

NDRC Network Design Research Center

オンデマンド型センサーネットワーク技術
～ネットワークアーキテクチャ概論～

2014年10月23日
九州工業大学
大学院工学研究院電気電子工学研究系
ネットワークデザイン研究センター
野林 大起

Agenda

- ◆ Radio-On-Demand Networks (ROD)
- ◆ ROD-WLAN (Wireless LAN)
- ◆ ROD-SAN (Sensor and Actuator Networks)
- ◆ NDRC の取り組みについて

背景

◆ 無線センサネットワーク(Wireless Sensor Network, WSN)の実用化

- Machine to Machine (M2M) や Internet of Things (IoT) の検討
- 農業や漁業等の産業、環境、交通、医療分野での活躍が期待されている

Device Type	Percentage
Other Portable Devices	0.3%
Tablets	1.3%
Laptops	2.1%
M2M	4.9%
Smartphones	24.9%
Non-Smartphones	66.4%

出典: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2018
http://www.cisco.com/c/enr/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html

WSANとは

◆ Wireless Sensor and Actuator Networks

- 無線センサがセンシングしたデータを収集
- センシングしたデータを基に、無線アクチュエータノードによる制御を行う
- 適応例
 - スマートハウス/タウンでの活用
 - 農畜産業、公共インフラ等

センサとアクチュエータが混在するネットワーク

Legend: S: Sensor, A: Actuator

課題

◆ WSN、WSANの課題

- 電力線の確保
- 維持管理のコスト
 - 電池交換や故障による設置コスト

◆ 既存の省電力化手法

- 各ノードが間欠動作を行う
- 簡潔動作期間が長い場合、高い省電力効果
- レスポンス性能の低下

省電力性能とレスポンス性能はトレードオフの関係

WSANの省電力化手法

◆ 一般的なアプローチ

- 間欠動作による省電力化 (Duty-Cycling)
- 一定期間ごとに「稼働」と「スリープ」状態を切り替え

間欠動作方式

Duty	省電力性能	レスポンス性能
Low	High	Low
High	Low	High

Radio-On-Demand Networks (ROD)

- Optimize the power consumption of network entities.
- Nodes switch to Sleep mode, when there is no communication demand.
- Nodes are equipped with **wireless wake-up receiver** which operate with **ultra-low-power consumption**.
- Nodes switch to Active mode after receiving wake-up signals from other node.

Automatically switch to Sleep mode when idle

S. Tang, H. Yomo, Y. Kondo, and S. Obana, "Wakeup Receiver for Radio-On-Demand Wireless LANs," IEEE Globecom 2011, Dec. 2011

ROD-WLAN (Wireless LAN)

ROD WLAN

- ROD技術を無線LANに適応
 - 従来のAPは常に稼働状態
- APの利用状況に応じて「稼働」「スリープ」を切替
 - Wake-up Receiver: オンオフ変調を検出

Remote Wakeup by STA (稼働させるAPのIDを含む)

RODにおけるAP稼働技術

- Wake-up シグナルの送信方式
 - 制約
 - STAに専用のモジュールを搭載しない
 - 導入コストが高い
- 従来の無線LANモジュールを活用
 - 端末のソフトウェアアップデートに対応
 - 無線LANのプロトコルとWake-upシグナルのフォーマットを考慮したWake-upシステムの開発が必要

WLAN信号による稼働

- IEEE 802.11のフレーム長を用いて APのID情報を付加[2][3]
 - STAが指定したのAPを稼働可能

ESSID: "KU_ap1"	Bit sequence	Length of frame
Wake-up ID: 001101001101101	00000	710 μ s
	00001	740 μ s
	00010	770 μ s
	11111	1680 μ s

[2] K. Chebrolu and A. Dhekne, "Esense: Communication through Energy Sensing," in Proc. of Mobicom'09, pp. 85-96, Sept. 2009.
 [3] Y. Kondo et al., "Wake-up Radio using IEEE 802.11 Frame Length Modulation for Radio-On-Demand Wireless LAN," in Proc. of IEEE PIMRC 2011.

Wake-up 受信機の仕組み

- Wake-up 受信機は、IEEE 802.11のデータフレーム長を識別して判断

RF: Radio Frequency
 LNA: Low Noise Amplifier
 BPF: Band Pass Filter
 LPF: Low Pass Filter
 ADC: Analog Digital Converter
 MCU: Micro Controller Unit

w/d/h: 29mm/20mm/3.5mm

[4] H. Yomo et al., "Receiver Design for Realizing On-Demand WiFi Wake-up using WLAN Signals," in Proc. of IEEE Globecom 2012.

実際の省電力性能

Network Design Research Center

- ◆ 実証実験による省電力性能の検証
 - 2012年12月1日～12月27日
 - 企業のオフィス2台、大学の研究室3台

稼働率: 終日

平日稼働率	平日スリープ率
15.63%	84.37%

消費電力仮定

AP稼働時の消費電力	APスリープ時の消費電力
7.6W※1	40mW

⇒ オンデマンド型APの1台当たり年間約 30.7 kg 削減可能

※1: 省エネ法のトップランナー制度、“小型ルータ(無線機能付き)”の2009年基準による

九州工業大学
ネットワークデザイン研究センターでの
取り組み(ROD-WLAN)
端末帰属集約による省電力化

Network Design Research Center

端末帰属集約による省電力化

Network Design Research Center

- ◆ ROD AP は未使用時にスリープ状態に遷移
- ◆ 通信量が低い AP は積極的に配下の端末を他の AP に帰属変更し、自身はスリープ
- ◆ 省電力効果の向上を目指す

低いチャネル利用率

端末を他の AP へ集約して、スリープへ遷移

端末帰属集約による省電力化

Network Design Research Center

- ◆ ROD における AP のスリープ機会を増加
- ◆ AP に接続している端末 (STA) の通信量が少ない場合、近隣の AP へ端末の帰属先を変更
 - 通信量を測る指標としてチャネル利用率を利用

低いチャネル利用率

端末を他の AP へ集約して、スリープへ遷移

An Channel Utilization

Network Design Research Center

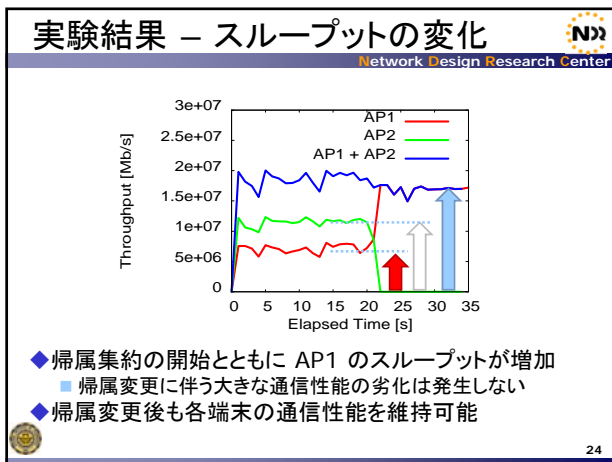
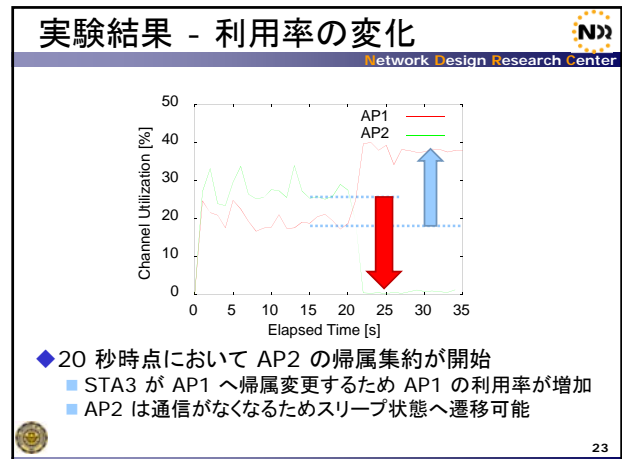
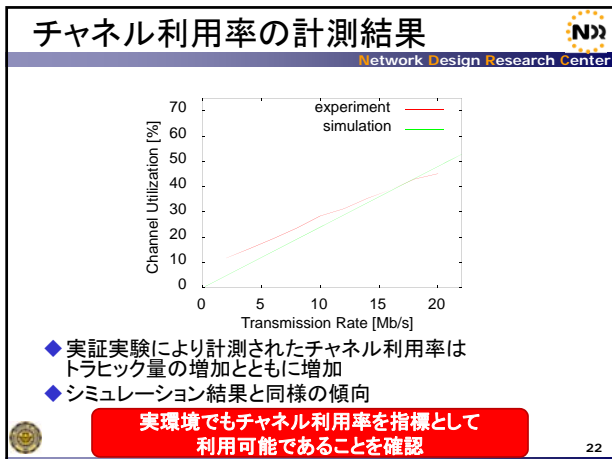
- ◆ An Channel Utilization is metric that shows communication condition of channel.
 - Ratio of frame transmission time for predefined measurement time at each AP.

$$AP\ Utilization\ U_{AP} = \frac{\sum T_{DATA} + \sum T_{ACK}}{T_{INTERVAL}}$$

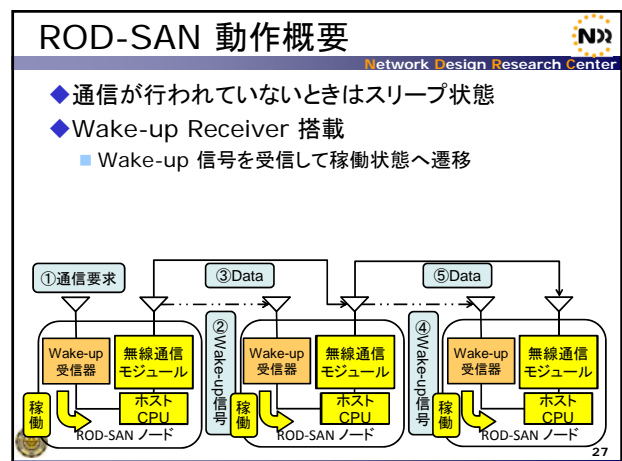
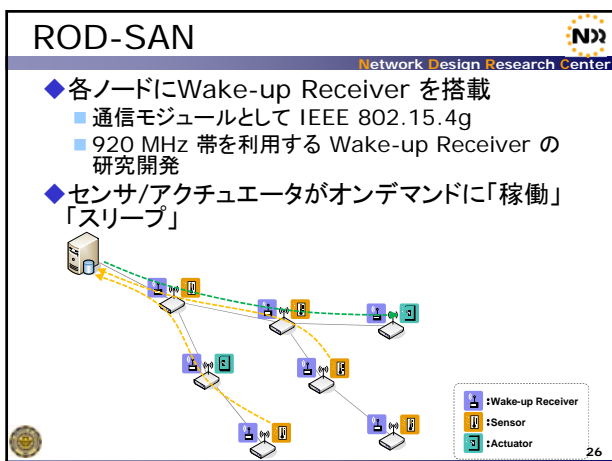
端末帰属集約手法の検証実験

Network Design Research Center

- ◆ トラフィック
 - 各 STA から受信ノードへ
 - STA1, STA2
 - 3 Mb/s の UDP フロー
 - STA3
 - 10 Mb/s の UDP フロー
- ◆ 計測開始から 20 秒後に帰属集約開始
 - STA3 が AP1 へ遷移
- ◆ チャンネル利用率の変化と通信性能への影響を調査



ROD-SAN (Sensor and Actuator Networks)



既存技術の課題

Network Design Research Center

◆ IEEE 802.15.4e (LE CSL/LE RIT)

間欠動作方式

Duty	省電力性能	レスポンス性能
Low	High	Low
High	Low	High
On Demand	High	High

28

ROD-SANの優位性の検証

Network Design Research Center

◆ 目的

- 各方式の消費電力量を比較し提案方式の優位性を確認[5]

◆ 条件

- 消費電力値
 - 市販品の消費電力を利用
- 応答性能
 - 5秒以内に制限
- センサデータ長
 - 100 Byte に固定(20 ms)
- トポロジ
 - 1ホップのスター型

◆ 比較手法 (IEEE 802.15.4e)

- Beacon Mode
- LE CSL
- LE RIT

◆ 消費電力量

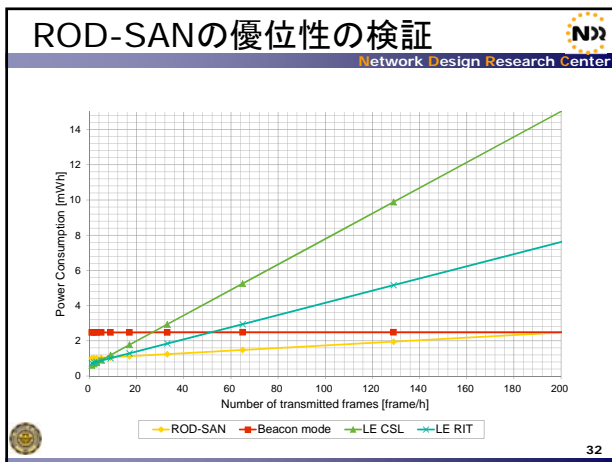
- 送信中: 55mW
- 受信時: 50mW
- 休止状態: 0.5mW
- Wake-up Receiver: 0.5mW

◆ 時間条件

- 間欠動作間隔: 5 s
- フレーム長: 20 ms
- 稼働区間 (Beacon): 200 ms
- Channel Sampling時間 (LE CSL): 20 ms
- 受信待機時間 (LE RIT): 60 ms

[5] 阿部憲一、他、「オンデマンド型無線センサネットワーク(ROD-SAN)の提案と評価」、電子技術、NS2013-221 2014年3月

31



Network Design Research Center

九州工業大学
ネットワークデザイン研究センターの
取り組み

Network Design Research Center

Network Design Research Center

ROD-SANにおけるWake-up機能を利用した送信チャンネル選択方式の検討

Network Design Research Center

ROD-SANの課題

Network Design Research Center

◆ ネットワーク制御のため同一チャンネルで送信

- チャンネルの競合が発生
- 転送遅延時間の増大
- 通信性能の低下

競合

ch1 — t [s]

ch1 — t [s]

チャンネル競合の抑制が必要

37

研究目的

- ◆ 複数のチャネルを使用し競合を抑制
- ◆ Wake-up機能を用いて適切なチャネルを選択

↓

通信性能の向上

38

Wake-up機能による送信チャネル指定 1/2

- ◆ ROD-SANにおいて複数のチャネルを使用
 - Wake-up受信機を拡張
- ◆ チャネル番号をWake-up信号に付加し送信
 - 指定チャネルでの通信可能

39

Wake-up機能による送信チャネル指定 2/2

- ◆ 複数のチャネルを使用可能
 - チャネルの競合を回避可能
- ◆ 自律的に使用チャネルを選択し送信
 - 適切なチャネル選択

↓

チャネルの競合を抑制

40

自律型送信チャネル選択手法(1)

- ◆ 自律型送信チャネル選択手法
 - 複数のチャネルから衝突の確率が低いチャネルを選択し競合を抑制
- ◆ 動作概要
 1. チャネル利用状況を取得
 2. 推定フレーム送信時刻の算出
 3. 推定フレーム送信時刻より送信チャネルを決定
 4. Wake-up信号より使用チャネルの通知
 5. 指定チャネルで稼働状態へ遷移

41

自律型送信チャネル選択手法(2)

- ◆ 現在時刻 $t[s]$ までのチャネル利用状況を取得
 - 平均フレーム送信間隔 $i_{ch}[s]$ の算出
 - 最終フレーム送信時刻 $d_{ch}[s]$ の算出

42

自律型送信チャネル選択手法(3)

- ◆ 推定フレーム送信時刻の算出
 - $\hat{t}_{ch} = i_{ch} - (t - d_{ch})$
 - $\hat{t} = \max(\hat{t}_{ch})$
 - 送信チャネルの決定

ch2を選択

43

自律型送信チャンネル選択手法(4)

- ◆チャンネル番号を Wake-up 信号に付加し送信
- ◆Wake-up 信号を受信
 - 指定チャンネルで稼働状態へ遷移

送信者

受信者

44

シミュレーションモデル (1)

- ◆チャンネル数(ch1~ch6)の変化によるパケット到達率の確認
- ◆提案手法の有効性の確認

シミュレータ	QualNet 6.1
ノード台数	10ペア (20台)
ノード間距離	50m
無線インターフェース	IEEE 802.15.4
周波数	920MHz
周囲の使用チャンネル	ランダム
トラフィック	CBR 1kb/s, 4~36kb/s

- ◆評価指標
 - 計測ノードのパケット到達率を評価

45

提案手法の動作検証

- ◆チャンネル利用率の変化 (ch1~ch6)

- ◆提案手法により ch1 と ch6 を選択
 - ch1 と ch6 の利用率を確認

利用率の低いチャンネルを選択

46

シミュレーションによる性能評価(1)

約 100%

パケット到達率の向上

47

シミュレーションモデル (2)

- ◆ノード台数の変化によるパケット到達率の確認
- ◆提案手法の有効性の確認

シミュレータ	QualNet 6.1
ノード台数	5~40ペア (10~80台)
ノード間距離	50m
無線インターフェース	IEEE 802.15.4
周波数	920MHz
周囲の使用チャンネル	ランダム (利用率に偏り有)
トラフィック	CBR 10kb/s, 4kb/s

- ◆評価指標
 - 計測ノードのパケット到達率を評価

48

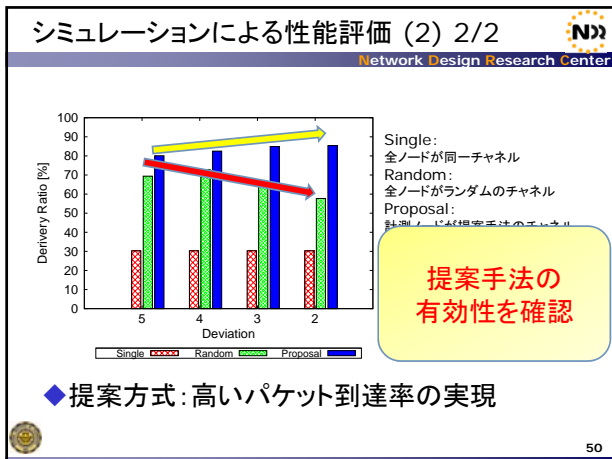
シミュレーションによる性能評価 (2) 1/2

- ◆ch1 ~ ch2 に偏りを持たせた場合

30% 改善!!

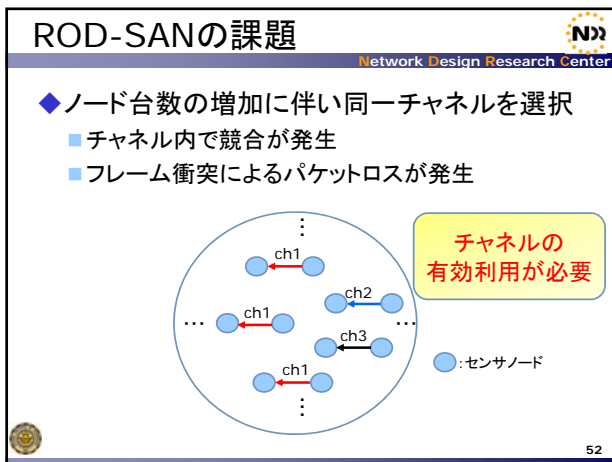
- ◆提案方式: 高いパケット到達率の実現

49



ROD-SANにおけるチャンネル利用率に基づく移動端末選択方式の一検討

Network Design Research Center



研究目的

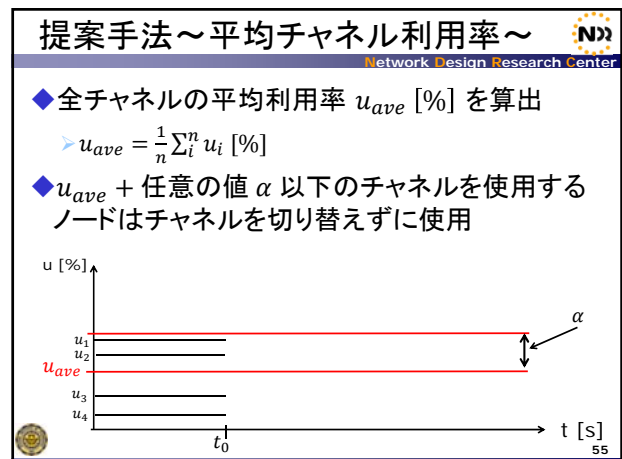
- ◆ 全ノードが均等にチャンネルを使用
 - フレーム衝突を最小限に抑制
 - パケット到達率の向上
 - 送信遅延時間の短縮

↓

高い応答性の実現

チャンネル利用率に基づいた移動端末選択手法

- ◆ チャンネル利用率に基づいた移動端末選択手法
 - 全チャンネルを均等に使用
- ◆ 動作概要
 1. 各チャンネルの利用率を算出
 2. 全チャンネルの平均チャンネル利用率を算出
 3. 平均チャンネル利用率からの超過率を算出
 4. 超過率に基づいて利用チャンネルを変更



チャンネル切り替え判断(1)

- ◆ u_{ave} + 任意の値 α 以上の場合
- ◆ 自身の使用チャンネルの超過率 p [%] を算出
 - ▶ $p = \frac{u_{ch} - u_{ave}}{u_{ch}} \times 100$ [%]
- ◆ p の確率でチャンネル切り替えの判断

チャンネル切り替え判断(2)

- ◆ p の確率で平均以下のチャンネルへ切り替え
- ◆ 切り替え先は平均以下のチャンネルからランダムにチャンネルを選択
 - 利用チャンネルの分散のため

シミュレーションモデル(1)

- チャンネル利用率, パケット到達率, 送信遅延時間の調査より提案手法の有効性を確認

シミュレータ	QualNet 6.1
ノード台数	5~30ペア (10~60台)
ノード間距離	30m
無線インターフェース	IEEE 802.15.4
周波数	920MHz
使用チャンネル数	6
トラフィック	CBR 10, 15 kb/s

- 評価指標
 - チャンネル利用率, パケット到達率, 送信遅延時間の評価

比較対象

- ◆ Single
 - 単一のチャンネルを使用し続けた場合
- ◆ Random
 - ランダムにチャンネルを決定しそのチャンネルを使用し続けた場合
- ◆ Estimation
 - 先行研究として取り組んだ, 推定フレーム送信間隔を用いた方式で送信毎にチャンネルを選択した場合
- ◆ Proposal
 - 提案手法を用いた場合

Randomの場合

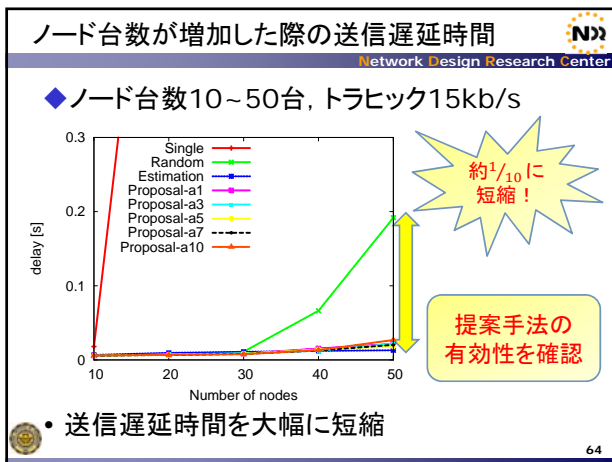
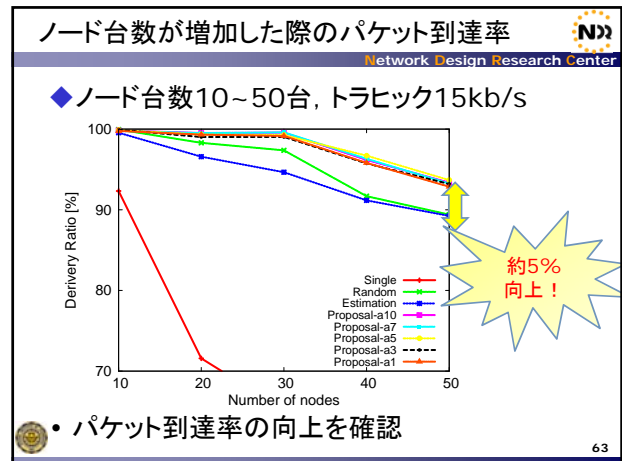
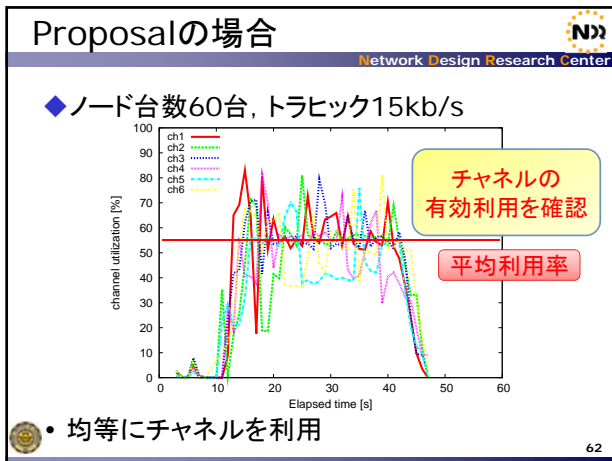
- ◆ ノード台数60台, トラフィック10kb/s

- チャンネル利用率に偏りが発生

Estimationの場合

- ◆ ノード台数60台, トラフィック15kb/s

- チャンネル利用率が大きく変動



- ### まとめ
- ◆ M2M, IoT の進展に伴うWSN/WSANの展開
 - ネットワークの維持管理コストを削減するためセンサ/アクチュエータの稼働時間延長が必要
 - リアルタイムなデータ収集/分析/制御を行うために高い応答性が必要
 - ◆ Radio-On-Demand Networkの研究開発
 - Wake-up receiver により、ノードの稼働状態をオンデマンドに変更可能
 - 高い消費電力/レスポンス性能を実現
 - ROD WLAN
 - ROD-SAN
 - ◆ 九州工業大学ネットワークデザイン研究センターの取り組みの紹介
 - ROD-SANIにおける無線資源を有効に活用するための検討