

修士論文

URLLC アップリンク通信の Grant-free 伝送における
チャンネル状態を利用した繰り返し送信制御法に関する研究

令和四年度卒業

三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

通信工学研究室

落合健太

目次

第 1 章	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	本研究の目的	6
1.3	本論文の構成	7
第 2 章	URLLC における基礎技術、関連研究	8
2.1	URLLC の概要	8
2.2	URLLC の基礎技術	10
2.2.1	フレーム構成	10
2.2.2	Grant-free 伝送	12
2.2.3	K-repetition(繰り返し送信).....	14
2.3	衝突軽減のための関連研究	16
2.3.1	端末移動性を考慮した繰り返し送信制御	16
2.3.1.2	制御内容	19
第 3 章	推定チャネル値を制御基準とした繰り返し送信制御	21
3.1	提案手法の概要	21
3.2	提案手法の制御基準	22
第 4 章	特性評価モデル	25
4.1	セルモデル	25
4.2	端末モデル	26
4.3	伝搬モデル	26
4.4	トラフィックモデル	26
4.5	遅延時間モデル	27
4.6	受信モデル	27
第 5 章	評価結果	29
5.1	シミュレーション諸元	29
5.2	評価指標	30
5.3	提案手法における制御基準の最適値評価	31

5.4	過剰な送信の低減評価	34
5.5	遅延に対する誤り率の評価	37
第6章	まとめ.....	40
参考文献		42
謝辞		44

第1章 序論

1.1 研究背景

近年の移動体通信技術は技術進化に伴い、大幅に性能を向上させつつ、需要に対応するための変化を遂げている[1]。現在第5世代移動体通信システム5Gでは、通信技術に対する需要の拡大に対応するべく、様々なシナリオが検討されている。代表的なシナリオとしては、多数同時接続(mMTC : Massive Machine Type Communications)、高速大容量(eMBB : Enhanced Mobile Broadband)、超高信頼低遅延通信(URLLC : Ultra-reliable and low latency communications)が挙げられる[2]。上記の中で、本研究で扱うURLLCでは、遅延の観点から既存の通信手法を用いて要求性能を達成することが困難であるということから、通信手法の再設計が必要とされている[3]。

端末から基地局へのアップリンク送信を行う既存の通信手法として、パケット生起後、基地局へ通信に必要なリソース割り当てを要求し、それによって返送されたリソース割り当て情報(Grant)を基に送信を行う Grant-based 伝送が存在する[4]。Grantを受信するまでの遅延はほとんどのURLLCのユースケースにおいて致命的なものであり、リソース割り当てによる遅延を低減する必要がある。そのため、この手法を改良し、リソース割り当てによる遅延を低減した Grant-free 伝送が現在検討されている[5]。Grant-free 伝送では、それぞれの端末に対してパケット生起後行っていたリソース割り当て手順を簡略化し、パケット生起前に基地局からあらかじめ全ての端末に対してリソース情報を送信することでパケット生起後に即時送信を行うことが可能となる。

パケット生起前のリソース割り当て手法には2種類存在し、1つはLTEで使用されているSPS(Semi-Persistent Scheduling)通信と同様に、各端末に対して送信を行うための時間、周波数リソースの割り当てを行う。このリソース割り当てでは、各端末に対して専用のリソースが割り当てられ、割り当て内容はDCI(Downlink Control Information)によって一定周期ごとに変更される。この手法は、周期的なパケット生起において有効であるが、URLLCのユースケースで検討されている散発的なパケット生起においてはリソース利用効率の観点から非効率的である。もう一つの手法は、基地局によって送信された時間、周波数リソースの全体情報、送信リソース周期など、SPS通信に比べて大まかなリソース情報を全端末にまとめて送信し、その内容を基に端末が送信を行う手法であり、本研究ではこの手法について着眼する。この手法で端末にリソースを割り当てる形式として、各端末に専用の帯域を割り当てる形式と、複数端末で帯域を共有する形式の二つが存在する。各端末に専用の帯域を割り当てる場合、送信先のリソースの重複が発生しないため、セル内の他端末による干渉を受けずに高い受信

SINR(Signal to Interference and Noise power Ratio)を得ることができるが、散発的なパケットを想定する URLLC においてはリソース利用効率の観点から非効率的である。よって、本研究では、全端末で全帯域を共有する形式に着眼する。しかし、複数端末で帯域を共有する場合、送信先のリソースが重複し、パケットの衝突が発生する可能性が生じている。パケット衝突は信頼性向上の妨げとなり、URLLC 要件達成における課題点の一つとなっている。

URLLC の要件を達成する技術において、特に重要なものとされているのが再送技術である[6]。再送における既存手法として、Chase 合成を用いた ARQ(automatic repeat request)が存在する[7]。この手法では、受信信号の復号処理後、復号に失敗していた際に、再送を要求する信号を送信後、復号失敗した信号と最大比合成を行うことで、信頼性を高めている。しかし、再送要求の通信に伴う信号のやり取りや信号の復号処理によって発生する遅延は URLLC において致命的なものであるため、3GPP(3rd Generation Partnership Project) Release15 では再送要求処理を排除した再送手法である K-repetition(繰り返し送信)が示されている[8]。この手法では、基地局からの再送を求める信号を待たずにパケットの複製をあらかじめ決定された回数の連続送信を行うことで、再送処理に伴う遅延を削減しつつ、信頼性を確保している。しかし、同一パケットの送信を繰り返し行うことにより、チャネル条件が良い場合においては要求される信頼性以上の過剰な送信が発生する問題が発生している[9],[10]。

過剰な送信は他端末の送信のパケット衝突率増加の原因となり、信頼性の向上を制限するため、過剰な送信やパケット衝突による影響を低減するための研究がおこなわれている。研究[11]では、平均的なチャネル状態が良いときに変調方式、MCS(Modulation and Coding scheme)の符号化率を上げることで、送信信号のデータ量を削減する。これによってリソース消費量を抑え、MCS の制御内容に応じた電力制御設定を行う。送信信号のデータ量を削減したことにより、パケット衝突時のリソース重複部分が少量である可能性が高くなるため、重複した際の影響が低減する。研究[12]では、送信後の再送に専用のリソースを割り当てることで、再送時のパケット衝突を避け、通信の信頼性を高める手法が研究されている。研究[13]では、NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access)を用いて、時間、周波数リソースだけでなく、電力領域でのリソース分割を用いることで、パケットの衝突を避ける手法が研究されている。以上の内容から、Grant-free 伝送のパケット衝突への対策として、MCS や変調方式などを用いてリソースの重複を避ける、もしくは重複による影響を低減することを目的としたものが多く、信頼性に応じて繰り返し送信回数を制御することで過剰な送信を抑制し、衝突確率を低減するための研究は現状少ない。研究[14]では SNR(Signal Noise Rate)の統計解析を基にチャネル状態を予測し、MCS と送信回数を制御しているものの、制御基準は統計的な数値に基づいており、送信時点でのチャネル状態との乖離が存在する。更に、研究[15]では、端末速度を基に算出を行ったフェージングの時間相関値、すな

わちチャネル状態の変動の速さを推定し、その変動が速いと推測できる場合に時間ダイバーシティ効果量が高くなるため、チャネル状態が良いと判断し、送信回数を低減する繰り返し送信制御について検討している。その結果、送信回数の制御を行うことによって、パケット衝突率の低減に成功している。しかし、この手法ではチャネル変動の速さのみを基準としており、送信時のチャネル状態を推定していないため、繰り返し送信の制御基準が不正確であることから、大きく誤り率を改善することができていない。

1.2 本研究の目的

本研究では、**Grant-free** 伝送における繰り返し送信制御によって発生する過剰な送信、パケット衝突による影響を軽減し、通信の信頼性を向上させることを目的とする。

この目的を達成するためには、繰り返し送信によって発生する過剰な送信を低減しつつ、より高い信頼性が得られる通信手法を検討する必要がある。従来研究では、チャネル状態の変動を基にチャネル状態の推定を行っている。この手法では、送信時のチャネル状態を推定していないため、繰り返し送信回数の制御が不適切なものになるおそれがあり、繰り返し送信によって得られる誤り率を改善できていない。そのため、本研究では、チャネル状態をより正確に制御に反映するべく、繰り返し送信回数を決定する初回送信時点でのチャネル状態の推定値を制御基準に追加し、繰り返し送信回数の制御を行う。これによって、従来研究に比べてより正確な繰り返し送信回数の制御が可能となり、送信回数を減らしつつ低いパケット誤り率を得ることが期待できる。

本研究では、より低いパケット誤り率を得るべく、最適な繰り返し送信の制御内容を模索する。従来研究では、過剰な送信とそれに伴うパケット衝突率の低減を目的としているため、URLLC の要求条件を満たしつつ送信回数を最も低減できる閾値を最終的に選択している。それに対し、本研究では誤り率が最低になる様な制御を目指すため、制御基準について見直す必要がある。よって、制御内容の最適化を行うべく、ベースとなった従来研究の制御基準値であるフェージングの時間相関値の閾値をパケット誤り率が最低になるよう選択し、選択した時間相関値に応じたチャネル状態の閾値について検討を行う。

その後、選択した制御内容を基に、提案手法の性能を誤り率とパケット衝突率を中心に **K-repetition** と従来研究との比較を行っていく。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の様に構成される。第 2 章では URLLC の要件達成のためにこれまで検討されている技術群について記述した後、本研究における研究対象である **Grant-free** 伝送における **K-repetitions**(繰り返し送信)の課題点と、それに対する研究である従来研究、それによって得られた結果の傾向と課題について記述する。第 3 章では、提案手法の繰り返し送信制御の概要について記述する。そして、第 4 章では計算機シミュレーションにおける評価モデルを示し、続く第 5 章で計算機シミュレーションによる特性評価の結果を示し、提案手法の有効性を示した後、第 6 章で本研究のまとめを行う。

第2章 URLLC における基礎技術、関連研究

本章では、URLLC において検討されている基礎技術と、それらに対する関連研究について記述する。2.1 節では URLLC の概要やユースケース、それに伴う要求条件などを述べる。2.2 節では、URLLC において、要件達成のために検討されている技術について述べる。2.3 節では本研究の課題点である過剰な送信によって生じるパケット衝突を抑制するために行われた過去の研究について述べる。

2.1 URLLC の概要

第五世代移動体通信 5G では、従来の高速データ通信に加えて、様々な需要によりサービスの多様化が検討されている。その代表的なシナリオを以下に示す。

- ・ 高速大容量(eMBB)

現在存在するサービスを更に改良し、性能を向上させたものであり、特に現代の無線伝送では、データ量の増加がすさまじく、4K、8K など解像度の高い映像を伝送する必要があるため、大容量のデータを高速で伝送することが求められる。その他にも利用状況は幅広く、広帯域通信やユーザーが密集するホットスポットなどの使用が主に検討されている。

- ・ 多数同時接続(mMTC)

IoT 産業の本格化により、スマート工場などにおいてトラフィックパターンが未解明のアプリケーションが登場する可能性があるため、様々な環境下で多数の端末の伝送に対応するための手法が検討されている。このシナリオでは、遅延の影響を受け辛いデータを中心に扱い、各端末のバッテリー寿命を長持ちさせることが求められている。

- ・ 超高信頼低遅延通信(URLLC)

NR(New Radio)の中でも最も困難なサービスであり、4G 以前の通信に対して遅延は 10 分の 1 ほどまで短縮されることが求められている。

遠隔手術や自動運転など、4G 以前の通信では安全性の観点から実現困難とされていたリアルタイムでの操作が求められる通信を主に扱う。

上記に加え、携帯電話の世界統一規格である IMT(International Mobile Telecommunications)では、IMT2020(5G に相当)において、様々なユースケースだけでなく、将来現れる未知のユースケースに対応できる様、柔軟性を要求されている[16]。具体的には、図 2.1 に示されるような各ユースケースの異なる要求性能を単一ネットワ

一クでそれぞれ満たすことができることが必要とされている。

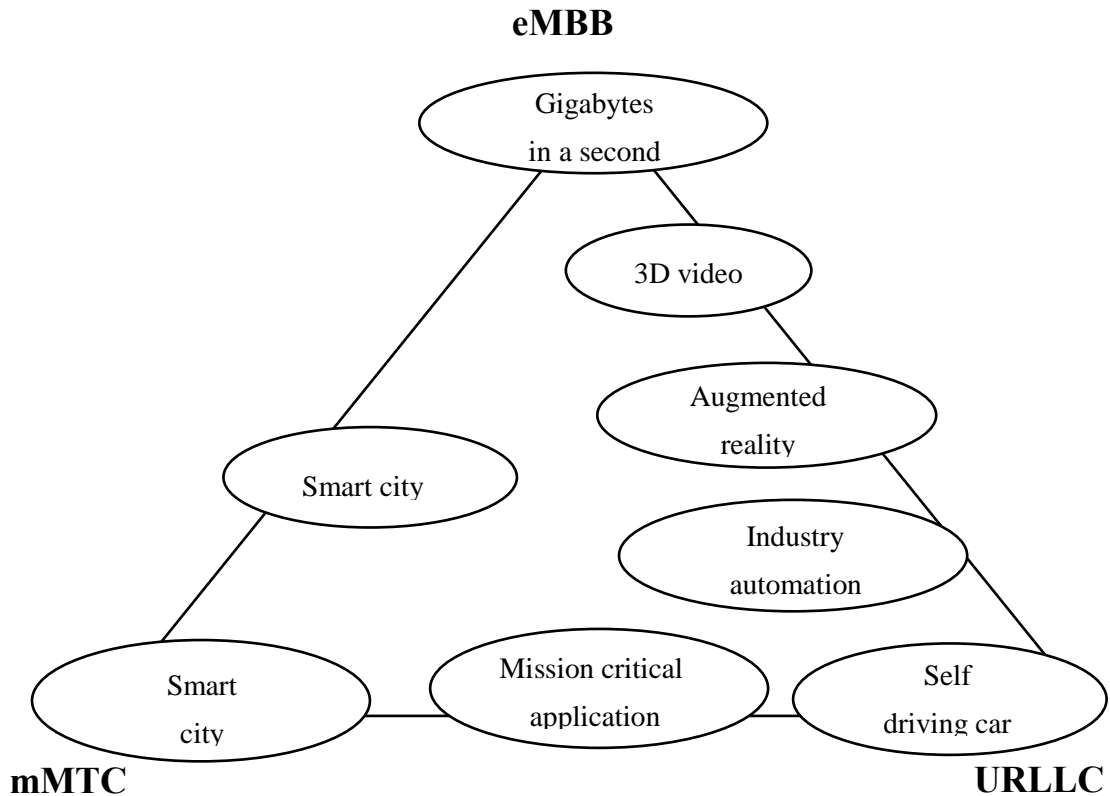


図 2.1 : 5G における多様なシナリオ[16]

そして、5G のシナリオの中でも、本研究で扱う URLLC では、具体的な用途として、以下の項目が主に検討されている。[17]

- ・ 自動運転，交通制御
交通事故の削減や緊急車両の移動をサポートするために車車間通信，路車間通信だけでなく歩行者に対して警告信号を送信する。
- ・ ロボットなどの遠隔操作
現在スマート工場などのロボットを用いた製造業の自動化や運送業の自動化が期待されており，5G を用いてこれらを制御するということが検討されている。
- ・ 遠隔手術
遠隔手術は本来光通信などの固定ネットワークを用いて実現するものであったが，災害地や危険地帯での使用が困難であるため，それらの地域において 5G を用いて遠隔手術を行うケースが検討されている。

上記のユースケースでは短時間での通信が求められ、通信失敗による影響が大きい

ため、3GPPでは「32[byte]のパケットを生起後遅延1[ms]以内に 10^{-5} 以下のパケット誤り率が得られる通信」という要求条件が定められている。この要求条件内における遅延の定義は、パケットの生起処理後、基地局によって正確に復号されるまでの時間である。この要求条件は既存の通信手法では達成困難であることから、現在URLLCの要求条件を満たすための通信手法の検討が行われている。

2.2 URLLCの基礎技術

本研究では、URLLCの要求条件を満たすために提案された既存の通信手法について説明を行う。URLLCの要求条件を満たすための技術について検討するにあたり、既存の通信手法では遅延要件を満たすことが困難であるということから、通信規格の根本的な見直しが行われている。その焦点について以下に示す。

- ・ 無線信号の伝送時間の短縮
- ・ 送信前のスケジューリング処理によって発生する遅延の短縮
- ・ ACK/NACK(Acknowledgement/Negative Acknowledgement)を用いた再送時に発生する遅延の短縮

上記の点を考慮して改善された技術について、本節では触れていく。2.2.1項では無線信号のスロット長を可変にすることで様々な需要に対応可能となったフレーム構成、2.2.2項ではスケジューリング処理によって発生する遅延を短縮すべく提案されたGrant-free伝送、2.2.3項ではACK/NACKを用いない再送方式であるK-repetitionについて記述していく。

2.2.1 フレーム構成

5Gでは、多様化した需要に対応できる様フレーム構成に改良が加えられている[18]。その全体像を図2.2に示す。

5Gでは、要求条件の異なるユースケースに対応すべく、様々なサブキャリア間隔をサポートできるOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)を使用する。フレーム構成は、10msのフレームを10個のサブフレームに分割している。さらに、そのサブフレーム内にサブキャリア間隔毎に長さが増えるスロットが収納されている。このフレーム構成において、送信に用いるサブキャリア間隔、すなわち送信信号の帯域幅を広げることで、スロット長は短くなり、伝送遅延を低減することが可能となる。また、サブキャリア間隔によってサブフレーム内に収納可能なスロットの数は変化し、最も小さいサブキャリア間隔である15kHzの時、サブフレーム内のスロット数は1つであるが、サブキャリア間隔を30kHzにした時にはスロット数は2つとなり、同様に60kHzであれば4つと、サブキャリア間隔の増加に応じてサブフレーム内のスロット数

は増加する。

サブキャリア間隔が可変であることで、様々な需要に対応するための拡張性が改善している。例としては、従来の LTE と同じサブキャリア間隔である 15kHz を採用した場合、単一ネットワークにおいて LTE との共存が可能となり、30kHz や 60kHz のサブキャリア間隔を採用した場合、伝送時間を短縮し、遅延を達成することができるなどの利点が挙げられる。

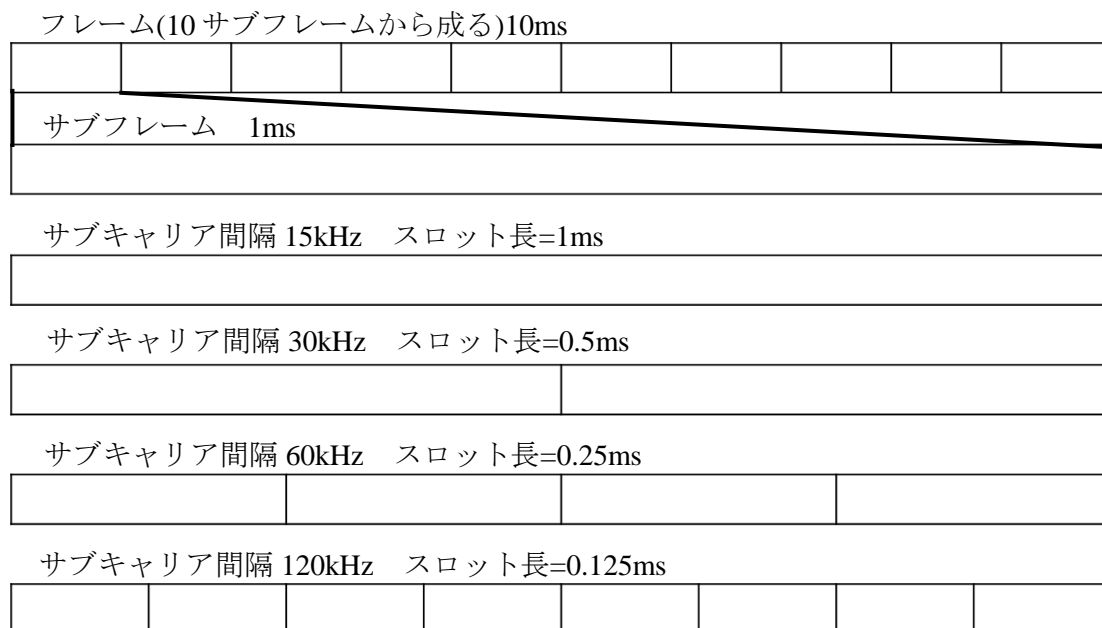


図 2.2 : OFDM のフレーム構造

スロット内に 14 シンボル



1RB あたり 2 シンボルの場合スロットを 7 つに分割



1RB あたり 7 シンボルの場合スロットを 2 つに分割



図 2.3 ミニスロット概要

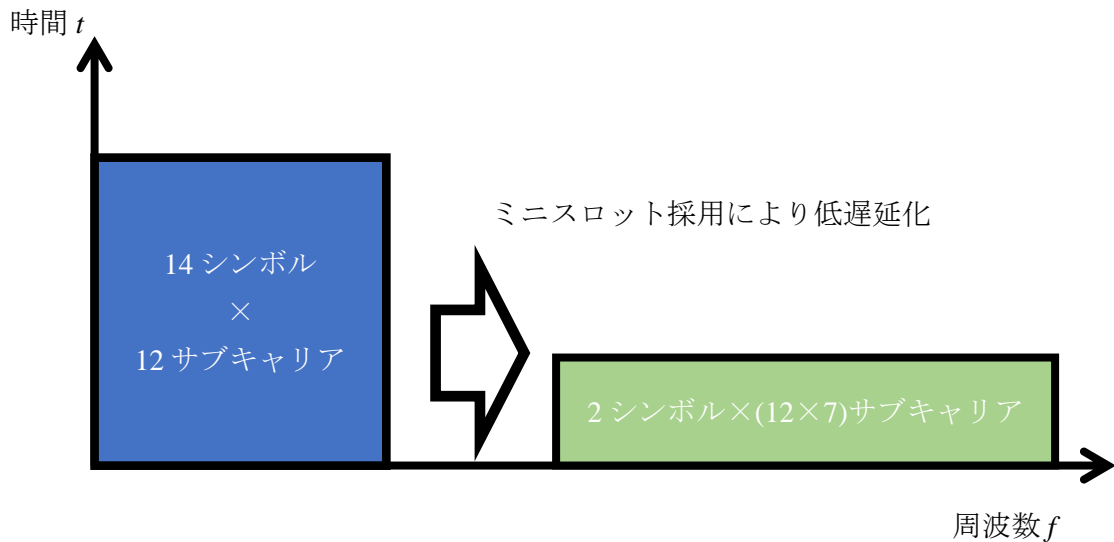


図 2.4 ミニスロット採用による低遅延化

更にスロット内の分割方法について図 2.3 に示す。5G のフレーム構成において、時間リソースの割り当ては可変となっており、スロット内の 1~13 個のシンボル単位でのリソース割り当てを使用したミニスロットという手法が検討されている。ミニスロットを用いた RB の最小単位は(ミニスロット内のシンボル数×12 サブキャリアという構成となっており、図 2.4 の様に周波数リソースの使用量を増加させることで、同一サイズの packets を送信するのに必要な時間リソースの消費量が低減され、低遅延化が可能となる。

2.2.2 Grant-free 伝送

URLLC のアップリンク通信において検討されている Grant-free 伝送について説明する。従来の Grant-based 伝送では、各端末の通信が重複しないよう、基地局側で予め送信先のリソースの割り当てを行う。各端末はパケットの生起後にリソース割り当ての要求を基地局へ送信し、要求を受けた基地局は、各端末の送信先となるリソースが重複しないようスケジューリングを行い、スケジューリング内容(Grant)を各端末へ送り返す。その後、端末は基地局から受信した Grant を基に送信を行う。

基地局側のスケジューリングによって衝突が発生しない通信が可能になるが、スケジューリング手順に伴う遅延は URLLC の遅延要件を満たすにあたって致命的であるため、削減する必要がある。そして、スケジューリングに伴う遅延を削減するべく提案されたのが Grant-free 伝送である。Grant-free 伝送の通信内容を Grant-based 伝送と比較したものを図 2.5 に示す。

Grant-free 伝送では、パケット生起前の端末に予めリソースを割り当てておくことで、

パケット生起後のスケジューリング手順による制御遅延を削減した送信を行うことが可能となる。Grant-free 伝送のリソース割り当て手法には 2 種類存在し、type1 では時間、周波数リソースとその周期をネットワーク層において事前に設定し、固定する。type2 では一定周期ごとに時間、周波数リソースを DCI(Downlink Control Information)を用いて変更することが可能である。これは LTE で採用されている SPS(Semi-Persistent Scheduling)と同様の手法である。なお、本研究では Type1 を使用する。Type1 のリソース割り当て内容として、各端末に専用の帯域を割り当てる手法と、複数の端末で周波数帯域を共有する手法が検討されている。URLLC において、各端末のトラフィックは散発的で低負荷なものが多いため、専用の帯域を割り当てる手法はリソース利用効率の観点から非効率的である。そのため、URLLC において Grant-free 伝送を用いる場合、複数の端末で周波数帯域を共有する手法を取る。

上記の手法を用いてリソース割り当てを簡略化したことによって、パケット生起から送信までの遅延を低減することに成功した。しかし、簡略化に伴う課題点として、基地局によるスケジューリングを行わなくなったことで端末間でのリソースの重複を避けるための処理がなくなり、複数の端末で帯域を共有した場合にリソースの重複によるパケット衝突が発生し、通信が失敗する可能性が生じている。

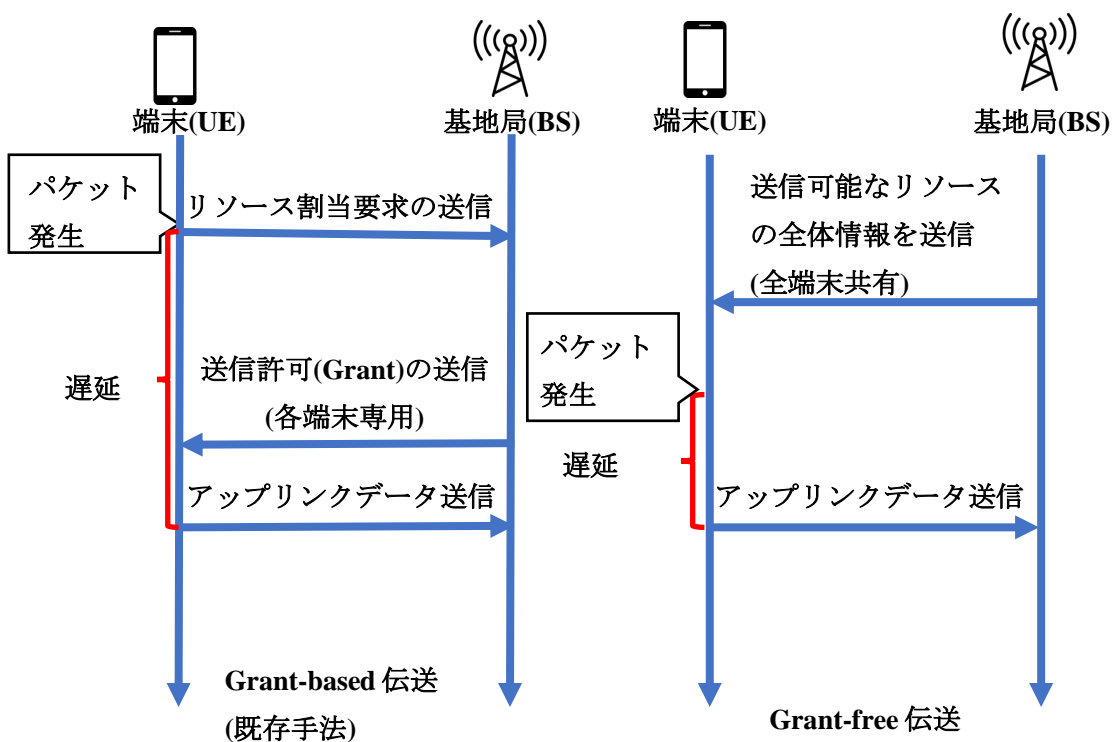


図 2.5 Grant-based 伝送と Grant-free 伝送の通信手順比較

2.2.3 K-repetition(繰り返し送信)

URLLC の遅延要件を満たしつつ信頼性を高めるための再送手法として、**K-repetition** について説明する。5G 以前の再送手法である HARQ(Hybrid automatic repeat request)の概要を図 2.6 に示す。HARQ において、基地局は受信判定の成否に応じて ACK/NACK という応答用の信号を送り返す。送信者側は受信の失敗を示す NACK を受信した場合に再送を行うことでパケット誤り率を低減する。しかし、ACK/NACK を用いた場合、信号の往復によって発生する遅延と各信号に伴う処理遅延は、URLLC の遅延要件を考慮した場合に再送回数が制限される原因となり、誤り率の低減にも制限が生じる。

よって、ACK/NACK を用いない再送手法として、**K-repetition** が提案されている。その概要を図 2.7 に示す。**K-repetition** において、送信者側は複製したパケットを予め決定された回数連続送信を行う。受信者側は連続送信内の複製されたパケットを受け取るたびに合成し、復号処理を行う。複数の同一パケットを送信した信号を合成することで時間ダイバーシティ効果を得る。ダイバーシティ効果を得ることで信号の品質は改善され、パケット誤り率が改善される。

同一パケットの連続送信によって再送に伴う遅延を削減しつつ通信の誤り率を低減することができる。しかし、**K-repetition** では予め決定された回数の連続送信を採用したことにより、受信側で復号が成功した後も送信は中止されずに過剰な送信が行われる問題点が発生している。過剰な送信は Grant-free 伝送の項において前述したパケット衝突が発生する確率を増加させる原因となり、URLLC の信頼性向上における障害となっている。この過剰な送信は、送信が連続送信内で早期に成功しやすい状態、すなわちチャネル状態が良い場合に発生しやすいとされている[9],[10]。

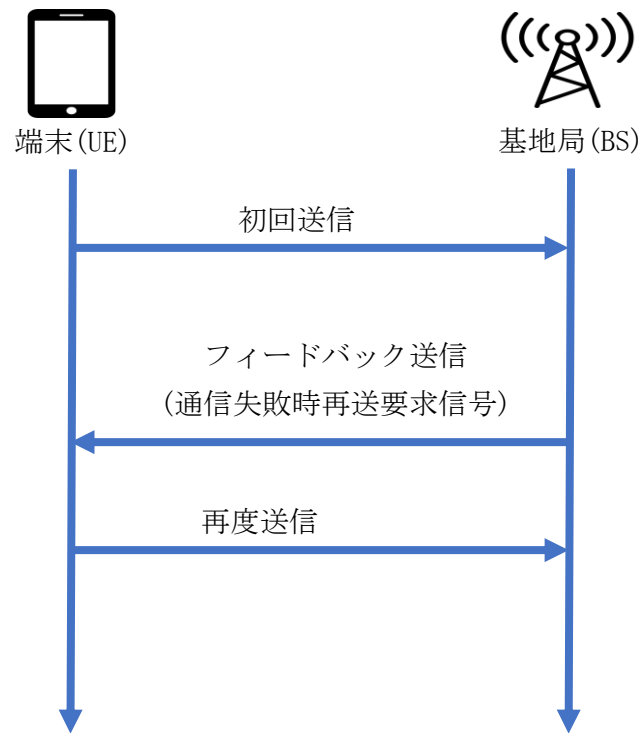


図 2.6 HARQ の再送手順

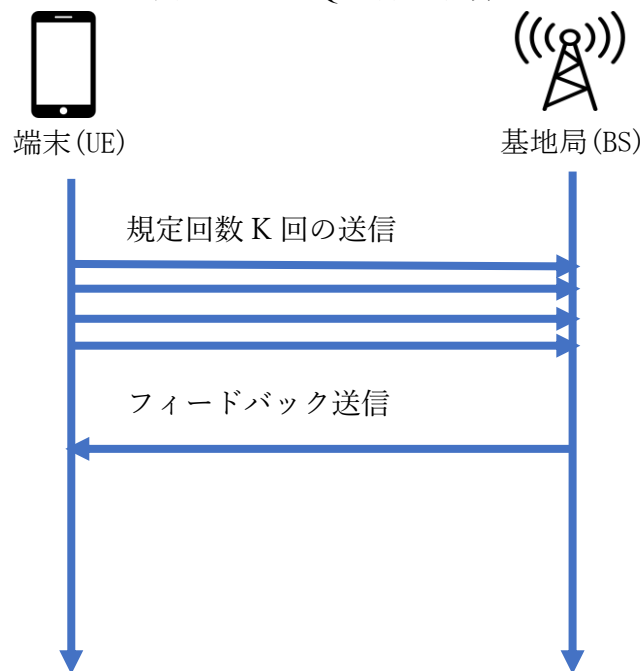


図 2.7 K-repetitions の再送手順

2.3 衝突軽減のための関連研究

URLLC において、Grant-free 伝送と K-repetition を併用したことで発生する過剰な送信、パケット衝突による通信の失敗を低減するために行われた研究について以下に示す。

2.3.1 項では端末の移動速度を通信の信頼性についてそれぞれ記述する。

2.3.1 端末移動性を考慮した繰り返し送信制御

この研究では、K-repetition によって生じる過剰な送信を低減するべく、端末が容易に取得可能な端末速度の情報を基に通信の信頼性を推定し、繰り返し送信の制御を行った[15]。2.3.1.1 目では制御基準となるフェージングの時間相関値について説明を行い、2.3.1.2 目で具体的な制御内容について記述する。

2.3.1.1 フェージングの時間相関値

フェージングとは、大気を伝送媒体として用いる無線通信において、気象や地理的な条件から発生する伝搬路特性の変化である。この変化は信号の伝送帯域、想定する伝搬環境や端末の移動速度によって異なる。本研究ではレイリーフェージングを扱うため、この項ではレイリーフェージングについても記述を行う。

レイリーフェージングとは、移動端末と基地局の間が NLOS(Non line of sight)である際に、多数の反射波が合成された多重散乱波の受信電力変動を示すものである[19]。具体的な内容を図 2.8 に示す。

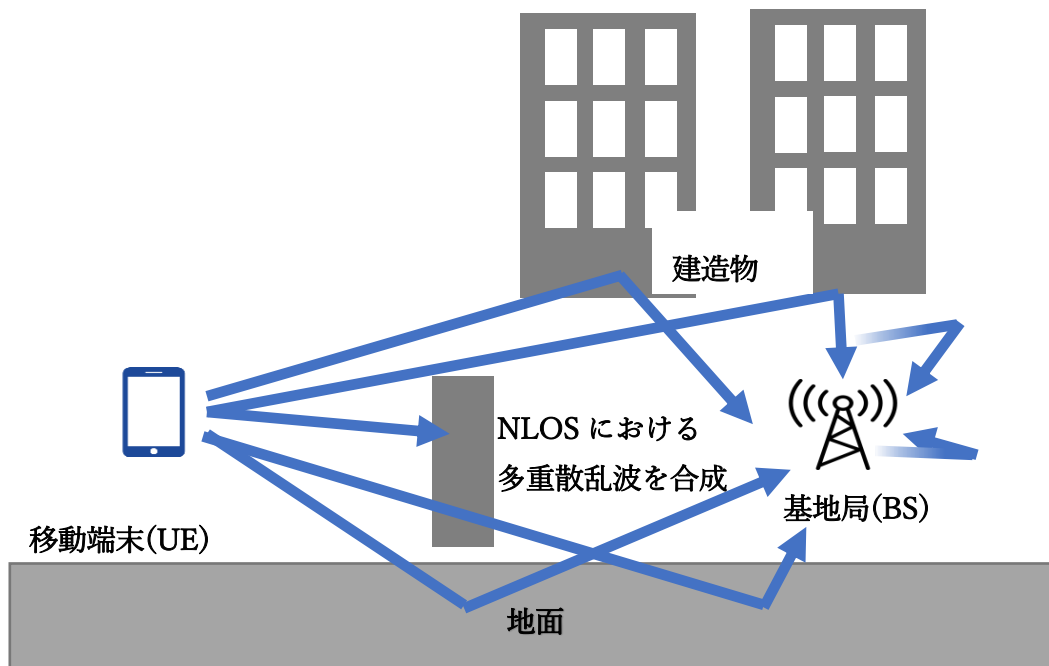


図 2.8 : レイリーフェージングの電波伝搬

図 2.8 より、端末から送信された無線信号は地面や障害物などに反射し、複数の伝搬路を経由して基地局で受信される。これらの反射波を合成したものを多重散乱波という。中でも、本研究で扱う見通し外における反射波が十分に得られる時の多重散乱波の複素包絡線では、同相成分と直交成分の振幅は正規分布となっている。複素包絡線における同相、直交成分の振幅を合成した受信電力のフェージング変動は以下の様なレイリー分布の式に従うため、レイリーフェージングと呼ばれている。

$$f(x) \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

- ・ x : 包絡線振幅
- ・ $2\sigma^2$: 包絡線振幅の 2 乗平均(受信電力に相当)

そして、レイリーフェージングにおける同相、直交成分の振幅でのフェージングの時間相関値は以下の式で示される。

$$\rho = J_0(2\pi v f_c \Delta t)$$

- ・ $J_0()$: 第 1 種 0 次ベッセル関数
- ・ v : 端末速度
- ・ f_c : 搬送波周波数
- ・ Δt : 送信の時間間隔(今回はミニスロット長に相当)

フェージングの時間相関値は、フェージングによってチャネル状態が変化する際の変動度合を示す数値であり、低ければ低いほど、チャネル状態の変動は早くなる。端末速度を 30m/s と 60m/s とした場合のフェージングの時間相関値とチャネル状態の変化をそれぞれ図 2.9, 図 2.10 に示す。端末速度が高いほどフェージングの時間相関値は小さく、チャネルの変動は早くなるため、時間ダイバーシティ効果を得やすい状態となる。時間ダイバーシティ効果を得た場合、繰り返し送信内の各受信信号の電力を合成することで、フェージングによる受信電力の急な減少の影響を抑えることができる。よって、本研究では端末速度が速く、フェージングの時間相関値が低い場合に通信の信頼性が高くなると予測する。

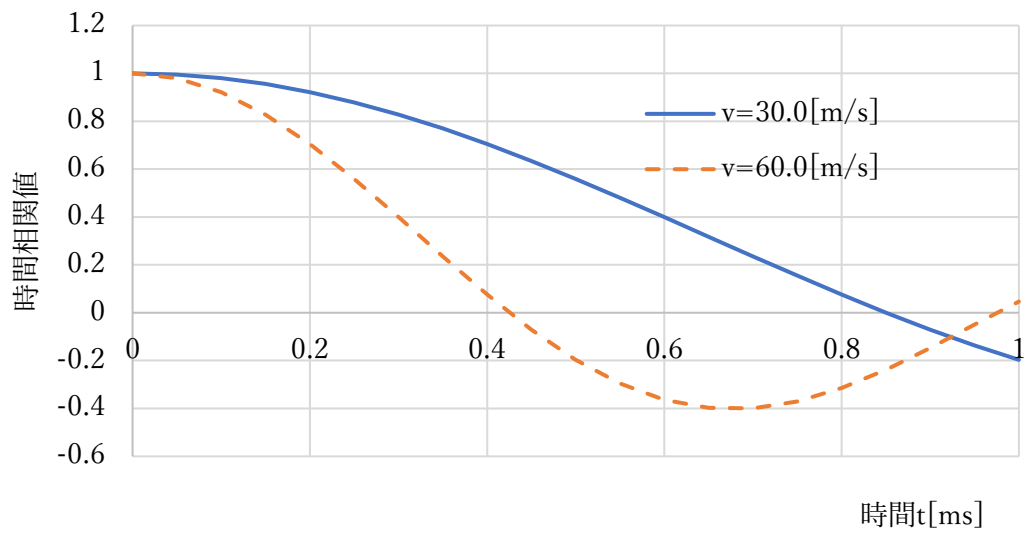


図 2.9 速度ごとのフェージングの時間相関値

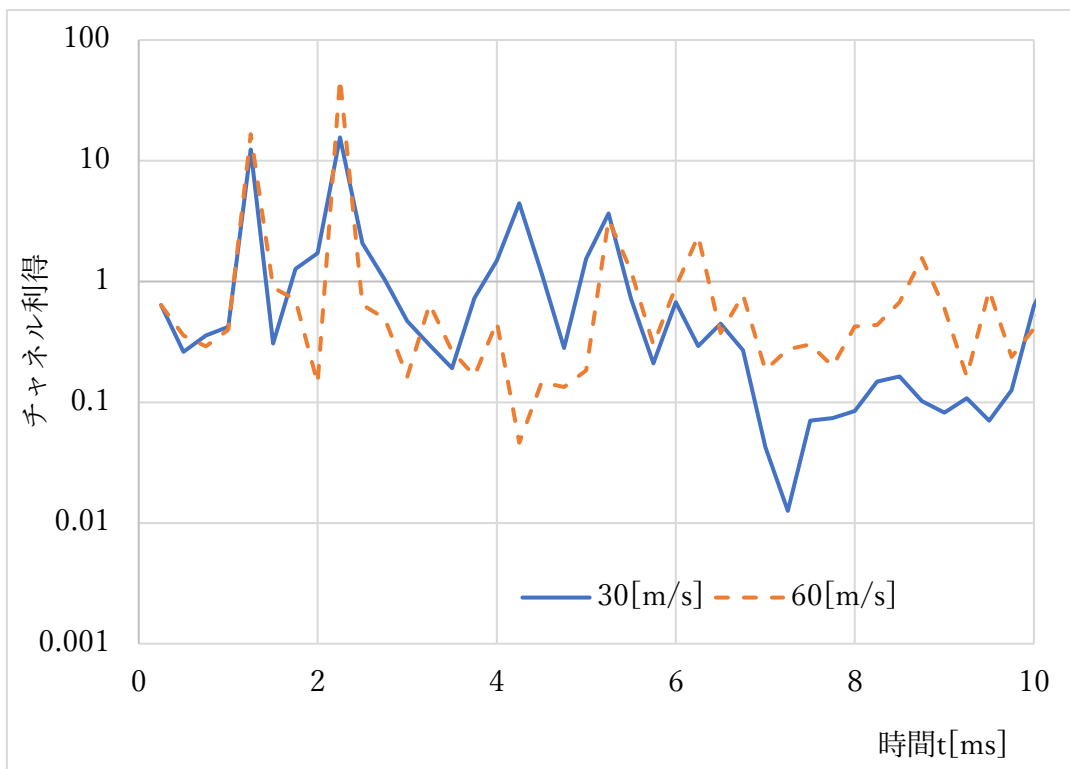


図 2.10 速度ごとのチャンネル変動

2.3.1.2 制御内容

パケット生起後の初回送信時に、端末速度を基にフェージングの時間相関値を算出する。前述のとおり、フェージングの時間相関値が低い場合、チャンネル状態の変動が速くなるため、比較的少ない送信回数で多様なチャンネル状態における信号を受信できることが期待される。よって、時間相関値を算出後、相関値が閾値より低い場合にはチャンネル変動が早く、十分な時間ダイバーシティ効果が得られることから、通信が成功する確率が高いと推測し、送信回数を減らした 2 回の連続送信を行う。逆に、閾値を上回っている場合、確実に時間ダイバーシティ効果を得ることを目的とし、送信回数を 4 回に増やすよう制御を行う。この繰り返し送信制御により、予想される信頼性に応じて連続送信回数を制限することで、パケット衝突率を低減し、1~2 回目の送信に相当する一部の遅延においてパケット誤り率を低減するという結果が得られた。しかし、1ms 経過後の最終的なパケット誤り率については 5G 本来の **K-repetition** の値を下回ることはできていない。フェージングの時間相関値を用いた繰り返し送信回数制御ではチャンネル変動の速さを基に制御を行っており、具体的なチャンネル変動の内容は不明である。チャンネル変動内容が不明であった場合、繰り返し送信回数削減の対象を選択する処理が不正確になり、誤り率を低減することが困難になる。

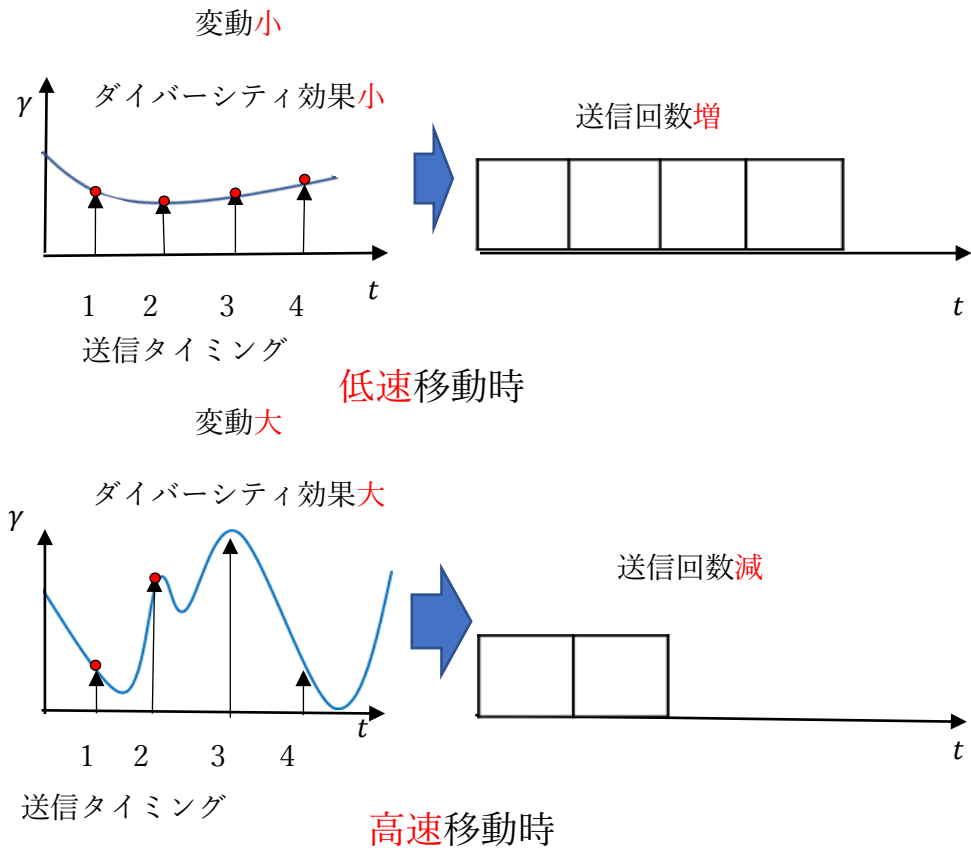


図 2.11 端末移動性を考慮した繰り返し送信制御の概要

第3章 推定チャネル値を制御基準とした繰り返し送信制御

2.3.4 項での結果として、送信回数を低減したことでパケット衝突率が減少し、一部の遅延時間において **K-repetition** によって得られる誤り率を下回ったが、最終的な誤り率については **K-repetition** の方が低い数値が得られるという結果になった。本研究では、この研究[15]を従来研究とし、従来研究以上にパケット衝突率を低減しつつ、パケット誤り率を減少させることを目的とした繰り返し送信制御について検討を行う。

従来研究の制御内容をベースに、より正確な制御を行うべく初回送信時のチャネル状態の推定値を制御基準に追加した繰り返し送信制御を提案する。

3.1 節では提案方式の概要について記述し、3.2 節では提案手法に用いる数値に関する記述を行う。3.3 節では 3.2 節の内容を踏まえて制御内容を説明する。

3.1 提案手法の概要

従来研究である研究[15]では、チャネル状態の変動度合を基に繰り返し送信制御を行い、**K-repetition** によって生じる過剰な送信を低減した。その結果、パケット衝突率は低減し、1~2 回目の送信に相当する部分の遅延に限られるものの、送信回数を 4 回とした **K-repetition** の誤り率を下回っている。これは、過剰な送信の低減によって通信の誤り率を低下させられることを示している。3 回目の送信以降の誤り率においては改善が見られていない。これは、前述の送信回数の削減対象が不正確であったことで、パケット衝突率の低減による誤り率低減に対して送信回数を増やしたことによるダイバーシティ効果の向上の影響が大きいためである。チャネル変動を基にした不正確な制御を行う場合、チャネル変動内容までは推定できないため、送信回数が過剰、もしくは不足する状況が発生する。

よって、繰り返し送信制御により正確な制御基準を採用することで、より効果的に過剰な送信を低減し、通信の誤り率を更に低減させられると推測できる。

本研究では従来手法の制御内容をベースに、繰り返し送信回数を決定する初回送信時点でのチャネル状態の推定値を制御基準値に追加し、従来以上に送信回数を低減しつつ、誤り率を低減する。

3.2 提案手法の制御基準

本研究では、端末速度から算出したフェージングの時間相関値、初回送信時のチャネル状態から算出した SNR 値を基準として繰り返し送信制御を行う。

まず、初回送信時にフェージングの時間相関値、初回送信時のチャネル状態を推定する。その後、推定値をそれぞれの閾値と比較し、その大小関係に応じて送信回数を制御する。制御の内容を図 3.4 に示す。この時、従来研究のチャネル状態の変動の速さを基にした繰り返し送信制御はチャネル状態からの信頼性推定が間接的であったため、低減する送信が不正確になってしまう点に留意し、制御基準は初回送信時のチャネル状態を優先したものとする。そして、初回送信時のチャネル状態が悪い場合には、時間相関値から推定されるチャネル変動度合を基に送信回数を制御することで、チャネル変動に応じた通信の信頼性確保を図る。

初回送信時のチャネル状態から推定した SNR 値 γ_{est} を閾値 Th_{γ} と最初に比較し、閾値より高い場合(a)には、十分な通信の信頼性が期待できることから送信回数を 2 回に低減する。次に、推定 SNR 値が閾値より低かった場合、フェージングの時間相関値 ρ を閾値 Th_{ρ} と比較する。時間相関値が閾値より低い場合(b)、3.2.1 項の内容よりチャネル状態の変動が速くなり、ダイバーシティ効果の観点から通信の信頼性が期待できるため、送信回数を低減する。なお、この信頼性推定手法は変動の速さを基にした間接的な信頼性推定であるため、確実にダイバーシティ効果を得るべく送信回数を 3 回とする。そして、推定 SNR 値が閾値より低く、時間相関値が閾値より高い場合(c)、送信回数を 4 回とすることで、時間ダイバーシティ効果を用いて信頼性を確保する。

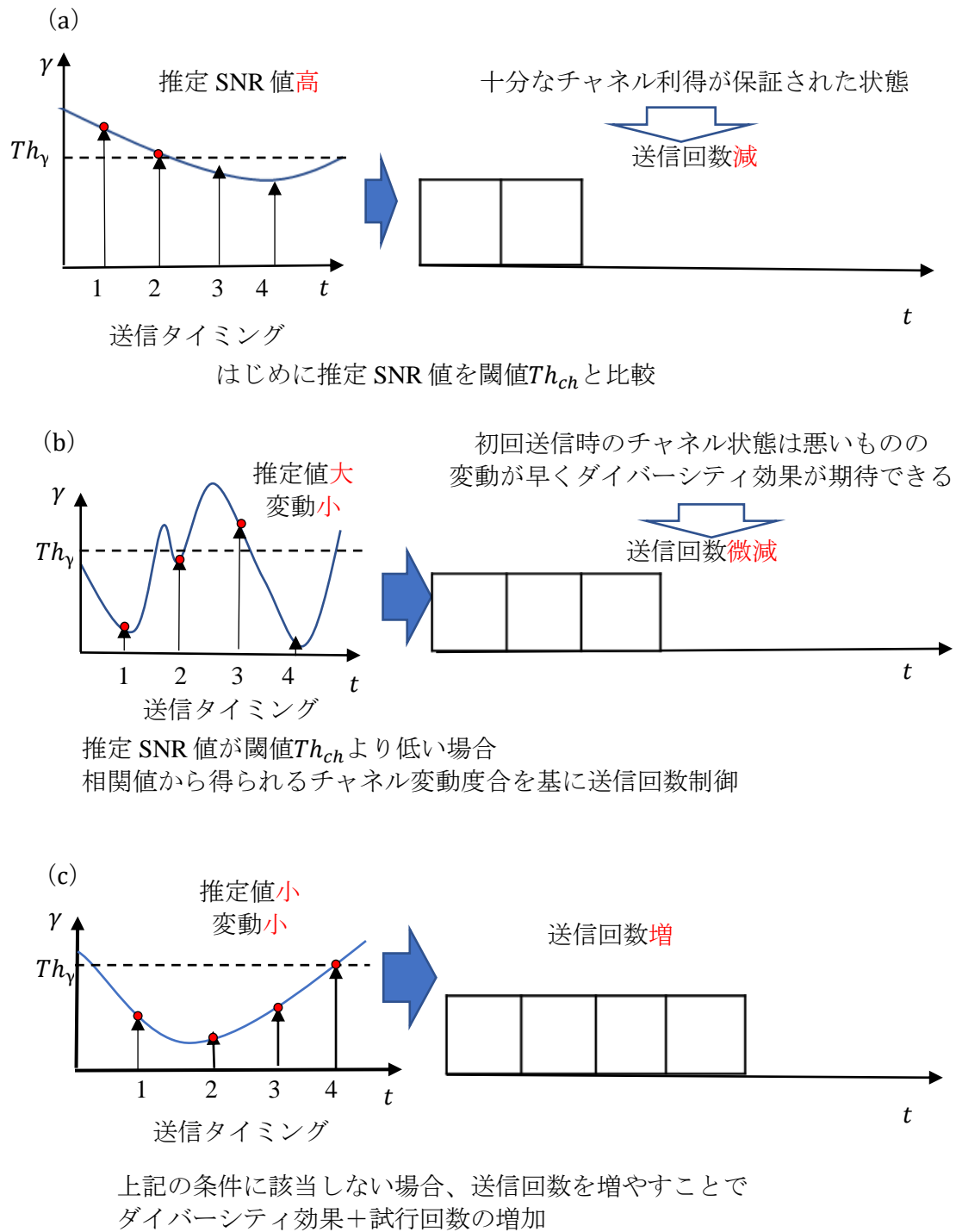


図 3.4 提案手法制御概要

次に、制御基準とする閾値設定について説明を行う。本研究では、従来研究の様にパケット衝突率を低減することが最終的な目的ではないため、パケット衝突率の低減をしつつ、最終的なパケット誤り率を 5G 本来の手法である K-repetition 以下の数値に低減させる制御内容について検討を行う。

チャンネル状態の推定値から算出した推定 SNR 値は、平均受信 SNR 値を基準に変化させる。フェージングの時間相関値は、ある一定のチャンネル変動が見込める時間相関値を設定する。それぞれの閾値はパケット誤り率が最も低い値となる様に最適化を行う。

第4章 特性評価モデル

本章では、URLLC の Grant-free 伝送における繰り返し送信制御の有効性を確認するための計算機シミュレーションによる特性評価のモデルについて記述する。

本研究では、主に従来研究[15]のシミュレーション諸元を使用し、システムレベルでの解析を行うために不足しているパラメータを研究[10]から参照して補う形でシミュレーションを行う。

4.1 節ではセルモデル、4.2 節では端末モデル、4.3 節では伝搬モデル、4.4 節ではトラフィックモデル、4.5 節では遅延時間モデル、4.6 節では受信モデルについて説明を行う。

4.1 セルモデル

図 4.1 に示す様な一辺が r [m]正六角形の単一セルの中に N 台の端末が配置されたセルを用いる。端末はランダムな方向へランダムな速度 v [m/s]で直線運動を行うものと想定する。

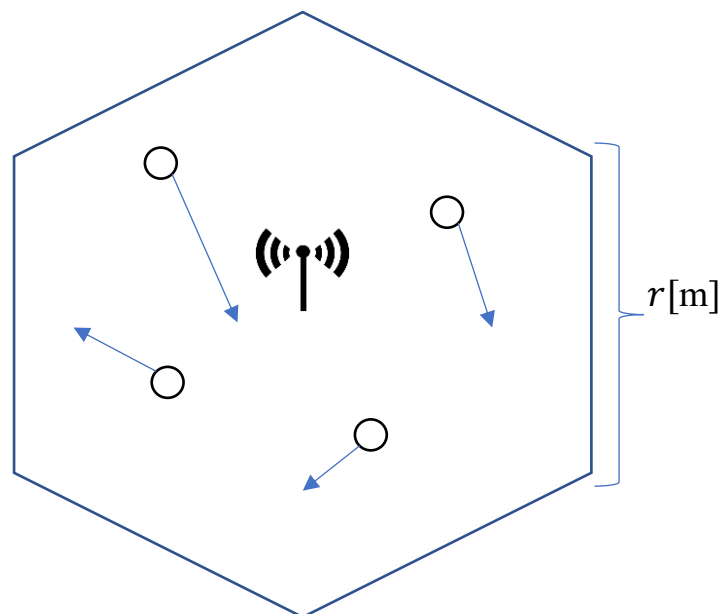


図 4.1 : セルモデル

4.2 端末モデル

各端末は、過去の研究[20]で得られた結果に基づき、平均受信 $\text{SNR}\gamma_{\text{Ave}}[\text{dB}]$ が一定になる様送信電力を調整する制御を行う。なお、この時の送信電力の上限は $P_{\text{MAX}}[\text{dBm}]$ である。更に、送信を行う際に処理時間 $t_{\text{prep}}[\text{ms}]$ を必要とする。

また、各端末はパケット生起後の初回送信前にチャネル推定を行い、その結果を基に連続送信を行う回数を決定する。本来なら正確なチャネル状態の推定は不可能であるが、過去の研究[21]を基にある程度のチャネル推定は可能であると推測する。なお、本研究においては簡易化のために完璧なチャネル推定を行うことができるものとして処理を行う。

4.3 伝搬モデル

搬送周波数の帯域は 5G で使用が検討されている $f_c[\text{GHz}]$ 、サブキャリア間隔は $f_{\text{sub}}[\text{kHz}]$ を用いる。

2つのシンボルが格納されているミニスロットで構成されたリソースブロックを使用する。この時、使用する帯域は生起した $X[\text{byte}]$ のパケットを符号化率 n の QPSK で送信するのに必要なリソースブロック数 B はすなわち以下の式で表される。

$$B = \frac{8X \times n}{2 \times 2 \times 12}$$

そして、使用する帯域幅は $f_{\text{BW}} = B \times f_{\text{sub}} \times 12[\text{kHz}]$ となる。

受信電力 P_R の変動は以下の式で表される。

$$P_R = P_T \times h$$

P_T は目標受信電力であり、 h はフェージングによる電力変動である。距離減衰については、受信電力が一定になる様送信電力設定を行うため考慮しない。

チャネル変動は 3.2.1 節で述べたようにレイリーフェージングを使用する。なお、本研究ではシャドーイングは想定せず、熱雑音電力 P_{noise} のみを考慮する。

4.4 トラフィックモデル

生起確率はセル単位で平均 r_{pkt} のパケット到着率を使用したポアソン生起による生起判定を行う。

セルで生起したパケットはランダムな端末内のバッファ内に格納される。この時、すでにバッファ内でパケットが存在する場合にはキューイングが発生し、前に生起したパケットが送信されるまでは次のパケットを送信できないものとする。

4.5 遅延時間モデル

遅延時間の算出は以下の式で行われる。

$$t_k(\text{遅延時間}) = t_{\text{queue}} + t_{\text{prep}} + t_{\text{align}} + k \times t_{\text{TTI}} + t_{\text{proc}}$$

- ・ t_{queue} : キューイングによる遅延
- ・ t_{prep} : 送信前の処理時間
- ・ t_{align} : フレームアライメントによる遅延
- ・ k : 受信成功するまでの TTI 数
- ・ t_{TTI} : 送信単位時間(=ミニスロット長)
- ・ t_{proc} : 受信処理時間

4.6 受信モデル

受信の成否は図 4.2 に示される様な 3GPP のレイリーフェージングにおける SNR 対 BLER 特性[22]に従って判定を行う。なお、従来研究と誤り率の数値を合わせるために受信 SINR に 4dB 分ほど乗算補正をかける。

また、それぞれの連続送信に対して受信後 Chase 合成処理を行った後、復号処理を行う。Chase 合成とは、複数の信号を受信する際に、最大比合成を行う手法である。

最大比合成によって得られた SINR 式を以下に示す。

$$SINR_{\text{MRC}} = \sum_{k=1}^K SINR_k$$

Chase 合成によって、K-repetition による一連の送信時の信号を合成することで、チャネル状態が悪い場合でも、高い SINR 値を得ることができる。

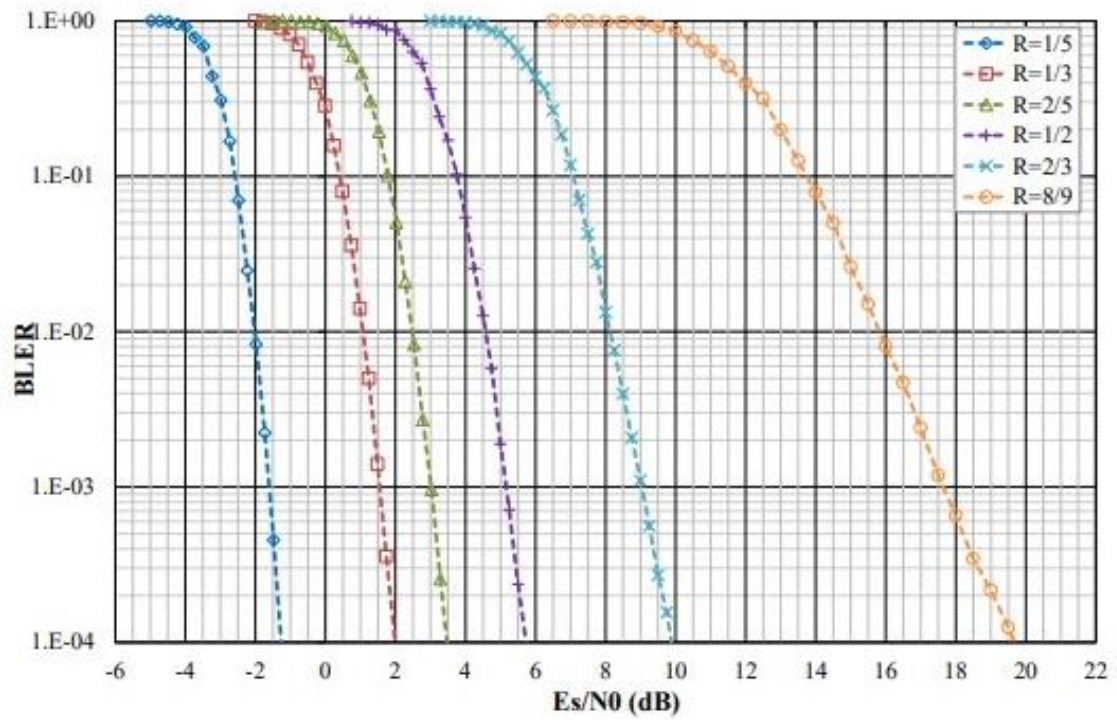


図 4.2 レイリーフェージングにおける SNR 対 BLER[21]

第5章 評価結果

この章では、URLLC の Grant-free 伝送において過剰な送信を削減するべく提案した繰り返し送信制御の有効性についての特性評価を行う。まず、5.1 節では使用するシミュレーション諸元について記述する。5.2 節では評価を行う項目について説明を行い、5.3 節にて提案手法の制御基準の最適値について検討を行う。そして、5.3 節で得られた制御基準の最適値を使用し、5.4 節で過剰な送信の低減に関する評価を行う。その後、5.5 節において遅延時間に対する CCDF から 5.4 節における評価の裏付けを行う。

5.1 シミュレーション諸元

本研究で用いた主要なパラメータを表 5.1 に示す。

表 5.1 シミュレーション諸元

セルモデル		一辺の大きさ r が 288.68[m]の六角形セル
搬送波周波数	f_c	4.5 [GHz]
サブキャリア間隔	f_{sub}	15 [kHz]
変調方式		OFDM/QPSK
符号化率	n	1/2
帯域幅 1Hz 辺りの熱雑音	P_{noise}	-174 [dBm/Hz]
移動端末数	N	500 [台]
端末速度	v	0.6~88.6 [m/s]
最大送信電力	P_{MAX}	23 [dBm]
平均受信 SNR	γ_{Ave}	25 [dB]
パケットサイズ	X	32 [byte]
ミニスロット長(= t_{prep} ,= t_{proc})	t_{TTI}	0.143 [ms]
フレームアライメント遅延	t_{align}	$[0, t_{\text{TTI}]$ の一樣乱数

5.2 評価指標

本研究で繰り返し送信制御の比較、評価を行う指標として、1パケットに対する平均送信回数、パケット衝突率、1ms 時点でのパケット誤り率、URLLC におけるシステム容量、遅延の CCDF といった数値基準を設定する。その概要を以下に示す。

- ・ 1TTIにおける平均送信数

送信回数低減を評価するための指標として、1TTI において送信されている信号数の平均値を使用する。1TTI 内での平均送信数 K_{ave} は以下の式で表される。

$$K_{ave} = \frac{K_{sum}}{T_{sum}}$$

K_{sum} : シミュレーション内において送信された信号の総数

T_{sum} : シミュレーションでの総 TTI 数

- ・ パケット衝突率

パケット衝突率は以下の式で表され、受信信号の復号時に他端末の送信とのパケット衝突によって復号が失敗する確率を示す。

$$Pr_c = \frac{N_c}{N_t}$$

N_c : パケット衝突が発生した回数

N_t : システム全体の送信回数

パケット衝突率が低ければ低いほど干渉による影響は低減していると考えられるが、誤り率が高くなっている場合、必要な送信が削減されているため、誤り率と併せて検討を行う必要がある。

- ・ 最終的なパケット誤り率

本研究における最終的なパケット誤り率とは、URLLC の遅延要件である 1ms 時点で達成されたパケット誤り率を示す。キューイングなどの要因によって遅延 1ms を上回る通信が発生した場合、そのパケットも受信失敗として処理を行う。

$$Pr_e = \frac{N_L}{N_P}$$

N_P : 生じたパケットの総数

N_L : 受信失敗として扱われたパケットの総数

- URLLCにおけるシステム容量
 システム容量とは、そのサービスの要求条件を達成しつつ収容可能な負荷を示す数値である。URLLCにおいては、遅延要件である 1ms の遅延において、パケット誤り率が信頼性要件 10^{-5} を下回る負荷、すなわちパケット到着率の上限について、各送信制御のパケット誤り率を基に比較を行う。
- 遅延時間の相補累積分布関数(CCDF : Complementary Cumulative Distribution Function)
 CCDF とは、1 から該当変数の累積分布関数の値をマイナスした関数である。式中使用する累積分布関数とは該当変数 a を横軸として、その値が横軸の A 点の値以下である確率を示す関数である。通信の遅延に対して累積分布関数を用いることで、該当する遅延時間において遅延が決定しているパケット、すなわちパケットの受信成功確率が判明する。このことから、遅延時間の CCDF を使用することで、その遅延時間における誤り率を得ることができ、時間ごとにどのような誤り率の変化が得られているか判明する。その内容を基に、各送信回数に相当する遅延時間における誤り率の変化という観点から、制御内容の評価を行う。

5.3提案手法における制御基準の最適値評価

まず、本研究の提案手法である繰り返し送信制御の制御基準値に関する検討を行う。それに伴い、従来研究で使用していた時間相関値の閾値について、再検討を行う必要がある。従来研究では URLLC の信頼性要件を満たしつつ、パケット衝突率を最小にするための制御基準を取っていた。本研究ではパケット誤り率を可能な限り低減するという目標設定を行っており、目標設定に応じた時間相関値の閾値を検討しなければならない。よって、従来手法において時間相関値の閾値を変化させた際の誤り率について図 5.1、繰り返し送信回数の選択確率を表 5.2 に示す。なお、フェージングの時間相関値の閾値は 0.65 以下の場合端末速度の上限を超えてしまい、0.85 以上の場合今回基準とする従来手法で検討していた負荷において URLLC の信頼性要件を満たすことができないことから検討を行わないものとする。

図 5.1 の結果を見ると、フェージングの時間相関値の閾値減少に伴い誤り率は低下していることがわかる。閾値が減少した場合、表 5.2 から分かるように相関値による信頼性推定の基準が厳しくなり、送信回数を増やす処理を行う割合が増加する。よって、従来研究において最も低い誤り率を得るためには全ての繰り返し送信を 4 回送信で固定して繰り返し送信の制御を行わないことが最適解となってしまふ。これは、送信回数を低減することができない上、後述する提案手法によって得られる結果の傾向と異なるため、別の方向から検討を行う必要がある。

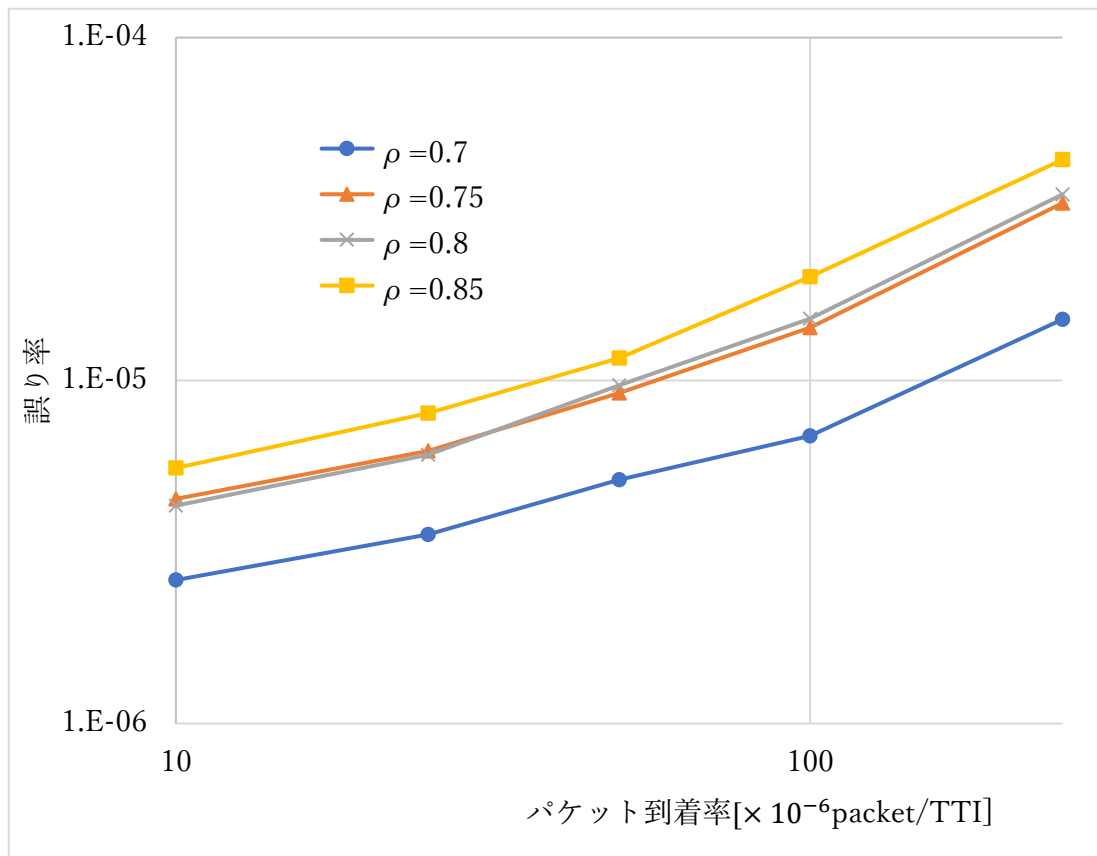


図 5.1 従来手法における閾値の再検討

表 5.2 従来手法における送信回数の割合

閾値 Th_{ρ}	2回送信	4回送信
0.7	0.05	0.95
0.75	0.14	0.86
0.8	0.23	0.77
0.85	0.35	0.65

本研究における制御基準の新たな決定手順として、各閾値を網羅的に組み合わせることによって最適値の模索を行う。これは、二つの閾値を変化させた場合の干渉による影響が不明であるため、時間相関値の閾値の最適値はそれぞれの推定 SNR 値の閾値に対して異なる可能性があるという推測に基づいたものである。その検討対象となる図を図 5.2 に示す。この時、使用した負荷は従来研究の数値を参照し、セル全体で 5×10^{-5} [packet/TTI] という数値を使用した。

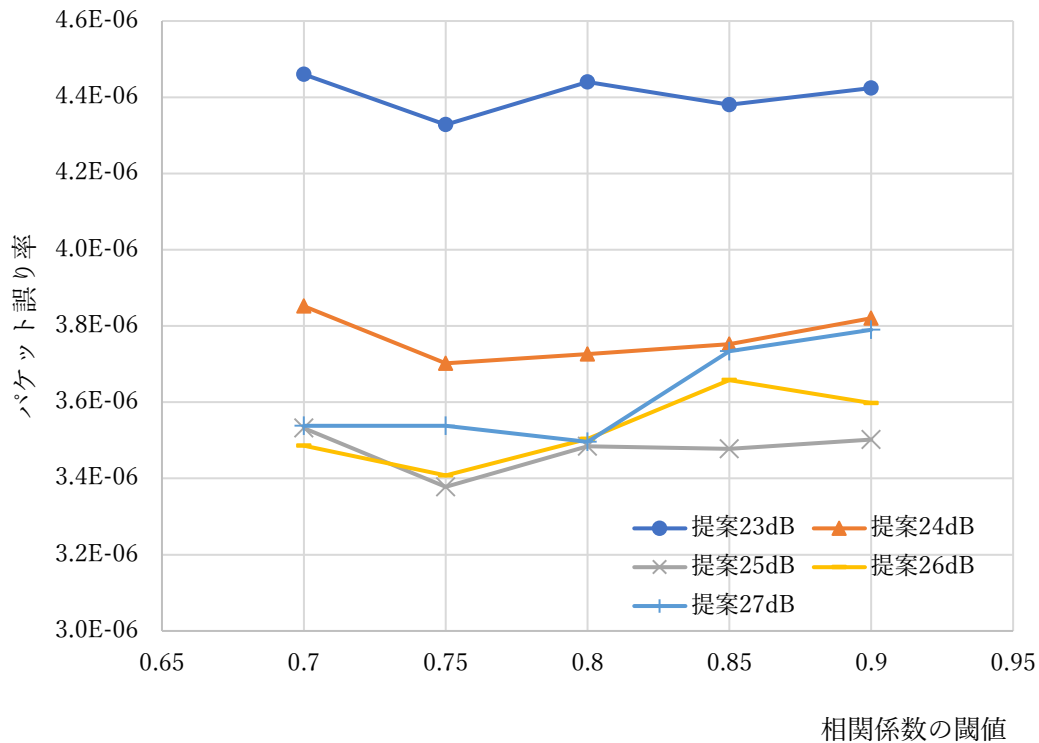


図 5.2 最適な閾値の検討

図 5.2 の結果より、提案手法における推定 SNR 値の閾値を増加させた場合、推定 SNR 値の閾値 $Th_{ch}=25\text{dB}$ までは各相関係数の閾値における全体的なパケット誤り率が減少傾向にあることがわかる。なお、閾値を 25dB 以上に増加させた場合、大きなパケット誤り率の減少は見られず、特に閾値 $Th_{ch}=27\text{dB}$ においてパケット誤り率は変化しない、もしくは悪化した。これは推定 SNR 値の閾値 $Th_{ch}=25\text{dB}$ という SNR 値において、十分な送信成功率が得られていたため、その数値以上に閾値を増加させていった結果、チャンネル状態が良いという判断される基準が厳しくなったことが原因であると推測される。具体的な内容としては、基準が厳しくなったことで、十分な推定 SNR 値が得られる場合においても送信回数を増加させた処理を行うようになり、それに伴いパケット衝突率の増加、パケット誤り率の低下に繋がったと考えられる。その影響は、25dB においてよって、推定 SNR 値の閾値 Th_{ch} は 25dB を最適値とし、該当推定 SNR 値の閾値において最も低い誤り率が得られる時間相関値の閾値である $Th_{\rho}=0.75$ を選択し、最適な閾値の組み合わせとして検討を行っていく。

5.4 過剰な送信の低減評価

本章では、従来手法で検討されたセルあたりのパケット到着率 5×10^{-5} [packet/TTI]という負荷を基準として変動させ、繰り返し送信制御の性能、妥当性について検討を行う。比較対象は、従来研究、4回のK-repetition(以下K=4と呼称)であり、従来研究で使用していたフェージングの時間相関値の閾値 Th_{ρ} は従来手法の最適値の決定基準である「信頼性要件であるパケット誤り率 10^{-5} を満たしつつ、パケット衝突率が最低となる閾値」に則り、図 5.1 の結果より $Th_{\rho}=0,8$ を使用する。それらと 5.3 節で選択した制御内容によって得られた性能を 1TTI あたりの平均送信数、パケット衝突率、1ms 時点での誤り率についてそれぞれ図 5.3、5.4、5.5 に示す。

図 5.3 の平均送信数の図より、チャネル状態を参照した繰り返し送信制御により、従来手法での送信回数、パケット衝突率を最低限に抑えた制御内容に比べて提案手法の送信数が約 11%低減されている。K=4 に対して比較を行った場合、21%の送信回数低減と大幅な減少が見られている。このことから、本研究の繰り返し送信制御は従来研究以上に送信を低減しており、図 5.4 のパケット衝突率の数値を見ると、繰り返し送信制御によって低減された分、パケット衝突率の数値も同様に低減されていることがわかる。しかし、この段階ではパケット衝突率の低減を確認しただけであり、繰り返し送信制御によって削減対象となった送信が正確であるかは不明である。このことを踏まえて誤り率についての検討を行う。

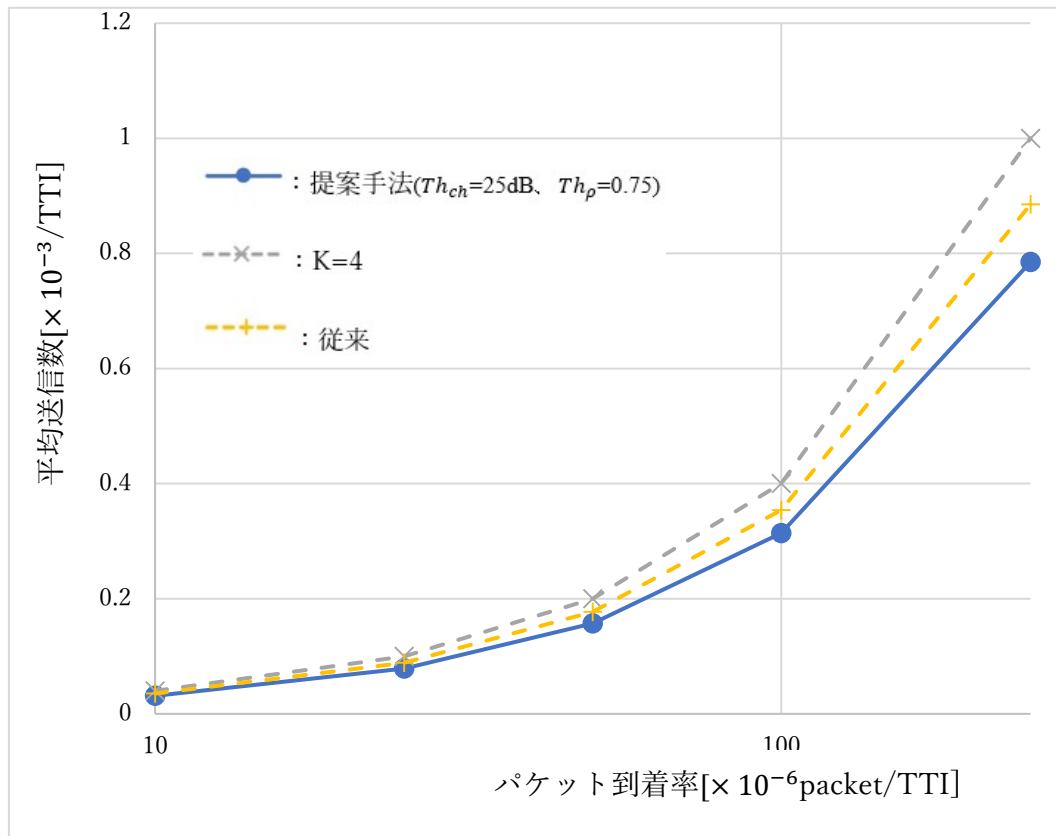


図 5.3 1TTI内の平均送信数

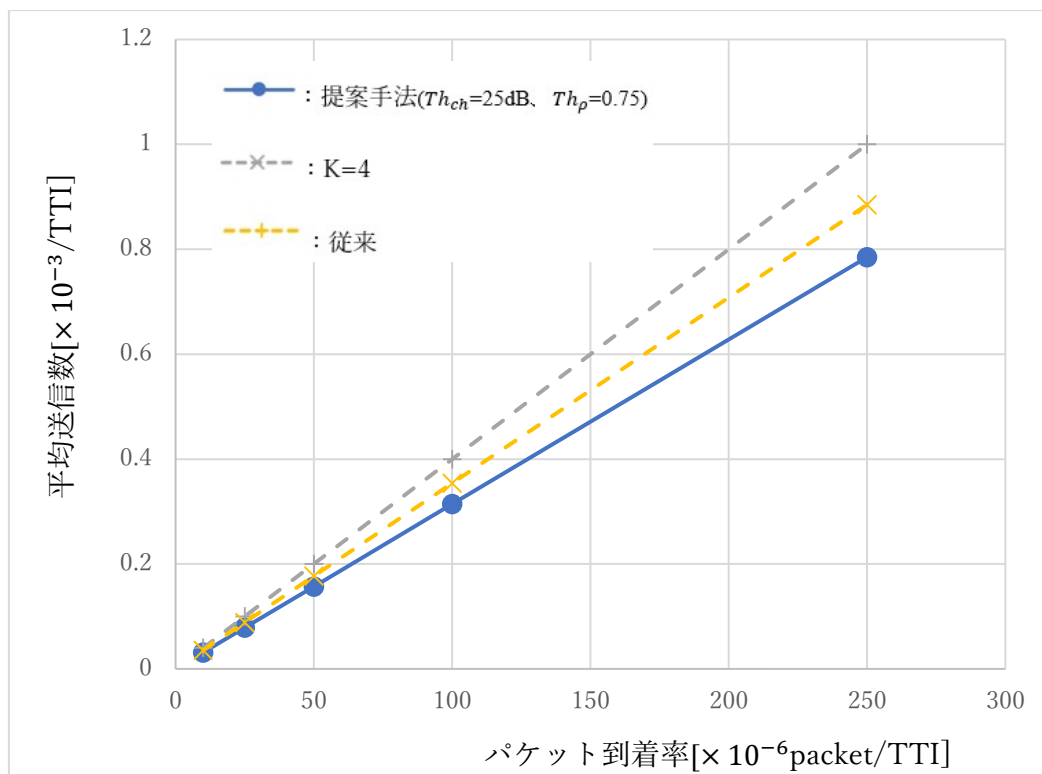


図 5.4 パケット衝突率

図 5.5 の結果より、繰り返し送信の制御によって、従来研究、 $K=4$ の結果に比べパケット低い誤り率が得られていることから、本研究におけるパケット誤り率の低減については達成できたと考えられる。制御内容が正確であるかという観点では、従来以上にパケット衝突率を低減したことで送信回数も同様に減少しており、その上で $K=4$ のパケット誤り率を下回るといった結果が得られていることから、繰り返し送信内の送信一回で得られる信頼性が向上していることがわかる。このことから、チャネル状態を直接推定することで、従来研究に比べてより効果的に過剰な送信が低減できていると推測される。

横軸のパケット到着率を増やして負荷量を増加させると、パケット衝突率の増加に伴いパケット誤り率が増加する。提案手法における誤り率は従来研究、 $K=4$ の結果に比べて緩やかな増加をしていることがわかる。これは、提案手法によって繰り返し送信制御を行ったことにより、システム全体の衝突の原因となる過剰な送信が減ったことが原因であると推測される。このことから、繰り返し送信制御によって過剰な送信を低減することで、受け入れる負荷の上限が増加する可能性があることがわかる。

負荷の上限を示すシステム容量について比較を行う。高負荷環境において **K-repetition** を使用した際に、衝突が頻発することによってシステム容量に制限がかかる点を改善し、 $K=4$ では約 2.2×10^{-4} [packet/TTI] という負荷がシステム容量の限界であったものの、本研究の提案手法では共に約 4.2×10^{-4} [packet/TTI] と、 $K=4$ に対して約 2 倍の数値の差が得られた。

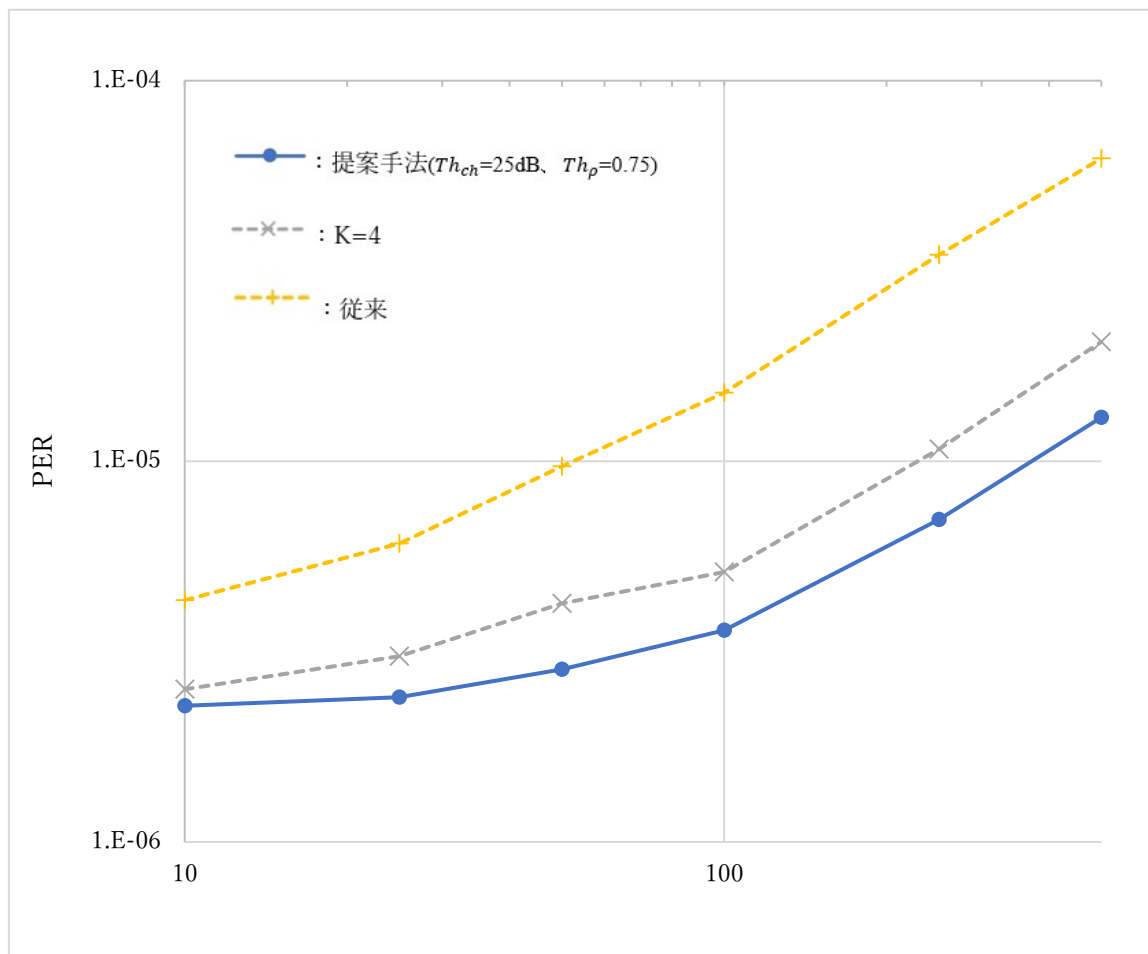


図 5.5 1ms 時点でのパケット誤り率

5.5 遅延に対する誤り率の評価

5.4 節の結果を基に、遅延の CCDF を使用して検討を行う。使用するパケット到着率は、従来と同様の 5×10^{-5} [packet/TTI] と、その 5 倍の負荷である 2.5×10^{-4} [packet/TTI] の二つであり、その結果を図 5.6、図 5.7 にそれぞれ示す。

CCDF の図では、 $0 < t < 0.28$ の遅延時間範囲では送信、受信処理が存在するため、すべての端末は受信処理が終了していない。よって、受信成功しているパケットは存在せず、CCDF の値が示す該当遅延時間における誤り率は 1 となる。 $0.28 < t < 0.42$ の時間では連続送信内の 1 回目が復号終了するため、CCDF の値が下がり始める。この時、緩やかな軌道を描いて CCDF が変化しているのは、フレームアライメントによって 0 から 1TTI 分の遅延がランダムに付与されているためである。同様に、 $0.42 < t$ 以降では、各送信が復号終了する度に CCDF の数値が減少していく。この時、各送信による誤り率の変化は CCDF の孤状になっている部分に該当する。

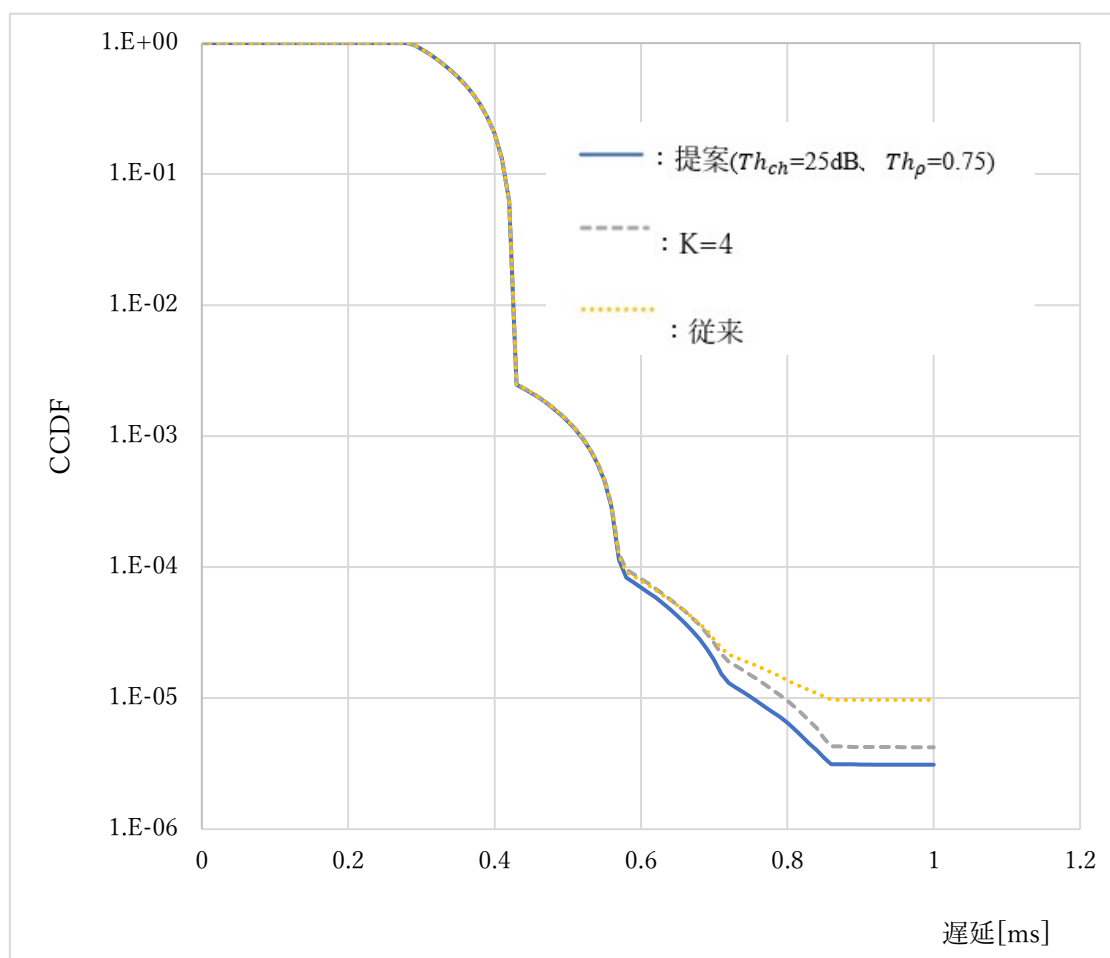


図 5.6 5×10^{-5} [packet/TTI]における遅延時間の CCDF

そして、図 5.6 を見ると、1,2 回送信時点での誤り率では大きな差異はないが、3 回目以降の送信を行っている遅延区間において、より大きな誤り率の低減が得られていることが分かる。このことから、5.4 節において述べた送信一回当たりの信頼性が向上している点について、確認が行われた。なお、3 回目、4 回目の送信に該当する遅延区間において、CCDF の低下が緩やかになっているのは、3 回目の送信を行う端末は全体の 60% ほどであるため、送信を行う端末自体が減少したことによるものである。

さらに、パケット到着率、すなわち負荷を向上させた図 5.7 を基に検証を行うと、途中の遅延における $K=4$ との誤り率の差が大きくなっていることが分かる。これは、パケット衝突率を低減したことによる改善効果が現れた例であると言える。しかし、最終的に K -repetition における性能差は大きく開いていないため、パケット衝突率の低減に対して、4 回目の送信に該当する $0.72 < t < 0.86$ の区間などでの送信の試行回数の差が現れた形となっていると推測される。

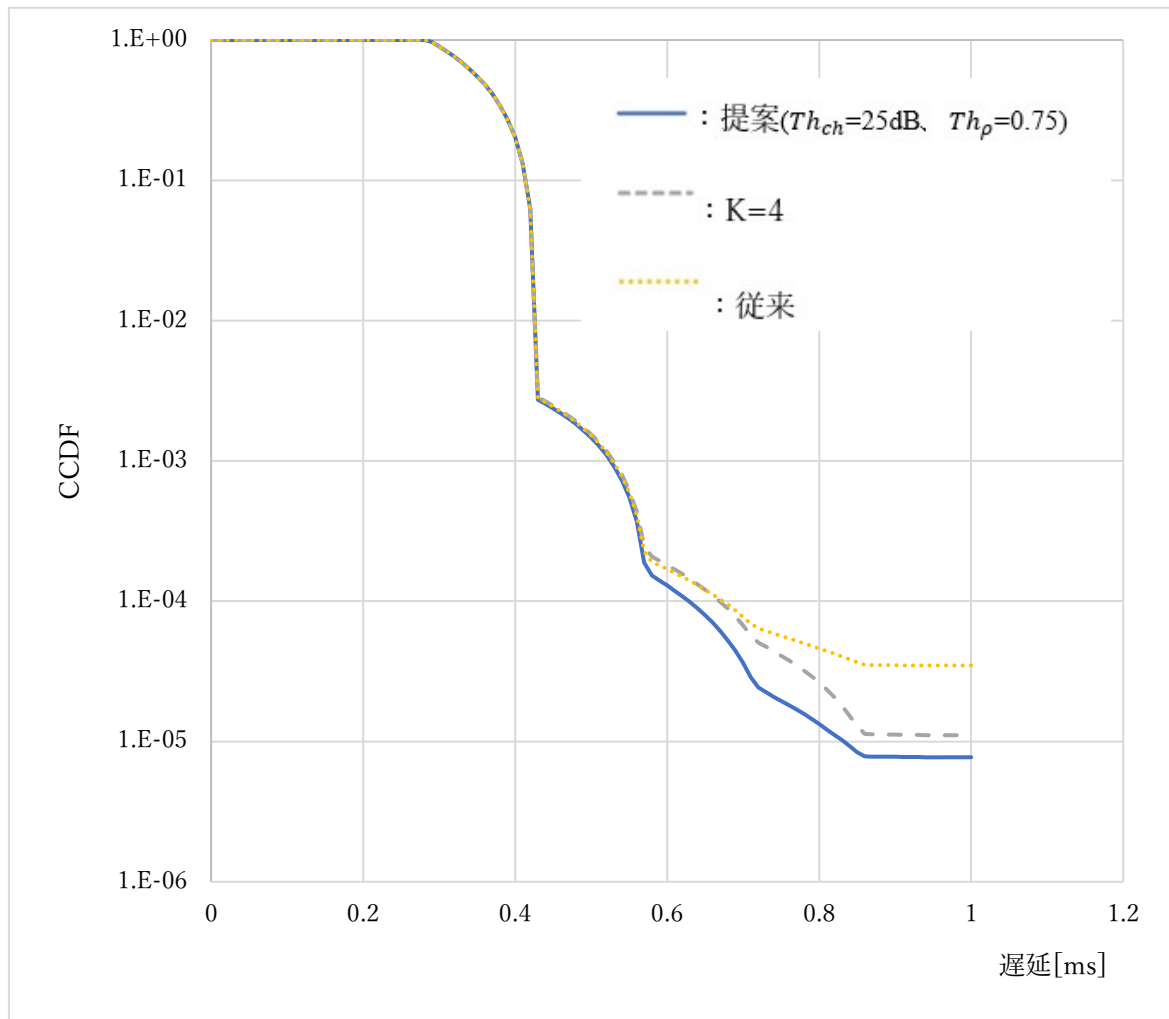


図 5.6 2.5×10^{-4} [packet/TTI]の時の CCDF

第6章 まとめ

第5世代移動体通信 5G では、多様化した需要に対応するための利用シナリオの一つとして、超高信頼低遅延通信 URLLC が検討されている。URLLC では通信の要求条件として、「32 byte のパケット生起後 1ms 以内の遅延で 10^{-5} 以下の誤り率で受信成功される」という条件が設定されている。この条件は既存の通信手法では遅延の観点から達成が困難であったため、通信手法の見直しが行われていた。

遅延の削減を行うために提案された手法が Grant-free 伝送と K-repetition であり、Grant-free 伝送ではスケジューリングの簡易化によって、生起後のリソース割り当て処理に伴う遅延を削減し、K-repetition では ACK/NACK を用いない連続送信によって、自動再送要求処理に伴う処理に伴う遅延を削減する。しかし、これらの手法では、それぞれスケジューリングの簡易化によって端末同士の衝突が発生する可能性が生じ、K-repetition ではチャンネル状態が良い場合の送信では、過剰な送信が生じやすいという課題点が存在する。過剰な送信は Grant-free 伝送によって発生した通信の衝突の原因となり、信頼性向上の妨げとなるため、干渉低減やリソース重複を避けるための研究が行われている。

過去に行われた研究として、Grant-free 伝送において、チャンネル状態が良い場合に K-repetition によって生じる過剰な送信を低減すべく、端末速度から算出されるチャンネル状態の変動度合を基に繰り返し送信の回数を制御するといったものが存在する。この研究では、送信回数を制御することでパケット衝突率を低減し、一部の遅延における誤り率を低減したものの、最終的な誤り率では 5G 本来の手法である K-repetition を下回ることができなかった。このような結果が得られた原因として、送信を低減する基準がチャンネル変動を基にした間接的で不確定なものであったためと推測した。

本研究ではこの繰り返し送信制御を従来研究とし、初回送信時のチャンネル推定値を制御基準値に追加し、従来のチャンネル変動度合が大きい時に送信回数を低減する制御を、信頼性の推定手法が間接的であることから低減量を抑えた繰り返し送信制御を行った。その結果、従来研究に比べて約 10%、4 回の連続送信を行う K-repetition に比べて約 20%のパケット衝突率を低減した。更に、パケット誤り率を比較すると、従来、K-repetition の値を下回ることがわかった。これらによって過剰な送信を低減できていると判断し、遅延時間の CCDF を基に、各送信による誤り率低減について検討を行い、各送信において得られる誤り率低減効果が向上したことを確認した。以上のことから、繰り返し送信制御によって過剰な送信を低減しつつパケット誤り率を低減できしており、一回送信あたりの信頼性効率が向上したと考えられる。よって、無駄な送信である過剰な送信も低減されたという結果が得られたと推測する。そして、過剰な送信を削減したことによって、干渉が低減された結果、URLLC の要求条件を満たすこ

とができる負荷の上限が **K-repetition** に比べて約 2 倍に増加していた。

本論文における課題点として、制御基準となるチャネル推定値を簡易化のために誤差のない推定ができると仮定しており、誤差について考慮がされていない点が挙げられる。対して、今後の改善点として、本論文ではセルモデルを単一セルとして検討しており、セル外干渉については考慮していない。セル外干渉を考慮した場合、**K-repetition** はセル外干渉の影響を受けやすく、過剰な送信を低減した提案手法では影響が少ないため、より性能の差異が得られると考えられる。

参考文献

- [1] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. D. Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, June 2017.
- [2] 3GPP TR 38.913 v14.2.0, “Study on scenarios and requirements for next generation access technologies,” Mar. 2017
- [3] B. Soret, P. Mogensen, K. I. Pedersen, and M. C. Aguayo-Torres, “Fundamental Tradeoffs among Reliability, Latency and Throughput in Cellular Networks,” in 2014 IEEE Globecom Workshops, Dec. 2014.
- [4] 3GPP TS 36.213 V14.2.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” Mar. 2017
- [5] C. Wang, Y. Chen, Y. Wu, and L. Zhang, “Performance evaluation of grant-free transmission for uplink URLLC services,” *Proc. IEEE 85th Veh. Technol. Conf. (VTC 2017-Spring)*, pp. 1–6, June. 2017.
- [6] G. Pocovi, B. Soret, K. I. Pedersen, and P. Mogensen, “MAC Layer Enhancements for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in Cellular Networks,” in IEEE International Conference on Communications (ICC) 2017 Workshop, May. 2017.
- [7] D. Chase, “Code combining – a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets,” *IEEE transactions on communications*, vol. 33, no. 5, pp. 385–393, 1985
- [8] 3GPP TS 38.214 v15.2.0, “NR; Physical layer procedures for data,” June. 2018
- [9] T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, P. Mogensen, I. Z. Kovacs, and T. K. Madsen, “System level analysis of uplink grant-free transmission for URLLC,” *Proc. 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2017)*, pp. 1–6, Dec. 2017
- [10] T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovacs, and P. Mogensen, “System level analysis of K-repetition for uplink grant-free URLLC in 5G NR,” *Proc. 25th European Wireless Conf. (European Wireless 2019)*, pp.1–5, May. 2019.
- [11] T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovacs, and P. Mogensen, “Joint Resource Configuration and MCS Selection Scheme for Uplink Grant-Free URLLC”, 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Dec 2018
- [12] R. Kotaba, C. N. Manchón, T. Balercia, and P. Popovski, “Uplink transmissions in URLLC systems with shared diversity resources,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 590–593, Aug. 2018.

- [13] R. Kotaba, C. N. Manchón, T. Balercia, and P. Popovski, “How URLLC can benefit from NOMA-based retransmissions,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 1684–1699, Mar. 2020
- [14] A. Shahsin, A. Belogaev, A. Krasilov, E. Khorov, “Adaptive Transmission Parameters Selection Algorithm for URLLC Traffic in Uplink,” *International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, Nov. 2020
- [15] S. Ozaku, Y. Shimbo, H. Suganuma, and F. Maehara, “Adaptive repetition control using terminal mobility for uplink grant-free URLLC,” in *Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [16] Recommendation ITU-R M.2083 “IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”,
- [17] NGMN “5G White paper.” Feb.2015
- [18] 山本哲矢, 岩田綾子, 鈴木秀俊, ” NR における超高信頼低遅延通信技術” 2020 年電子通信学会総合大会
- [19] 高橋文雄 “デジタル無線通信入門”, 培風館 Jun. 2002
- [20] 矢野哲也, 陳紅陽, 下村剛史, 田中良紀, ジャンミン・ウー, 株式会社 富士通研究所 “URLLC のための CSI の傾き報告によるチャネル状態予測の検討” 電子情報通信学会総合大会 Mar, 2017
- [21] R. Abreu, T. Jacobsen, G. Berardinelli, K. Pedersen, I. Z. Kovács, and P. Mogensen, “Power control optimization for uplink grant-free URLLC,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, Apr. 2018, pp. 1–6.
- [22] MT, “R1-1612938 Enhanced Turbo Codes for NR: Performance Evaluation for eMBB and URLLC,” in *3GPP TSG RAN WG1 #87*, Nov. 2016

謝辞

本研究を進行するにあたり，ご多忙の中時間を割いてご指導して下さいました森香津夫教授，羽多野裕之准教授，眞田耕輔助教に深く感謝致します。また，研究設備の整備，管理などご協力下さいました山本好弘技術員に深く感謝致します。また，様々な助言をして下さいました通信工学研究室の皆様に深く感謝致します。