模型



路径损耗与光源方位角的关系
($\theta_T = 60^\circ, \theta_R = 0^\circ$)

路径损耗与接收端方位角的关系
($\theta_T = 0^\circ, \theta_R = 60^\circ$)

路径损耗与接收端倾斜角的关系
(收发共面, $\theta_T = 60^\circ$)

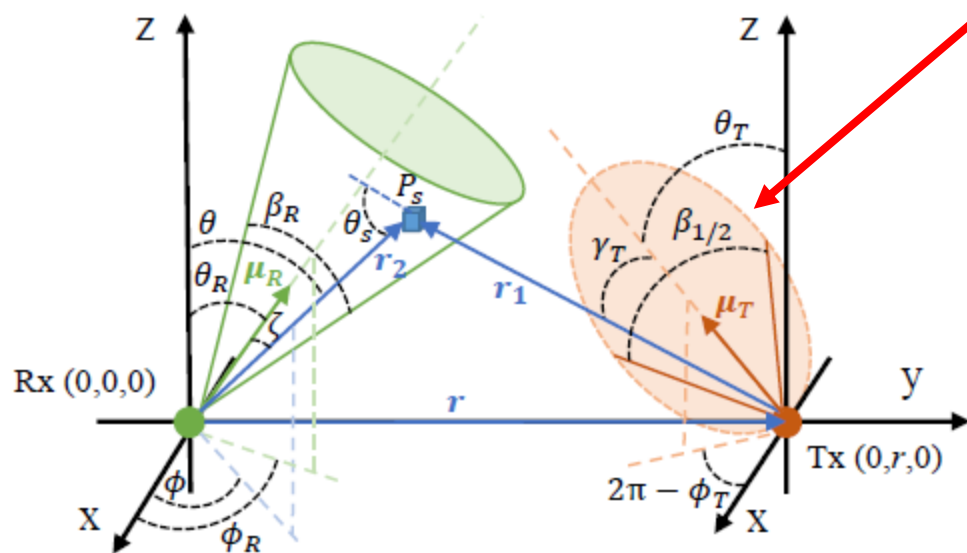
参数:

$$r = 50m \quad \beta_T = 60^\circ \quad \beta_R = 30^\circ$$

Cao Tian, Song Jian*, Pan Changyong. Simplified closed-form single-scatter path loss model of non-line-of-sight ultraviolet communications in noncoplanar geometry[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 1-9. (SCI检索)

■ 子内容2：基于LED的单次散射路损模型

➤ 系统示意图



LED辐照分布

——朗伯模型 [Ghassemlooy'2012]

$$\mathcal{L}(\gamma_T) = \begin{cases} \frac{m+1}{2\pi} \cos^m \gamma_T, & 0 \leq \gamma_T \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \frac{\pi}{2} < \gamma_T \leq \pi \end{cases}$$

其中 m 为朗伯阶数

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \cos \frac{\beta_{1/2}}{2}}$$

$\beta_{1/2}$ 为LED半功率角

■ 子内容2：基于LED的单次散射路损模型

➤ 到达接收端总能量

关键点：确定
积分上下限

$$Q_R = Q_T k_s A_r \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \int_{r_{2\min}}^{r_{2\max}} \frac{\mathcal{L}(\gamma_T) \exp[-k_e(r_1 + r_2)] \cos \zeta P(\mu)}{r_1^2} \sin \theta d\theta d\phi dr_2$$

■ 子内容2：基于LED的单次散射路损模型

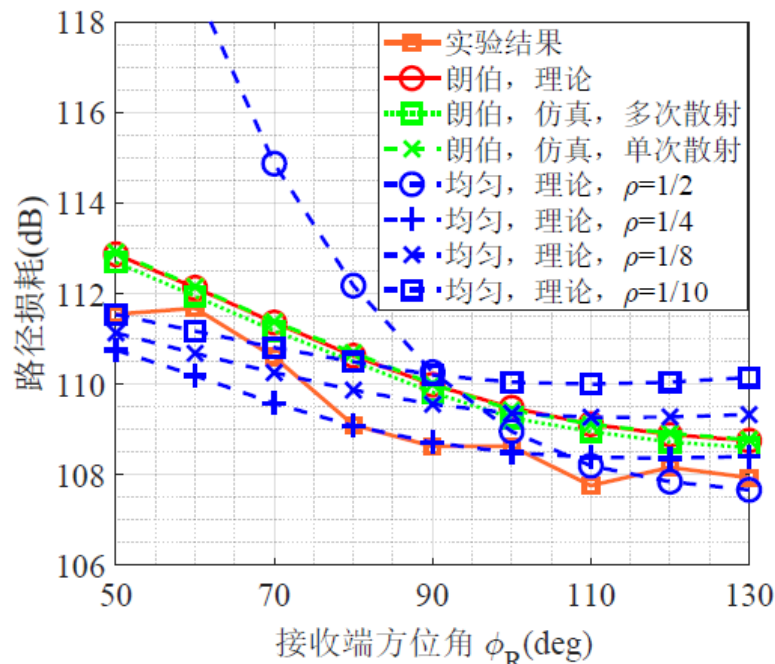
➤ 积分上下限

确定 θ : $\theta_{\min} = \max\left(\theta_R - \frac{\beta_R}{2}, 0\right) \quad \theta_{\max} = \min\left(\pi, \theta_R + \frac{\beta_R}{2}\right)$

确定 ϕ : $\begin{cases} \text{如果 } \frac{\beta_R}{2} - \theta_R \geq \theta \text{ 或 } 2\pi - \frac{\beta_R}{2} - \theta_R \leq \theta: & \phi_{\min} = -\pi, \phi_{\max} = \pi \\ \text{否则:} & \phi_{\min} = \phi_R - \phi_2, \phi_{\max} = \phi_R + \phi_2, \phi_2 = \arccos \frac{\cos \frac{\beta_R}{2} - \cos \theta \cos \theta_R}{\sin \theta \sin \theta_R} \end{cases}$

确定 r_2 : $\begin{cases} \text{如果 } \mathbf{v}_{r_2}^T \boldsymbol{\mu}_T = 0: & \begin{cases} \text{如果 } -\mathbf{r}^T \boldsymbol{\mu}_T \geq 0, \text{ 那么 } [r_{2\min}, r_{2\max}] = [0, +\infty] \\ \text{否则 } [r_{2\min}, r_{2\max}] = \emptyset \end{cases} \\ \text{如果 } \mathbf{v}_{r_2}^T \boldsymbol{\mu}_T > 0: & [r_{2\min}, r_{2\max}] = [\max(\delta, 0), +\infty] \\ & \delta = \frac{r \sin \phi_T}{\sin \theta \cos(\phi - \phi_T) + \cot \theta_T \cos \theta} \\ \text{如果 } \mathbf{v}_{r_2}^T \boldsymbol{\mu}_T < 0: & \begin{cases} \text{如果 } \delta < 0, \text{ 那么 } [r_{2\min}, r_{2\max}] = \emptyset \\ \text{否则 } [r_{2\min}, r_{2\max}] = [0, \delta] \end{cases} \end{cases}$

■ 子内容2：基于LED的单次散射路损模型



基于LED的非视距紫外光通信路径损耗与接收端方位角的关系曲线

参数: $r = 50m$ $\beta_T = \beta_\rho = 2 \arccos(\sqrt[m]{\rho})$ $\theta_T = 60^\circ$
 $\theta_R = 30^\circ$ $\phi_T = -120^\circ$ $\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$

Cao Tian, Gao Xinyu, Wu Tianfeng, Pan Changyong, Song Jian*. Single-scatter path loss model of LED-based non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 4013-4016. (SCI检索, 被选为Editors' pick)

单次散射信道模型



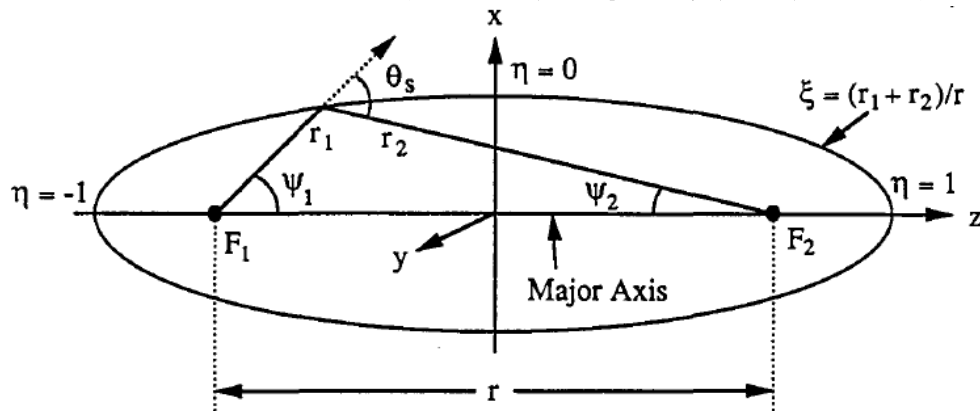
清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering

■ 子内容3：单次散射信道脉冲响应

早期研究 **椭球坐标系** 日常中使用较少且不便理解

实验+仿真 **球坐标系** 方位角和倾斜角决定几何设置



椭球坐标系示意图 [Luettgen'1991]

路径损耗：椭球坐标系 $\rightarrow$ 球坐标系

信道脉冲响应（ CIR ）： ?

■ 子内容3：单次散射信道脉冲响应

➤ 思路：

接收端总能量 Q_R ：从0时刻到无穷远时刻，对CIR的积分

$$Q_R = Q_T k_s A_r \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \int_{r_{2\min}}^{r_{2\max}}$$

可为任意 $\longrightarrow$ $\frac{\mathcal{T}(\gamma_T) \exp[-k_e(r_1 + r_2)] \cos \zeta P(\mu)}{r_1^2} \sin \theta d\theta d\phi dr_2$

辐照模式

那么：如果确定接收端总能量关于时间的函数（即从0时刻到t时刻的接收端总能量），然后对其求导，便得到CIR。

■ 子内容3：单次散射信道脉冲响应

$$h(t) = Q_T k_s \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \varphi(t, \theta, \phi) d\theta d\phi$$

其中

$$\varphi(t, \theta, \phi) =$$

$$\begin{cases} \frac{\mathcal{T}(\gamma_T) \exp[-k_e(r_1 + \tilde{r}_2(t))] \cos \zeta P(\mu) \sin \theta}{r_1^2} \tilde{r}_2'(t), & \tilde{t}(r_{2\min}) < t \leq \tilde{t}(r_{2\max}) \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\tilde{t}(r_2) = \frac{r_a}{c} = \frac{\sqrt{r_2^2 + r^2 - 2r_2 r \sin \theta \sin \phi} + r_2}{c}$$

$$\tilde{r}_2'(t) = \frac{d\tilde{r}_2(t)}{dt} = \frac{c}{\left(1 + \frac{\tilde{r}_2(t) - r \sin \theta \sin \phi}{\sqrt{\tilde{r}_2^2(t) + r^2 - 2\tilde{r}_2(t)r \sin \theta \sin \phi}}\right)}$$

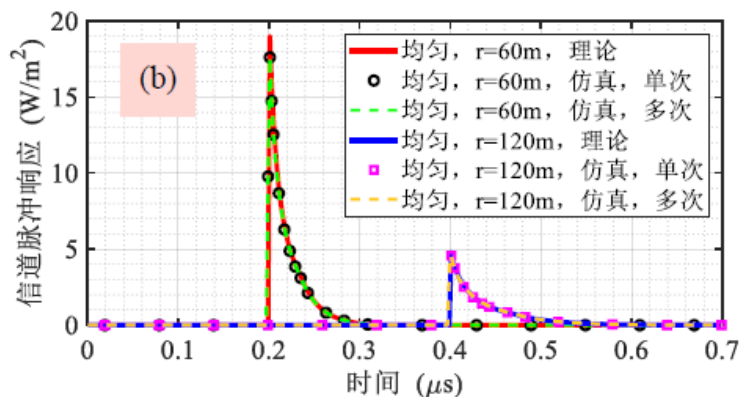
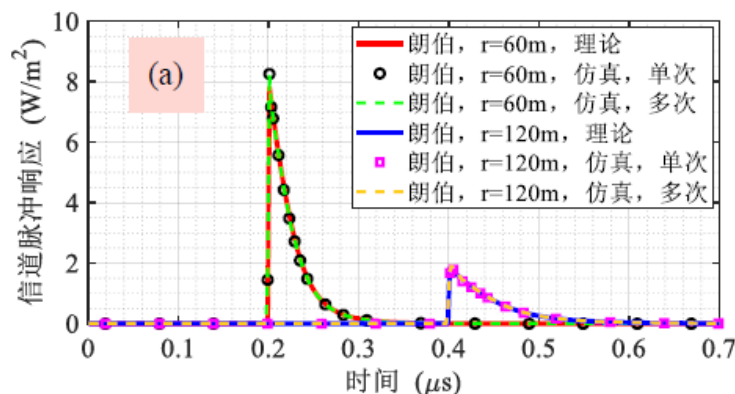
单次散射信道模型



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

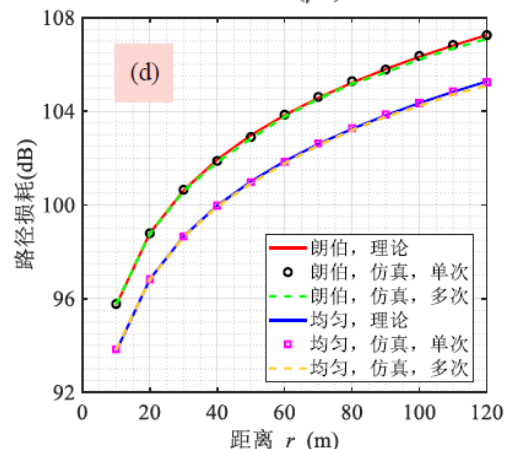
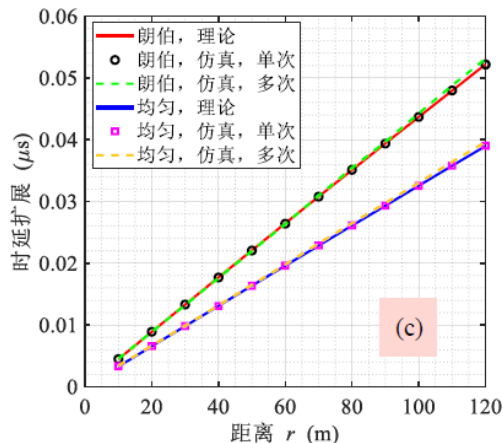
电子工程系
Department of
Electronic Engineering

子内容3：单次散射信道脉冲响应



时延扩展

$$DS = \left[\frac{\int (t - \mu)^2 h(t) dt}{\int h(t) dt} \right]^{\frac{1}{2}}$$



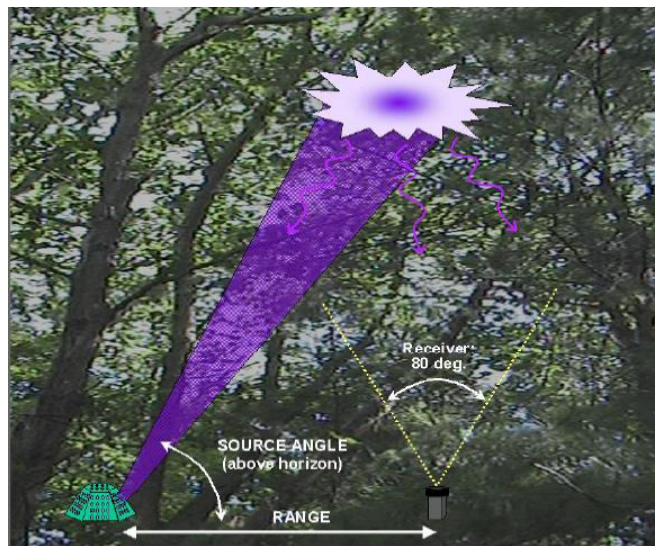
不同收发距离下的信道脉冲响应、时延扩展和路径损耗结果

参数: $\theta_T = \theta_R = 60^\circ$ $\phi_T = -90^\circ$ $\phi_R = 90^\circ$ $\beta_T = \beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$

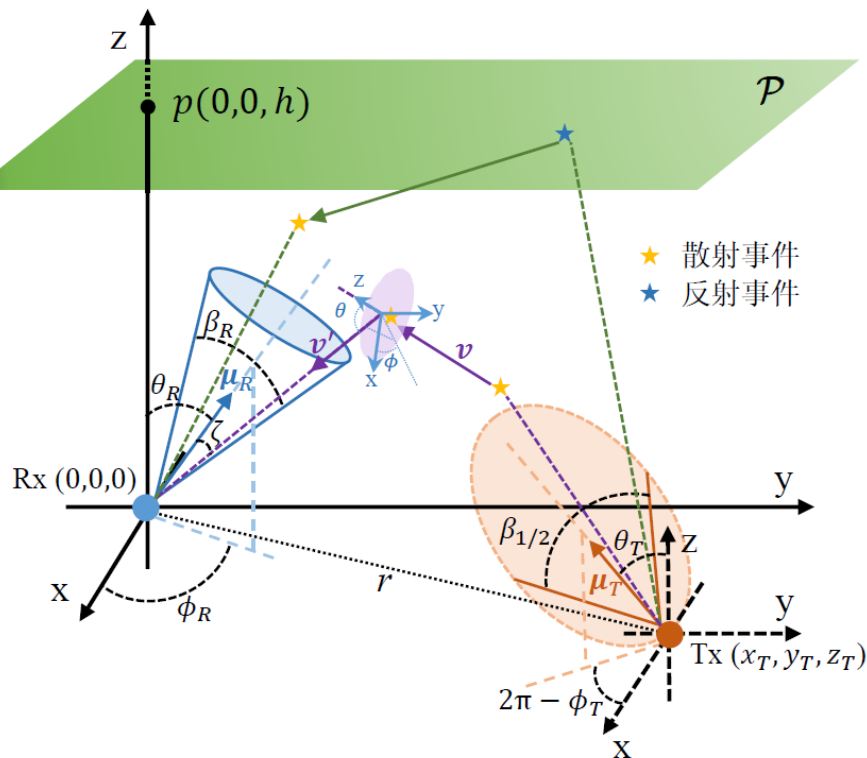
- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

- 仅通过散射实现非视距传输路径损耗高
收发距离50m，路径损耗在100dB以上
- 如何降低路径损耗？

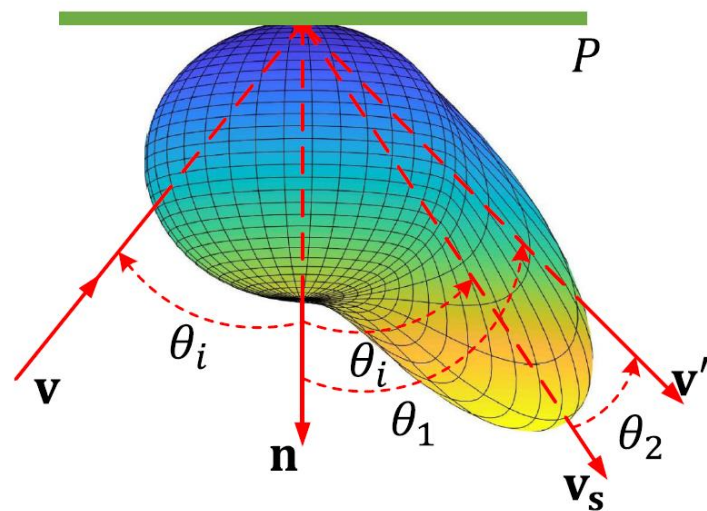
文献[Siegel'2004] 中提及树冠的**反射**有利于**提高接收端的信号强度**，但尚未见到考虑反射情况下的非视距紫外光通信链路理论建模与分析。



多次碰撞的蒙特卡洛光子追踪算法



反射辅助的非视距紫外光通信系统示意图

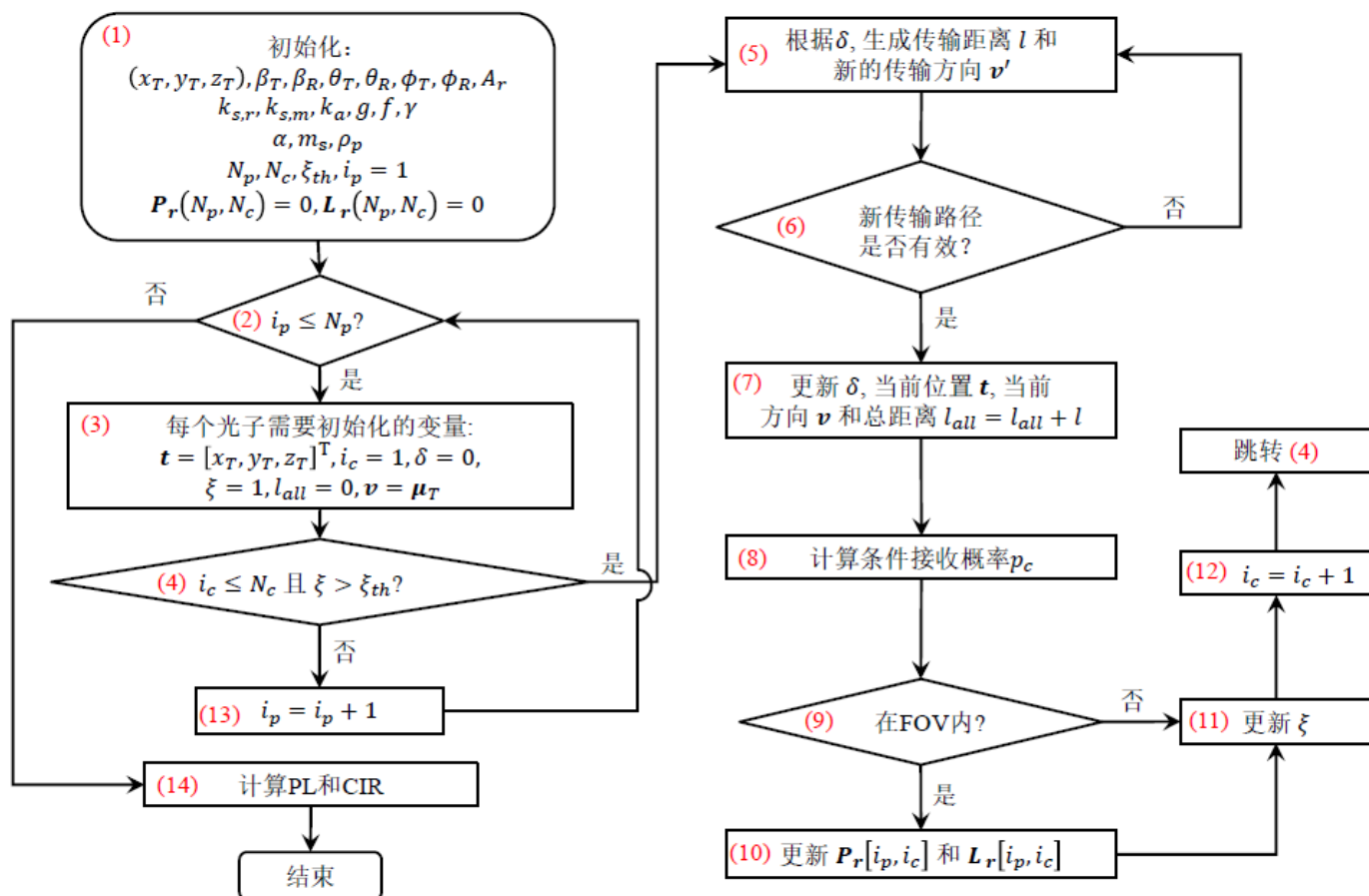


Phong模型示意图 [Lomba'1998]

$$I(\theta_1, \theta_2) = \underbrace{\alpha \frac{\cos \theta_1}{\pi}}_{\text{diffuse}} + \underbrace{(1-\alpha) \frac{m_s + 1}{2\pi} \cos^{m_s} \theta_2}_{\text{specular}}$$

光子与平面或大气粒子发生一次作用称为一次碰撞导致的事件。

多次碰撞的蒙特卡洛光子追踪算法

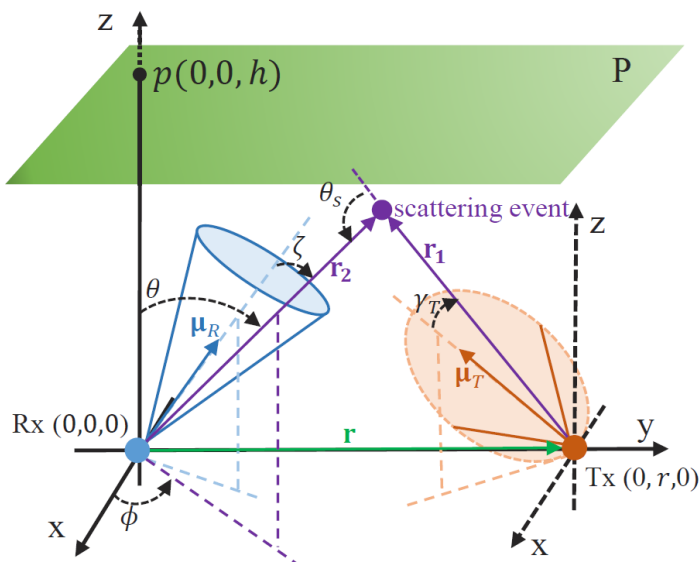


多次CIE的蒙特卡洛光子追踪算法流程图

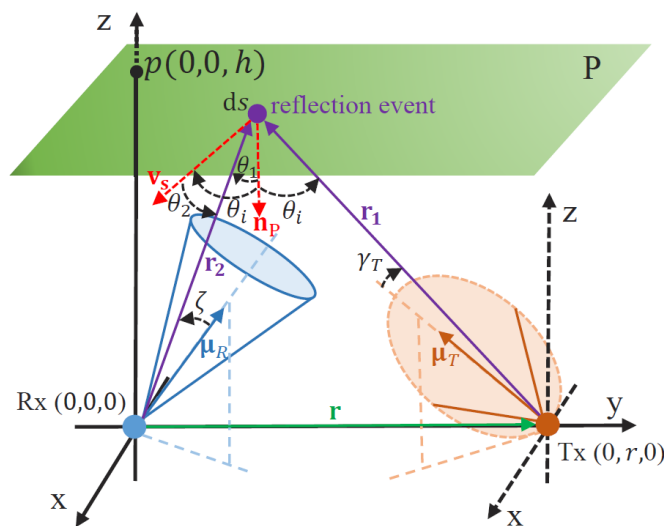
■ 单次碰撞路径损耗解析模型

类比单次散射信道模型，我们发现反射辅助的非视距紫外光通信系统收发距离较短且路径损耗小于110 dB 时，**经一次碰撞后到达接收端的光能量占接收总能量的绝大部分**，故提出了单次碰撞假路径损耗模型。

此时，接收端收到的总能量 Q_R 由单次散射的光能量 Q_R^{sca} 和单次反射的光能量 Q_R^{ref} 共同决定，即 $Q_R = Q_R^{sca} + Q_R^{ref}$ 。路径损耗为 $L = -10 \log_{10} \left(\frac{Q_R}{Q_T} \right)$ 。



单次散射示意图



单次反射示意图

■ 单次碰撞路径损耗解析模型

➤ 计算 Q_R^{sca}

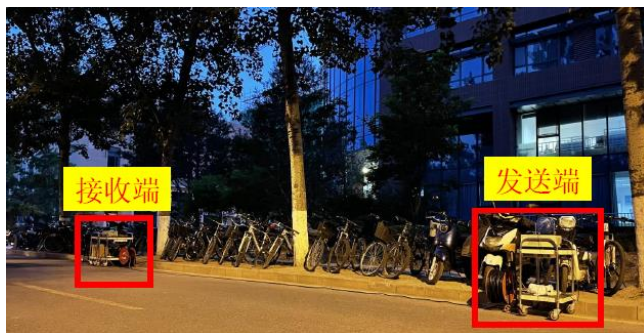
$$Q_R^{sca} = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \int_{r_{2\min}}^{r_{2\max}} \frac{Q_T A_r L(\gamma_T) k_s \exp[-k_e(r_1 + r_2)] \cos \zeta P(\cos \theta_s; \gamma, g, f)}{r_1^2} \sin \theta d\theta d\phi dr_2$$

➤ 计算 Q_R^{ref}

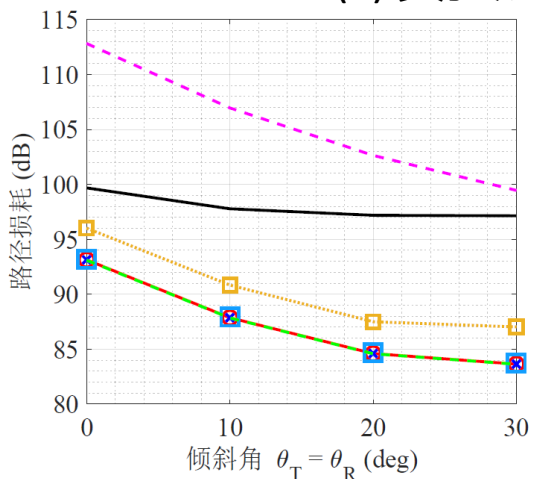
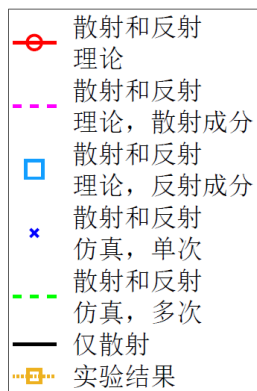
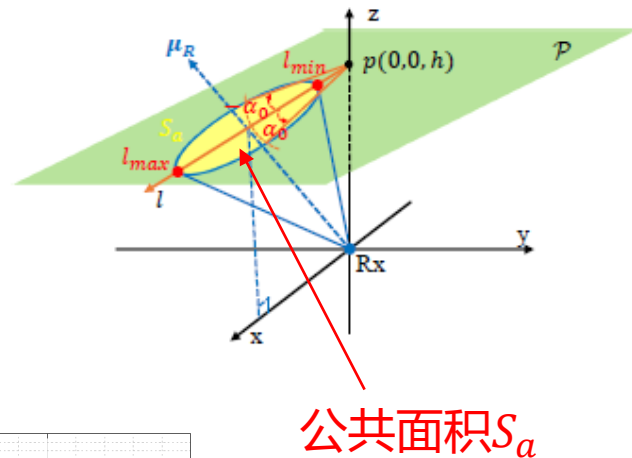
$$Q_R^{ref} = Q_T \rho_P A_r \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \frac{L(\gamma_T) \exp[-k_e(r_1 + r_2)] I(\theta_1, \theta_2) \cos \zeta \cos \theta_i}{r_1^2 r_2^2} l dl d\alpha$$

r	收发之间的距离	θ_s	散射角	$L(\gamma_T)$	朗伯分布
r_1	发射端到散射(反射)元的距离	ζ	散射元与接收端轴线的夹角	γ_T	光线出射角
r_2	接收端到散射(反射)元的距离	Q_T	发送端脉冲能量	$\theta_i, \theta_1, \theta_2$	反射面角度参数
β_T, β_R	发射机束散角, 接收机视场角	k_s, k_e	散射系数, 消光系数	l, α	反射面极坐标参数
θ_T, θ_R	发射机与接收机倾斜角	A_r	探测器有效探测面积	γ, g, f	散射相函数参数
ϕ_T, ϕ_R	发射机与接收机方位角	$P(\cos \theta_s)$	散射相函数	ρ_P	平面反射率

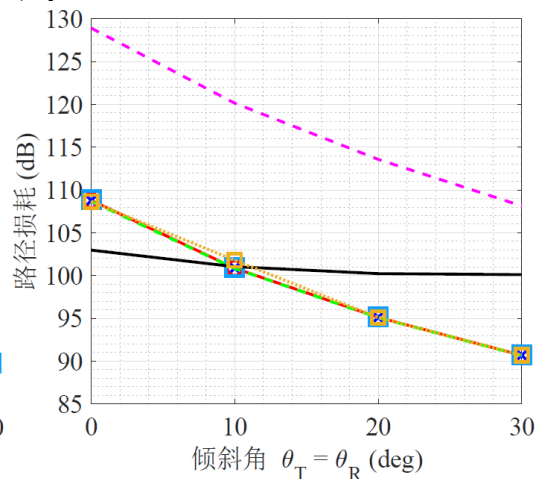
结果分析



(a) 实验照片



(b) $r = 5 \text{ m}$



(c) $r = 10 \text{ m}$

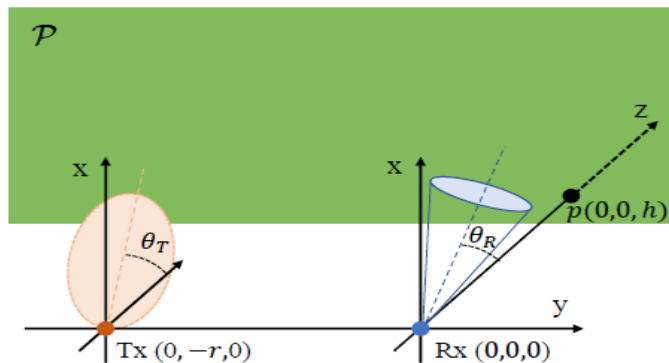
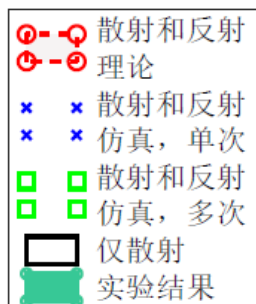
行道树下进行反射辅助的非视距紫外光通信路径损耗测量实验的照片与结果

参数: $\phi_T = -90^\circ$ $\phi_R = 90^\circ$ $\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$ $h = 5\text{m}$ $\rho_P = 0.014$ $\alpha = 1$

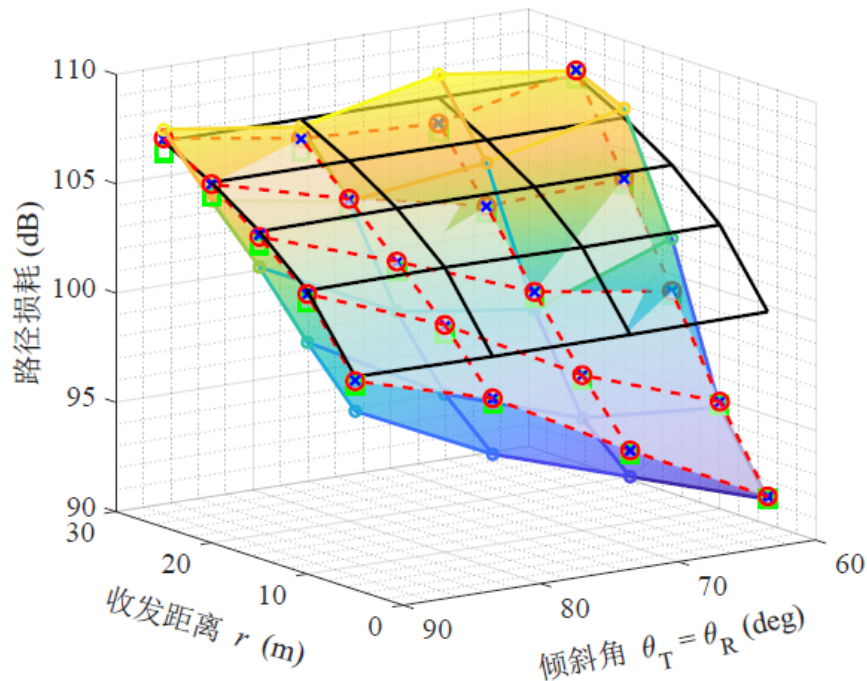
结果分析



(a) 实验照片



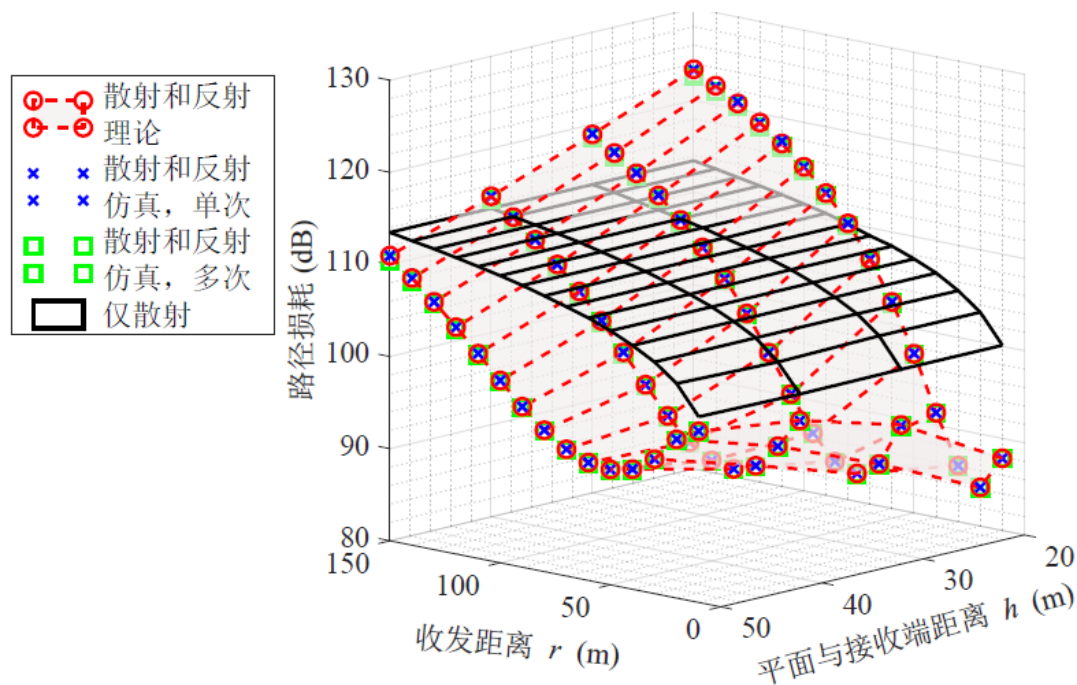
(b) 坐标系放置方式



(c) 路径损耗与距离和倾斜角的关系

参数: $\phi_T = 0^\circ$ $\phi_R = 0^\circ$ $\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$ $h = 9\text{m}$ $\rho_P = 0.19$ $\alpha = 0.28$ $m_s = 16$

■ 结果分析

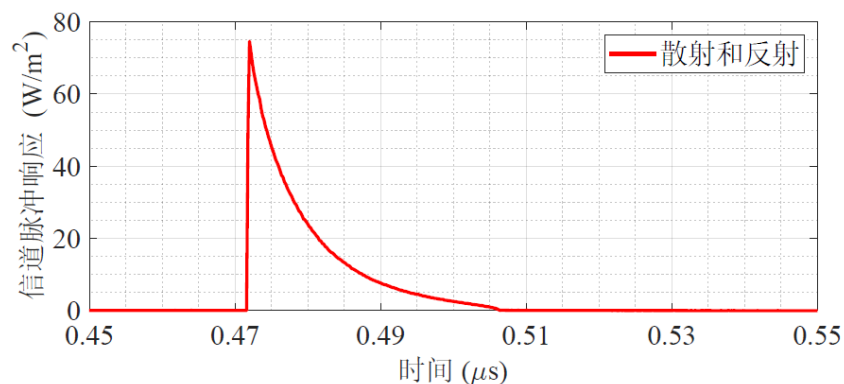


路径损耗与收发距离和平面位置之间的关系

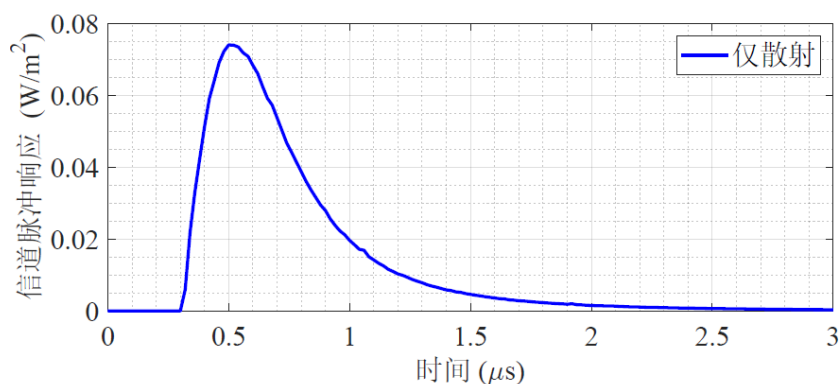
参数: $\theta_T = \theta_R = 30^\circ$ $\phi_T = -90^\circ$ $\phi_R = 90^\circ$ $\alpha = 0.5$ $m_s = 10$ $\rho_p = 0.1$

$\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$

■ 结果分析



(a) 反射辅助的非视距紫外光通信信道脉冲响应
 $h = 50m, r = 100m$



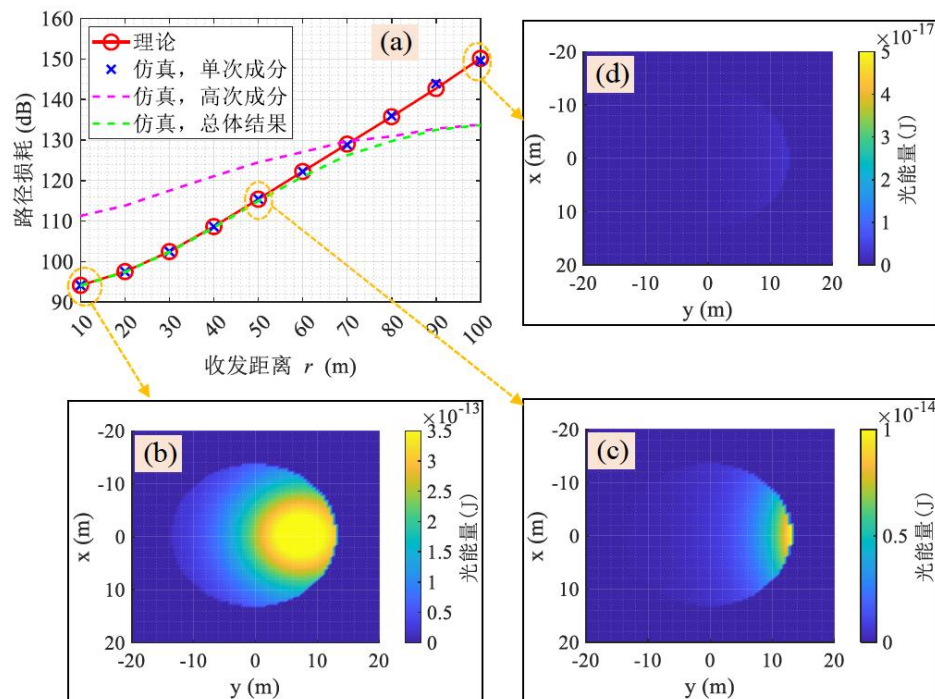
(b) 仅有散射的非视距紫外光通信信道脉冲响应
 $h = 50m, r = 100m$

时延扩展: (a) 10.7 ns (b) 352 ns

参数: $\theta_T = \theta_R = 30^\circ$ $\phi_T = -90^\circ$ $\phi_R = 90^\circ$ $\xi = 0.5$ $m_s = 10$ $\rho_p = 0.1$
 $\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$

结果分析

(a) 由公共面积内反射
到达接收端的光能量
从多至少时对路径损
耗的影响



(b)-(c) 平面上反射到
接收端的光能量分布

参数: $\theta_T = 20^\circ$ $\theta_R = 0^\circ$ $\phi_T = -90^\circ$ $\phi_R = 90^\circ$ $\beta_{1/2} = 60^\circ$ $\beta_R = 30^\circ$
 $\xi = 0.5$ $m_s = 10$ $\rho_P = 0.1$

- Cao Tian, Gao Xinyu, Wu Tianfeng, Pan Changyong, and Song Jian*. Reflection-Assisted Non-Line-of-Sight Ultraviolet Communications[J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2021, 40(7): 1953-1961. (SCI检索)
- Cao Tian, Wu Tianfeng, Pan Changyong, and Song Jian*. Single-collision-induced path loss model of reflection-assisted non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 15227-15237.(SCI检索)

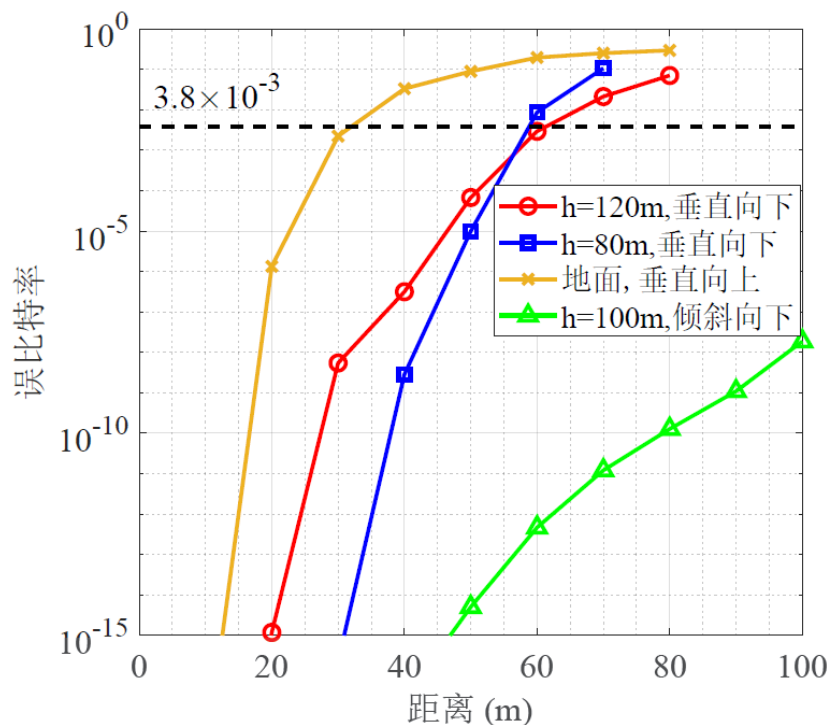
- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

■ 工作流程

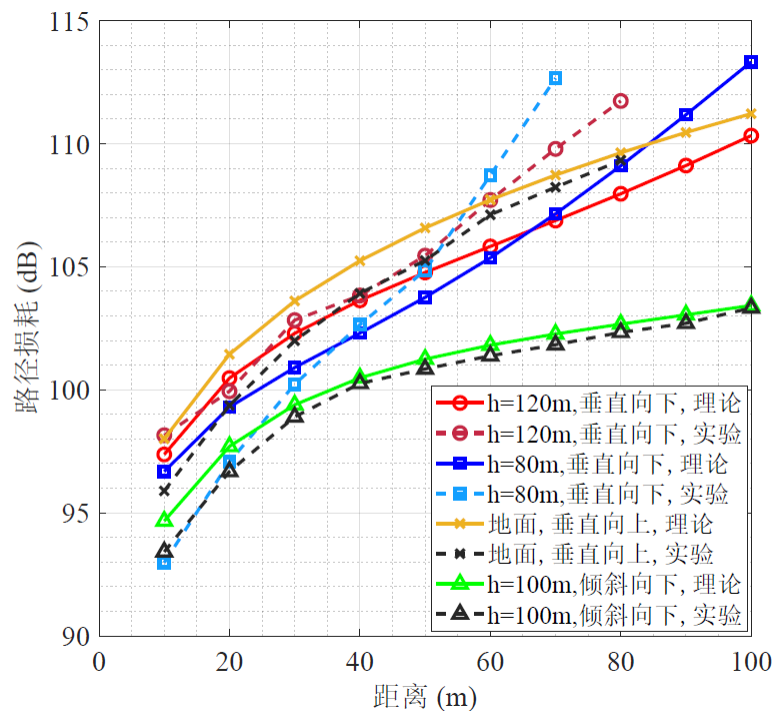


原理样机系统测试场景及
工作示意图

测试结果



测试场景3中BER结果



测试场景3中路径损耗结果

结论：利用地面反射可有效改善信道质量，降低BER，增加传输距离。

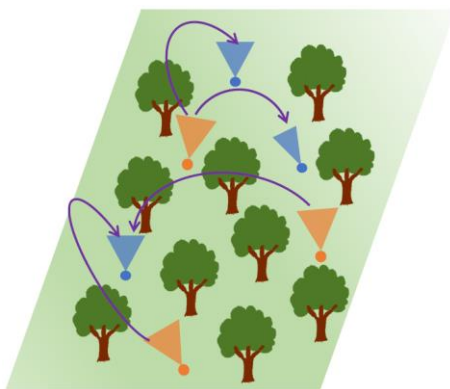
- 非视距紫外光通信概述
- 非视距紫外光通信信道建模
 - 信道模型简介
 - 非视距紫外光通信单次散射信道模型
 - 反射辅助的非视距紫外光通信信道模型
- 应用案例——无人机通信
- 总结与展望

■ 总结

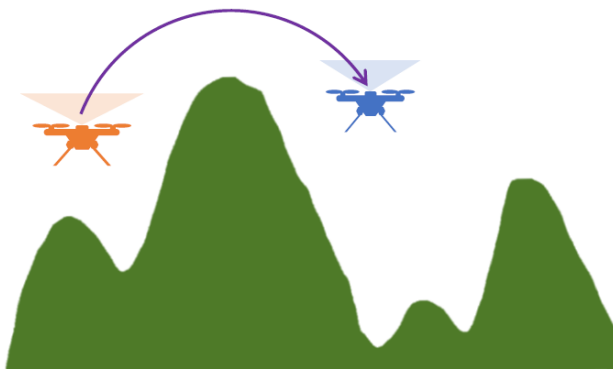
- 1、在非视距紫外光通信的典型应用场景中，单次散射模型可以有效地预测信道质量。
- 2、通过反射辅助，可以提高非视距紫外光通信的信道质量。

■ 展望

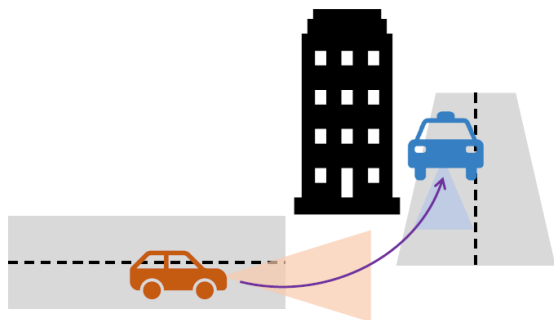
➤ 室外应用场景 [Chen'2022,Vavoulas'2019, Shaw'2005]



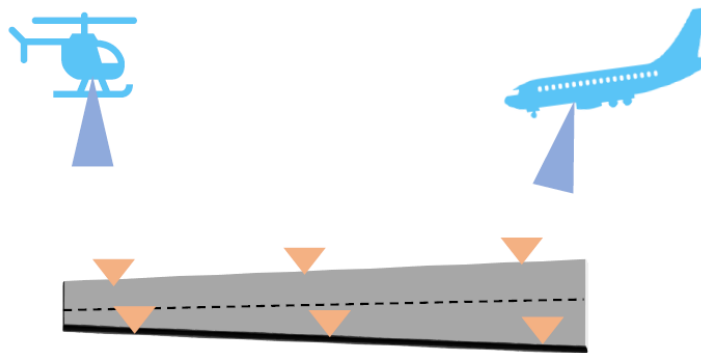
无人传感器网络



无人机之间通信



车辆之间通信



飞机起降引导

潜在研究点:

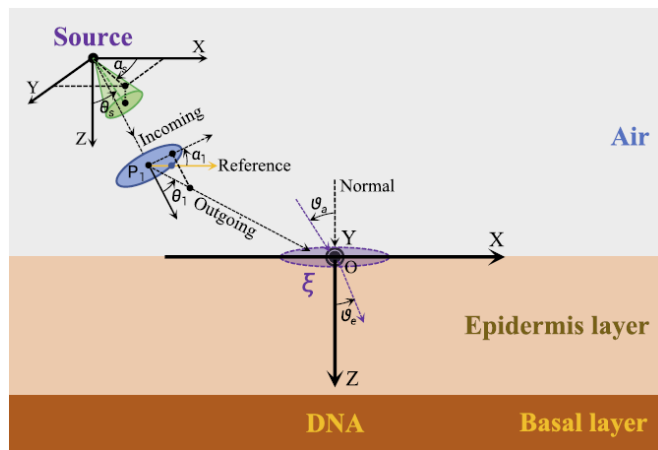
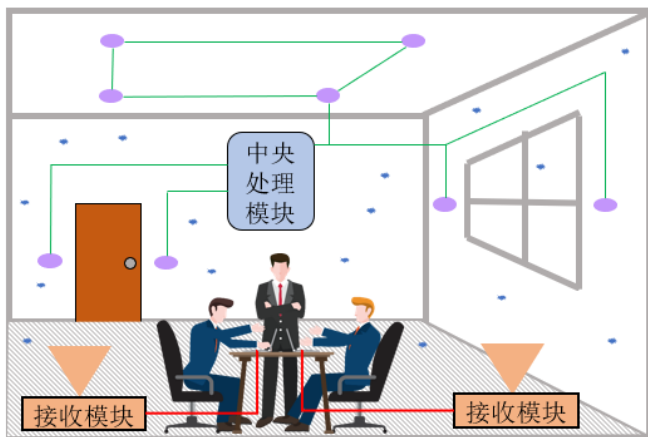
- 1、移动场景中的通信性能;
- 2、视距与非视距的切换;
- 3、多用户之间的干扰;

.....

■ 展望

➤ 室内应用场景——222nm通信消杀一体

● 紫外光源 ● 细菌、病毒



潜在研究点:

- 1、室内紫外光强度分布模型;
- 2、紫外光与人体健康的关系;
- 3、室内光源布局与MIMO;

.....

Wu T, Yang F, Cao T, et al. Modeling of ultraviolet propagation from air to human epidermis with wavelength range of 200–300 nm[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1662-1665.

1. Ericsson, Ericsson Mobility Report, Nov 2022, <https://www.ericsson.com/4ae28d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2022/ericsson-mobility-report-november-2022.pdf>
2. Vavoulas A, Sandalidis H G, Chatzidiamantis N D, et al. A survey on ultraviolet C-band (UV-C) communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2111-2133.
3. Hamza A S, Deogun J S, Alexander D R. Classification framework for free space optical communication links and systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(2): 1346-1382.
4. 高新宇. 基于紫外LED 的无线光通信系统关键技术研究[D]. 清华大学, 2022.
5. Tang Y, Ni G, Zhang L, et al. Study of channel character of solar blind UV communication[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Laser, Ultraviolet, and Terahertz Technology. International Society for Optics and Photonics, 2008, 6622: 66220H.
6. Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[C]. SPIE, 2005.
7. Bucholtz A. Rayleigh scattering calculations for the terrestrial atmosphere[J]. Applied Optics, 1995, 34(15): 2765-2773.
8. Zachor A S. Aureole radiance field about a source in a scattering-absorbing medium[J]. Applied Optics, 1978, 17(12): 1911-1922.
9. Sun Y, Gong C, Xu Z, et al. Link gain and pulse width broadening evaluation of non-line-of-sight optical wireless scattering communication over broad spectra[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-12.
10. Xu Z, Sadler B M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(5): 67-73.
11. Chen G, Xu Z, Ding H, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. Optics express, 2009, 17(5): 3929-3940.
12. Ding H, Chen G, Majumdar A K, et al. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2009, 27(9): 1535-1544.
13. Drost R J, Moore T J, Sadler B M. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions[J]. JOSA A, 2011, 28(4): 686-695.
14. Yuan R, Ma J, Su P, et al. Monte-Carlo integration models for multiple scattering based optical wireless communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 334-348.
15. Drost R J, Moore T J, Sadler B M. Monte-Carlo-based multiple-scattering channel modeling for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]//Atmospheric Propagation VIII. SPIE, 2011, 8038: 9-17.
16. Reilly D M, Warde C. Temporal characteristics of single-scatter radiation[J]. JOSA, 1979, 69(3): 464-470.
17. Luetzgen M R, Shapiro J H, Reilly D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. JOSA A, 1991, 8(12): 1964-1972.

18. Wu T, Ma J, Su P, et al. Modeling of short-range ultraviolet communication channel based on spherical coordinate system[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 242-245.
19. Elshimy M A, Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries[J]. JOSA A, 2011, 28(3): 420-428.
20. Zuo Y, Xiao H, Wu J, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. Optics express, 2012, 20(9): 10359-10369.
21. Xu Z, Ding H, Sadler B M, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. Optics letters, 2008, 33(16): 1860-1862.
22. Wang P, Zhang H, Xu Z. Simplified model and experimental validation for ultraviolet single-scattering channels[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 080603.
23. Wu T, Ma J, Yuan R, et al. Single-scatter model for short-range ultraviolet communication in a narrow beam case[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(3): 265-268.
24. Siegel A M, Shaw G A, Model J. Short-range communication with ultraviolet LEDs[C]//Fourth International Conference on Solid State Lighting. SPIE, 2004, 5530: 182-193.
25. Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: System and channel modelling with matlab[M]. CRC press, 2012.
26. Chen G, Wu T, Yang F, et al. Ultraviolet-Based UAV Swarm Communications: Potentials and Challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2022.
27. Vavoulas A, Sandalidis H G, Chatzidiamantis N D, et al. A survey on ultraviolet C-band (UV-C) communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2111-2133.
28. Shaw G A, Siegel A M, Model J, et al. Recent progress in short-range ultraviolet communication[J]. Unattended ground sensor technologies and applications VII, 2005, 5796: 214-225.

谢谢！

敬请各位老师和同学批评指正

非视距紫外光通信信道建模

曹 天

caot19@mails.tsinghua.edu.cn

2023年05月11日



清华大学
TSINGHUA UNIVERSITY

电子工程系
Department of
Electronic Engineering