

LPWANの伝送速度を向上させるための パケット型インデックス変調

電気通信大学

先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター (AWCC)

准教授 安達宏一

2021年5月13日

本研究は総務省SCOPE（受付番号JP205004001）「環境ダイナミクスを活用したフレキシブルLPWAの研究開発」の委託を受けて行われたものです

研究背景

- ◎ 「モノ」をインターネットに接続し、お互いに情報を交換したり、情報を集約したりするIoT (Internet-of-Things) が注目されている
 - IoTの特徴
 1. 多数端末がセンシングデータのような少量データを周期的に送信
 2. 低消費電力・長距離伝送が必要
- ◎ 省電力広域ネットワーク (LPWAN : Low Power Wide Area Network) の一種であるLoRaWAN (Long Range Wide Area Network)
 - 物理層：チャープスペクトラム拡散 (CSS: Chirp Spread Spectrum) の拡散率 (SF: Spreading Factor) を変化させることで、長距離伝送を実現
 - MAC層：簡易なMAC層技術を採用
 - 狭帯域伝送のため低データレート伝送
 - 送信時間比率 (DC : Duty Cycle) による送信可能時間制約

拡散率とデータレート

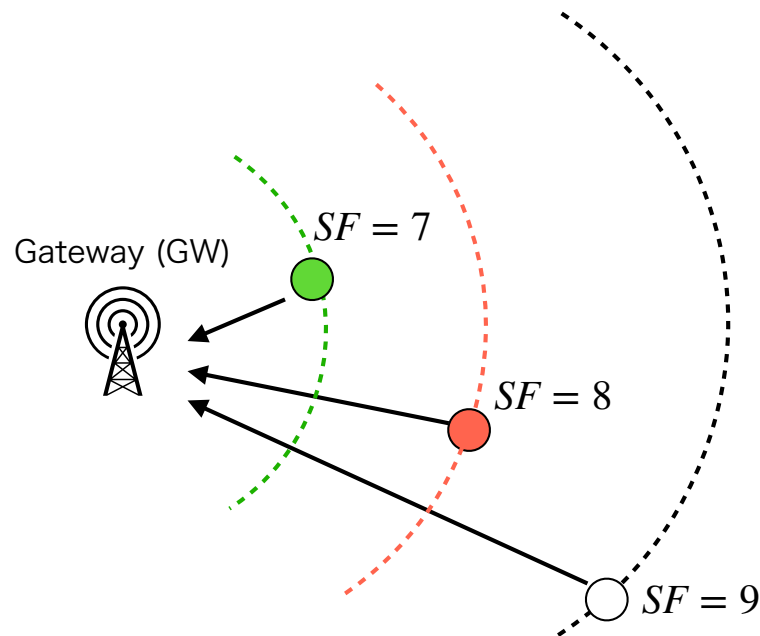
- 拡散率 SF を変更することによって通信可能距離を変更可能
- 拡散率 SF の増加とともに…
 - 信号対雑音比 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) 閾値が下がることにより、雑音への耐性が向上
→ より長い距離で通信が可能
 - データレートは減少し、1つのデータパケットで送信可能なペイロードサイズも著しく減少

表1. 拡散率 SF の影響

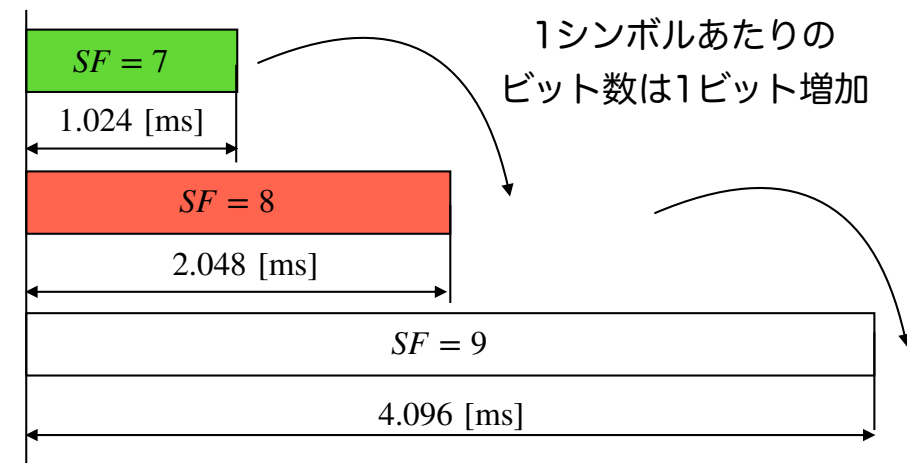
拡散率 (SF), s	データレート [bps]	SNR 閾値 [dB]	ペイロードサイズ [Byte]
7	5360	-7.5	170
8	3125	-10	85
9	1758	-12.5	34
10	977	-15	5

拡散率と通信可能距離

- 拡散率 SF の増加に伴い雑音に対する耐性が高くなるため、通信可能距離が長くなるが、データレートは減少
- 端末が高い拡散率 SF を用いなければいけない環境においては、1つのデータパケットで伝送できるビット数が減少 ⇒ 周波数利用効率の低下



(a) 拡散率と伝送可能距離



(b) 拡散率とシンボル長

図1. LoRaWANにおける拡散率の影響

LoRaWANにおける複数周波数利用

- 各端末はゲートウェイ（GW）から指定された K 個の狭帯域周波数チャネルからランダムに1つを選択してパケットを送信
- ランダムに周波数を選択することにより，他端末から送信されたパケットとの衝突を避けることが可能 ⇒ 干渉回避効果

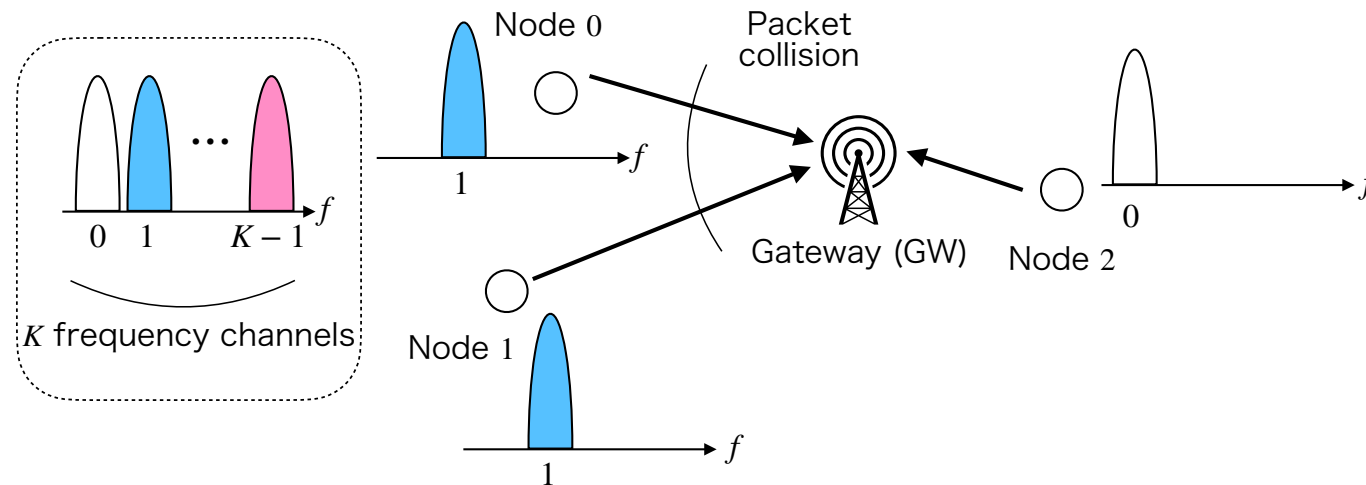


図2. ネットワークモデル

LoRaWANにおけるパケット伝送

- 複数の周波数チャネルからランダムに1つを選択しパケットを送信することで干渉を回避
- 送信比率（DC: Duty Cycle）を満たす周期 T_{frame} [sec]毎にパケット送信
 - 送信タイミングが重なった端末間ではパケット衝突が頻繁に発生

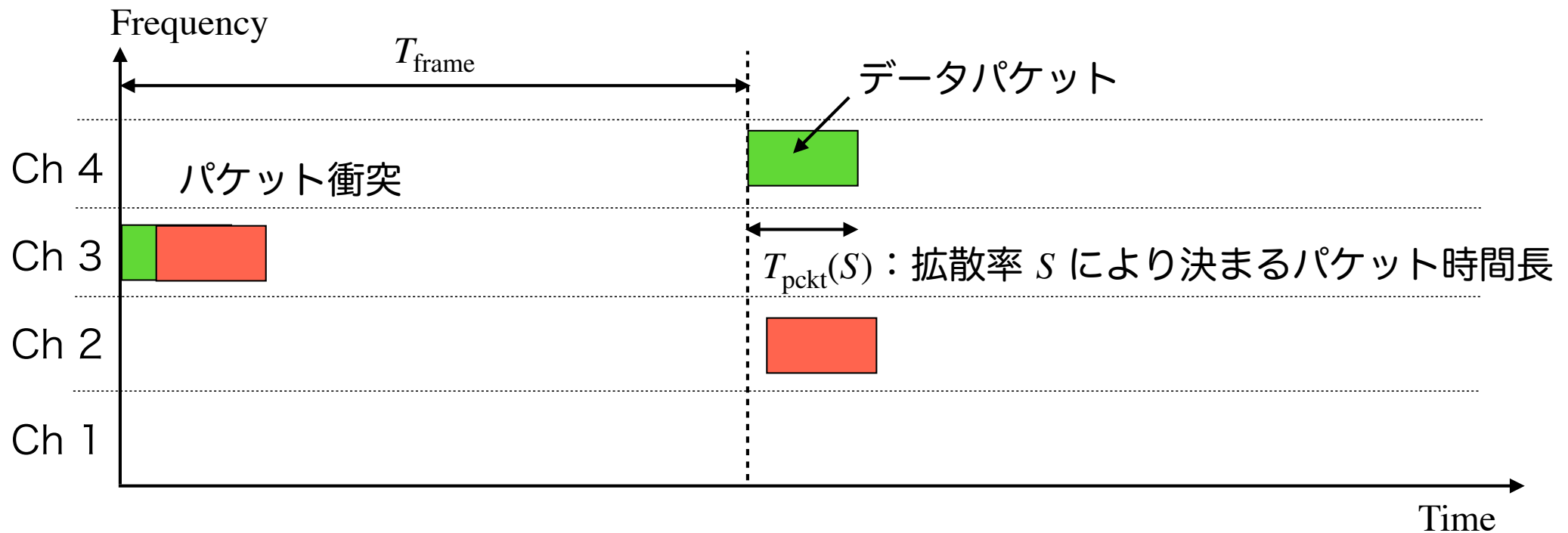


図3. LoRaWANにおけるパケット伝送

従来技術の問題点

- 長距離伝送には高い拡散率 SF が必要
⇒ 1データパケットで送信可能な情報ビット数の減少
- 送信比率（DC）による送信時間の制約
⇒ 送信パケット数を増やすことは困難
- センシング情報などは、周期的にGWへと送信
- LoRaWANに代表されるLPWANでは、各端末のデータ送信周期が比較的長い（数分～数時間）
→ 連続するパケットが送信される間の空白時間を有効に利用できないか？

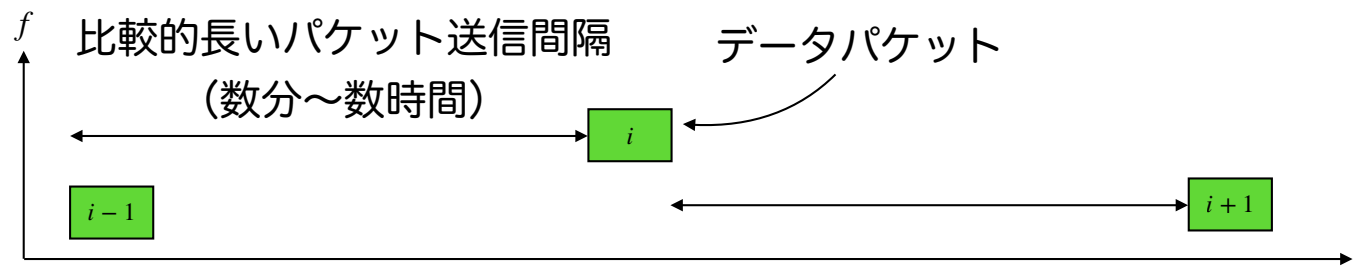


図4. 長周期的に送信されるデータパケット

新技術の特徴

◎ パケット型インデックス変調

(PLIM: Packet-Level Index Modulation)

- ▶ 周波数チャネルと送信タイミングの組み合わせ（インデックス）により、従来のデータパケットに加えて追加の情報ビットを伝送
- ▶ 既存通信規格の変更なしに1パケットで伝送できる情報ビット数を増大

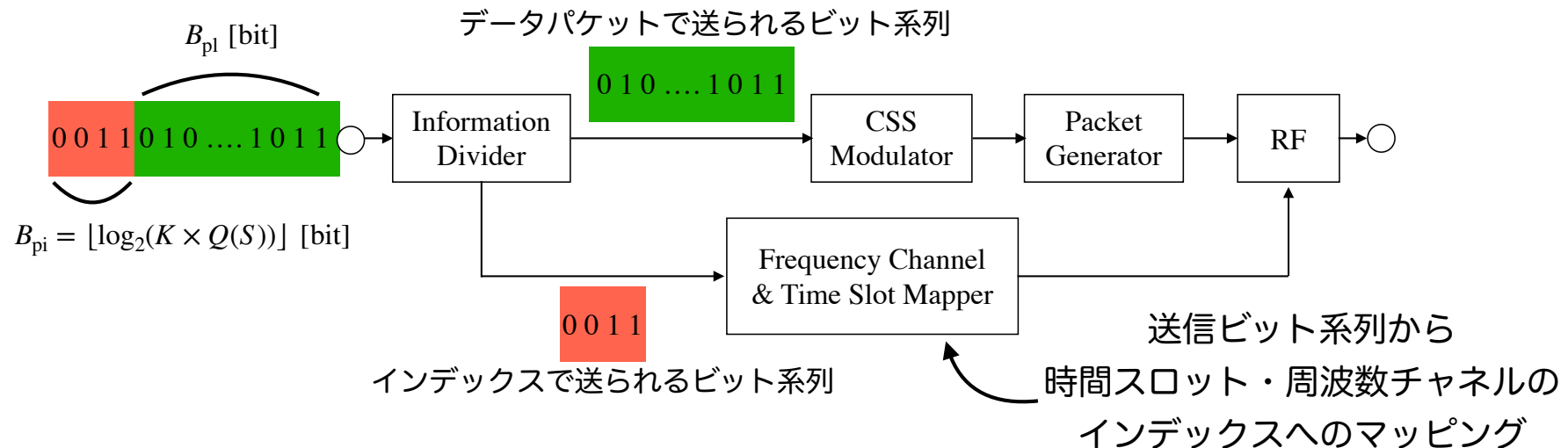


図5. パケット型インデックス変調を用いる送信機構成

PLIMにおけるパケット伝送

- 送信データ系列に基づいて、周波数チャネルと時間スロットの組み合わせ（**インデックス**）を指定してパケットを送信することで情報を伝送
 - 擬似的にランダムな送信タイミングと送信周波数チャネル選択を実現
- 端末間の同期は必要なく、**各端末とGWの間の同期のみが必要**

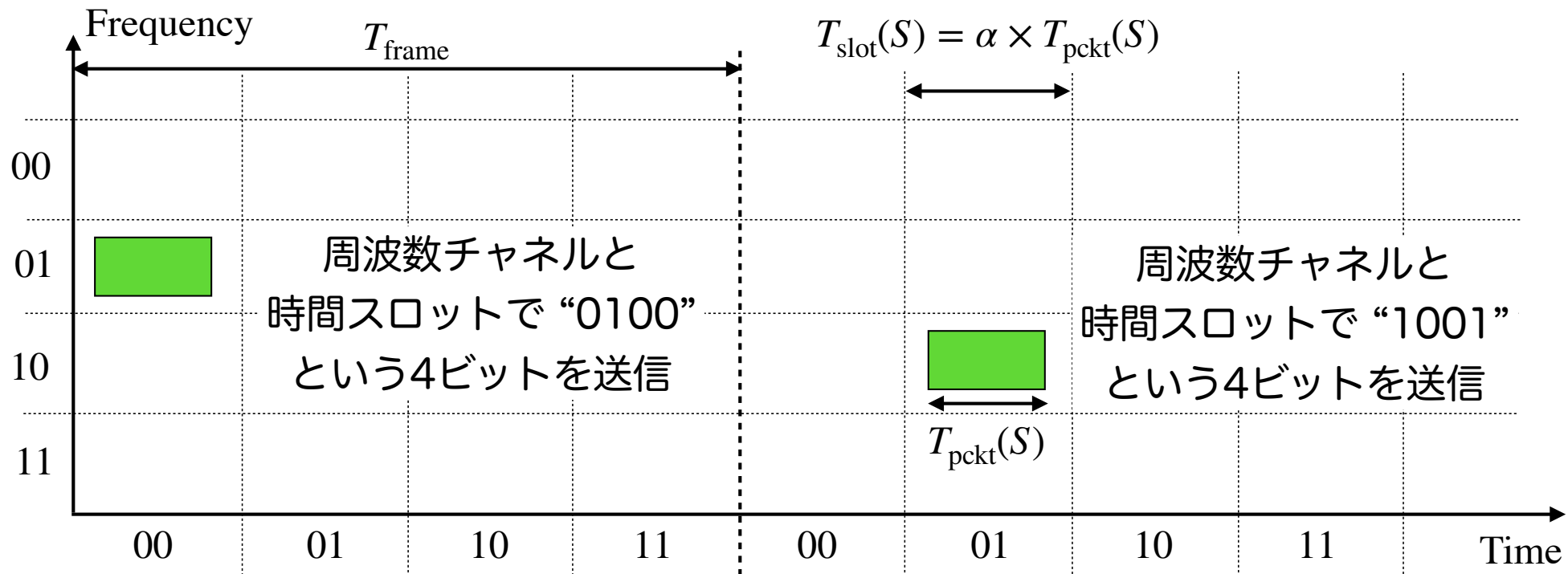


図6. PLIMにおけるパケット伝送

PLIMにより送信可能な情報ビット数

- 周波数チャネルと時間スロットに割り当てられる情報ビット数 B_{pi} [bit]

$$B_{pi} = \lfloor \log_2(K \times Q(S)) \rfloor \quad (3)$$

- ▶ $\lfloor x \rfloor$: x 以下の最大整数を返す関数
- ▶ K : 利用可能な周波数チャネル数
- ▶ $Q(S)$: 拡散率 S 使用時に利用可能な時間スロット数

$$Q(S) = \left\lfloor \frac{T_{\text{frame}}}{T_{\text{slot}}(S)} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{T_{\text{frame}}}{\alpha \times T_{\text{pkt}}(S)} \right\rfloor \quad (4)$$

- ▶ α : 0より大きな任意の変数

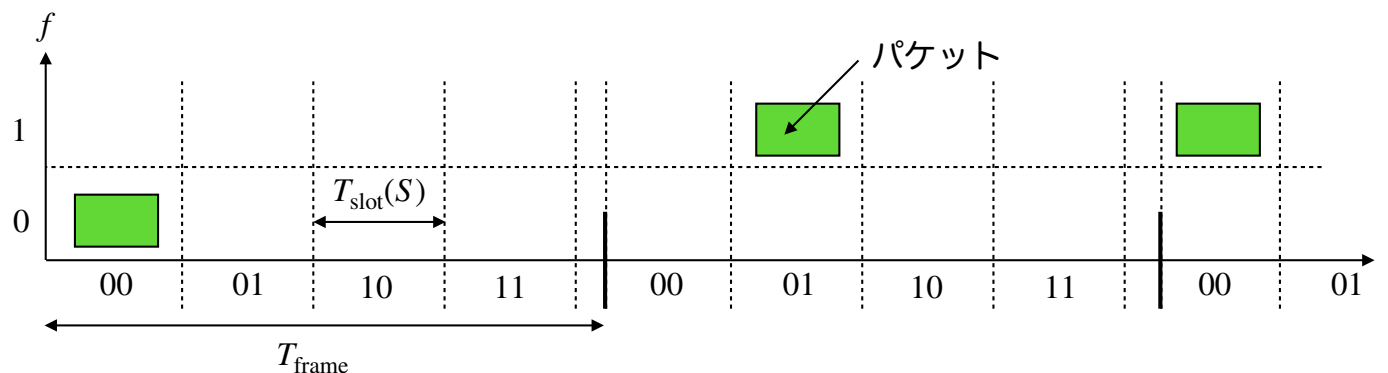


図7. パケット型インデックス変調 (PLIM) における時間スロット

PLIMにより送信可能な情報ビット数

- LoRaWANの1データパケットで伝送できるビット数 B_{conv} [bit]

$$B_{\text{conv}} = B_{\text{pl}} \quad (5)$$

・ B_{pl} : データパケットのペイロードサイズ

- 提案手法PLIMを用いて1パケットで伝送可能なビット数 B_{prop} [bit]

$$B_{\text{plim}} = \underbrace{B_{\text{pl}} + B_{\text{pi}}}_{\text{インデックスにより送信されるビット数}} = B_{\text{pl}} + \lfloor \log_2(K \times Q(S)) \rfloor \quad (6)$$

インデックスにより送信されるビット数

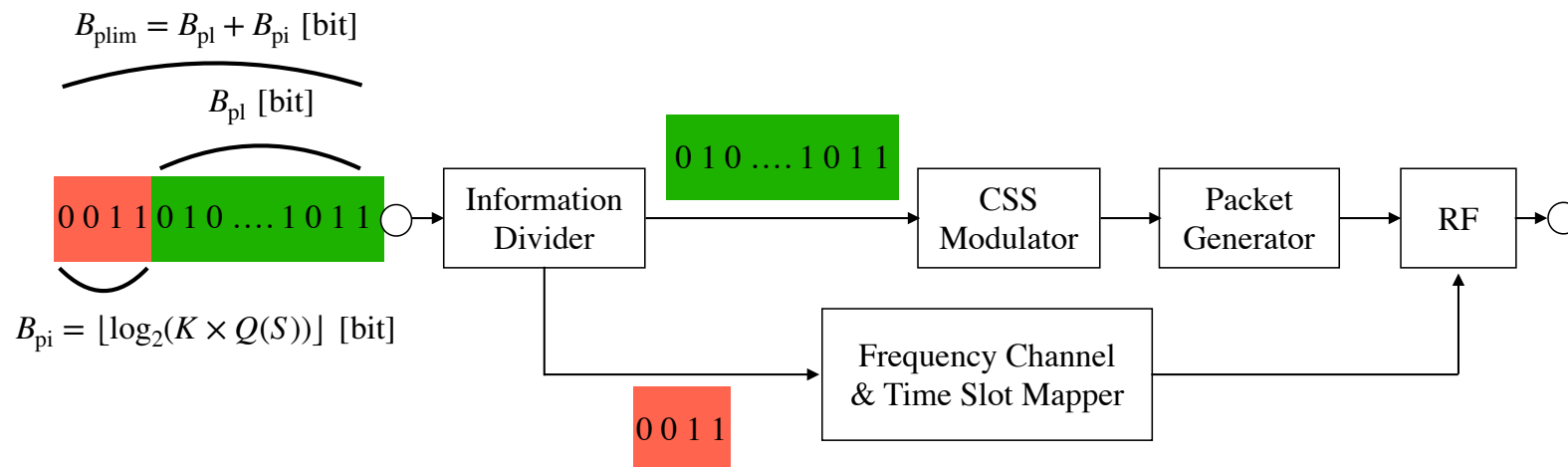


図8. パケット型インデックス変調 (PLIM) を用いる送信機構成

GWでのインデックス検出方法

- GWでは、どの周波数チャンネルでパケット受信したかに基づき周波数チャンネルインデックスを検出
- 各端末の初期パケット送信時刻 T_0 および第 i パケットの受信開始時刻 t_i に基づき、時間スロットインデックス q_i の推定値 \hat{q}_i を検出：

$$\hat{q}_i = \left\lfloor \frac{t_i - i \times T_{\text{frame}} - T_0}{T_{\text{slot}}(S)} \right\rfloor \quad (7)$$

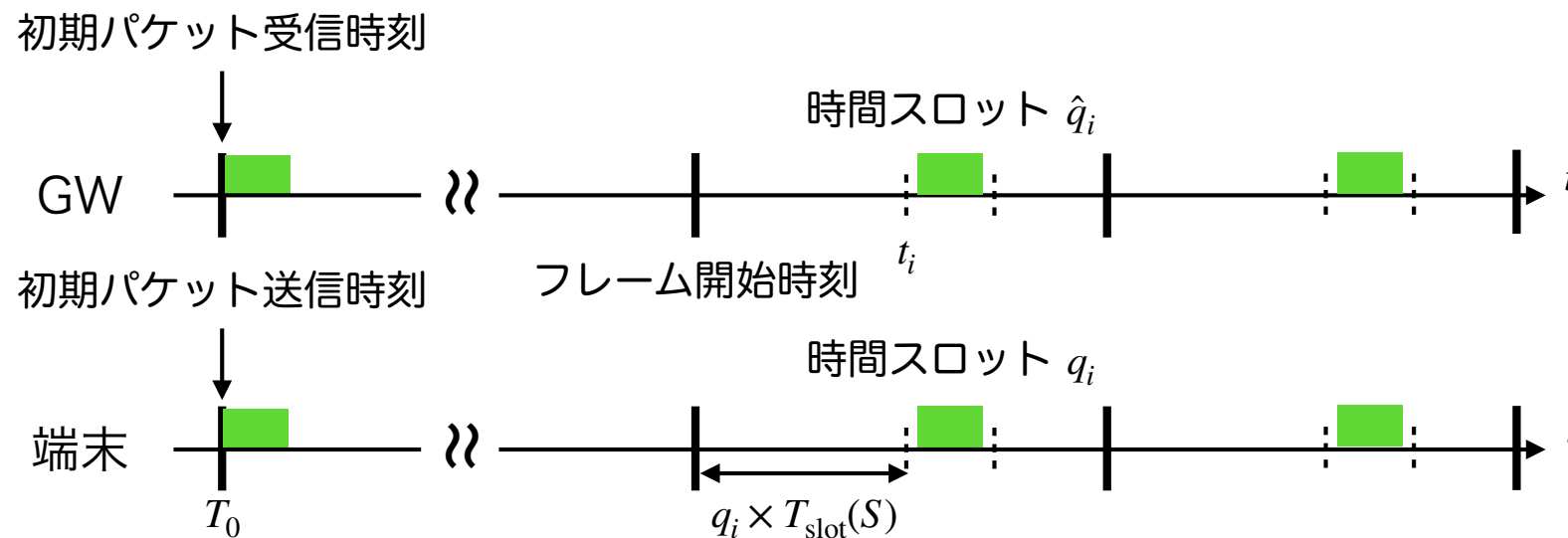


図9. 受信機における時間スロット検出手法
(簡単のため伝搬遅延は省略)

GWでのインデックス検出方法

- ◎ GWでは、パケットを受信した後に
 1. 従来通りパケットを復調し，CSS変調により送られた情報ビットを復調
 2. パケットを受信した周波数チャネルと時間スロットからインデックスを検出
 3. 送信機と逆のマッピングをインデックスに対して行うことで，追加の情報ビットを復調

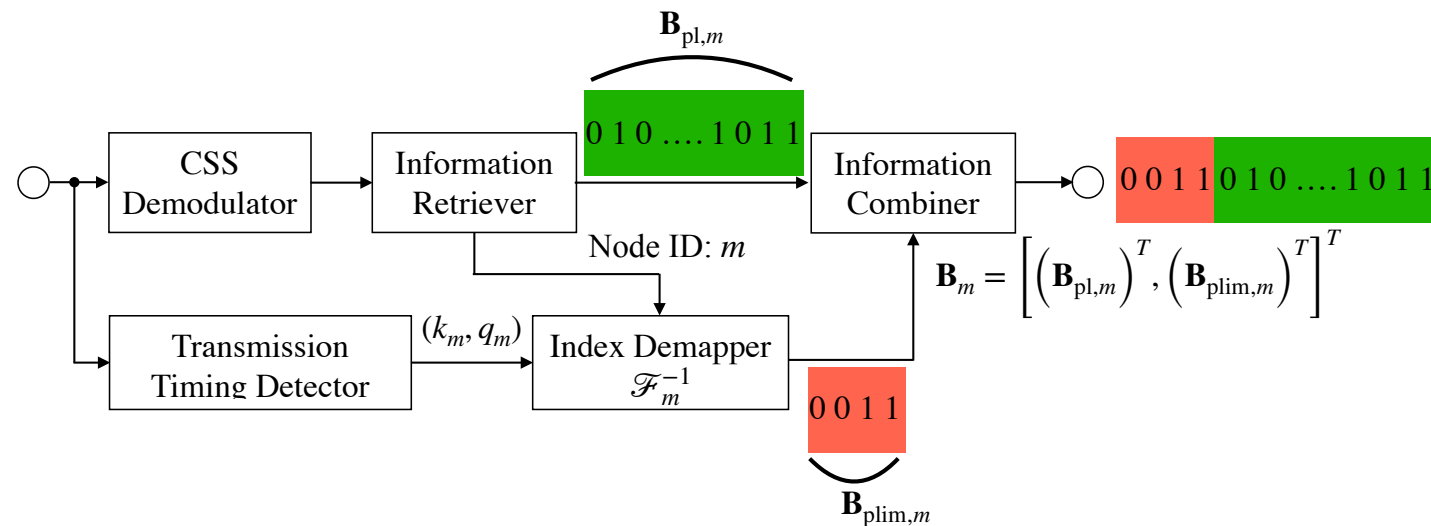


図10. パケット型インデックス変調（PLIM）を用いる受信機構成

GWでのインデックス検出方法

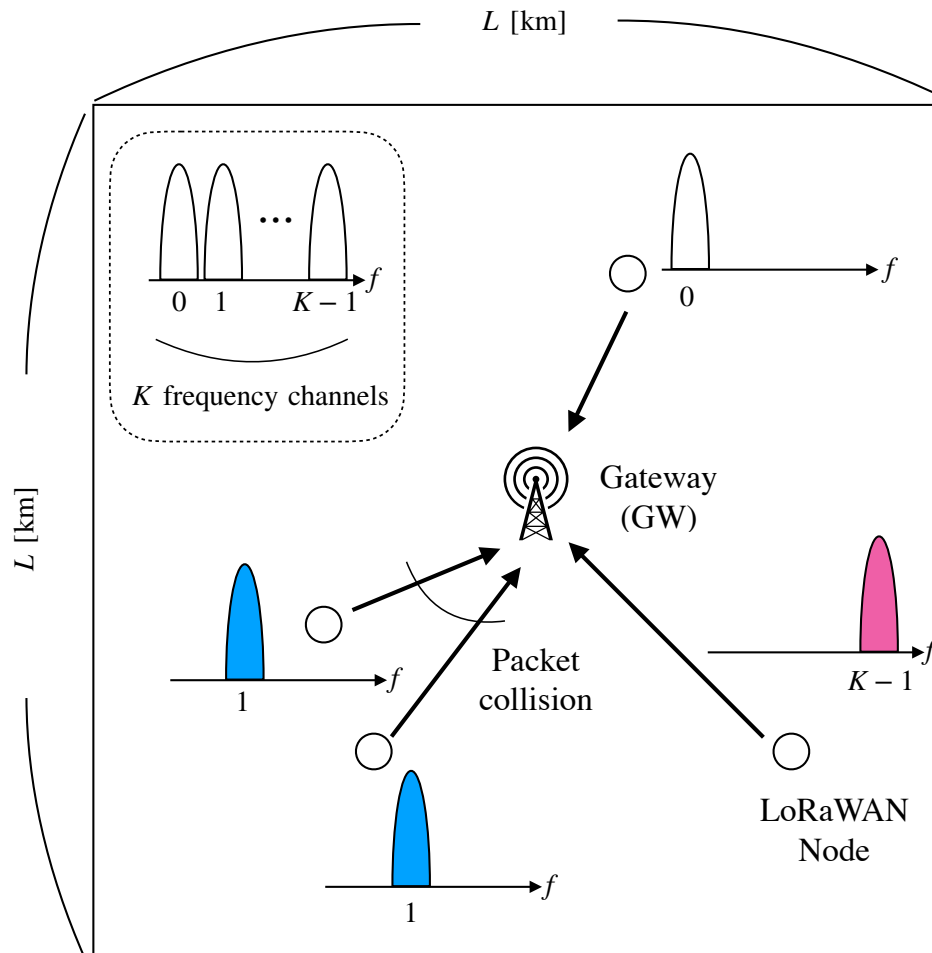
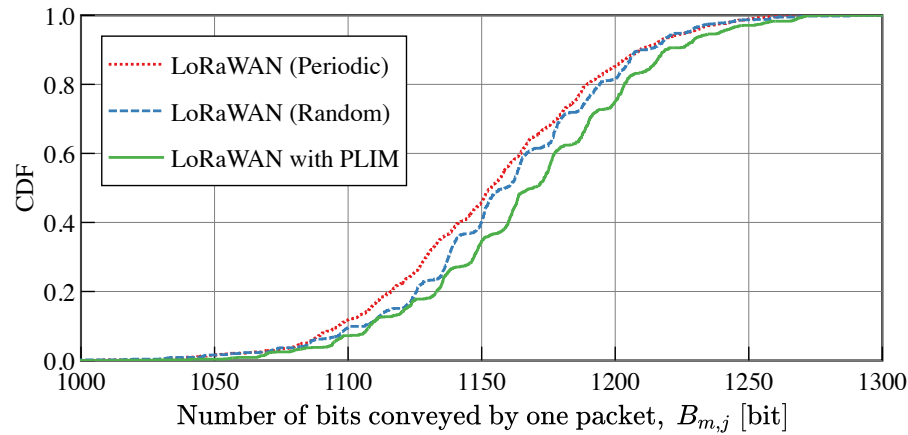


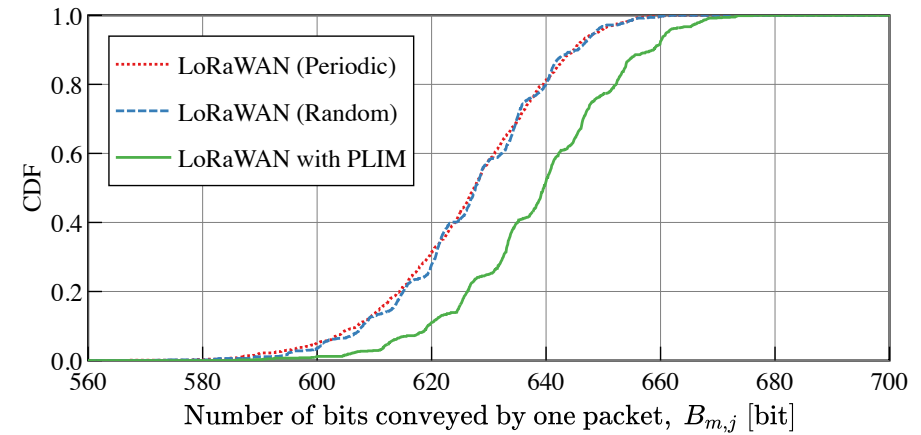
図11. ネットワークモデル

- 端末数 : $N = 1000$
- 周波数チャンネル数 : $K = 16$
- パケット送信間隔 :
 $T_{\text{frame}} = \{30, 60, 120, 300, 600\}$ [sec]
- 拡散率 : $S \in \{7, 8, 9, 10\}$

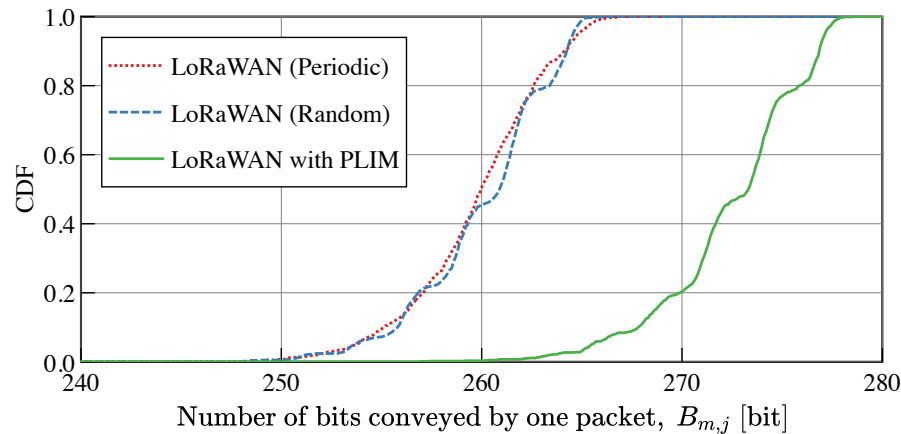
計算機シミュレーション結果



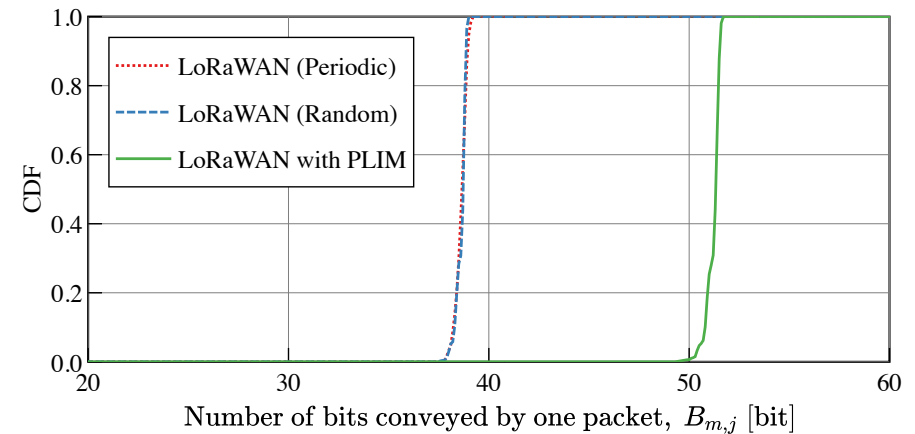
(a) 拡散率 $SF = 7$



(b) 拡散率 $SF = 8$



(c) 拡散率 $SF = 9$



(d) 拡散率 $SF = 10$

図12. 拡散率毎の送信可能情報ビット数のCDF特性

計算機シミュレーション結果

- パケットでの情報伝送に加えて、時間スロットと周波数チャネルで表されるインデックスにより追加の情報ビットを送信することで、従来法と比較して1つのパケットで伝送可能な情報ビット数を増大

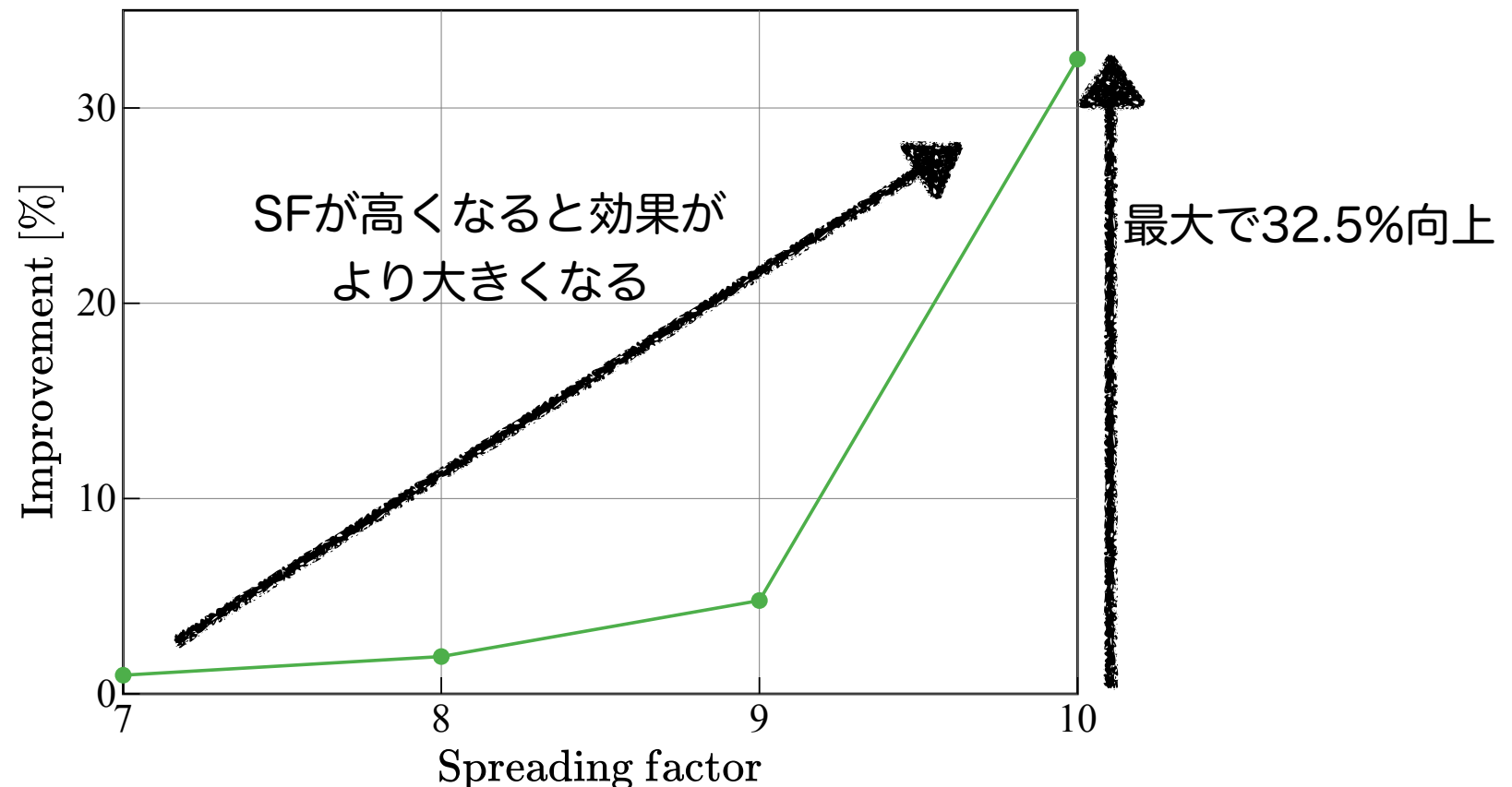


図13. PLIMによる1パケットで送信可能な情報ビット数の増大効果

計算機シミュレーション結果

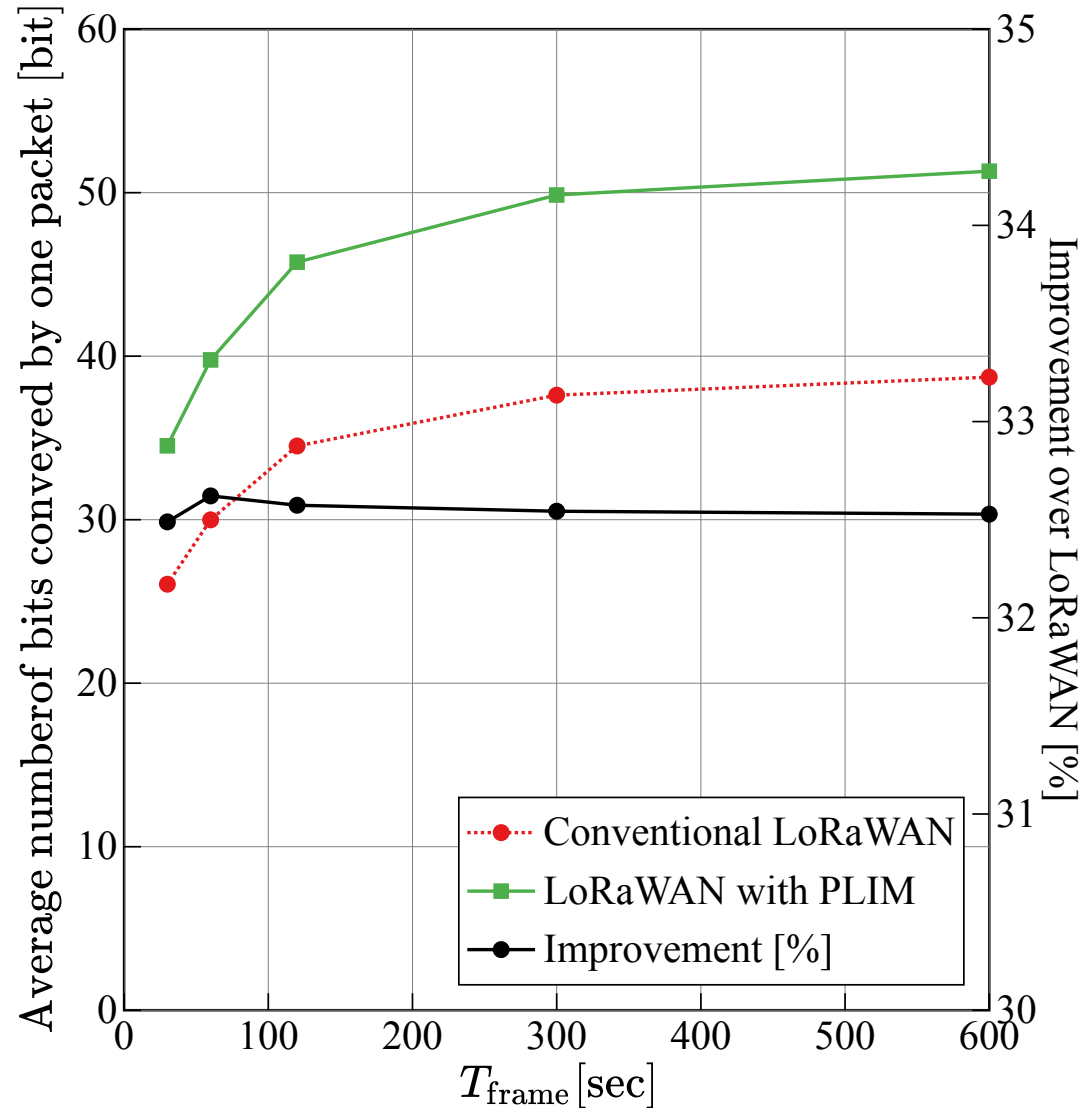
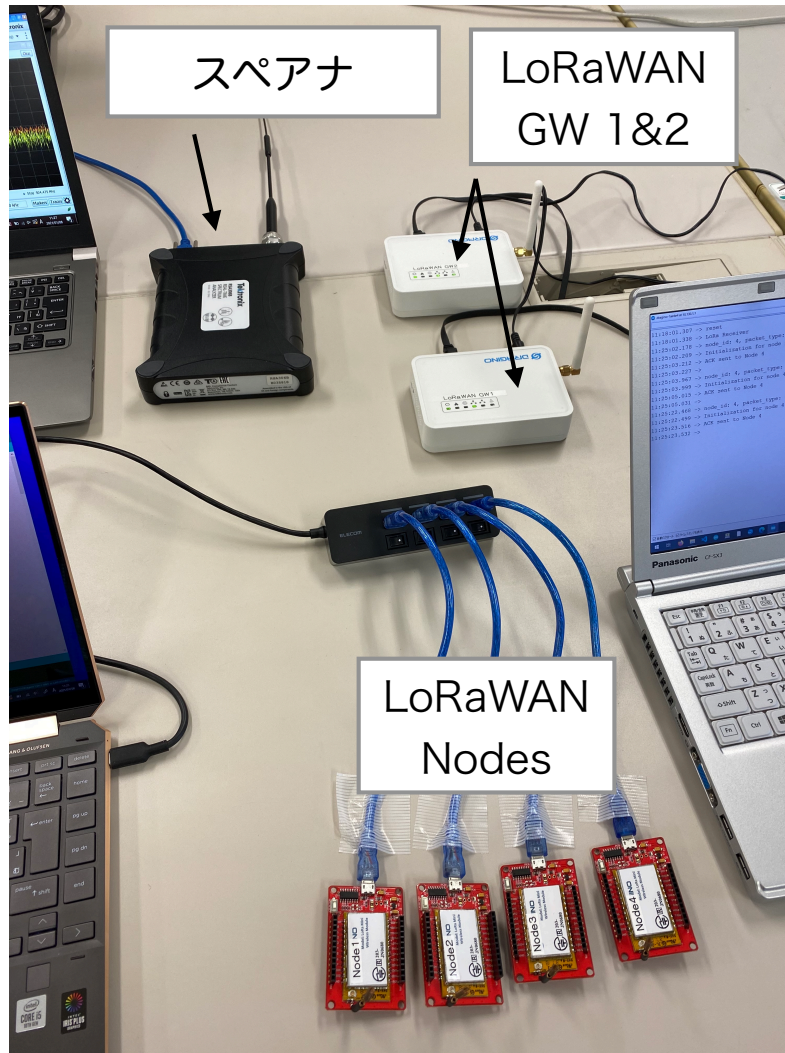


図14. 送信間隔 T_{frame} の影響

- パケット生成周期 T_{frame} の増大に伴い、パケット衝突率が低下するため、情報ビット数が増加
- 提案PLIMを使うことにより、 T_{frame} によらず大幅に伝送可能な情報ビット数を増大可能

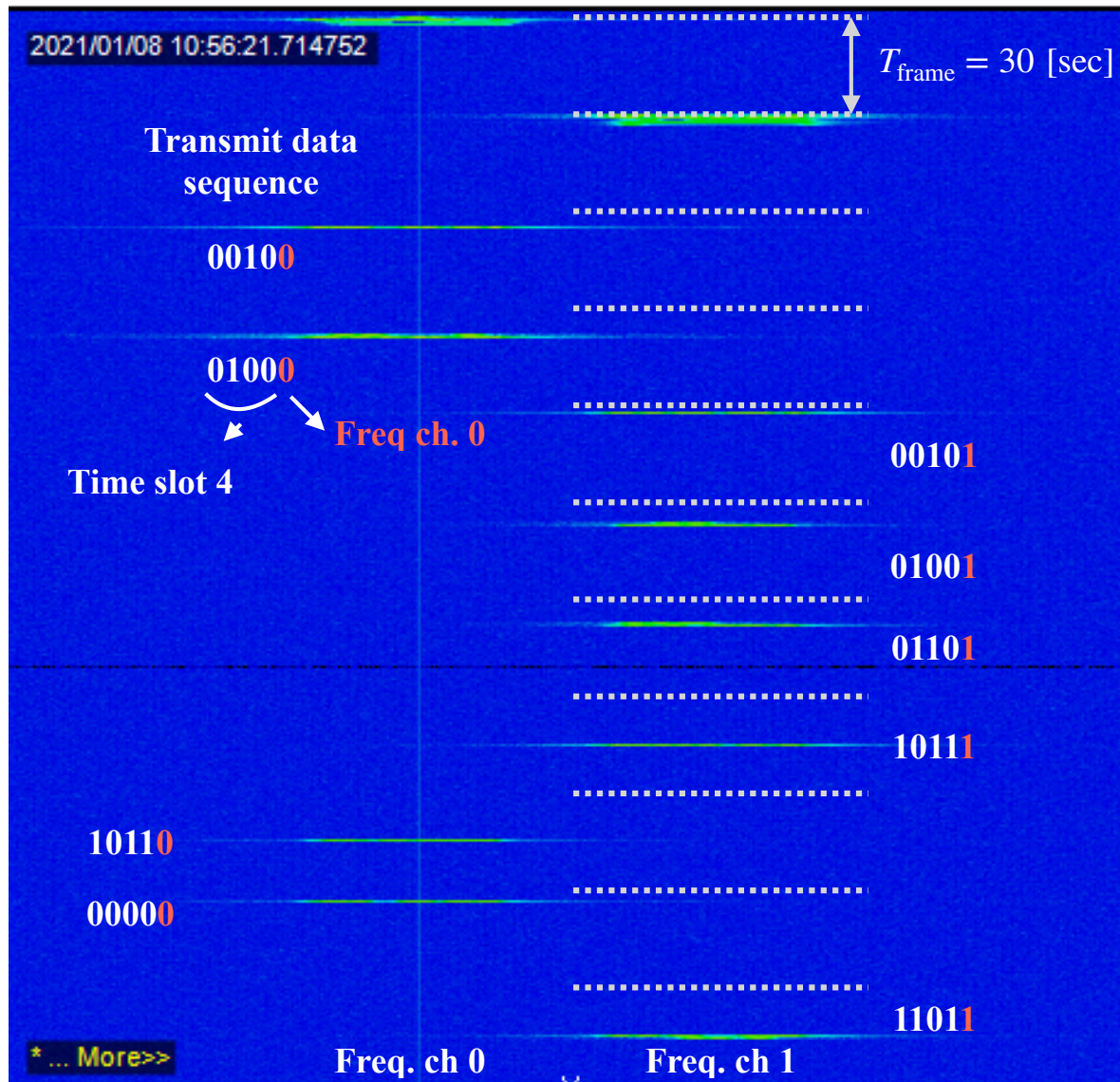
実機実装結果



- 提案PLIMの実現性を示すために、商用のLoRaWAN GWと端末にPLIMをArduinoにより実装
- GW (LG-01) では1つの周波数チャネルしか使うことが出来ないため、2つのGWを用いることで仮想的に2つの周波数チャネルを利用するGWを再現
- LoRaWANの通信プロトコルには一切変更なし

図15. 提案PLIMの実装写真

スペクトルアナライザーによる観測結果



- $T_{\text{frame}} = 30 \text{ [sec]}$ 毎にパケットを生成
- 周波数チャネル数: $K = 2$
- 時間スロット数: $Q = 16$
- $\log_2(K \times Q) = 5 \text{ [bit]}$ をインデックスにより送信可能
- スペクトログラムから分かるように、送信データ系列に基づいて時間スロット・周波数チャネルを選択

図16. PLIM適用時のスペクトログラム

想定される用途

- 高い雑音耐性（高SF利用）を必要とするような環境における情報伝送
- DCなどにより送信時間に制約がかかるような環境においてより多くの情報を伝送したい場合
- 端末のバッテリー容量などに制約があり，限られた数の送信パケットで情報をより多く送信したい場合

実用化に向けた課題

- インデックスの検出位置：
商用LPWANへの適用を考えた場合、ネットワーク内のどこでインデックスの検出を行うのか？ネットワーク内部での遅延などを考慮する必要あり
- 大規模システムでの実証実験の実施：
現時点では、「計算機シミュレーションによる大規模システムでの評価」「少数の端末を用いた実証実験」のみ

企業への期待

- 具体的なアプリケーションに関する提案
 - どのような情報をどの程度の時間間隔で収集する必要があるのか等
 - どの程度の精度で情報を収集する必要があるのか
- 大規模実証実験を行い，実用化に向けて共同で取り組んでいただける企業
- 920MHz帯以外の実証実験を行っていただける企業

本技術に関する知的財産権

- ◎ 発明の名称：情報伝送システム、情報伝送方法、端末プログラム
および基地局プログラム
- ◎ 出願番号： 特願2020-197256
- ◎ 出願人： 電気通信大学
- ◎ 発明者： 安達宏一， 藤井威生， 鶴見康平， 角田真一郎，
蕪木碧仁

お問い合わせ先

- 国立大学法人電気通信大学 産学官連携センター
産学官連携ワンストップサービス
- TEL : 042-443-5871
- Fax : 042-443-5725
- E-mail : onestop@sangaku.uec.ac.jp

まとめ

- ◎ 本提案であるパケット型インデックス変調(PLIM)は既存のLoRaWANの通信規格に変更を加えることなく、1パケットで伝送可能な情報ビット数を増大可能
 - 拡散率 SF が10の時に、従来のLoRaWANと比較して伝送可能情報ビット数を約32.5%増大
- ◎ 実装時に問題となる、GWと端末とのクロックドリフトの影響を考慮した時間スロット検出法を提案
- ◎ 実機評価により、提案手法の実現性を確認