

令和6年度 卒業論文

V2V通信向け HARQ を伴う適応型SINR予測を用いた 動的帯域切り替え方式の提案

学籍番号 2210175

氏 名 加藤 涼

指導教員 藤井 威生 教授

電気通信大学 情報理工学域

II類

情報通信工学プログラム

提出日 令和8年1月10日

概要

近年，自動運転レベル4（高度自動運転）以上の実現に向け，車両間通信（V2V）を用いた協調センシング技術が注目されている。協調センシングにより車両の死角情報を補完することで安全性が向上するが，高精細なセンサデータをリアルタイムに共有するためには，ギガビット級の伝送速度とミリ秒オーダの低遅延性を両立する通信システムが不可欠である。ミリ波通信（FR2）はこの要求を満たす有望な技術であるが，電波の直進性が強く，他車両による動的遮蔽が頻発する道路環境では通信品質が急激に劣化し，通信断が発生しやすいという重大な課題がある。

通信断を防ぐため，遮蔽に強いSub-6GHz帯（FR1）を併用するマルチバンド通信が検討されているが，既存の制御手法には一長一短がある。リアクティブ制御では，通信品質劣化後に切り替えるため切替処理の遅延によりパケット損失が生じる。一方，従来の予測型制御では，将来の劣化を予測して事前に切り替えることでパケット損失を防げるものの，一時的なフェージングに対しても過剰に反応してしまい，不要な帯域切替（ピンポン効果）により周波数利用効率が低下するという問題がある。したがって，動的遮蔽環境下において，高い信頼性と周波数利用効率を両立させる新たな制御手法が求められている。

本研究では，物理層のSINR（Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio）予測とMAC層のHARQ（Hybrid Automatic Repeat reQuest）を連携させた，適応的帯域切替手法を提案する。提案手法は，物理層におけるSINRの二重指標平滑法（Holt法）によるトレンド予測と，適応的EWMAを用いて突発的な急激変化を監視する二段階の監視アルゴリズムを採用し，これをMAC層のHARQ制御と密接に連携させた。これにより，一時的なフェージングによる品質劣化と，動的遮蔽による持続的な品質劣化を正確に識別する。一時的な劣化に対してはHARQの再送機能を用いて回復を図り，持続的な遮蔽が予測される場合にのみ，事前にSub-6GHz帯へハンドオーバを行う。さらに，制御パラメータの決定にはOptunaを用いたペイズ最適化を適用し，環境に応じた最適なチューニングを実現した。このアプローチにより，無駄な帯域消費を抑えつつ，通信断を未然に防ぐことが可能となる。

提案手法の有効性を検証するため，ネットワークシミュレータOMNeT++と交通流シミュレータSUMOに，3GPP TR 38.901準拠のチャネルモデルを実装した統合シミュレーション環境を構築した。現実的な高速道路環境における動的遮蔽シナリオでの評価の結果，提案手法は96.40%のパケット配信率（PDR）を達成した。これは，ミリ波のみのベースライン手法（59.58%）に対し約37%，HARQのみの手法（90.33%）に対し約6%の大幅な改善である。また，平均遅延は4.56msに抑えられ，V2Xサービスの要求条件（10ms以下）を十分に満たした。さらに，スループットの累積分布関数（CDF）における5パーセンタイル値の向上を確認し，最悪ケースにおいても安定した通信が可能であることを示した。加えて，遮蔽発生時においてもFR1による約30Mbpsのスループット維持を実現した。これらの結果より，提案手法は周波数利用効率を維持しながら，動的遮蔽環境下においても高い信頼性を実現できることを実証した。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
第 2 章 関連技術	2
第 3 章 システムモデル	3
3.1 伝搬モデル	3
3.1.1 受信電力の算出	3
3.1.2 4.6–4.9GHz 帯の伝搬損失モデル	3
3.2 周波数利用効率	4
第 4 章 提案手法	5
4.1 周波数利用効率 (Spectral Efficiency)	5
4.1.1 共通定義と観測パラメータ	5
4.1.2 マイクロセル (Microcell) の定式化	5
4.1.3 マクロセル (Macrocell) の定式化	6
4.1.4 システム全体の周波数利用効率	6
4.2 エネルギー効率 (Energy Efficiency)	6
4.2.1 マイクロセルのエネルギー効率	7
4.3 最適化問題の定式化	7
4.3.1 決定変数の定義	7
4.3.2 目的関数	8
4.3.3 制約条件	8
第 5 章 シミュレーション評価	9
第 6 章 結論	10
6.1 まとめ	10
謝辞	11

図 目 次

表 目 次

第1章 序論

本章では、本研究の背景となるローカル5G(L5G: Local 5G)とミリ波通信の課題について詳述し、既存研究の限界を踏まえた研究目的と主な貢献について述べる。

1.1 研究背景

第2章 関連技術

本章では、本研究の基盤となる関連技術について詳述する。まず、V2X通信の概要と規格化動向について述べ、次にミリ波通信の特性と課題について説明する。続いて、本研究で活用するHARQの仕組みと、SINR予測に用いる時系列予測手法について解説する。

第3章 システムモデル

本章では、本研究で想定するシステムモデルを定義する。まず、V2V通信を行う道路環境と車両配置について述べ、次にデュアルバンド構成の詳細を説明する。続いて、ミリ波通信に影響を与える遮蔽モデルについて述べ、最後にシミュレーションで使用する通信パラメータを示す。

3.1 伝搬モデル

ローカル5G(L5G)では、免許申請時にカバーエリアおよび調整対象区域を算出するために、総務省が定めた伝搬モデルに基づく計算が求められる。本節では、L5G免許申請支援マニュアル[1]に基づき、4.6–4.9GHz帯であるSub6での伝搬モデルについて述べる。

3.1.1 受信電力の算出

受信電力 P_r は、以下の式で算出される：

$$P_r = P_t + G_t - L_f + G_r - L - M \quad (3.1)$$

ここで、 P_t [dBm]は送信電力(基地局の空中線電力)、 G_t [dBi]は送信アンテナ利得、 L_f [dB]は基地局の給電線損失、 G_r [dBi]は受信アンテナ利得、 L [dB]は伝搬損失、 M [dB]はマージンである。マージンはSub6の場合8dBが規定されている。

3.1.2 4.6–4.9GHz帯の伝搬損失モデル

4.7GHz帯(Sub-6)における伝搬損失 L は、自由空間伝搬損失式および拡張秦式を基礎として、基地局と陸上移動局間の距離 d_{xy} [km]に応じて以下のように算出される。

(1) 近距離($d_{xy} \leq 0.04$ km)

距離が40m以下の場合、自由空間伝搬損失式を用いる：

$$L = L_0 = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 10 \log_{10} \left\{ \frac{d_{xy}^2 + (H_b - H_m)^2}{10^6} \right\} + R \quad (3.2)$$

ここで、 f [MHz]は使用周波数、 H_b [m]は基地局の空中線地上高、 H_m [m]は移動局の空中線地上高、 R [dB]は建物侵入損(屋内設置の場合16.2dB)である。

(2) 中距離($0.04 < d_{xy} < 0.1$ km)

距離が40mを超えて100m未満の場合、近距離モデルと遠距離モデルの補間を行う：

$$L = L_0 + \{2.51 \times \log_{10}(d_{xy}) + 3.51\} \times (L_H - L_0) \quad (3.3)$$

(3) 遠距離 ($d_{xy} \geq 0.1$ km)

距離が 100 m 以上の場合，拡張秦式を用いる：

$$\begin{aligned} L = L_H &= 46.3 + 33.9 \log_{10}(2000) + 10 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \\ &\quad - 13.82 \log_{10}(\max(30, H_b)) \\ &\quad + \{44.9 - 6.55 \log_{10}(\max(30, H_b))\} \cdot (\log_{10}(d_{xy}))^\alpha \\ &\quad - a(H_m) - b(H_b) + R - K - S \end{aligned} \quad (3.4)$$

ここで， α は遠距離に対する係数， $a(H_m)$ は移動局高に対する補正項， $b(H_b)$ は基地局高に対する補正項である。 S は環境による補正值であり，市街地では 0.0 dB，郊外地では 12.3 dB，開放地では 32.5 dB が適用される。

3.2 周波数利用効率

周波数利用効率 η は，単位周波数帯域幅あたり，かつ単位時間あたりに伝送可能な情報量を示す指標であり，単位には [bit/s/Hz] が用いられる。一般に，システム帯域幅を B [Hz]，スループットを R [bit/s] とすると，周波数利用効率は次式で定義される。

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (3.5)$$

第4章 提案手法

本章では、提案する HARQ 連携型予測帯域切替手法の詳細を説明する。まず提案手法の概要を述べ、次に傾向予測アルゴリズム、急激変化検知アルゴリズム、および切替判断アルゴリズムについて数式を交えて詳述する。最後に、HARQ との連携機構と計算量の評価について述べる。

4.1 周波数利用効率 (Spectral Efficiency)

本システムは、マクロセル (Macrocell: M) とマイクロセル (Microcell: m) からなる HetNet 環境を対象とする。

マイクロセルを優先してリソースブロック (RB) N_{RB}^m を割り当て、残余リソース N_{RB}^M をマクロセルが使用する周波数分割方式を採用する。

ここで、システム全体の周波数利用効率 $\eta_{\text{SE}}^{\text{sys}}$ の最大化を目的とする。

4.1.1 共通定義と観測パラメータ

システム帯域幅を W 、総 RB 数を $N_{\text{RB}}^{\text{total}}$ とする。

各セル $k \in \{m, M\}$ における帯域幅 B^k は次式で表される。

$$B^k = W \cdot \frac{N_{\text{RB}}^k}{N_{\text{RB}}^{\text{total}}} \quad (4.1)$$

直前の期間 T において、基地局側で取得可能な観測値セットを \mathcal{O}^k とする。

- R_{obs}^k : 送出量より算出された観測スループット (DL UE Throughput)
- λ^k : 到来量 (Ingress data at PDCP)
- \bar{D}^k : 観測された平均遅延 (MAC/RLC measurement)
- P_{out}^k : パケットドロップ率 (RLC SDU drop rate)
- γ_{obs}^k : UE からの CQI 報告に基づき推定された観測 SINR
- $P_{\text{t,ref}}^k$: 観測時の送信電力
- $N_{\text{RB,obs}}^k$: 観測時の割り当て RB 数

4.1.2 マイクロセル (Microcell) の定式化

マイクロセルは優先的にリソースが割り当てられるが、自身の送信電力 P_t^m を調整することで、エネルギー効率の改善とマクロセルへの干渉抑制を図る。

まず、物理層容量を予測する。マイクロセルの SINR $\hat{\gamma}^m$ は、自身の送信電力密度に比例してスケーリングされると仮定する。

マクロセルからの干渉は定常的なフロアノイズとして扱う近似を用いると、次ステップの送信電力 P_t^m および割り当て RB 数 N_{RB}^m に対する予測 SINR は次式となる。

$$\hat{\gamma}^m = \gamma_{\text{obs}}^m \cdot \frac{P_t^m}{P_{t,\text{ref}}^m} \cdot \frac{N_{\text{RB},\text{obs}}^m}{N_{\text{RB}}^m} \quad (4.2)$$

これより、ドロップ率 P_{out}^m を考慮した物理容量 C^m は次式で予測される。

$$C^m = B^m \cdot \log_2 (1 + \hat{\gamma}^m) \cdot (1 - P_{\text{out}}^m) \quad (4.3)$$

トラフィック需要 R_{req}^m は、観測された到来量 λ^m と遅延 \bar{D}^m を用いてリトルの法則より算出する。

$$R_{\text{req}}^m = \lambda^m + \frac{\lambda^m \bar{D}^m}{T} \quad (4.4)$$

したがって、マイクロセルの予測スループット \hat{R}^m は需要と容量のボトルネックにより決定される。

$$\hat{R}^m = \min(C^m, R_{\text{req}}^m) \quad (4.5)$$

4.1.3 マクロセル (Macrocell) の定式化

マクロセルは、マイクロセルが使用しなかった残余 RB を使用する ($N_{\text{RB}}^M = N_{\text{RB}}^{\text{total}} - N_{\text{RB}}^m$)。本検討において、マクロセルの総送信電力は一定であり、マイクロセルからの干渉変動の影響は無視できるものと仮定する。

したがって、マクロセルの予測 SINR $\hat{\gamma}^M$ は、マイクロセルの場合と同様に電力密度の変化（割り当て RB 数によるスケーリング）のみを考慮し、次式で表される。

$$\hat{\gamma}^M = \gamma_{\text{obs}}^M \cdot \frac{N_{\text{RB},\text{obs}}^M}{N_{\text{RB}}^M} \quad (4.6)$$

これより、マクロセルの予測スループット \hat{R}^M は以下の通りとなる。

$$\hat{R}^M = \min(B^M \log_2(1 + \hat{\gamma}^M)(1 - P_{\text{out}}^M), R_{\text{req}}^M) \quad (4.7)$$

4.1.4 システム全体の周波数利用効率

システム全体の予測周波数利用効率 $\hat{\eta}_{\text{SE}}^{\text{sys}}$ [bps/Hz] は、両セルのスループットの和をシステム帯域幅で除算したものとして定義される。

$$\hat{\eta}_{\text{SE}}^{\text{sys}} = \frac{\hat{R}^m + \hat{R}^M}{W} \quad (4.8)$$

4.2 エネルギー効率 (Energy Efficiency)

本研究では、マイクロセルの送信電力調整によるエネルギー効率の最大化に着目する。システム全体のエネルギー効率も定義可能ですが、最適化の主目的となるマイクロセルのエネルギー効率を優先的に定式化する。

4.2.1 マイクロセルのエネルギー効率

マイクロセルのエネルギー効率 $\eta_{\text{EE}}^{\text{m}}$ [bits/J] は、消費電力に対する有効スループットの比として定義される。

$$\eta_{\text{EE}}^{\text{m}} = \frac{\hat{R}^{\text{m}}}{P_{\text{c}}^{\text{m}}} \quad (4.9)$$

ここで、マイクロセルの総消費電力 P_{c}^{m} [W] は、固定回路電力 $P_{\text{fix}}^{\text{m}}$ と、送信電力 P_{t}^{m} に依存する変動電力の和でモデル化される。

本システムにおけるローカル 5G 基地局 (Sub6 帯) の電力増幅器 (PA) の実効効率 η_{PA} を約 40% と想定する。これにより、消費電力係数 ξ は $\xi = 1/\eta_{\text{PA}} = 2.5$ と設定される。したがって、総消費電力は次式で表される。

$$P_{\text{c}}^{\text{m}} = P_{\text{fix}}^{\text{m}} + 2.5P_{\text{t}}^{\text{m}} \quad (4.10)$$

以上より、決定変数 $P_{\text{t}}^{\text{m}}, N_{\text{RB}}^{\text{m}}$ に対する予測エネルギー効率は次式で定式化される。

$$\hat{\eta}_{\text{EE}}^{\text{m}} = \frac{\min(C^{\text{m}}, R_{\text{req}}^{\text{m}})}{P_{\text{fix}}^{\text{m}} + 2.5P_{\text{t}}^{\text{m}}} \quad (4.11)$$

4.3 最適化問題の定式化

本研究の目的は、システム全体の周波数利用効率 $\hat{\eta}_{\text{SE}}^{\text{sys}}$ およびマイクロセルのエネルギー効率 $\hat{\eta}_{\text{EE}}^{\text{m}}$ を最大化する、マイクロセルの送信電力 P_{t}^{m} および RB 割り当て数 N_{RB}^{m} を決定することです。

これら 2 つの指標は単位および数値のオーダーが大きく異なるため、単純な線形加重和ではスケールの大きい EE が支配的となる。本稿では、この問題に対処するため、Cobb-Douglas 効用関数 (Cobb-Douglas utility function) を用いた多目的最適化問題として定式化する。

Cobb-Douglas 効用関数は、異なるスケールを持つ複数の指標を統合する際に有効であり、スケール不变性と乗法的構造という 2 つの重要な特性を持つ。スケール不变性により、単位やオーダーが異なる SE と EE を公平に扱うことが可能となる。また、乗法的構造により、一方の指標のみを極端に優先するのではなく、両指標をバランスよく改善するインセンティブが与えられる。

さらに、本稿では Cobb-Douglas 効用関数を対数変換した形式で定式化する。対数変換により、最適解を保存したまま数値計算の安定性が向上し、かつ目的関数が凹関数となるため最適化が容易になるという利点がある。

4.3.1 決定変数の定義

(1) RB 数の離散集合

マイクロセルに割り当て可能な RB 数 N_{RB}^{m} は、システム全体の RB 数 $N_{\text{RB}}^{\text{total}}$ に基づいて制限される。選択可能な RB 数の集合 \mathcal{N} を以下のように定義する。

$$\mathcal{N} = \left\{ n \mid n \in \mathbb{Z}, 1 \leq n \leq N_{\text{RB}}^{\text{total}} \right\} \quad (4.12)$$

(2) 送信電力の離散集合

マイクロセルの送信電力 P_t^m は、1dB 刻みで調整可能な離散変数とする。現在の設定送信電力を $P_{t,current}^m$ 、マイクロセルのカバレッジがマクロセルのカバレッジと内接する（境界が接する）際の送信電力を $P_{t,incribed}^m$ とする。これに基づき、選択可能な送信電力の集合 \mathcal{P} を以下のように定義する。

$$\mathcal{P} = \left\{ P \mid P_{dB} \in \{P_{min,dB}, P_{min,dB} + 1, \dots, P_{max,dB}\}, P = 10^{\frac{P_{dB}-30}{10}} \right\} \quad (4.13)$$

ここで、 $P_{min,dB}$ および $P_{max,dB}$ はそれぞれ $P_{t,current}^m$ および $P_{t,incribed}^m$ を dBm 単位で表した値とする。

(3) トラフィック負荷

リソース配分の公平性とマイクロセルへの優先度を評価するため、各セル k におけるトラフィック負荷 ρ^k を、予測容量に対する要求量の比として定義する。

$$\rho^k = \frac{R_{req}^k}{\hat{R}_{cap}^k} \quad (4.14)$$

ここで、 \hat{R}_{cap}^k はパケットドロップ等を考慮しない物理層の最大予測容量 (C^k に相当) です。

4.3.2 目的関数

重み係数 w ($0 \leq w \leq 1$) を用いて、目的関数 U を次式で定義する。

$$U(P_t^m, N_{RB}^m) = w \ln(\hat{\eta}_{SE}^{sys}) + (1-w) \ln(\hat{\eta}_{EE}^m) \quad (4.15)$$

4.3.3 制約条件

最適化における制約条件は以下の通りです。

$$\text{maximize } U(P_t^m, N_{RB}^m) \quad (4.16)$$

$$\text{subject to } N_{RB}^m \in \mathcal{N}, \quad (4.17)$$

$$P_t^m \in \mathcal{P}, \quad (4.18)$$

$$\rho^m \leq \rho^M \quad (4.19)$$

式 (4.17) はマイクロセルに割り当てる可能な RB 数の範囲を定義し、式 (4.18) は送信電力が 1dB ステップの離散値をとることを示します。式 (4.19) はマイクロセルのトラフィック負荷がマクロセル以下となることを強制する制約です。この負荷制約により、マイクロセルに十分なりソース (RB および電力) を優先的に割り当て、局所的な輻輳の回避を保証します。

この問題は、離散変数 (RB 数セット \mathcal{N} および電力セット \mathcal{P}) の組み合わせ最適化問題となります。

第5章 シミュレーション評価

本章では、シミュレーション実験により提案手法の性能を評価する。まずシミュレーション環境と評価指標について述べ、次に比較手法を説明する。その後、PDR、スループット、遅延等の観点から提案手法の有効性を検証し、考察を行う。

第6章 結論

本章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

6.1 まとめ

本研究では、ミリ波V2V通信における動的遮蔽による通信断を防止するため、HARQと連携した適応的SINR予測に基づく動的帯域切替手法を提案した。

謝辞

本論文の執筆，および研究活動にあたり藤井威生教授には多大な助言および指導を賜りましたことを深く感謝申し上げます。また，B4 服部のさんをはじめとした研究室の先輩と同期の方々に大変多くのご協力を頂いたおかげで本論文を無事書き上げることができました。藤井研究室並びに同研究センターの石橋(功)研究室，李研究室の皆様にもお世話になりました。この場をお借りして深く感謝の意を示します。

参考文献

[1] 総務省. ローカル5g免許申請支援マニュアル. 第3.02版, 2024. <https://www.soumu.go.jp/>.