



重庆大学

CHONGQING UNIVERSITY

激光通信在低轨卫星星间传输中的应用与研究

2024年6月13日

汇报人：叶佳



重庆大学
CHONGQING UNIVERSITY

目录

CONTENTS

01

低轨卫星通信系统

02

低轨星座系统的延迟与可靠性分析

03

隐蔽性视角下的星间传输
安全保护

04

激光星间传输

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家



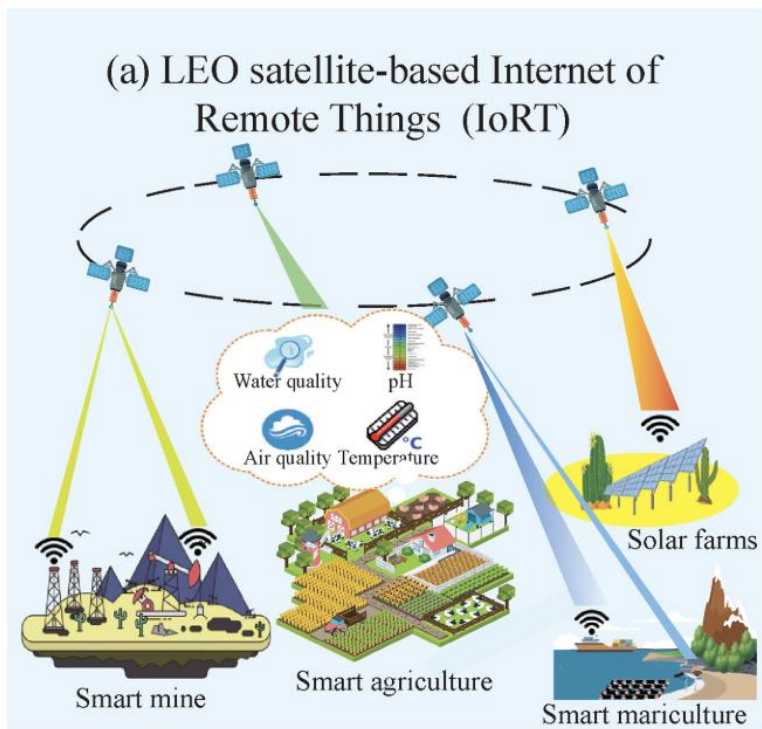
重慶大學
CHONGQING UNIVERSITY

01

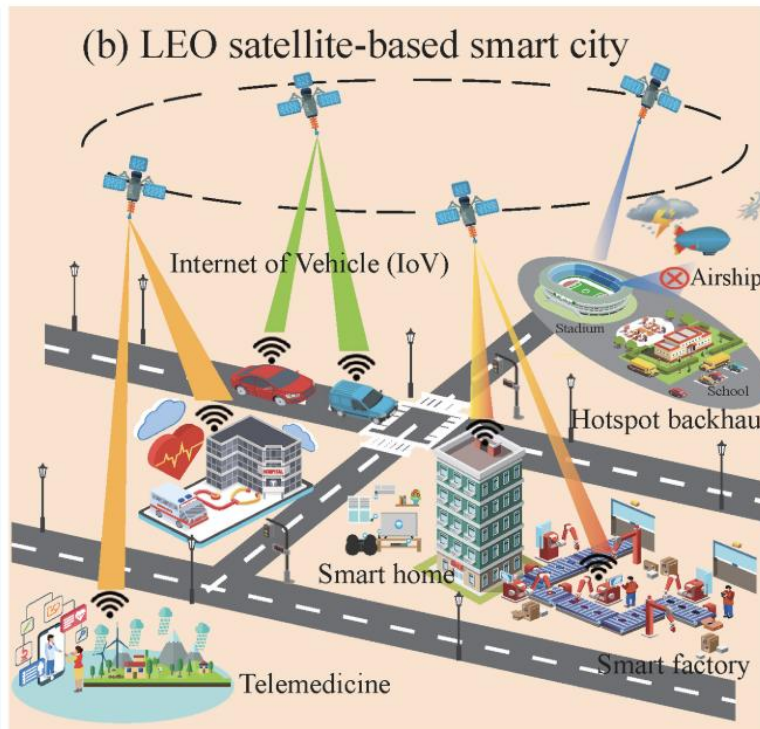
低轨卫星通信系统

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家

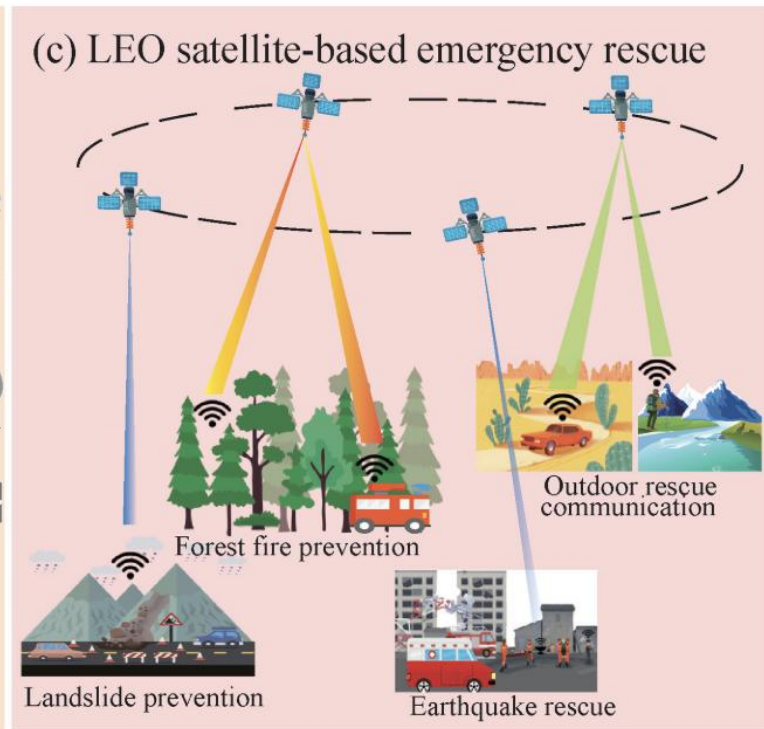
LEO卫星通信系统在许多领域得到了广泛应用，包括远程物联网、智慧城市和紧急救援。



部署在偏远地区，支持无缝的无线访问，可用于传感器数据收集、分析和处理。



支持远程医疗、车联网（IoV）、智能工厂和家庭，以提高城市服务、城市可持续性和工厂生产效率。

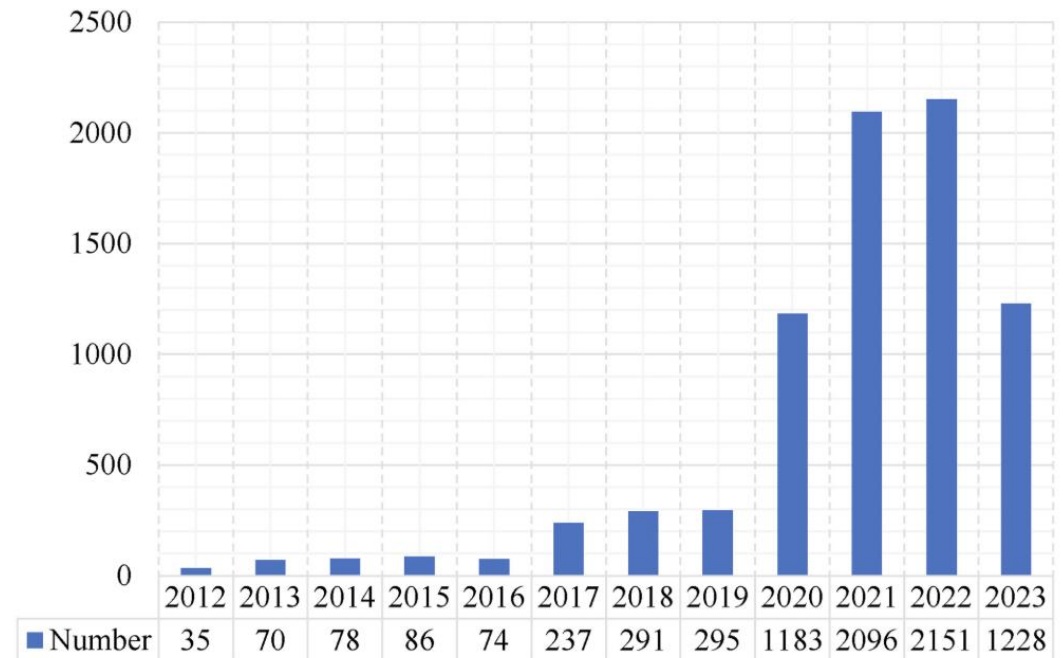


在紧急情况下通过LEO卫星获得实时语音服务，支持增强的态势感知、自动决策和其他快速响应。

得益于先进材料、复杂技术的发展和规模经济的效应，新的LEO卫星通信系统时代已经到来。

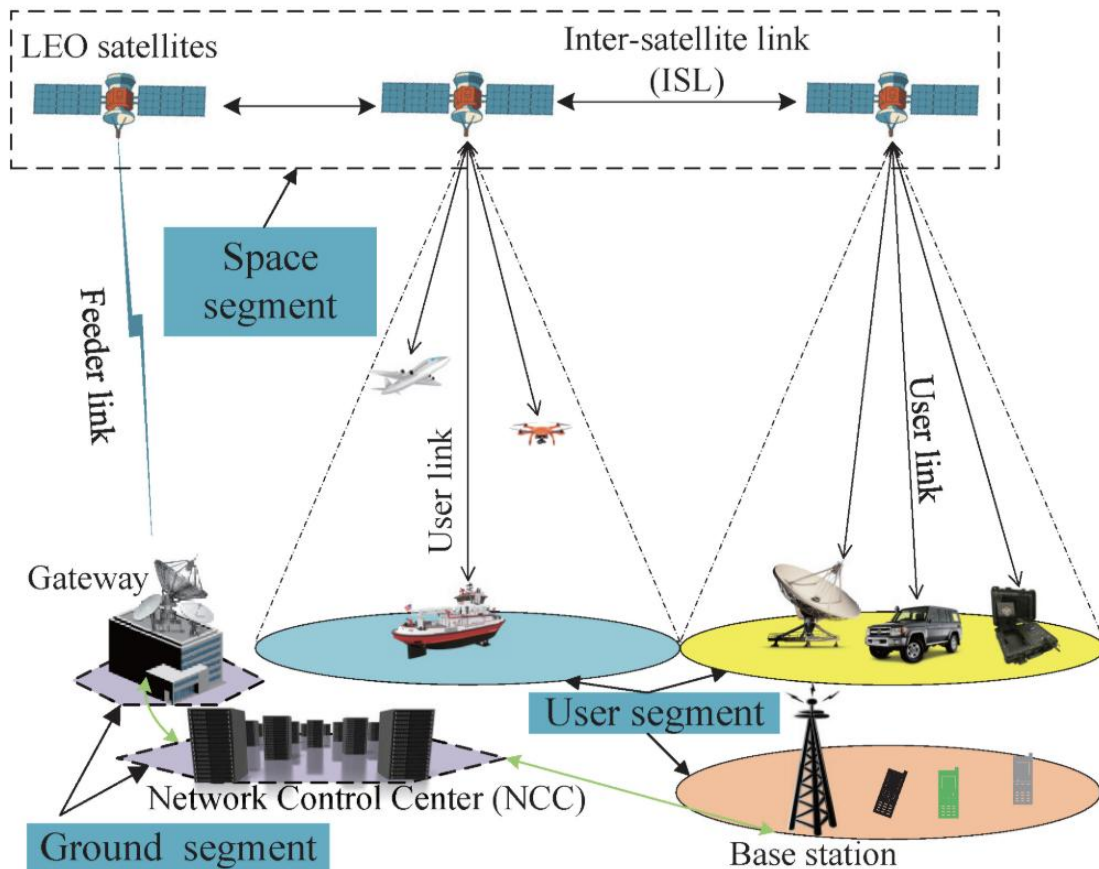


LEO卫星通信系统的概念在1990年代初开始萌芽，当时设计了如Iridium、Globalstar和Orbcomm等系统，旨在提供低延迟的语音和数据服务。



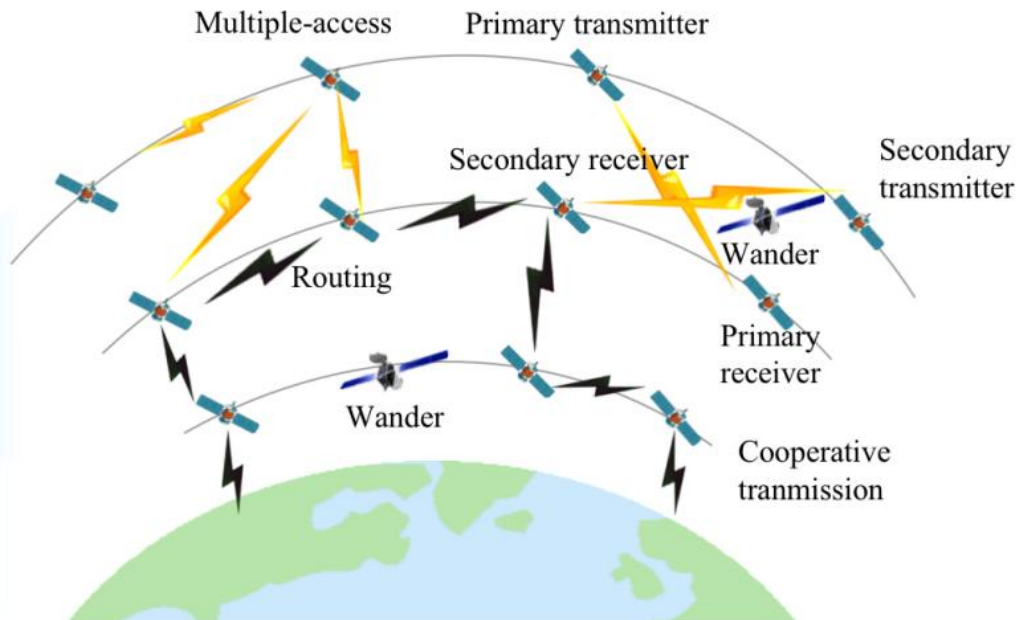
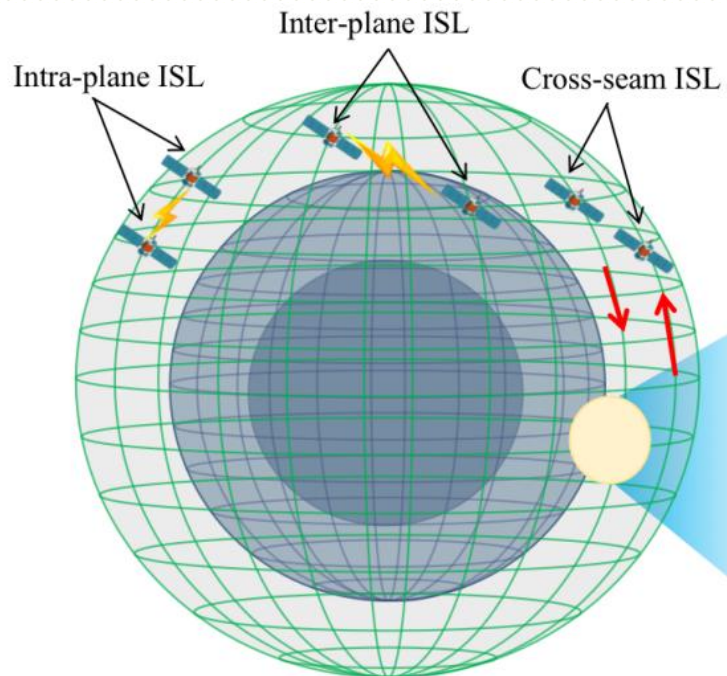
从2012年到2023年第二季度，已经成功发射了约7824颗LEO卫星。

低轨卫星星间通信指的是在LEO卫星之间建立直接通信链路，使得数据能够在卫星间传输。



- 提高数据传输效率：减少地面站中转；优化传输路径；减少信号延迟。
- 提供连续的全球覆盖：在全球范围内提供连续覆盖，包括地面站难以覆盖的偏远地区和海洋区域。
- 增强系统的可靠性和弹性：提高冗余度和容错性；动态路由调整。
- 支持高数据率和大容量通信：星间链路特别是激光通信链路；支持大规模物联网应用。
- 应对紧急情况 and 特殊应用：快速建立通信网络；实时传输来自偏远地区或危险环境的监控数据。

P. Yue, J. An, J. Zhang, J. Ye, G. Pan, S. Wang, P. Xiao, and L. Hanzo, "Low earth orbit satellite security and reliability: Issues, solutions, and the road ahead," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 25, no. 3, pp. 1604–1652, Thirdquarter 2023.



星间通信基本概念

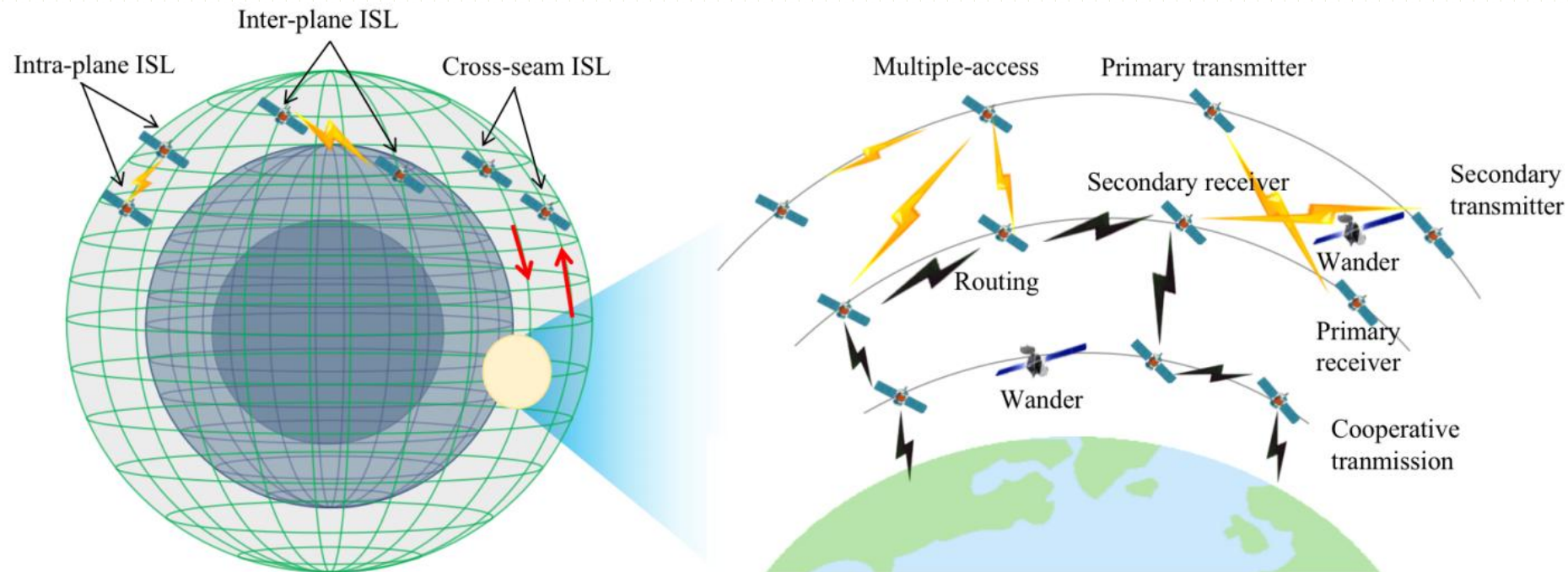
1) 信号层面:

- Ka和Ku 频段传输
- 太赫兹(THz)频段传输
- 可见光传输

2) 链路层面:

轨道内星间通信: 指同一轨道平面内的卫星保持一致、均匀的间距;

轨道间星间通信: 涉及不同轨道平面和高度的卫星; 反向轨道的卫星, 称为交叉平面链路。



卫星通信网

由众多卫星组成，是支持卫星星座内部和之间联系的强大通信网络。

- 1) **合作网络:** 对于远距离覆盖来说，多跳（依靠中间卫星来中继数据）是必不可少的
- 2) **多路接入网络:** 解决了在共享信道上同时传输多颗卫星的挑战

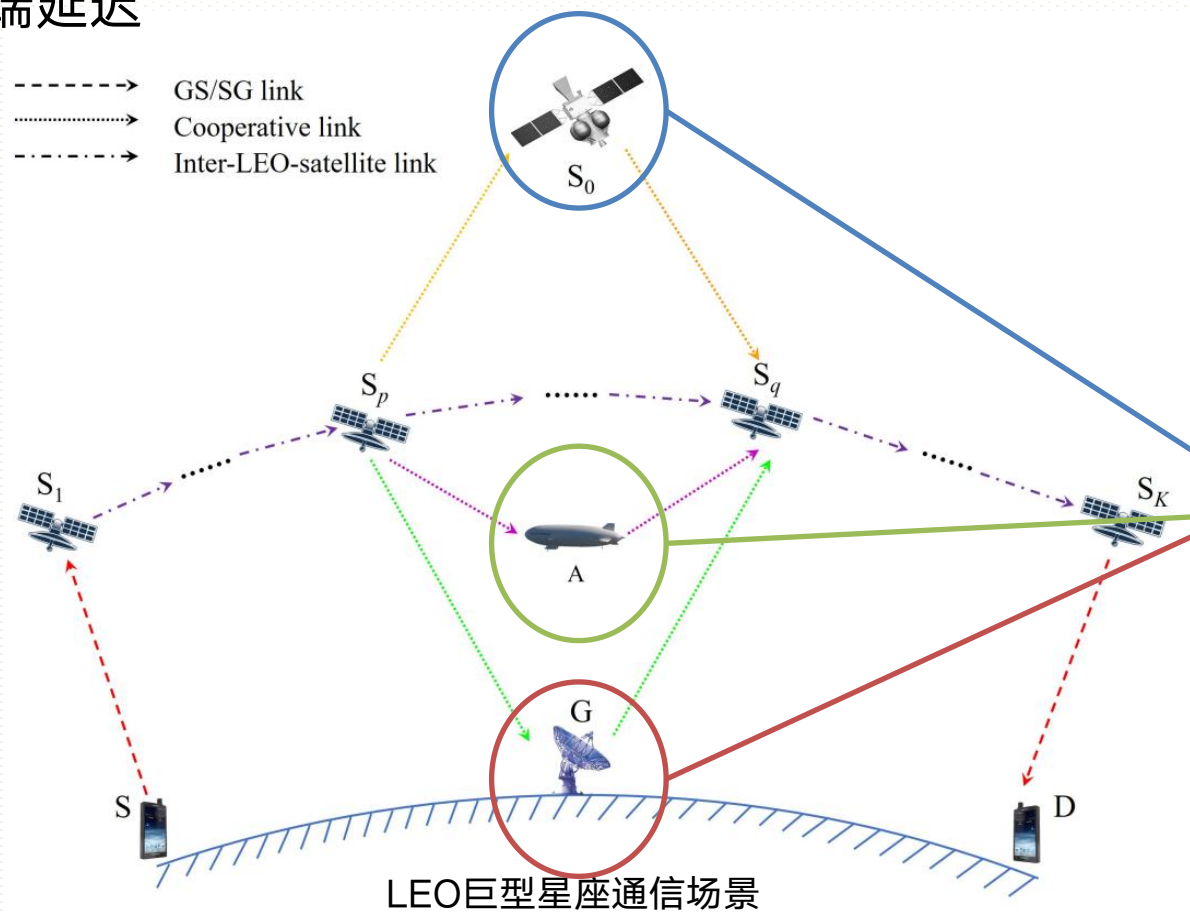


重庆大学
CHONGQING UNIVERSITY

02

低轨星座系统的延迟 与可靠性分析

LEO巨型星座系统面临着建立长距离连接的挑战，LEO卫星之间频繁地中继和转发信息，无法保证低端到端延迟



常用解决方式:

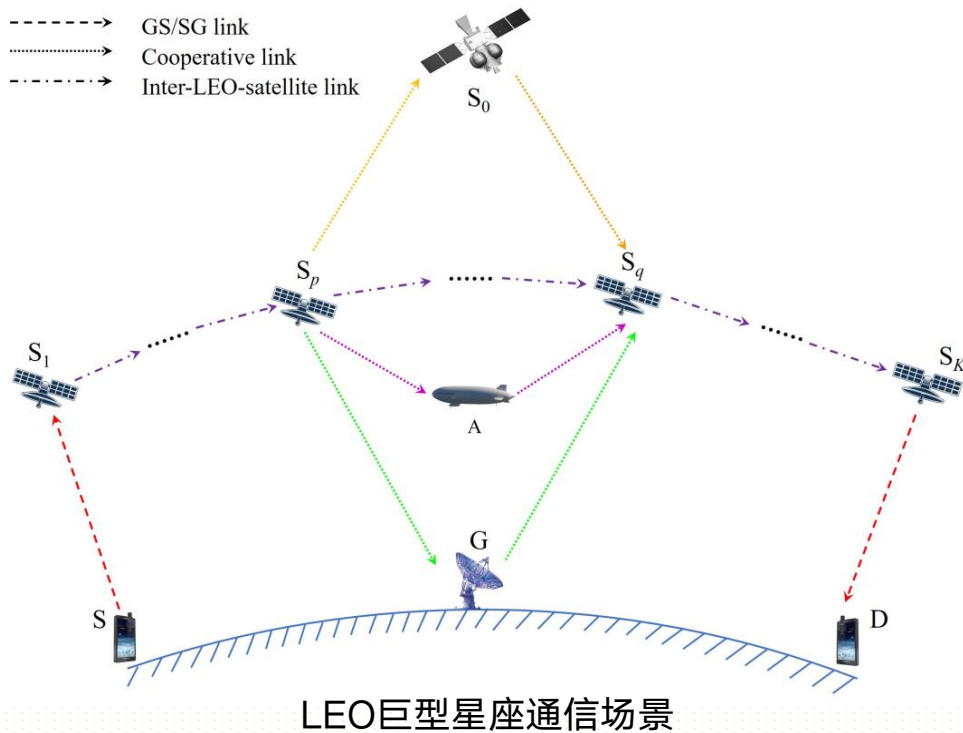
- 设计最佳路由方案
- 引入第三方中继:

1) 地面中继;

2) 空中中继;

3) 卫星中继

减少长距离传输的转发跳数



系统模型

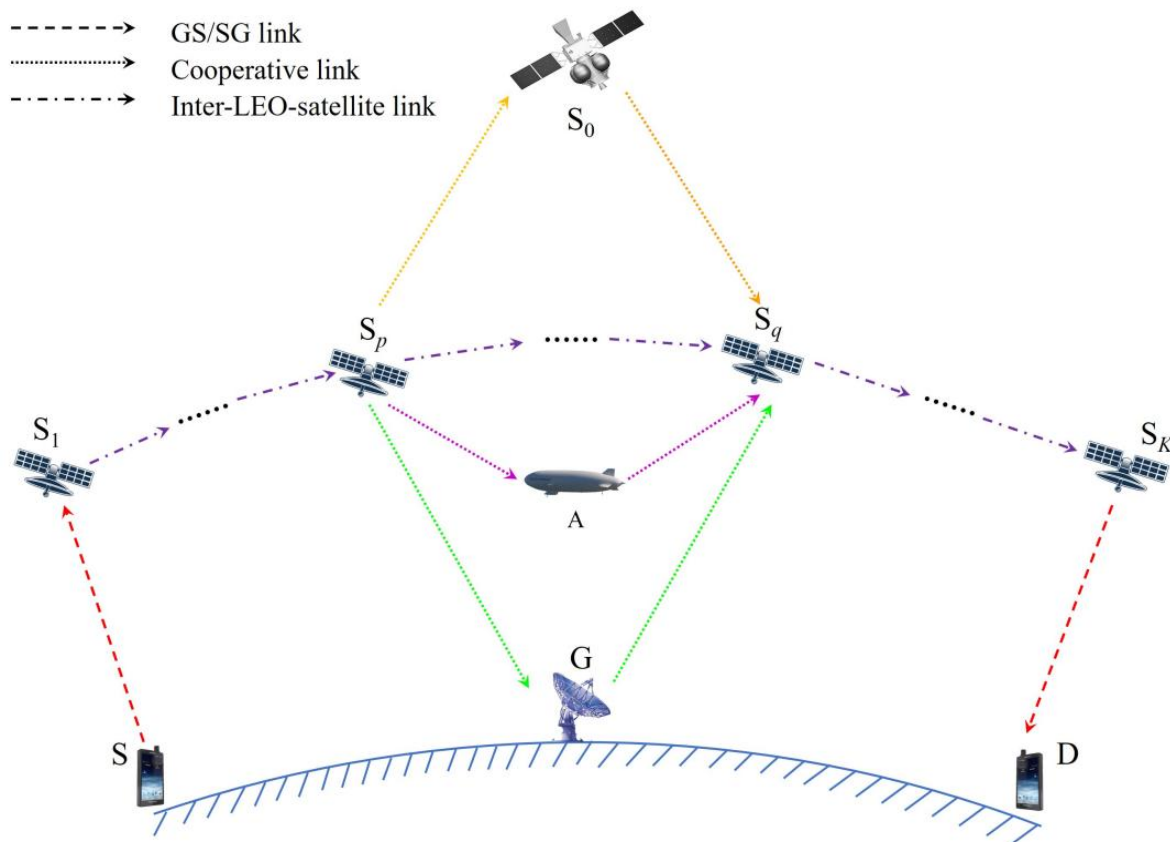
- 由一个S-D对、K ($K > 2$)颗LEO卫星($1 \leq p < q \leq K$)、一个地面中继(G)、一个空中中继(A)和一个比LEO卫星轨道更高的中继卫星(S_0)组成
- S-D通信方式:
 - 1) S和D可以通过星间LEO卫星链路进行通信
 - 2) 通过G、A或 S_0 的候选合作链路

节点 i 和 j 之间的链路上接收的信噪比为 $\gamma_{i,j} = \frac{P_i}{\sigma^2} \frac{|h_{i,j}|^2}{d_{i,j}^n} = \frac{\lambda_{i,j}}{d_{i,j}^n}$

其中 $i, j \in \mathbf{W} = \{S, D, G, A, S_k | 0 \leq k \leq K\}$, $\lambda_{i,j} = \frac{P_i |h_{i,j}|^2}{\sigma^2} = \bar{\lambda}_i |h_{i,j}|^2$

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家

表达式	含义
$ h_{i,j} ^2$	是由小尺度衰落引起的功率增益
$\bar{\lambda}_i$	节点 i 的发送信噪比
P_i	在 i 处的发射功率
σ^2	所有节点处AWGN的平均功率
$d_{i,j}$	i 和 j 之间链路上的距离
n	路径损耗因子 (图中都为 LoS 传播, 设 n 相等)



将采用端到端**时延和OP**来定量评价S和D之间端到端传输的时延和可靠质量，表达式为

$$\tau_{\text{int}}^{e2e} = \tau_{S,S_1} + \tau_{S_K,D} + \sum_{p \in \{1 \leq p < K\}} (\tau_{p,p+1} + \tau_p)$$

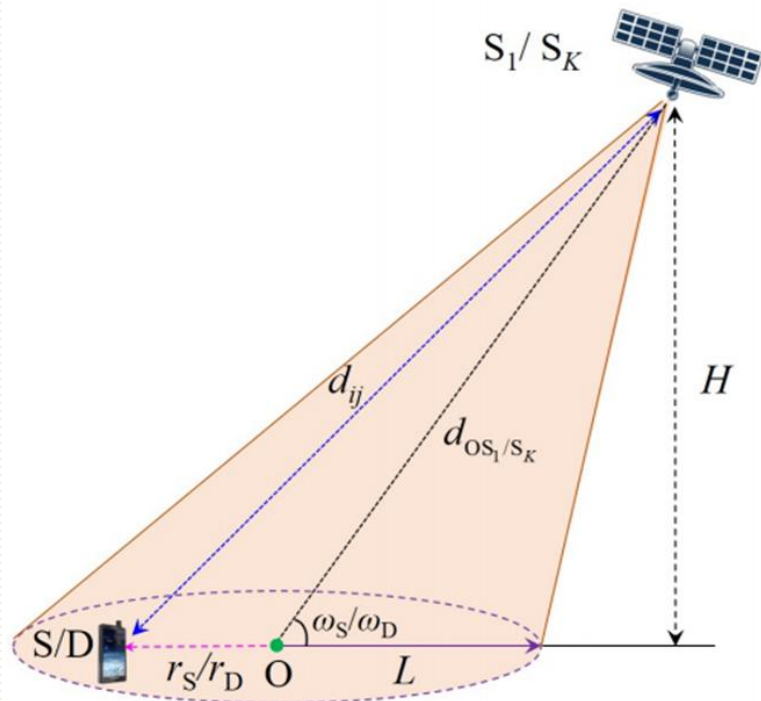
$$\tau_r^{e2e} = \tau_{S,S_1} + \tau_{S_K,D} + \sum_{k \in \{1 \leq k < p\} \cup \{q \leq k < K\}} (\tau_{k,k+1} + \epsilon_k) + \epsilon_r + \tau_{S_p,r} + \tau_{r,q}$$

$$P_{\text{out,int}}^{e2e} = 1 - (1 - P_{\text{out}}^{S,S_1}) (1 - P_{\text{out}}^{S_K,D}) \times \prod_{k \in \{1 \leq k < K\}} (1 - P_{\text{out}}^{k,k+1})$$

$$P_{\text{out},r}^{e2e} = 1 - (1 - P_{\text{out}}^{S,S_1}) (1 - P_{\text{out}}^{S_K,D}) (1 - P_{\text{out}}^{S_p,r}) \times (1 - P_{\text{out}}^{r,S_q})_{k \in \{1 \leq k < p\} \cup \{q \leq k < K\}} (1 - P_{\text{out}}^{k,k+1})$$

其中 $r \in \mathbf{R} = \{A, G, S_0\}$;

表达式	含义
$\tau_{i,j}$	节点i和j之间链路上的传输延迟
τ_i	表示节点i的转发延迟(如调制/解调、编码/解码等)
$P_{\text{out}}^{i,j}$	节点i和j之间的链路上的OP



星地传输模型示意图

模型条件

- 考虑**地面终端随机性**的前提下，建立低轨道卫星 S_1/S_K 与地面终端 S/D 的传输模型
- 地面终端 S/D 均匀分布在 S_1/S_K 覆盖范围
- 利用**shadowed-Rician模型**来描述星地间链路的统计分布

➤ 卫星到地面终端的距离为

$$d_{ij} = \sqrt{r_l^2 + \left(\frac{H}{\sin \omega_l}\right)^2 - 2r_l H \cot \omega_l}$$

其中 $(i, j, l) \in \{(S, S_1, S), (S_K, D, D)\}, H \leq \sqrt{H^2 + L^2}$

表达式 含义

L S_1/S_K 覆盖面积的半径

O 圆心

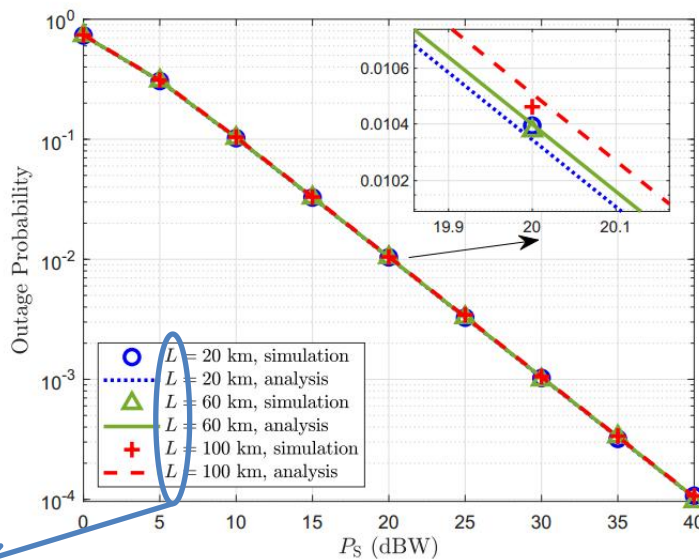
ω_S/ω_D OS_1/OS_K 与地平线之间的角度

i与j之间的**平均传输延迟**为 $\bar{\tau}_{ij} = \int_H^{\sqrt{H^2+L^2}} \frac{x}{c} \cdot f_{d_{ij}}(x) dx = \frac{2}{cL^2} \int_H^{\sqrt{H^2+L^2}} x^2 dx = \frac{2}{3cL^2} \left[(H^2 + L^2)^{\frac{3}{2}} - H^3 \right]$

i与j之间链路上的**OP**为 $P_{out}^{i,j} = \Pr\{\gamma_{ij} \leq \gamma_{th}\} = \Pr\left\{\frac{\lambda_{ij}}{d_{ij}^n} \leq \gamma_{th}\right\} = 1 - a \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\zeta(k)}{\bar{\lambda}_i^{k+1}} \sum_{p=0}^k \gamma_{th}^p \frac{k!}{p!} \left(\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i}\right)^{-(k+1-p)} \times d_{ij}^{np} \exp\left(-\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i} \gamma_{th} d_{ij}^n\right)$

2 系统模型——星地传输

时延和OP仿真结果:

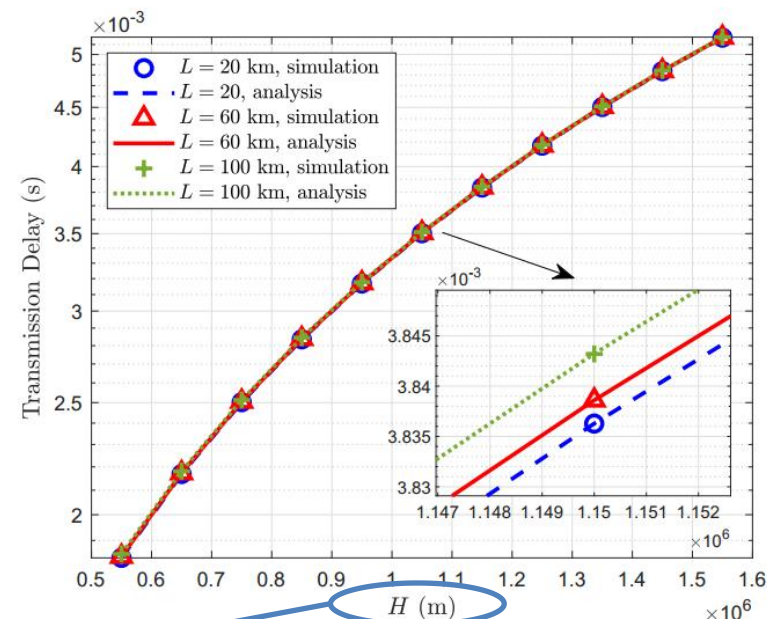


卫星覆盖范围

星对地传输链路的OP

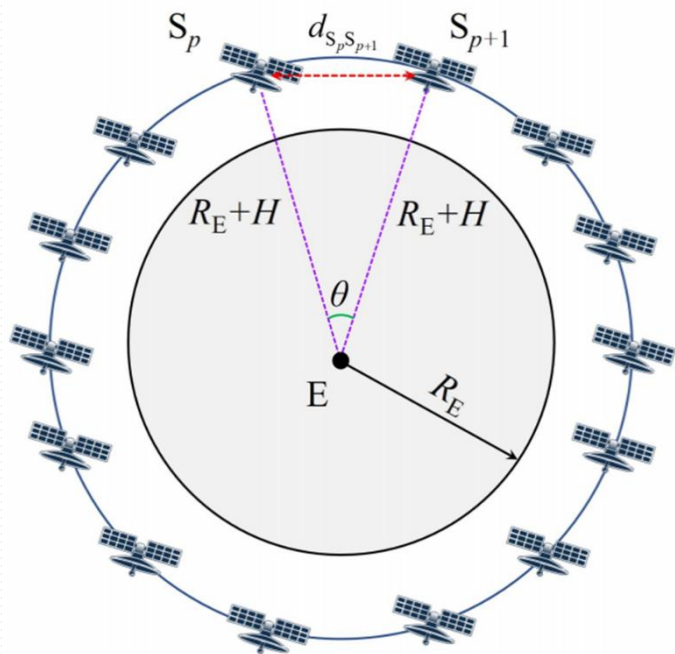
- 卫星覆盖区域半径 L 对传输延迟的存在一定影响。**卫星覆盖区域半径越大，传输延迟越大**；因为大 T 表示传输距离大，导致传输时间长
- 卫星高度 H 越大，**传输延迟越大**，距离越远

- **低 L 值小的OP优于 L 值大的OP**。这说明卫星覆盖面积大导致中断性能下降。因为大的 L 意味着卫星与地面终端之间的传输距离大，从而导致大的路径损耗
- L 对OP的影响非常小，因为卫星的轨道高度对路径损失起主要作用



卫星高度

星对地传输链路的传输延迟



低轨道卫星间传输示意图

模型条件

- 没有任何中继
- 任何相邻的两个LEO卫星，同一轨道平面上的下一个卫星和该轨道平面上的后一个卫星，始终保持在相同的位置。即在设计LEO卫星星座时，相邻的任意两颗LEO卫星之间的传输距离是固定的。
- 没有反射，阴影，衍射和散射产生多路径传播。因此，该自由空间无障碍信道仅包含传输距离的影响，该传输信道遵循**自由空间路径损耗模型**

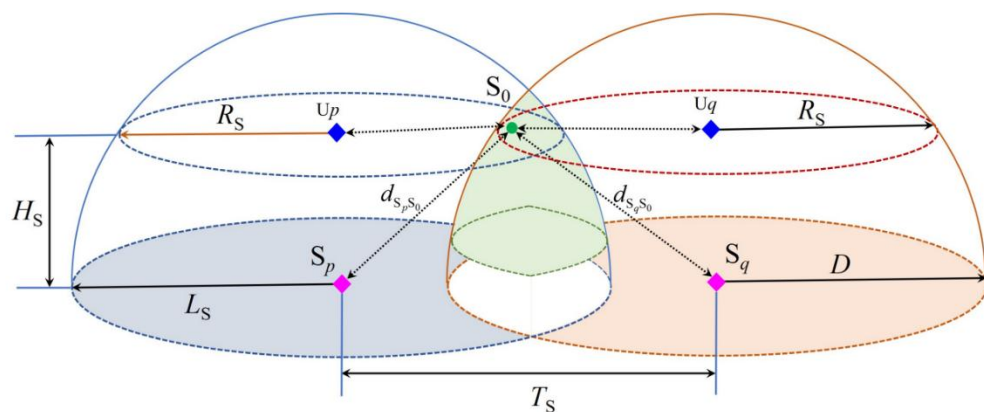
同一平面内相邻的两颗LEO卫星之间的距离为 $d_{S_p S_{p+1}} = 2(R_E + H) \sin \frac{\theta}{2} = 2(R_E + H) \sin \frac{\pi}{N}$, $1 \leq p \leq N$

从 S_1 到 S_K 的LEO卫星间传输的端到端**OP**可表示为

$$P_{\text{int,LEO}}^{e2e} = 1 - \prod_{k \in \{1 \leq k < K\}} (1 - P_{\text{out}}^{k,k+1}) = 1 - \prod_{k \in \{1 \leq k < K\}} \left(1 - \Pr \left\{ \frac{P_k}{\sigma^2} \frac{1}{d_{S_k S_{k+1}}^n} \leq \gamma_{\text{th}} \right\} \right) = 1 - \left(1 - \Pr \left\{ \frac{P_{\text{LEO}}}{\sigma^2} \kappa \sin^{-n} \frac{\theta}{2} \leq \gamma_{\text{th}} \right\} \right)^{K-1}$$

其中设所有LEO卫星具有相同的发射功率 P_{LEO} ，且 $\kappa = \frac{1}{2^n (K-1)^n (R_E + H)^n}$ ；

表达式	含义
H	LEO卫星离地面的高度
RE	地球的半径
θ	地球中心与相邻的任意两颗LEO卫星连接的线路的夹角
N	每个轨道平面的LEO卫星数



卫星中继辅助传输分布示意图

模型条件

- 卫星作为中继
- 只有位于LEO卫星 S_p 与 S_q 覆盖空间交点处的才能作为中继卫星
- S_0 均匀分布在两个以 U_p 和 U_q 为中心，半径为 R_s 的圆的交点区域（绿色）
- 设 S_0 轨道高度比LEO卫星大得多
- 分别考虑RF和FSO通信技术

可得

$$T_s = 2(R_E + H) \sin \frac{(q-p)\theta}{2} = 2(R_E + H) \sin \frac{(q-p)\pi}{2N}, H_{s_{\max}} = \sqrt{L_s^2 - \left(\frac{T_s}{2}\right)^2}$$

S_0 与 S_p/S_q 之间距离的PDF为

$$f_{d_{S_p/S_q S_0}}(x) = \frac{2x}{S_{\text{in},S}} \cdot \arccos \frac{T_s^2 - R_s^2 - H_s^2 + x^2}{2T_s \sqrt{x^2 - H_s^2}} = \frac{2x}{S_{\text{in},S}} \cdot \arccos \frac{T_s^2 - L_s^2 + x^2}{2T_s \sqrt{x^2 - H_s^2}}$$

其中 $d_{S_p S_0} = \sqrt{H_s^2 + d_{S_p S_0}^2}, d_{S_q S_0} = \sqrt{H_s^2 + d_{S_q S_0}^2},$

$$S_{\text{in},S} = 2R_s^2 \cos^{-1} \left(\frac{T_s}{2R_s} \right) - \frac{T_s}{2} \sqrt{4R_s^2 - T_s^2}, \sqrt{H_s^2 + (T_s - L_s)^2} = M_{\min} \leq x \leq M_{\max} = L_s$$

表达式

含义

L_s

S_0 分布空间下侧与LEO卫星 S_p 和 S_q 覆盖空间交点之间的平面半径

$H_{s, \min}$

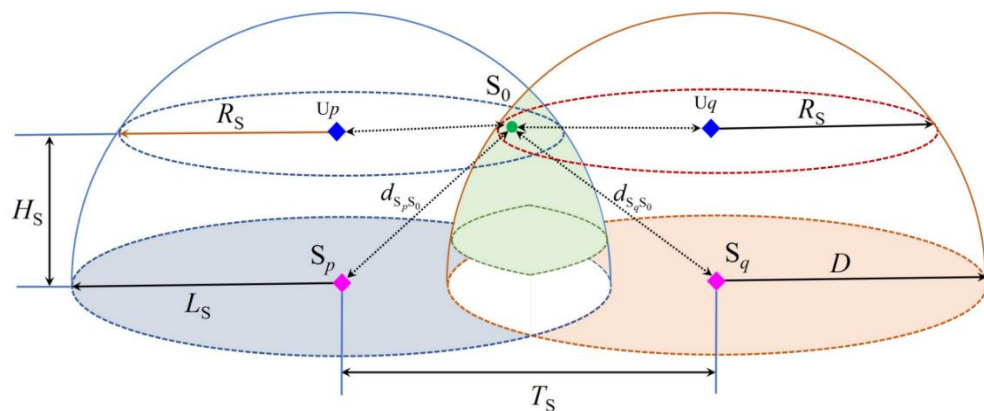
S_0 的分布空间底部到由 S_p 和 S_q 组成的两个圆的平面的距离

H_s

S_p 到 U_p 的距离，或 S_q 到 U_q 的距离

T_s

S_p 到 S_q 的距离，或 U_p 到 U_q 的距离



卫星中继辅助传输分布示意图

由前可积分推出 $f_{d_{S_p/qS_0}}(x)$ 的CDF:

$$F_{d_{S_p/qS_0}}(x) \approx \frac{x - M_{\min}}{S_{\text{in},S}} \sum_{i=1}^{Q_{S1}} \delta_{Si} \sqrt{1 - \tau_{Si}^2} (c_1 \tau_{Si} + c_2) \times \arccos \frac{T_S^2 - L_S^2 + (c_1 \tau_{Si} + c_2)^2}{2T_S \sqrt{(c_1 \tau_{Si} + c_2)^2 - H_S^2}}$$

其中 $c_1 = \frac{x - M_{\min}}{2}, c_2 = \frac{x + M_{\min}}{2}, \delta_{Si} = \frac{\pi}{Q_{S1}}, \tau_{Si} = \cos\left(\frac{2i-1}{2Q_{S1}}\pi\right)$;

平均传输时延:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{ij} &= \frac{2}{cS_{\text{in},S}} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} x^2 \arccos \frac{T_S^2 - L_S^2 + x^2}{2T_S \sqrt{x^2 - H_S^2}} dx = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{cS_{\text{in},S}} \int_{-1}^1 (a_9 t + a_{10})^2 \times \arccos \frac{T_S^2 - L_S^2 + (a_9 t + a_{10})^2}{2T_S \sqrt{(a_9 t + a_{10})^2 - H_S^2}} dt \\ &\approx A_{SR1} \sum_{i=1}^{P_{S1}} w_{Si} \sqrt{1 - \varepsilon_{Si}^2} (a_9 \varepsilon_{Si} + a_{10})^2 \times \arccos \frac{T_S^2 - L_S^2 + (a_9 \varepsilon_{Si} + a_{10})^2}{2T_S \sqrt{(a_9 \varepsilon_{Si} + a_{10})^2 - H_S^2}} \end{aligned}$$

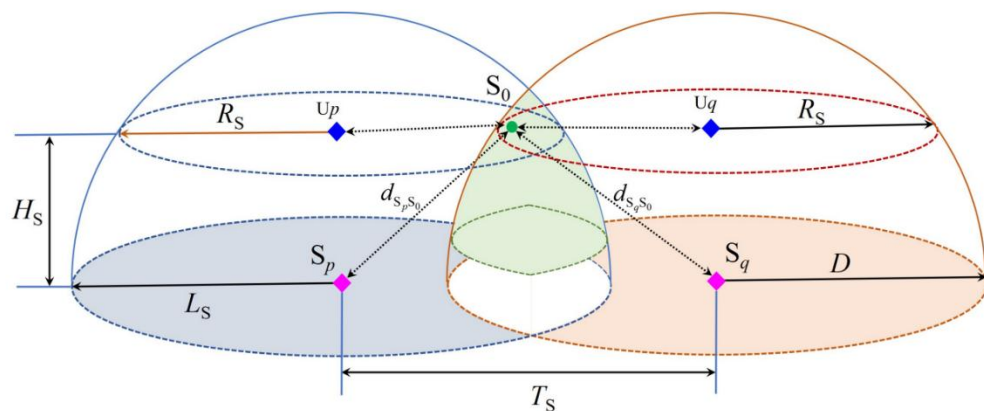
其中 $A_{SR1} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{cS_{\text{in},S}}, a_9 = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2},$

$$a_{10} = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}, w_{Si} = \frac{\pi}{P_{S1}}, \varepsilon_{Si} = \cos\left(\frac{2i-1}{2P_{S1}}\pi\right)$$

用切比舍夫-高斯正交法处理HS的随机性得到的平均传输延迟的近似解析表达式会过于复杂



利用**仿真**研究H_S的随机性对平均传输延迟的影响



卫星中继辅助传输分布示意图

星间中继链路接收信噪比为

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \frac{\bar{\lambda}_i G_{FSO}}{d_{ij}^4}, & \text{当采用 FSO 技术} \\ \frac{\bar{\lambda}_i}{d_{ij}^2}, & \text{当采用 RF 技术} \end{cases}, (i, j) \in \{(S_p, S_0), (S_0, S_q)\}$$

注：LoS下的RF传输，路径损耗因子设为2

RF链路的OP：

这种情况下的OP可以推导为

$$P_{out}^{i,j} = \Pr\{\gamma_{ij} \leq \gamma_{th}\} = \Pr\left\{\frac{\bar{\lambda}_i}{d_{ij}^2} \leq \gamma_{th}\right\} = 1 - F_{d_{S_p/q S_0}}\left(\sqrt{\frac{\bar{\lambda}_i}{\gamma_{th}}}\right)$$

模型条件

- 分别考虑**RF和FSO通信技术**
- RF没有多径传输，没有反射、衍射、散射，实现自由空间传输
- FSO由于其固有的高带宽、高数据速率、体积小等优点

FSO链路的OP：

发射机到接收机在FSO信道上的端到端信号功率增益 G_{FSO} 写为

$$G_{FSO} = \eta_T^2 \eta_R^2 G_T^2 G_R^2 L_T^2 L_R^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^4$$

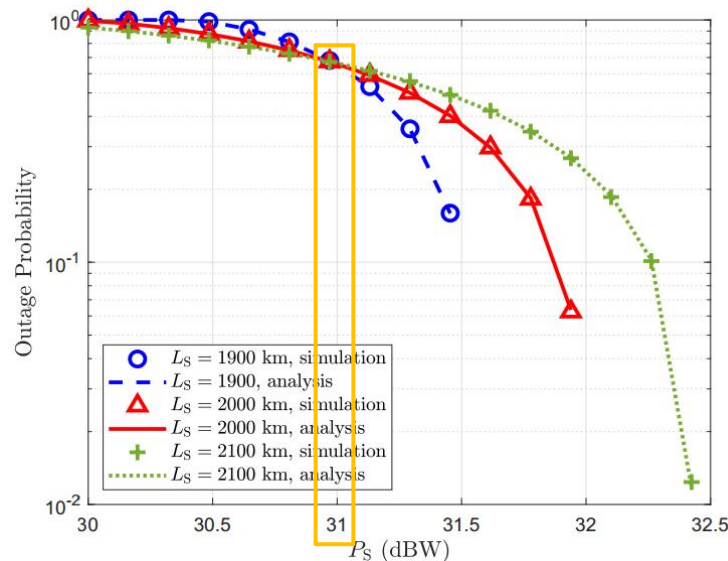
因此，这种情况下的OP可以推导为

$$P_{out}^{i,j} = \Pr\left\{\frac{\bar{\lambda}_i G_{FSO}}{d_{ij}^4} \leq \gamma_{th}\right\} = 1 - F_{d_{S_p/q S_0}}(\Lambda)$$

$$\approx 1 - \frac{\Lambda - M_{\min}}{S_{in,S}} \sum_{i=1}^{Q_{S1}} \delta_{Si} \sqrt{1 - \tau_{Si}^2} (c_3 \tau_{Si} + c_4) \times \arccos \frac{T_S^2 - L_S^2 + (c_3 \tau_{Si} + c_4)^2}{2T_S \sqrt{(c_3 \tau_{Si} + c_4)^2 - H_S^2}}$$

其中 $\Lambda = \left(\frac{\bar{\lambda}_i G_{FSO}}{\gamma_{th}}\right)^{\frac{1}{4}}$, $c_3 = \frac{\Lambda - M_{\min}}{2}$, $c_4 = \frac{\Lambda + M_{\min}}{2}$;

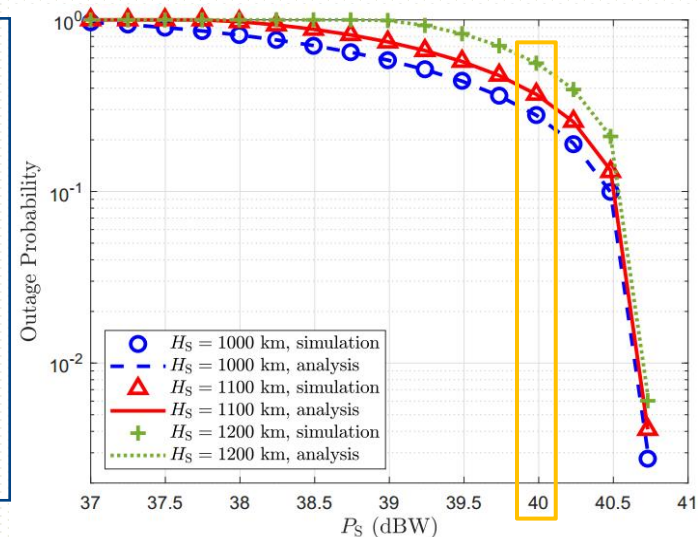
2 系统模型——卫星中继辅助传输



卫星中继RF链路的OP

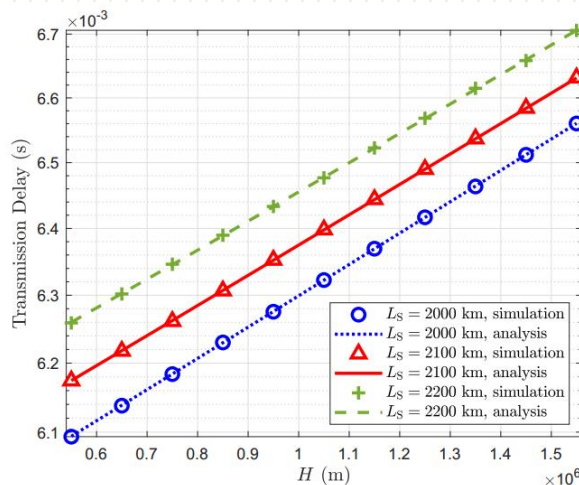
仿真结果

- 在左图中, L_s 对影响为负, 而 P_s 小于一定值时, 则可以得到相反的观测结果
- 在右图中, H_s 对OP影响为负, 当 P_s 大于一定值时, 这种影响变小



卫星中继FSO链路的OP

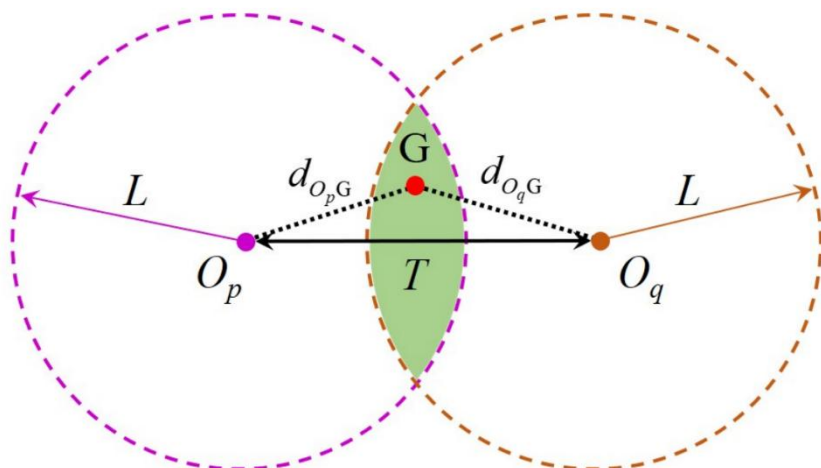
VS



卫星中继链路上传输延迟

仿真结果

- 卫星中继链路上传输时延如左图所示
- L_s 大时的传输延迟比 L_s 小时的传输延迟更差, 因为 L_s 大导致传输距离大



地面中继辅助传输示意图

模型条件

- 加入G作为中继
- 只有当G位于 S_p 和 S_q 覆盖区域的交叉点时，G才能辅助 S_p 和 S_q 之间的传输，A均匀分布在绿色空间中
- 如果 S_p 和 S_q 存在地面中继， S_p 和 S_q 的覆盖面积相交的面积不应为0，即 $L < T \leq 2L$

采用切比雪夫-高斯正交，**平均传输延迟**为

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{ij} &= \frac{2}{cS_{in}} \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} x^2 \arccos \frac{T^2 - L^2 - H^2 + x^2}{2T\sqrt{x^2 - H^2}} dx \\ &= \frac{2}{cS_{in}} \cdot \frac{Z_{max} - Z_{min}}{2} \int_{-1}^1 (a_1 t + a_2)^2 \times \arccos \frac{T^2 - L^2 - H^2 + (a_1 t + a_2)^2}{2T\sqrt{(a_1 t + a_2)^2 - H^2}} dt \\ &\approx A_{TR} \sum_{i=1}^{P_G} w_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2} (a_1 \varepsilon_i + a_2)^2 \times \arccos \frac{T^2 - L^2 - H^2 + (a_1 \varepsilon_i + a_2)^2}{2T\sqrt{(a_1 \varepsilon_i + a_2)^2 - H^2}}\end{aligned}$$

➤ G与 O_p/O_q 之间的距离的PDF为

$$f_{d_{O_p/O_q}}(x) = \frac{2x}{S_{in}} \cdot \arccos \frac{T^2 - L^2 + x^2}{2Tx}$$

$$T - L \leq x \leq L$$

$$S_{in} = 2L^2 \cos^{-1}\left(\frac{T}{2L}\right) - \frac{T}{2} \sqrt{4L^2 - T^2} \quad \text{为两个圆的相交面积}$$

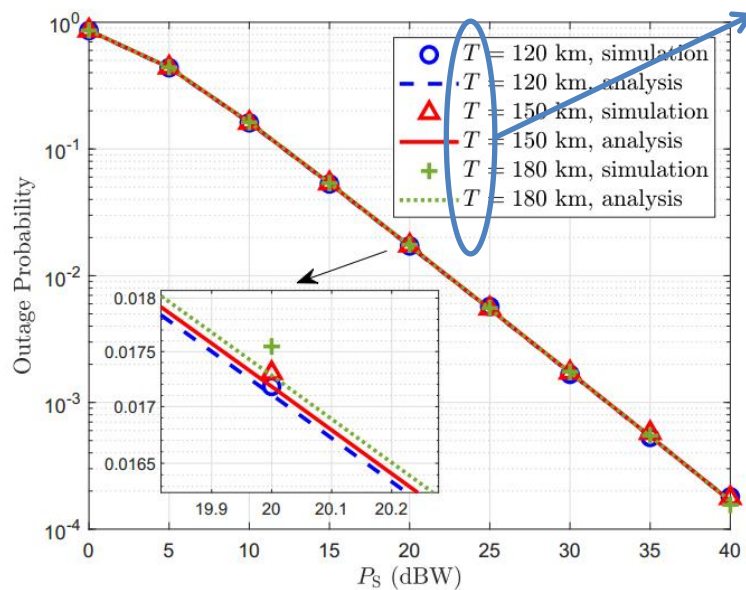
表达式 含义

L	卫星覆盖面积下圆的半径
T	O_p 和 O_q 之间的距离

i与j之间链路上的准确OP为 $P_{out}^{i,j} = 1 - \frac{\alpha}{S_{in}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\zeta(k)}{\bar{\lambda}_i^{k+1}} \sum_{p=0}^k \gamma_{th}^p \frac{k!}{p!} \left(\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i} \right)^{-(k+1-p)} \cdot \int_{Y_{min}}^{Y_{max}} y^p \exp\left(-\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i} \gamma_{th} y\right) \arccos \frac{T^2 - L^2 - H^2 + y}{2T\sqrt{y - H^2}} dy$

2 系统模型——地面中继辅助传输

时延和OP仿真结果:

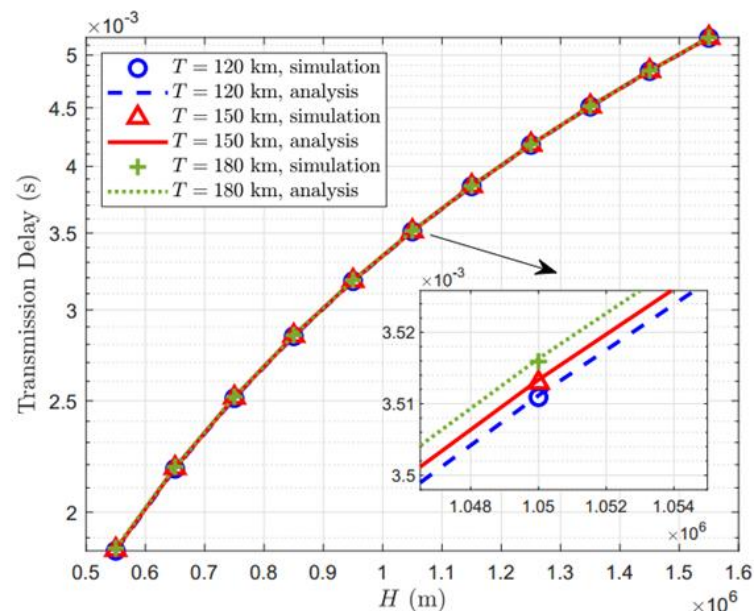


地面中继链路的OP

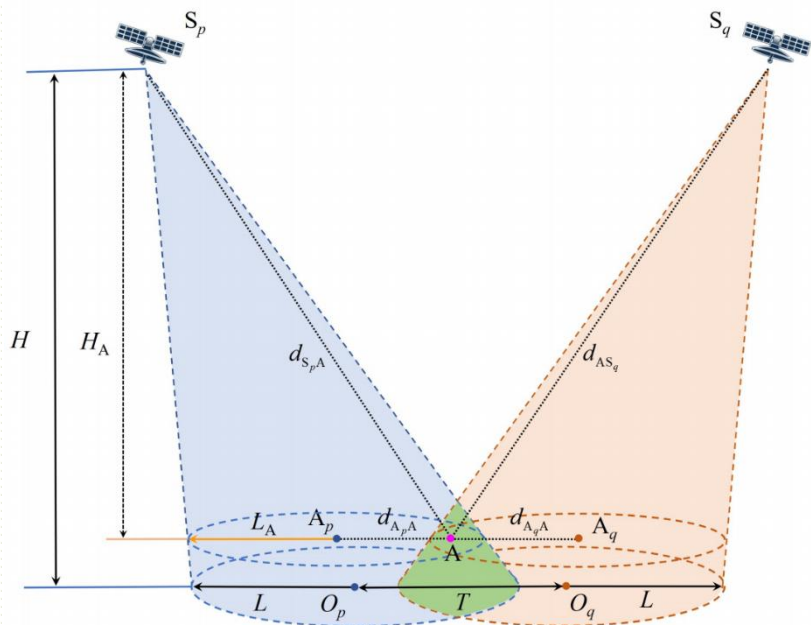
- 卫星覆盖区域中心之间的距离 T 对传输延迟的存在一定影响。卫星覆盖区域中心之间的距离越大，链路传输距离大的概率增加，传输延迟越大；
- 卫星高度 H 越大，传输延迟越大，距离越远

卫星覆盖区域中心之间的距离

- 低 T 值小的OP优于 T 值大的OP。这说明卫星覆盖区域中心之间的距离大导致中断性能下降。因为大的 T 意味着卫星与地面终端之间的传输距离大，从而导致大的路径损耗。
- T 对OP的影响非常小，因为卫星的轨道高度对路径损失起主要作用



地面中继链路的传输延迟



空中中继辅助传输示意图

模型条件

- 考虑空中中继
- 只有位于LEO卫星 S_p 与 S_q 覆盖空间相交空间（绿色区域）的空中中继才可以代替LEO卫星 S_p 与 S_q 之间的星间传输
- A均匀分布在绿色空间中
- 考虑了SR衰落来模拟 i 和 j 之间的信道增益

➤ A_p 和 A_q 之间的距离 T_A 为

$$T_A = T + (H - H_A)(\cot \omega_{Op} + \cot \omega_{Oq})$$

采用切比雪夫-高斯正交，**平均传输延迟**为

$$\bar{r}_{ij} = \frac{2}{cS_{in,A}} \int_{W_{min}}^{W_{max}} x^2 \arccos \frac{T_A^2 - L_A^2 - H_A^2 + x^2}{2T_A \sqrt{x^2 - H_A^2}} dx = A_{AR1} \sum_{i=1}^{P_{A1}} w_A \sqrt{1 - \varepsilon_A^2} (a_5 \varepsilon_{Ai} + a_6)^2 \times \arccos \frac{T_A^2 - L_A^2 - H_A^2 + (a_5 \varepsilon_{Ai} + a_6)^2}{2T_A \sqrt{(a_5 \varepsilon_{Ai} + a_6)^2 - H_A^2}}$$

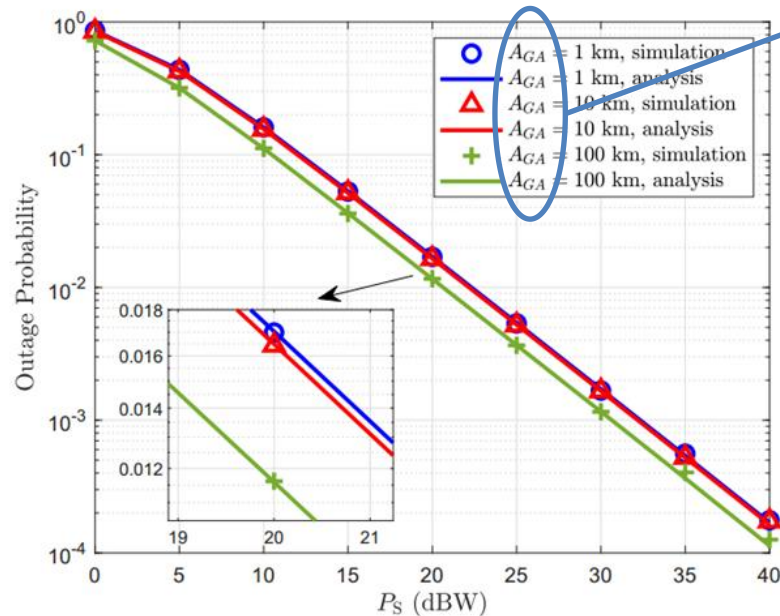
其中 $A_{AR1} = \frac{W_{max} - W_{min}}{cS_{in,A}}$, $a_5 = \frac{W_{max} - W_{min}}{2}$, $a_6 = \frac{W_{max} + W_{min}}{2}$, $w_A = \frac{\pi}{P_{A1}}$, $\varepsilon_A = \cos \left(\frac{2i-1}{2P_{A1}} \pi \right)$

表达式	含义
L	卫星覆盖面积下圆的半径
T_A	A_p 和 A_q 之间的距离
w_{Op}	S_p Op线与地平线的夹角
w_{Oq}	S_q Oq线与地平线的夹角

i与j之间链路上的**OP**为 $P_{out}^{i,j} = 1 - \frac{\alpha}{S_{in,A}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\zeta(k)}{\bar{\lambda}_i^{k+1}} \sum_{p=0}^k \gamma_{th}^p \frac{k!}{p!} \left(\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i} \right)^{-(k+1-p)} \int_{T_{min}}^{T_{max}} y^p \exp \left(-\frac{\beta - \delta}{\bar{\lambda}_i} \gamma_{th} y \right) \arccos \frac{T_A^2 - L_A^2 - H_A^2 + y}{2T_A \sqrt{y - H_A^2}} dy$

2 系统模型——空中中继辅助传输

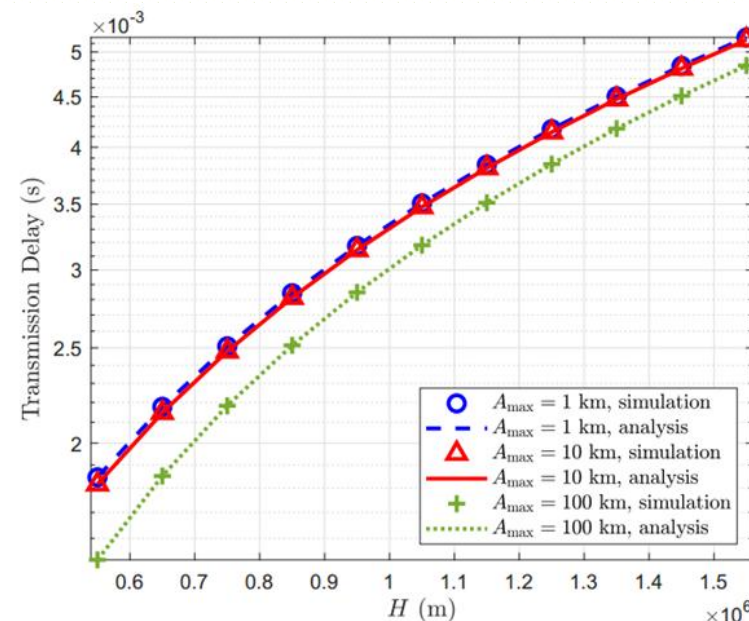
时延和OP仿真结果:



空中中继链路的OP

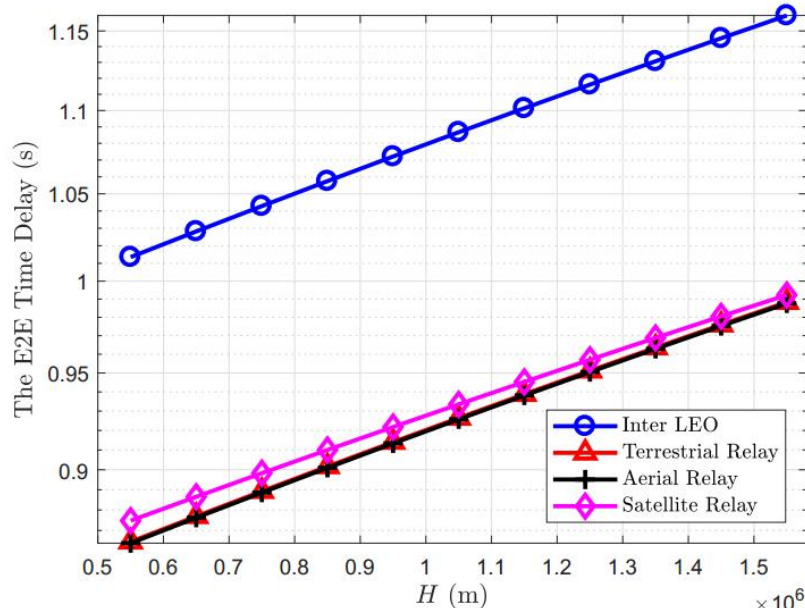
- **Amax的增大对OP产生正面影响**。这说明Amax越大意味着空中中继链路的传输距离越短;
- Amax对OP的影响非常小, 其他系统参数对路径损失起主要作用。

- 空中中继最大飞行高度Amax对传输延迟的存在一定影响。**空中中继最大飞行高度越大, 传输延迟越小**; 因为大Amax表示传输距离小, 导致传输时间短。
- 卫星高度H越大, **传输延迟越大**, 距离越远。



2 系统模型——多种方式性能对比

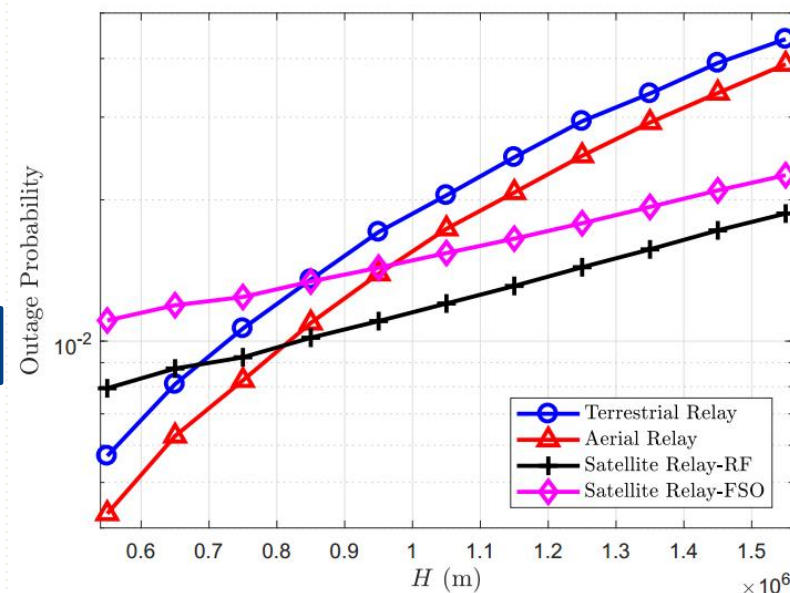
仿真结果



端对端延迟与H的关系

- 低地球轨道(LEO)卫星频繁进行转发→**星间链路的端到端时延是最大的**
- 中继可以节省转发延迟但会增加传输距离，**卫星中继在同类中距离最远，时延最长**

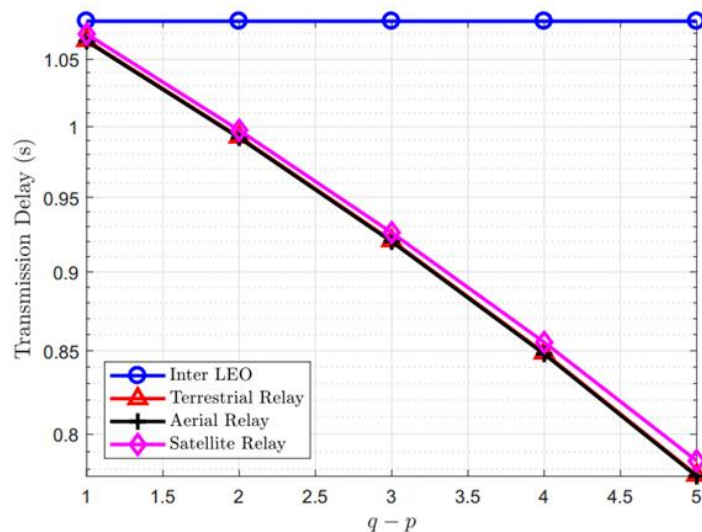
- 在 $H < 800$ km时，空中中继链路的OP优于其他三种链路
- 当 $H > 800$ km时，卫星中继链路的OP表现出最差的端到端中断性能。
- **当H增大，四个链路的端到端延迟和OP降低，因为路径损耗增加**



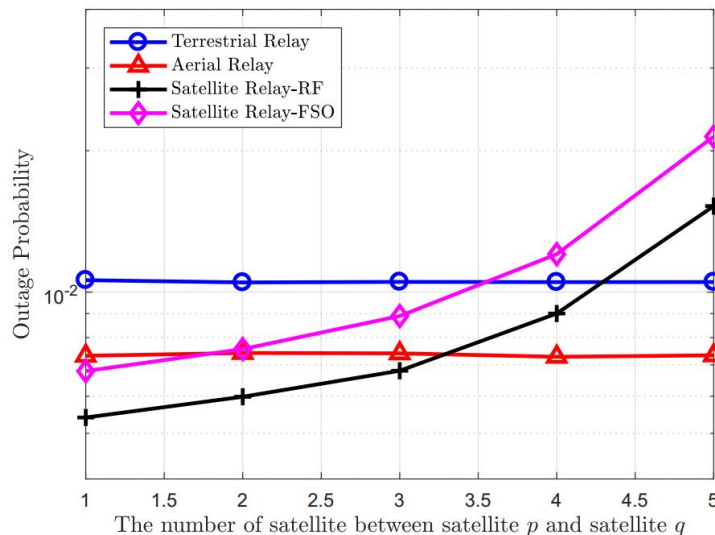
端对端的OP与H的关系

2 系统模型——多种方式性能对比

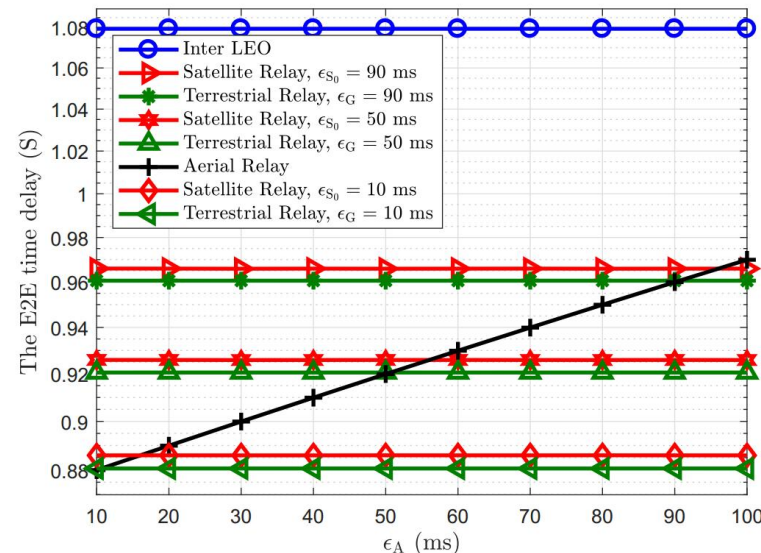
仿真结果



端对端延迟与q-p的关系



端对端的OP与q-p的关系



端对端延迟与转发延迟的关系

- q-p表示可以通过引入中继链路来减少的卫星间跳数
- q-p对地面、空中和卫星中继链路的端到端时延产生了很大影响
- q-p对地面和空中中继链路的端到端优化性能影响较小，但对卫星中继链路的影响较大
- 随着q-p的增加，卫星中继链路的传输距离增加幅度远大于地面和空中中继链路的增加幅度

- 不同情况下LEO卫星间链路和考虑的中继链路的端到端时间延迟
- 转发延迟对端到端时延有**较强的负向影响**，且最优中继链路的端到端时延很大程度上取决于转发时延

- 本研究注重LEO巨型星座系统中的链路**中断和传输延迟**性能，包括LEO卫星与地面终端、地面中继、空中中继和卫星中继之间的链路。考虑了地面终端以及各中继位置的**随机性**，并验证了提出的分析模型。

采用经典的无线通信系统分析方法
“忽略了时间线”

未来

结合信息比特/分组的传输顺序，
采用**上层分析方法**研究传输过程

关键
结论

覆盖区域大小

对中断和传输延迟性能有轻微的**负面影响**

覆盖区域交集大小

对中断和传输延迟性能也有轻微的**负面影响**

轨道高度

对地面和空中中继链路的中断和传输延迟性能有**负面影响**，
对空中中继的中断和传输延迟性能有**积极影响**，因为传输距离缩短了

端到端时间延迟

引入地面、空中和卫星中继可以**显著减少**每个LEO卫星的转发延迟，
从而改善端到端时间延迟

中继链路的选择

取决于具体系统

不同链路都有局限性和独特优点，在实际的LEO巨型星座系统中，选择何种中继链路以及如何部署**取决于实际的应用场景和需求**



重慶大學
CHONGQING UNIVERSITY

03

隐蔽性视角下的星 际传输安全保护

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家

与传统地面网络相比，ISL网络在移动性、传播性和硬件方面特点如表所示

特征	地面网络	卫星间链路（ISL）网络
终端的移动性	• 静态 • 随机移动 • 不同的移动速度	• 始终移动 • 周期性 • 固定移动速度
传播路径	• 较低频率 • 充满散射 • 大多数以非视距为主 • 有些发生在室内	• 更高的频率 • 损耗占主导地位 • 视距为主 • 完全开放的空间
硬件的限制	• 足够的计算能力 • 更容易接入强大的数据处理中心 • 一般有固定和稳定电源供应	• 有限的计算能力 • 有限的电池和不稳定的电源

激光星间通信系统的安全挑战

易于跟踪

卫星的轨道轨迹固定

卫星的运动是周期性和可预测的

01

02

开放可获取

无线和开放的传播环境

在自由空间中缺乏散射现象且使用更高的频段，使得信号
经历视距(LoS)主导的传输，具有更高的指向性

信号处理能力不足

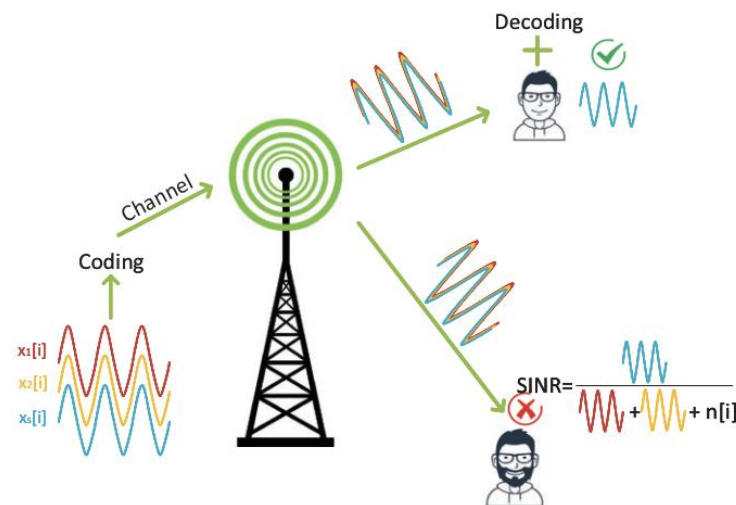
卫星作为机载设备

电池容量和机载处理能力受尺寸、重量限制

03

空间域内的传统安全方法(如PLS和上层加密) 由于卫星的可预测轨迹, ISL的开放等原因, 保护效果被大大削弱

➤ 需要**创新的安全解决方案**, 以超越现有方法的缺点, 提供有效保护



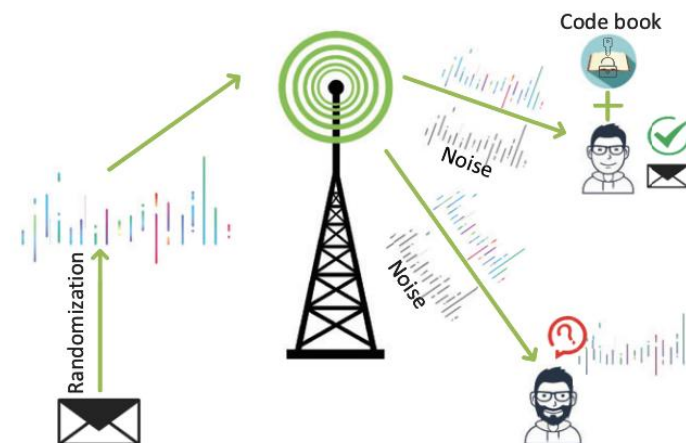
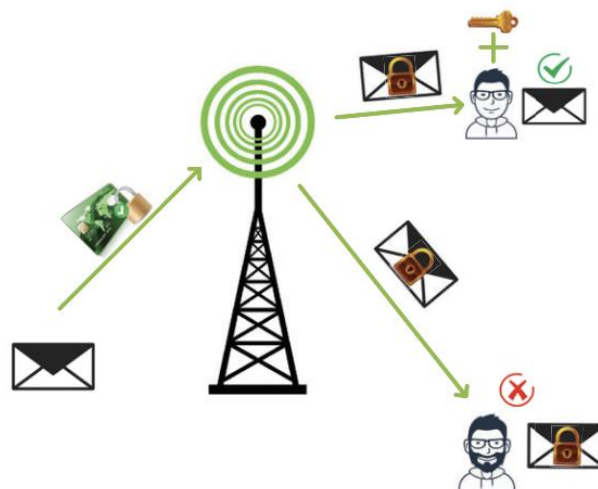
● 加密技术

- 原理: 使用密钥将信息转化为密文, 只有持有密钥的合法用户可以解密。
- 优势: 信息保护可靠, 只要密钥不被破解。
- 应用场景: 大多数数字通信, 如互联网传输、电子邮件等

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家

● 物理层安全

- 原理: 利用信道特性和信号处理技术, 通过最小化窃听者的信噪比 (SINR) 来实现通信安全。
- 优势: 利用信道本身的特性, 无需依赖密钥管理。
- 应用场景: 需要利用物理信道特性进行安全通信的场景。



● 隐蔽通信技术

- 原理: 将传输信号嵌入噪声中, 使得信号不被检测器发现。
- 优势: 极高的隐蔽性, 减少被窃听的可能性。
- 应用场景: 高度保密的通信需求, 如军事通信。

隐蔽通信是一种隐藏信息传输过程的方法，其过程为

如果恶意设备不确定卫星信号的传输，则无法接收或解码信息



如果它们认为卫星没有传输数据，则大概率不会尝试窃听或攻击



安全威胁在**源头-信号**传输上得到缓解

适应于星间通信的创新性安全解决方案——隐蔽方案分类

终端驱动的隐蔽方案

网络驱动的隐蔽方案

混合隐蔽设计

基于时域的
隐蔽技术

基于频谱域的
隐蔽技术

基于功率域的
隐蔽技术

基于空间域的
隐蔽技术

路由设计

频谱共享

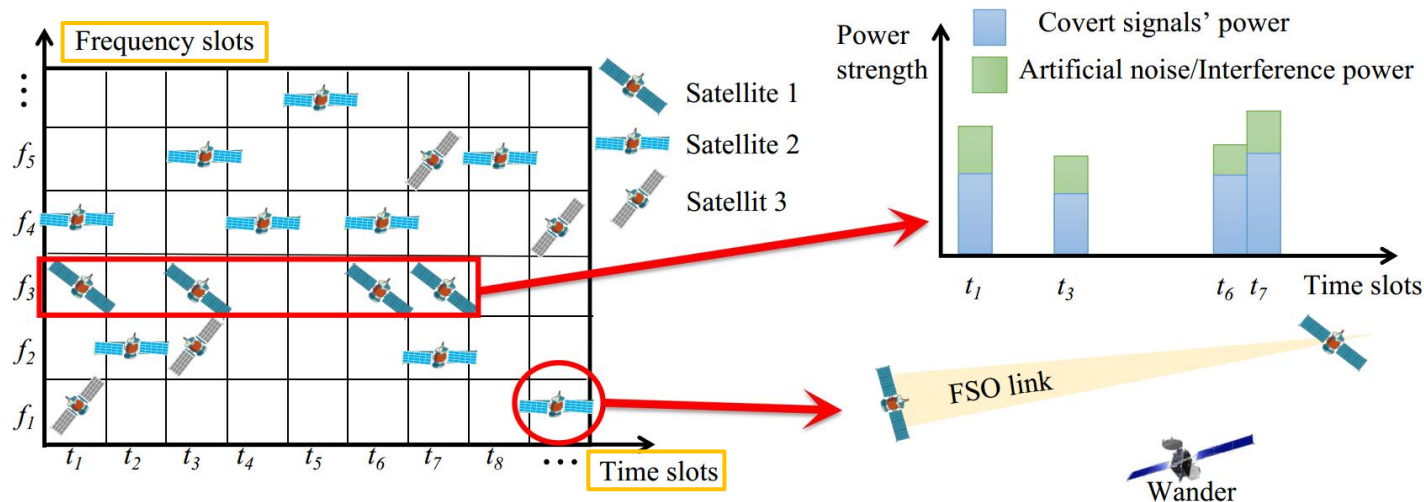
四种基于终端驱动的
自适应组合

3 系统安全——终端驱动的隐蔽方案

应用于卫星间网络的终端驱动隐蔽方案，可跨越时间、功率、频谱和空间域

基于时域的隐蔽技术

将可用时隙间隔分割地更小以用于传输隐蔽信号。隐蔽信号在窃听者活动减弱时发生或同非隐蔽信号一起发生
这种**动态定时隐蔽信号传输的方法**引入了时间随机性和不可预测性的因素，使未经授权的信号检测和拦截复杂化
卫星可以引入**定时延迟或偏移**，使隐蔽信号与标准传输不同步、隐蔽信号与背景噪声混合，增加窃听难度



从时间、频率、功率和空间角度演示隐蔽ISC技术

基于频谱域的隐蔽技术

高频频段在ISCs中的使用带来安全挑战也提供了解决思路。

通过**扩频技术**可以将信号的功率谱密度扩展到低于环境噪声水平以实现信息隐藏的有效性

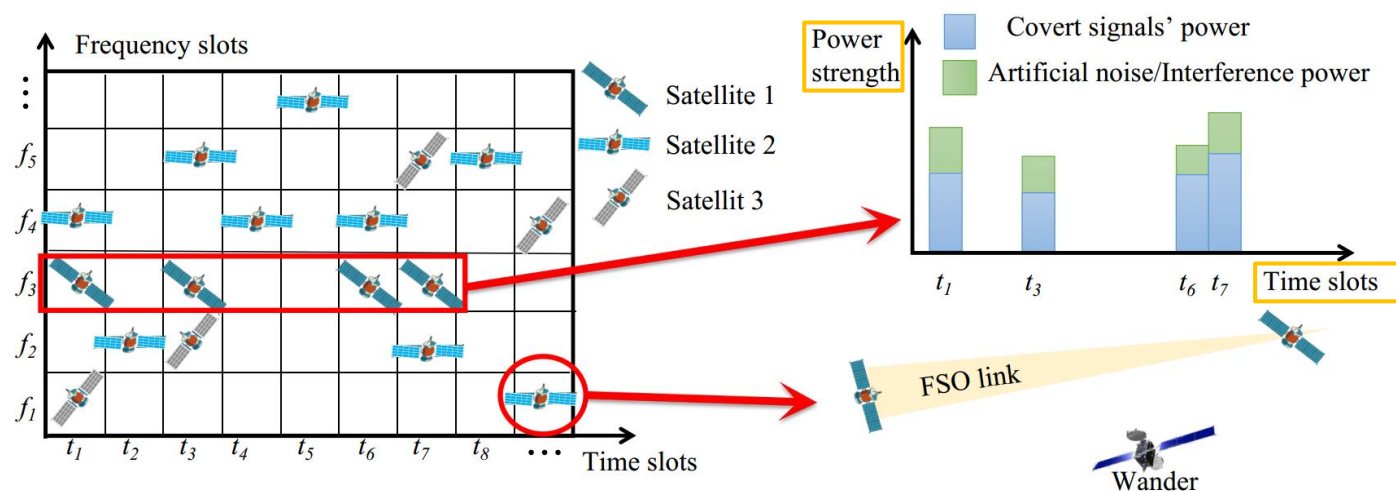
跳频和选频技术可快速改变传输频率，给窃听带来复杂性。

基于功率域的隐蔽技术

功率控制：将较低的功率电平分配给隐蔽信号，使其比其他非隐蔽信号的功率电平更低，以降低被检测概率，加强隐蔽性

可以通过设置**人工干扰和噪声**，以造成混乱，使窃听者更难检测和拦截秘密通信

需要考虑卫星网络隐蔽通信需求和资源利用之间的平衡。



从时间、频率、功率和空间角度演示隐蔽ISC技术

基于空间域的隐蔽技术

侧重于控制发射信号的**空间特性或天线的辐射方向图**来实现隐蔽通信

空间特性：使用**更高的频带**如毫米波、太赫兹频带，或使用高定向自由空间光通信技术等

天线的辐射方向图：利用**波束赋形**形成功率和形状可控的窄波束

卫星间合作网络涉及路由设计，多址卫星间网络利用了频谱共享技术

路由设计

密集的LEO巨型星座提高了足够的路由选择，提高了建立隐蔽通信链路的灵活性和效率，同时降低了检测风险。
网络中的路由设计利用直接视距(LoS)传播和聚焦波束链接来增强安全性，可以根据有关潜在窃听者的信息来设计。

情况	方案
窃听者位置已知	直接设计时避开
窃听者位置未知	最大化路由路径的不可预测性，增加窃听难度

主动避免已知威胁 + 在路由选择中
战略性地结合随机性

显著增强网络安全性



频谱共享

处于恶意设备部署的发射器或接收器附近时，传统的路由策略不足以确保隐蔽通信。基于频谱共享技术的卫星间多址网络为**降低信号检测概率和提高安全性**提供了很有前景的方法。

频谱共享技术：非正交多址(NOMA)、认知无线电(CR)和分频多址(RSMA)

NOMA

- 隐蔽信息与其他信息共享同一发射机，信号使用**相同的频谱资源**一起传输
- 将较少的功率分配给需要隐藏的信息
- 窃听者接收到混合信号，窃听困难，安全性增加

CR

- ISL必须与其他ISL共享**相同的频谱资源**
- 安全信息传输时同时承受其他ISL产生的干扰
- 窃听者接收到混合了初级和次级信息的信号，窃听困难，安全性增加

RSMA

- 它允许多个用户同时使用有效的叠加编码**共享相同的时频资源**。
- 隐蔽信息与其他非隐蔽传输共存，同时通过精心设计的叠加编码将频谱干扰降到最低
- 窃听困难，安全性增加

3 系统安全——卫星间终端和网络驱动隐蔽方案对比



这些隐蔽技术共同减轻了信号处理和功耗的负担，增强了安全性，

隐蔽技术	解决安全问题	优势
时域	开放可获取 信号处理能力不足	引入时间变化，在有限的处理需求下增强传输安全性，优化隐蔽性和计算效率。
频谱域	易于跟踪 开放可获取 信号处理能力不足	增加了信号拦截和分析的复杂性，同时有效地利用带宽来适应处理能力。
功率域	易于跟踪 开放可获取	降低被窃听的概率，优化功率使用，以延长隐蔽和运行寿命。
空间域	易于跟踪 开放可获取	在优化信号完整性和传输范围的同时，最大限度地减少拦截和窃听的可能性。
路由设计	易于跟踪 信号处理能力不足	利用网络拓扑避免检测，实现安全、高效的数据传输，同时减少计算需求。
频谱共享	易于跟踪 开放可获取	混淆对手并有效地利用可用频谱在拥挤的频带中维持隐蔽操作。

➤ 综合上述技术的多面优势、混合方案可取长补短，显著提升该系统的隐蔽能力，为最佳选择。

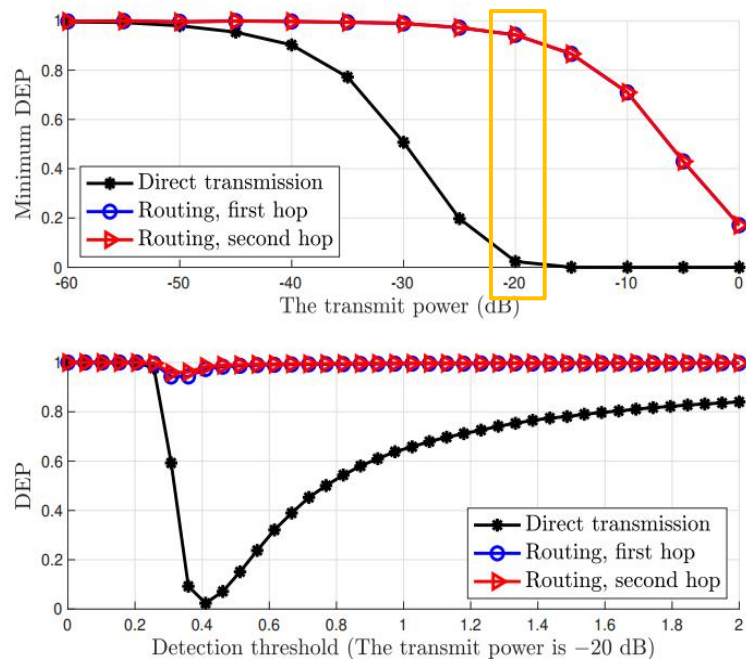
混合隐蔽设计

四种基于终端域的隐蔽技术可以**自适应组合**

可以对设计的传输路径的每一跳进行频谱共享

时间、频谱、功率和空间域**四域技术**可以集成到路由设计和频谱共享网络中

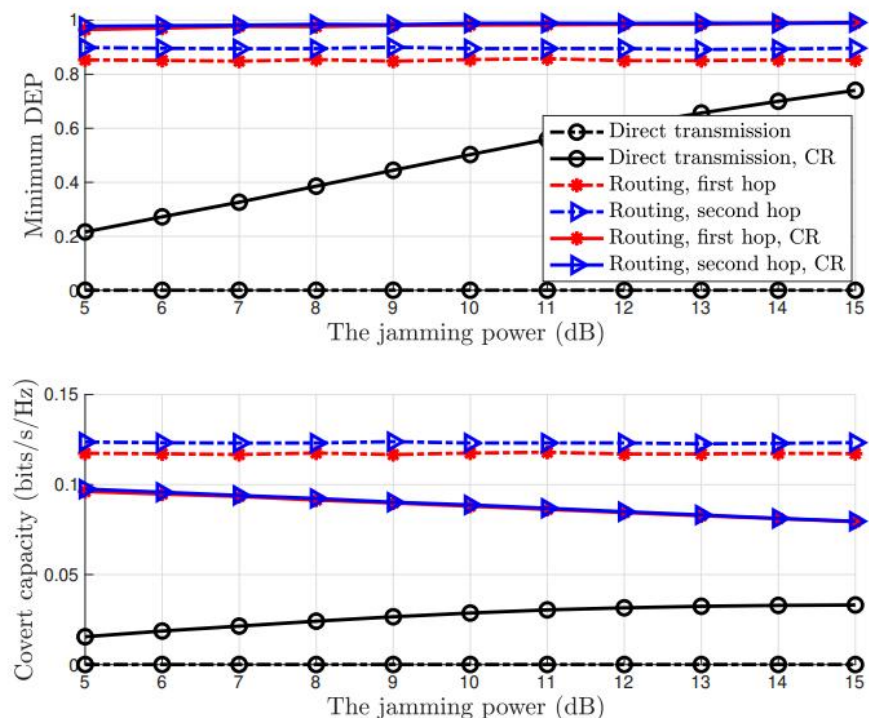
下面对混合隐蔽方案的有效性进行了评价



直接传动与混合动力方案的DEP比较

案例一

- 将直接传输的最小DEP与高指向性卫星间FSO链路上的混合方案进行了比较
- 两种方法都利用动态功率控制来优化性能
- 混合方案将单跳路由与基于时间的策略相结合，选择最有利的转发时隙
- 结果表明：混合方案显著提高了最小DEP，确保了比直接传输更安全的卫星间传输。



隐蔽容量与主用户的干扰器功率之比

案例二

- 研究了频谱共享技术与路由设计的集成，特别是主ISL与隐蔽ISL共存的情况
- 结果显示：增加主发射机产生的干扰功率确实可以**提高ISCs的隐蔽性**，但在路由方案本身已经具有较高隐蔽性的情况下，对系统隐蔽性的提高并不明显
- 隐蔽性的增强通常会导致期望传输降低，特别是当系统的隐蔽性接近峰值水平时（随着干扰功率的增加，隐蔽容量降低）

Q：基于四域的隐蔽方案涉及复杂优化问题，路由设计和频谱共享技术各有所长，怎么更好增强系统安全性？

A：取长补短，根据实际通信场景选择和组合几种技术方案

隐蔽ISC的研究很有意义；以下是未来研究的一些方向

合法接收机设计

- 合法接收机**准确解码信号的能力**决定隐蔽效果。
- 现代误差校正和信号增强技术在维护隐蔽信号的可靠性和清晰度方面发挥着关键作用

人工智能

- 包括机器学习、深度学习和强化学习等
- 目前缺乏训练模型的原始数据
- 预期可实现**威胁检测和实时自适应决策**，增强隐蔽通信的整体质量

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家



空间感知通信

- 收集周围空间环境的基本数据和信息
- **计算机视觉**使用先进的图像处理和人工智能(AI)方法来分析视觉数据
- 卫星间网络的联合感知和通信研究较少

量子通信

- **试图窃听会收到提示**
- 允许量子信息从一个位置转移到另一个位置，而**不需要物理移动粒子**，从而在卫星之间秘密地转移量子态



重慶大學
CHONGQING UNIVERSITY

04

激光星间传输

耐劳苦 尚俭朴 勤学业 爱国家

自由空间光通信技术

激光为载波进行通信；
是解决信息传输“最后一公里”
的最佳选择

特点

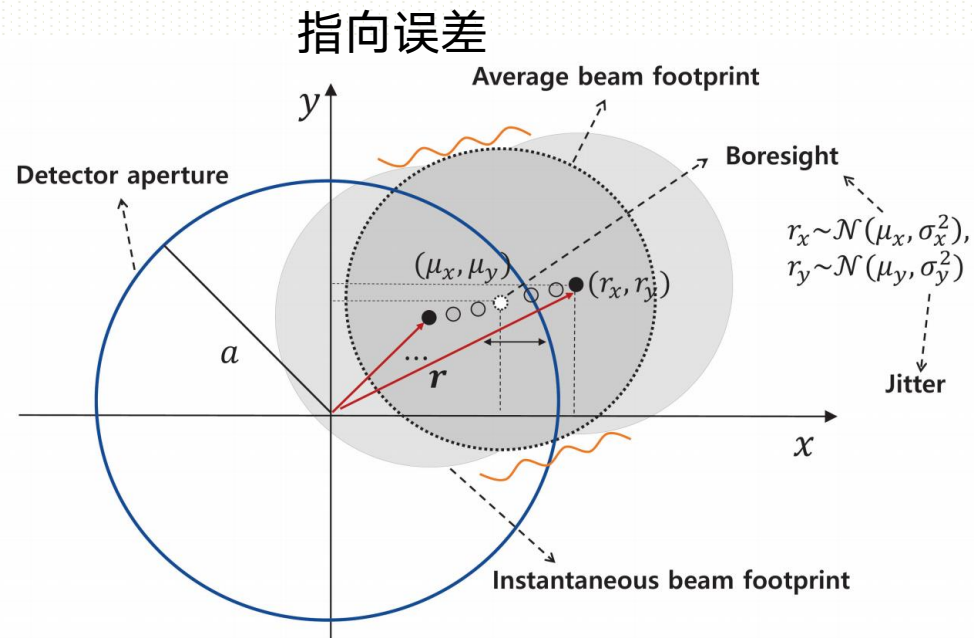
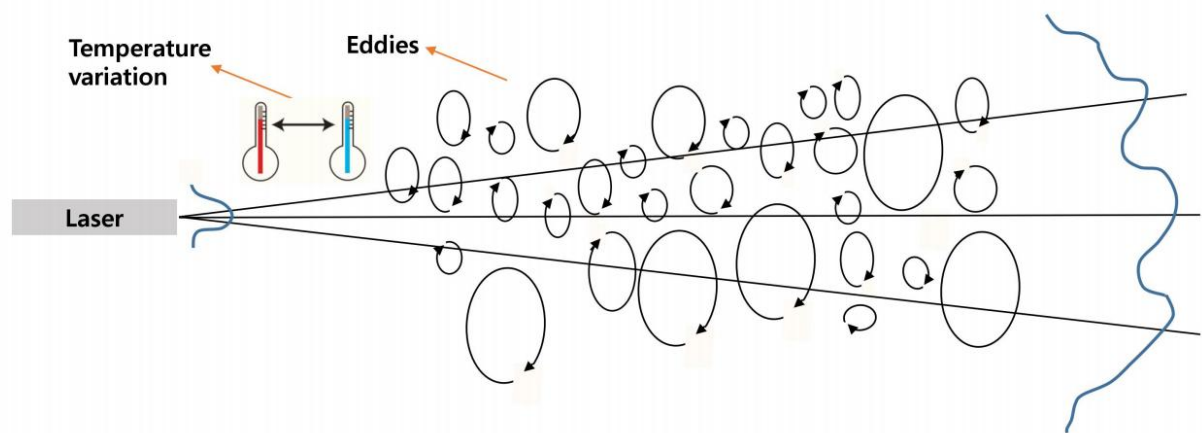
- 高频率；
- 高指向性；
- 设备小型化

优势

- 高数据传输速率；
- 抗干扰能力强；
- 低延时高可靠；

FSO传输特点：

大气湍流



星间传输：1. 没有大气影响；

2. 卫星的位置和姿态可以通过高精度控制系统进行精确调整，从而实现精确的激光对准



中国的“星网”、“鸿雁”、“虹云”、“行云”以及“天地一体化”星座和国外的“Kuiper”、“Telesat”、“Starlink”网络已经将激光星链路作为其核心传输链路的方式之一。



各国的商业化航天科技公司如 TESAT、Mynaric、HyperionTech、Thales Alenia Space、NICT 等开始推出更高速率、更小质量和体积及更低功耗的激光终端产品，这些终端产品可以适应同类多任务的普适需求。

激光在星间通信的应用

01

高速传输

激光通信具备高信道吞吐率、高传输带宽、强抗干扰能力等优点，可以较好地支持如今日益增加的数据传输需求。

02

平台轻量级

激光通信终端设备向着更小体积、轻量化和低功耗的方向发展，这也符合卫星平台对有效载荷小型化、轻型化、低能耗的要求。

03

安全传输

波束比微波更窄，发散角更小，指向性好，从而使通信获得很好的抗干扰能力和抗截获能力，提供了更高的安全性和可靠性。

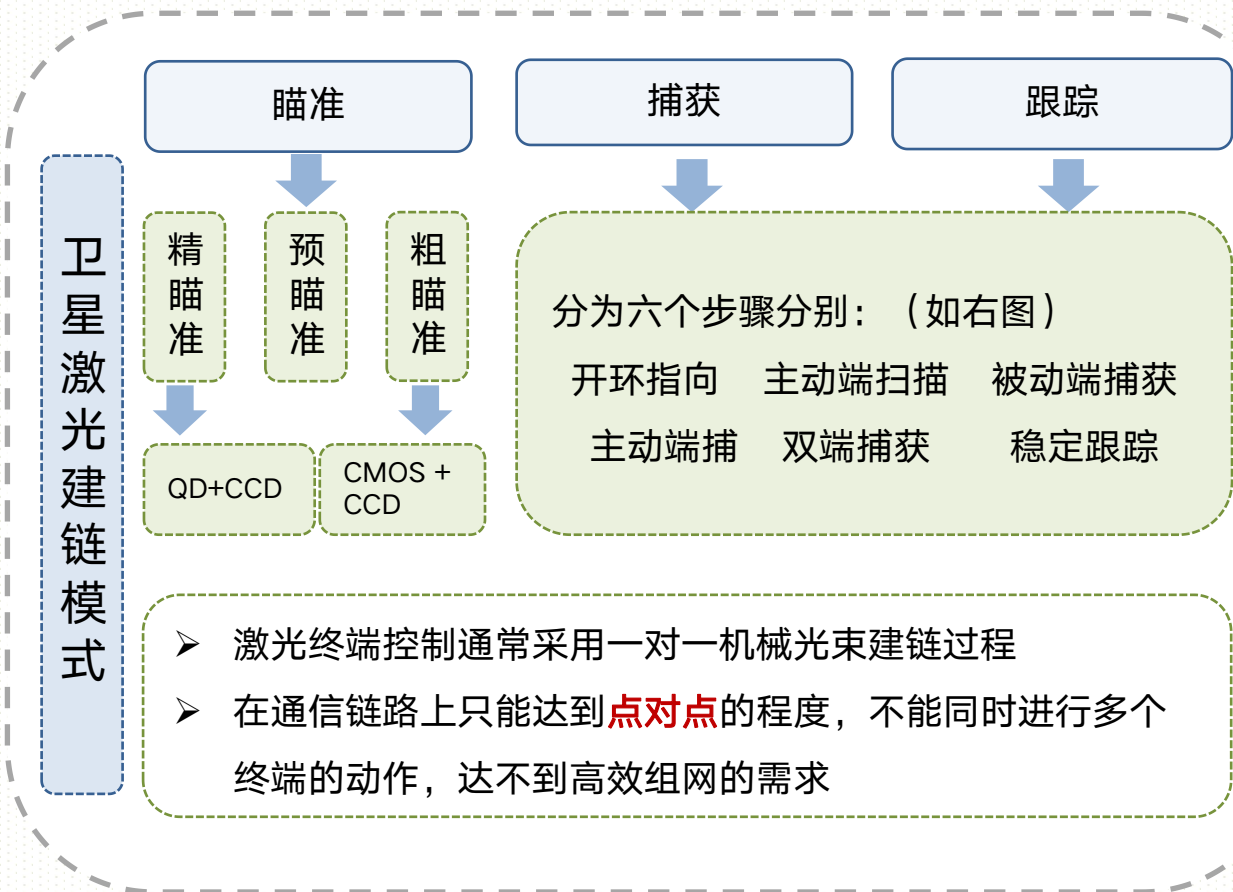
04

精密测距

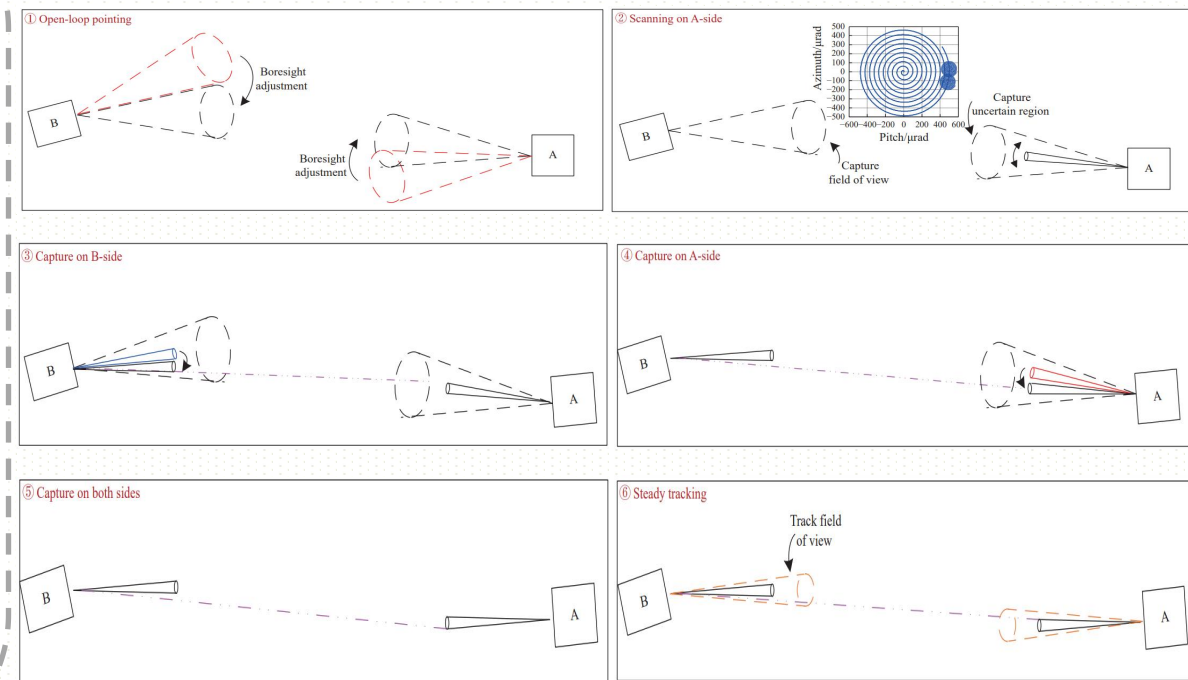
激光传输具有极高的信号速度（光速）和窄光束特性，可以通过测量光脉冲的发射和接收时间来精确计算卫星之间的距离。

卫星激光通信具有频率更高且方向性更强的特点，可以实现更快、更高体量的数据传输

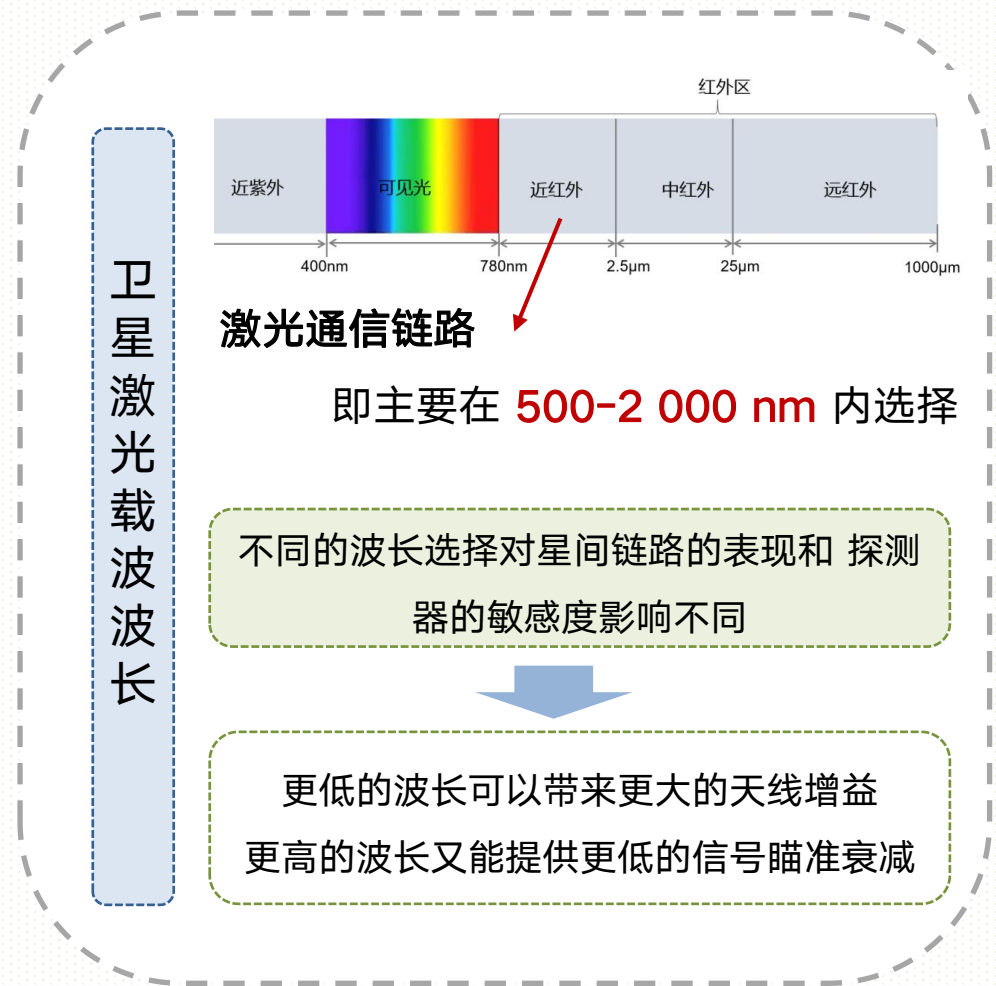
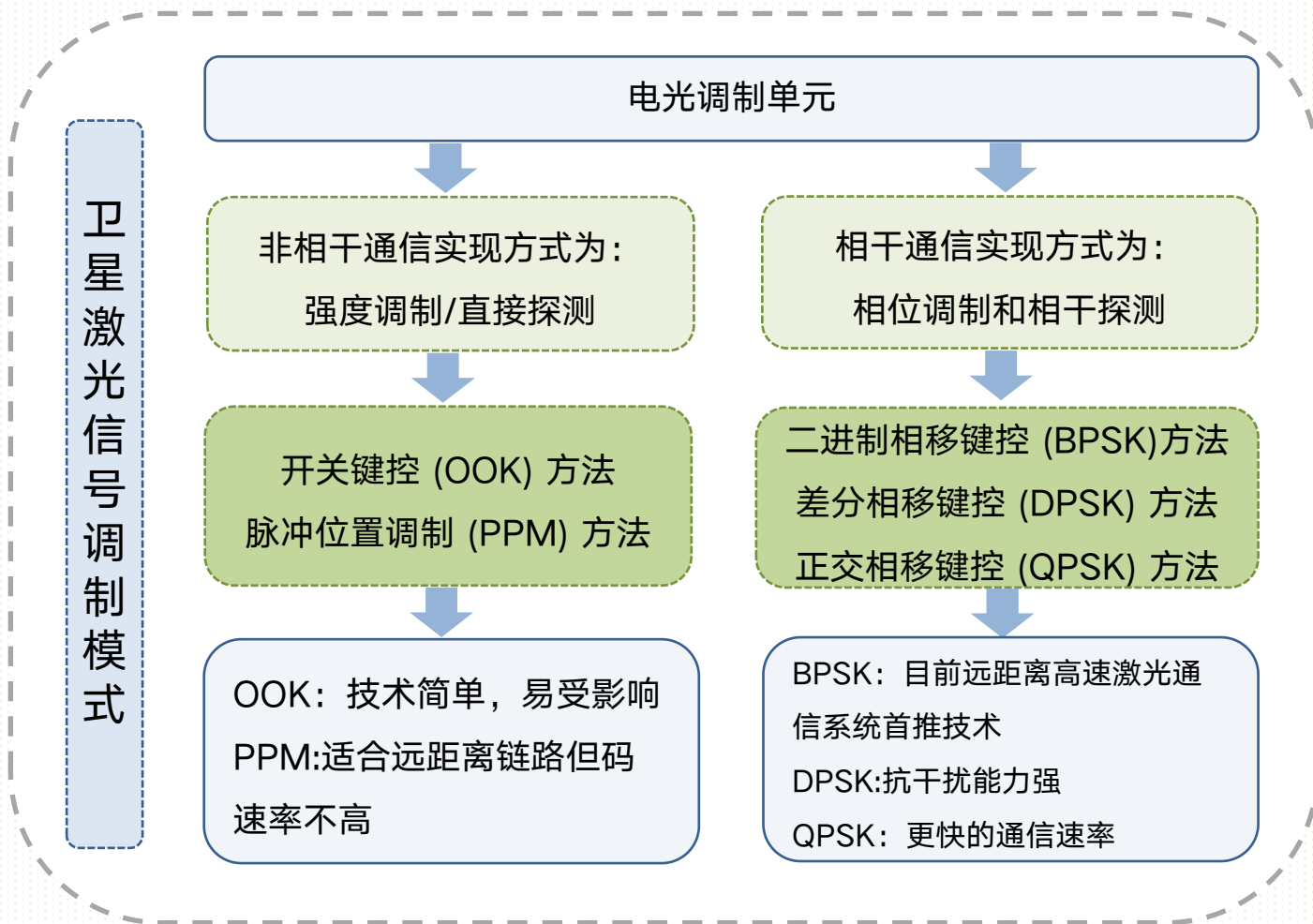
卫星激光通信的三个重要技术：卫星激光建链模式、卫星激光信号调制模式、卫星激光载波波长



信号光捕获跟踪过程示意图



卫星激光通信的三个重要技术：卫星激光建链模式、卫星激光信号调制模式、卫星激光载波波长

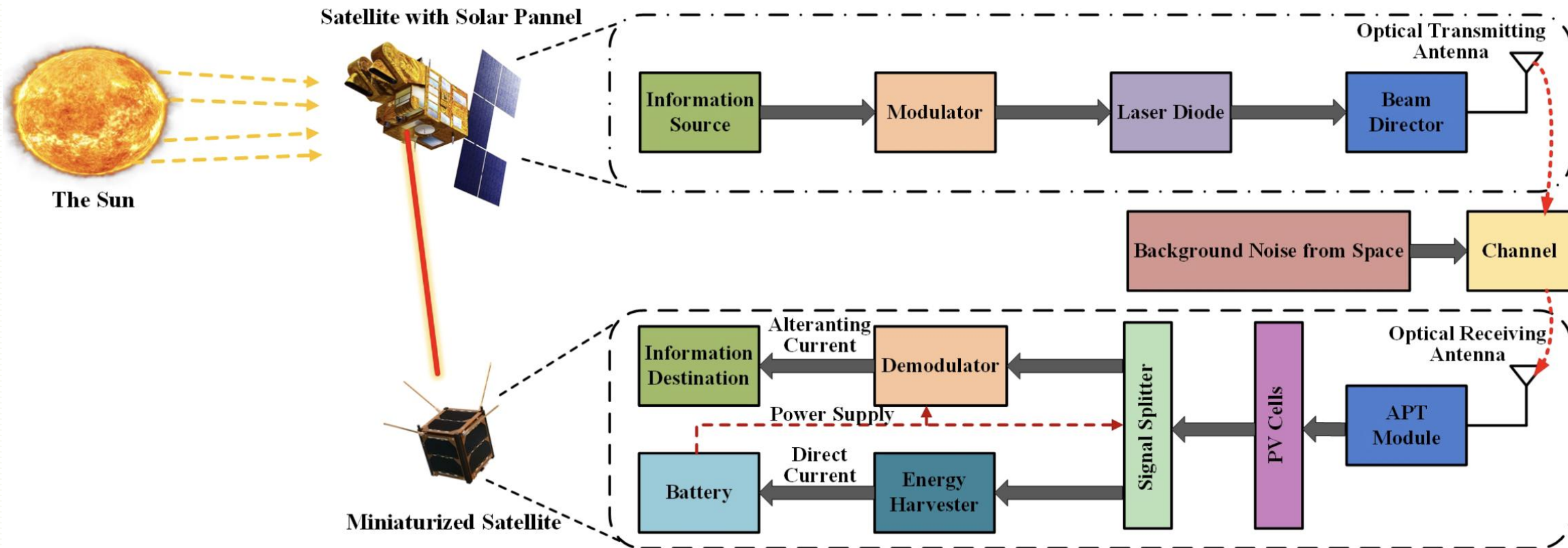


星间激光通信是极远距离、极弱信号的探测，其技术难点来自超远距动态变化链路特性、复杂的空间环境和受限的能源供给、数据处理能力。

对比项	星间激光通信	地面光纤通信
传输介质	自由空间	光纤光缆
系统环境	极端温度、强烈震动、高强度辐射等	机房环境，相对稳定
节点移动性	卫星高速运动，收发机需要精准跟瞄	静止状态
链路稳定性	受太空环境、卫星运动及跟瞄精准度影响	受环境影响较小
能源供给	受限于太阳帆板面积、星载电池及星蚀现象	稳定充分
存储处理	能力弱	能力强
系统运维	困难	容易

- 卫星通信收发两端相距遥远且处于高速运动状态，快速光束捕获和高精度光束跟踪是星间激光通信的关键所在。
- 卫星运行环境极度恶劣，星间激光通信受源于太阳、月球及其他星球的辐射和反射的背景噪声影响，要求星间激光通信系统具有较强的抗背景噪声能力。
- 卫星的能源供给受限于太阳能帆板面积、星载电池容量、星蚀现象等因素，卫星载荷数据采集、存储、计算和转发等能力也相应受影响。

激光传输与空间太阳能电站，以及无线信息与能量同传技术结合，可以解决小型卫星机载电力短缺的问题



空间无线传输没有电磁辐射限制，具有相对稳定的系统拓扑结构，相对较短的小型卫星间链路距离

G. Pan, H. Zhang, R. Zhang, S. Wang, J. An and M. -S. Alouini, "Space Simultaneous Information and Power Transfer: An Enhanced Technology for Miniaturized Satellite Systems," in IEEE Wireless Communications, vol. 30, no. 2, pp. 122-129, April 2023.

激光星间通信具有很高的研究价值；以下是未来研究的一些方向

太空环境

- 受源于太阳、月球及其他星球的辐射和反射的背景噪声影响
- 没有电磁辐射限制

卫星运动

- 轨道内星间通信
- 轨道内星间通信

激光关键技术

- 卫星激光建链模式；
- 卫星激光信号调制模式；
- 卫星激光载波波长

系统功能

- 星间通信
- 无线能量传输
- 信息与能量同传
- 精密测距





重庆大学

CHONGQING UNIVERSITY

汇报结束 感谢聆听！

T H A N K S F O R Y O U R L I S T E N I N G !

2024年6月13日

汇报人：叶佳