[依頼講演]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

池上 十五† 金ミンソク†

†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 電波伝搬路測定は無線通信システムを適切に設計するために必要不可欠である. 伝搬路測定にはチャネ ルサウンダやベクトルネットワークアナライザが用いられるが, これらの機器は一般に高価であることや校正が複 雑,用途が限定的であるという問題がある. 本研究では, 低コストかつ柔軟性の高い伝搬路測定装置を開発するた めに, ソフトウェア無線機 (USRP) に着目した. さらに, 伝搬路の空間特性を捉えるために, RF スイッチを用いて アンテナを切り替えるアンテナスイッチング方式を用いた MIMO 構成を採用した. 本稿では, 開発したチャネルサ ウンダの概要と, その性能評価結果を報告する. 今後, マルチリンク MIMO チャネル特性が取得できるようにシス テムを拡張し, 高精度屋内測位法の開発を行う予定である.

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

[Invited Lecture] Development of an Antenna Switching MIMO Channel Sounder with Software Defined Radio

Togo IKEGAMI^{\dagger} and Minseok KIM^{\dagger}

† 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 Propagation channel measurement is essential for the proper design of wireless communication systems. Channel sounders and vector network analyzers are used for radio channel measurement, but those are usually expensive, complicated to calibrate, and have limited measurement scenarios. This study focused on the software-defined radio system (USRP) to develop a low-cost and flexible channel sounder. Furthermore, to capture the spatial channel characteristics, we employed a MIMO (multiple-input-multiple-output) scheme where antenna elements are switched using RF switches. This paper presents an overview of the developed antenna-switching 8x8 MIMO channel sounder and its performance evaluation results. We plan to extend the system to acquire multi-link MIMO channel characteristics to achieve highly accurate indoor positioning.

Key words radio channel measurement, software defined radio, USRP, UHD, MIMO, microwave band

1. まえがき

伝搬路の特性は無線通信システムの設計・評価において,必 要不可欠な情報である. 伝搬路特性を解明するために用いら れている装置として,チャネルサウンダや VNA(Vector Network Analizer) がある. しかしながらチャネルサウンダは,一般に 大型の機器であり校正が頻雑である. 対して VNA は,チャネ ルサウンダに比べて安価であるものの,周波数掃引に時間を 要すること,送受信回路が一体化されていることから動的変 動の測定や移動測定が困難であるなどの問題がある. 既存装 置におけるこのような課題を考慮すると,低コストかつ柔軟 性の高い伝搬路測定装置が求められている.

また,伝搬路の空間特性を捉えるためには,アンテナ回転, 仮想アレー,フルアレーの3方式が主に用いられる[1][2].ア ンテナ回転方式は,測定ごとに指向性アンテナを回転して測 定する方法で,測定時間が長い欠点を持つが,角度領域の信号 処理(ビームフォーミング)が不要である.仮想アレー方式は アンテナをポジショナーに設置し,測定ごとにアンテナの位 置を変更して測定する方法で,アンテナ回転方式と同様に測 定時間が長いが,アンテナの開口を大きくすることができる

Copyright ©2023 by IEICE

ため分解能の向上が容易である.分解能の向上が容易である. フルアレー方式はフル MIMO (Multiple Input Multiple Output) とアンテナスイッチングの2つの手法に分けられる.前者は 送受信アンテナを複数配置し、それぞれのアンテナと送受信 回路を接続することで、複数の送受信経路を同時に測定する. 後者は、単一の送受信回路を複数のアンテナに切り替えて使 用することで、複数の送受信経路を順次測定する.送信信号 はアンテナ間で区別するために、時間分割(TDM)、周波数分 割(FDM),符号分割多重化(CDM)手法が用いられる.フル MIMO 方式は測定時間が短い一方,アンテナ数分の送受信回 路が必要であるため開発コストが高く,また,回路構成の複雑 さが問題になる.アンテナスイッチング方式は、切り替えに 時間を要し、複数経路の同時測定ができないため、高速移動測 定には不向きだが、低速または静的な環境における測定には 有効である. さらに、それぞれ1系統の送受信回路で測定で きるため校正が簡易で低コストである.

以上のことから、本研究では、比較的安価に入手できるソ フトウェア無線機に着目し、アンテナスイッチング方式を採 用することで低コストかつ柔軟性の高い Sub-6GHz 帯 MIMO チャネルサウンダを開発する.本稿では、最初に使用するソ フトウェア無線機の概要と、アンテナスイッチング方式によ る MIMO チャネルサウンダの構成について記述する.また、 USRP の電力増幅器の線形性を確認し、電波伝搬路測定装置と しての性能を評価する.次に、電波伝搬路測定に必要な信号処 理,送受信機のタイミング同期、スイッチング制御および送受 信機特性の除去 (Back-toBack 校正)について述べる.また、動 作検証のために DUT 測定とスイッチングによる位相変動特性 の測定、および電波伝搬路測定を行い、その結果を評価する.

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 [4]. 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



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

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.

2.2 無線回路の評価

USRP に搭載されている電力増幅器の線形性を調べ,線形 領域で動作する条件を確認する.USRP の電力増幅性は,搬 送波周波数 2 GHz のマルチトーン信号を送信し,アンテナ端 子における電力をスペクトラムアナライザで計測することに よって評価した.USRP X310 においては,送信利得を 0 dB~ 31.5 dB (0.5 dB 刻み)の範囲で選択可能である.本研究では, 利得は 15 dB, 20 dB, 25 dB, 30 dB,振幅は 0.1, 0.5, 0.7, 1.0 のそれぞれ 4 つの条件で測定を行った.電力増幅器の利得を 変化させ測定した結果を図 2 (a) に,振幅を変化させ測定し



実 つ.	測空玄の	小样
1X 2.	側足示り	1L.1%

搬送波周波数	6 GHz(最大)
サンプリング周波数	200 MHz
信号带域幅	100 MHz
送信信号	NPM 信号
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)

た結果を図2(b)に示す.ここで,Levelはベースバンド信号 における振幅を示している.図より,伝送電力が20dBm以下 の範囲ではゲイン及び振幅の増加に伴いそれぞれ線形に増加 していることがわかる.一方で,伝送電力が20dBm程度を迎 えると,それ以上増加しなくなっており,USRPの最大伝送電 力が20dBm程度であることがわかる.

3. MIMO チャネルサウンダの開発

3.1 測定系の概要

USRP を用いたスイッチング方式 MIMO チャネルサウンダ の先行研究として, Wang らは車車間伝搬路の測定を目的とし たシステムを開発している[3]. この研究では, 測定の安定性 と測定時間の短縮に重点を置いて, 搬送波周波数 5.9 GHz, 帯 域幅は 15 MHz としている.本研究では,後述の屋内測位シス テムの応用のために,マルチリンク測定への拡張を想定して, 100 MHz 帯域幅を持つ Sub-6 GHz 帯 MIMO チャネルサウンダ を開発した.

本研究における測定系の概要図を図3に示す.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[5].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200 MHz,信号帯域 幅は100 MHz 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



(b) アンテナスイッチングの制御(2×3MIMOの場合)図 4: 送受信同期及びスイッチング処理のシーケンス図

表 3: RF スイッチの仕様

動作周波数帯	0.5 GHz~12.4 GHz	
挿入損失	3.0 dB Max	
マイソレーション	0.5~6 GHz: 60 dB Min	
///////////////////////////////////////	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)		

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送信側と受信側の REF 端子 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.図4(a)にタイミン グ同期の概要図を示す.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[4].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,送受信機のデバイス時間が PPS 信 号と同期した状態となる. さらに,UHD API の機能として送 受信の開始を任意の時間に設定することができる. これを用 いて,送信側は1秒ごとに繰り返し信号を送信し,受信側はそ れに合わせて受信を開始することで,送受信タイミングを同 期することができる.

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 (b) 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 信号設計と Back-to-Back 校正

伝搬路測定とは、伝搬路のインパルス応答を測定することで ある. 伝搬路測定に用いられる信号は広い帯域幅を持ち、均 一のパワースペクトル、低 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) になるよう設計する必要がある.本研究では、Newman Phase Multitone (NPM) 信号を用いてこれを実現する. 複素 NPM 信 号は次式で与えられる [1].

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(j2\pi\Delta_f t + j\phi_k\right) \tag{1}$$

ここで、 $\phi_k = \exp\left(\frac{k^2\pi}{N}\right)$ は PAPR 逓減のための Newman 位相で ある.また、N は副搬送波(トーン)の数であり、信号の帯域 幅 2B に対して一様に割り当てられる. Δ_f は副搬送波の間隔 である.

また,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 信信号を受信信号に直接接続することで行う.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.

$$Y_{\text{B2B}}(f) = H_{\text{RX}}(f)G_{\text{ATT}}H_{\text{TX}}(f)X(f)$$
(2)

ここで、 $Y_{B2b}(f)$ は Back-to-Back 測定 (ケーブル直結時) 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、 G_{ATT} は減衰器の伝達特性、 $H_{TX}(f)$ 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.



図 5: Back-to-Back 校正前後の伝達関数及びインパルス応答

$$Y(f) = H_{\text{Rx}}(f)H(f)H_{\text{TX}}(f)X(f)$$
(3)

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.

(2) 式と(3) 式を比較して *X*(*f*), *H*_{TX}(*f*), *H*_{RX}(*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.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{Y_{\text{B2B}}(f)} G_{\text{ATT}}$$
(4)

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*(τ) が得られる.

図5に, Back-to-Back 校正を行ったときの伝搬路の伝達関 数およびインパルス応答を示す.測定は,送信機と受信機を 30 dBの減衰器を介して直接接続した状態で2回行い,1回目 の測定結果を Back-to-Back 測定の結果(Y_{B2B}),2回目の測定 結果を実際の伝搬路測定の結果(Y(f))と想定し,2回目の測 定結果を1回目の測定結果で除算することで,ハードウェア 特性を除去した伝搬路のインパルス応答を求めた.また,搬 送波周波数は2.4 GHz,送信信号は NPM 信号である.これら の図より,Back-to-Back 校正によってハードウェア特性を除去



された結果,伝搬路の伝達関数及びインパルス応答を推定で きるようになったことがわかる.

4. 測定系の評価

4.1 位相安定性の評価

MIMO チャネルサウンダにおいて空間特性を正確に測定す るためには、素子間での受信信号の相関特性(コヒーレンス) が非常に重要である.スイッチング方式 MIMO は同一信号を 繰り返し送信し、送受信アンテナを順次切り替えることで全 てのチャネルを測定する.このため、全てのチャネルを測定 する間の位相ドリフトが大きいと、空間特性の測定が困難に なる.そこで、局部発振器の位相安定性の評価を行った.

評価は,送受信機を減衰器を介して直接接続した状態で,1 信号 256 サンプルの NPM 信号を送信し,受信信号の位相を測 定することで行った.搬送波周波数は 4.8 GHz とした.測定結 果を図 6 に示す.ここで,位相変動は全信号の平均位相との 差分である.測定の結果,最大の位相差は 3°程度,標準偏差 は 0.62°であり,スイッチング方式 MIMO において与える影 響は小さく,空間特性の測定には十分に許容できる結果であ ると考えられる.

4.2 DUT 測定

構築したシステムの伝搬路測定評価として,DUT (Device Under Test)測定を行った.図7にDUT 測定のイメージ図を示す.マルチパス環境を模擬するために,送信機と受信機の間に非整合のT-ジャンクション (Mini-Circuits:ZFRSC-42-S+)を介し,15mのケーブルを接続した.ケーブル端は,開放状態



にして反射波を発生させた状態と,終端抵抗を接続して減衰 が軽減された状態で,それぞれ測定を行い,測定結果を比較す る.仕様により,ケーブルの波長短縮率は77%,搬送波周波 数3GHzにおける挿入損失は1mあたり-0.45 dBである.測 定結果を図8に示す.ここで,測定における搬送波周波数は 3GHzである.図より,終端の有無による差が遅延時間130 ns において顕著に表れており,終端により反射波の減衰が抑えら れていることが確認できる.反射波の理論値は遅延時間129 ns であり,測定結果とよく一致している.

4.3 空間特性測定

開発したチャネルサウンダの空間特性測定の評価を行った. 図9(a)に示すように,送受信アンテナにそれぞれ無指向性 のスリーブアンテナを用いて,8×8の MIMO チャネル測定を 行い,ビームフォーミングにより放射角・到来角推定を実施 した.送信アンテナと受信アンテナは図9(b)に示すように, アンテナ高さに障害物のない環境で放射角・到来角がブロー ドサイド方向から-30°になるように設置した.ここで,搬送 波周波数は2.4 GHz,送受信アンテナの素子間隔は半波長にな るように設定した.

測定した各チャネルの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.

 $DDADPS(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \mathbf{w}_{R}^{H}(\phi_{Rx})\mathbf{h}(\tau)\mathbf{w}_{T}^{*}(\phi_{Tx})$ (5)

ここで, $\mathbf{h}(\tau)$ は測定した MIMO チャネル行列, $\mathbf{w}_{\mathrm{T}}(\phi_{\mathrm{Tx}})$, $\mathbf{w}_{\mathrm{R}}(\phi_{\mathrm{Rx}})$ はそれぞれ送受信ビームフォーミングのステアリングベクト ルである.

$$\mathbf{w}_{\mathrm{T}}(\phi_{\mathrm{Tx}}) = \left[1, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\phi_{\mathrm{Tx}}\right), \cdots, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda}(K-1)\sin\phi_{\mathrm{Tx}}\right)\right]^{T}$$
(6)
$$\mathbf{w}_{\mathrm{R}}(\phi_{\mathrm{Rx}}) = \left[1, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\phi_{\mathrm{Rx}}\right), \cdots, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda}(K-1)\sin\phi_{\mathrm{Rx}}\right)\right]^{T}$$
(7)

また,導出した DDADPS から 200 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9(c)に測定より求めた DDAPS を示す. 図より,送受信



図 9: 空間特性測定



ともに –30° 付近にピークが現れており,送受信ビームフォー ミングにより放射角・到来角推定ができていることが確認で きる.

5. マルチリンク MIMO への拡張

今後の課題として、マルチリンク MIMO への拡張を行う. 筆者らのこれまでの研究において、屋内における人やロボット などの移動物体の移動経路推定を目的として、多重波伝搬を利 用した多重波電波トモグラフィーイメージング法(RTI)法を 開発した[7]. この多重波 RTI 法は屋内の伝搬路ごとの受信電 力変化を利用して、移動物体の移動経路を推定する.実現の ためには、移動物体の移動時間より充分に短い時間で伝搬路 の変化を捉える必要がある.これらの背景から、本研究で開 発した MIMO チャネルサウンダを複数台用いて、送受信機を 適宜切り替えることで、複数リンクの MIMO チャネルを短時 間で測定することを目指す.図 10 にマルチリンク MIMO の概 念図を示す.図では、USRP を 4 台用いて、6 リンクの MIMO チャネルを測定している.

6. まとめ

本稿では、ソフトウェア無線機を用いたスイッチング方式 MIMO チャネルサウンダを開発し、その詳細を述べた.また、 開発した MIMO チャネルサウンダについてその性能評価のた めに,位相安定性の測定,DUT 測定,ビームフォーミングに よる空間特性測定を行った.測定結果より,電波伝搬路測定 装置としての実用性を示した.今後は,マルチリンク MIMO チャネル測定を実現し,リアルタイム測位システムの構築を 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.

文 献

- [1] 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.
- [2] M. Kim, J. Takada, and K. Saito, "Multi-Dimensional Radio Channel Measurement, Analysis and Modeling for High Frequency Bands," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E101.B, no. 2, pp. 293–308, 2018, DOI:10.1587/transcom.2017ISI0003.
- [3] R. Wang, C. U. Bas, O. Renaudin, S. Sangodoyin, U. T. Virk and A. F. Molisch, "A real-time MIMO channel sounder for vehicle-tovehicle propagation channel at 5.9 GHz," 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1–6, Paris, France, 2017, DOI:10.1109/ICC.2017.7996407.
- [4] "USRP x310 high performance software defined radio," Ettus Research, https://www.ettus.com/all-products/x310-kit/, 参照 Jun. 2023.
- [5] 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.
- [6] "Synchronizing USRP Events Using Timed Commands in UHD," Ettus Research, https://kb.ettus.com/Synchronizing_USRP_ Events_Using_Timed_Commands_in_UHD 参照 Jun. 2023.
- [7] 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.