



基于随机几何的 LEO 卫星辅助船岸通信网络性能分析

汇报人：胡旭

日期：2022年1月23日



目 录

1 研究背景及意义

2 系统模型

3 理论分析

4 现存问题与下一步研究计划



目录

1 研究背景及意义

2 系统模型

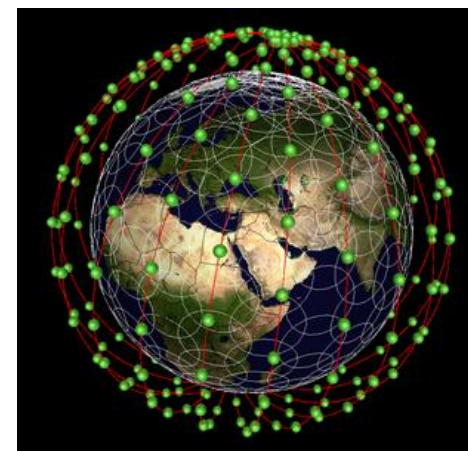
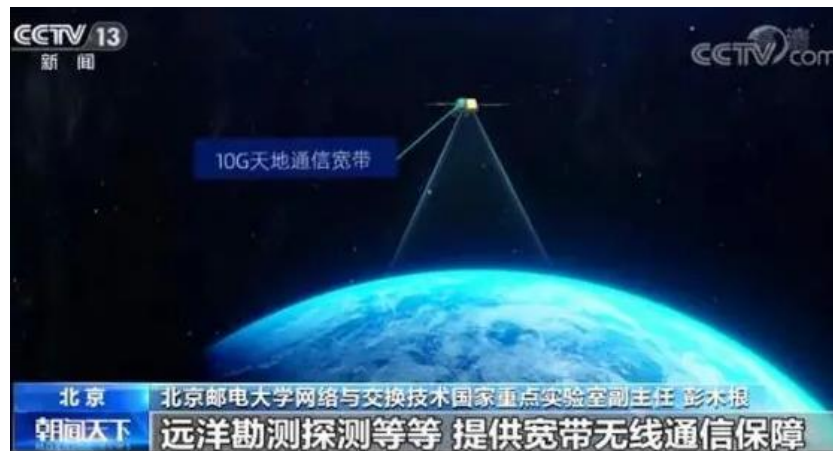
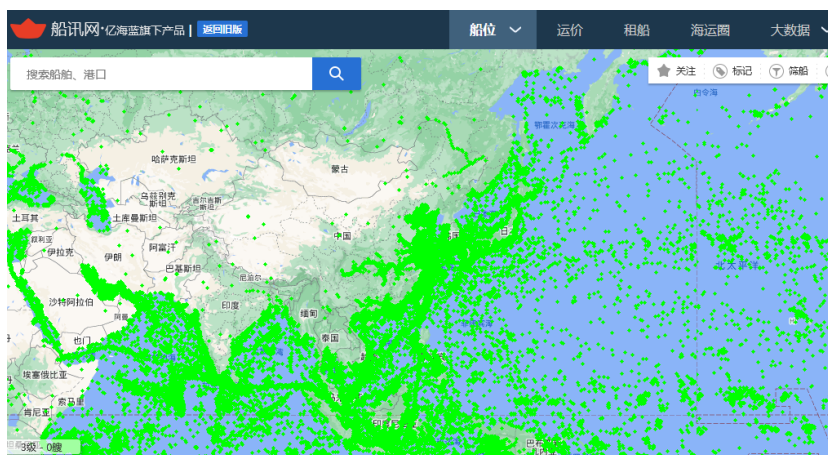
3 理论分析

4 现存问题与下一步研究计划

01 研究背景及意义

1.1 研究背景

- 航行安全、海洋监测、灾害预警、应急通信和海上搜救等领域服务质量要求的提高，使得船舶与岸基站通信的多媒体服务需求不断增加 [1]。
- 由于海洋环境的复杂性，通信服务质量随着船岸距离的增加而逐渐降低，目前需要更可靠、数据速率更高、时延更低的海上通信网络为海上的船舶提供数据传输服务。
- 由于海面基础设施匮乏，离岸较远海域的通信业务主要依靠海事卫星，只能以较高的成本提供传输速率低、传播时延长的通信服务。
- 低地球轨道（Low Earth Orbit, LEO）星座凭借低成本、高速度和高吞吐量的优势，被视为提升海上通信网络能力的有效方式。因此，充分考虑海上通信需求部署LEO星座网络对提高海上通信网络的质量十分重要。



01 研究背景及意义

1.1 研究意义

- 在LEO卫星星座部署之前，**如何有效地评估和预测不同场景下的网络性能对于网络建设者来说至关重要**。因此，我们的目标是建立一个准确的网络框架来分析网络性能，为部署LEO卫星星座提供参考。
- 然而，现阶段的网络性能分析存在一些挑战：
 - ✓ 基于实验或仿真的传统方法只能分析相对**小规模网络**的性能，难以建立一个准确的框架来获取具有不规则和复杂拓扑的大规模 LEO 星座网络；
 - ✓ 海上通信网络中的**无线信道**会因节点移动性而遭受路径损耗、多径衰落以及来自同一或相邻信道上其他用户的干扰[1]；
- 随机几何理论可用于对无线网络中的随机节点位置进行建模 [2]。由于适用于具有不规则拓扑的网络，随机几何可以用来评估具有密集节点的大规模LEO卫星星座的性能。
- 因此，我们通过**将卫星星座建模为球面上的二项式点过程 (Binomial point process, BPP) 来获取 LEO 卫星辅助海上通信网络场景中的性能，为海上宽带通信的发展及部署LEO卫星星座提供参考。**

[1] Y. Zhou and W. Zhuang, "Opportunistic cooperation in wireless ad hoc networks with interference correlation," Peer-to-Peer Netw. Appl. vol. 10, pp. 238-252, Jan. 2017.

[2] Y. Zhou and W. Zhuang, "Performance Analysis of Cooperative Communication in Decentralized Wireless Networks with Unsaturated Traffic," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 5, pp. 3518-3530, May 2016.



目录

1 研究背景及意义

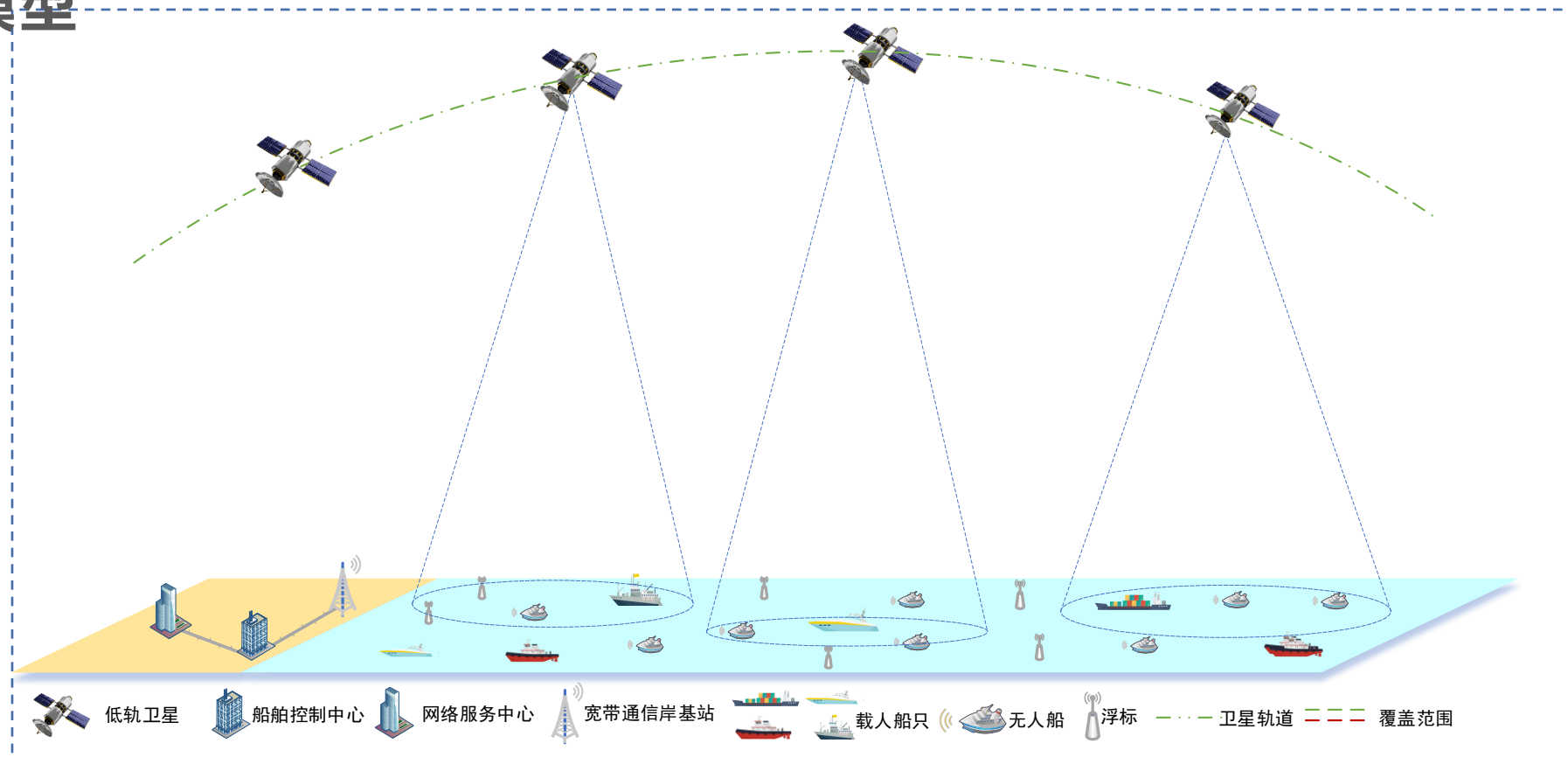
2 系统模型

3 理论分析

4 现存问题与下一步研究计划

02 系统模型

2.1 网络模型



- 考虑由N颗LEO卫星组成的**密集**卫星星座网络，均匀分布在距地球同一高度的球面上围绕地球匀速运动，形成一个二项式点过程（BPP）。
- 假设每个卫星都配备了定向天线，向地球中心辐射，且主瓣形成一个波束。地球近似为一个半径 ≈ 6371 km的完美球体。
- 考虑K艘船随机分布在海面上，每艘船与岸基站都有周期性数据传输需求。

2.1 网络模型

- 考虑岸基站与船舶通信的下行链路，船舶与岸基站通信考虑两条数据链路，**直传链路**和**中继链路**，分别工作在MF频段和ka频段。
- 在直传链路中，岸基站与船载接收机进行数据传输；
- 在中继链路中，从岸基站到船舶的信号传输分为两个时隙，包括
 - 1)第一个时隙：岸基站向服务卫星发送数据；
 - 2)第二个时隙：服务卫星向船舶V发送数据。
- 假设无线传输仅从卫星在其地平线以上时进行数据的接收与转发，所有的数据包都可以被接收方正确地接收到，而不会在链路上发生冲突。

| 符号 | 描述 |
|---------------------------|--|
| $r_e;r_{min}$ | 地球半径 (6371 km);卫星S到船舶的最小可能距离 |
| $N;K;N_i$ | 卫星数量；信道数量；干扰卫星数量 |
| $R_{bv}; R_{bs}; R_0;R_n$ | 岸基站到船舶的 距离 ；岸基站到服务卫星S的距离；服务卫星S到船舶的距离；干扰卫星到船舶的距离 |
| $p_b ;p_v;p_s; p_i$ | 基站发射功率；船舶V的发射功率; 服务卫星S的发射功率；干扰卫星的发射功率 |
| σ^2 | 加性噪声功率 |
| α | 路损因子 |
| τ | SINR 阈值 |
| $G_{bv};G_{bs};G_0;G_n$ | 船岸信道增益；中继上行链路增益；服务卫星下行链路信道增益；干扰卫星下行链路信道增益 |

02 系统模型

2.1 网络模型

- 在中继链路中，假设有 K ($K \leq N$) 个正交信道，并将 N/K 个卫星随机分配给每个信道。
- 岸基站与其最近的卫星关联（称为服务卫星），服务卫星为船岸提供数据转发服务，同一信道上的所有其他卫星，只要它们在地平线以上，就可能会对船舶的接收造成干扰，并且 $N_i \leq \frac{N}{K} - 1$ 。
- 每颗卫星的定向天线的主瓣辐射向地球中心，我们假设服务卫星的功率为 p_s ，干扰卫星的功率为 p_i ，并且 $p_i < p_s$ 。





目 录

1 研究背景及意义

2 系统模型

3 理论分析

4 现存问题与下一步研究计划

3.1 引理

引理 1: 星座中任一卫星到用户的距离 R 的 累积分布函数 (Cumulative Distribution Function , CDF)

$$F_R(r) \triangleq \mathbb{P}(R \leq r) = \begin{cases} 0, & r < r_{\min} \\ \frac{r^2 - r_{\min}^2}{4r_e(r_e + r_{\min})}, & r_{\min} \leq r \leq 2r_e + r_{\min} \\ 1, & r > 2r_e + r_{\min} \end{cases}$$

引理 2: 服务卫星到用户的距离的 CDF 和概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 为

$$F_{R_0}(r_0) \triangleq \mathbb{P}(R_0 \leq r_0) = 1 - (1 - F_R(r_0))^N \quad f_{R_0}(r_0) = N \left(1 - \frac{r_0^2 - r_{\min}^2}{4r_e(r_e + r_{\min})} \right)^{N-1} \frac{r_0}{2r_e(r_e + r_{\min})}$$

3.2 覆盖概率

第二项:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_I(s) &= \mathbb{E}_I \left[e^{-sI} \right] \\ &= \mathbb{E}_{N, H_n, R_n} \left[\exp \left(-s \sum_{n=1}^{N_I} p_n H_n R_n^{-\alpha} \right) \right] \\ &= \mathbb{E}_{N, H_n, R_n} \left[\prod_{n=1}^{N_I} \exp \left(-s p_n H_n R_n^{-\alpha} \right) \right] \\ &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \mathbb{E}_{N, H_n} \left[\prod_{n=1}^{N_I} \exp \left(-s p_n H_n r_n^{-\alpha} \right) \right] \times f_{R_n | R_0} (r_n | r_0) dr_n\end{aligned}$$



N : 二项随机变量

H_n : 阴影莱斯分布的拉氏变换

R_n : 干扰卫星的距离分布

$$f_{R_n | R_0} (r_n | r_0) = \frac{f_R (r_n)}{1 - F_R (r_0)}$$

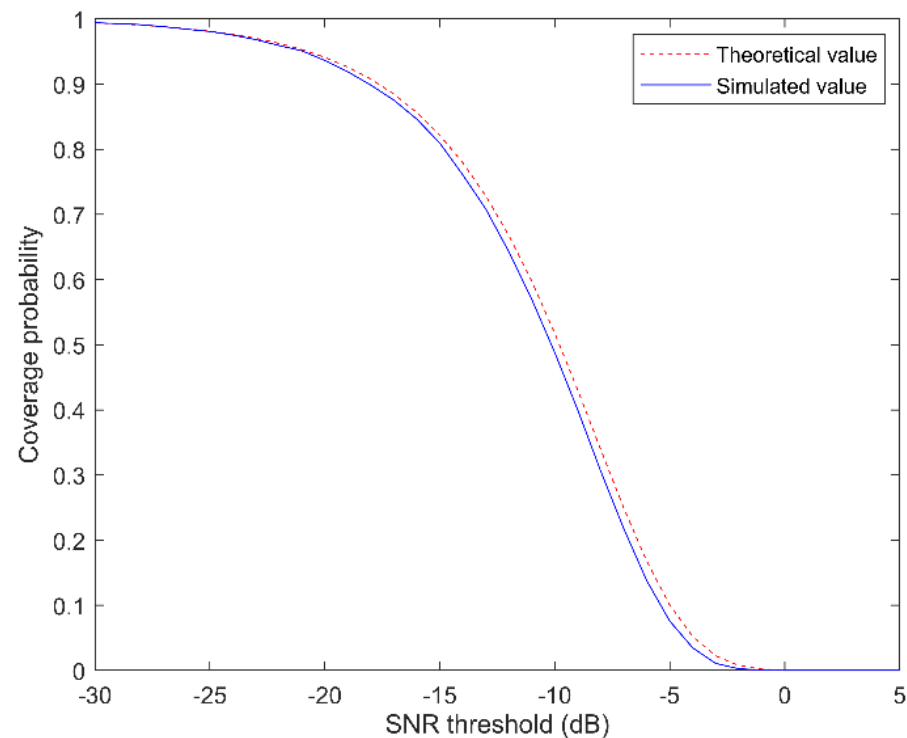
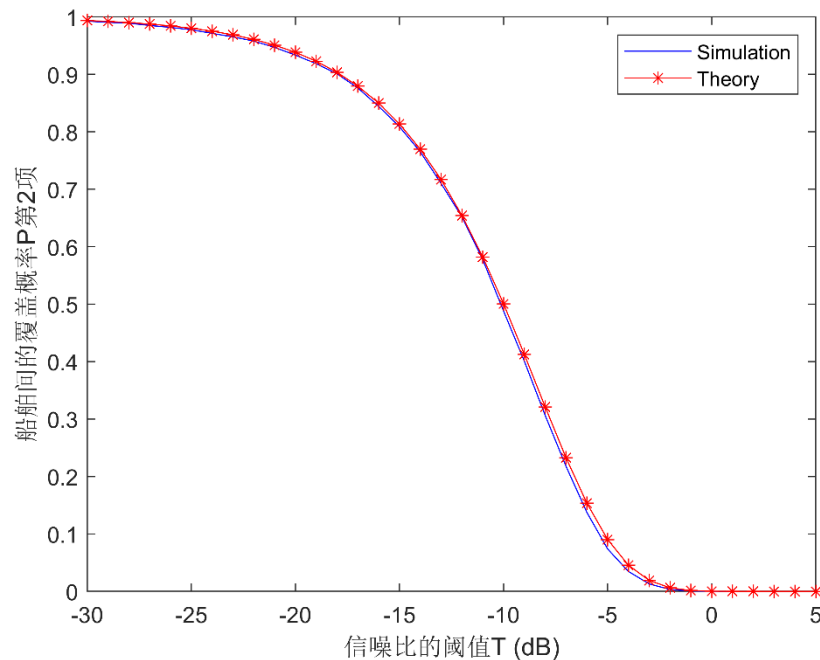
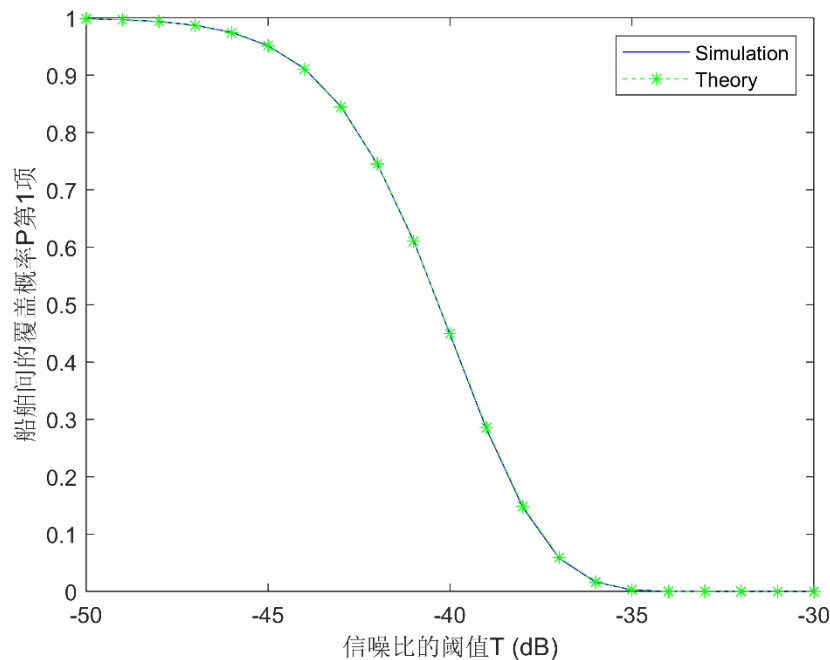
03 理论分析

3.3 初步结果

当 $\xi=0$ 时, 覆盖概率为

参数设置:

```
N1 = 720;  
(*几何参数*)  
rmax = 13942000;  
rmin = 1200000;  
re = 6371000;  
ra = 7571000;  
rvv = 90000;  
(*船间链路*)  
mvv = 2;  
pvv = 12.5;  
nPvv = 10-9.8;  
alphavv = 3;  
cvv = 1;  
gvv = 100.2;  
(*卫星链路*)  
pv = 200;  
ps = 10;  
gvs = 100.2;  
gsv = 100.6;  
sigmau = 10-9.8;  
sigmad = 10-9.8;  
cu = 1;  
cd = 1;  
alphau = 2;  
alphad = 2;  
(*信道参数*)  
m = 2;  
b = 0.2; (*0.279;  
Omega = 0.6; (*0.2
```





目录

1 研究背景及意义

2 系统模型

3 理论分析

4 现存问题与下一步研究计划

04 现存问题与下一步研究计划

4.1 现存问题

1. 查询阴影莱斯信道衰落功率的拉氏变换 $\mathcal{L}(s)$;
2. 学习拉氏变换相关推导和平均干扰因素的方法;

4.2 下一步研究计划

1. 推导有干扰情况下的覆盖概率的解析表达式;
2. 求解不同参数情况下的覆盖概率曲线, 并与Monte Carlo仿真对比性能结果;
3. 思考分析结果的落地方案, 尝试将分析结果与工程实际结合;

- [1] Shengming Jiang, “ 2020. Networking in Oceans: A Survey”. ACM Comput. Surv. 54, 1, Article 13 , pp. 33, Dec. 2020.
- [2] Y. Zhou and W. Zhuang, "Opportunistic cooperation in wireless ad hoc networks with interference correlation," Peer-to-Peer Netw. Appl. vol. 10, pp. 238-252, Jan. 2017.
- [3] Y. Zhou and W. Zhuang, "Performance Analysis of Cooperative Communication in Decentralized Wireless Networks with Unsaturated Traffic," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 5, pp. 3518-3530, May 2016.
- [4] J. Wang et al., "Wireless Channel Models for Maritime Communications," in IEEE Access, vol. 6, pp. 68070-68088, 2018.
- [5] F. J. Lopez-Martinez, D. Morales-Jimenez, E. Martos-Naya and J. F. Paris, "On the Bivariate Nakagami-m Cumulative Distribution Function: Closed-Form Expression and Applications," in IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 4, pp. 1404-1414, April 2013.
- [6] H. Lin, C. Zhang, Y. Huang, R. Zhao and L. Yang, "Fine-Grained Analysis on Downlink LEO Satellite-Terrestrial MmWave Relay Networks," in IEEE Wireless Communications Letters.
- [7] N. Okati, T. Riihonen, D. Korpi, I. Angervuori and R. Wichman, "Downlink Coverage and Rate Analysis of Low Earth Orbit Satellite Constellations Using Stochastic Geometry," in IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 8, pp. 5120-5134, Aug. 2020
- [8] Niloofar Okati, Taneli Riihonen, Nonhomogeneous Stochastic Geometry Analysis of Massive LEO Communication Constellations, arXiv:2108.10785.



感谢老师、同学提出宝贵意见!