

LEO 衛星ネットワークの事業者間提携のモデリング

Modeling of Inter-Operator Partnerships in LEO Satellite Networks

近藤海斗¹

上山 憲昭²

宮田 純子³

Kaito Kondo

Noriaki Kamiyama

Sumiko Miyata

立命館大学大学院 情報理工学研究科¹

Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

立命館大学 情報理工学部²

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

東京科学大学 工学院³

School of Engineering, Institute of Science Tokyo

1. はじめに

近年、LEO (Low Earth Orbit) 衛星ネットワークによるブロードバンド提供への関心が高まっている [1]。LEO 衛星は低軌道に位置し、遅延が低い利点があるが、狭い範囲しかカバーできないため、多数の衛星を用いたコンステレーションが必要となる。しかし、事業展開の初期段階では LEO 衛星の数が少なく、通信サービス提供エリア・時間が限定的となり、サービス利用者を十分に集められない問題がある。本研究では、複数の LEO 衛星事業者が協力してサービスを提供するモデルを提案し、初期段階での収益向上を目指す。衛星を共有して 1 つのコンステレーションを構築する提携ゲームモデルを提案する。そのための予備研究として、本稿では事業者 2 者の協力をモデル化し、数値評価により契約者数が増加することを確認する。

2. 提携ゲーム

複数の自律的なプレイヤーがいる場合にどのような提携を形成し、各プレイヤーに利益をどう分配するかを議論する理論として知られている [2][3]。

3. モデリング

まず、LEO 衛星の通信範囲を定義する。通信範囲は衛星から地平線までの視野角に基づき、地球中心を結ぶ直線と地球表面に接する線の角度を用いて、式 (1) で幾何学的に求められる。

$$R_s = R_e \cos^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + H} \right) \quad (1)$$

R_s は、地球の半径 R_e 、衛星高度 H のときの衛星の通信範囲となる。衛星があるグリッドセル内に存在する場合、そのセル内で通信可能とする。また、複数衛星が 1 セル内に存在する場合、カバレッジ多重度が上がり、ユーザにより大きな帯域幅を提供できる。

衛星事業者 i のグリッドセル k における契約者数 $\alpha_{i,k}$ は、以下の式 (2) で定義される。

$$\alpha_{i,k} = \begin{cases} \sum_{c \in s_k} P_c C_{i,c}, & \text{if } \sum_{c \in s_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U} > \delta \\ \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{\delta}, & \text{if } \sum_{c \in s_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U} \leq \delta \end{cases} \quad (2)$$

P_c は国 c の人口、 s_k はグリッドセル k に存在する国の集合、 $C_{i,c}$ は衛星事業者 i の国 c の契約率、 U は平均通信量 (bps)、 γ_i は事業者 i の衛星の帯域幅 (bps)、 δ はサービス提供の閾値である。契約者数は、グリッドセル k で 1 人当たり通信量が閾値 δ を超える場合、人口と契約率の積で与えられ、下回る場合は γ_i/δ で与えられる。人口 P_c は面積と人口密度から次式で得られる。

$$P_c = \lambda_c \eta_c \quad (3)$$

λ_c は国 c の面積、 η_c は国 c の人口密度である。契約率 $C_{i,c}$ はロジスティック関数 (4) で得られる。ただし最小値・最大値 $C_{c,\min}$ 、 $C_{c,\max}$ は国別インターネット普及率を基に設定される。

$$C_{i,c} = \tau_i \left(C_{c,\min} + \frac{C_{c,\max} - C_{c,\min}}{1 + e^{-10(\epsilon_i - 0.5)}} \right) \quad (4)$$

満足度 ϵ_i は対数関数 (5) で定義し、カバレッジ率 ω_i とカバレッジ多重度 μ_i の加重平均として与える。

$$\epsilon_i = \log \rho \omega_i + (1 - \rho) \mu_i \quad (5)$$

ここで、 ρ はカバレッジ率を重視するため $0.5 < \rho < 1$ とする。カバレッジ率は通信範囲を、カバレッジ多重度は帯域幅を表し、利用者満足度に影響を与える。

また、提携ゲームは契約者数 α と定額の料金 β の積である収益を特性関数とする。

4. 数値評価

地球の半径 R_e を約 6,371km、衛星高度 H を 550km とすると、通信範囲の直径 R_s は 2,557km となる。この範囲を一边 1,809km の正方形グリッドセルに分割し、これを通信範囲とする。地球全体は長さ 39,798km と近似し、 22×22 のグリッドセルに分割する。また、各国の面積と人口密度においては Natural Earth および世界銀行の 2021 年データを用いる。

OneWeb を模したコンステレーションを conste1 とし、Qianfan を模したものを conste2 とする。conste1 は高度 1,200km、傾斜 87.9°、軌道面 18、総衛星数 648 で、conste2 は高度 813km、傾斜 89°、軌道面 18、総衛星数 648 である。図 1 に示すように、契約者数は conste1 単独の場合で 964,810 人、conste2 単独の場合で 965,490 人、conste1 と conste2 の協力によって形成されるコンステレーションで 2,032,869 人となる。協力時のコンステレーションの契約者数は conste1 と conste2 の契約者数の和の約 1.05 倍であり、提携ゲームの条件である優加法性を満たす。これは、衛星カバレッジ多重度 μ の影響で、満足度 ϵ に差が生じたためである。衛星数が等しい事業者同士で協力することで、カバレッジ多重度が conste1 と conste2 の約 2 倍になり、満足度は conste1 の約 0.3530 と conste2 の約 0.3533 に対して、協力時は約 0.6669 となる。

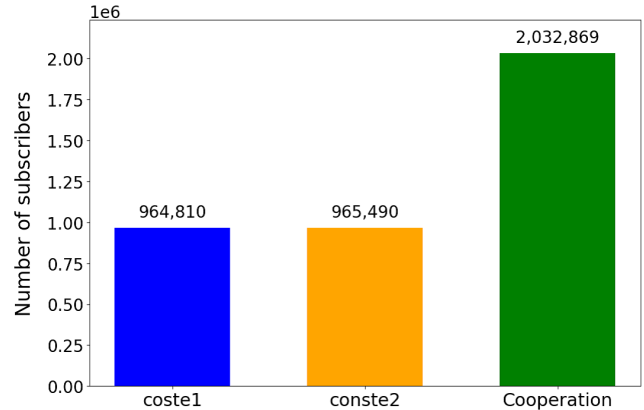


図 1: Number of subscribers in three cases

5. まとめ

事業者 2 者の協力をモデル化し、数値評価により契約者数が増加することを確認した。

今後は、LEO 衛星事業者間の協力サービスモデルを提案し、初期段階における参加事業者の配分法を提案する。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K11086, 23K21664, 23K28078 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] T. Darwish; G.K. Kurt; H. Yanikomeroglu; M. Bellmare; G. Lamontagne, "LEO Satellites in 5G and Beyond Networks: A Review From a Standardization Perspective", IEEE Access, 2022
- [2] S.N. Durlauf, L.E. Blume, Game Theory, Macmillan Publishers Ltd., 2010.
- [3] M.J. Osborne, A. Rubinstein, A Course in Game Theory, The MIT Press, Cambridge, 1994.