

コグニティブ無線のためのインテリジェント MACレイヤ技術に関する研究開発

電気通信大学 藤井 威生
信州大学 田久 修

2012年10月2日

目次

1. 委託研究概要
2. コグニティブ無線におけるMACレイヤ技術
3. インテリジェントMACレイヤ技術研究成果
 - (1) データベース構築型MACプロトコル
 - (2) TCP レイヤを考慮したアクセス方式
 - (3) 経験学習によるインテリジェント送信電力
 - ・キャリアセンス制御
4. 統合コンセプトおよびシミュレータの開発
5. まとめ

1. 委託研究概要

◆研究者

研究代表者： 藤井 威生 （電気通信大学）

研究分担者： 田久 修 （信州大学）

◆研究期間：

平成21年度～平成23年度

◆研究目的

本研究開発課題では、既存システムと周波数を共用するダイナミックスペクトルアクセス型(DSA型)のコグニティブ無線機において、自律分散セカンダリ無線ネットワークを実現するインテリジェント高度MACレイヤ技術の開発を行う。予測と学習によるMACレイヤ技術の効率改善を図り、最終的に従来の分散プロトコルCSMA/CAに対して、周波数利用効率を3倍にすることを目的とする。

2. コグニティブ無線におけるMACレイヤ技術

◆コグニティブ無線の能力

■ 周波数資源の動的運用

- 周波数・時間・空間の極所的な利用状況を認識し、空きチャンネルを積極的に利用

■ 自律分散性

- 自己解決型の無線機、他システムへの依存性が低く、容易に通信確立が可能

■ 高い適応能力

- 周辺環境の変動に対して高い精度で追従可能

簡易・高効率な自律分散無線ネットワーク構築に最適

コグニティブ無線の活用事例 無線LAN(IEEE802.11規格)



(a) 家庭内のインターネット
インフラとしての無線LAN



(b) 公共無線LAN接続
サービス, 携帯電話から
無線LANへオフロード



(c) Office内ネットワーク
クラウドサーバへの接続

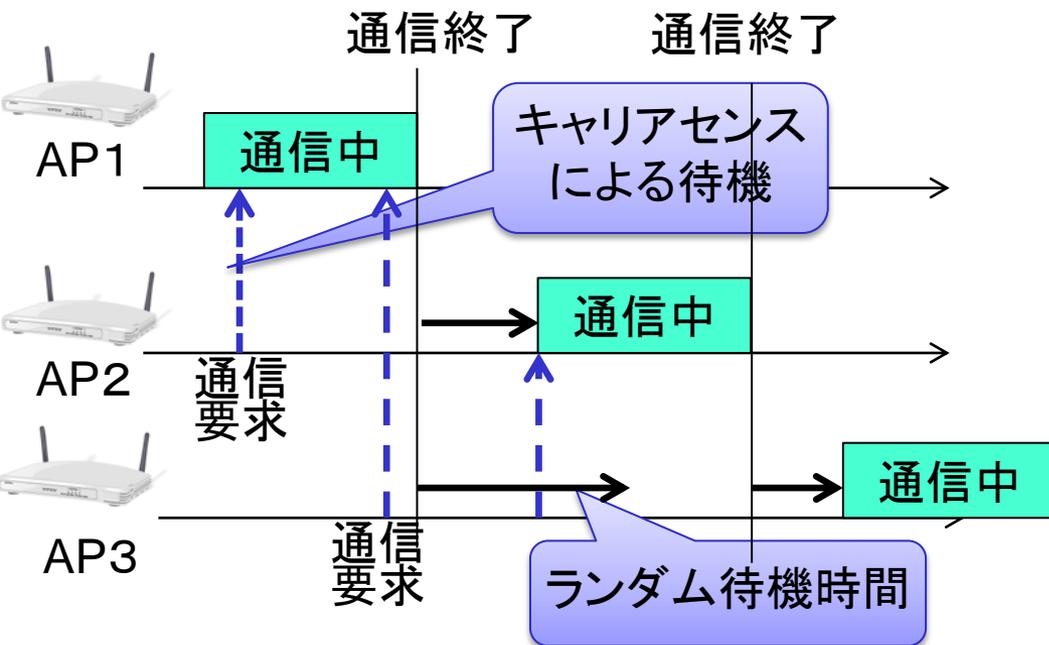
図 無線LANの普及と利用シーン

- ◆ 2.4GHzISMバンド(5GHzUNII)の周波数帯域を利用した無線通信規格
- ◆ 通信範囲:小規模(数10m程度)
- ◆ キャリアセンス機能(他局の無線アクセスの検知)とランダムバックオフ機能(不規則アクセス)機能による自律分散性を確保 → **コグニティブ無線機能**
- ◆ 設置についての専門知識を不要とし、設置・増設を容易にした
→未計画に配置されたアクセスポイントの相互干渉により周波数利用効率:低

無線LANの低効率な周波数運用

自律分散性を維持するため
適応性に欠けた制御が問題

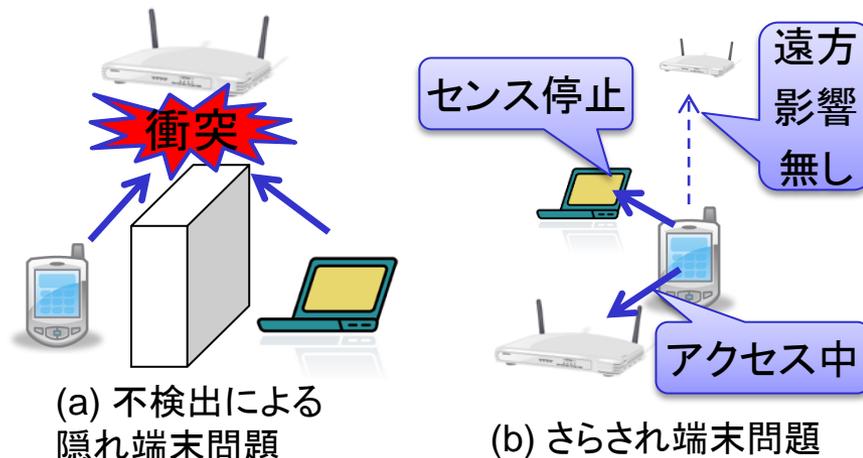
非効率な点1 CSMA/CAの制御待ち時間



◆ ランダム待ち時間や再送による効率低下

自律的に環境を認識、適応的に制御するインテリジェントな
媒体アクセス制御(MACプロトコル)が必要不可欠

非効率な点2 空間再利用の失敗



非効率な点3 無作為チャンネル選択

特定チャンネルへのトラフィック集中
→特に都市内などAPが多数
存在する環境では深刻

研究開発課題

◆ 状況認識と動的な制御を併せ持つインテリジェントMAC レイヤ技術の開発を進める

課題1: 無線環境予測及び学習のためのトラヒックを考慮した電波環境測定とモデル化

- ISMバンド (2.4GHz), UHF帯などの周波数資源の利用状況を調査

課題2: 無線環境に応じたインテリジェント高度MAC技術の開発

- データベース構築型MACプロトコル
- TCP レイヤを考慮したアクセス方式
- 経験学習によるインテリジェント送信電力・キャリアセンス制御

課題3: 無線環境予測・学習技術と高度MAC技術の統合によるコグニティブ無線システムの開発

課題4: 無線環境測定結果に基づくインテリジェントMAC技術を評価するためのシミュレータの構築

3. インテリジェントMACレイヤ技術研究成果

◆ コグニティブ無線による周波数共有手法

- プライマリユーザ(PU)への与干渉を制限して共有:
センシングによりPUの存在を検出
セカンダリユーザ(SU)送信停止 or 電力制御
- 時間的に分離して共有化:
PUを優先的に送信する仕組みを導入し
TDMAやCSMAを用いてPU,SUが周波数共有

本研究では後者に注目し、既存無線LANにオーバレイする形でセカンダリネットワークが共存するネットワークを検討

本研究の目標

SUに導入するインテリジェントなアクセスプロトコルにより、PUのスループットを確保した上で、SUのスループットを最大化する

(1) データベース構築型MACプロトコル

- ◆ 既存無線LANと周波数共用する新たなセカンダリMACを考案
 - 既存無線LANの干渉耐性機能を活用
 - 既存無線LANの再送機能を活用することで遅延の増加は生じるものの、スループットは確保
- ◆ SUは周囲のPU周辺ノードとの相互干渉関係を保存するデータベース(DB)を準備し、これらの情報を基に適応的にアクセスプロトコルを選択

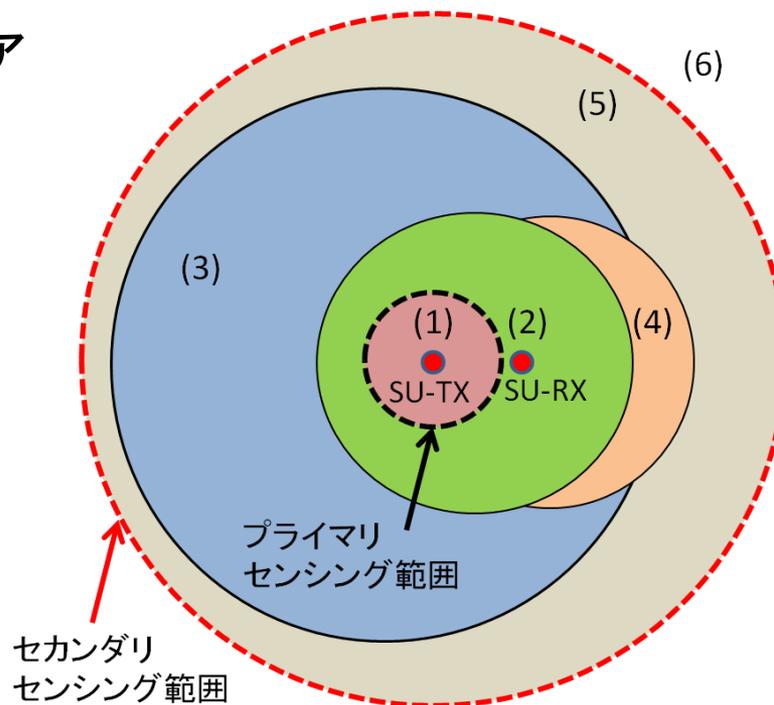
既存無線LANのスループットを保持したまま、PUとのオーバレイ環境で、SUのスループットを確保

データベース連携インテリジェントSU MACプロトコルの考案

SUにおけるPU位置による相互干渉エリア分類

- ◆ PUとSUの相互位置関係による干渉状態をエリア分類して適切なプロトコル選択に活用

- (1) 相互キャリアセンス可能エリア
- (2) 相互干渉エリア
- (3) SU⇒PU片方向干渉エリア
- (4) PU⇒SU片方向干渉エリア
- (5) さらされ端末エリア
- (6) 無干渉エリア

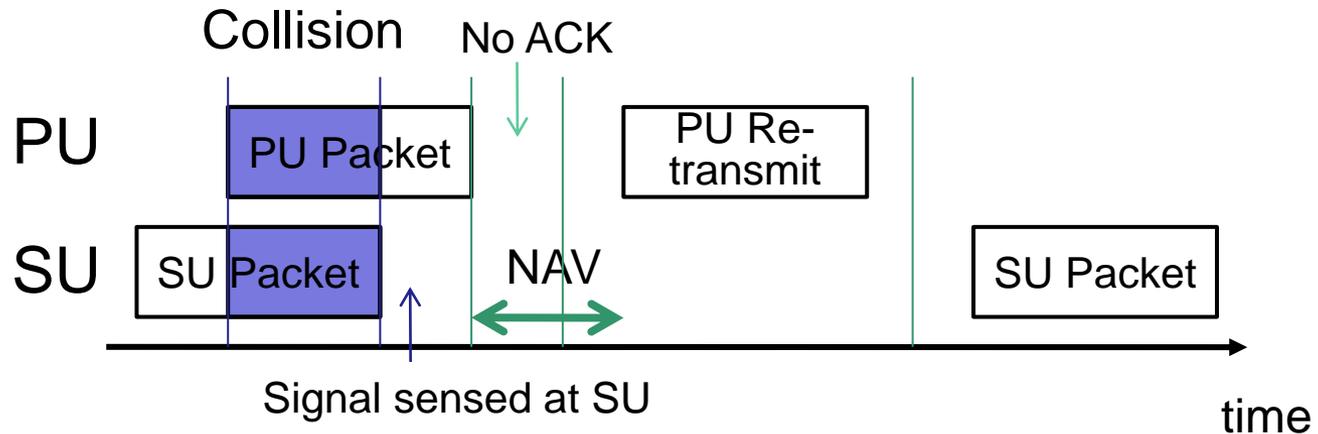


プライマリ送信機位置による
相互干渉分類

適用するPU優先手法

◆ SU保護のための再送優先

- SUパケット伝送完了後、センシングによりPUの存在が検出された場合、PUのACKの有無を確認
- ACKが観測できなかった場合、PUの再送パケット送信可能時間の送信待機(NAV設定)によりPUの再送パケットを優先



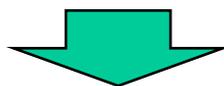
◆ SUパケット長の適応制御

◆ SUバックオフタイムの適応制御

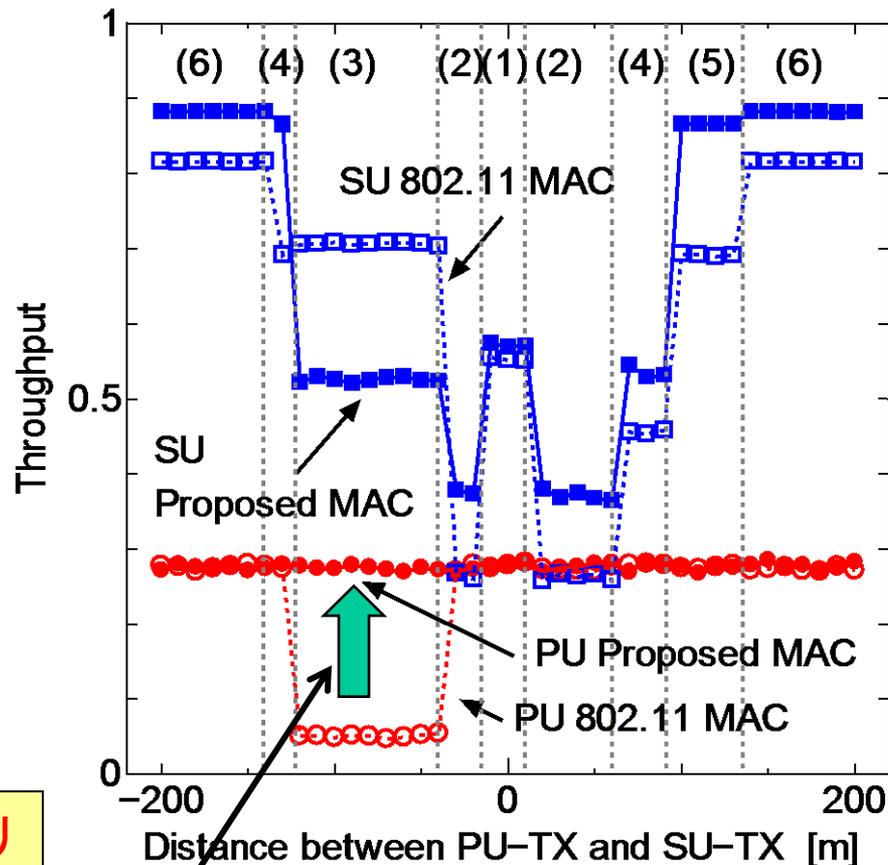
DBから取得したチャンネル共用PUエリア分類とPUチャンネル占有率から、現時点での最適なアクセス方式を選択

計算機シミュレーションによる評価

- ◆プライマリのチャンネル占有率を28%とした場合のスループット評価
- ◆点線: 従来、実線: 提案
- ◆プライマリのスループットはセカンダリの位置に寄らず一定
- ◆セカンダリスループットはプライマリ保護領域で大幅改善



プライマリシステム保護とセカンダリスループットの向上を実現



プライマリスループットの保護

(2) TCP レイヤを考慮したアクセス方式

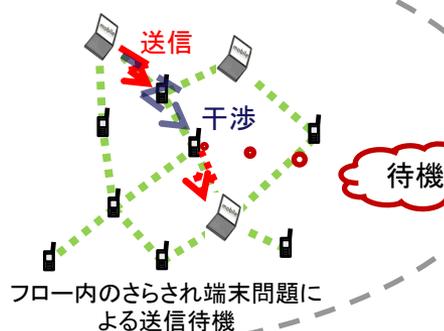
- ◆ 要望: コグニティブ無線分散ネットワーク環境で高性能なTCP通信を行いたい。
- 問題点①: TCPはCRやマルチホップネットワーク(MANET)と合せると性能が劣化。
- 問題点②: 高普及率なので、TCP動作の変更は非現実的。



提案: 既存のTCPを変更せずに、CR MANETにおける高性能通信を実現する為の、MAC層プロトコルを考える。(既存MAC: CSMA/CA)

では、なぜCR MANETでTCP通信性能が劣化するのか？

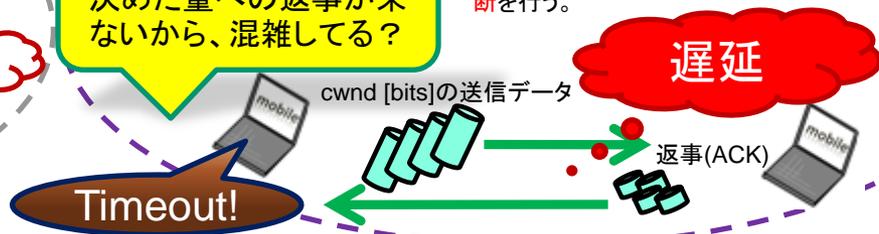
CR MANET環境
→遅延の増大・変動



TCP動作は混雑と誤解
→送信量を制限

送信側TCP: cwndで決めた量への返事が来ないから、混雑してる？

※ RTT(1パケットが往復する時間)に基づいて決めたRTO(タイムアウト)を用いてこの判断を行う。

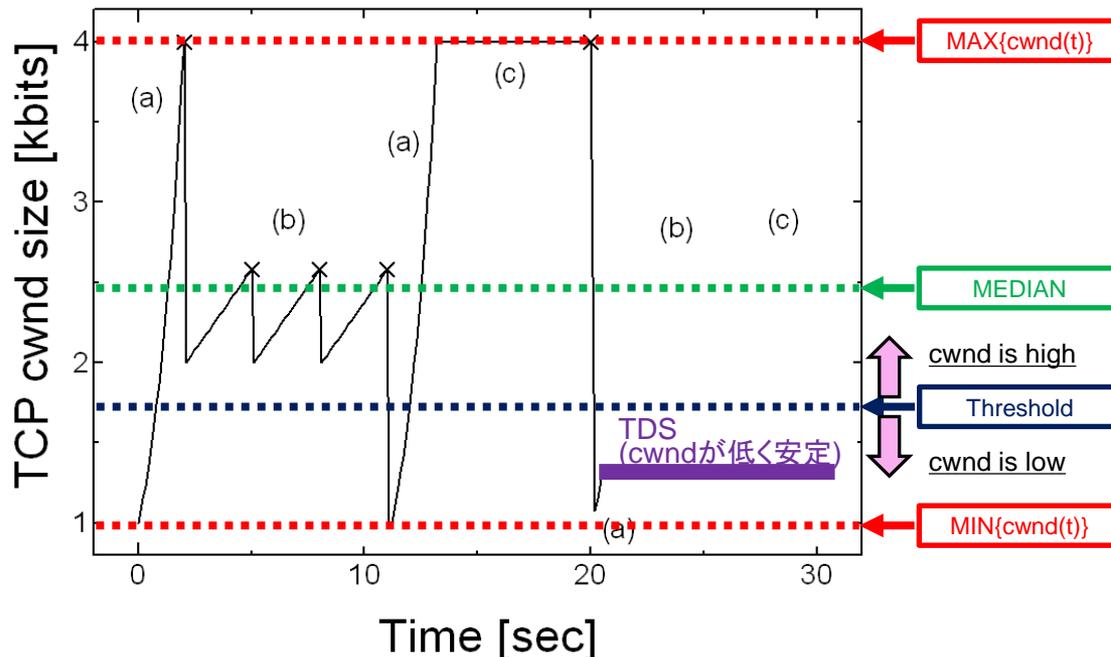


TCP性能低下状態の判別法

- ◆ TCPの性能劣化状態をTDS(TCP Degrading State)と定義
- ◆ TCP cwndサイズ(一度に送るデータ量)の情報を用いて判定

➤ TDS判別式:
$$\text{IF} \left[\text{cwnd}(t) \leq \frac{\text{MAX}\{\text{cwnd}(t) \mid \text{state} \neq (a)\} - \text{MIN}\{\text{cwnd}(t)\}}{4} \right] \cap \left[\left| \frac{\text{cwnd}(t) - \text{cwnd}(t-1)}{\text{cwnd}(t-1)} \times 100 \right| \leq 75 \right] \text{ THEN TDS.}$$

(a) Slow Start Phase (b) Congestion Avoidance Phase
 (c) Congestion is not detected × A congestion is detected



- ・ TCPはcwndをネットワークの混雑に合わせて変化
- ・ タイムアウトまでにcwndで決めた量のデータを送り終えるか否かで、cwndを増減

通信がうまくいかない時は、cwndが低く安定してしまう。



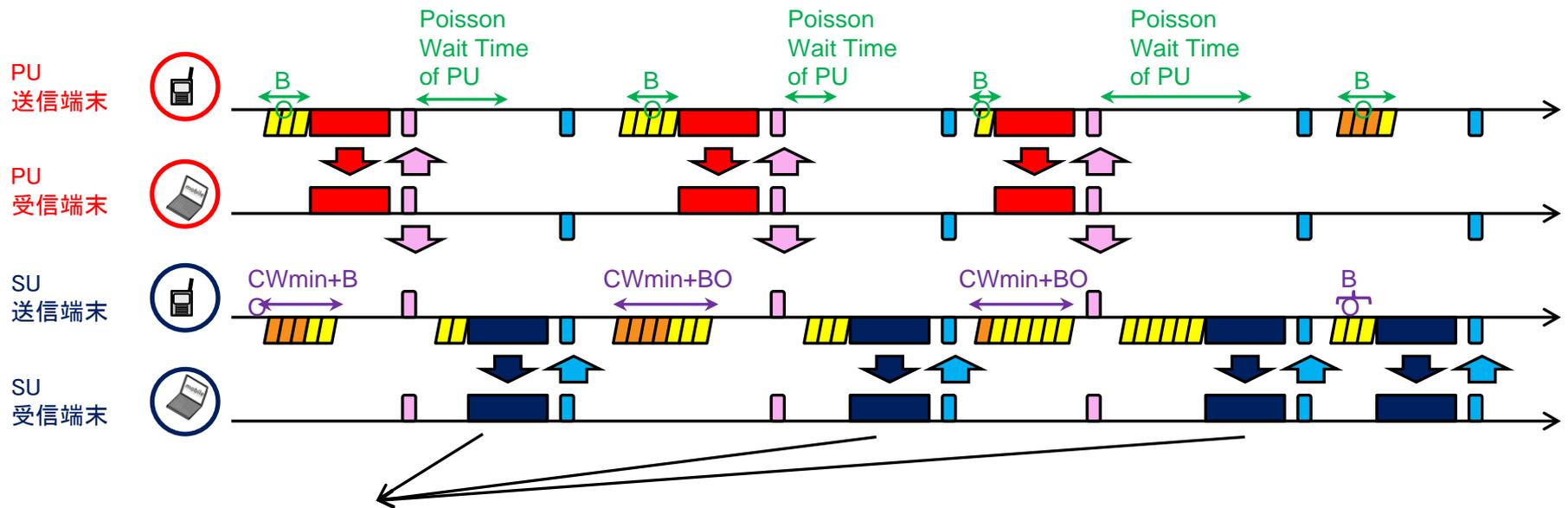
TDS状態を定義して低い安定状態が継続しないように制御

TCP 性能劣化回避セカンダリ送信制御

- ◆ TDSを抜ける為には、SUの通信も一定数成功させる必要
- ◆ PUの設定BO(送信待機時間)と同等以上に待機して、PUとSUが交互に通信を行えるような状態を設定

➤ BO設定式:

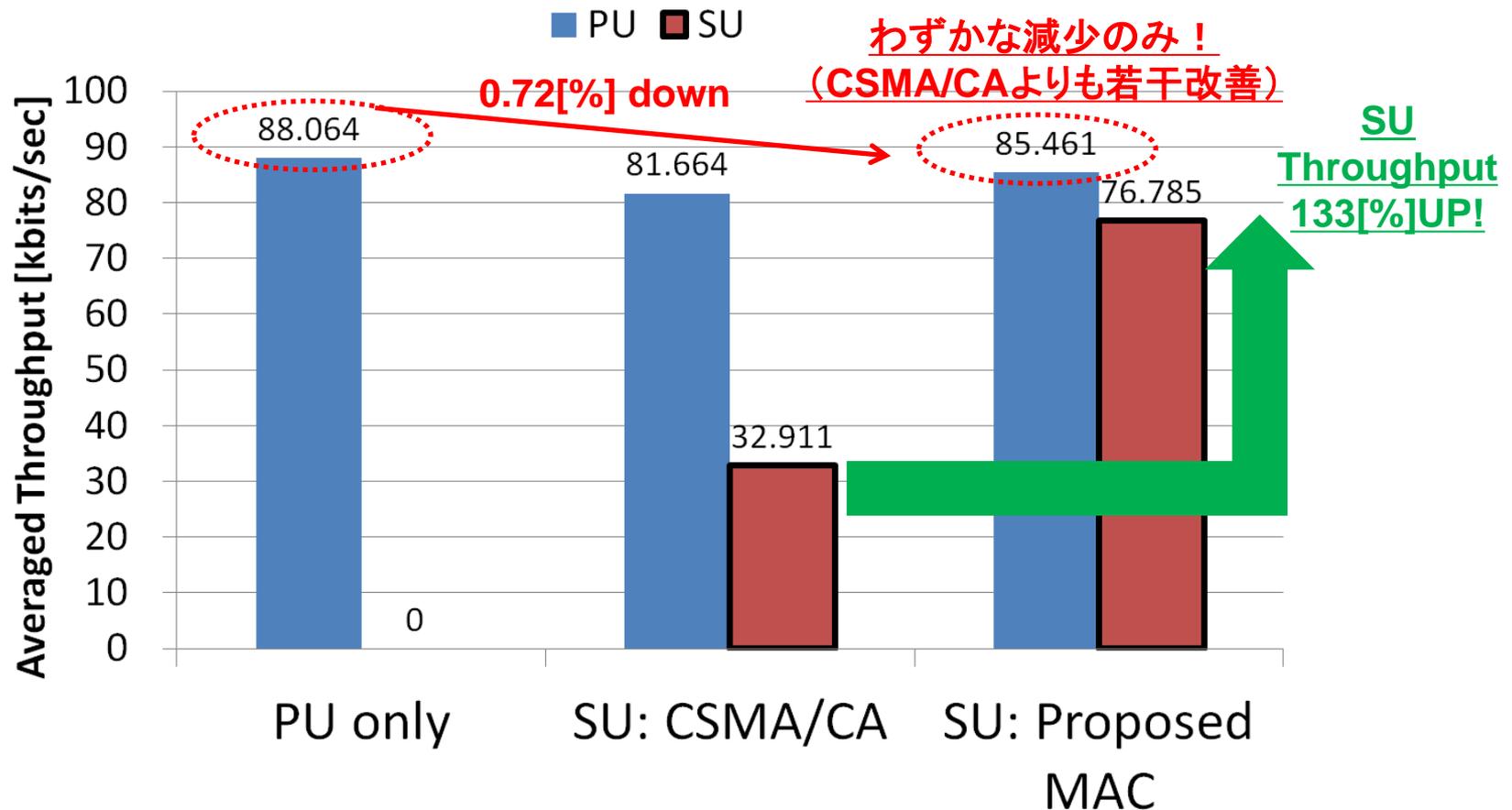
$$BO_{SU} = \begin{cases} (slottime) \times \{CW_{min} + RAND(0, CW)\} , TDS \\ (slottime) \times RAND(0, CW) , otherwise \end{cases}$$



PUスループットを低下させずに、SUが一定の通信機会を得ることが可能になる。

平均スループット特性

- ◆ 総合受信スループット特性(PU、SU)より、CR MANETにおける性能を評価する。
- ◆ グラフより、SUが提案手法を使うと.....PU性能:0.72[%]減、 SU性能:約2.33倍



(3) 経験学習による インテリジェント送信電力・キャリアセンス制御



送信電力を抑えた相互干渉回避
→空間チャネル再利用の実現

AP間が比較的離れている場合
→送信電力拡大で高スループット化
→高感度センシングで遠方システム監視

空間再利用を実現する動的制御

- ◆ 送信電力の拡大
 - 伝送速度の拡大, 与干渉範囲の拡大
 - より広範囲の無線機のアクセスを確認が必要
- ◆ キャリアセンス感度の拡大
 - 空間再利用により高いスループットの達成に期待

周辺の無線機の情報(受信状態, 位置情報)に基づく適応制御が不可欠

制御プロセス

- ◆ キャリアセンス感度と送信電力の組み合わせセットを設定
 - 送信電力: 拡大 → センシング: 高感度
- ◆ 設定レベルのスループット評価(経験学習), スループットが拡大する方向にレベルを段階的に制御

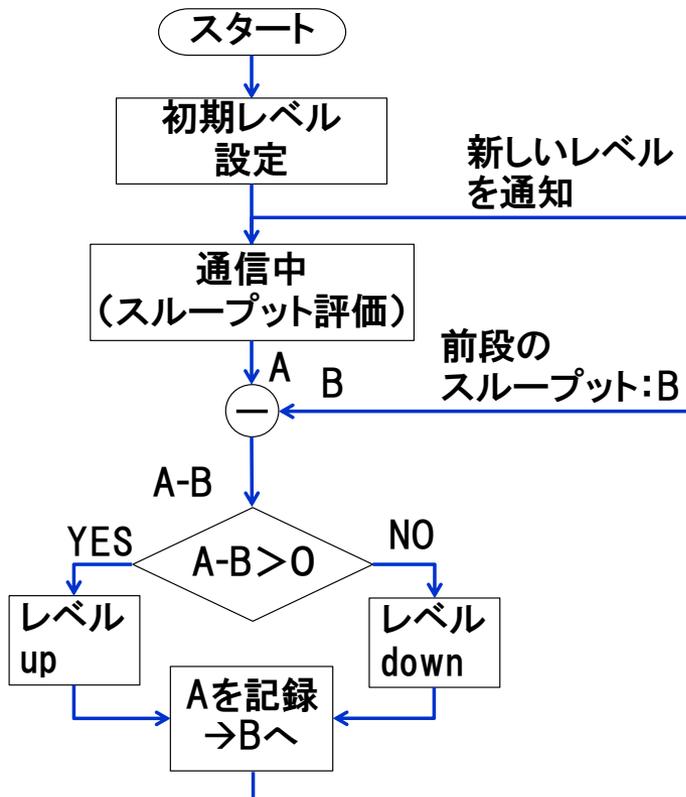


図 経験学習による段階的レベル制御フロー

表 送信電力とキャリアセンス感度のセット

レベル	送信電力 (dBm)	キャリアセンス感度 (dBm)
1	5	-60
2	10	-65
3	12	-70
4	14	-75
5	18	-80
6	19	-80
7	21	-80
8	22	-95
9	24	-95
10	26	-95

高スループット

広範囲検出

評価結果

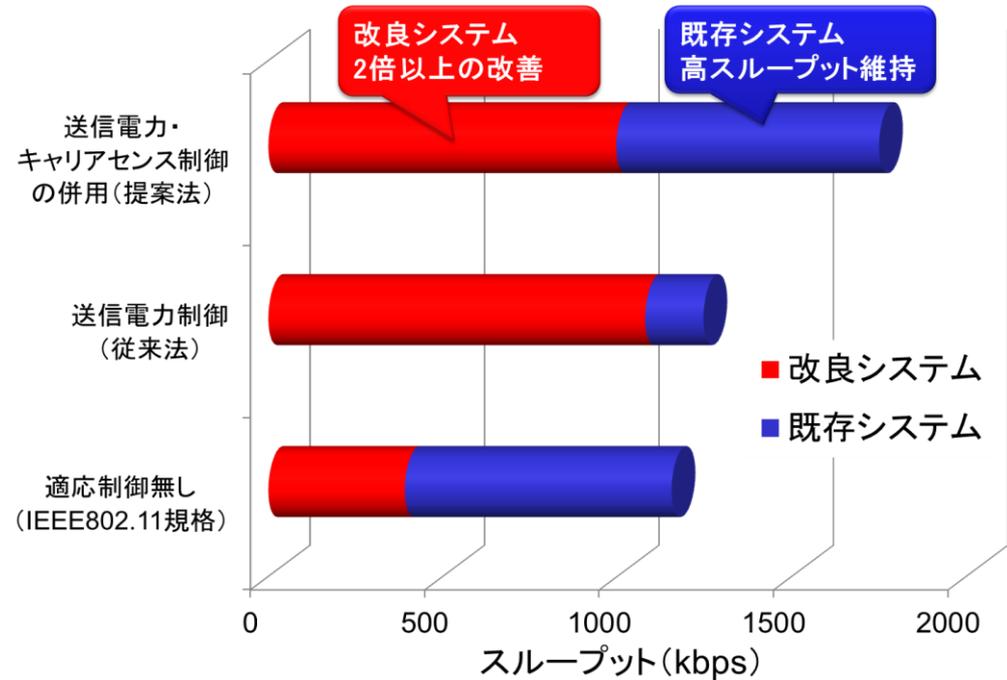
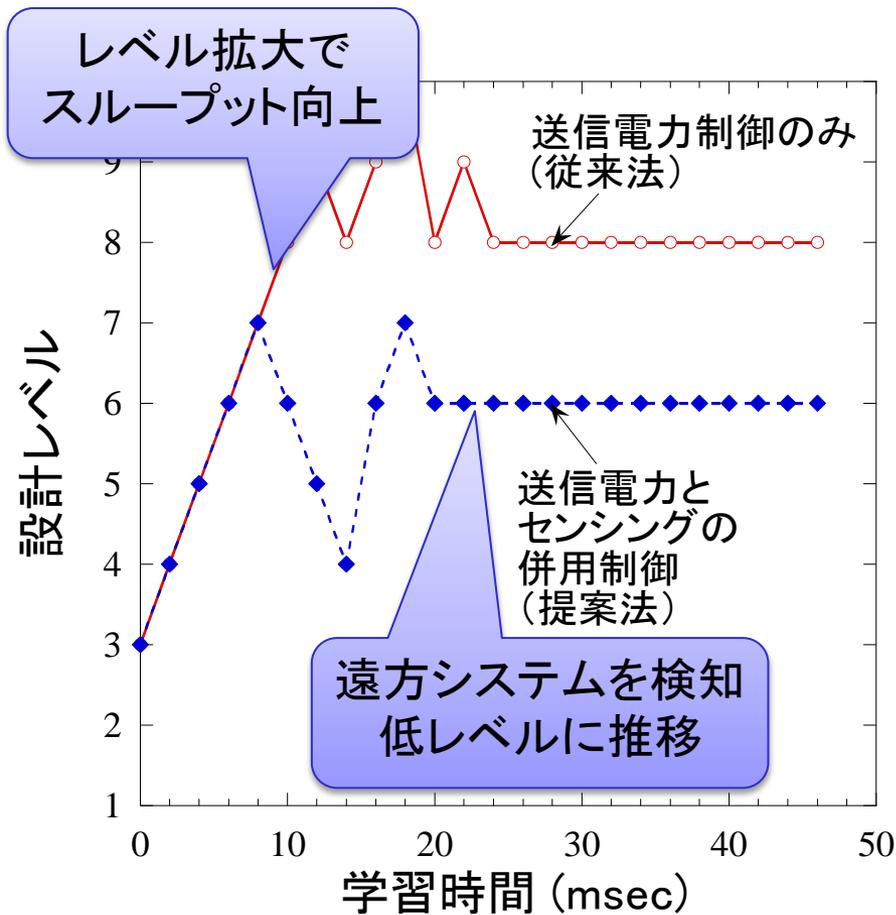


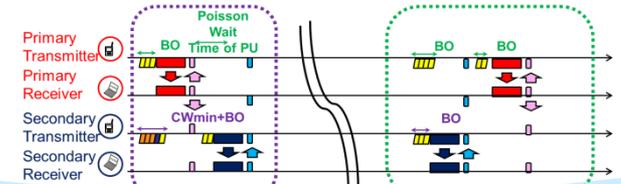
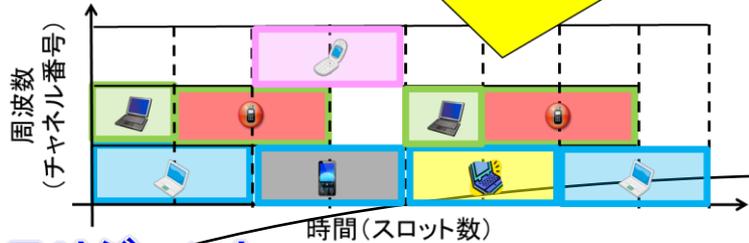
図 達成スループット

- ◆ 既存システムとの空間共有を実現！ → 2倍以上のスループット改善を実現
- ◆ 経験学習による適応制御 → 無線LANの自律分散性を維持し、容易に導入可能！

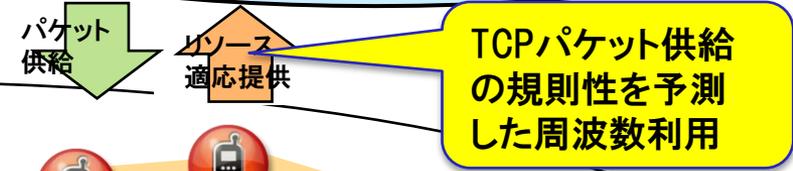
4. 統合コンセプトおよびシミュレータの開発

インテリジェント空きチャネル探索

不活性なチャネルを高速探索。
経験学習による低占有率探索型占有率測定。



TCPLレイヤ: 高品質パケット供給



TCPパケット供給の規則性を予測した周波数利用

インテリジェント送信電力制御



送信電力と信号検出の併用により安全・高効率空間共有

チャンネル観測によるチャンネル利用状況のモデル化データベース構築

インテリジェントMACプロトコル

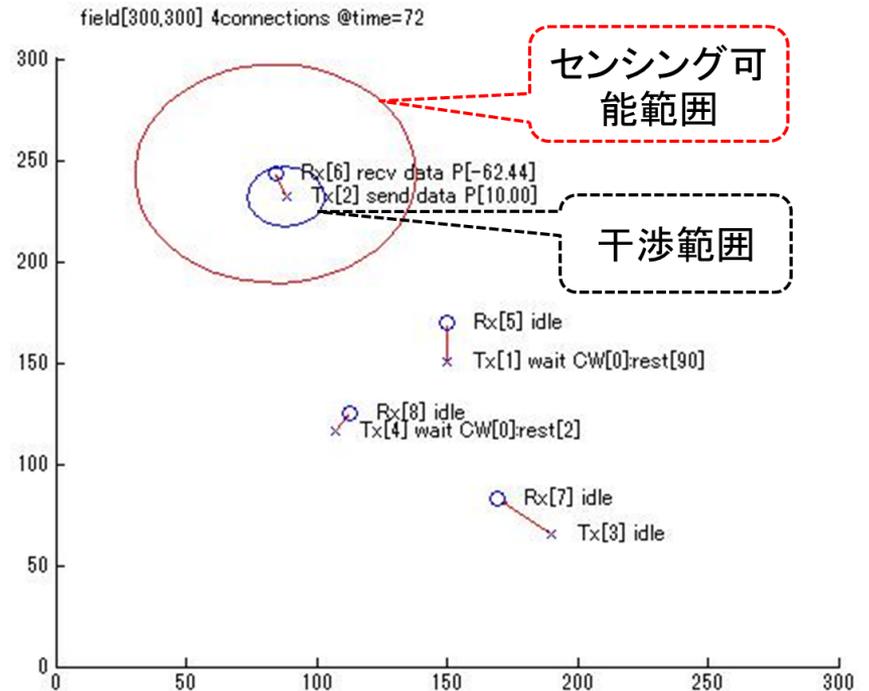
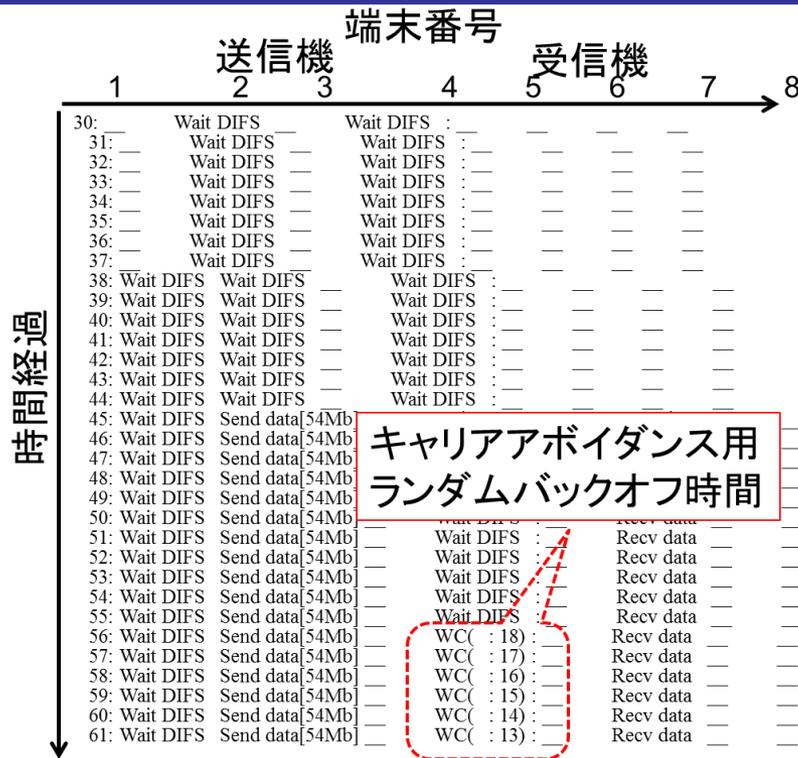
プライマリシステム保護
周波数・マルチルーティング

インテリジェントMACシミュレータ

究極の周波数利用効率の達成を評価する疑似空間シミュレーション環境を提供

3つのインテリジェント機能を統合・その動作を与えるシミュレータの構築

MACシミュレータ開発(時間・空間利用環境)



(a) MACシミュレータ時間推移

(b) MACシミュレータ 空間分布図

- IEEE802.11規格をベースに改良したMACプロトコルを適用
- 時間・空間的再利用によるスループット量の評価が可能
- 空間再利用によるスループットは本シミュレータで評価
- マルチチャネルのトラフィック分散を考慮し、既存システムより3倍の改善を確認

5. まとめ

コグニティブ無線技術を基本コンセプトとする インテリジェントMACレイヤ技術開発

◆ 開発したインテリジェントMACプロトコル

- 無線機の独自学習の下、適応的に無線パラメータを制御
- 自律分散性を維持する自己解決能力
- 周波数資源の時間・空間的な再利用を実現

→周波数資源の拡大を実現

◆ 今後の発展

- 開発システムの利点
 - 自律分散システムにより容易に導入が可能
 - 周波数資源の拡大による通信資源の余裕
- **多くのアプリケーションへの導入に期待**
 - 例:ITS通信や、スマートグリッドなど社会基盤を支えるシステム技術における無線分散ネットワーク構築