

Private LoRa インタフェースを用いた TCP/IP 通信における 複数フロー競合時の性能評価

坂本 淳平[†] 野林 大起^{††} 塚本 和也^{†††} 池永 全志^{††} 佐藤 剛至^{††††}
滝沢 賢一^{††††}

[†]九州工業大学 大学院 工学府 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

^{††}九州工業大学 大学院 工学研究院 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

^{†††}九州工業大学 大学院 情報工学研究院 〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

^{††††}情報通信研究機構レジリエント ICT 研究センター 〒980-0812 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-3

E-mail: †sakamoto.jumpei752@mail.kyutech.jp, ††nova@ecs.kyutech.ac.jp

あらまし Low-power wide-area (LPWA) は、IoT における主要な通信技術として期待されている。LPWA を搭載したセンサによるネットワークは、LPWA 独自の通信方式で形成されることから、ネットワーク内のセンサ間の通信は可能であるが、インターネットに接続された他の通信機器とは直接通信ができないため、センサ情報の活用範囲が限定される。先行研究では、LPWA の一つの通信方式である Private LoRa インタフェースを用いて TCP/IP 通信を実現し、インターネット上の接続機器との通信を可能にした。また、Private LoRa を用いて TCP/IP 通信を実現する IP2LoRa 上において、TCP の通信性能を改善するパケット送信制御手法により通信性能の向上を果たした。しかし、先行研究におけるパケット送信制御手法は複数の通信が同時に発生する場合に対応していない。そこで本研究では、IP2LoRa 上において、複数の通信が発生した際にも通信性能を改善する機能を開発し、実機実験によりその有効性を評価する。

キーワード Low-power wide-area (LPWA), Private LoRa, TCP/IP

Experimental Evaluation for TCP Performance with Multiple Flows using Private LoRa Interface

Jumpei SAKAMOTO[†], Daiki NOBAYASHI^{††}, Kazuya TSUKAMOTO^{†††}, Takeshi IKENAGA^{††}, Goshi SATO^{††††}, and Kenichi TAKIZAWA^{††††}

[†] Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{††} Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{†††} Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology
680-4 Kawazu, Iizuka-shi, Fukuoka, 820-8502 Japan

^{††††} Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology
2-1-3 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-0812 Japan

E-mail: †sakamoto.jumpei752@mail.kyutech.jp, ††nova@ecs.kyutech.ac.jp

Abstract Low-power wide-area (LPWA) is a major communication technology for the Internet of Things (IoT). However, since LPWA does not conform to the TCP/IP protocol stack and employs its own unique protocol, it is difficult for sensors equipped with LPWA I/F to connect to the Internet directly. In a previous study, we implemented and introduced the TCP/IP function to the Private LoRa device, one of the LPWA. Also, we have implemented packet transmission control to improve single TCP communication performance. In this study, we implement a function that can communicate even when multiple communications occur, and evaluate its effectiveness by real machine experiments.

Key words Low-power wide-area (LPWA), Private LoRa, TCP/IP

1. はじめに

Low-power wide-area (LPWA) は低消費電力、長距離通信、低コストで導入可能であることから、IoT における主要な通信技術として着目されている。IoT における LPWA ネットワークとしては、LPWA を搭載したセンサによるネットワーク（以降、センサネットワーク）が多く形成されているが、各センサネットワークは独自の通信方式に基づき形成されているため、ネットワーク内のセンサ間通信は可能であり、センサ情報を共有できるが、ネットワーク外にあるインターネットに接続された他の通信機器とは直接通信ができないため、センサ情報の活用範囲が限定される。

先行研究では、センサ情報の活用範囲を拡大するため、LPWA の一つの通信方式である Private LoRa インタフェースを用いて TCP/IP 通信を実現した [1] [2]。具体的には、Airbus CyberSecurity が開発した、LoRa デバイスに仮想インタフェースの生成やパケット処理を行う IP2LoRa [3] を実装することにより TCP/IP 通信を可能にし、TCP および UDP 通信を用いて性能を評価した。これにより、TCP/IP を用いることでインターネット上の接続機器と IP アドレスを用いて通信を実現出来ることを示した。しかし、TCP を用いた通信では、LoRa デバイスの物理的な伝送レートの 10% 以下のスループットとなっており、想定される以上にスループットが低くなった。これは、TCP が輻輳制御アルゴリズムによって 2 パケットを連続して送信しようとした際に、データパケットと ACK パケットの送信が重なり、パケットの受信が正しく行えないために生じた。そこで、先行研究 [4] [5] [6] において、IP2LoRa 上にパケットの連続送信を防ぐ、または、パケットの衝突を回避する伝送制御手法を導入することで、性能改善を達成した。しかし、先行研究においては、単一の通信のみを考慮した性能改善手法とその評価を行っており、複数の通信が同時に発生する場合を想定していなかった。現実の環境では、通信プロセスが同時に実行される状況や複数デバイスが同時に通信を行う状況など、複数の通信が同時に発生することが想定される。本研究では、Private LoRa を用いて TCP/IP 通信を実現する IP2LoRa 上において、複数の通信が同時に発生した際も通信品質の低下を抑制する機能を実装する。本手法は、IP2LoRa が IP 及び TCP ヘッダから得られる情報を 5-tuple として保存し、通信ごとに独立した送信処理を行うことで複数の同時通信に対応する。提案手法を実装した機器でネットワークを構成し、複数通信を発生させた際の TCP スループットを計測することにより、有効性を評価する。

以降では、2 節において、LPWA を用いた関連研究について述べる。3 節において、先行研究とその課題を説明する。4 節において、課題を改善する手法を提案する。5 節において、実験による提案手法の評価結果を示す。6 節において、本研究のまとめ、及び今後の検討課題について述べる。

2. 関連研究

本節では、関連研究について述べる。文献 [7] では、LPWA ネットワークと Wi-Fi や LTE などの LPWA と異なるネットワー

クを接続し、両方のネットワークの利点を活用できるクロスオーバー通信を実現することを目的として、TCP/IP ネットワークを用いたサブ GHz 帯通信ブリッジを提案している。HTTP ダウンロードによる通信動作の評価を行った結果、ダウンロード時間が不安定であった。これは、通信損失が発生した場合、TCP 再送による大きな遅延が発生する場合があるためである。また、この結果から LPWA デバイスにおける TCP 再送信セグメントの冗長伝送を回避することで、TCP の通信性能を向上させると述べられている。

文献 [8] では、LoRaWAN ネットワークを介して LoRaWAN デバイスの TCP ベースのリモート管理をサポートするシステムを実装し、より良いパフォーマンスを実現するために、ヘッダー圧縮、ネットワーク層の再送信、およびデュアル LoRaWAN モジュールなどの手法を提案している。tail や scp などのコマンドの完了時間をさまざまなパケットロス率の環境下で測定し、システム動作の性能を示している。

LPWA は利用が拡大しているが、ネットワークの拡大に伴い、独自のプロトコルでのネットワークではなく、共通のプロトコルでのネットワーク構築が求められる。そのため、上記の関連研究のように、LPWA ネットワークを介して TCP/IP パケットを送信するシステムを構築し、そのシステムの性能評価が行われている。本研究では、TCP 通信を LPWA ネットワークで利用する際に、複数の通信プロセスが同時に実行される状況や複数デバイスが同時に通信を行う状況など複数の通信が同時に行われることを考慮し、複数通信を発生させた際の TCP スループットを評価する。

3. IP2LoRa を用いた TCP/IP over Private LoRa

本節では、先行研究とその課題について説明する。

3.1 概要

先行研究では、LPWA において汎用的な通信を実現するため、TCP/IP 通信可能な LPWA ノードを作成した。実際には、LPWA の一つの通信方式である Private LoRa で TCP/IP を利用可能にする仮想インタフェースドライバ (Virtual Interface Driver, VID) を実装した。VID には、IP2LoRa に拡張を加えたものを利用した。これにより、TCP/IP を用いることでインターネット上の接続機器と IP アドレスを用いて通信を実現出来ることを示したが、IP2LoRa を実装したデバイスを用いた通信性能評価では、TCP を用いた通信の性能が著しく低下する結果が得られた。そこで、TCP 通信の性能を改善するために、Stop-and-Wait 方式や遅延 ACK 方式を用いた性能改善手法を実装した。

3.2 Stop-and-Wait 方式

Stop-and-Wait 方式は、TCP からの送信パケットを Stop-and-Wait にする手法である。つまり、送信側は 1 度に 1 つのパケットを送信し、ACK を受信するまで次のパケットを送信しない。2 パケット連続送信を防ぎ、受信処理できないパケットをなくし、性能改善を果たした。この Stop-and-Wait を実現するために、IP2LoRa にて広告ウィンドウサイズを 1 に書き換えて送信側に通知する。広告ウィンドウサイズを 1 にすることにより、送信側がウィンドウサイズを決定する際に輻輳ウィンドウサイ

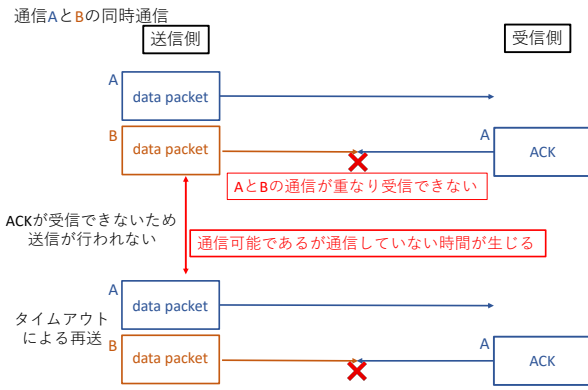


図 1: 先行研究実験時の TCP 通信の流れ 1

ズより小さい値である広告ウィンドウサイズがウィンドウサイズとして適用されるため、その値は 1 になる。これにより、連続送信量を 1 に制御することが可能となり、Stop-and-Wait の通信が実現出来る。

3.3 遅延 ACK 方式

遅延 ACK 方式は、ACK パケットの送信を遅らせて、複数のパケットに対して確認応答を一括で返すことにより、Stop-and-Wait 方式より効率的な通信を実現したものである。具体的には、IP2LoRa 上において TCP の広告ウィンドウサイズを 2 パケット分書き換えることと ACK の送信制御を行う。IP2LoRa は ACK パケットをキャプチャした際に即座に送信せず、一定時間待機した後に送信を行う。この待機時間中に次の ACK パケットの送信要求が入ると前の ACK パケットを破棄し、この ACK パケットを即座に送信する。

3.4 複数通信発生時の課題

先行研究では、単一の通信のみを考慮した性能改善手法であり、複数の通信が同時に発生する場合に対応していない。Stop-and-Wait 方式は、送信側は一度に 1 パケットのみを送信し、パケットを送信した後、送信側は ACK を受信するまで次のパケットを送信しないため、ロスが発生した際にスループットの大幅な低下が生じることが想定される。単一の通信では送受信タイミングが重なることはないが、複数の通信が同時に行われている状況では、複数の送信端末からのパケット送信が重複し、これによるパケットロスがスループットの大幅な低下をもたらす(図 1)。さらに、通信開始のタイミングが同時になってしまうとコネクション確立時のスリーウェイハンドシェイクパケットがロスした結果、コネクション確立が失敗し、通信が開始できない場合もある。また、遅延 ACK 方式は、2 パケット連続で送信されるデータに対してのみ有効な手法である。図 2 のように、異なる通信が交互に連続して行われるような場合、一方の ACK パケットのみしか送信しない状況が発生する。現実の環境では、複数の通信が発生することが想定されるため、複数の通信が発生する場合にも対応している必要がある。

4. 提案手法

本研究では、Private LoRa を用いて TCP/IP 通信を実現する

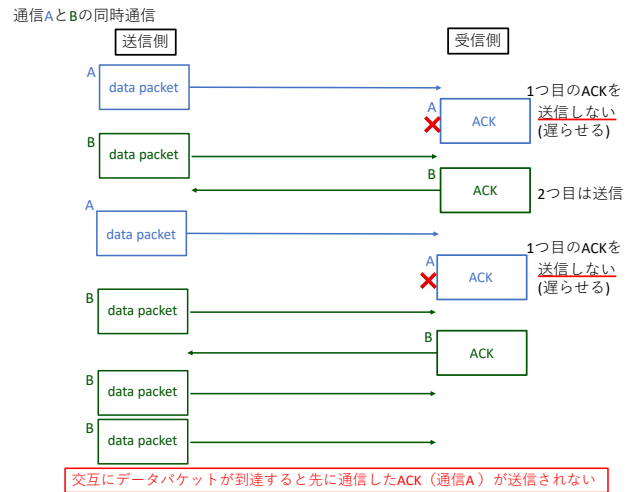


図 2: 先行研究実験時の TCP 通信の流れ 2

IP2LoRa 上において、複数の通信が発生した際の性能を改善する機能を実装する。前節で論じたように、既存手法では、単一の通信のみを考慮した性能改善手法であり、複数の通信が発生した際に、大幅な通信速度の低下や通信不可になるという課題がある。この課題を解決するために、通信ごとに送信処理を変える機能を実装する。本手法では、各通信の 5-tuple を保存し、これを元にパケットの送信処理の仕方を判断する。5-tuple は、送信元アドレス (Source IP)、宛先アドレス (Destination IP)、送信元ポート番号 (Source Port)、宛先ポート番号 (Destination Port)、プロトコル (Protocol) から構成される。本研究では TCP 通信のみを取り扱うためプロトコルは TCP で同一であるが、通信プロセスごとにポート番号が割り当てられるため、通信が異なればポート番号は異なる。さらに、IP アドレスはデバイス毎に割り当てられるため、デバイスが異なれば IP アドレスは異なる。通信時に 5-tuple を保存し、各パケットの 5-tuple と比較することで通信を判断する。これは実際には、IP2LoRa 上において実行される。IP2LoRa は IP レイヤからのパケットを受け取った際にパケットのヘッダを確認する。IP ヘッダから送信元と宛先の IP アドレスおよびプロトコルを確認する。また、TCP ヘッダから送信元と宛先のポート番号を確認する。これらを組み合わせて 5-tuple とし保存する。IP2LoRa は次のパケットを受け取った際には、同様にヘッダからパケットの 5-tuple を確認し、IP2LoRa が保存している 5-tuple と比較する。5-tuple が等しい場合には、同じフローの通信と判断する。この場合、前回と同様の送信処理プロセスを使用する。一方で、5-tuple が異なる場合には、異なる通信として判断し、新たな 5-tuple として保存する。また、前パケットとは異なるプロセスで送信処理を行う。通信ごとに送信処理プロセスを分けた後は、それぞれのプロセスごとに先行研究の遅延 ACK 方式のように ACK パケットの遅延送信などの送信処理が行われる。

5. 性能評価及び考察

提案手法の有効性を評価するため、実機環境により測定した。本節ではその実験方法及び実験結果と考察を示す。

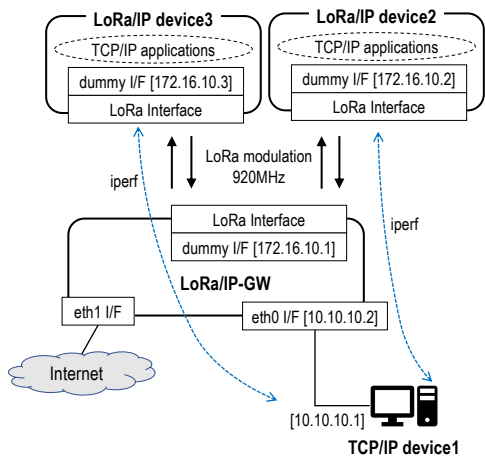


図 3: 実験環境：構築ネットワーク

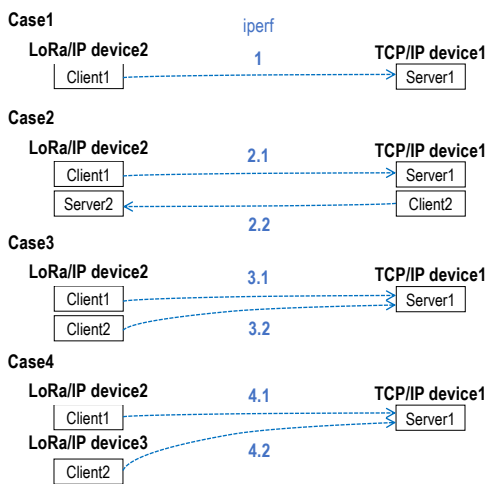


図 4: 実験環境：計測シナリオ

5.1 実験環境

図 3 に本研究で構築した実験環境を示す。LoRa/IP デバイスと LoRa/IP-GW には、Raspberry Pi 3 Model B+ (RasPi3) を用い、LoRa インタフェースとして RFLink 社の RM-92A を搭載した。また、TCP/IP デバイスにも RasPi3 を用い、LoRa/IP-GW と TCP/IP デバイスの間は Ethernet を用いて有線接続した。LoRa/IP デバイスと LoRa/IP-GW には、前節にて提案した制御手法を導入した IP2LoRa を実装した。それぞれの機器には図 3 に示すように IP アドレスを設定した。LoRa/IP-GW は、ルーティング機能を設定した LoRa デバイスであり、TCP/IP デバイスとの接続のために IP アドレス 10.10.10.2 を割り当て、他の LoRa デバイスを接続するために IP2LoRa により作成された仮想インタフェースの IP アドレスが 172.16.10.1 である。LoRa/IP デバイスは、TCP/IP 通信を可能にした LoRa デバイスであり、IP2LoRa により作成された仮想インタフェースの IP アドレスは、デバイス 2 が 172.16.10.2 であり、デバイス 3 が 172.16.10.3 である。TCP/IP デバイスは、IP アドレス 10.10.10.1 を割り当てた。

次に、LoRa インターフェースとして使用した RM-92A の

表 1: RM-92A の設定パラメータ

項目	設定値
周波数 [MHz] (ch)	921MHz (26ch)
送信出力:Tx-Power	13dBm (20mW)
誤り訂正符号化率:Error Coding Rate (CDR)	4/5
帯域幅:Bandwidth (BW) [kHz]	500
拡散率:Spreading Factor (SF)	7, 8, 12
キャリアセンス (リトライ)	Use (なし)
4 秒間連続送信時間制限	Use

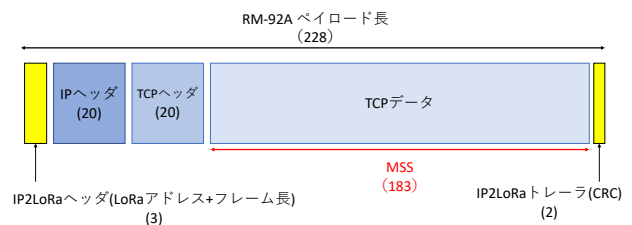


図 5: IP2LoRa フレーム

設定を表 1 に示す。使用する中心周波数は 921MHz (26ch) とし、送信出力は 13dBm (20mW) とした。エラー訂正率 (Error Coding Rate, CDR) は 4/5、帯域幅 (Bandwidth, BW) は 500kHz と固定とし、拡散率 (Spreading Factor, SF) を変更して測定した。RM-92A は ARIB STD-T108 [9] に従い、キャリアセンスと連続送信時間の制限が設けられている。キャリアセンスは、受信時間 5ms に設定されている。連続送信時間制限は 4 秒に設定されており、最初の電波を発射してから連続する 4 秒以内に限り、停波した後の 50ms の送信休止時間を待機をせず再送信が可能となる。RM-92A では、この連続送信時間制限 4 秒と、RM-92A の設定パラメータ毎の伝送レートに従い、ペイロード長が設定されており、本実験での設定では 228Byte とする。

図 3 に示した実験環境において、LoRa/IP デバイスと TCP/IP デバイスの間で、iperf (version 2.0.13) を用いてクライアントからサーバへデータを送信する TCP の通信を発生させ、スループット性能を評価した。通信を発生させる際、パケットの分割が発生しないように、TCP のヘッダサイズを考慮して、TCP のペイロード長 (MSS) は 183Byte と設定した (図 5)。

複数の通信を同時に発生させるために、図 4 に示すように複数のクライアントを用意し、同時に通信を開始した。発生させる総通信量を調整し、1 つのクライアントが送るデータを含んだパケットは 50 パケットになるようにした。通信状況として、LoRa/IP デバイスと TCP/IP デバイスそれぞれにクライアントが存在する場合 (図 4 Case2) や LoRa/IP デバイ스에複数クライアントが存在する場合 (図 4 Case3)、複数の LoRa/IP デバイスが同時に通信する場合 (図 4 Case4) を想定した実験を行った。

5.2 実験結果と考察

図 6~8 に各 SF における TCP スループットの測定結果を示す。それぞれの数値は、5 回の測定結果の平均値である。ケース 1 は、単一の通信における TCP スループットである。ケース 2 は、LoRa/IP デバイスと TCP/IP デバイスそれぞれから同時に

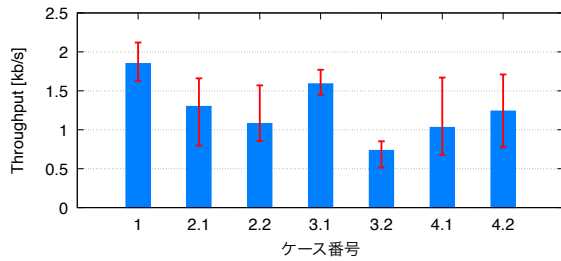


図 6: SF7 の時の TCP スループット

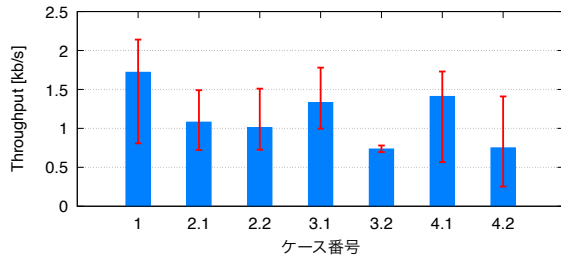


図 7: SF8 の時の TCP スループット

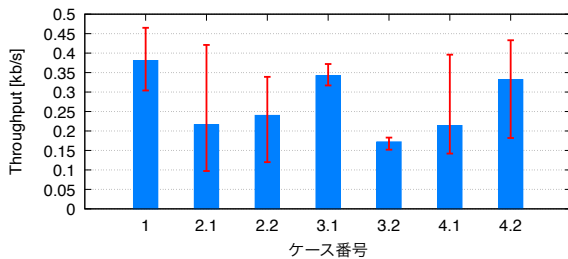


図 8: SF12 の時の TCP スループット

データ送信をした際の LoRa/IP デバイスからの送信結果（ケース 2.1）および、TCP/IP デバイスからの送信結果（ケース 2.2）である。ケース 3 は、LoRa/IP デバイスから 2 つの通信を同時に発生させた際の結果であり、SYN パケットを先に送信開始したものを結果 3.1 に、後に開始したものをケース 3.2 に示す。ケース 4 は、2 つの LoRa/IP デバイスから同時に通信した際の結果であり、LoRa/IP デバイス 2 からの送信結果をケース 4.1 に示し、LoRa/IP デバイス 3 からの送信結果をケース 4.2 に示す。全ての SF において、通信速度は異なるが、同様の結果が得られており、複数通信時における TCP スループットはどのような場合においても単一の通信における TCP スループットより低いスループットとなった。これは、複数の通信が同帯域を使用しており、輻輳が発生するためである。特に 1 つの LoRa/IP デバイスから 2 つの通信を同時に発生させた際のケース 3.2 において、スループットの低下が見られる。これは、一方のデータ送信が優先され、もう一方がデータ送信できていない場合があるためである。具体的には、一方のデータパケットともう一方の確認応答パケットの送信タイミングが重なり、一方のパケットが受信できていないという問題が生じるためである。単一の通信では衝突回避を行っていたが、複数の通信が発生することで双方向の通信が同時に起こり、LoRa の半二重通信であると

いう特性がスループットの低下に大きな影響を与えた。また、2 つの LoRa/IP デバイスから同時に通信した際には、両デバイスからのデータパケットの送信が重なることで、一方のデータパケットが TCP/IP デバイスに到達することができないためにパケットロスが発生し、スループットの低下が見られた。この発生回数が通信性能や結果のばらつきに大きな影響を与えたと考えられる。

6. まとめ

本研究では、Private LoRa を用いて TCP/IP 通信を実現する IP2LoRa 上において、複数の通信が発生した際の通信性能の低下を抑制する機能を実装し、実機実験を通して Private LoRa インタフェースを用いた TCP/IP 通信における複数フロー競合時の性能を示した。今後は、屋外における長距離での性能評価に取り組み、電波の距離減衰や同一周波数帯との干渉などによるパケットロスを検討した際の最適な制御手法の検討をする必要がある。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 23K11067 による成果を含む。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 坂本淳平, 野林大起, 塚本和也, 池永全志, 佐藤剛至, 滝沢賢一, “920MHz 帯 Private LoRa インタフェースを用いた TCP/IP 通信の実装と性能評価,” 信学技報, IA2022-9, pp.49-54, 2022 年 6 月
- [2] J. Sakamoto, D. Nobayashi, K. Tsukamoto, T. Ikenaga, G. Sato and K. Takizawa, “Poster: Implementation and Performance Evaluation of TCP/IP Communication over Private LoRa,” IEEE 30th International Conference on Network Protocols (ICNP), 2022.
- [3] Airbus CyberSecurity, “IP2LoRa,” <https://github.com/airbus-cyber/IP2LoRa/>
- [4] 坂本淳平, 野林大起, 塚本和也, 池永全志, 佐藤剛至, 滝沢賢一, “Private LoRa インタフェースの特性を考慮した TCP 通信性能改善手法,” 信学技報, IA2022-91, pp.93-97, 2023 年 3 月
- [5] J. Sakamoto, D. Nobayashi, K. Tsukamoto, T. Ikenaga, G. Sato and K. Takizawa, “Improvement of TCP Performance based on Characteristics of Private LoRa Interface,” IEEE COMPSAC 2023.
- [6] 坂本淳平, 野林大起, 塚本和也, 池永全志, 佐藤剛至, 滝沢賢一, “Private LoRa インタフェースを用いた TCP/IP 通信における性能改善手法,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2023 年 9 月
- [7] S. Kodama, R. Nakagawa, “Sub-GHz Band Communication Bridge Connecting TCP/IP Network,” EAI Endorsed Trans. IoT, vol. 5, no. 19, Jul. 2019.
- [8] S.Y. Wang, C.H. Chang, “Supporting TCP-Based Remote Managements of LoRa/LoRaWAN Devices,” in Proc. of VTC2019, pp. 1-5, Sep. 2019.
- [9] 一般社団法人電波産業会 (ARIB), “標準規格概要 (STD-T108) 920MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備”