

川渝前沿论坛第20期

可见光通信的基本性能限

王金元

南京邮电大学

通信与信息工程学院

2024.11.21



王金元@南京邮电大学
江苏 南京



扫一扫上面的二维码图案，加我微信

汇报内容

一、可见光通信的背景

二、点对点通信的基本性能限

三、物理层安全的基本性能限

四、隐蔽通信的基本性能限

五、总结与展望

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信的起源和发展

● 起源

- ✓ 利用光作为媒介传递信息的思想，最早可以追溯到1880年贝尔发明的**光电话**。

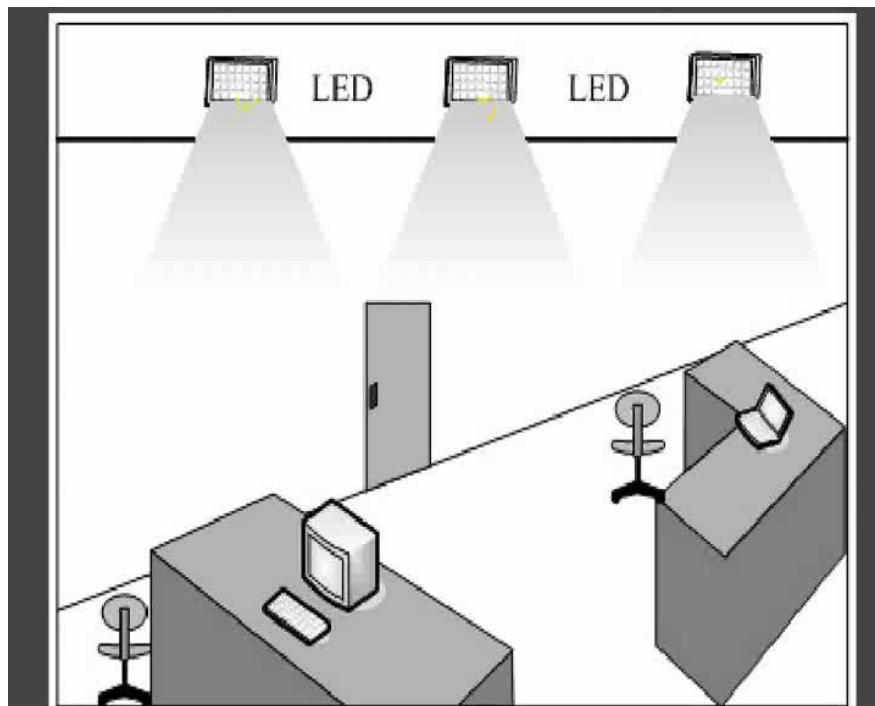


● 发展

- ✓ 由于当时技术的限制，这种无线光通信技术没有被受到足够的重视。
- ✓ 近年来，随着LED技术的进步和成熟，这种技术被重新予以重视。
- ✓ 1999年，香港大学G. Pang提出了可见光通信的概念，逐渐受到世界各国的关注和支持。

一. 可见光通信的背景

□ 什么是可见光通信？



可见光通信是一种新的宽带无线接入技术，它在满足照明需求的同时，以LED发出高速明暗闪烁的光信号为载体，使承载信息的光信号通过空气、水等传输媒介，最后利用光电转换器件（如：PD、太阳能电池板等）对信号进行接收和恢复。

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信的应用



车辆



机舱



高铁



室内宽带接入



室内定位导航



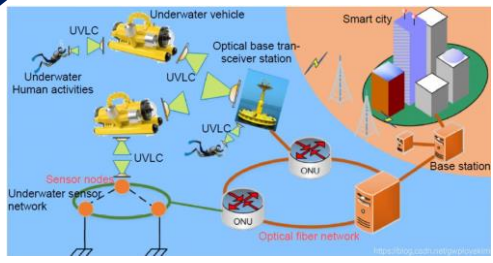
矿井



医疗



工业



水下

智能家居

智慧城市

一. 可见光通信的背景



一、6G总体愿景

二、推动6G发展的宏观驱动力分析

- (一) 社会结构变革驱动力
- (二) 经济产业高质量发展驱动力
- (三) 环境可持续发展驱动力

三、6G潜在业务应用场景

- (一) 沉浸式云XR：虚拟空间的广阔天地
- (二) 全息通信：身临其境的极致体验
- (三) 感官互联：多维感官的交融响应
- (四) 智慧交互：情感思维的互通互动
- (五) 通信感知：融合通信的功能拓展
- (六) 普惠智能：无处不在的智慧内核
- (七) 数字孪生：物理世界的数字镜像
- (八) 全域覆盖：无缝立体的超级连接

四、6G潜在关键技术

- (一) 内生智能的新型网络
- (二) 增强型无线空口技术
- (三) 新物理维度无线传输技术
- (四) 太赫兹与可见光通信技术
- (五) 跨域融合关键技术
- (六) 分布式自治网络架构
- (七) 确定性网络
- (八) 算力感知网络
- (九) 星地一体融合组网
- (十) 支持多模信任的网络内生安全

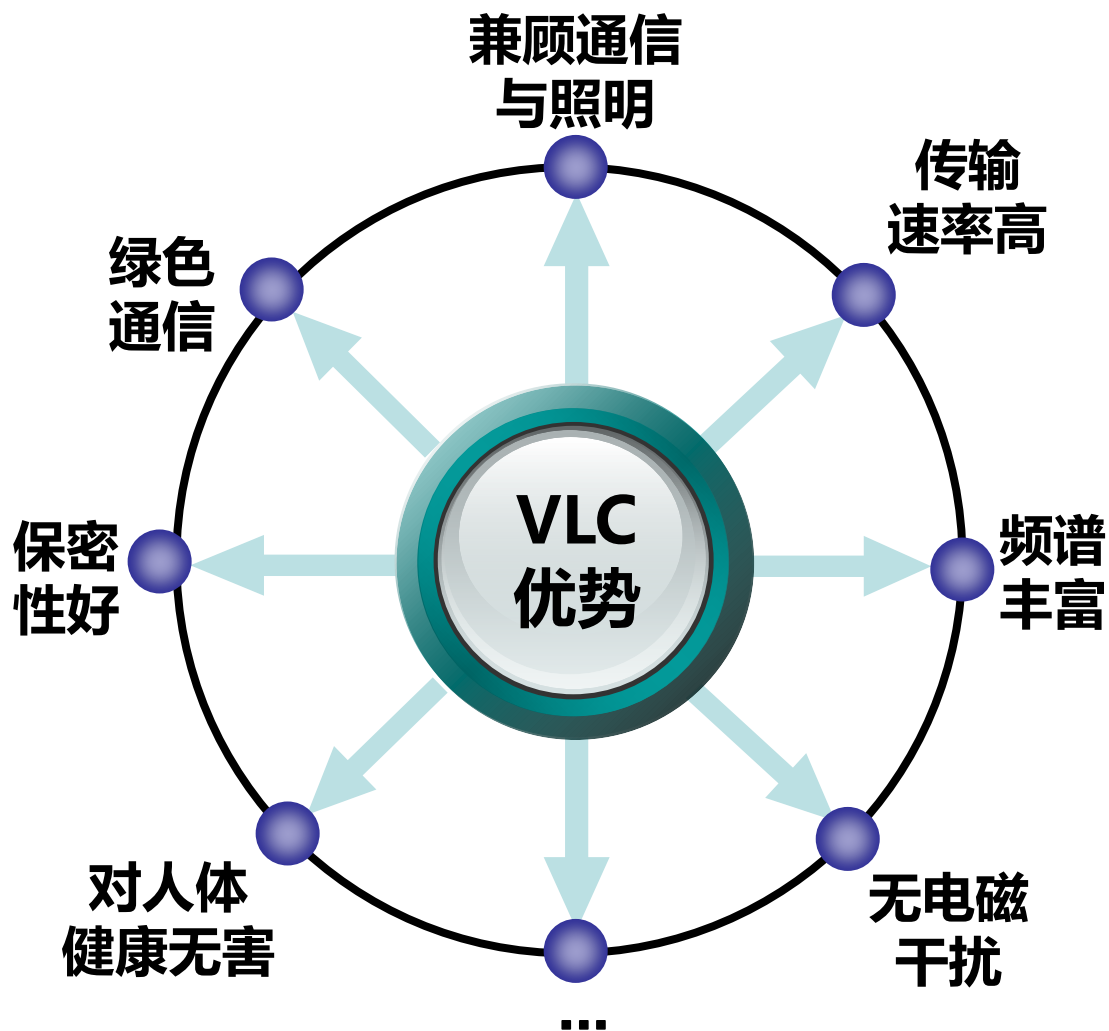
五、对6G发展的几点思考

- (一) 5G成功商用将为6G演进奠定坚实基础
- (二) 智慧万物、智慧内生成为6G重要特征
- (三) 高中低频段高效利用满足6G频谱需求
- (四) 卫星等助力蜂窝地面网络实现6G全域覆盖

中国信通院IMT-2030(6G)推进组发布《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书，将可见光通信列为6G十大潜在关键技术之一。

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信的优势

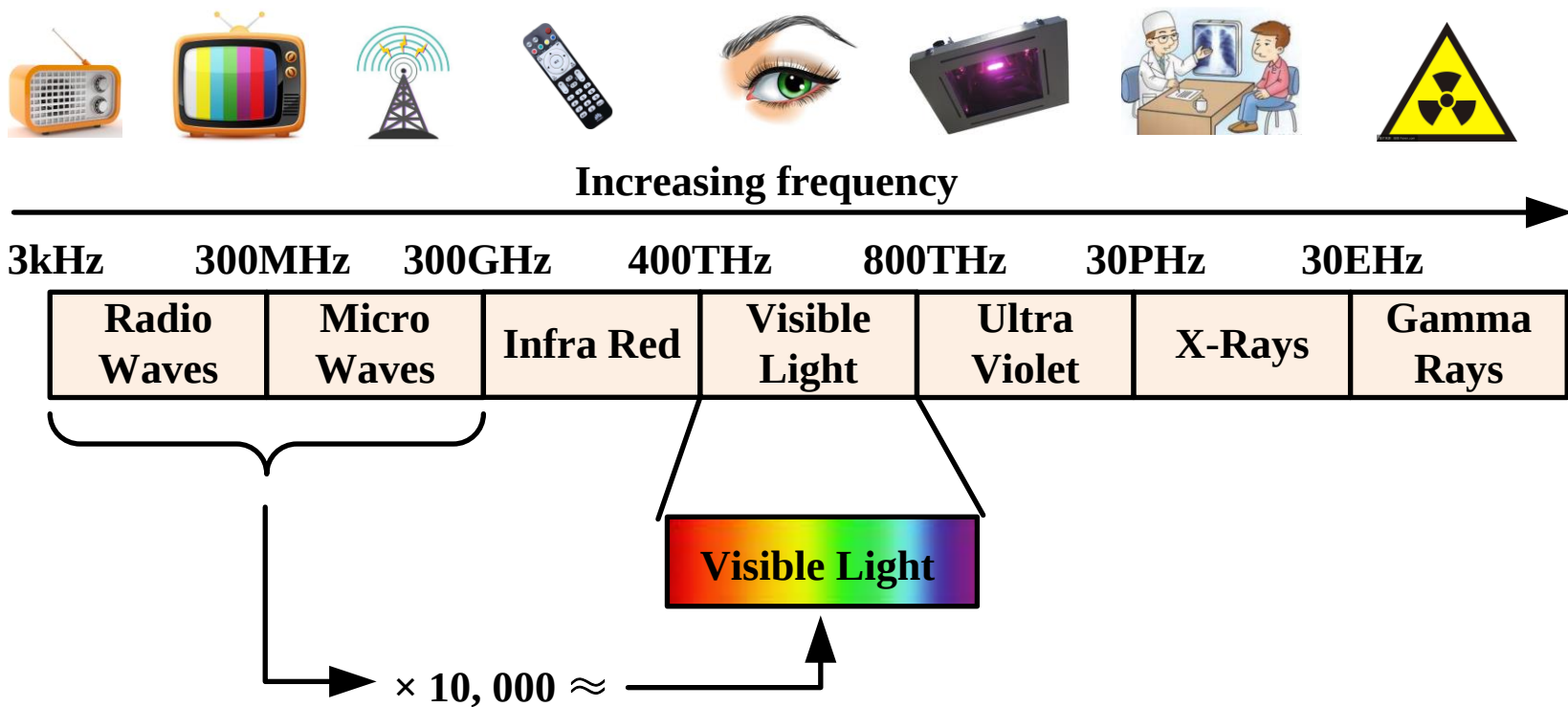


技术优势

- **欧盟**
 - ✓ OMEGA计划; pureLiFi系统
- **美国**
 - ✓ 美国自然科学基金
- **日本**
 - ✓ 可见光通信协会
- **韩国**
 - ✓ 三星等
- **中国**
 - ✓ 国家863计划, 国家重点专项
- **企业界**
 - ✓ 华为, 中兴等
- **学术界**
 - ✓ IEEE系列杂志专题
 - ✓ 国内核心期刊专题

业界行动

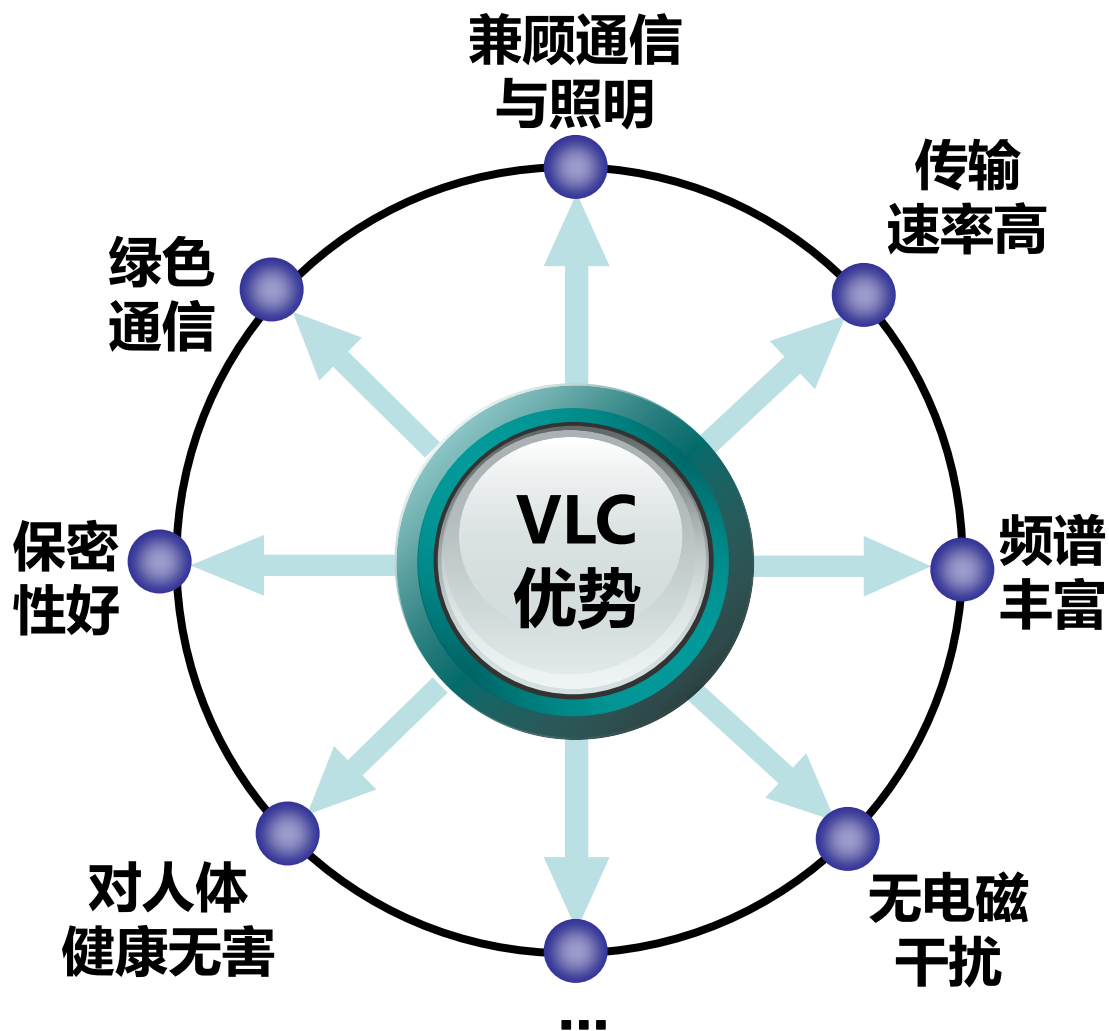
一. 可见光通信的背景



可见光通信的频谱

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信的优势



技术优势

- **欧盟**
 - ✓ OMEGA计划; pureLiFi系统
- **美国**
 - ✓ 美国自然科学基金
- **日本**
 - ✓ 可见光通信协会
- **韩国**
 - ✓ 三星等
- **中国**
 - ✓ 国家863计划, 国家重点专项
- **企业界**
 - ✓ 华为, 中兴等
- **学术界**
 - ✓ IEEE系列杂志专题
 - ✓ 国内核心期刊专题

业界行动

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信与传统射频通信的区别

属性	可见光通信	射频通信
收发机	LED/PD	射频天线
频率	几百THz	几GHz
频谱	不受管制	受管制
电磁干扰	无	有
信道衰落	由直达径主导	各种衰落综合影响
信号特性	单极性、实值	单/双极性、实/复值
检测类型	非相干	相干/非相干
传输距离	短	较长

射频通信的很多研究成果无法直接运用在可见光通信中。

一. 可见光通信的背景

□ 可见光通信的二十年（1999-现在）

基础理论

- 信道建模
 - 调制技术
 - 多址技术
 - 定位技术
 - 资源分配
 - 均衡技术
 - 编码技术
 - 性能分析
 - 光源布局
 - 星座设计
- ...

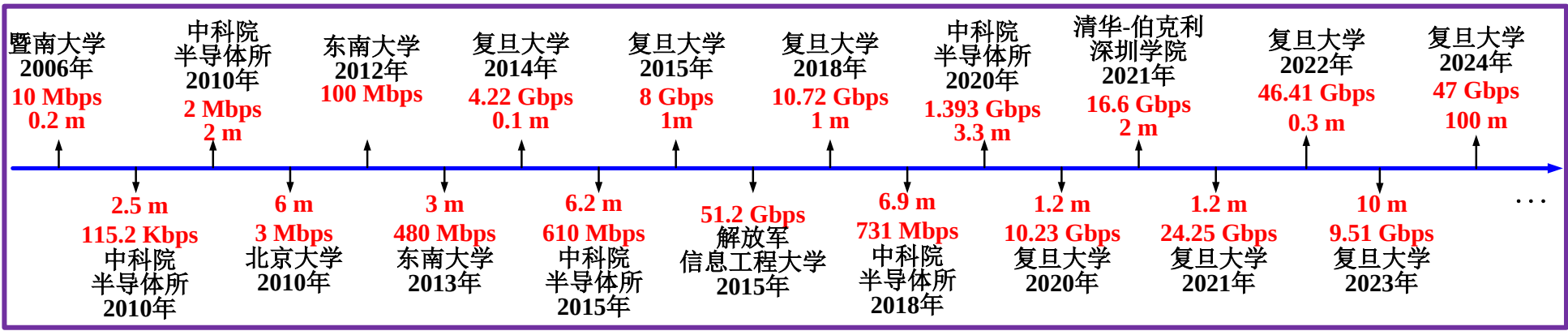
硬件平台

- 高速率
- 长距离
- 实时处理
- 场景多样化

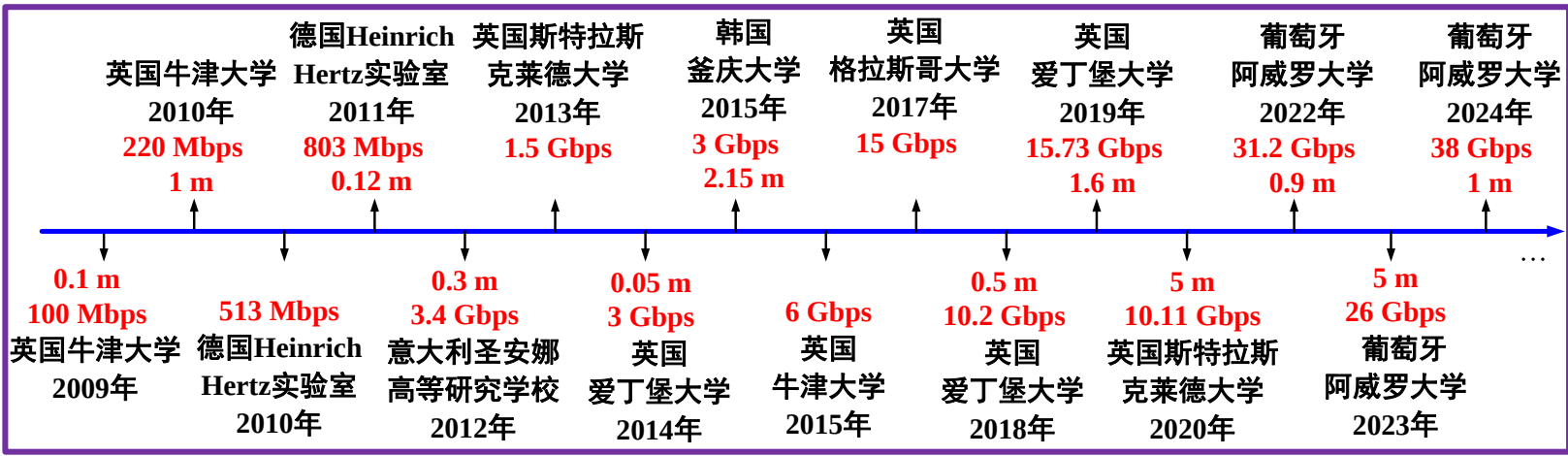
一. 可见光通信的背景

□ 硬件平台

• 国内



• 国外



可见光通信的容量限是多少？

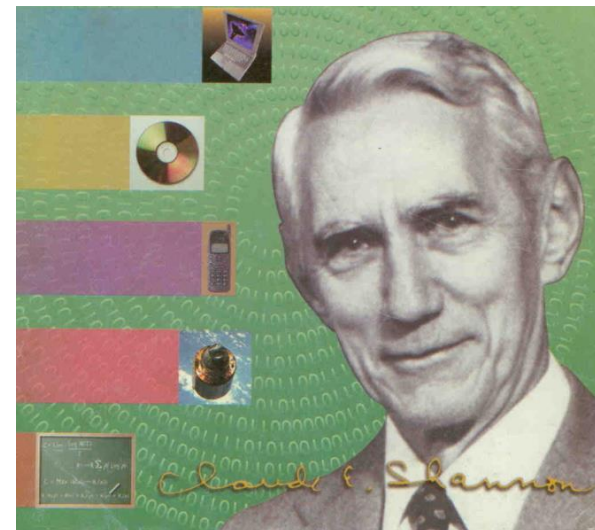
二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ 香农容量 vs 可见光通信容量

- 香农容量

$$\begin{aligned} Y_i &= X_i + Z_i, \\ \text{s.t. } Z_i &\sim \mathcal{N}(0, N) \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 &\leq P \end{aligned} \Rightarrow C = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{P}{N} \right)$$

- 可见光通信的容量



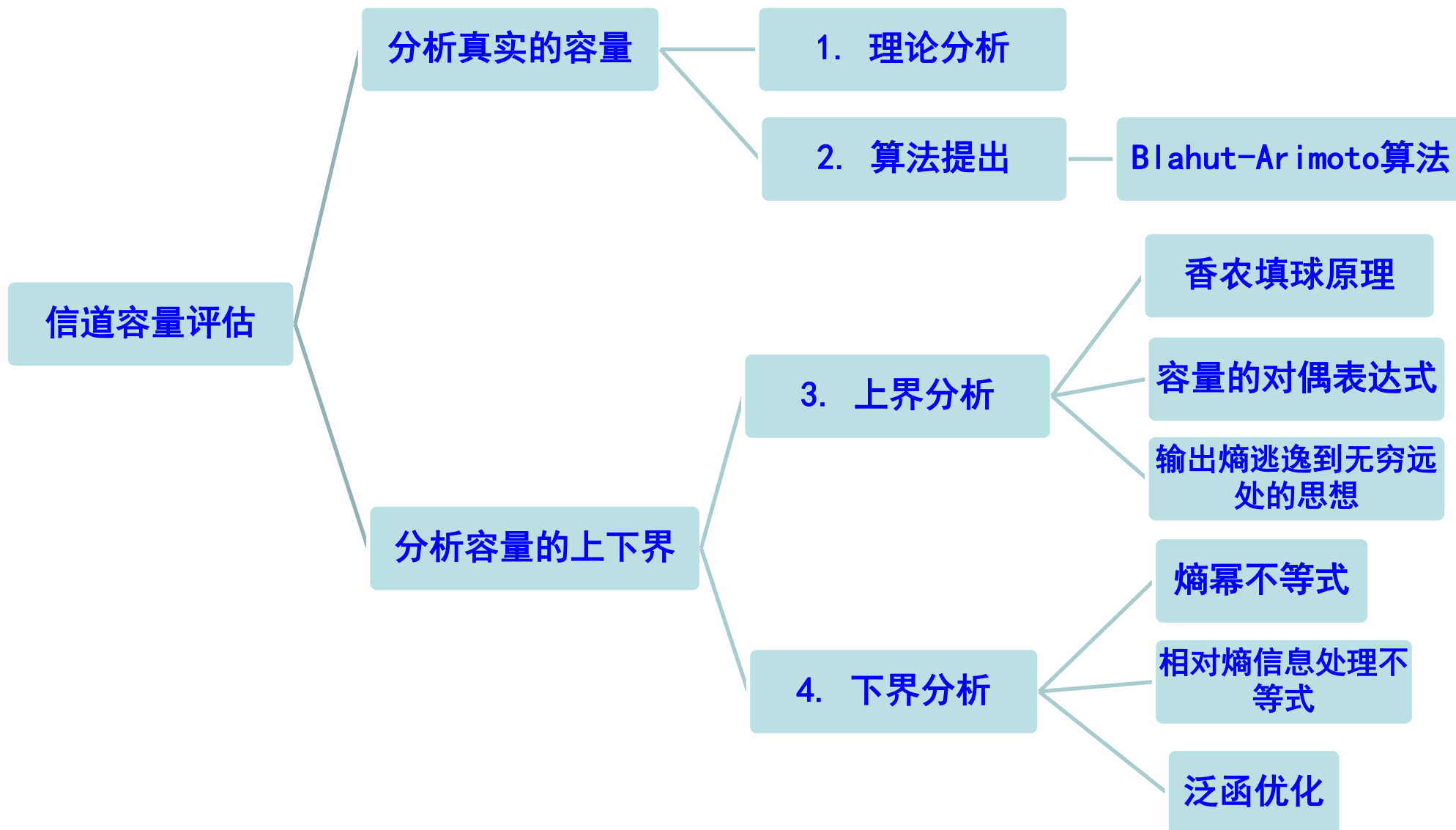
信息论奠基人——香农

属性	射频通信	可见光通信
输入信号	射频信号（双/单极性，复值）	光强信号（非负，实值）
平均功率表征	信号的均方值 $E(X ^2)$	信号的均值 $E(X)$
平均功率约束	可以小于等于某个门限值	等于某个门限 (满足照明和调光需求)

香农容量公式在可见光通信中不适用。

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ VLC信道容量评估技术

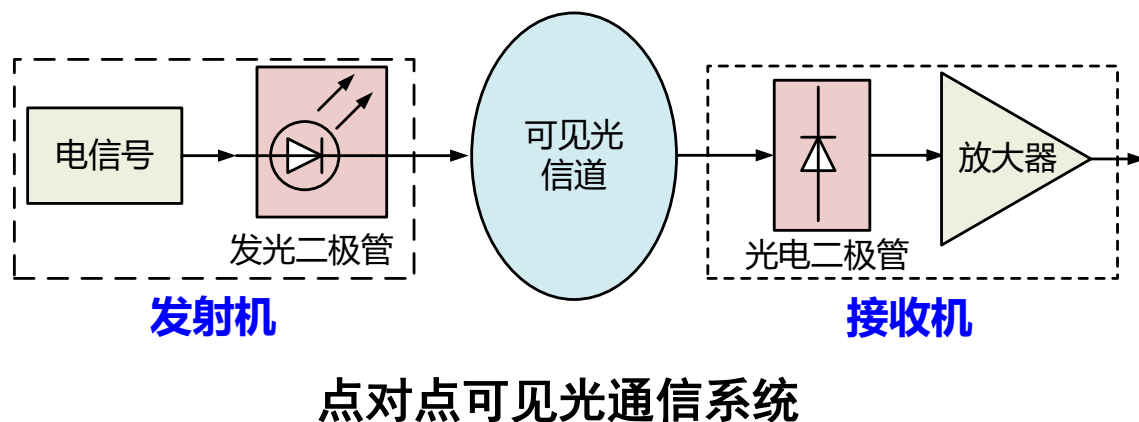


二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

1. 噪声独立条件下VLC的信道容量

自香农开启信息论的研究以来，传统无线射频通信的信道容量得到了大量研究。然而由于其特殊性，VLC的信道容量并不能直接运用以前的结果。

- 考虑独立于信号的噪声，在非负性、平均光强、峰值光强约束下，构建系统模型；
- 基于经典信息论和最优化理论，推导信道容量上、下界的理论表达式。



$$Y = X + Z$$

约束：

$$X \geq 0$$

$$X \leq A$$

$$E(X) = \xi P$$

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ 最优化问题

$$\begin{aligned} \max_{f_X(x)} & I(X;Y) \\ \text{s.t.} & \int_0^\infty f_X(x) dx = 1 \\ & E(X) = \int_0^\infty xf_X(x) dx = \xi P \end{aligned}$$

复杂的泛函优化问题，求解困难。

□ 信道容量下界（熵幂不等式+变分法）

$$\begin{aligned} I(X;Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ &= H(X+Z) - H(Z) \\ &\geq \frac{1}{2} \ln(e^{2H(X)} + e^{2H(Z)}) - H(Z) \\ &= \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{e^{2H(X)}}{2\pi e \sigma^2}\right) \end{aligned}$$

熵幂不等式

原始问题转化为

$$\begin{aligned} \max_{f_X(x)} & H(X) = -\int_0^\infty f_X(x) \log f_X(x) dx \\ \text{s.t.} & \int_0^\infty f_X(x) dx = 1 \\ & \int_0^\infty xf_X(x) dx = \xi P \end{aligned}$$

利用变分法，可得

$$f_X(x) = \frac{1}{\xi P} \exp\left(-\frac{1}{\xi P} x\right), x > 0$$

不再是高斯分布

$$h(X) = \log_2(\xi P e)$$

$$C \geq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{e}{2\pi} \left(\frac{\xi P}{\sigma} \right)^2 \right)$$

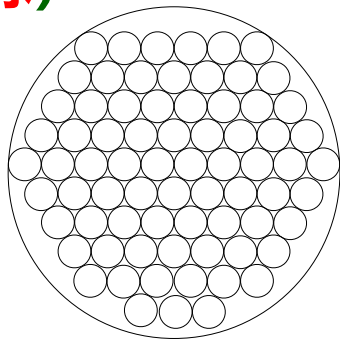
不再是香农容量公式

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ 信道容量上界 (香农填球)

香农填球原理:

$$Y = X + Z$$



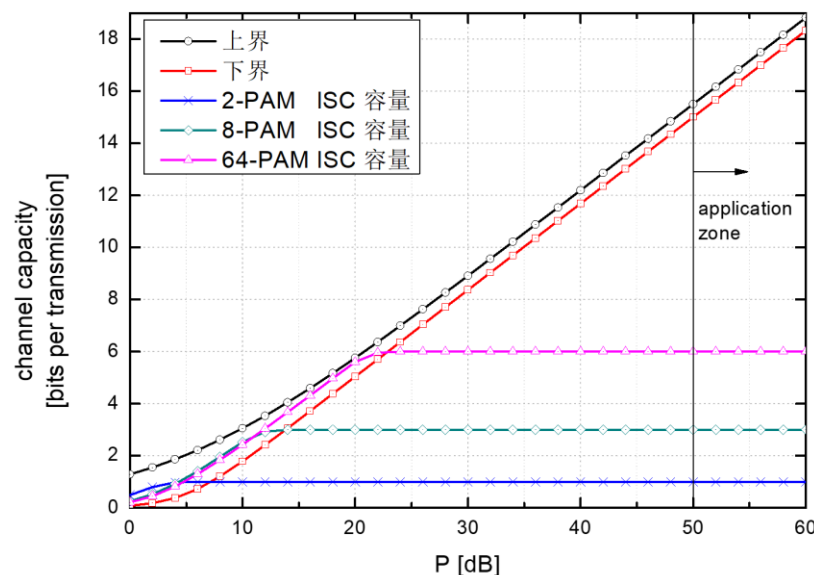
发送一个 N 长码字, 接收码字以很大的概率落在码字为中心, 以 $\sqrt{N\sigma^2}$ 为半径的译码球内。只有当接收码字落在译码球外, 译码才会出错, 且发生的概率很低。则在这个超球内最多可以容纳的译码球个数记为容量。

接收空间超球体积

$$C \leq \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \log_2 \frac{V(\Omega(\xi, P, r))}{V(r\mathcal{B}_{N-1})} \text{ bits/transmission}$$

译码球体积

$$C \leq \log_2 \left[\frac{e^{\frac{\mu^*}{2}} \xi^{\mu^*} P^{\mu^*}}{\pi^{\frac{\mu^*}{2}} \sigma^{\mu^*} (\mu^*)^{2\mu^*} (1-\mu^*)^{\frac{3(1-\mu^*)}{2}}} \right]$$



二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

2. 噪声依赖条件下VLC的信道容量

自香农开启信息论的研究以来，传统无线射频通信的信道容量得到了大量研究。然而由于其特殊性，VLC的信道容量并不能直接运用以前的结果。

- 考虑**依赖于信号的噪声**，在**非负性、平均和峰值光强约束**下，构建**系统模型**；
- 基于经典信息论和最优化理论，**推导信道容量上、下界的理论表达式**。

∞ 在接收信噪比较低时，噪声主要为**热噪声**，假设噪声独立于信号是合理的。

∞ 当接收信噪比很高时，**散弹噪声**的影响不可忽略，它是依赖于输入信号的。

$$Y \triangleq X + \sqrt{X}Z_1 + Z_0$$

约束：

$$X \geq 0$$

$$X \leq A$$

$$E(X) = \xi P$$

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ 最优化问题

$$\begin{aligned} \max_{f_X(x)} & I(X;Y) \\ \text{s.t.} & \int_0^A f_X(x) dx = 1 \\ & E(X) = \int_0^A x f_X(x) dx = \xi P \end{aligned}$$

复杂的泛函优化问题，求解困难。

□ 信道容量下界（相对熵信息处理不等式 + 变分法）

$$\begin{aligned} C &= \max_{f_X(x)} I(X;Y) \\ &\geq I(X;Y) \\ &= \cancel{h(Y)} - h(Y|X) \\ &\geq \cancel{h(X)} + \cancel{f_{\text{low}}(\xi P)} - \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2) - \frac{1}{2} E_X[\ln(1 + X \zeta^2)] \end{aligned}$$

相对熵信息处理不等式

原始问题转化为

$$\begin{aligned} \max_{f_X(x)} & \left\{ H(X) - \frac{1}{2} E_X[\ln(1 + \zeta^2 X)] \right\} \\ \text{s.t.} & \int_0^A f_X(x) dx = 1 \\ & \int_0^A x f_X(x) dx = \xi P \end{aligned}$$

利用变分法，可得

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \begin{cases} \frac{\zeta^2}{2(\sqrt{1+\zeta^2 A}-1)\sqrt{1+\zeta^2 x}}, & x \in [0, A], \\ \text{if } \alpha = \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A}-1}{3\zeta^2 A} \\ \frac{\zeta^2 e^{bx}}{2g(b, \zeta^2, A)\sqrt{1+\zeta^2 x}}, & x \in [0, A], \\ \text{if } \alpha \neq \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A}-1}{3\zeta^2 A} \text{ and } \alpha \in (0, P/A], \end{cases} \\ C_{\text{low}} &= \begin{cases} \ln\left(\frac{2(\sqrt{1+\zeta^2 A}-1)}{\zeta^2 \sqrt{2\pi e \sigma^2}}\right) + f_{\text{low}}(\xi P), & \text{if } \alpha = \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A}-1}{3\zeta^2 A} \\ \ln\left(\frac{2g(b, \zeta^2, A)}{\zeta^2 \sqrt{2\pi e \sigma^2}}\right) - b\xi P + f_{\text{low}}(\xi P), & \text{if } \alpha \neq \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A}-1}{3\zeta^2 A} \text{ and } \alpha \in (0, P/A], \end{cases} \end{aligned}$$

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ **容量上界** (容量对偶表达式+容量可达的输入分布逃逸到无穷远处思想)

$$E_X[D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))] = I(X;Y) + \underbrace{D[f_Y(y) \| R_Y(y)]}_{\geq 0}$$

$$I(X;Y) \leq E_X[D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))]$$

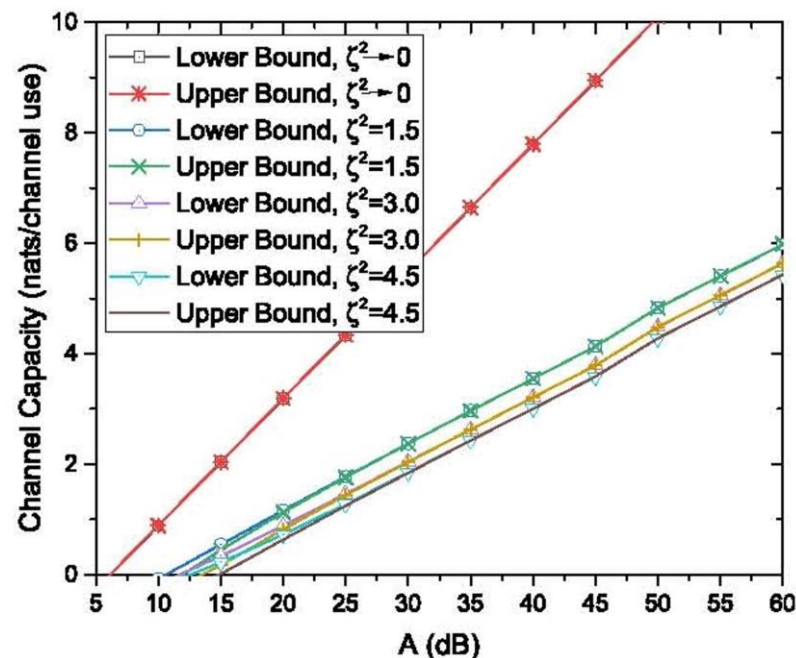
容量的对偶表达式

$$C \leq \min_{R_Y(y)} \max_{f_X(x)} E_X[D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))],$$

$$\leq \max_{f_X(x)} E_X[D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))]$$

任意取一个 $R_Y(y)$ ，都对应一个容量上界。然后，利用容量可达的输入分布逃逸到无穷远处思想和适当的放缩，可得

$$C_{\text{upp}} = \begin{cases} \ln \left(\frac{2(\sqrt{1+\zeta^2 A(1+\delta)} - 1)}{(1-2\beta)\zeta^2 \sqrt{2\pi e \sigma^2}} \right) + o_A(1), \\ \text{if } \alpha = \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A} - 1}{3\zeta^2 A} \\ \ln \left(\frac{2G(b, \zeta^2, A, \delta)}{(1-2\beta)\zeta^2 \sqrt{2\pi e \sigma^2}} \right) + \psi(b, \zeta^2, A, \sigma^2, \xi, P) \\ + o_A(1), \\ \text{if } \alpha \neq \frac{\zeta^2 A + \sqrt{1+\zeta^2 A} - 1}{3\zeta^2 A} \text{ and } \alpha \in (0, P/A], \end{cases}$$



二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

3. 输入范围受限条件下VLC的信道容量

自香农开启信息论的研究以来，传统无线射频通信的信道容量得到了大量研究。然而由于其特殊性，VLC的信道容量并不能直接运用以前的结果。

- 考虑依赖于信号的噪声，在输入范围受限约束和平均光强约束下，构建系统模型；
- 基于经典信息论和最优化理论，推导信道容量上、下界的理论表达式。

∞ LEDs工作在线性区，LED的线性范围对应于最小和最大光强点，这使得最小光强不为零。因此，非负性和峰值光强约束应该建模为输入范围受限的约束。

$$Y \triangleq X + \sqrt{X}Z_1 + Z_0$$

约束：

$$A_1 \leq X \leq A_2$$

$$E(X) = P$$

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

□ 最优化问题

$$\begin{aligned} \max_{f_X(x)} & I(X;Y) \\ \text{s.t.} & \int_{A_1}^{A_2} f_X(x) dx = 1 \\ & \int_{A_1}^{A_2} x f_X(x) dx = P \end{aligned}$$

复杂的泛函优化问题，求解困难。

□ 信道容量下界（相对熵信息处理不等式 + 变分法）

$$\begin{aligned} C \geq & \underbrace{H(X) - \frac{1}{2} E_X [\ln(1 + hX\zeta^2)]}_{\triangleq -\mathcal{J}[f_X(x)]} \\ & + \ln \left(\frac{h}{\sqrt{2\pi e\sigma^2}} \right) + f_L(P) \end{aligned}$$

原始问题转化为

$$\begin{aligned} \min_{f_X(x)} & \mathcal{J}[f_X(x)] \\ \text{s.t.} & \int_{A_1}^{A_2} f_X(x) dx = 1 \\ & \int_{A_1}^{A_2} x f_X(x) dx = P \end{aligned}$$

利用变分法，可得

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \begin{cases} \frac{h\zeta^2}{2(\sqrt{1+hA_2\zeta^2}-\sqrt{1+hA_1\zeta^2})\sqrt{1+hx\zeta^2}}, \\ x \in [A_1, A_2], \text{ if } \xi = \rho \\ \frac{e^{bx}}{g\sqrt{1+hx\zeta^2}}, x \in [A_1, A_2], \text{ o.w.} \end{cases} \\ C_L &= \begin{cases} \ln \left(\frac{2(\sqrt{1+hA_2\zeta^2}-\sqrt{1+hA_1\zeta^2})}{\zeta^2\sqrt{2\pi e\sigma^2}} \right) + f_L(P), \text{ if } \xi = \rho \\ \ln \left(\frac{ghe^{-bP}}{\sqrt{2\pi e\sigma^2}} \right) + f_L(P), \text{ o.w.} \end{cases} \end{aligned}$$

研究工作1和2的下界都是本结果的特例。

二. 点对点通信的基本性能限——信道容量限

容量上界 (容量对偶表达式+容量可达的输入分布逃逸到无穷远处思想)

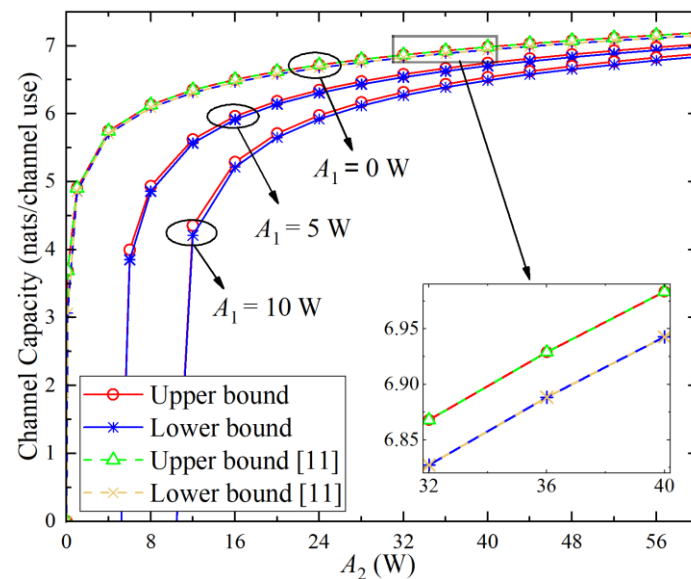
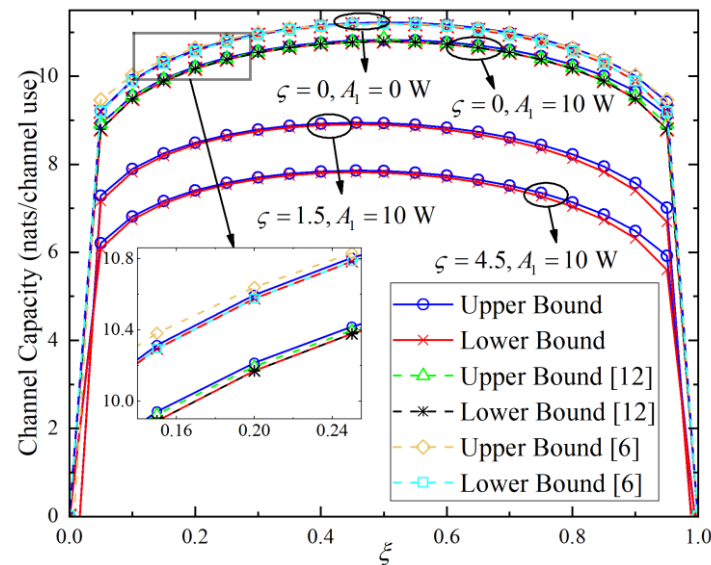
$$C = \min_{R_Y(y)} \max_{f_X(x)} E_X [D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))]$$
$$\leq \max_{f_X(x)} E_X [D(f_{Y|X}(y|X) \| R_Y(y))]$$



任意取一个 $R_Y(y)$, 都对应一个容量上界。然后, 利用容量可达的输入分布逃逸到无穷远处思想和适当的放缩, 可得

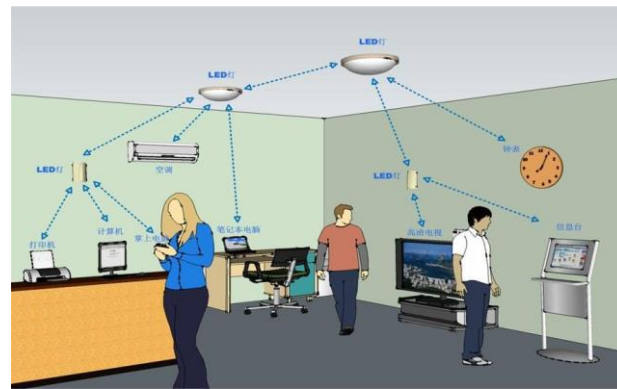
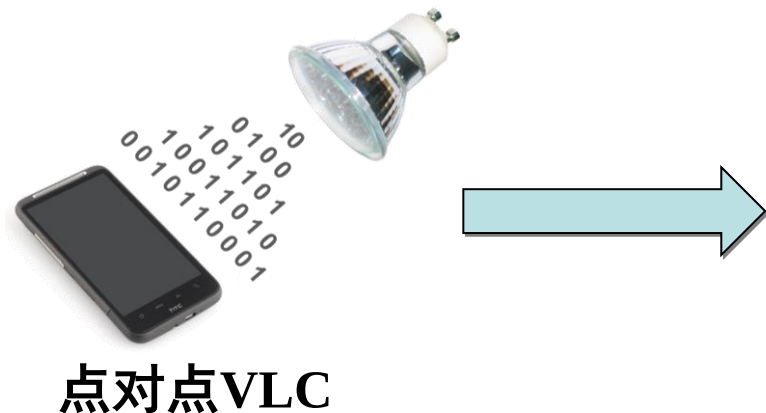
$$C_U = \begin{cases} -\frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2) + D_2 + o_{A_2}(1), & \text{if } \xi = \rho \\ -\frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2) + \varphi + D_5 + o_{A_2}(1), & \text{o.w.} \end{cases}$$

研究工作1和2的上界都是本结果的特例。



三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

□ 可见光通信的物理层安全



● 基于加密技术的网络安全

- 从协议栈的上层解决网络安全。缺陷：1. 由于用户的移动性和资源的有限性，传统加密算法变得异常复杂。2. 随着高性能计算的飞速发展，基于计算量的加密机制的安全性受到挑战。

● 物理层安全

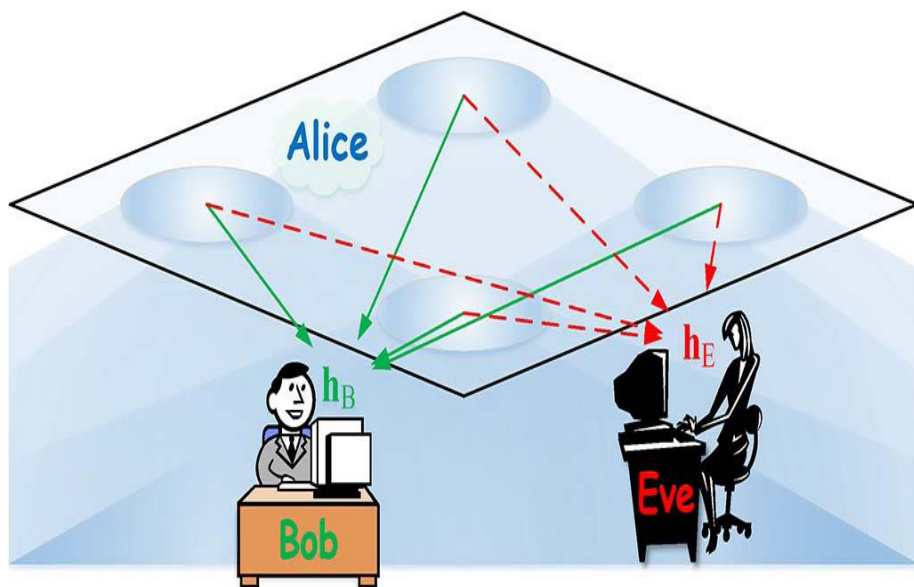
- 利用主信道和窃听信道的随机性、差异性和互易性等，从物理层实现信息的安全传输。

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

4. 噪声独立条件下VLC的保密容量

前面三个工作仅关注点对点通信，并未对信息传输的安全性加以考虑。我们对VLC的物理层安全技术进行了研究。

- 考虑**信号独立的噪声**，在**非负性、平均和峰值光强约束**下，构建**系统模型**；
- 基于经典信息论和最优化理论，**推导保密容量上、下界的理论表达式**。



典型三节点物理层安全网络

$$\begin{cases} Y_B = H_B X + Z_B \\ Y_E = H_E X + Z_E \end{cases}$$

约束:

$$X \geq 0$$

$$X \leq A$$

$$E(X) = \xi P$$

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

□ 最优化问题

$$C_s = \max_{f_X(x)} [I(X; Y_B) - I(X; Y_E)]$$

$$\text{s.t.} \quad \int_0^\infty f_X(x) dx = 1$$

$$E(X) = \int_0^\infty x f_X(x) dx = \xi P$$

复杂的泛函优化问题，求解困难。

□ 保密容量下界一（前期信道容量分析结果）

$$C_s = \max_{f_X(x)} [I(X; Y_B) - I(X; Y_E)]$$

$$\geq \max_{f_X(x)} I(X; Y_B) - \max_{f_X(x)} I(X; Y_E)$$

$$C_s \geq \ln \left[\frac{\sigma_E \sqrt{2\pi e \left(1 + \frac{H_B^2 \xi^2 P^2 e}{2\pi \sigma_B^2} \right)}}{\beta e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_E^2}} + \sqrt{2\pi} \sigma_E \mathcal{Q} \left(\frac{\delta}{\sigma_E} \right)} \right] - \frac{1}{2} \mathcal{Q} \left(\frac{\delta}{\sigma_E} \right) - \frac{\delta}{2\sqrt{2\pi} \sigma_E} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_E^2}}$$

$$- \frac{\delta^2}{2\sigma_E^2} \mathcal{Q} \left(-\frac{\delta + H_E \xi P}{\sigma_E} \right) - \frac{\delta + H_E \xi P}{\beta} - \frac{\sigma_E}{\sqrt{2\pi} \beta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_E^2}},$$

□ 保密容量下界二（熵幂不等式+变分法）

利用熵幂不等式，可得

$$C_s \geq \max_{f_X(x)} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[e^{2[\mathcal{H}(X) + \ln(H_B)]} + 2\pi e \sigma_B^2 \right] - \frac{1}{2} \ln [2\pi e \text{var}(Y_E)] \right\}$$

$$+ \ln \left(\frac{\sigma_E}{\sigma_B} \right)$$

求解如下泛函优化问题：

$$\min_{f_X(x)} \mathcal{J} [f_X(x)] \triangleq \int_0^\infty f_X(x) \ln [f_X(x)] dx$$

$$\text{s.t.} \quad \int_0^\infty f_X(x) dx = 1$$

$$\int_0^\infty x f_X(x) dx = \xi P.$$

$$C_s \geq \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_E^2}{2\pi \sigma_B^2} \cdot \frac{e \xi^2 P^2 H_B^2 + 2\pi \sigma_B^2}{H_E^2 \xi^2 P^2 + \sigma_E^2} \right)$$

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

保密容量上界(保密容量对偶表达式)

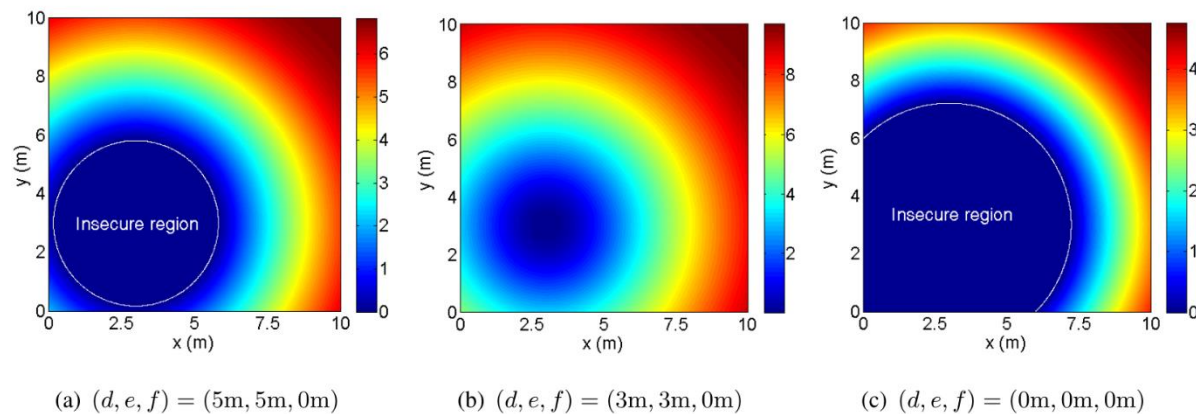
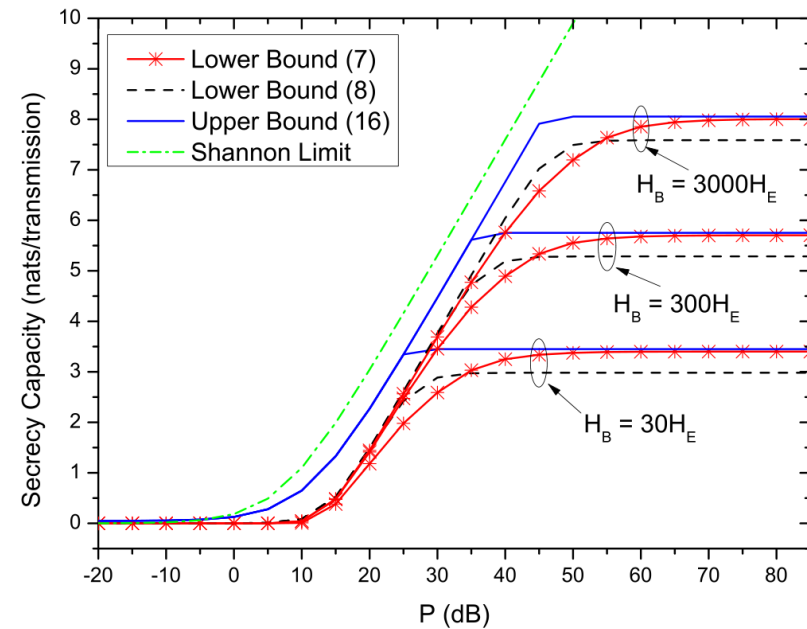
$$C_s = \max_{f_X(x)} \min_{g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)} E_{X Y_E} [D(f_{Y_B|X Y_E}(y_B|X, Y_E) \| g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E))] \\ = \min_{g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)} E_{X^* Y_E} [D(f_{Y_B|X Y_E}(y_B|X, Y_E) \| g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E))],$$

其中 X^* 为最优的输入。 $g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)$ 为任意的条件概率密度函数，任意取一个 $g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)$ 都可得到一个上界。

$$C_s \leq \underbrace{E_{X^*} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{Y_B Y_E|X}(y_B, y_E|X) \ln [f_{Y_B|X Y_E}(y_B|X, y_E)] dy_B dy_E \right\}}_{I_1} \\ - \underbrace{E_{X^*} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{Y_B Y_E|X}(y_B, y_E|X) \ln [g_{Y_B|Y_E}(y_B|y_E)] dy_B dy_E \right\}}_{I_2}.$$

取 $g_{Y_B|Y_E}(y_B|y_E) = \frac{1}{2s^2} e^{-\frac{|y_B - \mu y_E|}{s^2}}$ ，可得

$$C_s \leq \begin{cases} \ln \left[\frac{4e \left(\sqrt{\frac{1}{2\pi}} \sigma_B + \frac{H_B \xi P}{2} \right)}{\sqrt{2\pi e \sigma_B^2 \left(1 + \frac{H_B^2 \sigma_B^2}{H_E^2 \sigma_E^2} \right)}} \right], & \text{if } \sqrt{\frac{\frac{H_E^2}{H_B^2} \sigma_B^2 + \sigma_E^2}{2\pi}} \geq \frac{H_E}{H_B} \left(\frac{\sigma_B}{\sqrt{2\pi}} + \frac{H_B \xi P}{2} \right) \\ \ln \left(\frac{2\sqrt{e} H_B \sigma_E}{\pi H_E \sigma_B} \right), & \text{if } \sqrt{\frac{\frac{H_E^2}{H_B^2} \sigma_B^2 + \sigma_E^2}{2\pi}} \leq \frac{H_E}{H_B} \left(\frac{\sigma_B}{\sqrt{2\pi}} + \frac{H_B \xi P}{2} \right). \end{cases}$$



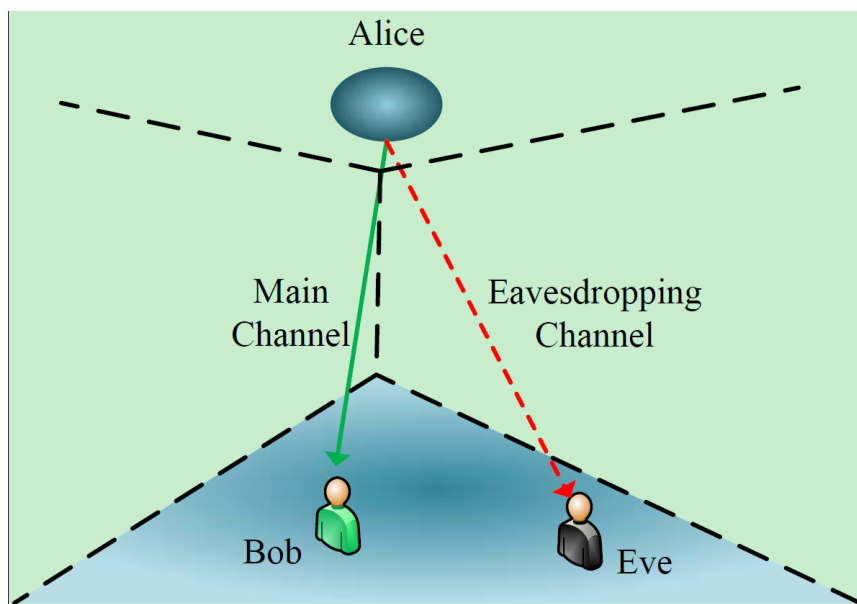
J.-Y. Wang, C. Liu, J.-B. Wang, Y. Wu, M. Lin, and J. Cheng, "Physical-layer security for indoor visible light communications: Secrecy capacity analysis," *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(12): 6423-6436.

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

5. 噪声依赖条件下VLC的保密容量

前面三个工作仅关注点对点通信，并未对信息传输的安全性加以考虑。我们对VLC的物理层安全技术进行了研究。

- 考虑**信号依赖的噪声**，在**非负性、平均和峰值光强约束**下，构建**系统模型**；
- 基于经典信息论和最优化理论，**推导保密容量上、下界的理论表达式**。



$$\begin{cases} Y_B = H_B X + \sqrt{H_B X} Z_{B,1} + Z_{B,0} \\ Y_E = H_E X + \sqrt{H_E X} Z_{E,1} + Z_{E,0} \end{cases}$$

约束:

$$X \geq 0$$

$$X \leq A$$

$$E(X) = \xi P$$

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

□ 最优化问题

$$C_s = \max_{f_X(x)} [I(X; Y_B) - I(X; Y_E)]$$

$$\text{s.t.} \quad \int_0^\infty f_X(x) dx = 1$$

$$E(X) = \int_0^\infty x f_X(x) dx = \xi P$$

依赖噪声的加入使得该泛函优化问题更为复杂，求解更为困难。

□ 保密容量下界(熵放缩+变分法)

$$C_s \geq [I(X; Y_B) - I(X; Y_E)]|_{\forall f_X(x) \text{ satisfies (2) and (4)}}$$

$$= \mathcal{H}(Y_B) - \mathcal{H}(Y_B|X) - \mathcal{H}(Y_E) + \mathcal{H}(Y_E|X).$$

其中

$$\mathcal{H}(Y_k|X) = \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma_k^2) + \frac{1}{2} E_X [\ln(1 + H_k \zeta_k^2 X)], \quad k = B \text{ or } E.$$

$$\mathcal{H}(Y_E) \leq \frac{1}{2} \ln[2\pi e \text{var}(Y_E)].$$

任意变量的熵 < 同方差下高斯变量的熵

$$\mathcal{H}(Y_B) \geq \mathcal{H}(X) + f_{\text{low}}(H_B, \xi, P)$$

输出熵 > 输入熵

$$C_s \geq \mathcal{H}(X) + f_{\text{low}}(H_B, \xi, P) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_E^2}{\sigma_B^2} \right)$$

$$+ \frac{1}{2} E_X \left[\ln \left(\frac{1 + H_E \zeta_E^2 X}{1 + H_B \zeta_B^2 X} \right) \right] - \frac{1}{2} \ln[2\pi e \text{var}(Y_E)].$$

第一、四、五项均与输入信号分布有关，然而联合优化这三项，导致优化问题复杂，无法求解。因而，我们仅优化第一项，得到次优解：

$$\max_{f_X(x)} \mathcal{H}(X) = - \int_0^\infty f_X(x) \ln[f_X(x)] dx$$

$$\text{s.t.} \quad \int_0^\infty f_X(x) dx = 1$$

$$E_X(X) = \int_0^\infty x f_X(x) dx = \xi P.$$

求解上述泛函优化，得到输入分布，进而得到保密容量下界：

$$C_{\text{Low}} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{e \xi^2 P^2 \sigma_E^2}{2\pi \sigma_B^2 (H_E^2 \xi^2 P^2 + H_E \xi P \zeta_E^2 \sigma_E^2 + \sigma_E^2)} \right] + f_{\text{low}}(H_B, \xi, P)$$

$$+ \frac{1}{2} \left[e^{\frac{1}{H_B \zeta_B^2 \xi P}} \text{Ei} \left(-\frac{1}{H_B \zeta_B^2 \xi P} \right) - e^{\frac{1}{H_E \zeta_E^2 \xi P}} \text{Ei} \left(-\frac{1}{H_E \zeta_E^2 \xi P} \right) \right].$$

三. 物理层安全的基本性能限——保密容量限

保密容量上界(保密容量对偶表达式)

$$I(X; Y_B | Y_E) = \min_{g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)} E_{XY_E} [D(f_{Y_B|XY_E}(y_B|X, Y_E) || g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E))] .$$
$$C_s = \max_{f_X(x)} I(X; Y_B | Y_E) .$$

$$C_{Upp} = \begin{cases} \ln \left(\sqrt{\frac{4eH_B\zeta_B^2\sigma_E^2}{\pi^2 M}} + \sqrt{\frac{2e\xi P H_B H_E \zeta_E^2 \sigma_E^2}{M \pi \zeta_B^2 \sigma_E^2}} \right), & \text{if } \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \geq \frac{H_E}{H_B} \left(\sqrt{\frac{H_B \zeta_B^2 \sigma_E^2}{2\pi M}} + \frac{H_B}{2} \sqrt{\frac{\xi P}{M}} \right) \\ \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4eH_B\zeta_B^2\sigma_E^2}{\pi^2 H_E \zeta_E^2 \sigma_E^2} \right), & \text{otherwise} \end{cases}$$

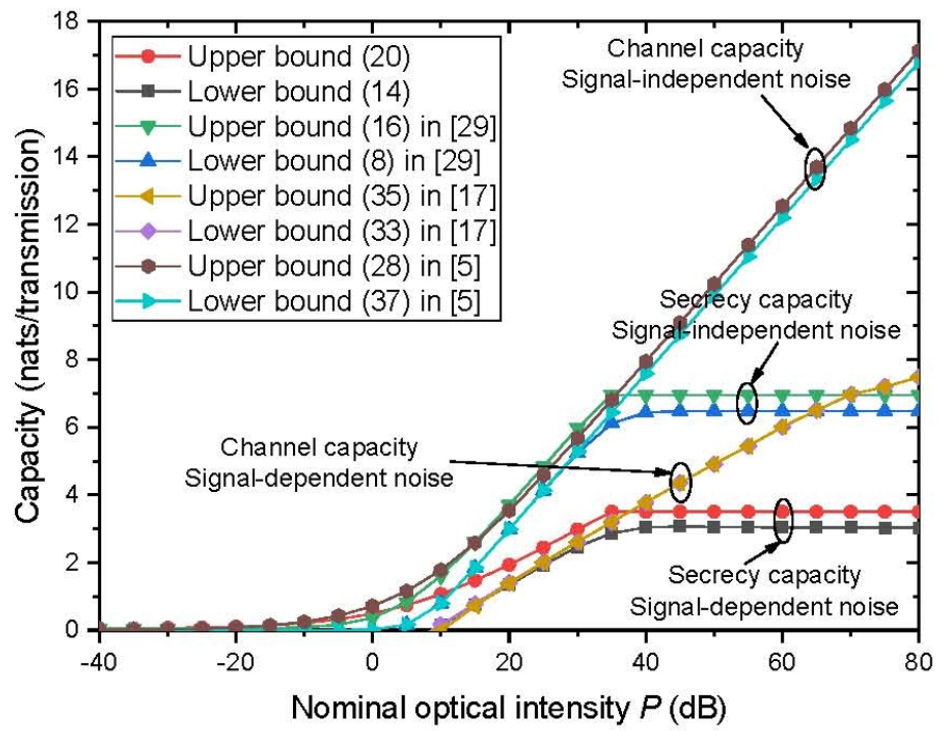


$$C_s = \max_{f_X(x)} \min_{g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)} E_{XY_E} [D(f_{Y_B|XY_E}(y_B|X, Y_E) || g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E))]$$
$$= \min_{g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E)} E_{X*Y_E} [D(f_{Y_B|XY_E}(y_B|X, Y_E) || g_{Y_B|Y_E}(y_B|Y_E))] ,$$

保密容量对偶表达式

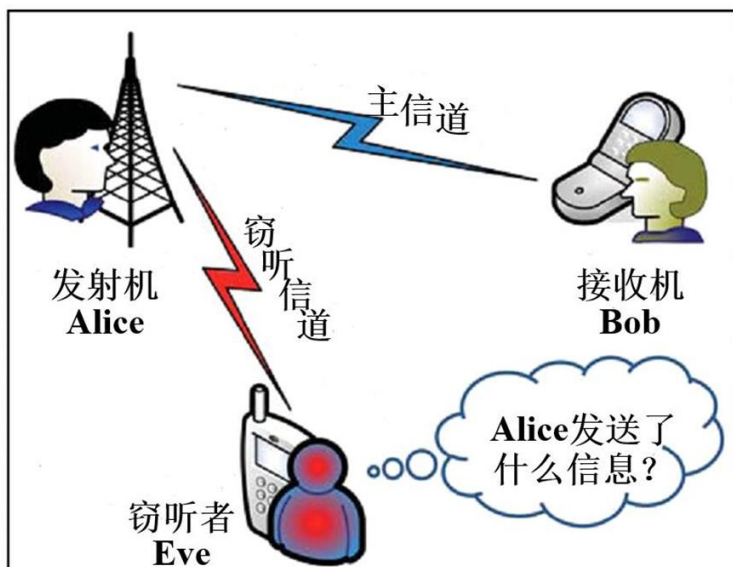
选择任意一个 $g_{Y_B|Y_E}(y_B|y_E)$ 都可得到一个上界。
选择

$$g_{Y_B|Y_E}(y_B|y_E) = \frac{1}{2s^2} e^{-\frac{|y_B - \mu y_E|}{s^2}}$$



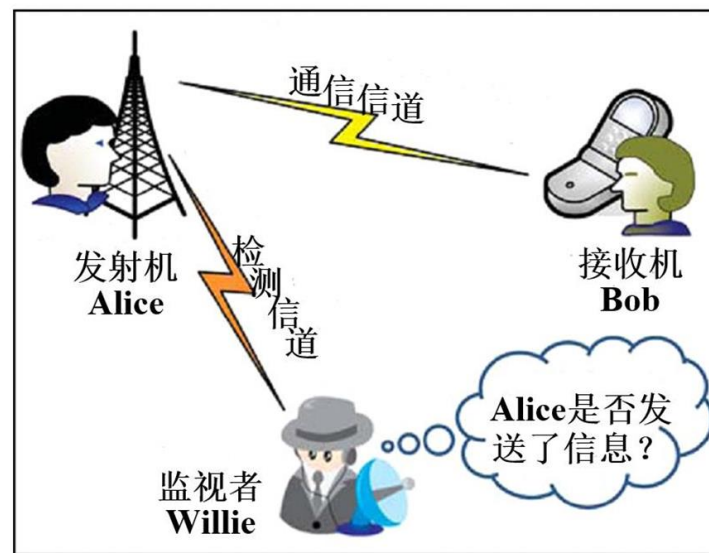
四. 隐蔽通信的基本性能限

□ 可见光通信新型安全技术



物理层安全

仅保护传输内容，不提供对传输检测的保护。



隐蔽通信

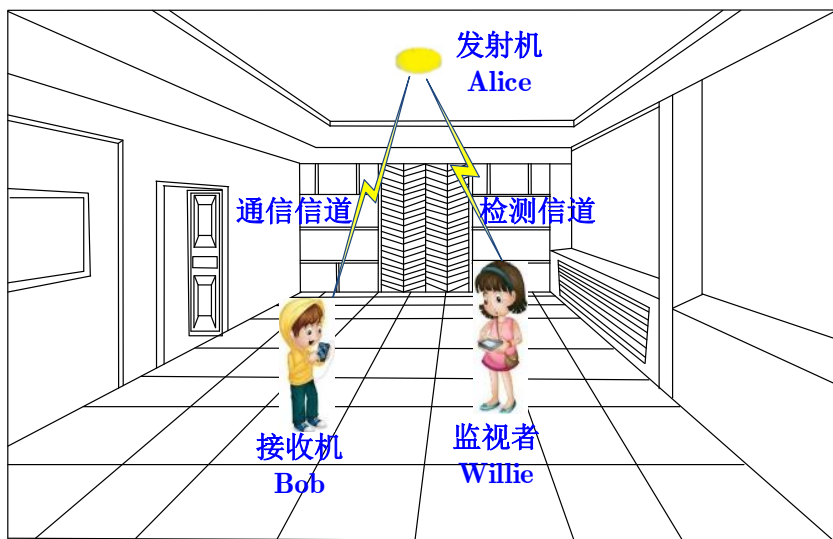
不仅保护传输内容，更强调传输行为难以被检测。

四. 隐蔽通信的基本性能限——隐蔽传输的最大比特数

6. 隐蔽可见光通信的基本性能限

物理层安全仅保护传输的内容，不提供对传输检测的保护。本内容将研究新型的安全通信方式——隐蔽可见光通信。

- 考虑N次信道传输，在**非负性、平均光强约束下**，构建**通信信道模型和检测信道模型**；
- 基于经典信息论和最优化理论，**推导隐蔽传输的信息比特数**。



Alice通过使用N次信道在通信信道上向Bob发送合法信息；
Willie通过这N次观察，来检测Alice和Bob是否存在通信行为。

$$x[i] \geq 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$\mathbb{E}(x[i]) = \xi P, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

四. 隐蔽通信的基本性能限——隐蔽传输的最大比特数

□ 通信信道性能表征 (互信息)

Bob接收信号:

$$y_B[i] = r_B h_B x[i] + n_B[i]$$

第*i*个信道上, Alice和Bob之间的互信息:

$$I(x[i]; y_B[i]) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} p(x, y_B) \log_2 \frac{p(x, y_B)}{p(x)p(y_B)} dx dy_B$$

由于x和y_B中的元素独立同分布, 则Alice和Bob之间总互信息:

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}_B) = n \times I(x[i]; y_B[i])$$

□ 检测信道性能表征 (检测错误概率)

Willie执行二元假设检验:

$$y_W[i] = \begin{cases} n_W[i], & H_0 \\ r_W h_W x[i] + n_W[i], & H_1 \end{cases}$$

先验等概条件下, Willie的检测错误概率:

$$P_e = \frac{1}{2} (\alpha + \beta)$$

虚警 漏检
概率 概率

隐蔽性约束:

$$\alpha + \beta \geq 1 - \varepsilon$$

利用全变差距离、Pinsker不等式、相对熵链式法则等, 可以将隐蔽性约束进一步写为:

$$\mathcal{D}(p_1(y_W[i]) \| p_0(y_W[i])) \leq \frac{2\varepsilon^2}{n \ln 2}$$

四. 隐蔽通信的基本性能限——隐蔽传输的最大比特数

最优输入分布及性能限

在满足隐蔽性约束和输入信号约束前提下，最大化互信息，即

$$\max_{p(x)} I(x; y_B)$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}(x) = \int_0^\infty xp(x)dx = \xi P$$

$$\int_0^\infty p(x)dx = 1$$

$$\mathcal{D}(p_1(y_w) \| p_0(y_w)) \leq \frac{2\varepsilon^2}{n \ln 2}$$

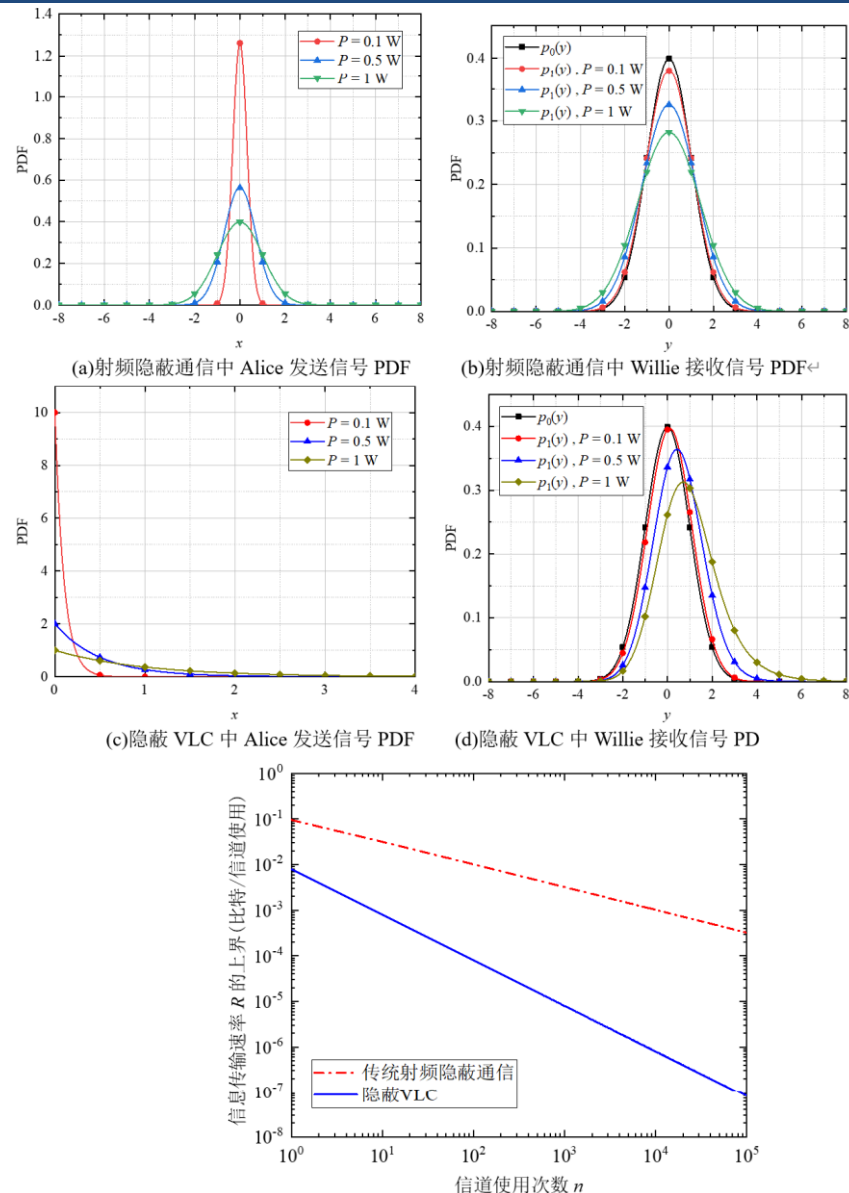


$$p^*(x) = \frac{1}{\xi P} \exp\left(-\frac{1}{\xi P} x\right), \quad x \geq 0$$

不再是射频通信中的高斯分布

$$nR \leq \frac{n}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(4\pi - e)(r_B h_B)^2}{e\sigma_B^2} f(n) \left(\sqrt{1 + \frac{8\varepsilon^2 e^2}{n(4\pi - e)^2}} - 1 \right) \right)$$

不再服从射频通信中的平方根法则



四. 隐蔽通信的基本性能限——隐蔽传输的最大比特数

7. 考虑峰值光强约束的隐蔽可见光通信的基本性能

- 考虑N次信道传输，在非负性、平均光强约束基础上，增加峰值光强约束，构建通信信道模型和检测信道模型；
- 基于经典信息论和最优化理论，推导隐蔽传输的信息比特数。

P.-F. Yu, J.-W. Shi, D.-P. Su, and J.-Y. Wang, "Covert transmission performance for visible light communications under optical intensity and covert constraints," *Physical Communication*, 2023, 60: 1-9.

8. 干扰节点协助下的隐蔽可见光通信性能提升策略

- 在Alice、Bob、Willie三节点模型基础上，增加干扰节点Dave来扰乱Willie的检测；
- 分析检测性能和通信性能，并证明干扰节点的加入可以实现正速率隐蔽传输。

五. 总结与展望

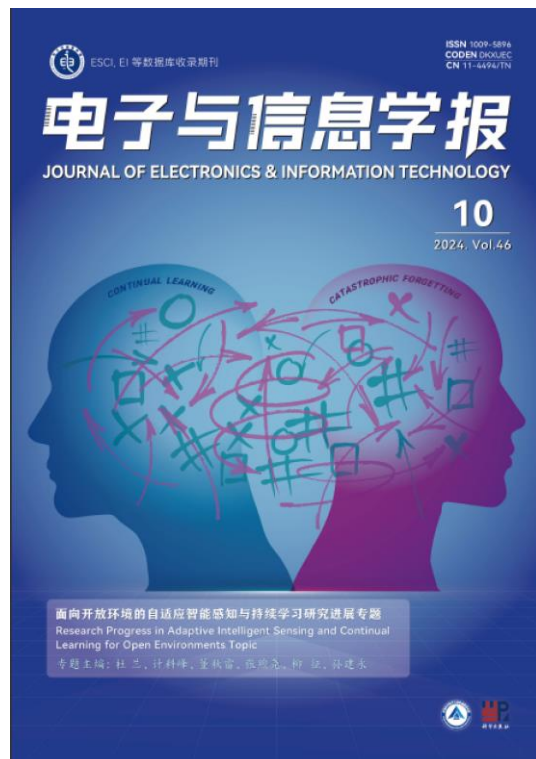
□ 总结

- 确定了不同条件下的信道容量上下界表达式，揭示了**可见光通信的基本性能限**。
- 确定了不同条件下的保密容量上下界表达式，为评估**可见光通信的物理层安全**提供了理论依据。
- 确定了不同条件下隐蔽传输的最大比特数表达式，为评估**隐蔽可见光通信**提供了理论参考。

□ 展望

- 助力系统参数优化
- 助力硬件系统设计

电子与信息学报(EI、ESCI、中文领军期刊、核心期刊)



主编：付琨
1979年创刊 月刊
中文领军期刊
ESCI数据库收录
EI、Scopus数据库收录
国内所有中文核心数据库收录



主办单位：

中科院空天信息创新研究院

出版单位：科学出版社

期刊网址：<https://jeit.ac.cn>

学报邮箱：jeit@mail.ie.ac.cn

学报电话：010-58887066

学报微信公众号：



➤ 定位与目标

期刊定位：

电子与信息领域最具影响力的中文科技期刊之一

建设目标：

力争打造能代表行业发声的学术媒体与交流平台

➤ 报道范围

- ✓ 无线通信与物联网；
- ✓ 电子对抗、雷达、声呐与导航；
- ✓ 电磁场与微波技术；
- ✓ 集成电路、芯片与传感器设计；
- ✓ 数字与阵列信号处理；
- ✓ 图像处理、模式识别与人工智能；
- ✓ 密码学与信息安全；
- ✓ 其它电子与信息领域的交叉学科.....

光通信研究 (中文核心、中国科技核心期刊)



双月刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

- **主办单位：**光通信技术和网络全国重点实验室---武汉邮电科学研究院有限公司。
- **收录情况：**期刊被DOAJ、EBSCO, Ulrichsweb (乌利希期刊指南), ICI World of Journals (哥白尼索引期刊数据库) 和ICI Master List (哥白尼精选数据库) 收录。
- **载文内容：**主要刊载光通信及光电子领域具有创新性的基础研究和应用研究成果, 理论和实用技术, 以及与光通信、光电子相关的交叉领域的科研学术论文, 反映国内外光通信、光电子领域的发展动态、研究成果、应用状况和市场信息等, 并针对热点问题和前沿课题出版相关专题, 开展国内外学术交流, 沟通科研与产业的联系, 促进光通信行业发展。

电讯技术 (中文核心、中国科技核心、RCCSE中国核心学术期刊)

1958年创刊•月刊 西南电子技术研究所 (中国电子科技集团公司第十研究所) 主办



有高度 有深度 有温度

不收审稿费 不收版面费

有稿费 有奖励 有报酬

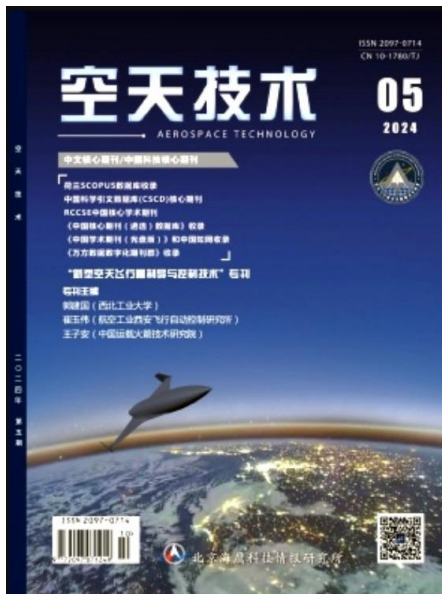


- 创刊名《**电讯技术译丛**》，1959年改为《电讯技术》
- 国家新闻出版广电总局**第一批**认定的学术期刊
- “信息通信**精品科技期刊**方阵”期刊
- “**三核心**”期刊 (中文核心+中国科技核心+RCCSE核心)
- 《信息通信领域高质量科技期刊分级目录》**T2级**期刊
- 《电子技术、通信技术领域高质量科技期刊分级目录》**T3级**期刊
- 《世界期刊影响力指数报告 (WJCI)》收录期刊
- 工业和信息化部**优秀**期刊
- 国家新闻出版署出版融合发展 (武汉) 重点实验室OSID开放科学计划出版融合**优秀**案例入选期刊
- 国内外多家**数据库**收录 (知网、万方、维普、INSPEC、EBSCO等)

.....

欢迎合作策划、出版专题、专刊
欢迎在《电讯技术》及相关平台宣传个人或团队成果

空天技术（中文核心、中国科技核心期刊）



双月刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

- **期刊刊名：**《空天技术》（原《飞航导弹》）是由中国航天科工集团有限公司主管、北京海鹰科技情报研究所主办的学术期刊。
- **收录情况：**期刊被《中国核心期刊（遴选）数据库》《世界期刊影响力指数（WJCI）报告》收录。
- **办刊宗旨：**刊载空天技术领域研究新理论、新成果、新技术，促进学术交流与技术合作，推动成果转化，服务我国空天事业发展。
- **载文内容：**以临近空间与空间领域研究的新理论、新技术、新成果的综述和研究论文为主，围绕临近空间与空间领域的基础科学理论与技术方法，以空天飞行基础理论、关键技术以及与空天飞行活动相关的空天环境、载荷、遥感、遥测、临近空间与空间开发应用等为主要选题、组稿方向。

河南理工大学学报（自然科学版）

《河南理工大学学报（自然科学版）》

《河南理工大学学报（自然科学版）》创刊于1981年，是河南省教育厅主管，河南理工大学主办的工程技术类综合性学术期刊，以矿业和安全学科为特色。刊号ISSN1673-9787,CN41-1384/N，双月刊，国内外公开发行。

栏目设置：安全·矿业 地质·测绘·环境 机电·智能化 力学·土木·材料

国外数据库收录：美国《化学文摘》（CA）、俄罗斯《文摘杂志》（Pж(AJ))

波兰《哥白尼索引》（IC）、英国“Europub数据库”

日本“科学技术振兴机构数据库”（JST）

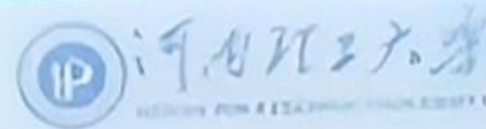
期刊荣誉：北大中文核心期刊 中国科技核心期刊

RCCSE中国核心学术期刊（A） 河南优秀出版奖期刊奖

煤炭领域高质量科技期刊T2级

地球科学领域高质量科技期刊T2级

中国煤炭行业知识服务平台数字化优秀期刊



青年编委：王金元

投稿网址：

<http://xuebao.hpu.edu.cn>

咨询电话：0391-3987068

北大中文核心期刊
中国科技核心期刊
煤炭领域高质量科技期刊T2级
地质学领域高质量科技期刊T2级
2022年度河南优秀出版期刊奖

ISSN 1673-9787
CODEN HLDX2

河南理工大学学报

JOURNAL OF
HENAN POLYTECHNIC UNIVERSITY

HENAN LIGONG DAXUE XUEBAO · ZIRAN KEXUE BAN

自然科学版
Natural Science

1

2024
第43卷 第1期
Vol.43 No.1



征稿启事

谢谢大家， 敬请批评指正！

