

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	2210177
氏 名	鐘ヶ江 僚太
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ー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の二重指数平滑法（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帯へハンドオーバーを行う．さらに，制御パラメータの決定にはOptunaを用いたベ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4.56 msに抑えられ，V2Xサービスの要求条件（10 ms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30 Mbps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	5
4.2	エネルギー効率	6
第5章	シミュレーション評価	7
第6章	結論	8
6.1	まとめ	8
	謝辞	9

图 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 8 dB 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 40 m 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 16.2 dB）である．

(2) 中距離 ($0.04 < d_{xy} < 0.1$ km)

距離が 40 m を超え 100 m 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 ($d_{xy} \geq 0.1 \text{ km}$)

距離が 100 m 以上の場合，拡張秦式を用いる：

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

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

本システムにおける周波数利用効率 (Spectral Efficiency: SE) の定義および予測モデルについて述べる．システム全体の帯域幅を W [Hz]，システムの総リソースブロック (RB) 数を $N_{\text{RB}}^{\text{total}}$ とする．ある基地局に割り当てられた RB 数を N_{RB} ，そのセルスループットを R [bps] とすると，当該基地局に割り当てられた帯域幅 B [Hz] は次式で表される．

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

したがって，周波数利用効率 η_{SE} [bps/Hz] は次式で定義される．

$$\eta_{\text{SE}} = \frac{R}{B} = \frac{R}{W} \cdot \frac{N_{\text{RB}}^{\text{total}}}{N_{\text{RB}}} \quad (4.2)$$

本研究では，RB 割り当ておよび送信電力制御の同時最適化を行う．直前の観測期間 T [s] における観測値に基づき，次ステップで割り当てる RB 数 $N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}$ および基地局の総送信電力 P_t [W] に対するスループットを予測する．

まず，物理層における最大伝送容量を推定する．直前の期間 T において当該基地局に割り当てられた RB 数を $N_{\text{RB}}^{\text{obs}}$ ，観測されたセルスループットを R_{obs} [bps] とする．このとき，観測された周波数利用効率に基づき，セル内の実効的な SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) γ_{obs} は，シャノンの公式の逆関数を用いて次式で導出できる．

$$\gamma_{\text{obs}} = 2^{\eta_{\text{SE}}^{\text{obs}}} - 1 = 2^{\left(\frac{R_{\text{obs}}}{W} \cdot \frac{N_{\text{RB}}^{\text{total}}}{N_{\text{RB}}^{\text{obs}}} \right)} - 1 \quad (4.3)$$

次に，観測時の基地局総送信電力を P_t^{ref} [W] とする．次ステップにおいて総送信電力を P_t ，割り当て RB 数を $N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}$ に変更した場合，単位周波数あたりの電力密度および受信雑音帯域幅の変化を考慮すると，予測 SINR $\hat{\gamma}$ は次式でスケージングされる．

$$\hat{\gamma} \left(P_t, N_{\text{RB}}^{\text{alloc}} \right) = \gamma_{\text{obs}} \cdot \frac{P_t}{P_t^{\text{ref}}} \cdot \frac{N_{\text{RB}}^{\text{obs}}}{N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}} \quad (4.4)$$

これより，決定変数 P_t と $N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}$ を用いた場合の物理層容量 C [bps] は次式で推定される．

$$C = \left(W \cdot \frac{N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}}{N_{\text{RB}}^{\text{total}}} \right) \cdot \log_2 \left(1 + \hat{\gamma} \left(P_t, N_{\text{RB}}^{\text{alloc}} \right) \right) \cdot (1 - P_{\text{out}}) \quad (4.5)$$

次に，トラフィックの需要を算出する．期間 T における平均パケット到着率を λ [bps]，平均パケット遅延を \bar{D} [s] とすると，リトルの法則に基づき，システムが処理すべき必要レート R_{req} [bps] は次式で表される．

$$R_{\text{req}} = \lambda + \frac{\lambda \bar{D}}{T} \quad (4.6)$$

実効的な予測セルスループット \hat{R} [bps] は，物理容量 C とトラフィック需要 R_{req} のボトルネックとして算出される．

$$\hat{R} = \min(C, R_{\text{req}}) \quad (4.7)$$

最終的に，予測周波数利用効率 $\hat{\eta}_{\text{SE}}$ は次式となる．

$$\hat{\eta}_{\text{SE}} = \frac{\hat{R}}{W} \cdot \frac{N_{\text{RB}}^{\text{total}}}{N_{\text{RB}}^{\text{alloc}}} \quad (4.8)$$

4.2 エネルギー効率

次に，本システムにおけるエネルギー効率 (Energy Efficiency: EE) の定義および予測モデルについて述べる．エネルギー効率 η_{EE} [bits/J] は，消費電力に対するスループットの比として次式で定義される．

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{R}{P_c} \quad (4.9)$$

ここで， R はスループット [bps] であり， P_c は総消費電力 [W] とする．

本研究では，システムの総消費電力 P_c [W] を，固定電力と送信電力に依存する変動電力の和としてモデル化する．ここで，固定回路電力を P_c^{fix} [W]，基地局の総送信電力を P_t [W] とする．また，ローカル 5G 基地局 (Sub6 帯) における電力増幅器の効率 η_{PA} を約 40% と想定し，その逆数である消費電力係数を $\xi = 1/\eta_{\text{PA}} = 2.5$ と設定する．これに基づき，総消費電力は次式で表される．

$$P_c = P_c^{\text{fix}} + \xi P_t \quad (4.10)$$

したがって，予測エネルギー効率 $\hat{\eta}_{\text{EE}}$ は次式により算出される．

$$\hat{\eta}_{\text{EE}} = \frac{\hat{R}}{P_c^{\text{fix}} + \xi P_t} \quad (4.11)$$

$$\hat{\gamma}^{\text{M}}(P_t^\mu) = \gamma_{\text{obs}}^{\text{M}} \cdot \frac{1}{1 + \beta \cdot P_t^\mu} \quad (4.12)$$

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/>.