## マルチリンク8×8MIMOチャネル測定系の構築と評価実験

池上 十五<sup>†</sup> トンサヴァンクーラプ<sup>†</sup> 佐藤 正宗<sup>†</sup> 金ミンソク<sup>†</sup>

+ 新潟大学大学院自然科学研究科 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地 E-mail: †f22c046h@mail.cc.niigata-u.ac.jp, ††mskim@eng.niigata-u.ac.jp

**あらまし** 生活環境課や災害現場において有用な利用者が端末の携帯を必要としないパッシブ型測位法(デバイスフ リー測位:DFL)のひとつに,RFセンサネットワーク内の多数の無線リンクを用いて,測位対象領域における人の居 場所をマッピングする RTI(Radio Tomographic Imaging)法がある.先行研究において,我々はセンサーノード間の マルチパス成分を個別に分離して扱うことで従来法に比ベセンサーノードの数を大幅に低減し高精度な測位を行う多 重波 RTI(Multipath-RTI)法を提案した.また,マルチリンク MIMO センサを用いてビームフォーミングにより伝搬 路の分離・抽出を行う手法を検討し,シミュレーションによりその有効性を確認した.本稿では,この多重波 RTI 法 の実現に向けて,先行研究により開発したソフトウェア無線機を利用したアンテナスイッチング方式 Sub-6 GHz 帯伝 搬路測定装置を複数用いて,これらの装置を連携することで短時間に複数のアンカーノード間リンクの伝搬路測定を 行うことのできるシステムを開発し,評価実験により性能を確認した.

キーワード 伝搬路測定,ソフトウェア無線,USRP,UHD,MIMO,マイクロ波帯

# Multi-Link 8 × 8 MIMO Channel Measurement System Construction and Evaluation Experiment

Togo IKEGAMI<sup>†</sup>, Koularp THONGSAVANH<sup>†</sup>, Masamune SATO<sup>†</sup>, and Minseok KIM<sup>†</sup>

† Graduate School of Science and Technology, Niigata University 8050 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, Niigata Prefecture, 950–2181 Japan

E-mail: †f22c046h@mail.cc.niigata-u.ac.jp, ††mskim@eng.niigata-u.ac.jp

**Abstract** A passive localization method (Device-Free Localization: DFL) is useful in disaster scenarios as well as daily life applications because it does not require users to carry a terminal. RTI (Radio Tomographic Imaging), which is one of the passive localization methods, maps the location of a moving target in a target area using many wireless links in an RF sensor network. In our previous study, we proposed the Multipath-RTI method, which reduces the number of sensor nodes significantly and achieves highly accurate localization by separating the multipath components among sensor nodes. We also developed a method of separating and extracting propagation paths by beamforming using distributed MIMO sensors and confirmed its effectiveness through simulations. In this paper, we propose a new method to measure the propagation paths of multiple MIMO links between anchor nodes in a short time by using four switched-antenna MIMO channel sounders configured based on a software radio developed in our previous study. The performance of the system was confirmed through evaluation experiments. **Key words** radio channel measurement, software defined radio, USRP, UHD, MIMO, microwave band

## 1. まえがき

近年注目を集めているスマートホームやスマートビルディン グにおいて,対象となる施設内における利用者の居場所同定法 (屋内測位法)は重要な技術となっている.また,災害現場や分 厚いコンクリートで囲まれた原子炉建屋内での作業など,GPS 等の電波が届かない劣悪な無線環境下における作業者や作業ロ ボットの位置推定技術も同様に重要である.特に,災害現場や 生活環境下においては、利用者が端末の携帯を必要とするアク ティブ型測位法より、端末を携帯する必要のないパッシブ型測 位法(デバイスフリー測位:DFL)がより望ましい.これらの 背景から、RF センサネットワーク内の多数の無線リンクを用 いて、測位対象領域における人の居場所をマッピングする RTI (Radio Tomographic Imaging)法は DFL の有力な手法の一つで ある.

RTI 法は、測位対象領域を一様に分割したボクセルを定義し、



図 1: USRP X310 + UBX 160 のブロック図

表 1: USRP X310+UBX 160 の仕様

FPGA	Xilinx Kintex-7 XC7K410T
対応周波数帯	10 MHz~6 GHz
最大パスバンド帯域幅	160 MHz
DA コンバータの性能	16 bit, 800 MS/s
AD コンバータの性能	14 bit, 200 MS/s

各ボクセル値を測定された無線リンクの RSS(Received Signal Strength)から不良設定逆問題を解くことで推定する. Wilson らは,各伝搬経路で測定された RSS は,見通し線(LoS)経路 に沿ったボクセル値の加重和で合成されると仮定した単純な重 みづけモデルを開発した[1]. 我々は,新しい RTI 手法として 多重波 RTI(Multipath-RTI)法を提案している[2]. また,実用 化に向けた新たなアプローチとして,アンカーノードに複数の アンテナ素子を持つアレイアンテナを用いることで,送受信ア ンカーノード間で MIMO システムを構築し,ビームフォーミン グにより多重波の経路を個別に扱う手法を提案し,シミュレーションによってその有効性を確認した[3].

本稿では、マルチリンク MIMO センサを用いた多重波 RTI 法 の実現に向けて、先行研究により開発したソフトウェア無線機 を利用した Sub-6 GHz 帯伝搬路測定装置 [4] を複数用いて、こ れらの装置を連携することで短時間に複数のアンカーノード間 リンクの伝搬路測定を行うことのできるシステムを開発し、評 価実験を行った結果を報告する.

## 2. ソフトウェア無線機

#### 2.1 ソフトウェア無線機の概要

ソフトウェア無線機(SDR:Software Defined Radio)は、回路 にハードウェア的な変更を加えることなく、ソフトウェアを使 用して無線通信システムの機能を実装することで、さまざま な方式の無線通信を実現出来る柔軟性の高い通信技術である. 中でも、USRP(Universal Software Radio Peripheral)(米 Ettus Research 社)は、回路図や FPGA プログラムが公開されており、 オープンソースのソフトウェアプラットフォームである GNU Radio を用いて、様々な無線通信方式を実現できることから、 広く用いられている [5]. USRP の開発には、GNU Radio のほ か LabVIEW や MATLAB/Simulink などのソフトウェアが用い られている. さらに、UHD(USRP Hardware Driver)と呼ばれ るドライバと API(Application Programming Interface)が提供 されており、これを用いることで、C/C++ や Python などのプロ グラミング言語を用いてより柔軟な制御を行うことができる.

本研究では,送受信機として USRP X310 (Ettus Research 社) を用いる. USRP X310 は,マザーボードと 2 つのドーターボー ドから構成されており,ドーターボードを変更することによっ て,DC~6 GHz までの周波数,最大 160 MHz のパスバンド帯 域幅を持つ送受信機として使用できる.本研究では,10 MHz~ 6 GHz の周波数帯と 160 MHz のパスバンド帯域幅を持つ UBX 160 ドーターボードを用いている.本構成における USRP の主 なスペックを表1に示す.また,USRP X310 内部の回路構成を 図1に示す.USRP とホスト PC との接続インターフェースに は10 ギガビット・イーサネットを用いており,最大 200 MS/s (最大パスバンド帯域幅: 200 MHz)のデータ転送が可能であ る.このため,本構成では USRP の最大帯域幅はドーターボー ドの low pass filter(LPF) によって決定される.

USRP 内部出の信号処理は次のような手順で行われる.まず, 送信側はホスト PC から転送された複素ベースバンド信号がデ ジタルアップコンバータ (DUC) で補間処理され,DC 付近の 中間周波数 (IF:Intermediate Frequency)の複素信号に変換され る.その後高速 DA コンバータにより IF デジタル信号はアナロ グ信号に変換され,ドーターボードの RF アップコンバータ回 路に入力される.受信側では,受信された信号がドーターボー ドの RF ダウンコンバータ回路で DC 付近の IF 複素信号にダ ウンコンバートされたのち,高速 AD コンバータによりサンプ リングされる.その後 FPGA 内のデジタルダウンコンバータ (DDC) により複素ベースバンド信号に変換され,ホスト PC に 転送される.

## 3. マルチリンク MIMO 測定系の構築

#### 3.1 測定系の概要

各送受信アンテナと制御系の組み合わせをノード,各ノード 間の伝搬路をリンクと呼ぶ.ノード数をNとすれば,NC2通 りのリンクが存在する.本研究では、4ノード6リンクの測定 系を構築した.

測定系の概要図を図2に示す.各ノードにUSRPを1台ずつ 用い,各USRPを制御するSlave PCと,Slave PCに対して送 受信命令を行うMaster PCがある.Master PCからSlave PCへ の送受信命令は,TCP通信により行い,各Slave PCで受信さ れたデータはUDP通信によりMaster PCに転送される.また, 測定系の仕様を表2に示す.なお,USRPは,DDCのロールオ フ特性により伝達関数の両端が歪む問題がある[6].このため, 得られた伝達関数の256点のうち,両端の64点を除く128点 を用いる.これにより,サンプリング周波数200MHz,信号帯 域幅は100MHzとなる.

## 3.2 送受信タイミング同期

複数の無線機を使用して電波伝搬路測定を行うためには,送 信側と受信側で周波数同期及びタイミング同期を行う必要があ る. USRP には,複数機器の同期インターフェースとして REF 端子と PPS (Pulse Per Second)端子が備えられている.本研究 では,ルビジウム発振器を用いて各ノード USRP の REF 端子

表 2: 測定系の仕様		
搬送波周波数	4.850 01 GHz	
サンプリング周波数	200 MHz	
信号带域幅	100 MHz	
送信信号	ニューマン位相マルチトーン信号[7]	
副搬送波数	256	
副搬送波間隔	781.25 kHz	
シンボル長	1.28 µs	
遅延時間分解能	10 ns	
FFT 点数	256	
送信電力	15 dBm(typ.)	
測定時間	164 µs(8 × 8 MIMO の場合)	









と PPS 端子に同期信号を供給することで、送信側と受信側の周 波数同期及びタイミング同期を行う. UHD API には, PPS に 合わせて USRP のデバイス時間を設定する関数が提供されてい る [5]. この関数を用いてデバイスとホスト PC との通信確立時 にデバイス時間を0に設定することで、USRPのデバイス時間 が PPS 信号と同期した状態となる. これにより, 送受信機間で 内部時間の秒以下(毎 PPS からの経過時間)が同期する.図3 に同期された送受信タイミングのイメージを示す.この図では、 送信機は 0.1 秒 ごとに送信を行っている. 受信機は, 送信周期 に合わせて任意のタイミングで受信を行う. 送受信タイミング



図 4: アンテナスイッチング処理のシーケンス図(2×3MIMO の場合)

表 3: RF スイッチの
---------------

動作周波数帯	0.5 GHz~12.4 GHz	
挿入損失	3.0 dB Max	
	0.5~6 GHz: 60 dB Min	
7170-999	6 GHz~12.4 GHz: 50 dB Min	
VSWR(オン状態)	1.8:1 Max	
立上り/立下り時間	40 ns Max	
(10% to 90 $%$ RF, 90 $%$ to 10 $% RF)$		
On/Off 時間	90 ns Max	
(50 % TTL to 90 % RF, 50 % TTL to 10 % RF)		

指定は、UHD API に提供されている関数を用いて、送受信を開 始するデバイス時間を設定することで実現できる.

#### 3.3 アンテナスイッチング

アンテナスイッチング方式 MIMO を実現するために, RF ス イッチを用いてドーターボードのアンテナ端子と接続するア ンテナを切り替える. RF スイッチには、SR-J030-8S(Universal Microwave Components Corp.)を用いる. 表3にRFスイッチの 仕様を示す.

USRP X310 では、ドーターボードから独立してマザーボー ド自体に 15 ピン汎用 GPIO (General Purpose Input/Output) 端 子が備えられており、FPGA によって直接制御される.また、 UHD API にはこれらの GPIO ピンを制御するための関数が提 供されている.本研究では、この GPIO を用いて RF スイッチ を制御する.図4にアンテナスイッチングの制御シーケンス図 を示す.送信側は、受信アンテナ素子数の2倍分の送信信号を 送信した後に、送信アンテナを切り替え、受信側は送信信号長 の2倍分の時間でアンテナ切り替えを行う.これによって、ス イッチングによる遅延を考慮したアンテナスイッチングが実現 できる.

#### 3.4 Back-to-Back 校正

正確な伝搬路測定を行うためには、ローパスフィルタやアン プ・減衰器の周波数特性などといったハードウェア特性を除去 する必要がある. これらの特性は、Back-to-Back 校正を行うこ とで除去することができる. Back-to-Back 校正は、送信機と受 信機を図5に示すキャリブレーションキットを介して接続す ることで行う.キャリブレーションキットは、制御によって内 部で各送信ポートと受信ポートの接続を切り替えることがで きるため、手動で繋ぎ変えることなく、8×8全てのチャネル



数字はリンク番号を表す.

で Back-to-Back 測定を行うことができる. 送信信号 *X*(*f*) での Back-to-Back 測定によって得られる周波数領域での受信信号は 次式で表される.

$$Y_{\text{B2B}}(f) = H_{\text{RX}}(f)H_{\text{C}}(f)H_{\text{TX}}(f)X(f)$$
(1)

ここで、 $Y_{B2B}(f)$  は Back-to-Back 測定によって得られる受信信 号、 $H_{RX}(f)$  は受信機の周波数特性、 $H_C(f)$  はキャリブレーショ ンキットの伝達特性、 $H_{TX}(f)$  は送信機の周波数特性である. 一方、実際の伝搬路測定での受信信号は次式で表される.

$$Y(f) = H_{\text{Rx}}(f)H(f)H_{\text{TX}}(f)X(f)$$
(2)

ここで, *H*(*f*) は伝搬路の周波数特性, *Y*(*f*) は実際の伝搬路測 定での受信信号である.

(1) 式と (2) 式を比較して X(f), H<sub>TX</sub>(f), H<sub>RX</sub>(f) を消去す
 ることで、ハードウェア特性を除去した伝搬路の周波数特性
 H(f) が得られる.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{Y_{\text{B2B}}(f)} H_{\text{C}}(f)$$
(3)

H(f)を逆フーリエ変換することで、ハードウェア特性を除去 した伝搬路のインパルス応答  $h(\tau)$  が得られる.

なお、マルチリンク測定においては、測定を行う全リンクに ついて Back-to-Back 校正を行う必要がある.

#### 3.5 マルチリンク測定

前述の方法により,送受信ペアごとに伝搬路のインパルス応 答を測定することができる.これを拡張し,各ノードの送受信



図 7: 各フェーズの通信シーケンス図

を適宜切り替えることで、マルチリンク測定を行う.図6に、 各リンク測定における送受信の組み合わせを示す.この実装で は、3回のフェーズに分けて全リンクの測定を行う.第1フェー ズでは、ノード1を送信ノードとして、リンク1~3の測定を、 第2フェーズでは、ノード2を送信ノードとして、リンク4~5 の測定を行う.最後に、第3フェーズでは、ノード3を送信 ノードとして、リンク6の測定を行う.

各フェーズでは図7に示すように Master PC と Slave PC 間で 通信を行う.受信開始時に送信が開始されていることを担保す るために,受信 Slave PC への受信開始命令は,送信 Slave PC か らの送信開始通知を受け取った後に行う.送信開始命令を受け 取った送信ノードは,0.1秒間隔で繰り返し送信を行う.対し て,受信開始命令を受け取った受信ノードは,送信タイミング に合わせて必要サンプルの受信を行う.受信ノードが複数存在 する場合は,各受信側 Slave PC に対してブロードキャストを行 い,同時に受信を開始する.受信したデータは,各 Slave PC で UDP 通信により Master PC に転送される. Master PC 側で,受 信したデータの確認を行い,次のフェーズの送信を開始する. また,高速化のために,各 Slave PC で受信したデータをファイ ルに保存し,Master PC へのデータ転送を行わずに次のフェー ズへ移行することも可能である.

## 4. 測定系の評価

構築した測定系の評価のために、伝搬実験を行った.図8に 構築した測定系の写真を示す.この系を用いて4ノード6リン クの8×8MIMOチャネル測定を行い、ビームフォーミングに より放射角・到来各推定を行った.各ノードには等間隔リニア アレーアンテナを用いており、素子間隔は半波長である.各ア ンテナは、図9(b)で示す障害物のない部屋内において、丸印



図 8: 構築した測定系





の位置に設置した. このとき, 各アンテナの高さは, すべて床 から 1.4m とし, ブロードサイド方向が壁と反対側になるよう に壁に対して平行に設置した.

図 10 にリンク4の一部のチャネルの伝達関数とインパルス応 答を示す.リンク4の直線距離は5.15mであるため,遅延時間 の理論値は17.2nsである.また,自由空間伝搬損失は60.4dB で,送受信アンテナ利得は4dBiであるため,伝搬損失の理論 値は52.4dBである.図10(b)を見ると,遅延時間20nsに各 チャネルのピークが現れており,受信電力は-50~-60dB程 度と確認できる.構築した系の遅延時間分解能が10nsである ことから,理論値と照らしても妥当な結果が得られていること がわかる.

つづいて,測定した各リンクのチャネルインパルス応答から 双方向角度遅延時間電力スペクトル(DDADPS)を構築した.

 $DDADPS(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \mathbf{A}_{R}^{H}(\phi_{Rx})\mathbf{h}(\tau)\mathbf{A}_{T}^{*}(\phi_{Tx})$ (4)

ここで、 $\mathbf{h}(\tau)$ は測定した MIMO チャネル行列、 $\mathbf{A}_{\mathrm{T}}(\phi_{\mathrm{Tx}})$ 、  $\mathbf{A}_{\mathrm{R}}(\phi_{\mathrm{Rx}})$ 



はそれぞれ送受信アンテナのアレーマニフォールドである. さらに、導出した DDADPS から 100 ns まで遅延時間軸について 足し合わせた双方向角度電力スペクトル (DDAPS)を構築した. 図 11 に測定より求めた DDAPS を示す. また、図 12 に実 験環境をモデル化しレイトレーシングシミュレーションにより 伝搬路を計算した結果から導出した DDAPS を示す. 図 11 と 図 12 を比較すると、それぞれ LoS 方向のピークが顕著にみら れ、近い結果が得られており、測定が正しく行われていること が確認できる.

## 5. ま と め

本稿では、パッシブ測位システムへの応用を目的とした、マ ルチリンク8×8MIMO チャネル測定系を構築し、その詳細を 述べた.また、構築した測定系を用いて、4 ノード6リンクの 8×8MIMO チャネル測定を行い、その結果を示した.今後は、 構築した測定系を用いて、多重波 RTI 法の実験的検討を行う予 定である.また、制御系の処理の簡略化・最適化を行うことで、 より高速な測定を実現することを目指す.





## 謝 辞

本研究は, JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成 事業 JPJA22P22683407 の助成を受けたものです.

## 献

文

- J. Wilson, and N. Patwari, "Radio Tomographic Imaging with Wireless Networks," IEEE Trans. Mobile Computing, Vol.9, No.5, pp.621– 632, May 2010. DOI:10.1109/TMC.2009.174
- [2] M. Kim, T. Tasaki, and S. Yamakawa, "Millimeter-Wave Radio Tomographic Imaging Technique using Multipath Components for Indoor Localization," Proc. 2019 Intl. Symp. Antennas Propag. (ISAP 2019), Oct. 2019.
- [3] 池上十五, 金ミンソク, "分散 MIMO センサを用いたパッシブ測位 システム構築の机上検討," 信学技報, vol. 122, no. 214, AP2022-127,

pp. 137-142, Oct. 2022.

- [4] 池上十五, 金ミンソク, "ソフトウェア無線機を用いたアンテナス イッチング方式 MIMO チャネルサウンダの開発," 信学技報, vol. 123, no. 103, AP2023-30, pp. 1–6, Jul. 2023.
- [5] "USRP x310 high performance software defined radio," Ettus Research, https://www.ettus.com/all-products/x310-kit/, 参照 Jun. 2023.
- [6] 金ミンソク and アズリル・ハニズ, "オープンソースソフトウェア 無線プラットホーム GNU Radio," 電子情報通信学会誌, vol. 96, no. 1, pp. 52–57, Jan. 2013.
- [7] M. Kim, J. Takada and Y. Konishi, "Novel Scalable MIMO Channel Sounding Technique and Measurement Accuracy Evaluation With Transceiver Impairments," *IEEE Transactions on Instrumentation* and Measurement, vol. 61, no. 12, pp. 3185–3197, Dec. 2012, DOI: 10.1109/TIM.2012.2205510.