

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04493

研究課題名(和文)電波伝搬特性を生かしたランダムアクセス方式の研究

研究課題名(英文)Random Access Communications over Fading Channels

研究代表者

程 俊 (Cheng, Jun)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：00388042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レイリーフェージング環境における符号化Slotted ALOHAシステムのbelief propagation (BP)閾値, maximum a posteriori (MAP) 閾値およびConverse理論限界の定式化し, さらにMAP閾値をほぼ達成する具体的な送信方式を提案し, 数値計算および計算機シミュレーションで確認しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

This project derived several limited performances for random access protocols, and developed some practical transmission schemes, which approach these limit performance. Our work improves the energy and spectral efficiencies for machine-type communications and the Internet of Things.

研究成果の概要(英文)：In this project, we provide the asymptotic analysis performance of the coded slotted ALOHA wireless communication systems over Rayleigh block fading channels. We give the asymptotic decoding thresholds of the average normalized offered traffic G of the systems, such as a belief propagation (BP) threshold, a maximum a posteriori (MAP) threshold, and a converse bound. We show that, over fading channels, employing the intra-slot successive interference cancellation (SIC) enhances the BP thresholds. We also developed a spatially-coupled scheme through which the BP decoding threshold approaches the MAP threshold and approaches the converse bound.

研究分野：通信工学

キーワード：random access slotted ALOHA fading channel channel coding

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

Machine Type Communications (mMTC), which is a potential application of the sixth generation (6G) of wireless technology, is anticipated to provide wireless connectivity to a large number of devices. Random access schemes, which evolved from slotted ALOHAs (SAs), are regarded as a class of promising solutions for mMTC since such devices transmit their data without pre-establishing connections and pre-requesting channel resources. The extensively studied traditional SA has been implemented in various commercial communication systems and standards. Nevertheless, its maximum offered traffic is only $1/e$. Among these random access schemes, code slotted ALOHA (C-SA) achieves a theoretical bound of slotted ALOHA-type schemes over the collision channel model. The model is simple and, however, neglects the impact of fading and noise in wireless transmission.

However, in wireless scenarios, the impact of fading must be addressed. It is well known that fading, causing power variations among the superimposed signal, can be utilized, such as non-orthogonal multiple access (NOMA), to improve the spectrum efficiency in wireless systems. This motivates us to enhance the spectrum and energy efficiencies for random access wireless systems, by utilizing fading.

2. 研究の目的

The purpose of this project is to enhance the spectrum and energy efficiency for random access wireless systems, especially coded SA (C-SA) systems over fading channels. We provide the asymptotic analysis performance of the C-SA systems.

3. 研究の方法

We model the C-SA systems with an inter-slot successive interference cancellation (SIC) by a bipartite graph, which resembles the density evolution of LDPC decoding. This makes it possible for channel-coding theory is used to analyse C-SA systems.

Moreover, since fading causes power variations in the collide signals in slots, we employ an intra-slot SIC to enhance the decoding capacity within slots, similar to the conventional NOMA techniques. This makes it possible that communications theory is used to analyze the average error probability with threshold decoding and intra-SIC.

4. 研究成果

In the C-SA systems, N_T devices transmit their packets to an access point (AP) within a frame of M time slots. Each device generates a single message with activation probability π . The message of each active device is partitioned into k segments, which are encoded through segment-orientated codes. Each segment is further encoded through a channel code. These coded segments are transmitted to randomly chosen slice-slots in a frame of slice-slots for contention resolution. At the AP, The intra- and inter-slot SIC processing is carried out iteratively to recover those messages. The performance metric is the average normalized offered traffic G , which represents the average number of packets transmitted per slot when the packet loss rate (PLR) is lower than a target value.



Figure 1 random access system.

In this project, we provide the asymptotic analysis performance of the C-SA systems over Rayleigh block fading channels. The analysis performance is the asymptotic decoding thresholds of the average normalized offered traffic G , such as a belief propagation (BP) threshold, a maximum a posteriori (MAP) threshold, and a converse bound.

The BP threshold is obtained by iterative decoding between the intra- and inter-slot SICs, and it can be achieved in practice. Packet-wise MAP threshold, which is the highest performance when not addressing

the complexity of decoding, is the upper limit of practical decoding, such as the BP threshold. Converse bound expresses an impossibility threshold to be approached and is tight if the MAP or BP thresholds are close to the bound. Although it is relatively simple to get a converse bound, calculating a MAP threshold is usually difficult. If the converse bound is tight, it can be used as an upper bound for the BP threshold, especially when the MAP threshold is unknown.

First, we derive the BP decoding threshold of the average normalized offered traffic for the C-SA systems. In the C-SA, maximum distance separation (MDS) codes with an energy efficiency over $(0, 1)$ are employed to recover the erasure errors due to segment-collisions, and a channel code is employed to mitigate interference between devices, even over fading. Using the erasure probability of decoding an MDS code and the average channel decoding error probability in the presence of both fading and collisions, we formulate iterative equations of density evolution. By using the equations, we derive a BP threshold. Numerical results show that over Rayleigh block fading channels, the BP thresholds of the C-SA are higher than those without fading, i.e., over the collision channel model (see Fig. 2). This means that over fading channels, employing the intra-slot SIC enhances the BP thresholds.

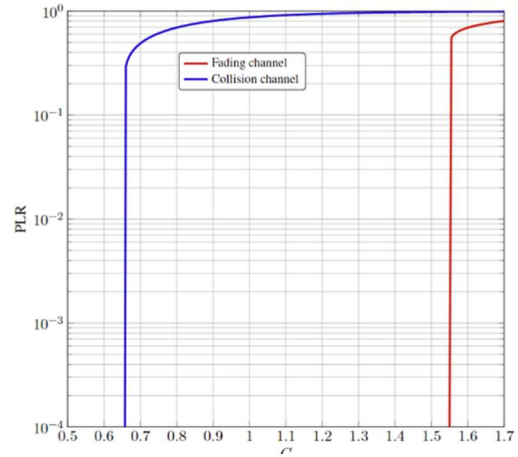


Figure 2: PLRs vs average traffic G over fading and collision channels. At the target PLR of 10^{-2} , The BP thresholds are 1.550 and 0.655 [packets/slots].

Second, we establish a converse bound of the average normalized offered traffic by using a match condition of the two extrinsic information transfer (EXIT) curves associated with the MDS decoding and the channel decoding.

Third, for irregular repetition slotted ALOHA (IR-SA) systems, we derive a MAP decoding threshold of the average normalized offered traffic. The coincidence of the BP and MAP EXIT curves makes it possible to derive a MAP threshold, which serves as a guideline for practical access schemes. Note that IR-SA, where each device repeatedly transmits its packet or replicas, is the repetition code case of a generic linear segment-orientated block code in C-SA systems.

Fouth, we present a density evolution algorithm for an explicit spatially-coupled slotted ALOHA (SC-SA) scheme, and derive its BP decoding threshold. We observe from the numerical results that the spatially-coupled scheme achieves a threshold saturation effect through which the BP decoding threshold approaches the MAP threshold.

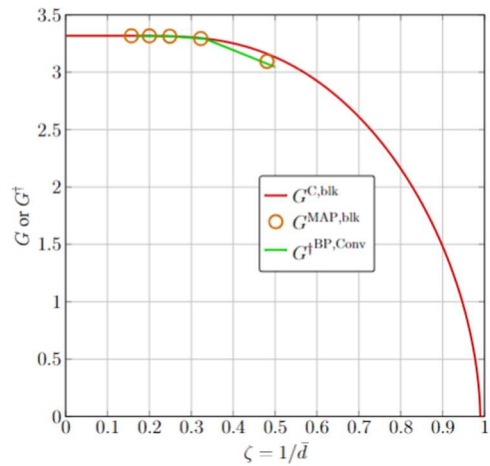


Figure 3 Thresholds versus energy efficiency: Thresholds are converse bound $G^{C,blk}$ and MAP $G^{MAP,blk}$ of IR-SA, and BP $G^{\dagger BP,Conv}$ of SC-SA.

In Fig. 3, we give numerical results to show that over Rayleigh block fading channels, the BP thresholds of the SC-SA approaches the MAP thresholds of IR-SA, and are close to the converse bounds of IR-SA. The converse bounds are tight.

Our work above gives the theoretical bounds of the C-SA systems over fading channel and also gives a practical way to approach these bounds. These contributions enhance the energy and spectral efficiencies of wireless random protocols, which are required in the emergence of mMTC and the internet of things.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahashi Yuhei, Song Guanghui, Kimura Tomotaka, Cheng Jun	4. 巻 11
2. 論文標題 Irregular Repetition Slotted ALOHA Over Rayleigh Block Fading Channels: Bounds and Threshold Saturation via Spatial Coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 106528 ~ 106543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3320575	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
1. 著者名 Bu Yingcheng, Fang Yi, Zhang Guohua, Cheng Jun	4. 巻 41
2. 論文標題 Achievable-Rate-Aware Retention-Error Correction for Multi-Level-Cell NAND Flash Memory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems	6. 最初と最後の頁 3438 ~ 3451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCAD.2021.3123288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 WEI Lantian, LU Shan, KAMABE Hiroshi, CHENG Jun	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 User Identification and Channel Estimation by Iterative DNN-Based Decoder on Multiple-Access Fading Channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 417 ~ 424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2021TAP0008	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 Song Guanghui, Cai Kui, Sun Ce, Zhong Xingwei, Cheng Jun	4. 巻 70
2. 論文標題 Near-Optimal Detection for Both Data and Sneak-Path Interference in Resistive Memories With Random Cell Selector Failures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 836 ~ 850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2022.3140459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Yifei, Hou Wei, Li Ying, Cheng Jun	4. 巻 70
2. 論文標題 Robust Rateless Spatially Coupled Repeat-Accumulate-Repeat Multi-User Codes on IDMA Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 11523 ~ 11537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3110760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Song Guanghui, Cai Kui, Zhong Xingwei, Jiang Yu, Cheng Jun	4. 巻 69
2. 論文標題 Performance Limit and Coding Schemes for Resistive Random-Access Memory Channels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 2093 ~ 2106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2021.3051413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Y. Takahashi, I. Masuo, G. Song, T. Kimura, and J. Cheng
2. 発表標題 Coded slotted ALOHA over Rayleigh block fading channels: BP threshold and converse bound
3. 学会等名 2023 IEEE Globecom Workshops (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大坂 主, 宋 光輝, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 2次Reed-Muller 列に基づくスパース重ね合わせ符号: 直交符号化
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会 (IT)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 樋口貴大, 北川善大, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 I/Q インバランスを生かした複素ニューラルネットワークによるデバイス識別
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論とその応用シンポジウム(SITA2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井陽平, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 混合ガンマ分布による双方向中継通信システムの有限長伝送性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論とその応用シンポジウム(SITA2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田邊絵梨, 宋光輝, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 SNR 発展法による有限長符号化 IDMA 性能の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Osaka, H. Nakanishi, T. Kimura, and J. Cheng,
2. 発表標題 Reed-Muller sequence-based unsourced random access over multipath fading channels
3. 学会等名 IEEE Region 10 Conference (TENCON) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Sakai, M. Kambara, G. Song, T. Kimura, and J. Cheng
2. 発表標題 Finite blocklength analysis of cooperative superposition coded relaying systems over Nakagami-m fading channels
3. 学会等名 2022 Int. Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Nakanishi, G. Song, T. Kimura, and J. Cheng
2. 発表標題 Reed-Muller sequence-based block orthogonal sparse superposition codes
3. 学会等名 2022 Int. Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 邦泰, 木村 共孝, 程俊
2. 発表標題 超大規模センサネットワークにおける少数パイロットシンボルを用いたメタ学習による復調
3. 学会等名 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会(CS)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中西 日向子, 副嶋 凜太郎, 宋 光輝, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 2次Reed-Muller系列に基づくスパース重ね合わせ符号
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論とその応用シンポジウム(SITA)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 侑平, 宋 光輝, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 レイリーフェージング環境における不規則反復Slotted ALOHAシステム: 理論限界とMAP閾値
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論とその応用シンポジウム(SITA)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Song Guanghui, Cai Kui, Sun Ce, Zhong Xingwei, Cheng Jun
2. 発表標題 Selector Failure Detection for Resistive Random Access Memories
3. 学会等名 Proceeding of IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井 陽平, 神原 征弥, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 整数 m の仲上 m フェージング環境下での重畳符号化協調通信の有限長伝送における平均ブロック誤り率の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会(IT)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山岸 雅弥, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 部分アクセスIDMAシステムにおける電力制御およびSNR発展法による性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会(IT)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 雲雀恵太, 神原征弥, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 センシングデータの相関性を生かした無線連合学習
3. 学会等名 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会(CS)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大坂 主, 中西 日向子, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 マルチバスマフェージング環境下での2次Reed-Muller列を用いたアンソースランダムアクセス通信
3. 学会等名 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会(CS)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島大, 木村共孝, 程 俊
2. 発表標題 アンソースランダムアクセス通信における繰り返し干渉除去による衝突メッセージの復号
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会(IT)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神原征弥, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 仲上・ライスフェージング環境での重畳符号化協調通信の有限長伝送性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論とその応用シンポジウム(SITA2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中西日向子, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 アンソースランダムアクセス通信における固有なフェージング値によるデバイスの区別と部分メッセージのスティッチング
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論とその応用シンポジウム(SITA2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Song, K. Cai, X. Zhong, J. Yu, and J. Cheng
2. 発表標題 Coding for resistive random-access memory channels
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (Globecom) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 L. Wei, S. Lu, H. Kamabe, and J. Cheng
2. 発表標題 User identification and channel estimation by DNN-based decoder on multiple-access channel
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (Globecom) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yamagishi, G. Song, T. Kimura, and J. Cheng
2. 発表標題 Performance evaluation of LDPC coded partial-access IDMA systems with SNR evolution
3. 学会等名 IEEE Region 10 Conference (TENCON) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kambara, G. Song, T. Kimura, and J. Cheng
2. 発表標題 Optimal power allocation of superposition-coded relaying with finite-blocklength transmission over quasi-static Rayleigh channels
3. 学会等名 Int. Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上智貴, 木村共孝, 程俊
2. 発表標題 レイリーフェージング環境下での空間結合符号化Slotted ALOHA システムにおける有限長パケット伝送特性の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神原 征弥, 木村 共孝, 程 俊
2. 発表標題 レイリーフェージング環境下3ノード双方向協調通信における最大比合成を用いた有限長伝送システムの性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会情報理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 L. Wei, S. Lu, H. Kamabe, and J. Cheng
2. 発表標題 User identification and channel estimation by iterative DNN-based decoder on multiple-access fading channel
3. 学会等名 IEICE Technical Report
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------