

ソフトウェア無線機を用いた2.4GHz帯の 電波伝搬路測定装置の開発

黒瀬拓人

新潟大学工学部電気電子工学科

T13E176F

B-2

金 ミンソク研究室

研究背景

■ スマートフォンやタブレット端末等の急速な普及・拡大

- Wi-Fiのホットスポット数の増大 [1]
- 6400万箇所 (2015) → 4億3200万箇所 (2020)
 - 無線LAN通信 (IEEE 802.11a,g,...,etc) の混雑

1m当たりの自由空間損失 (L_{os})
2.4 GHz → 40 dB
60 GHz → 68 dB

$$L_{os} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

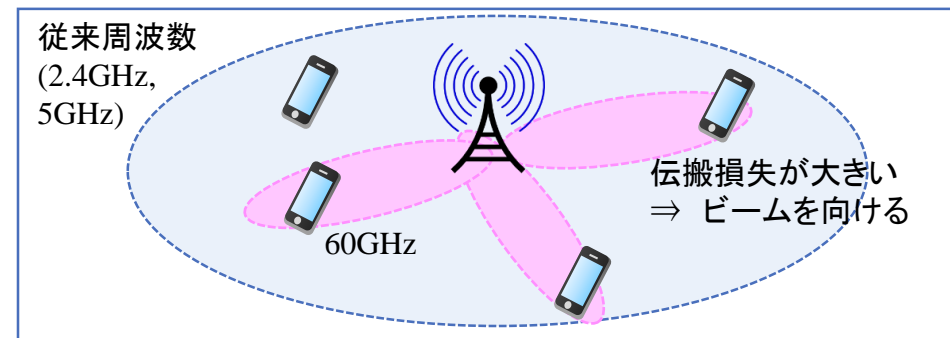
d : 距離
 λ : 波長

■ 超高速無線LANの導入 (IEEE 802.11ay) [2]

- 60GHz, 5GHz, 2.4GHz (マルチバンド)

■ 複数の無線LANシステムを最適に選択切り替え

- 60 GHz : 高速データ通信
- 2.4/5 GHz : 低速データ通信



マルチバンド無線LANの運用概念

[1] Cisco VNI Mobile Forecast (2015 – 2020) – Cisco

[2] IEEE doc802.11-2015/0625r3, IEEE 802.11 Tgay Use Cases, Rob Sun et al, Sep, 2015

問題点と研究目的

■ 問題点

- マイクロ波とミリ波の相関関係を解明する研究が十分に行われていない

研究目的

両周波数帯の電波伝搬特性の比較

■ 研究手法

- 60GHzミリ波帯
 - ミリ波(60GHz帯)伝搬路に関する研究 [1]
- 2.4GHzマイクロ波帯
 - ソフトウェア無線機を用いた電波伝搬路測定装置の開発 [2]
 - 仮想アレーアンテナ信号処理による電波伝搬路測定

本報告



60 GHz帯伝搬路測定装置



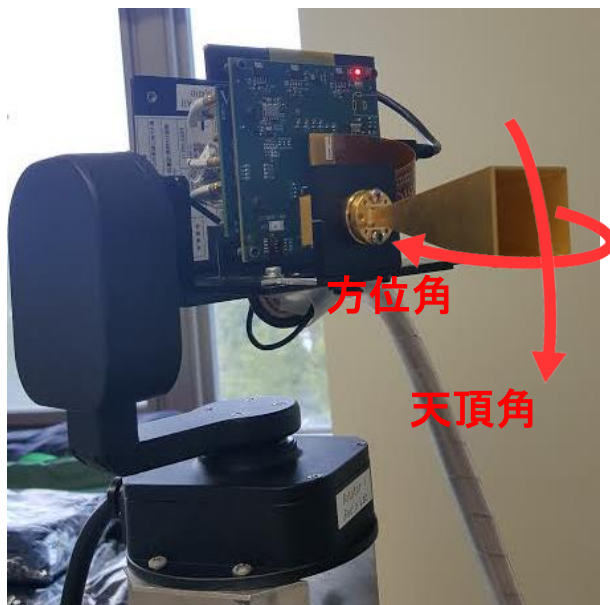
2.4 GHz帯伝搬路測定装置

[1] 岩田ら, "ミリ波屋外アクセス環境における電波伝搬メカニズムに関する考察," July, 2016

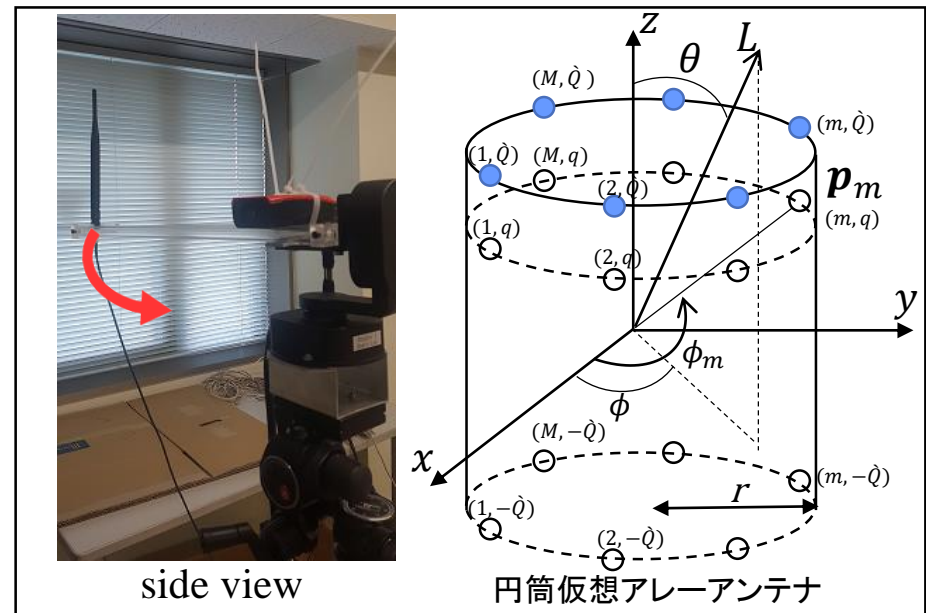
[2] 黒瀬ら, "ソフトウェア無線機を用いた2.4GHz帯の電波伝搬路測定装置の開発," Oct, 2016

60 GHzと2.4 GHzの伝搬路測定方法

- 60 GHz帯
 - 回転台により指向性アンテナの角度を変化させて測定
- 2.4GHz帯
 - 回転台により無指向性アンテナの移動させて円筒仮想アレーアンテナ信号処理による測定



60 GHz帯測定方法



2.4 GHz帯測定方法

仮想アレーアンテナ信号処理

■ アンテナを移動させて測定

- 信号処理によりウェイト w_m を加算し電波の到来方向を推定

$$\mathbf{L}(\theta, \phi) = [\sin \theta \overset{x}{\cos \phi}, \sin \theta \overset{y}{\sin \phi}, \overset{z}{\cos \phi}]^T$$

$$\mathbf{p}_m = [r \cos \phi_m, r \sin \phi_m, d_l]^T$$

$$v_m(\theta, \phi) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{p}_m^T \mathbf{L}(\theta, \phi)\right)$$

$$v_m(\theta, \phi) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \theta \cos(\phi - \phi_m)\right) \exp(j\pi l \cos \theta) = w_m \mathbf{L}(\theta, \phi)$$

出力信号 $y(t)$

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m^* x_m(t)$$

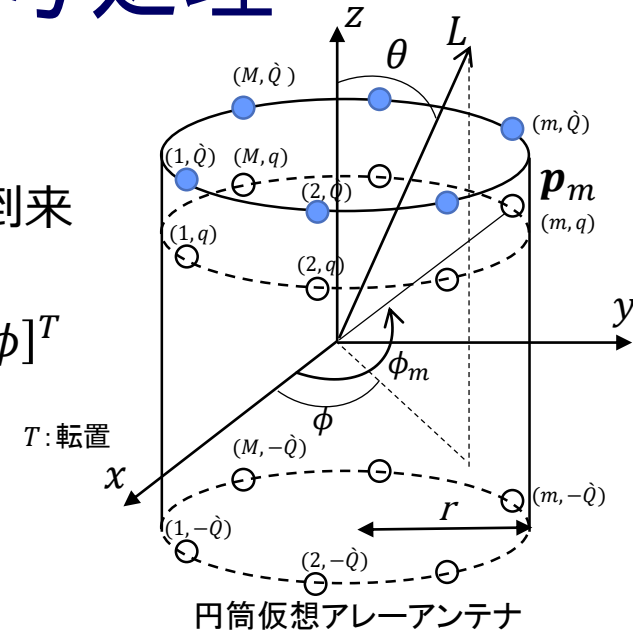
*: 複素共役

出力電力 $P_{out}(\theta, \phi)$

$$P_{out}(\theta, \phi) = E[|y(t)|^2]$$

走査範囲
 $0 \leq \theta \leq 180$
 $-180 \leq \phi \leq 180$

w_m の θ, ϕ を信号処理によって全ての角度方向に走査することによって全方向の電力を測定



$\mathbf{L}(\theta, \phi)$: 単位方向ベクトル
 \mathbf{p}_m : アンテナ素子の位置ベクトル
 v_m : アレー応答ベクトル成分
 M : 円状に並ぶアンテナの総数
 $x_m(t)$: 各アンテナ素子の入力信号
 Q : 高さ方向に並べるアンテナ総数
 r : 円の半径
 θ : 天頂角
 ϕ : 方位角
 $\phi_m = \frac{2\pi}{M}(m-1)$
 $d_l = \frac{\lambda}{2}l$
 $l = \{-Q, \dots, 0, \dots, Q\}$
 $Q = 2\hat{Q} + 1$
 $m = \{1, 2, \dots, M\}$

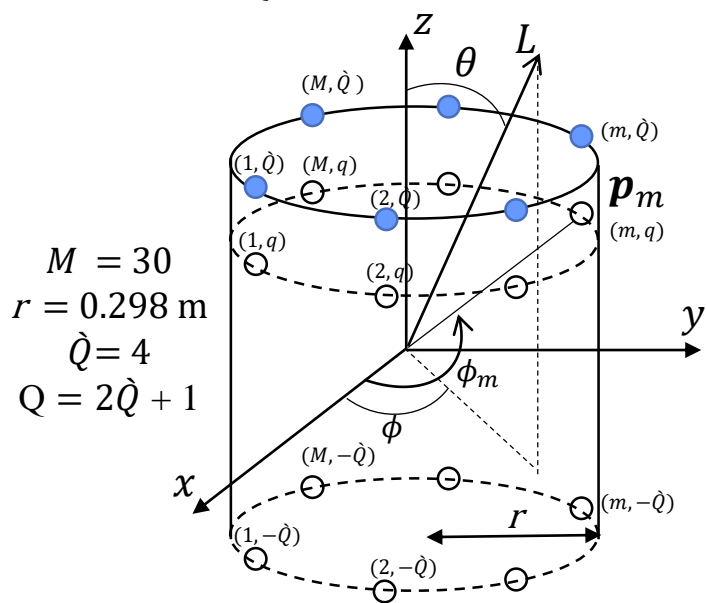
仮想アレーアンテナ設計

■ 制約

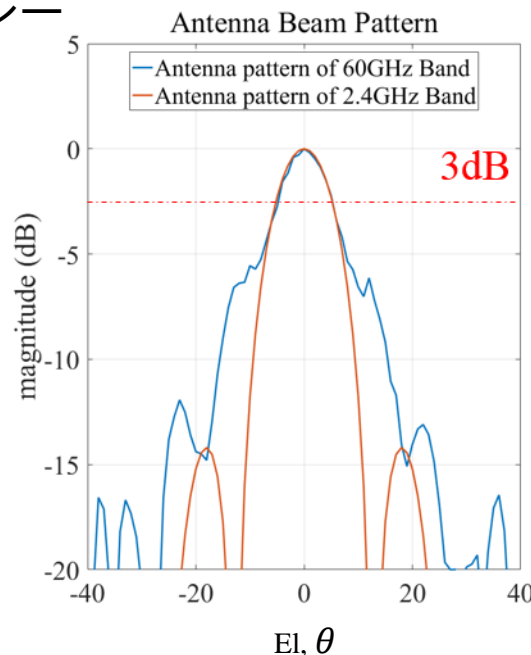
- 60GHz帯の電波伝搬路測定装置と同程度の分解能を持つ
 - 半値幅(3dB低下)12度のホーンアンテナを使用

■ シミュレーションにより確認

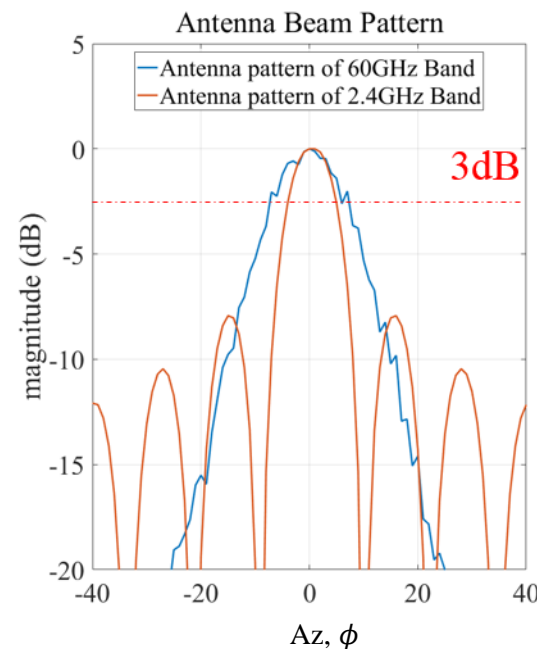
- 円状に $M=30$ 個のアンテナを配置
- $Q=9$ 段構成の円筒アレー



円筒仮想アレーアンテナ



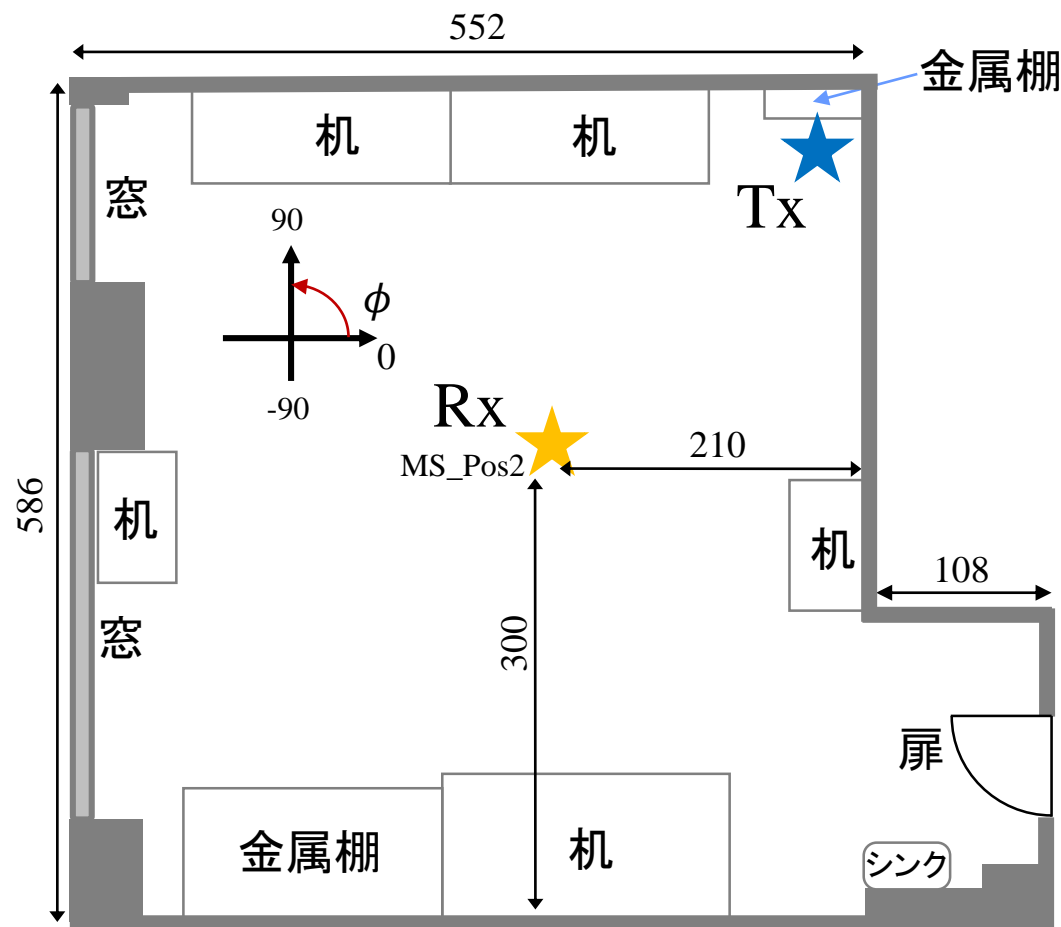
ホーンアンテナとアレーアンテナのビームパターンの比較結果



測定環境と測定諸元

- 測定場所
 - 工学部棟A505室
- アンテナの高さ
 - $h_{Tx} = 2.5\text{m}$
 - $h_{Rx} = 1.35\text{m}$

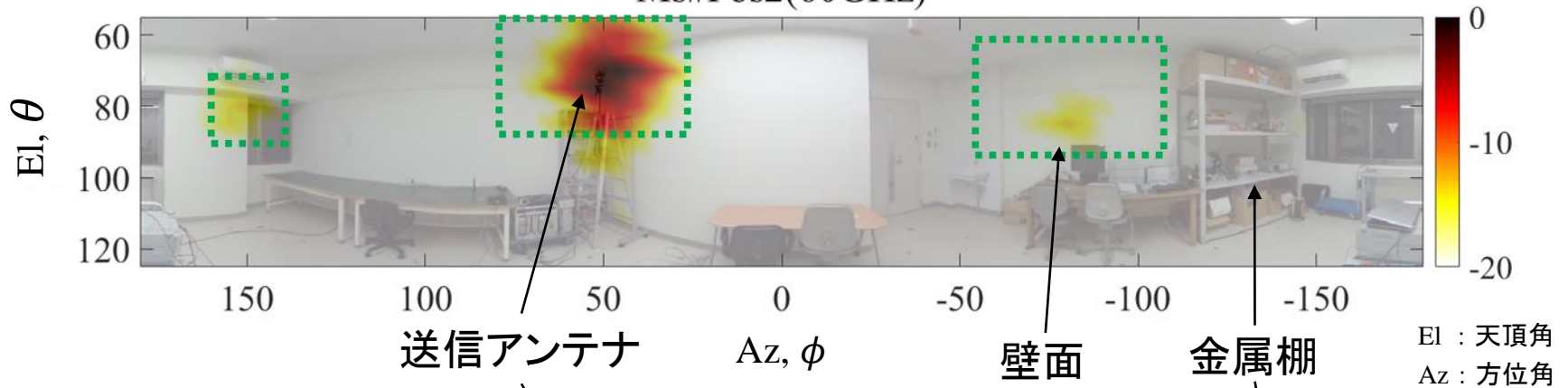
信号諸元	
中心周波数 (GHz)	2.4
帯域幅(MHz)	20
サンプリングレート(kHz)	400
ベースバンド信号	正弦波信号



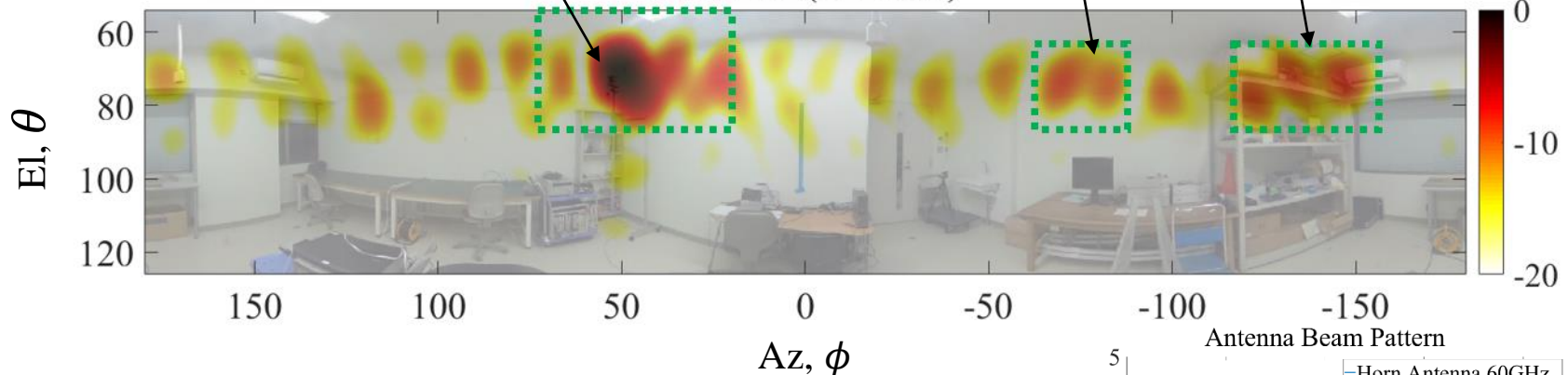
工学部棟A505室

測定結果

Ms#Pos2(60GHz)

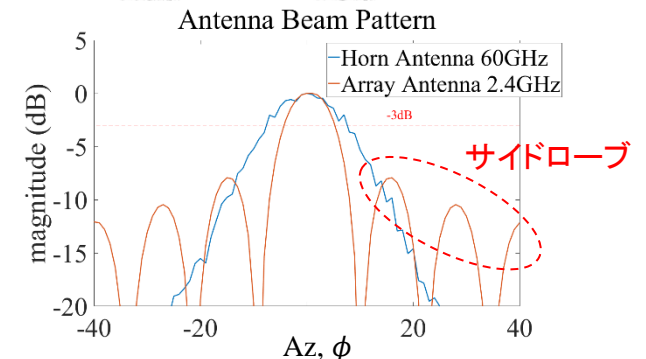


Ms#Pos2(2.4GHz)



- 両周波数帯において壁面による反射を確認
- 2.4GHz帯は金属棚による散乱が大きい
- サイドローブの影響が強い
 - 電波の到来方向を正確に特定することが困難

➡ サイドローブを抑圧する信号処理の実装 [1]



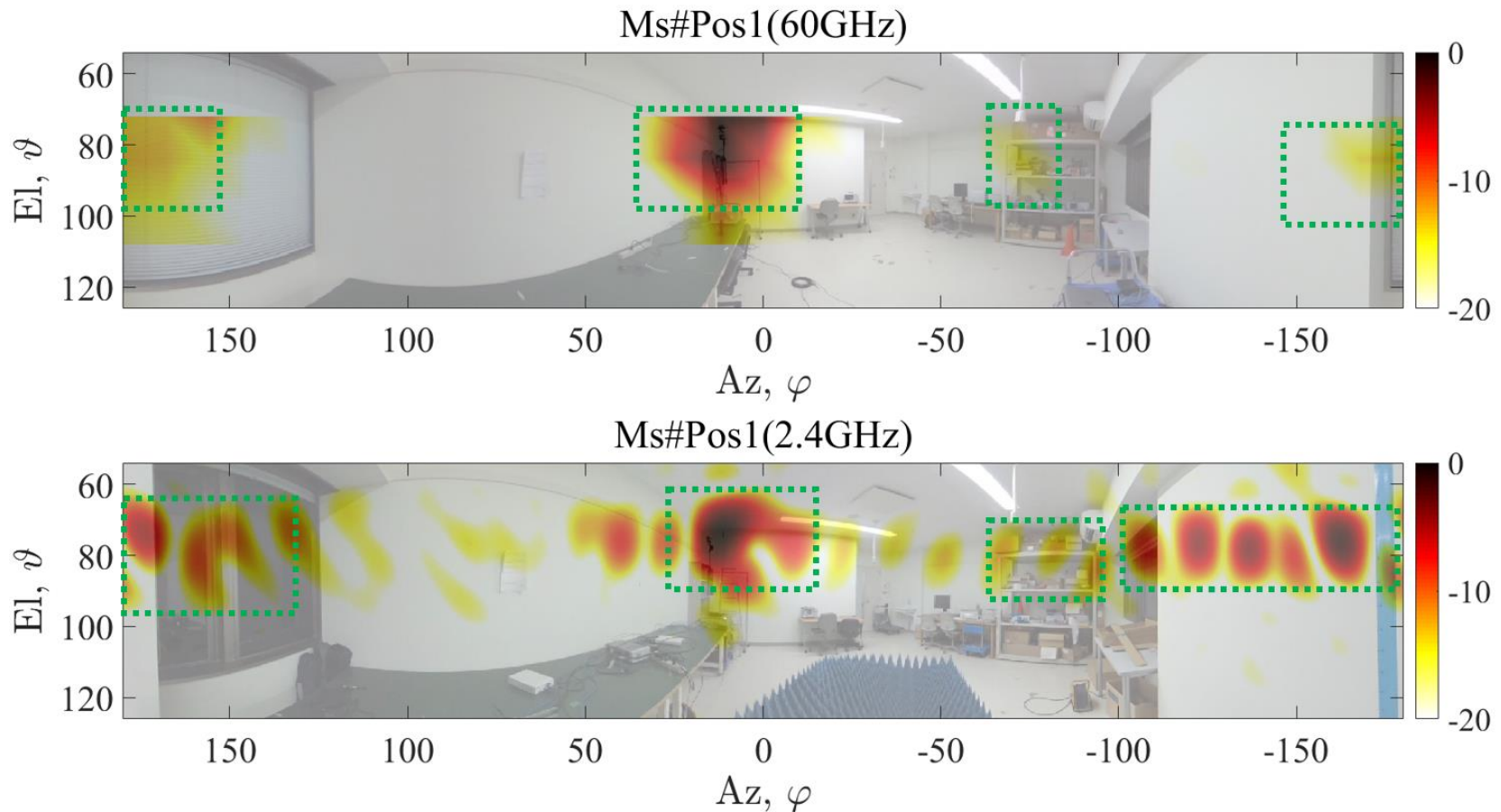
まとめ

- マイクロ波帯とミリ波帯を利用する超高速無線LANの導入が検討
 - 両周波数帯の相関関係を解明する研究が十分に行われていない
- 研究目的: 両周波数帯の電波伝搬特性の比較
- 実施内容
 - 2.4GHz帯電波伝搬路測定装置の開発とアレーアンテナの設計
 - 両周波数帯の電波伝搬路測定を実施
 - 両周波数帯において壁面による反射を確認
 - 2.4GHz帯は金属棚による散乱の影響が大きい
 - サイドローブの影響が測定結果に大きく影響
- 今後の展望
 - サイドローブの影響を抑圧する信号処理の実装
 - ドルフチェビシェフアレー信号処理の適用
 - 様々な環境における電波伝搬路測定の実施

参考文献

1. IEEE doc802.11-2015/0625r3, IEEE 802.11 Tgay Use Cases, Rob Sun et al, Sep, 2015
2. T. Kurose, T. Iwata, K. Yusuke, M. Kim, S. Sasaki, “ Development of Channel Sounder at 2.4 GHz using Software Radio Periperal,” IEICE, Technical Report , SR2016-64 , Oct. 2016.
3. 菊間信良, “アダプティブアンテナ技術,” オーム社, 2003.
4. T. Min, K. Saito, J. Takada, “Development of Directional Channel Sounder using USRP and GNU radio,” IEICE Technical Report, SR2015-102, Mar. 2016.

MS_Pos1 Measurement (補足)



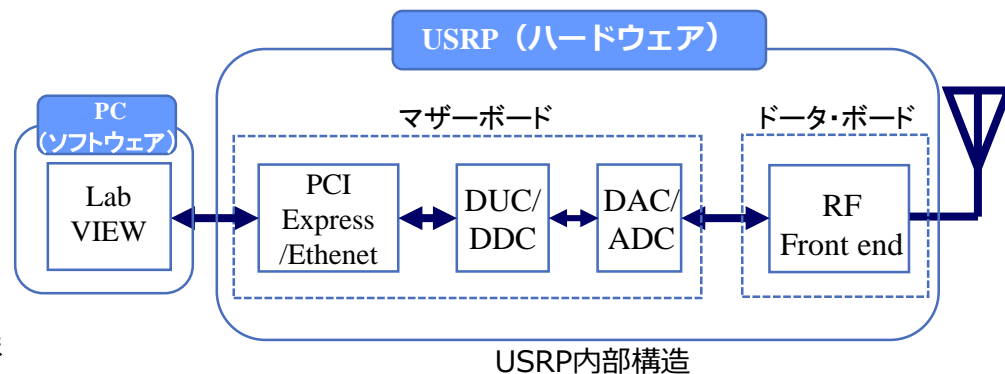
- 両周波数帯において壁面による反射を確認
- 2.4GHz帯は金属の棚による反射が大きい
- サイドローブの影響が強い

ソフトウェア無線機(補足)

■ USRP(Universal Software Radio Platform)

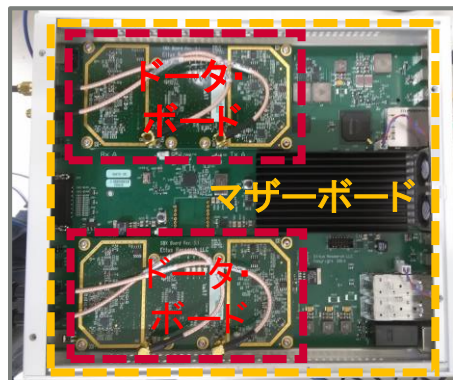
□ 特徴

- 中心周波数
400 ~ 4400 [MHz]
- ドータ・ボードの差し替えて様々な周波数帯に対応



■ 本研究

- 送信側 : USRP-2942R
- 受信側 : USRP-2922



USRP内部構成



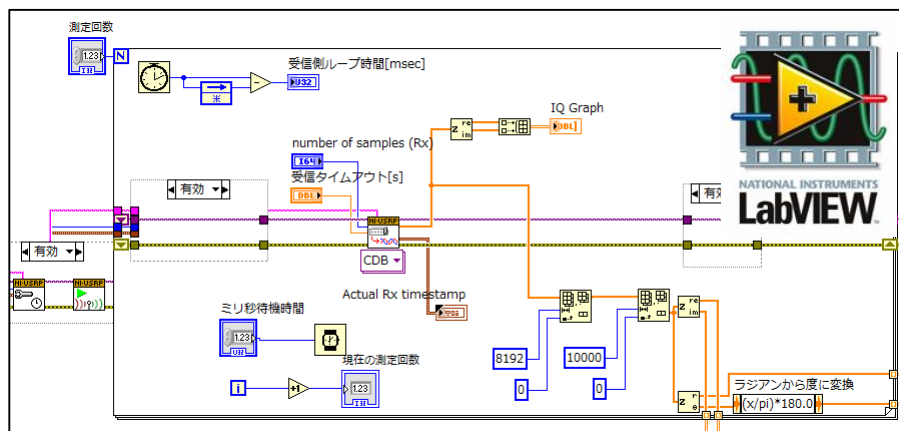
上 : USRP-2942R

下 : USRP-2922

ソフトウェア無線機（補足）

■ LabVIEW

- グラフィカルプログラム言語
 - 直感的なプログラムが可能
- 計測器制御に特化
 - 様々な計測器を制御することが可能（600種以上）
- 様々なプログラム言語を使用可能(Matlab, C++, ..)



LabVIEW グラフィカルプログラミング環境

■ GNU Radio

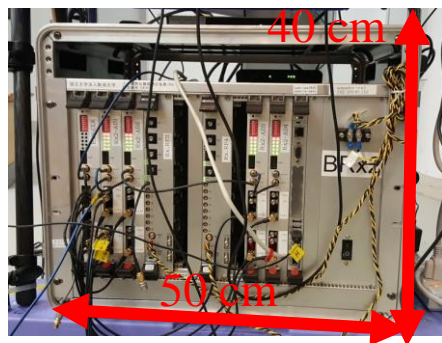
- ソフトウェア無線開発専用プラットフォーム
- 無償のソフトウェア
- Python, C++を使用



GNU Radio Pythonによるプログラム

ソフトウェア無線機（補足）

	USRP	チャンネルサウンダ	VNA
利点	安価 小型 周波数範囲が広い	広帯域幅 高遅延分解能	広帯域幅 高遅延分解能 高精度な測定
欠点	狭帯域幅 低遅延分解能	高価 大型 周波数範囲に限られる	高価 大型 室内のみの使用

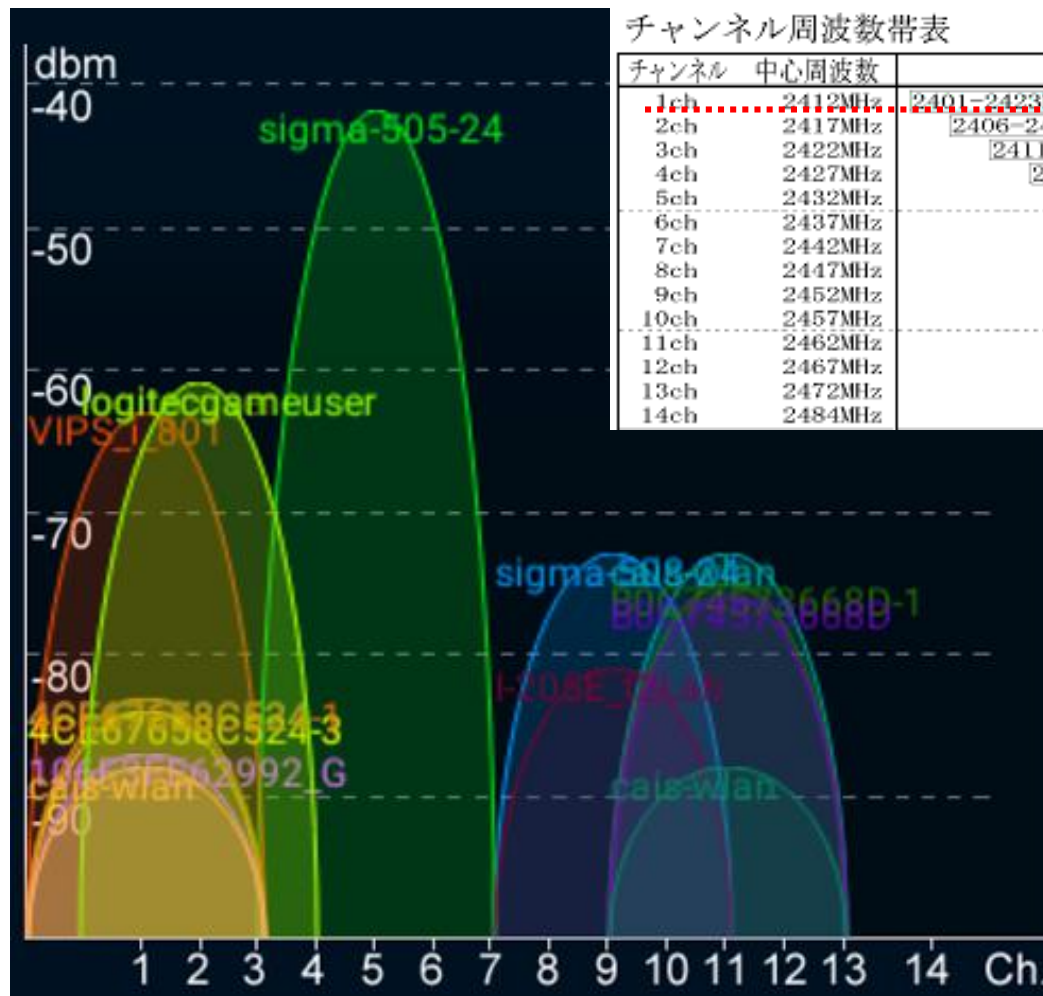


60 GHz帯伝搬路測定装置



2.4 GHz帯伝搬路測定装置

無線LAN使用状況(補足)



チャンネル周波数帯表

チャンネル	中心周波数	周波数帯
1ch	2412MHz	2401-2423MHz
2ch	2417MHz	2406-2428MHz
3ch	2422MHz	2411-2433MHz
4ch	2427MHz	2416-2438MHz
5ch	2432MHz	2421-2443MHz
6ch	2437MHz	2426-2448MHz
7ch	2442MHz	2431-2453MHz
8ch	2447MHz	2436-2458MHz
9ch	2452MHz	2441-2463MHz
10ch	2457MHz	2446-2468MHz
11ch	2462MHz	2451-2473MHz
12ch	2467MHz	2456-2478MHz
13ch	2472MHz	2461-2483MHz
14ch	2484MHz	2473-2495MHz

信号諸元

中心周波数 (GHz)	2.4
帯域幅(MHz)	20
サンプリングレー(kHz)	400
ベースバンド信号	正弦波信号

ドルフチェビシェフアレー(補足)

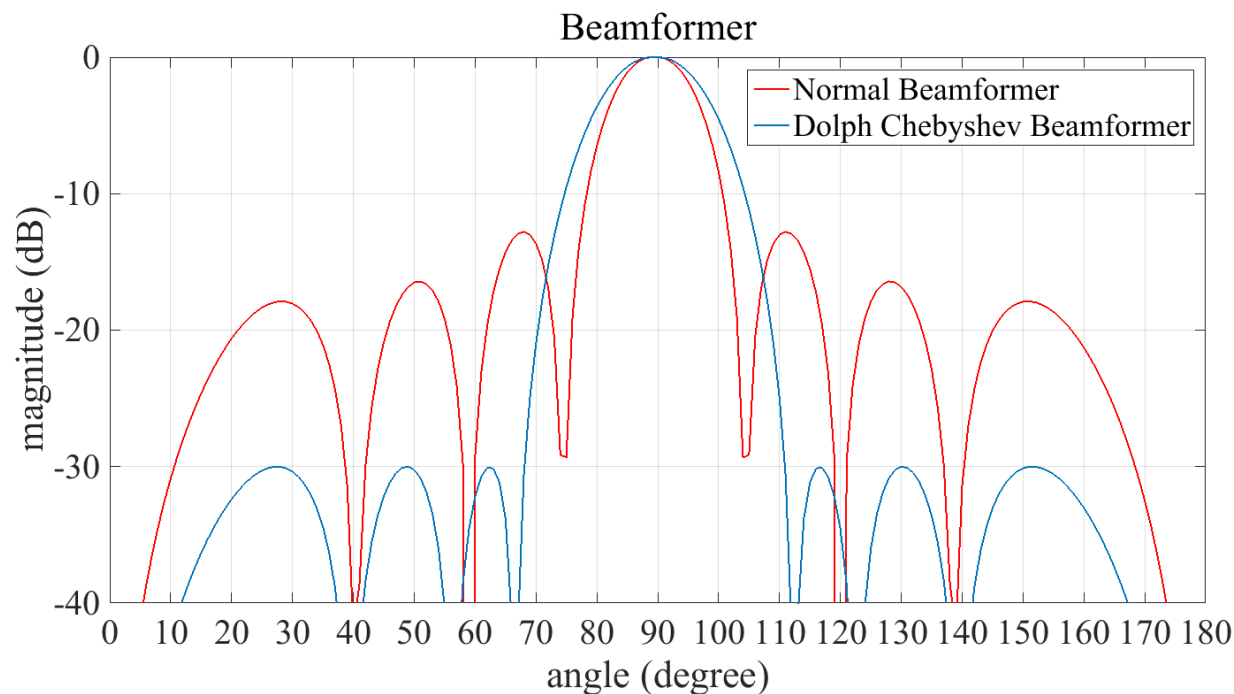
- チェビシェフ多項式の性質を用いてサイドローブを抑圧

- 利点

- サイドローブレベルを任意に選べる
 - サイドローブレベルは全て同じ一定値をとる

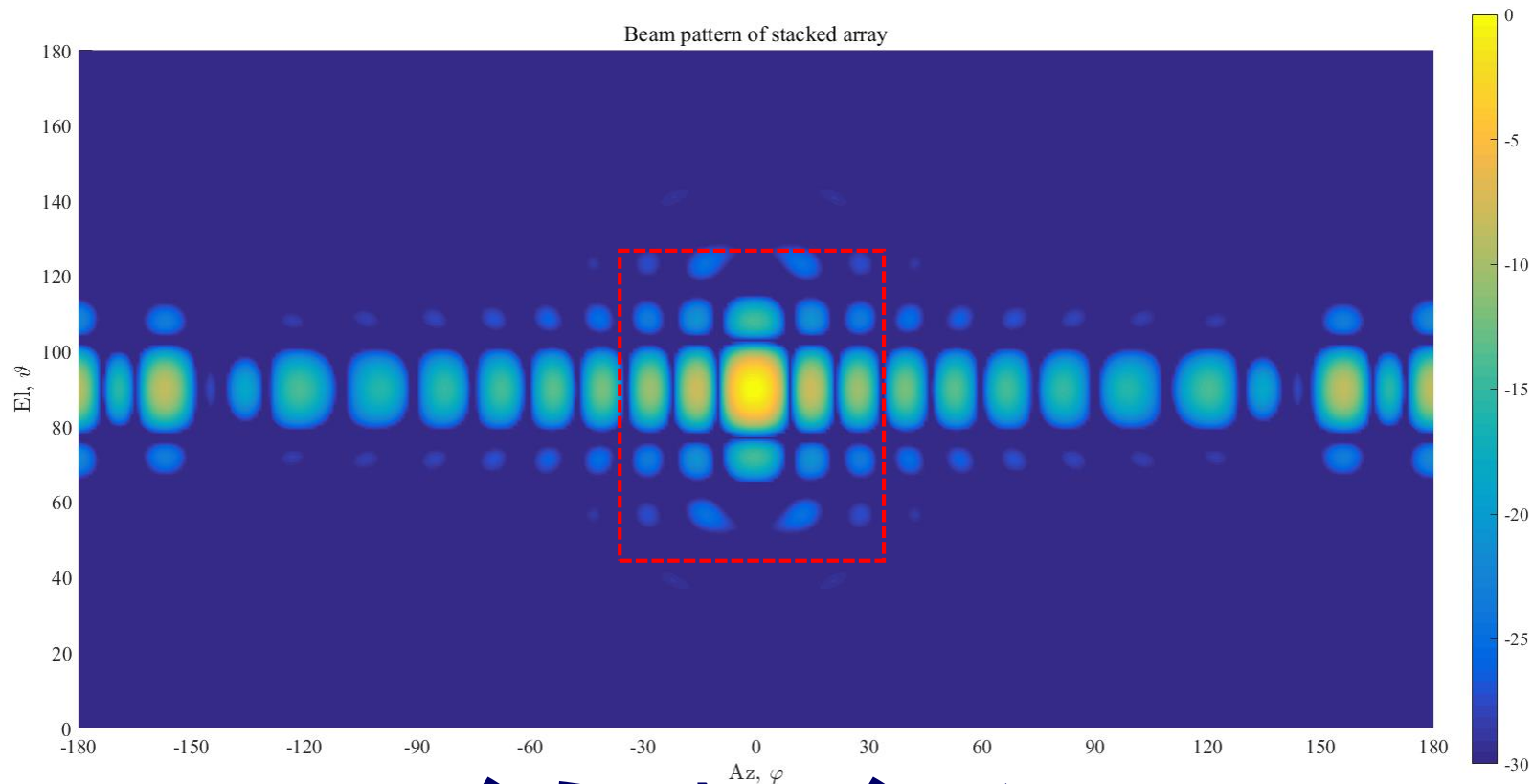
- 欠点

- メインローブのビーム幅が大きくなる



サイドローブを-30dBに抑圧(リニアアレーアンテナ)

仮想アレーアンテナ設計(補足)



シミュレーション

到来角 El 90度 Az 0度 閾値-30dB

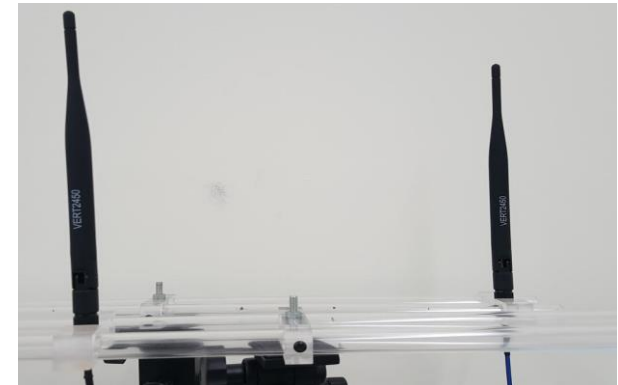
El : 天頂角

Az : 方位角

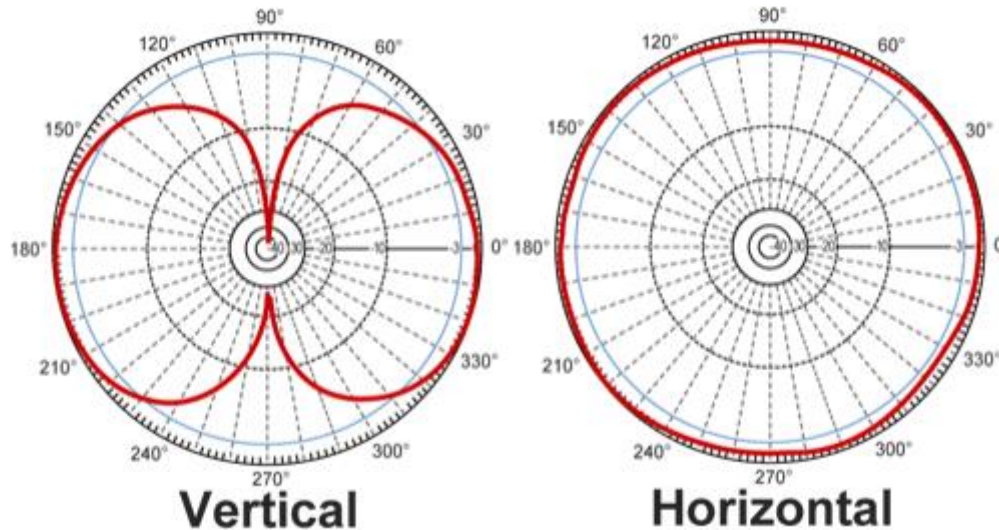
使用アンテナ (VERT2450) (補足)

Mechanical Specifications

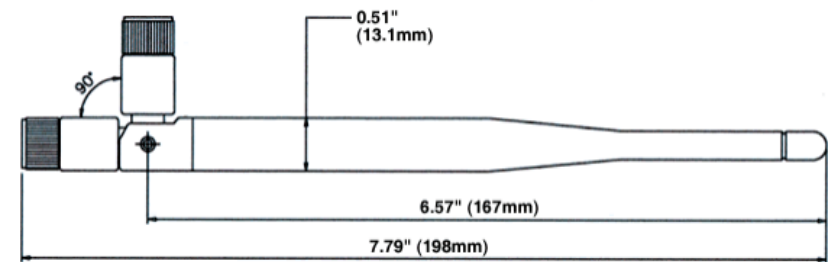
Frequency Ranges (MHz)	2400~2500 4900~5350 5725~5850
Gain (dBi)	3
Horizontal Beam Width (degree)	360
Impedance (Ω)	50
Max Power (W)	50



Picture



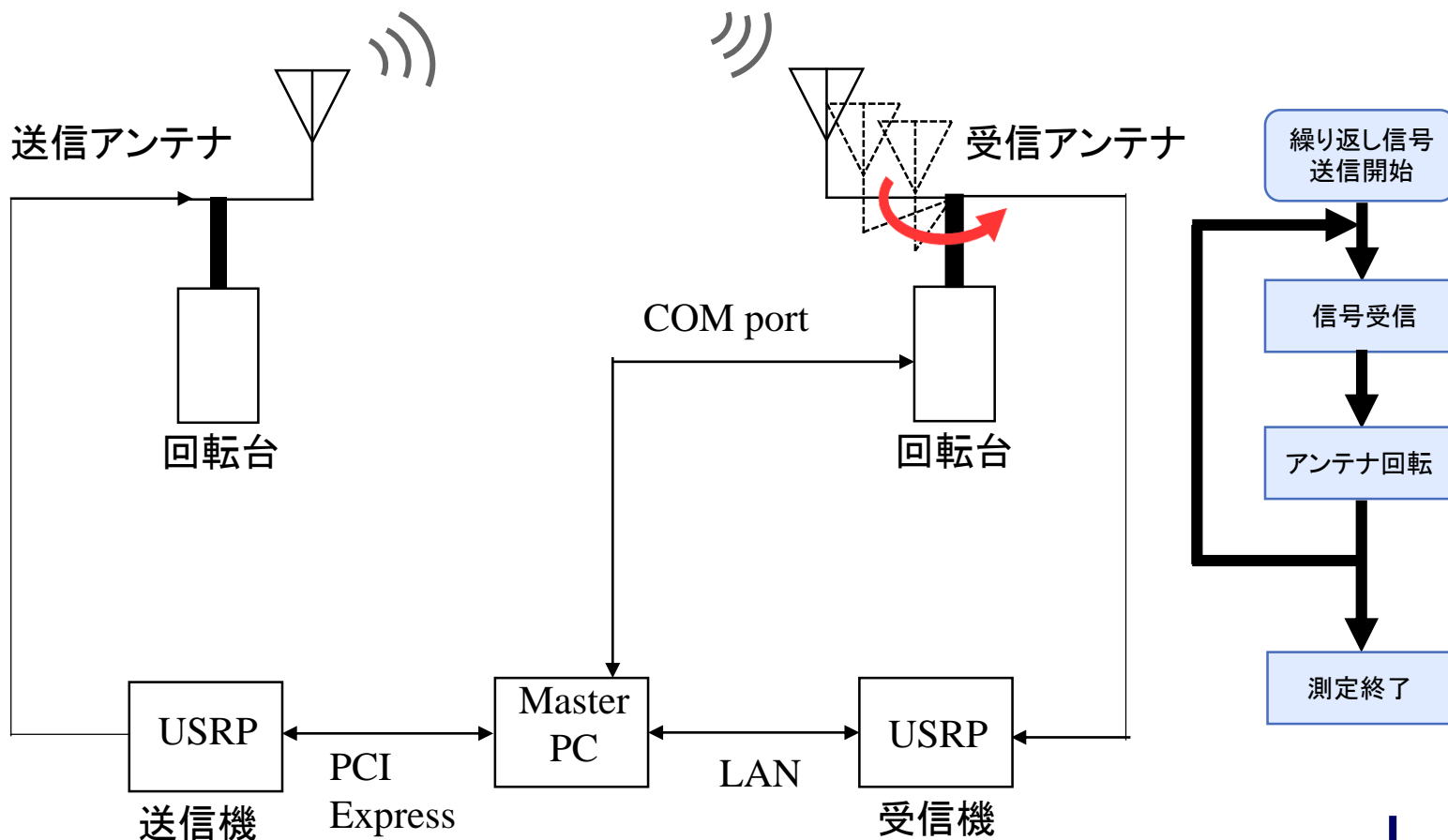
Antenna Patterns



Dimensions

測定システム(補足)

- 受信アンテナのみ回転させる
 - 12度ずつ30回円状に移動
 - 高さを半波長移動し, 再度測定(9回測定)



Multi-Band Operation(補足)

■ Application

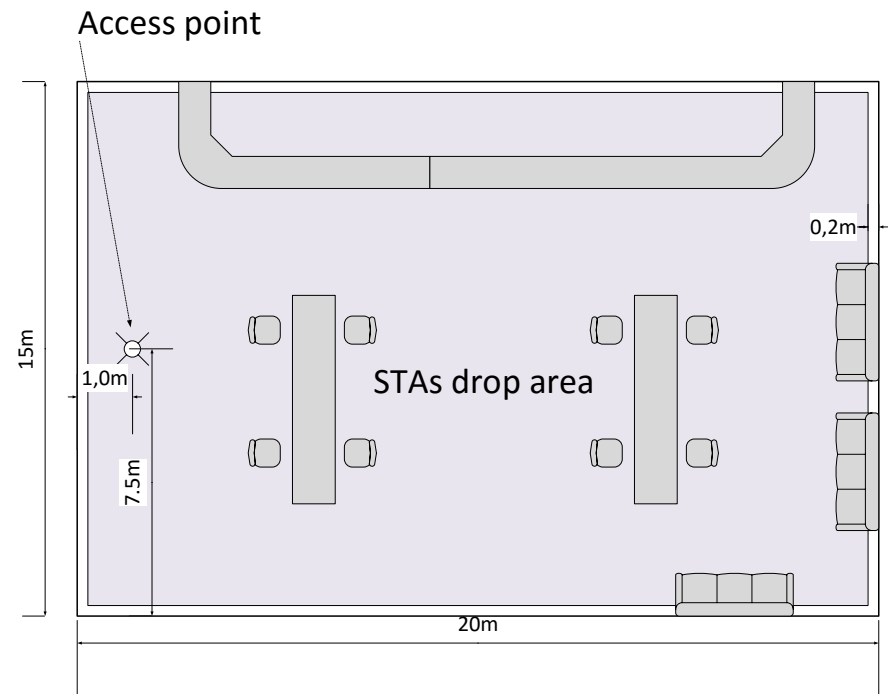
The data transfers at **~20 Gbps**, with some low mobility (**5km/h** etc)

■ Environment

Devices are operating in both outdoor and indoor environment with some potential LOS obstruction objects or interference from other sources. Transmissions are mostly LOS. Distance between far corners of the room are **<100m**

■ Example scenario

- Large indoor area
 - Hotel lobby, Mall/Exhibition

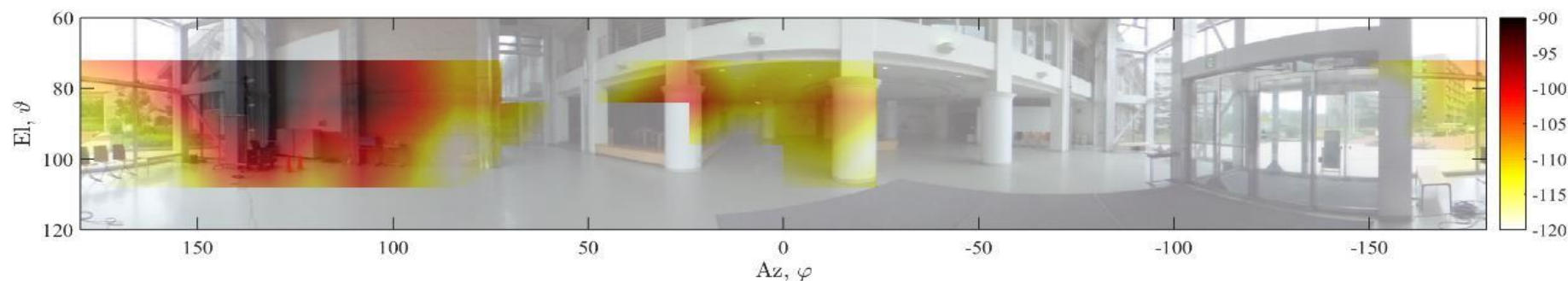
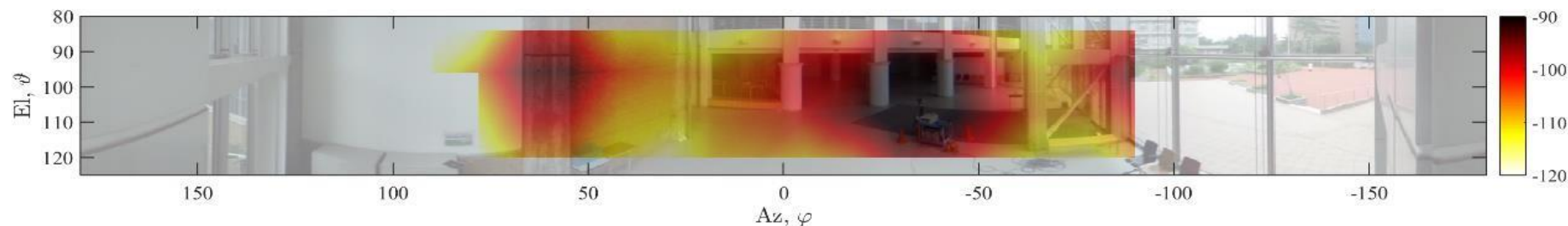


Hotel lobby (indoor access large public area) scenario

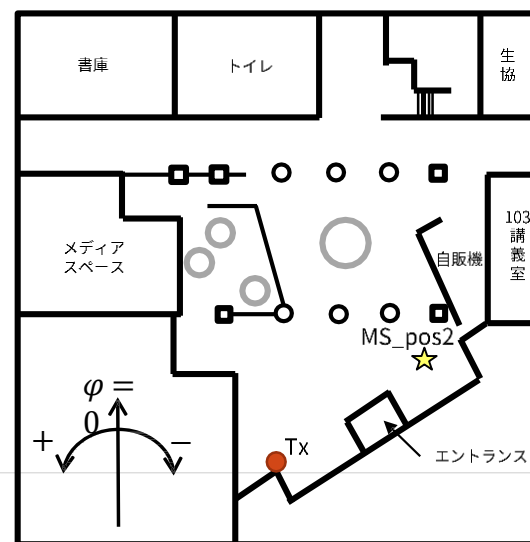
[1] 11-15-1150-08-00ay-channel-models-for-ieee-802-11ay, Alexander Maltsev et al, Jan, 2017

[2] IEEE doc802.11-2015/0625r3, IEEE 802.11 Tgay Use Cases, Rob Sun et al, Sep, 2015

測定例 60GHz帯(補足)



- エントランスホールで電波伝搬路測定を実施



無線LAN通信規格比較（補足）

規格名称	周波数帯	最大通信速度	チャネル帯域幅
IEEE802.11b	2.4 GHz	11 Mbps/22 Mbps	22 MHz
IEEE802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	20 MHz
IEEE802.11n	2.4/5 GHz	65 Mbps ~ 600 Mbps	20/40 MHz
IEEE802.11ac	5 GHz	290 Mbps ~ 6.9 Gbps	20/40/80/160 MHz
IEEE802.11ay	60 GHz	~ 20 Gbps	2.16 GHz

2.4 GHzホーンアンテナ(補足)

- アンテナ大きさ
 - 波長に依存
 - 波長が短いほどアンテナは小さくなる
- 2.4GHzのホーンアンテナを回転台で回転させるのは困難



Mechanical Specifications

Frequency Ranges (GHz)	1.7 ~ 2.6
Gain (dBi)	20
3dB Width (degree)	17.3
Weight (Kg)	12.02
Width (mm)	565.15