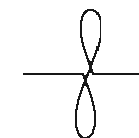


GNU Radio/USRPを用いた 研究事例と今後の展開

東京大学 森川研究室

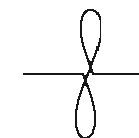
猿渡 俊介



MORIKAWA
LABORATORY

Outline

- 背景
 - ソフトウェア無線への期待
- GNU Radio紹介
 - 概要
 - デモ
- GNU Radioを用いた研究事例
 - コグニティブ無線
 - 信頼性向上
- 今後の方向性
 - 研究ネタをいくつか

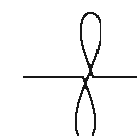


MORIKAWA
LABORATORY

ソフトウェア無線

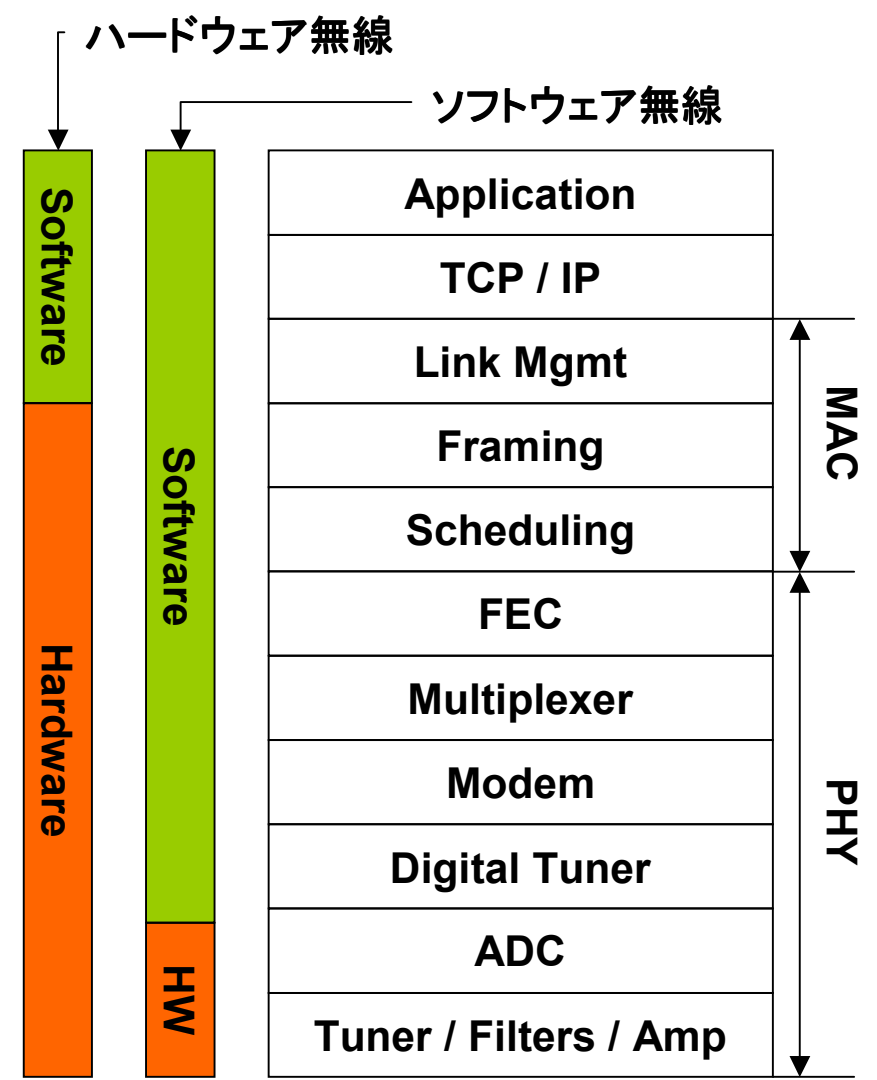
洗練された技術は 魔法と区別が付かない

アーサー C クラーク



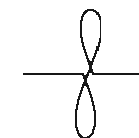
ソフトウェア無線とは

- 通称SDR
 - Software Defined Radio
- ADCより後は全部ソフトウェア



想像してください

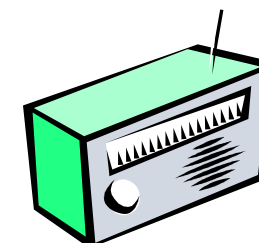
携帯電話の無線の物理層まで
全てプログラミング可能になったら？

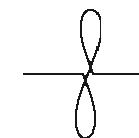


MORIKAWA
LABORATORY

たとえば...

- 携帯電話で無線LAN + Skype
- 携帯電話で車内対戦
- 携帯電話でアマチュア無線
- 携帯電話でトランシーバ
- 携帯電話でラジオ受信
- 携帯電話でTV受信
- 携帯電話がポケベル
- 携帯電話がGPS
- 携帯電話がRFIDタグ
- 携帯電話がRFIDタグリーダ



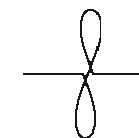


MORIKAWA
LABORATORY

もしくは...

- FMで車載ラジオに飛ばしてハンズフリー
- 電波環境測定でお小遣い稼ぎ
- 携帯電話が家電の子機
- 携帯電話でFM配信(音楽配信)
- 携帯電話が講演の時のマイクに
- 携帯電話でTV配信
- 監視カメラで記念撮影
- 携帯電話のUWBでDVD購入
- 携帯電話がレーダー
- 他人の携帯電話のエネルギーチャージ



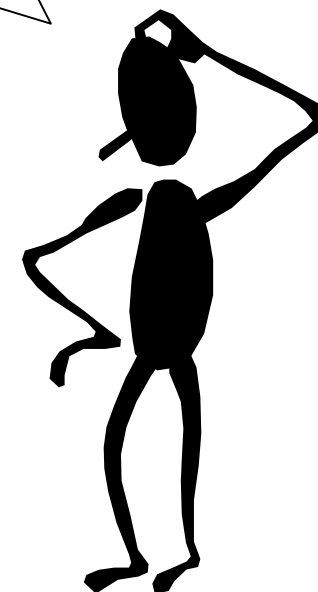


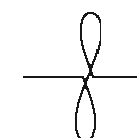
MORIKAWA
LABORATORY

裏SDRも出回ったり...

MITのDinna
Katabiのところの
SDR使うと通話
切れないらしいよ！

裏SDR使うと電
池もたなくなるか
らやだなあ...





MORIKAWA
LABORATORY

ソフトウェア無線とコグニティブ無線

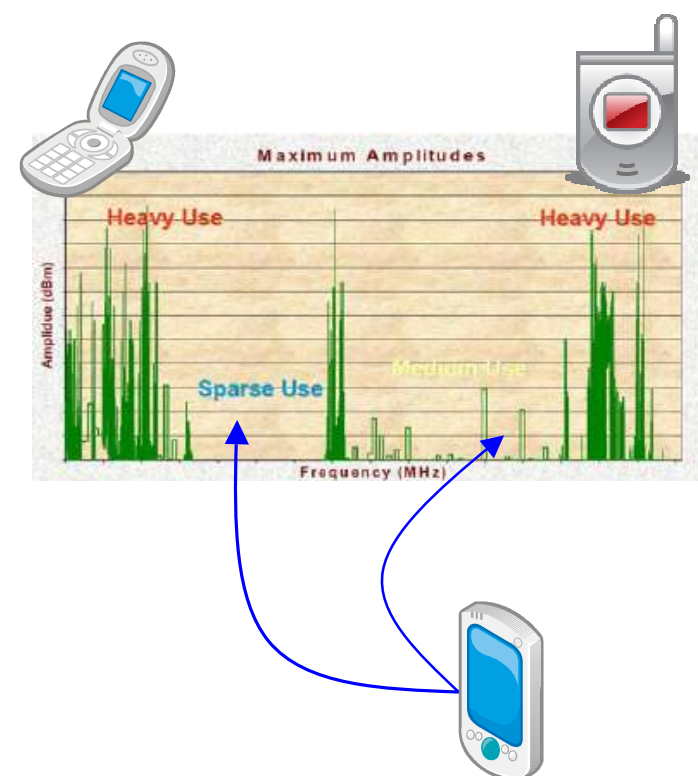
- [Mit99a] [Mit99b] [Hay05]
- 柔軟な無線通信デバイス

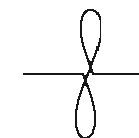
+

- 人工知能



- IEEE 802.22として標準化





MORIKAWA
LABORATORY

GNU Radio

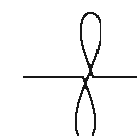
GNU RadioとUSRP

■ GNU Radio

- 高級言語で無線の物理層を記述可能
 - 他のソフトウェア無線はFPGAメイン
 - パフォーマンスに難あり
- PythonとC++

■ USRP (Universal Software Radio Peripheral)

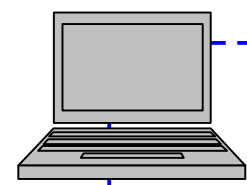
- 無線のフロントエンド
 - USBタイプ(USRP)とギガビットイーサタイプ(USRP2)
- オプションボードで周波数帯を選択



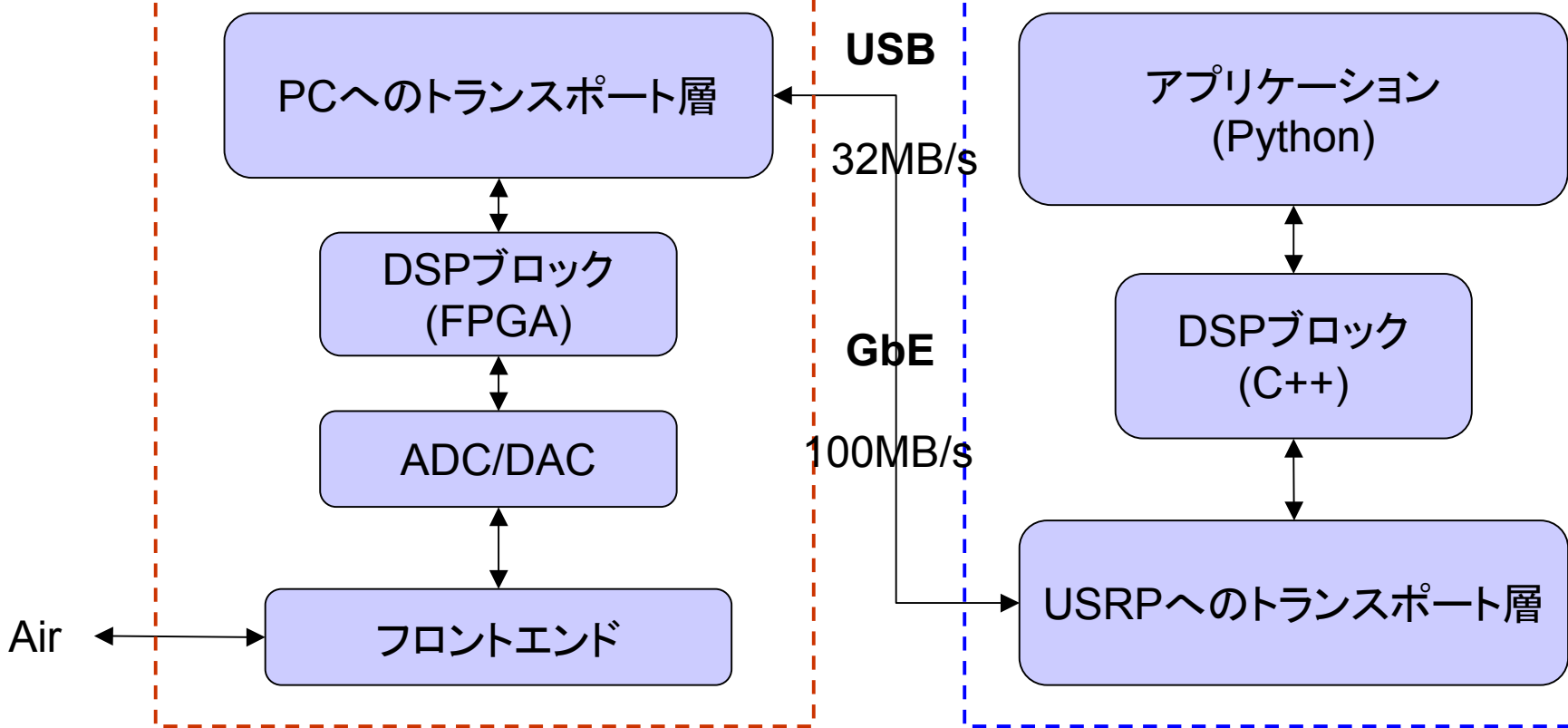
GNU Radio and USRP

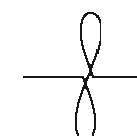


USRP
無線ハードウェア



GNU Radio
無線ソフトウェア





USRP



USRP
無線ハードウェア

PCへのトランスポート層

DSPブロック
(FPGA)

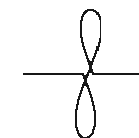
ADC/DAC

フロントエンド

DDC/DUC
データレートの制御

Digital ↔ Analog

DC ~ 3GHz,
4.9~5.85GHz



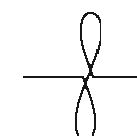
MORIKAWA
LABORATORY

USRP: オプションで周波数変更

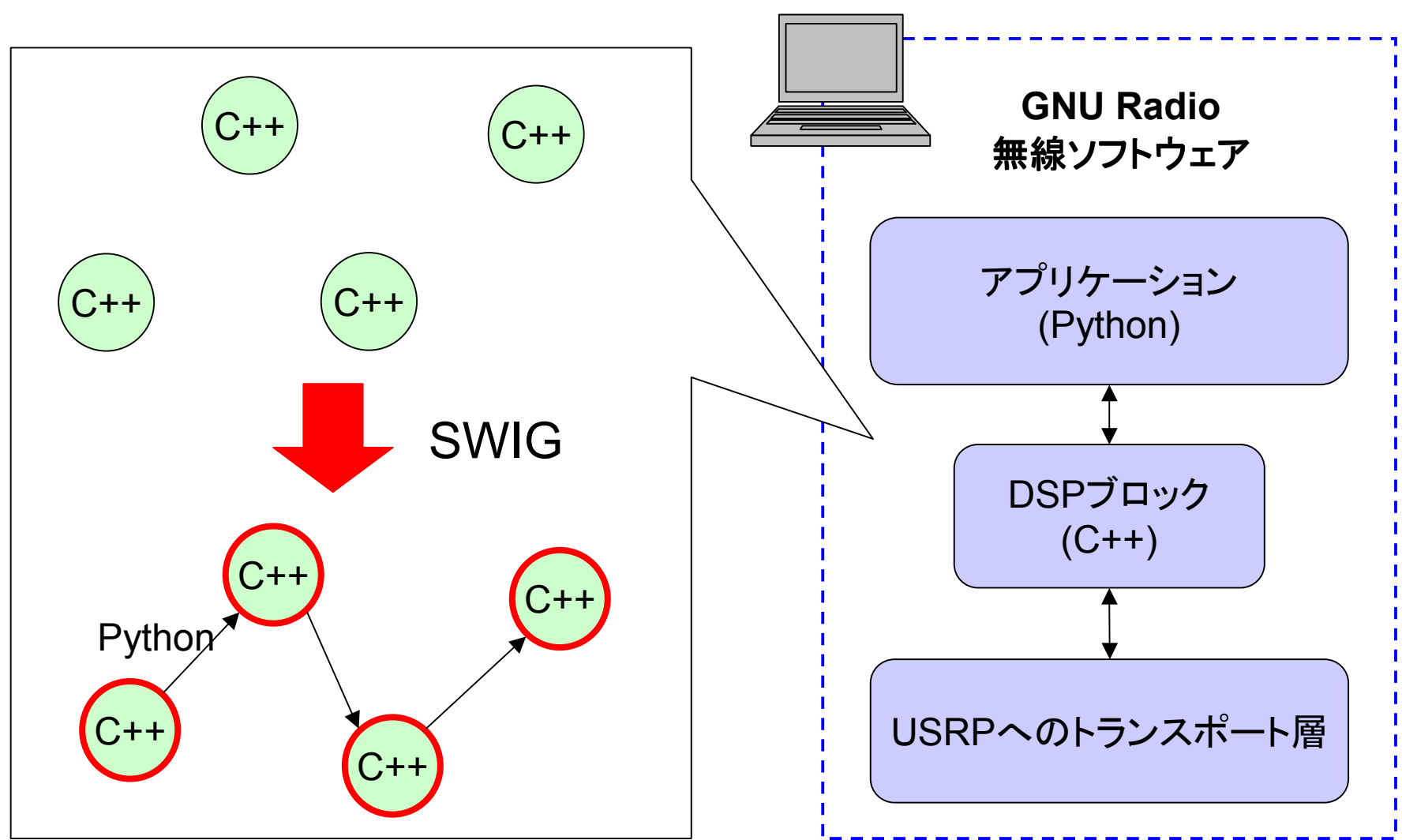
■ ドーターボード

- TVRX
 - 50MHz~870MHz受信
- DBSRX
 - 800MHz~2.4GHz受信
- RFX2400
 - 2.3GHz~2.9GHz送受信
- その他多数
 - 自作も可





GNU Radio



GNU Radio用語

■ Source

- 信号源。受信時のRFやサイン波生成器など

■ Sink

- 終端。オシロスコープとか送信時のRFとか。

■ Block

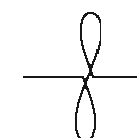
- SourceとSinkを接続するBlock。

■ Flow-graph

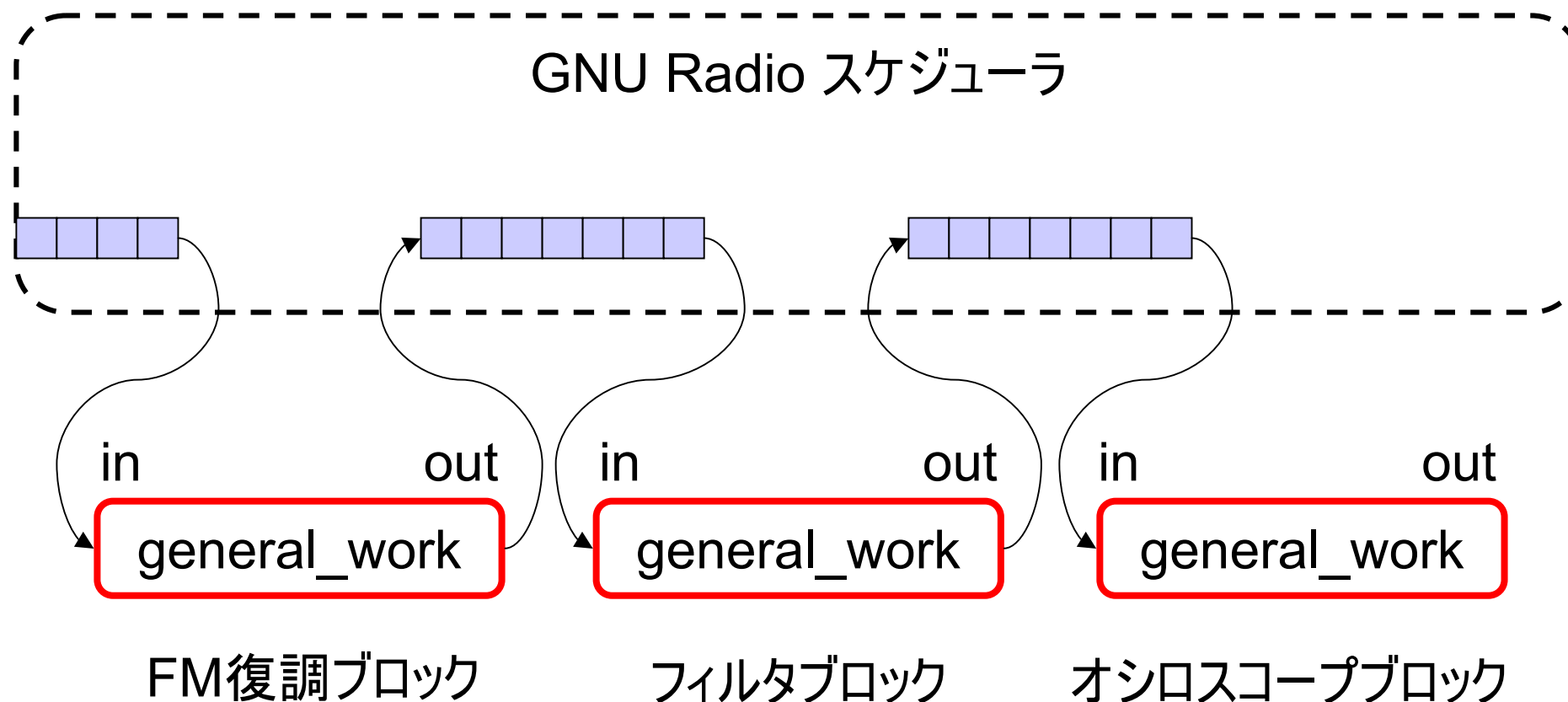
- SourceからはじまりSinkに終わる処理のグラフ



`self.connect(src, block1, block2, sink)`



ブロックの動作

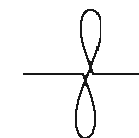


キューが小さいほどリアルタイム処理できるけどCPUを食う [Pe108]

デモ1 FM波の受信



- 274行のプログラム

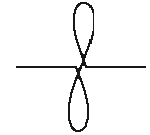


MORIKAWA
LABORATORY

デモ2 センサノードと通信

- 自作ブロック
- PAVENETモジュールからパケットを強引に受信
 - CC1000
 - 315MHz帯
 - FSK
 - 115.2kbps

生データ



MORIKAWA
LABORATORY

```
class my_top_block(stdgui2.std_top_block):
    def __init__(self,frame,panel,vbox,argv):
        stdgui2.std_top_block.__init__(self,frame,panel,vbox,argv)

        self.u = usrp2.source_32fc("eth0", "")
        adc_rate = self.u.adc_rate()
        usrp_decim = 312
        self.u.set_decim(usrp_decim)
        usrp_rate = adc_rate / usrp_decim

        self.u.set_center_freq(315e6)

        scope_sink = scopesink2.scope_sink_c(panel, sample_rate=usrp_rate, v_scale=1)

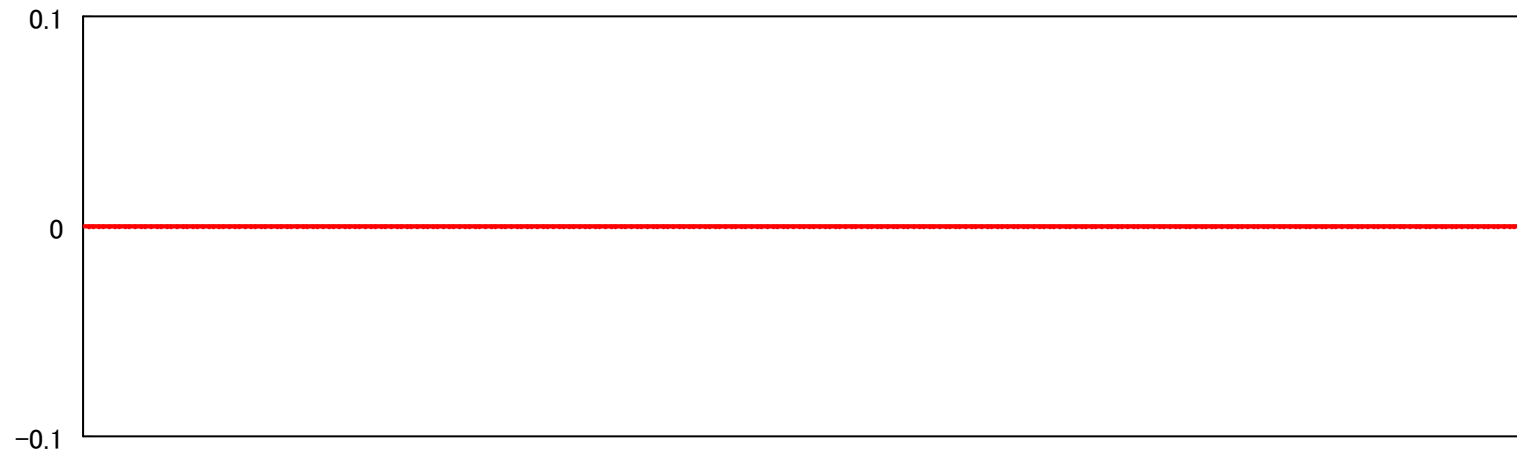
        self.connect(self.u, scope_sink)

        vbox.Add(scope_sink.win, 4, wx.EXPAND)

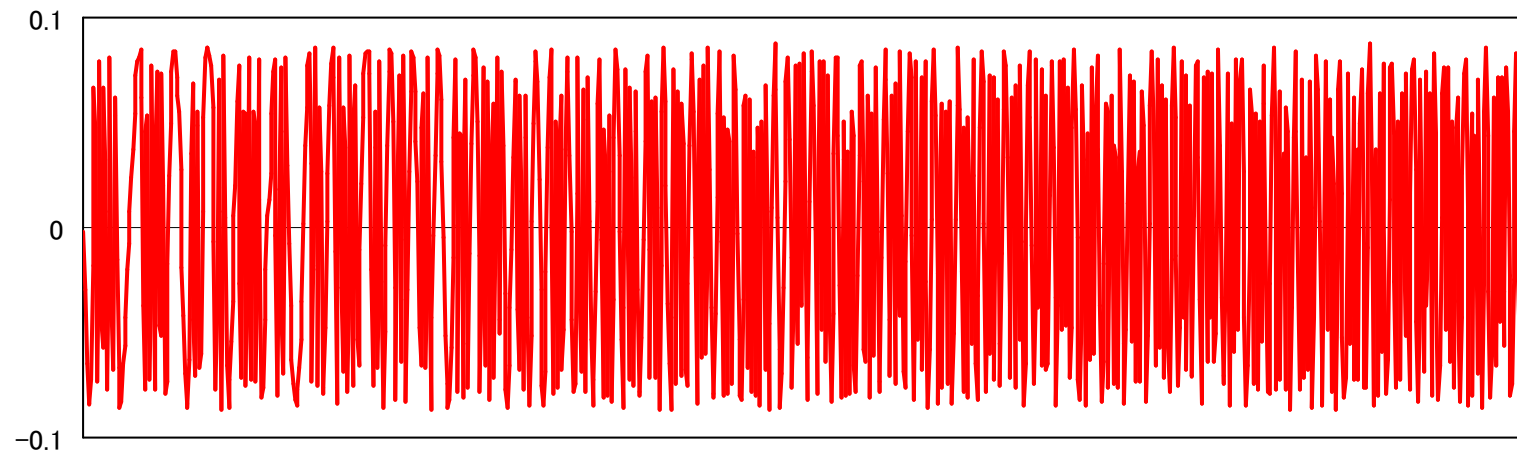
if __name__ == '__main__':
    app = stdgui2.stdapp(my_top_block, "ex012")
    app.MainLoop()
```

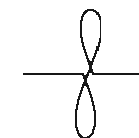
生データ

キャリア無し



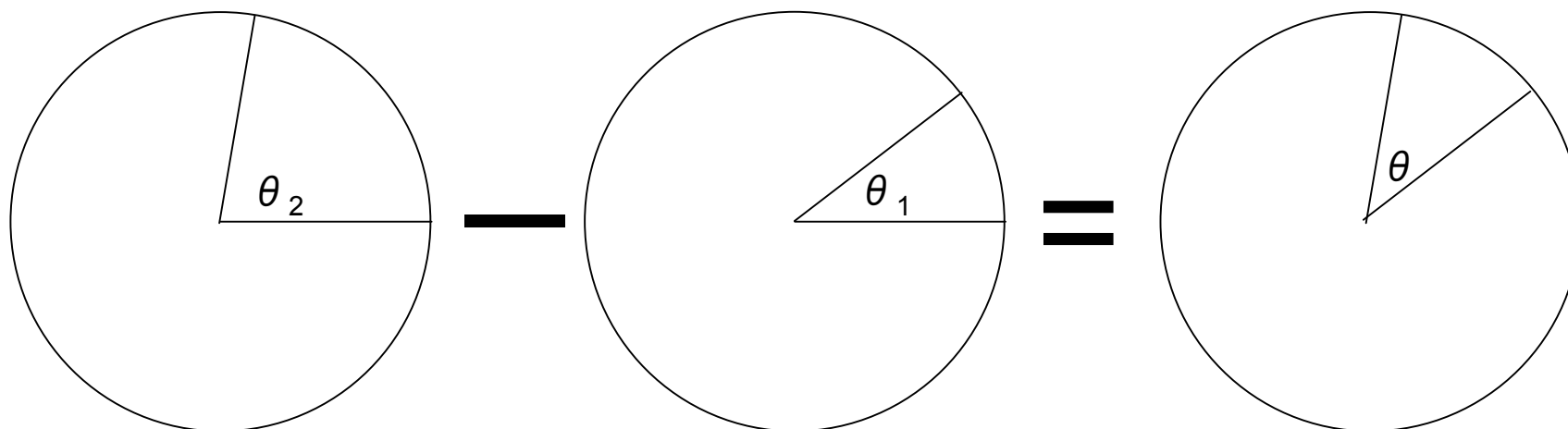
キャリア有り





生データ→直交復調器

- $\theta = \text{atan}(g[k] \times g[k + 1]^*)$
= $\text{atan}(e^{i\theta_1} \times e^{-i\theta_2})$
= $\text{atan}(e^{i(\theta_1 - \theta_2)})$



生データ→直交復調器

C++

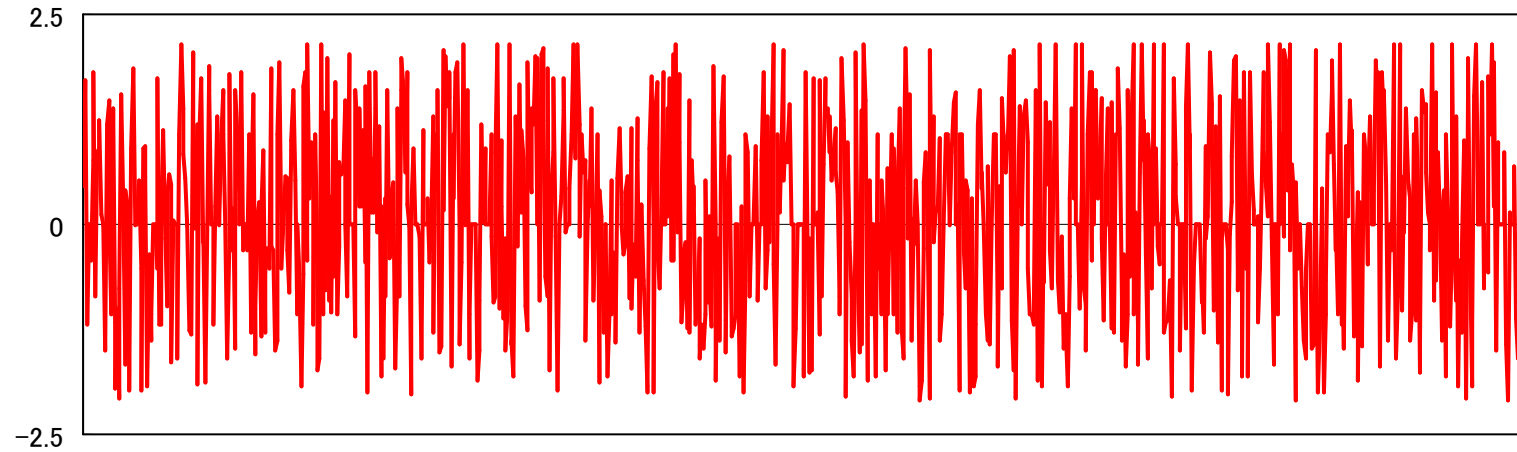
```
int
gr_quadrature_demod_cf::work (int noutput_items,
                              gr_vector_const_void_star &input_items,
                              gr_vector_void_star &output_items)
{
    gr_complex *in = (gr_complex *) input_items[0];
    float *out = (float *) output_items[0];
    in++; // ensure that in[-1] is valid

    for (int i = 0; i < noutput_items; i++){
        gr_complex product = in[i] * conj (in[i-1]);
        out[i] = d_gain * gr_fast_atan2f(imag(product), real(product));
    }

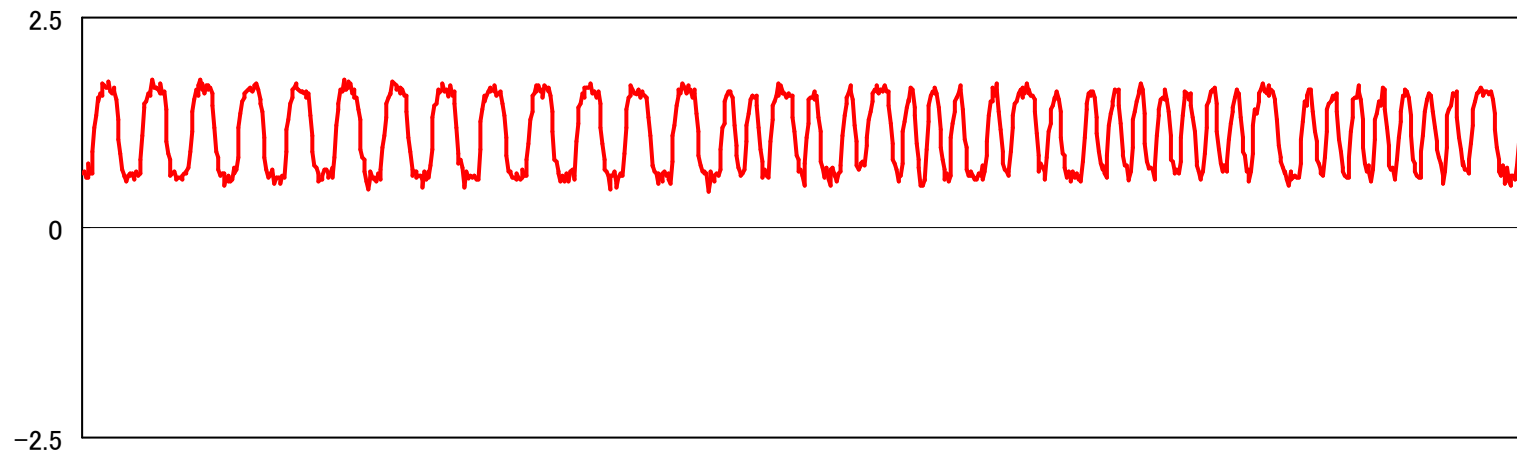
    return noutput_items;
}
```


生データ→直交復調器

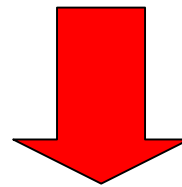
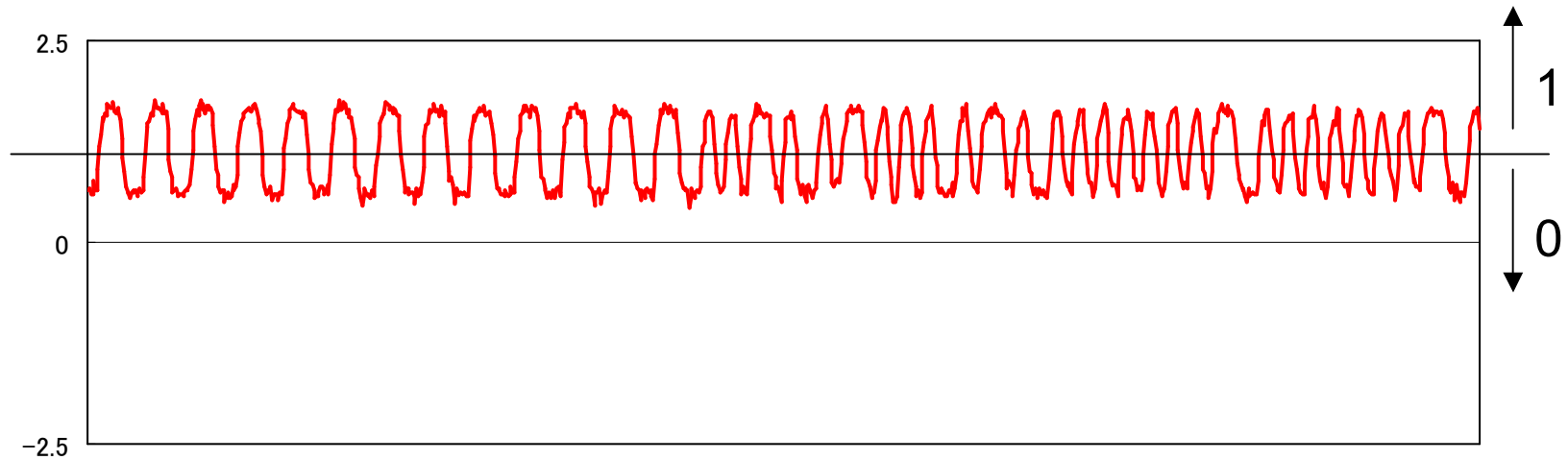
キャリア無し



キャリア有り



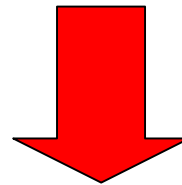
直交復調器→スライサー



1111110000000000000000111111111111000000000000

スライサー→ビットをまとめる

1 0 0 1
1111111 0000000 0000000 1111111 1111111 0000000 0000000

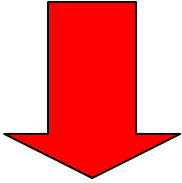


100110011001100110011001100110010110100101101001

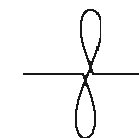
ビットをまとめる→マンチェスター復号

1 0 1 0
└─┘└─┘└─┘└─┘
100110011001100110011001100110010110100101101001

01 → 0
10 → 1

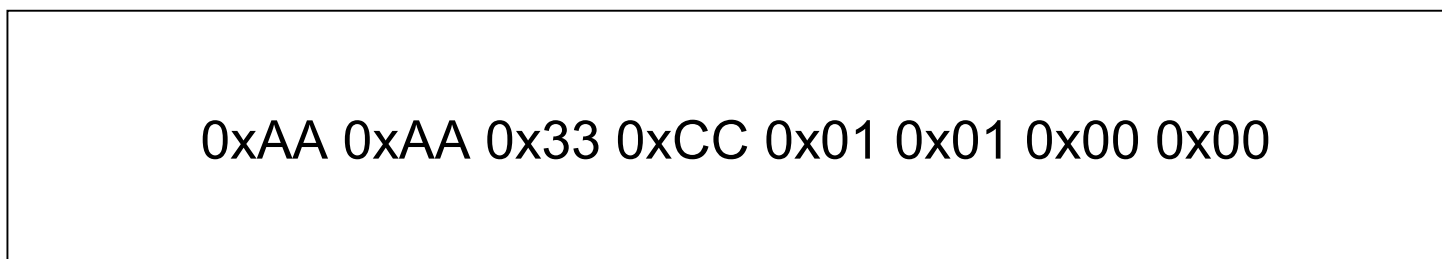
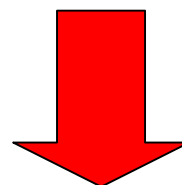
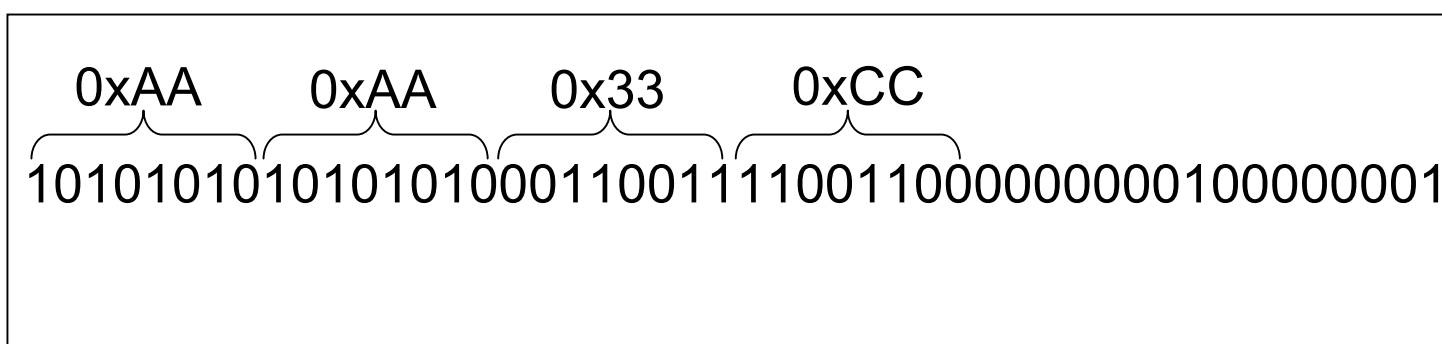


10101010101010100011001111001100000000100000001



マンチェスター復号→フレーム抽出

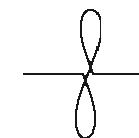
- PAVENET OSのソースコードをそのまま使用



参考情報

- ソースコードを読むのが一番早い
- 情報を共有・公開しています
 - Gnu Radio/USRP Wiki
 - <http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/~saru/usrp/>
- 参加機関(募集中)
 - 東大 森川研究室
 - 静岡大 渡辺研究室
 - 静岡大 石原研究室

GNU Radio/USRPを用いた 研究事例



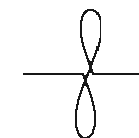
MORIKAWA
LABORATORY

分類

- アプリケーションの研究
 - 地デジ、センサネットワーク
- コグニティブ無線の研究
 - 機械学習、プロトコルの実測
- 無線通信の信頼性向上の研究
 - 干渉除去、Soft Valueの利用
- GNU Radioを拡張する研究
 - MACプロトコル、メタデータ、SIMD

アプリケーションの研究

- **Soft-DVB [PeI08]**
 - DVB-T(日本で言うところの地上波デジタル)の実装
 - リアルタイム性を評価
- **CC1000とZigBeeの実装 [Sch07]**
 - Mica2とMicaZをブリッジして通信
 - ソフトウェア実装による遅延を評価
- **プラズマを使った風速計 [Mat05]**
 - 信号処理のみにGNU Radioを利用

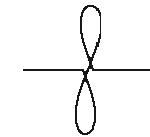


Soft-DVB [PeI08]

- V. Pellegrini, G. Bacci, and M. Luise
- 「Soft-DVB: A Fully-Software GNU Radio-based ETSI DVB-T Modulator」 WSR 2008
- 目的
 - DVB-T(地デジ)をGNU Radioで実装
- モチベーション
 - 緊急時の受信機
 - DVB-Tの標準化への貢献
 - 高密度でのコンテンツ配信ネットワークの実現
 - DVB-T上でIPを動作させる可能性の模索
- リアルタイム性をしっかり検証しているところがポイント
 - SIMDの利用
 - バッファサイズの最適化

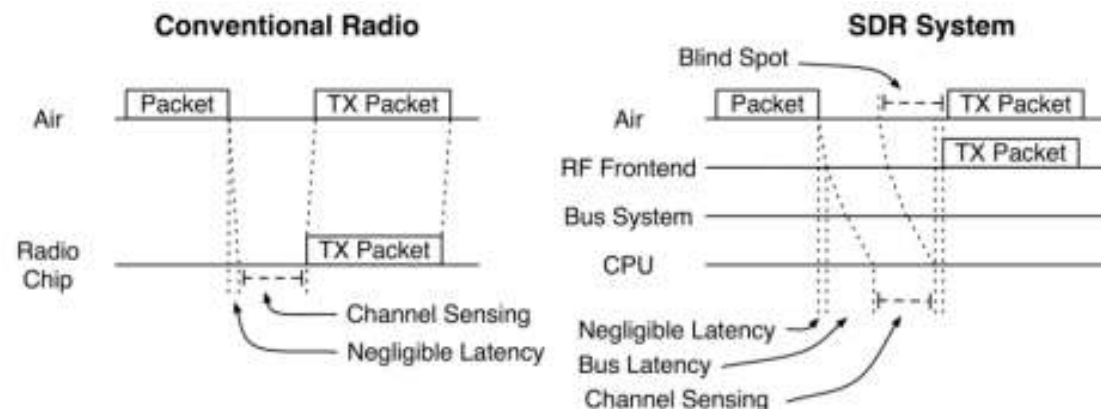


CC-1000とZigBeeの実装 [Sch07]



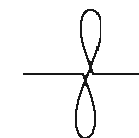
MORIKAWA
LABORATORY

- T. Schmid, O. Sekkat, and M. Srivastava
- 「An Experimental Study of Network Performance Impact of Increased Latency in Software Defined Radios」 IEEE WINTech 2007
- 目的
 - CC1000とZigBeeをGNU Radioで実装
 - オーバヘッドの計測



- ウェブサイトで公開中

<https://www.cgran.org/wiki/UCLAZigBee>



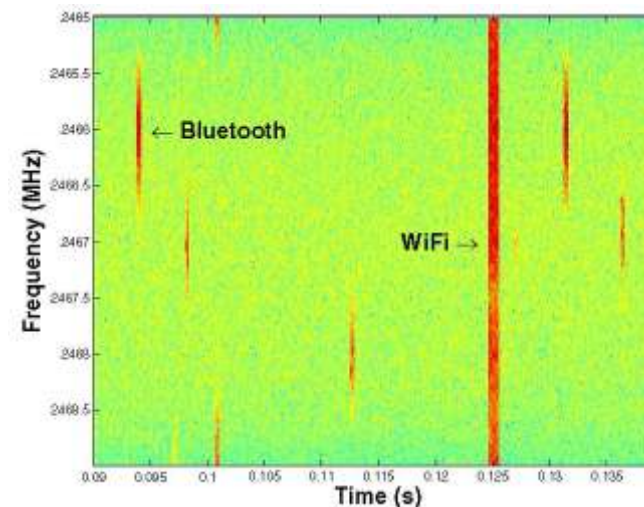
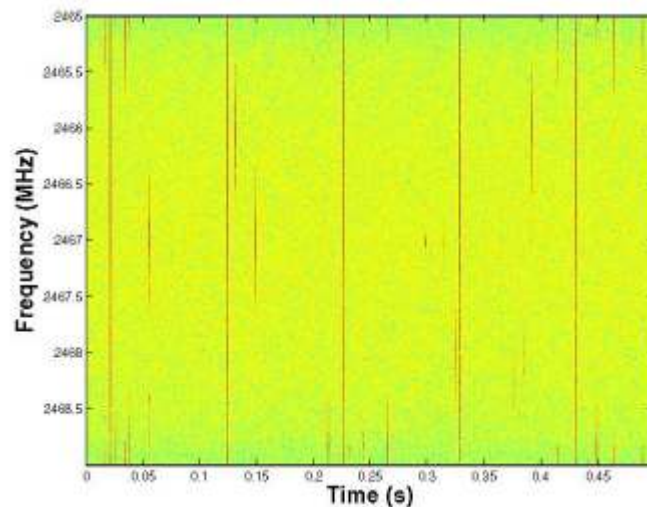
MORIKAWA
LABORATORY

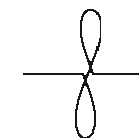
コグニティブ無線の研究

- WiFiとBluetoothを識別 [Mil07]
- 機械学習で変調方式等を抽出 [Osh06][Ron06][Sok08]
- ネゴシエーションプロトコル [Hor07]
- PrimaryとSecondaryの干渉実験 [Noi07][Yan08]
 - 3~5ノード使用
- 送信端末の位置検出 [Ran07]
 - 10ノード使用
- 機械学習用にGNU Radioを拡張 [Sca06]

WiFiとBluetoothを識別 [Mi107]

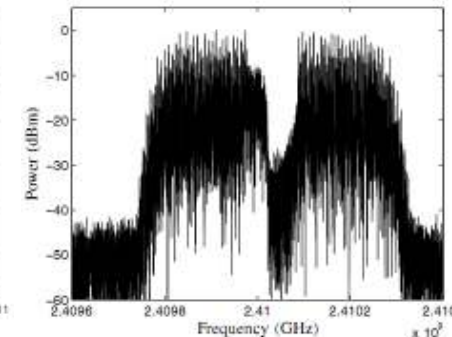
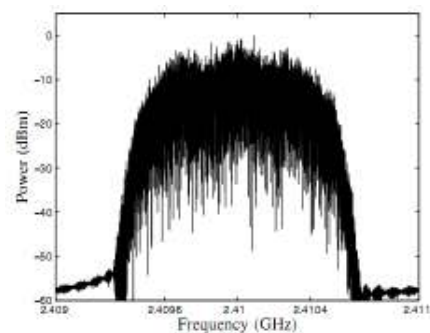
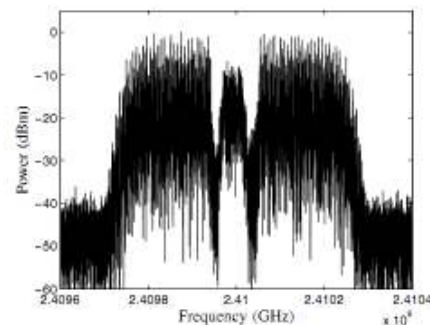
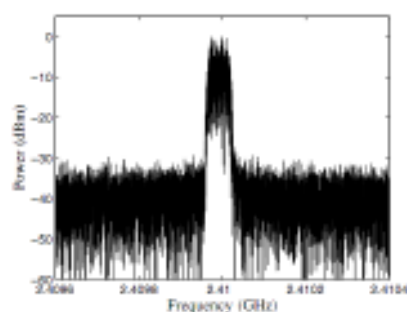
- R. Miller, W. Xu, P. Kamat, and W. Trappe
- 「Service Discovery and Device Identification in Cognitive Radio Networks」 IEEE SECON 2007
- 目的
 - 狭帯域
 - WiFiとBluetoothを識別（帯域幅を検出）
 - Piconetを識別（周期を検出）
 - デバイスを識別（パケット内を検出）





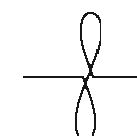
PrimaryとSecondaryの干渉実験 [No107]

- K. Nolan, P. Sutton, L. Doyle, T. Rondeau, B. Le, and C. Bostian
- 「Dynamic Spectrum Access and Coexistence Experiences Involving Two Independently Developed Cognitive Radio Testbeds」 IEEE DySPAN 2007
- 目的
 - Primary(ナローバンド)とSecondary(ブロードバンド)の干渉実験



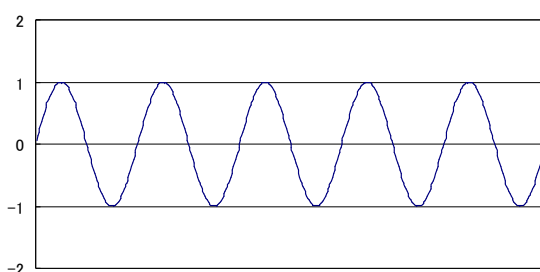
信頼性向上の研究

- 干渉除去 (Interference Cancellation)
 - Analog Network Coding [Kat07]
 - ZigZag Decoding [GoI08]
 - SIC on WLAN [Hal08]
- Soft Valueを利用
 - Partial Packet Recovery [Jam07]
 - Beyond the Bits [Woo07]
 - MIXIT [Kat08]



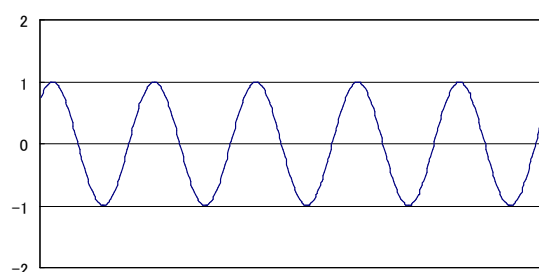
MORIKAWA
LABORATORY

干渉除去



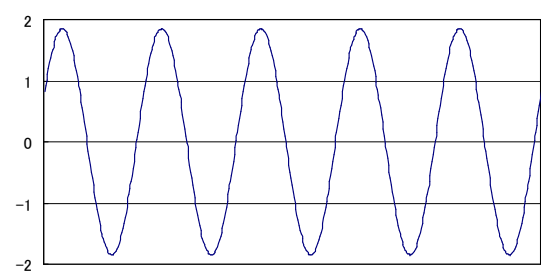
パケットA

+

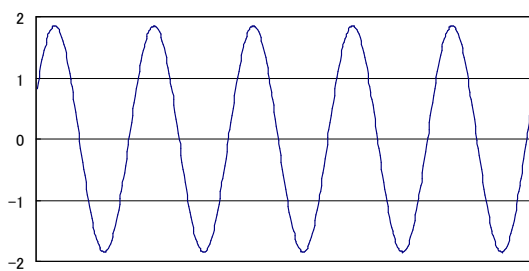


パケットB

=

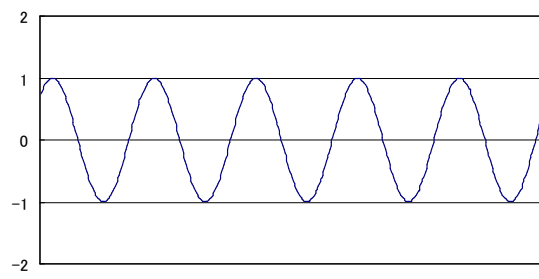


受信波



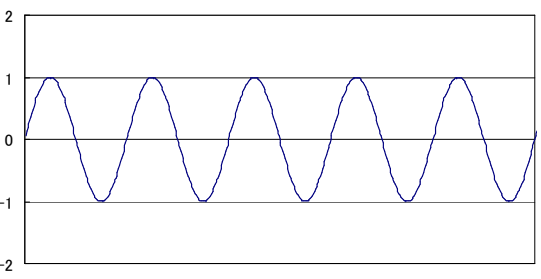
受信波

-

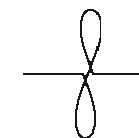


パケットB

=

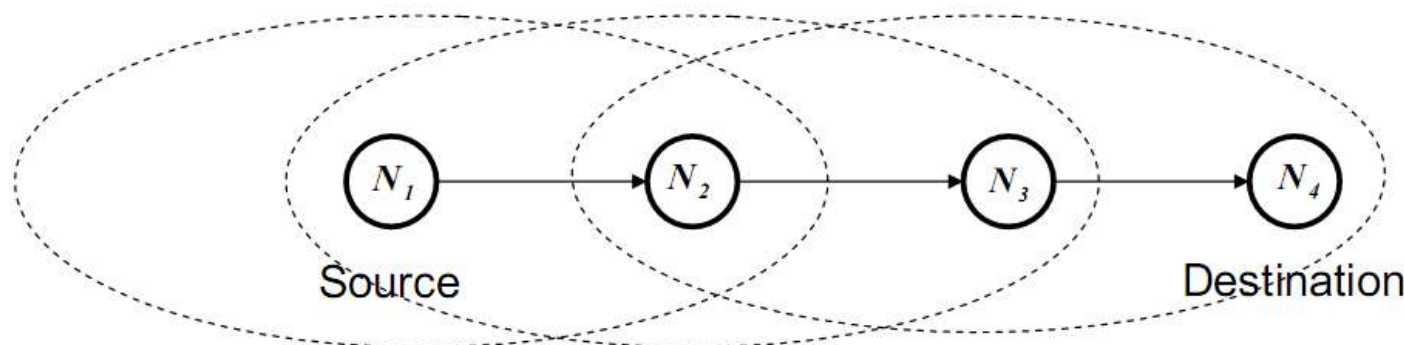


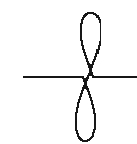
パケットA



Analog Network Coding [Kat07] -1

- S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi
- 「Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding」 SIGCOMM 2007
- 目的
 - メッシュネットワークのスループットの向上





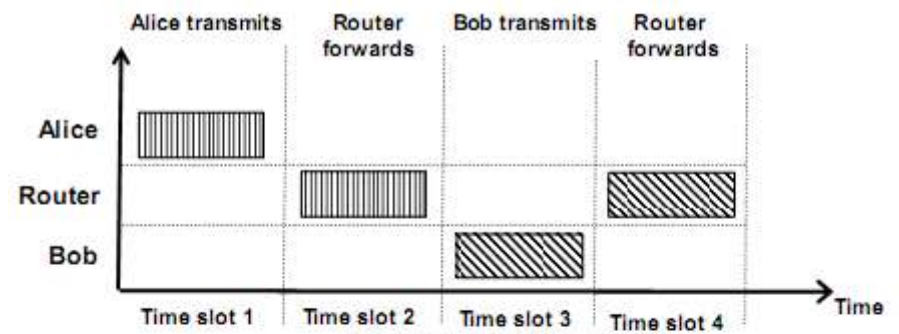
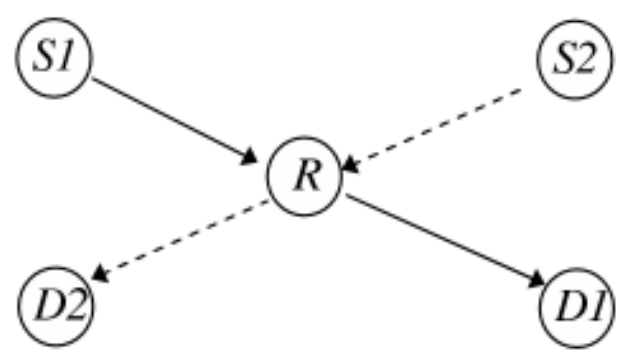
Analog Network Coding [Kat07] -2

■ アプローチ

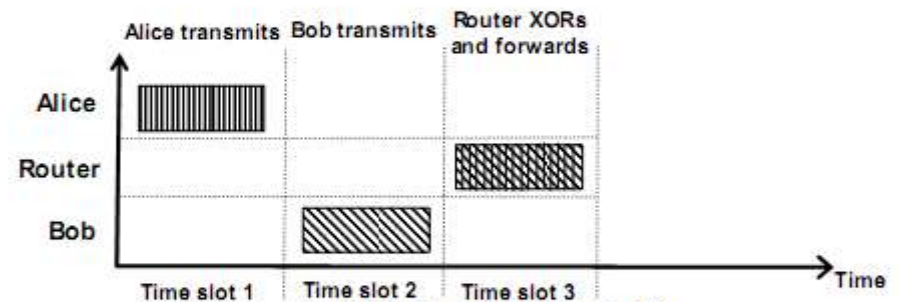
- 干渉を除去して衝突による干渉を解消

■ 評価

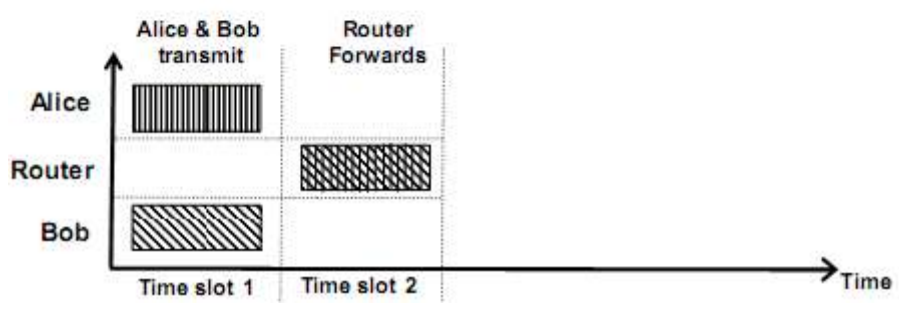
- USRP 5ノード
- 70%のスループットの向上

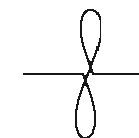


(b) Traditional Approach



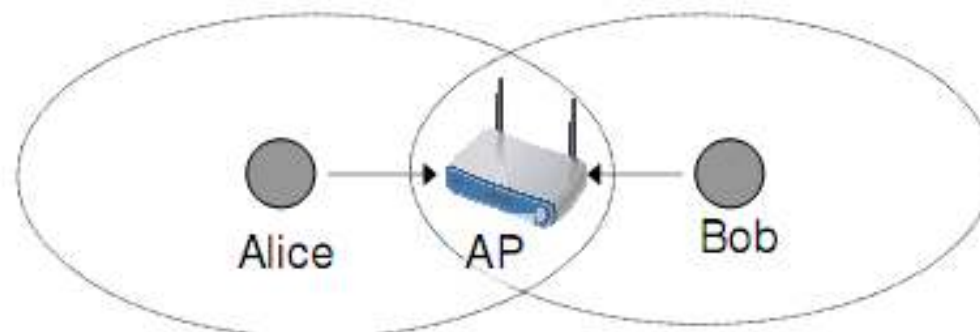
(c) Digital Network Coding





SIC on WLAN [Hal08] – 1

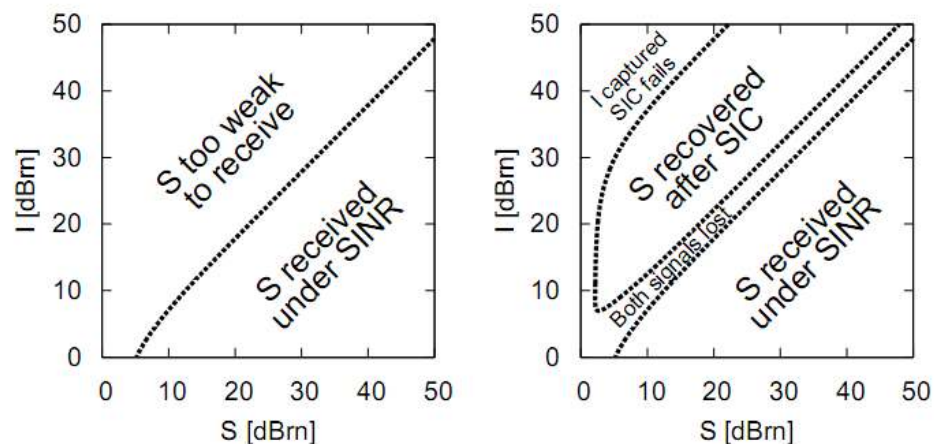
- D. Halperin, T. Anderson, and D. Wetherall
- 「Taking the Sting out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs」
MobiCom 2008
- 目的
 - WLANにおける干渉除去



SIC on WLAN [Hal08] – 2

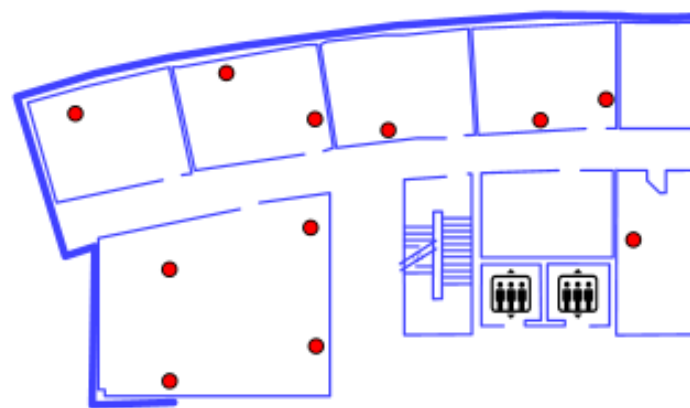
■ アプローチ

- キャプチャ効果を利用して干渉した電波を除去



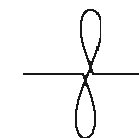
(a) Capacity under the SINR model

(b) Capacity with SIC



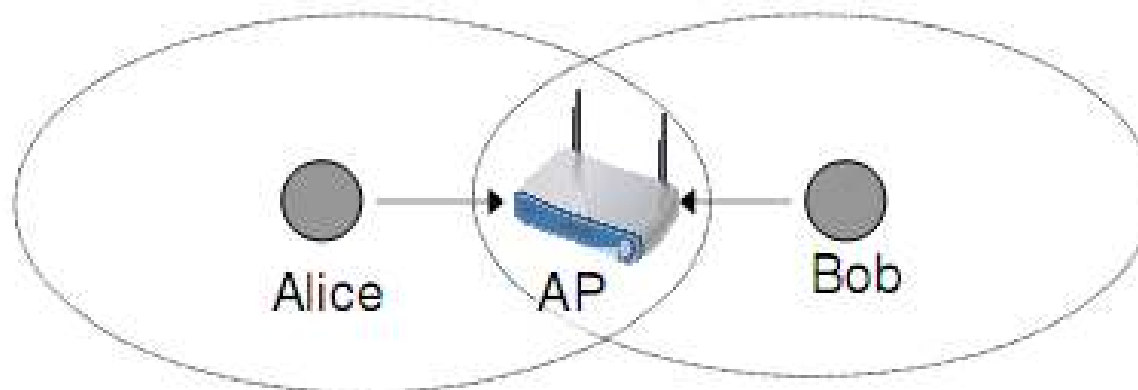
■ 評価

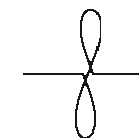
- USRP11ノード
- ランダムにノードの組を選択して1000パケット送信
- 衝突率が14%から8%に減少



ZigZag Decoding [Gol08] – 1

- S. Gollakota, and D. Katabi
- 「ZigZag Decoding: Combating hidden Terminals in Wireless Networks」 SIGCOMM 2008
- 目的
 - 隠れ端末同士のコリジョンの干渉除去

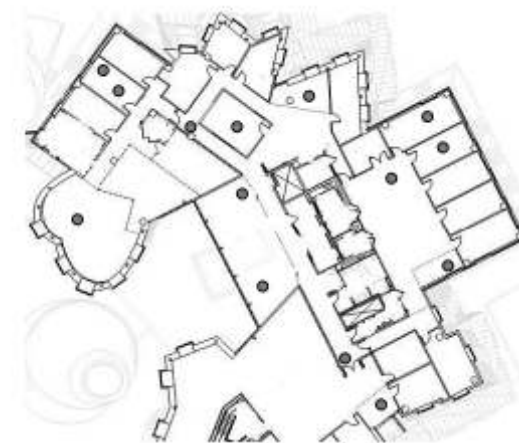
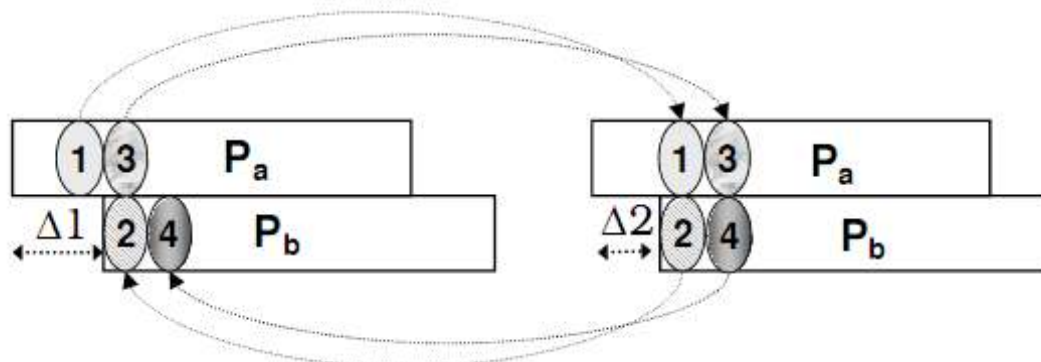




ZigZag Decoding [Gol08] – 2

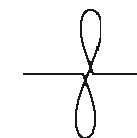
■ アプローチ

- 違うタイミングで衝突した2組の packets を利用して ZigZag に干渉除去



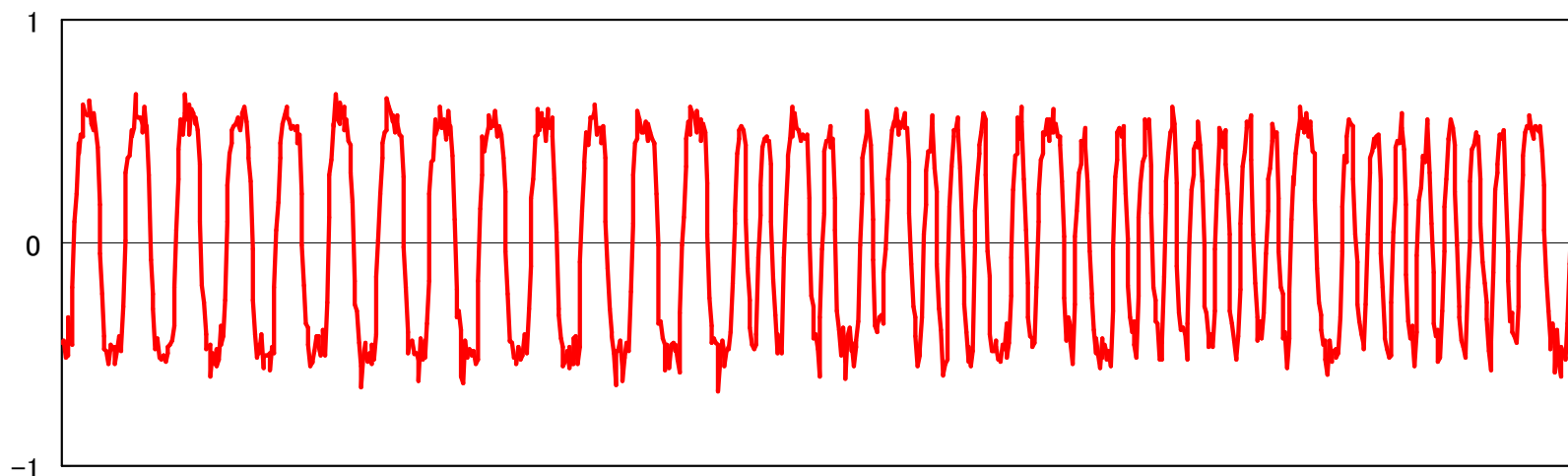
■ 評価

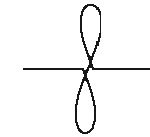
- 14ノード
- ランダムに選択した2つのノードが100パケット送信
- 25.2%のスループット向上
- パケットロス率が15.8%から0.2%に減少



Soft Value

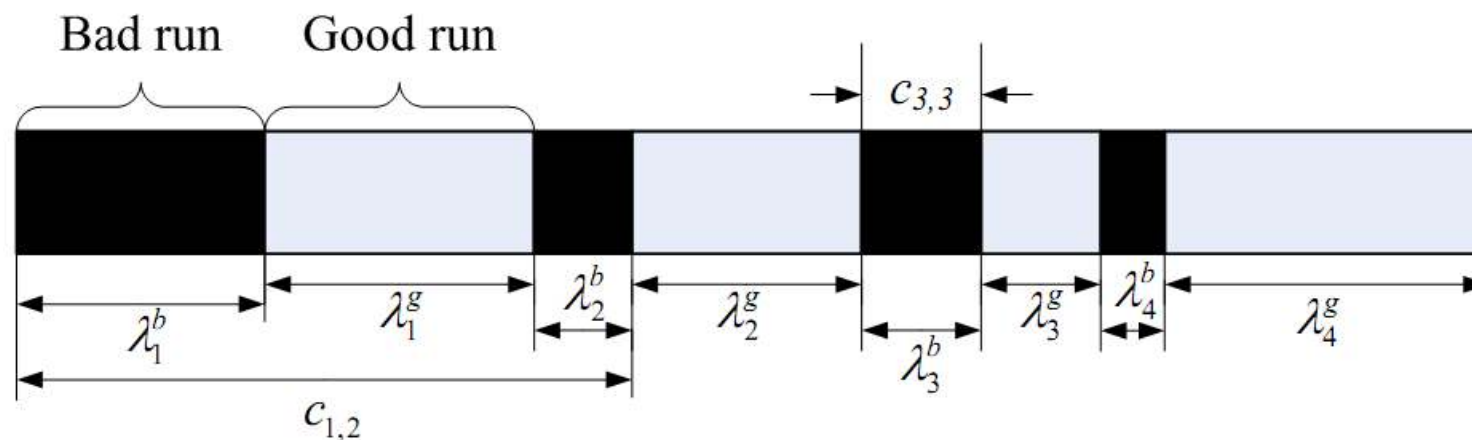
- ベースバンドを slicer にかける前のデータを上位層に渡す
 - $[0,1]$ の2進の情報では無く $[-1,1]$ の実数
 - Cross Layer

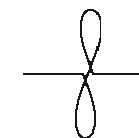




PPR [Jam07] – 1

- K. Jamieson, and H. Barakrishnan
- 「PPR: Partial Packet Recovery for Wireless Networks」 SIGCOMM 2007
- 目的
 - パケット内の部分的なエラーの修復

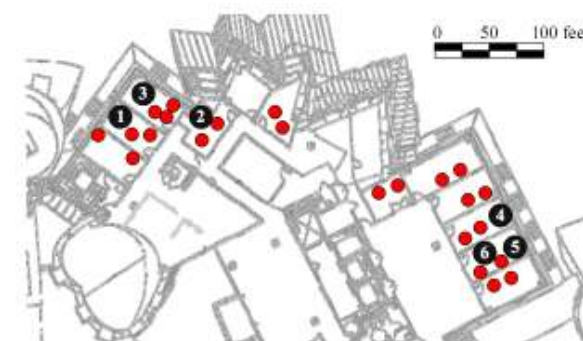
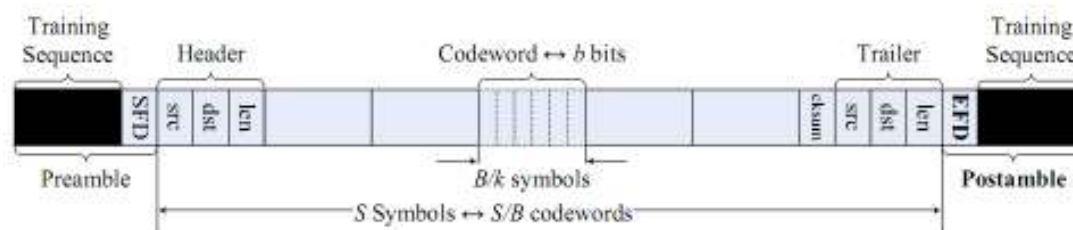




PPR [Jam07] – 2

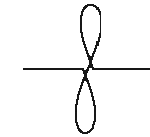
■ アプローチ

- PostambleとSoft Valueを使って壊れている部分を正確に検出
- 壊れてる部分だけをARQで再送



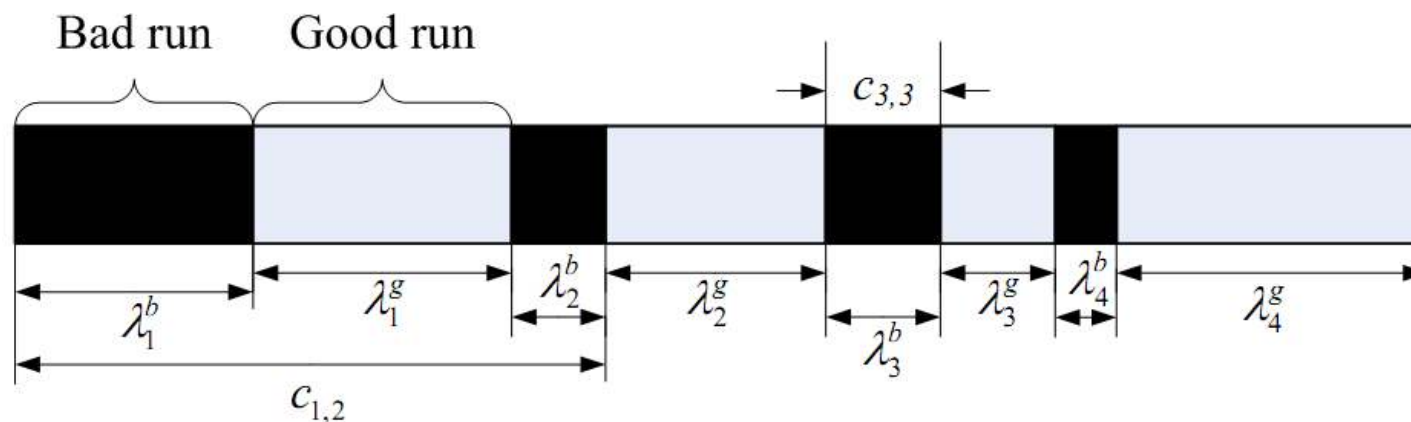
■ 評価

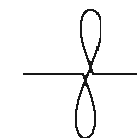
- USRP 6ノード + ZigBee 25ノード
- 高負荷時に4倍のスループット



Beyond the Bits [Woo07] – 1

- G. Woo, P. Kheradpour, D. Shen, and D. Katabi
- 「Beyond the Bits: Cooperative Packet Recovery Using Physical Layer Information」 MobiCom 2007
- 目的
 - パケット内の部分的なエラーの修復





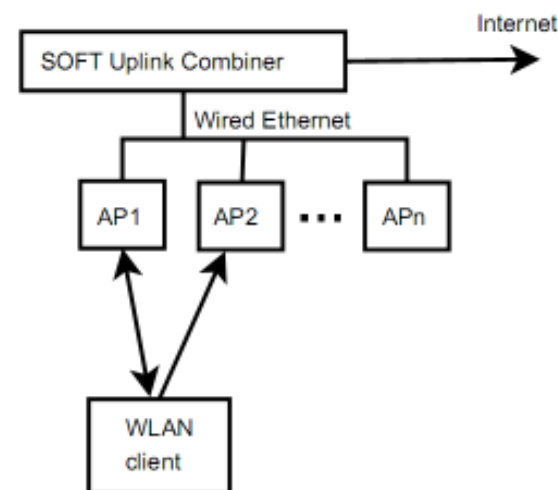
Beyond the Bits [Woo07] – 2

■ アプローチ

- 各BitのSoft Valueを記録
- 複数の基地局で受け取ったパケットを組み合わせてパケットを復元

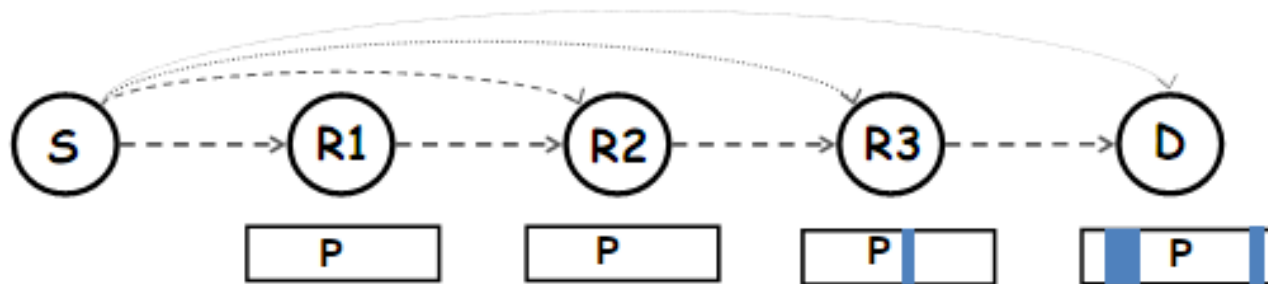
■ 評価

- USRP 13ノード
- ランダムに選択したノードから1500Bのパケットを500パケット送信
- パケットロス率を10分の1に削減



MIXIT [Kat08] -1

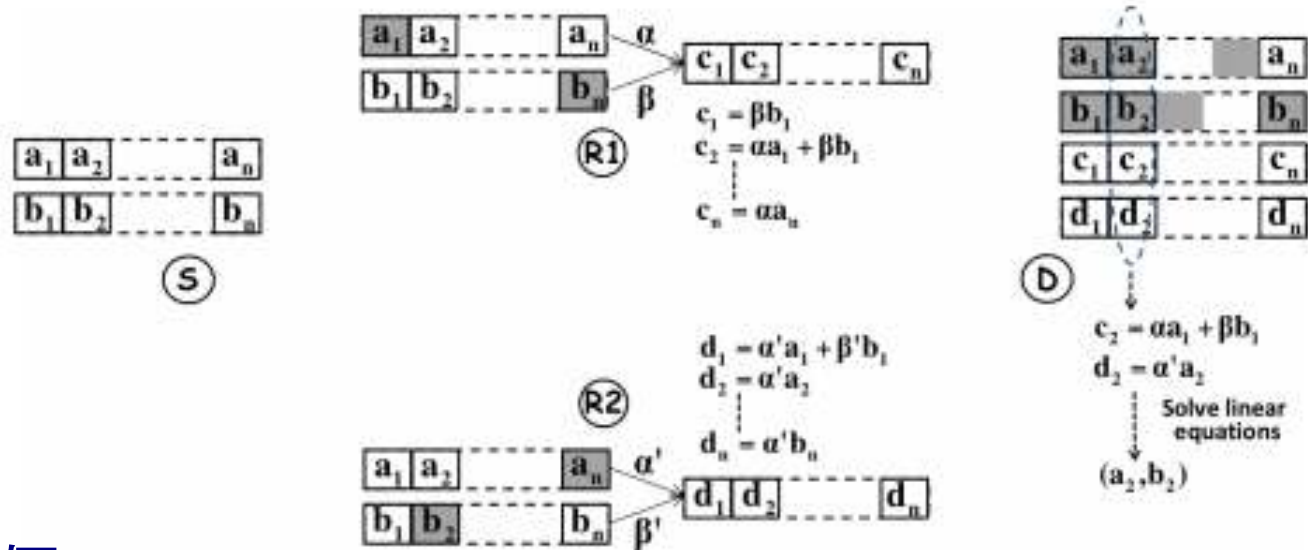
- S. Katti, D. Katabi, H. Balakrishnan, and M. Medard
- 「Symbol-level Network Coding for Wireless Mesh Networks」 SIGCOMM 2008
- 目的
 - メッシュネットワークにおけるスループットの向上



MIXIT [Kat08] -2

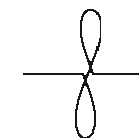
■ アプローチ

- 壊れた部分をSoft Valueで検知
- シンボルレベルのネットワークコーディングを利用



■ 評価

- USRP 25ノード (ZigBeeを実装)
- ランダムに120組の送信元と宛先を選択して5MBのファイルを転送
- 既存のルーティングプロトコルに比べて3.9倍のスループット向上



GNU Radioを拡張する研究

■ ADROIT [Tro06]

- メタデータ(m-block)の拡張、MAC、GUI (Clicks)

■ Hydra [Man07]

- MIMO、MAC、Routing、GUI(Clicks)

■ 機械学習用に拡張 [Sca06]

- MeterとKnobのためのAPI

■ SIMD [McC08]

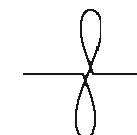
- Cellに実装、PS3でも動作

クロスレイヤ
をサポート

ハイパフォー
マンス化

ADROIT [Tro06] – 1

- G. Troxel, E. Blossom, S. Boswell, A. Caro, I. Castineyra, A. Colvin, T. Dreier, J. Evans, N. Goffee, K. Haigh, T. Hussain, V. Kawadia, D. Lapsley, C. Livadas, A. Medina, J. Mikkelson, G. Minden, R. Morris, C. Partridge, V. Raghunathan, R. Ramanathan, C. Santivanez, T. Schmid, D. Sumorok, M. Srivastava, R. Vincent, D. Wiggins, A. Wyglinski, and S. Zahedi
- 「Adaptive Dynamic Radio Open-source Intelligent Team (ADROIT): Cognitively-controlled Collaboration among SDR Nodes」 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks, 2006.
- 目的
 - オープンソースのソフトウェア無線を実現する

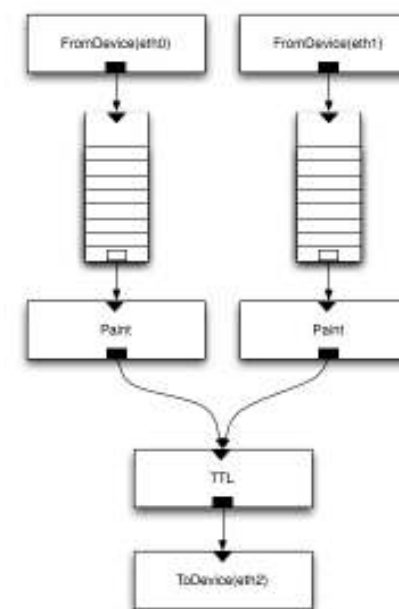


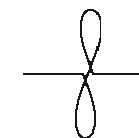
ADROIT [Tro06] – 2

■ アプローチ

- Clickでモジュールを接続
- MACを扱えるように拡張
- メタデータを各シンボルに付けることができるように拡張
 - m-block

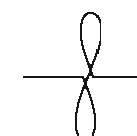
■ Gnu Radioの本家





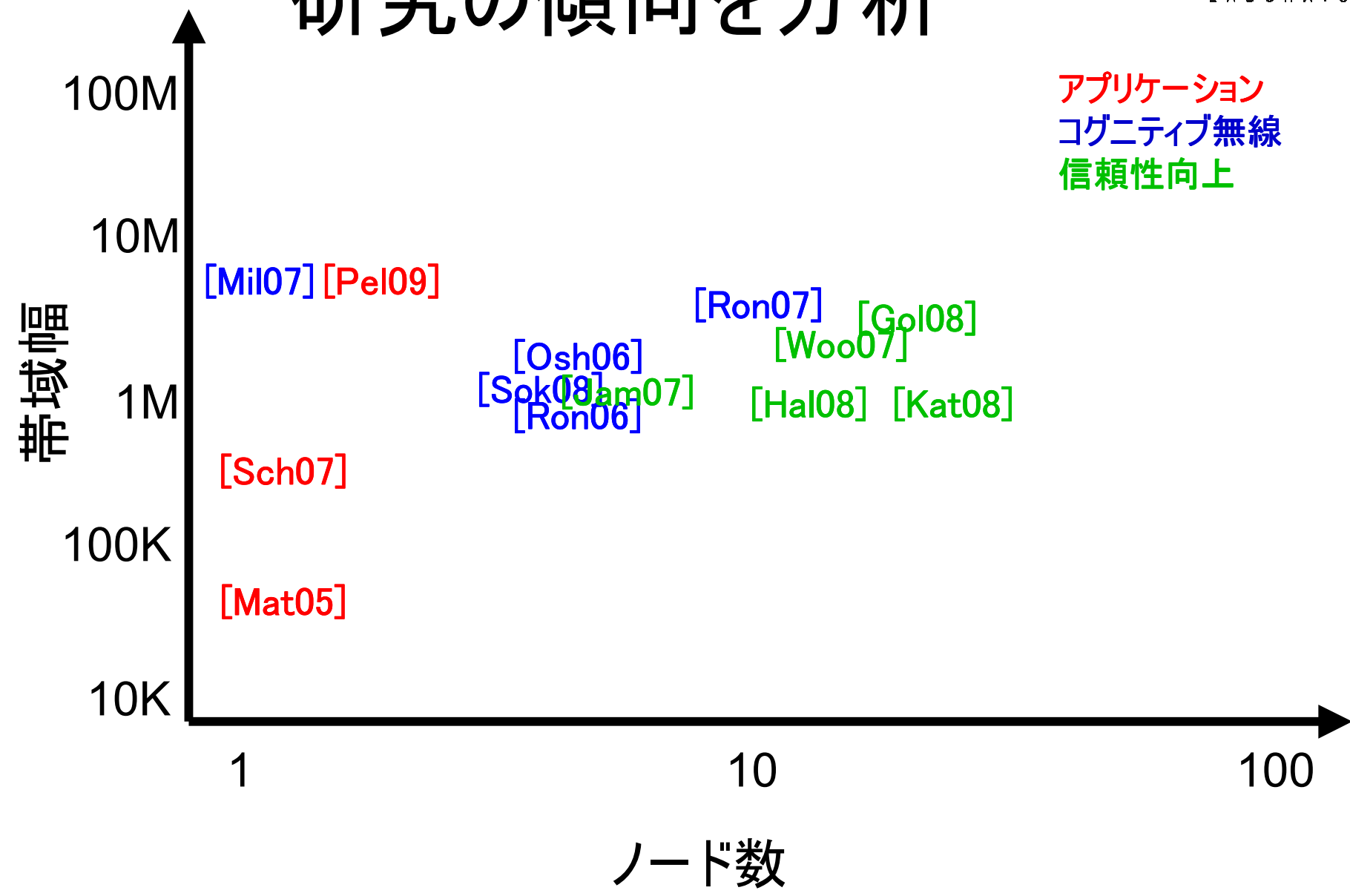
MORIKAWA
LABORATORY

今後の展開

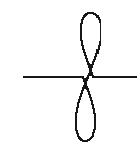


MORIKAWA
LABORATORY

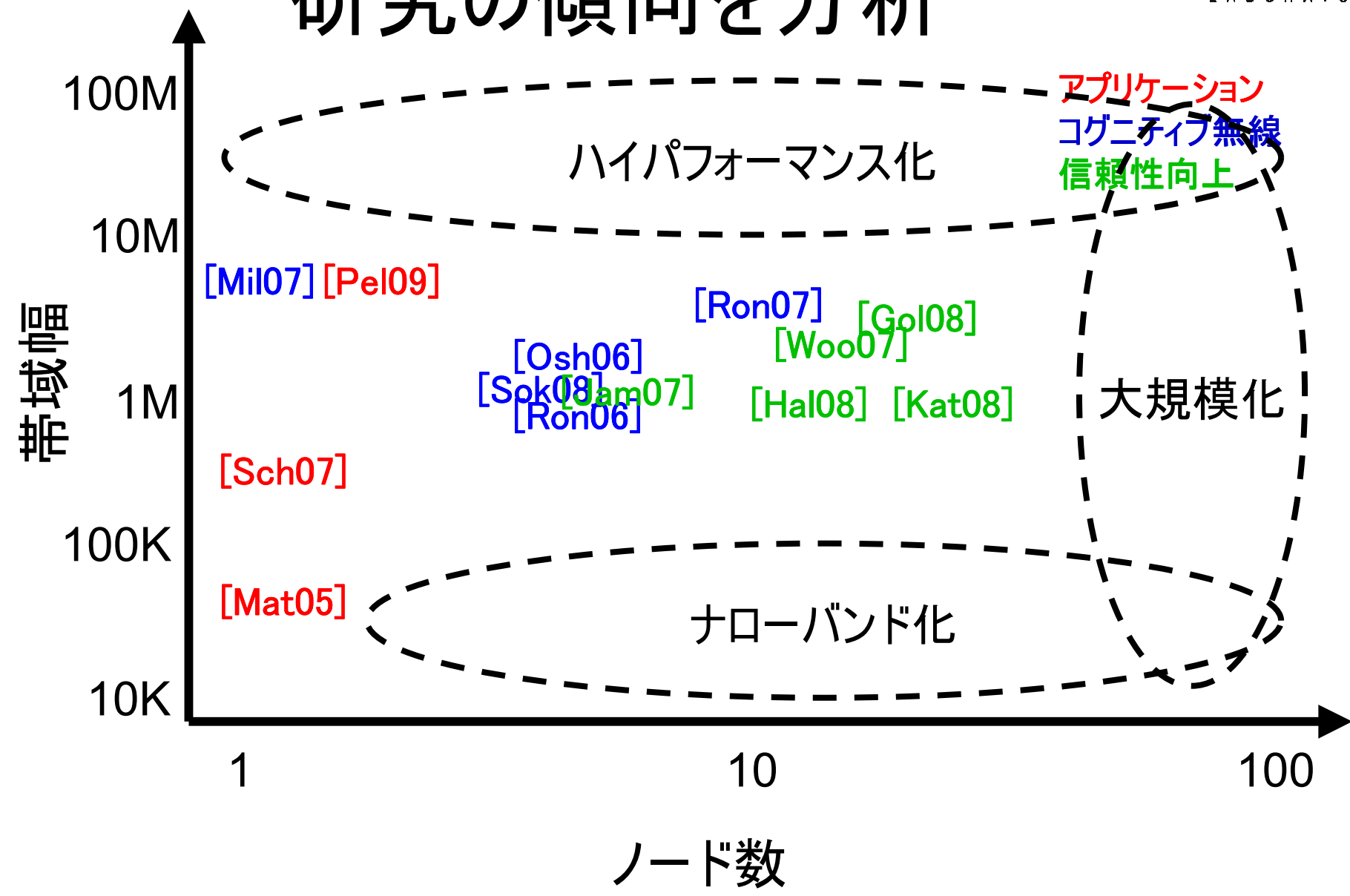
研究の傾向を分析

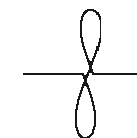


アプリケーション
コグニティブ無線
信頼性向上



研究の傾向を分析





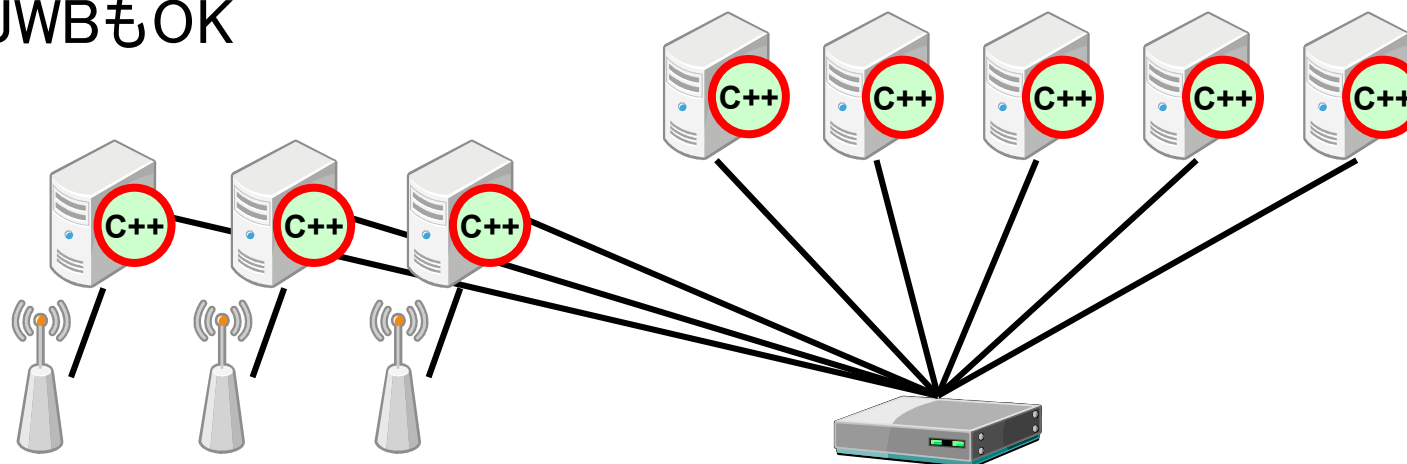
MORIKAWA
LABORATORY

研究ネタ

ハイパフォーマンス化

■ GNU Radio Cluster

- Gnu Radioを拡張する研究
- USRP2を複数使う
- 複数のマシンで分散で処理
- 広帯域をリアルタイム処理
 - UWBもOK

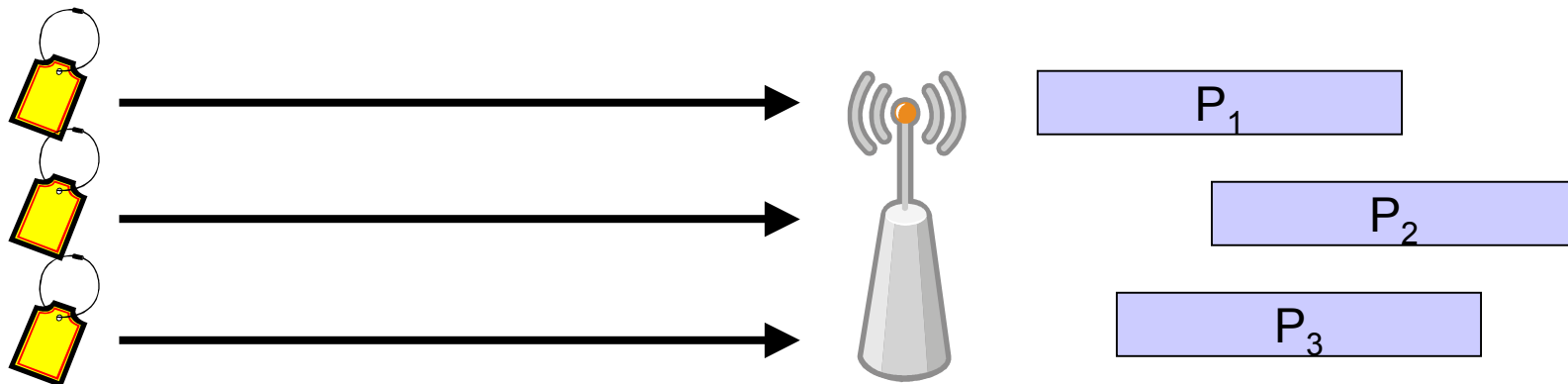


研究ネタ

ナローバンド化

■ アクティブタグの干渉除去

- 信頼性向上の研究
- 数kHzから数十kHzの帯域のアプリケーション
- 数が多くなると衝突が頻発
- 干渉除去で受信率向上

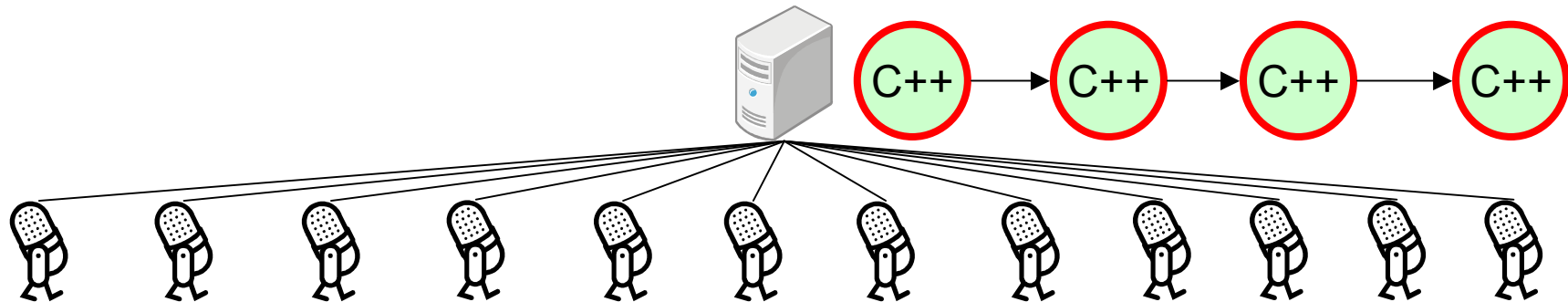


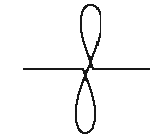
研究ネタ

大規模化 + ナローバンド化

■ ユビキタスマイク(電波以外の応用)

- GNU Radioを拡張する研究
- 数kHzの帯域(ナローバンド)
- 誰と誰が会話しているか
- 干渉除去で受信率向上
- 音の発生場所の特定





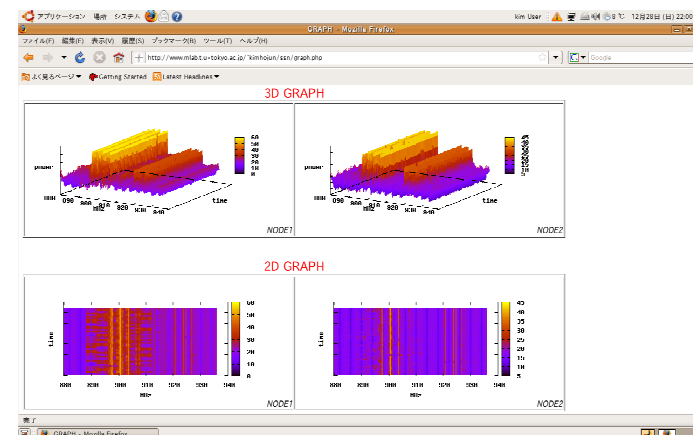
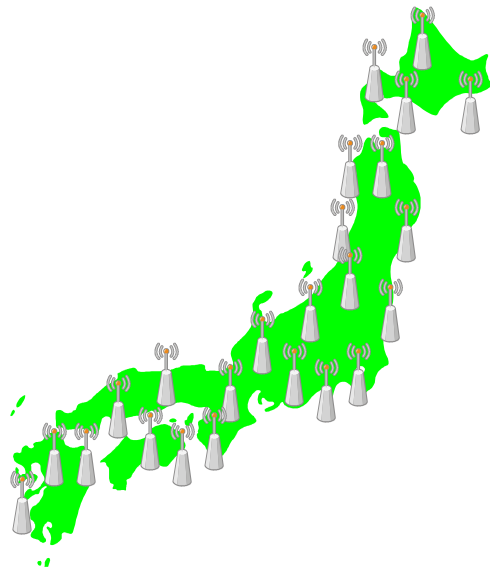
MORIKAWA
LABORATORY

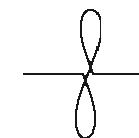
研究ネタ

大規模化

■ スペクトラムセンサネットワーク

- コグニティブ無線の研究
- 多数のスペクトラムセンサノードを配置して電波の見える化を実現
- 街の込み具合、天候なども分かるかも





MORIKAWA
LABORATORY

まとめ

■ GNU Radioのすごいところ

- 高級言語で物理層が書ける
- Cross Layerのアプローチに有効

■ 研究パートナー募集中

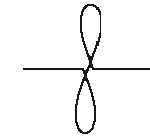
- <http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/~saru/usrp/>
- saru@mlab.t.u-tokyo.ac.jp
- USRP2の貸出もします

参考文献 - 1



- [Mit99a] J. Mitola, Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999.
- [Mit99b] J. Mitola, and G. Maguire, Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal, IEEE Personal Communications, 1999.
- [Hay05] S. Haykin, Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005.
- [Pel08] V. Pellegrini, et al., Soft-DVB: A Fully-Software GNURadio-based ETSI DVB-T Modulator, WSR 2008.
- [Sch07] T. Schmid, et al., An Experimental Study of Network Performance Impact of Increased Latency in Software Defined Radios, IEEE WINTech 2007.
- [Mat05] E. Matlis, and T. Corke, A.C. Plasma Anemometer for Hypersonic Mach Number Experiments, AIAA 2005.
- [Mil7] R. Miller, et al., Service Discovery and Device Identification in Cognitive Radio Networks, IEEE SECON 2007.
- [Osh06] T. O'Shea, et al., Practical Signal Detection and Classification in GNU Radio, SDR 2006.

参考文献 - 2



MORIKAWA
LABORATORY

- [Ron06] T. Rondeau, et al., Optimization, Learning, and Decision Making in a Cognitive Engine, SDR 2006.
- [Sok08] C. Sokolowski, et al., Cognitive Radio Testbed: Exploiting Limited Feedback in Tomorrow's Wireless Communication Networks, ICC 2008.
- [Hor07] B. Horine, and D. Turgut, Link Rendezvous Protocol for Cognitive Radio Networks, ACM DySPAN 2007.
- [Nol07] K. Nolan, et al., Dynamic Spectrum Access and Coexistence Experiences Involving Two Independently Developed Cognitive Radio Testbeds, ACM DySPAN 2007.
- [Yan08] Z. Yan, et al., Spectrum Sensing, Access and Coexistence Testbed for Cognitive Radio Using USRP, IEEE ICCSC 2008.
- [Ran07] C. Raman, et al., Distributed Spatio-Temporal Spectrum Sensing: An Experimental Study, ACSSC 2007.
- [Sca06] D. Scaperoth, et al., Cognitive Radio Platform Development for Interoperability, MILCON 2006.
- [Kat07] S. Katti, et al., Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding, SIGCOMM 2007

参考文献 - 3



- [Hal08] D. Halperin, et al., Taking the Sting out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs, MobiCom 2008.
- [Gol08] S. Gollakota, and D. Katabi, ZigZag Decoding: Combating hidden Terminals in Wireless Networks, SIGCOMM 2008.
- [Jam07] K. Jamieson, and H. Barakrishnan, PPR: Partial Packet Recovery for Wireless Networks, SIGCOMM 2007.
- [Woo07] G. Woo, et al., Beyond the Bits: Cooperative Packet Recovery Using Physical Layer Information, MobiCom 2007.
- [Kat08] S. Katti, et al., Symbol-level Network Coding for Wireless Mesh Networks, SIGCOMM 2008.
- [Tro06] G. Troxel, et al., Adaptive Dynamic Radio Open-source Intelligent Team (ADROIT): Cognitively-controlled Collaboration among SDR Nodes, SDR 2006.
- [Man07] K. Mandke, et al., Early Results on Hydra: A Flexible MAC/PHY Multihop Testbed, IEEE VTC 2007.
- [McC08] N. McCarthy, et al., High-Performance SDR: GNU Radio and the IBM Cell Broadband Engine, Technical Report, 2008.

国際会議



- ACM SIGCOMM
- ACM MobiCom
- ACM WINTech
- IEEE DySPAN
- IEEE VTC
- IEEE SECON
- SDR Forum