

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03259

研究課題名(和文) 中継端末にバッファを用いた無線分散ネットワークの高信頼かつ低遅延プロトコル

研究課題名(英文) Highly-reliable and reduced-packet-delay buffer-aided cooperative protocol

研究代表者

杉浦 慎哉 (Sugiura, Shinya)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30394927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信システムにおいて、分散ノード群が協調して動作することでネットワーク全体の通信品質が向上する協調通信技術が知られている。本研究では、各分散ノードにおいてこれまで広くは利用されてこなかったデータバッファの自由度を最大限活用することにより、システム設計自由度を上げ、従来の性能限界を上回る方式を提案した。特に、非直交多元接続、および、全二重通信と組み合わせたバッファ利用協調通信プロトコルを提案した。理論解析と数値解析により、実効送信レートと信頼性、秘匿性の向上を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、データバッファを利用した無線通信ネットワークを対象として、非直交多元接続と全二重通信のコンセプトを利用した新しい方式を提案した。このことは、さらなる高性能化が重要である次世代ワイヤレス通信システムへの適用検討に重要である。今回対象とした方式は基本的な技術であるため、実用化時には幅広い通信システムへの波及効果が期待できる。引き続き、本技術の実用化に向けた研究に取り組んでいく。

研究成果の概要(英文)：In wireless communication systems, cooperative communication technology has the potential to improve the communication performance of the entire network when a group of distributed nodes cooperates. In this study, we proposed methods that increase the degree of freedom in system design and exceed the conventional achievable performance by exploiting the degree of freedom of the data buffer, which has not been widely used in conventional wireless networks. In particular, we proposed cooperative communication protocols using buffers in combination with non-orthogonal multiple connections and full-duplex communication. The theoretical and numerical analysis confirmed the improved effective transmission rate, reliability, and confidentiality in the proposed schemes.

研究分野：情報通信工学

キーワード：協調通信 バッファ 中継選択 全二重 非直交多元接続

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2000年以降、空間的に分散する無線中継ノードを仮想的にひとつの端末とみなす協調(仮想)アレイ技術により、従来の無線ネットワークと比べて高いエネルギー効率や高い送信レート、広いカバーエリアを達成できることが明らかにされた。さらに2010年代半ばに、無線中継ノードの物理レイヤにデータを一定期間保持するためのバッファを用いることにより、柔軟な中継スケジューリングを可能にするコンセプトが発案された[1]。これにより、時々刻々と変化する無線通信特有の伝播環境において、常に最良のリンクを利用することが可能になり、原理的に従来の協調通信を大幅に上回る信頼性を獲得することが可能となった。一方、このバッファ利用協調通信では、伝送パケット遅延の増大への対処、および、効率的な最適リンク選択アルゴリズム開発が必要であり、実用化には至っていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、パケット遅延とオーバーヘッドを最小限に抑制しつつ、送信レートや信頼性、遅延特性を向上させることが可能なバッファ利用協調通信技術を提案し、通信システムにおいて新たなシステム設計自由度を与えることを目的とする。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、従来のようにすべてのリンクから1つの最適リンクを選択するのではなく、無線伝搬路のプロードキャスト性を活かして一部の複数リンクを陽に選択することなしに同時に利用する従来にはない新しいアプローチをとる[2], [3]。これにより、システム的设计自由度を向上させ、バッファ内で保持するパケット数を削減することが可能となる。さらに、中継ノードのバッファ状態に応じたリンク選択を行うことで、提案システムのポテンシャルを最大化する。さらに、全二重通信[4]や非直交多重[5], [6]の技術を応用することにより、達成可能な送信レートや電力効率を向上する。また、同技術の秘匿性向上への応用[7]についても実施した。

4. 研究成果

以下では、関連する主な研究成果[2]-[7]の中から特に全二重通信を利用したバッファ利用協調通信[4]について示す。

(1) システムモデル

対象とするシステムは、一台のソースノード(S)、 $K$ 台の中継ノード(R)、一台の宛先ノード(D)から構成される。各中継ノードは $L$ パケットまで保持可能なデータバッファを持つとする。図1に示すように、提案方式は五つのモード構成されている(図1(a): SRユニキャスト、図1(b): RDユニキャスト、図1(c): SRブロードキャスト、図1(d): RDビームフォーミング、図1(e): 仮想全二重モード)。伝搬路とデータバッファの状況に応じて各送信スロットでひとつのモードが選択される。特に、仮想全二重モードは他の四モードと異なり、SRリンクとRDリンクを同時に利用できるため、優先的に選択されるように設計されている。また、仮想全二重モードは、各中継ノードが共通のパケットをデータバッファに保持されているときにのみ選択可能となっている。この制限により、全二重通信特有の自己干渉の影響を効率的に除去可能することが可能となり、通信性能の向上に寄与する。なお、SRブロードキャストモードによって中継ノード間でシームレスなパケット共有が可能となる。詳細なモード選択アルゴリズムは文献[4]を参照されたい。

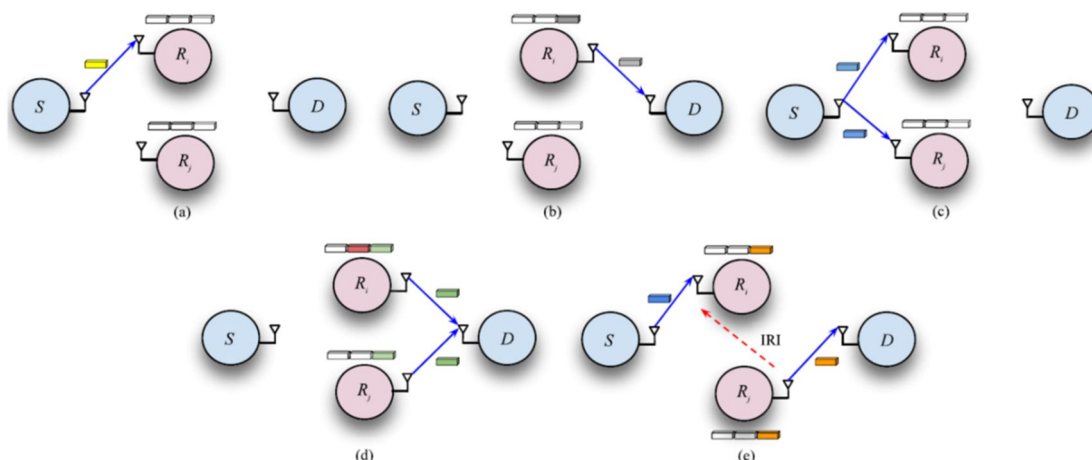


図1. 提案する全二重通信を利用したバッファ利用協調通信における送信モード[4]

## (2) 数値解析結果

提案方式の通信性能を評価するために、数値シミュレーションを実施した。簡単のため、各リンクの目標レートは 1 bps/Hz として固定した。また、各中継ノードの初期バッファ状態は空であると、各モンテカルロシミュレーションで送信ノードは十分な数のパケットを送信する。また、すべてのチャンネルは独立なブロックレイリーフェージングに従うとし、平均信号対雑音電力比 (Signal-to-Noise Ratio: SNR) は同一であるとした。

図 2(a)に達成可能な平均スループットを示す。システムパラメータ  $(K, L) = (6, 6)$  のとき、提案方式 (仮想全二重モードあり)、その他の五つのベンチマーク方式 (いずれもバッファ利用中継選択方式で、仮想全二重モードなし) の間の平均スループットを比較したものである。結果より、提案方式に含まれる仮想全二重モードの効果により、提案方式は全 SNR 範囲において 5 つのベンチマーク方式を上回る性能を発揮することが確認できた。

図 2(b)にシステムパラメータ  $(K, L) = (6, 10)$  のときの提案方式における五送信モードの分布を示す。平均 SNR は 0 dB から 20 dB まで変化させた。図 2(b)に示すように、SNR 値が最も低い 0 dB の場合は、伝搬路状態が悪いため不稼働状態 (図中の“Outage event”) が支配的であり、次いで SR ユニキャスト、RD ユニキャストモードの順であった。SNR を上げると、仮想全二重モード (図中の“VFD mode”) の割合が増え、スループットの向上に寄与していることが確認できる。また、高 SNR 領域 (SNR 12dB) では、仮想全二重モードと SR ブロードキャストモードが支配的であることがわかる。これは、SR ブロードキャストモードが選択された結果、中継ノードでパケットが共有され、仮想全二重モードが選択されやすいためである。

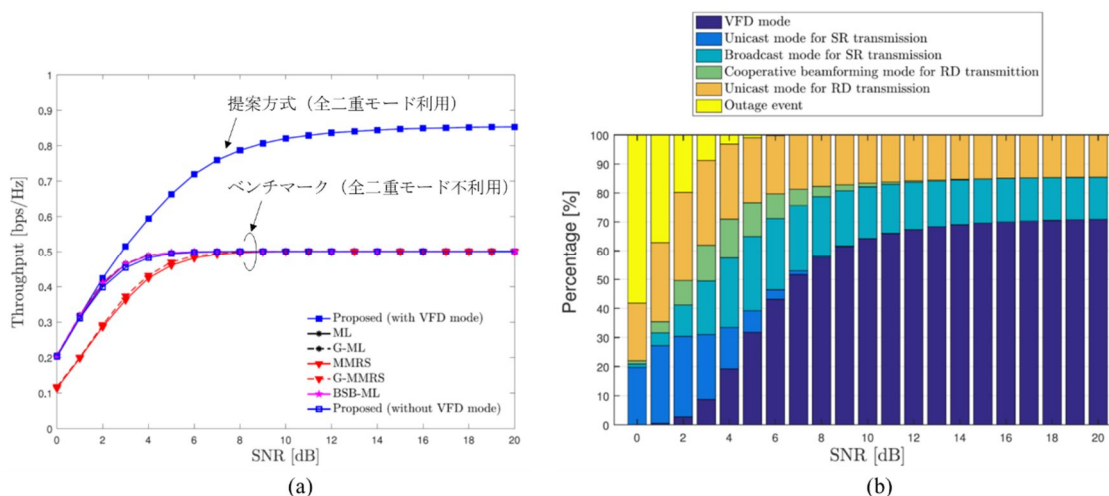


図 2 . 数値解析結果[4] : (a)スループット、(b)モード選択レシオ

## < 引用文献 >

- [1] N. Zlatanov, A. Ikhlef, T. Islam, and R. Schober, “Buffer-aided cooperative communications: Opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, pp. 146–153, Apr. 2014.
- [2] M. Oiwa, R. Nakai, and S. Sugiura, “Buffer-state-and-thresholding-based amplify-and-forward cooperative networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 674–677, Oct. 2017.
- [3] R. Nakai, M. Oiwa, K. Lee, and S. Sugiura, “Generalized buffer-state-based relay selection with collaborative beamforming,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1245–1257, Feb. 2018.
- [4] G. Srirutchataboon, J. Kochi, and S. Sugiura, “Performance analysis of hybrid buffer-aided cooperative protocol based on half-duplex and virtual full-duplex relay selections,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1862–1873, Aug. 2021.
- [5] J. Kochi, R. Nakai, and S. Sugiura, “Performance evaluation of generalized buffer-state-based relay selection in NOMA-aided downlink,” *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 173320–173328, Dec. 2019.
- [6] J. Kochi, R. Nakai, and S. Sugiura, “Hybrid NOMA/OMA broadcasting-and-buffer-state-based relay selection,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 2, pp. 1618–1631, Feb. 2021.
- [7] G. Srirutchataboon and S. Sugiura, “Physical layer security of buffer-aided hybrid virtual full-duplex and half-duplex relay selection,” in *IEEE 95th Vehicular Technology Conference*, Helsinki, Finland, 19–22 June 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Srirutchataboon Gan, Kochi Jun, Sugiura Shinya	4. 巻 2
2. 論文標題 Performance Analysis of Hybrid Buffer-Aided Cooperative Protocol Based on Half-Duplex and Virtual Full-Duplex Relay Selections	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Communications Society	6. 最初と最後の頁 1862 ~ 1873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJCOMS.2021.3102027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kochi Jun, Nakai Ryota, Sugiura Shinya	4. 巻 70
2. 論文標題 Hybrid NOMA/OMA Broadcasting-and-Buffer-State-Based Relay Selection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 1618 ~ 1631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3054904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Ruichao, Nakai Ryota, Sezaki Kaoru, Sugiura Shinya	4. 巻 8
2. 論文標題 Generalized Buffer-State-Based Relay Selection in Cooperative Cognitive Radio Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 11644 ~ 11657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2965742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kochi Jun, Nakai Ryota, Sugiura Shinya	4. 巻 7
2. 論文標題 Performance Evaluation of Generalized Buffer-State-Based Relay Selection in NOMA-Aided Downlink	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 173320 ~ 173328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2956542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Nakai and S. Sugiura	4. 巻 14
2. 論文標題 Physical Layer Security in Buffer-State-Based Max-Ratio Relay Selection Exploiting Broadcasting With Cooperative Beamforming and Jamming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Forensics and Security	6. 最初と最後の頁 431 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIFS.2018.2854711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Oiwa Miharuru, Nakai Ryota, Sugiura Shinya	4. 巻 6
2. 論文標題 Buffer-State-and-Thresholding-Based Amplify-and-Forward Cooperative Networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 674 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2017.2729547	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakai Ryota, Oiwa Miharuru, Lee Kyungchun, Sugiura Shinya	4. 巻 67
2. 論文標題 Generalized Buffer-State-Based Relay Selection With Collaborative Beamforming	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 1245 ~ 1257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2017.2751582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 河内淳、中井陵太、杉浦慎哉
2. 発表標題 ハイブリッドNOMA/OMA選択に基づくバッファ利用協調通信
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Mishina, M. Oiwa, R. Nakai, and S. Sugiura
2. 発表標題 Buffer-aided virtual full-duplex cooperative networks exploiting source-to-relay broadcast channels
3. 学会等名 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Oiwa and S. Sugiura
2. 発表標題 Generalized virtual full-duplex relaying protocol based on buffer-aided half-duplex relay nodes
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中井陵太、杉浦慎哉
2. 発表標題 バッファ状態に基づく中継ノード同時利用による物理レイヤセキュリティ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大岩美春、杉浦慎哉
2. 発表標題 仮想全二重バッファ利用無線ネットワークにおけるブロードキャスト型中継プロトコル
3. 学会等名 第32回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中井陵太、大岩美春、杉浦慎哉
2. 発表標題 バッファ状態に基づく中継ノード選択と協調ビームフォーミング
3. 学会等名 第32回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三科達也、杉浦慎哉
2. 発表標題 中継ノード間干渉を考慮したバッファ利用全二重協調通信
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

杉浦研究室webページ <a href="http://sgurlab.iis.u-tokyo.ac.jp/">http://sgurlab.iis.u-tokyo.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------