

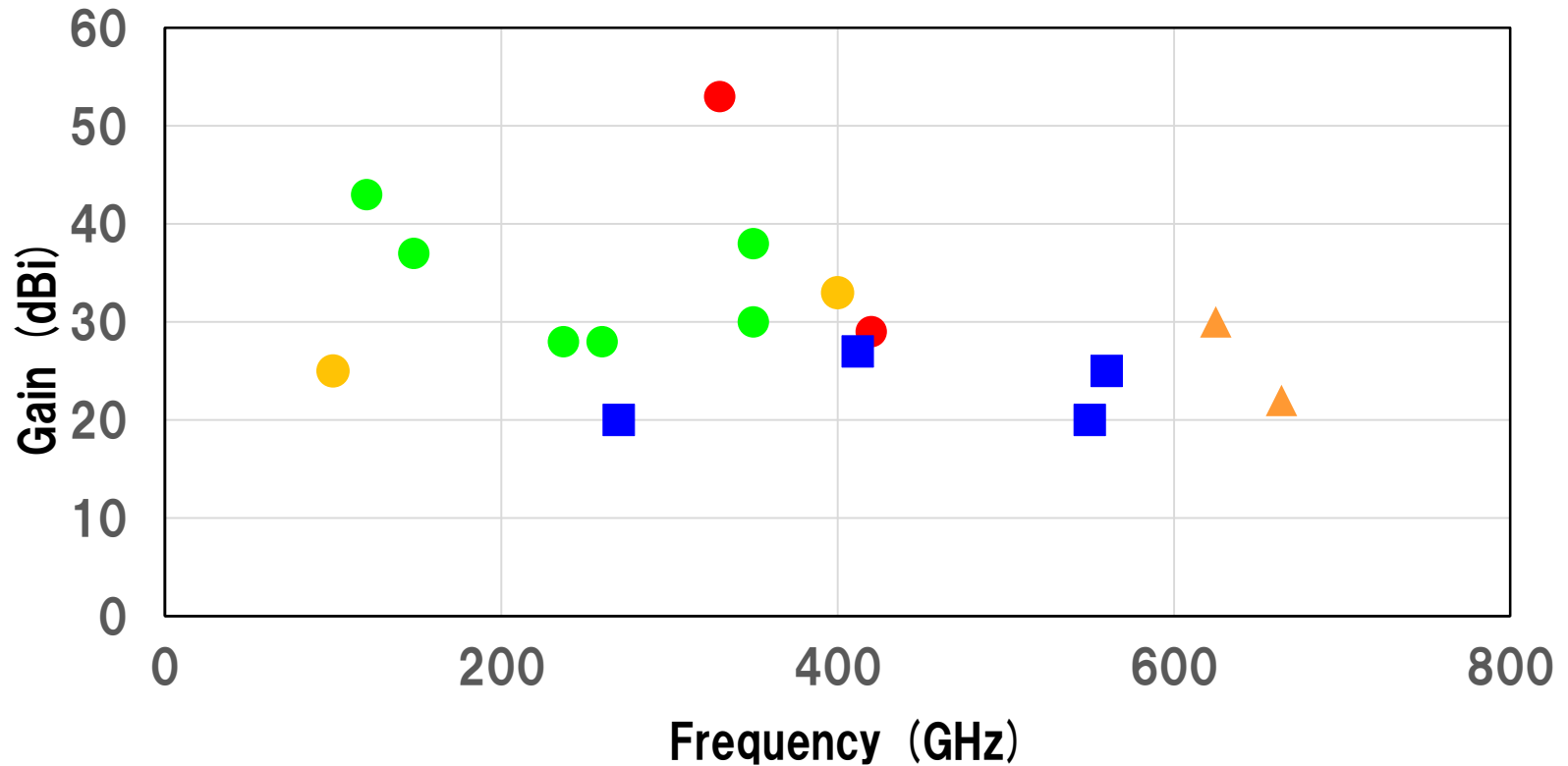
6G におけるテラヘルツ帯アンテナ・伝搬技術

枚田明彦

千葉工業大学

テラヘルツ帯アンテナの概要

高利得アンテナ



● Reflectors

■ Lenses

● Planar Antenna (waveguide)

● Reflect Array

▲ Horn Antenna

市販の高利得アンテナ

Reflector Antenna:カセグレインアンテナ

- **複数のメーカーから購入可能**
 - MI-wave: ~ 220 GHz
 - ELVA-1: ~ 325 GHz (~50 dBi)
 - Anteral: ~ 600 GHz (~60 dBi)
 - Millitech: ~325 GHz (~ 50 dBi)

Horn Antenna:ホーンアンテナ

- **325 GHz までであれば、複数のメーカーから購入可能**

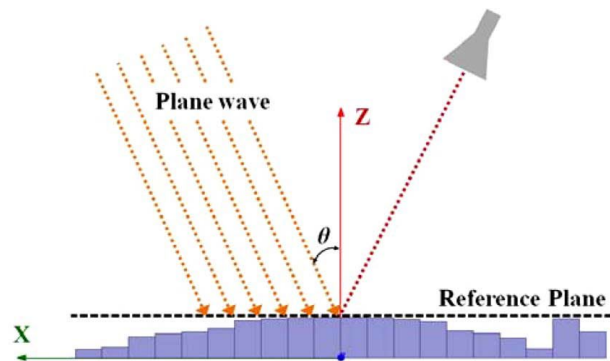
Lens Antenna:レンズアンテナ

- Anteral: ~ 325 GHz (~45 dBi)
- Elva-1: ~325 GHz (~ 40 dBi)

テラヘルツ帯高利得アンテナの研究開発例

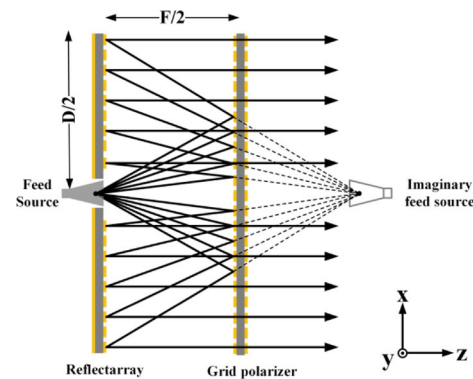
リフレクターアンテナの課題: 反射鏡の加工精度

3D プリンタによる反射鏡の作成



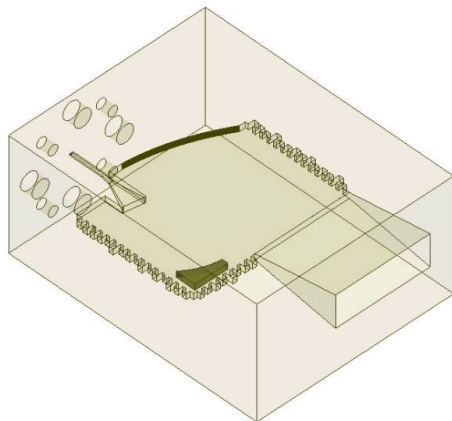
Payam Nayeri, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 62, NO. 4, APRIL 2014

メタサーフェスの使用



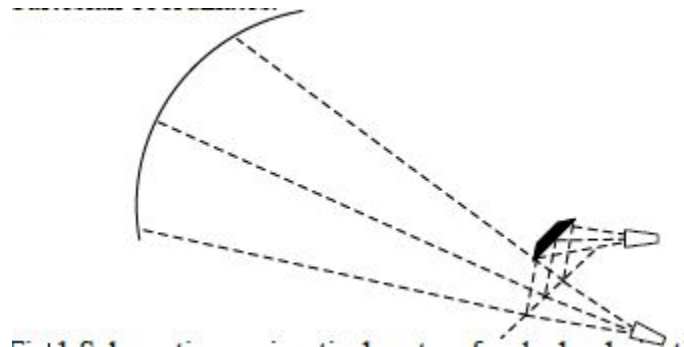
Zhuo-Wei Miao, et al., IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. 9, NO. 1, JANUARY 2019

半平面反射鏡



Kuikui Fan, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 65, NO. 7, JULY 2017

プラスチック、SiC の使用

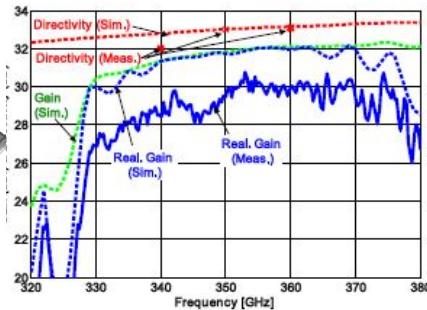
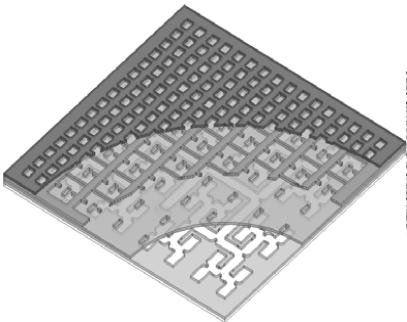


Wang Hongjian, et al., ISAP2016, 3A1-4, 2016

テラヘルツ帯高利得アンテナの研究開発例

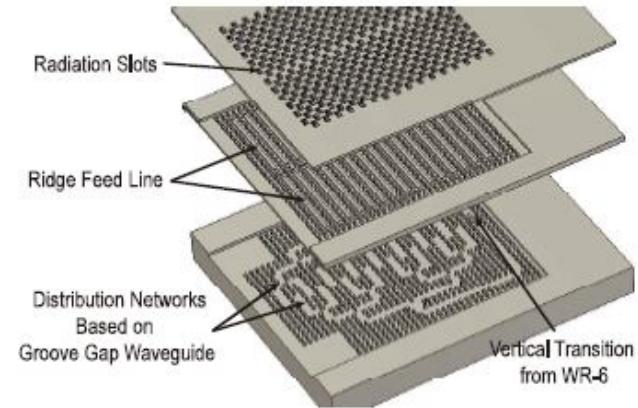
平面アレーアンテナの課題: 各アンテナ素子への給電

Si MEMS による中空導波管
平面アレーアンテナ



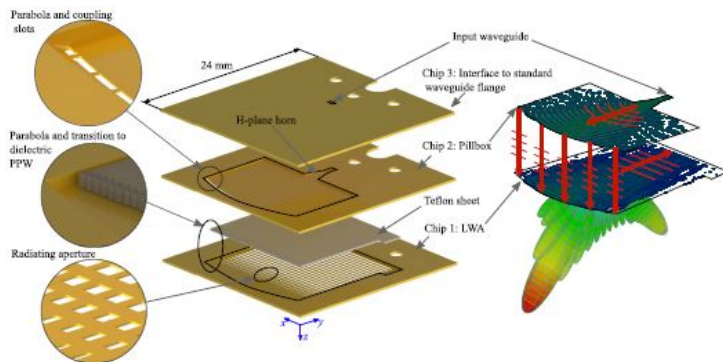
Karim Tekkouk, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 65, NO. 1, JANUARY 2017

メタル積層中空導波管
平面アレーアンテナ

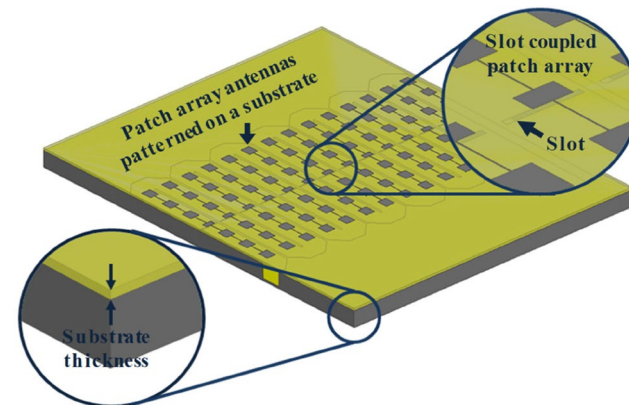


J. Liu et al., IEEE-APS Topical Conf. Antennas Propag. Wirel. Commun., pp. 75-78, Sept. 2019.

周波数掃引によるビーム走査



Adrian Gomez-Torrent, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 68, NO. 2, FEBRUARY 2020



Kamal Sarabandi, et al., IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. 8, NO. 6, NOVEMBER 2018

テラヘルツ帯高利得アンテナの研究開発例

アンテナパタンの評価

- 周波数共用や通信品質の評価にアンテナパタンの評価が必要
- 高利得アンテナの評価には数十m の距離が必要なため、電波暗室での評価は不可能
- サイドローブの正確な評価には受信器のダイナミックレンジが必要

- Boundary of far field (r) : $r = \frac{2D^2}{\lambda}$

λ : 1 mm @300GHz, D: 0.15m @45 dBi

⇒ Boundary of far field (r) : 45 m

- Free-space propagation loss (FSPL)@45 m : $\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 = 115 \text{ dB}$
- Antenna gain : 90 dBi (Tx and Rx)
- Target dynamic range : >70 dBi (Tx and Rx)
- Required minimum sensitivity P_r (dBm) @ 0 dBm Tx output power :

$$P_r = 0 + 90 - 115 - 70 = -95 \text{ dBm}$$

ITU-R 勧告におけるアンテナモデル

Recommendation ITU-R	Name	Frequency (GHz)
F.699	Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to 86 GHz	86 GHz
F.1245	Mathematical model of average and related radiation patterns for point-to-point fixed wireless system antennas for use in interference assessment in the frequency range from 1 GHz to 86 GHz	86 GHz

2.1 in cases where the ratio between the antenna diameter and the wavelength is greater than 100 ($D/\lambda > 100$), the following equation should be used (see Notes 1 and 7):

2.1.1 for frequencies in the range 1 GHz to 70 GHz, the antenna gain G (dBi):

$$G(\varphi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{for} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{for} \quad \varphi_m \leq \varphi < \max(\varphi_m, \varphi_r)$$

$$G(\varphi) = 29 - 25 \log \varphi \quad \text{for} \quad \max(\varphi_m, \varphi_r) \leq \varphi < 48^\circ$$

$$G(\varphi) = -13 \quad \text{for} \quad 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

where:

G_{max} : maximum antenna gain (dBi) (see Note 2)
 $G(\varphi)$: gain (dBi) relative to an isotropic antenna
 φ : off-axis angle (degrees)
 D : antenna diameter
 λ : wavelength } expressed in the same unit
 G_1 : gain of the first side lobe
 $= 2 + 15 \log(D/\lambda)$

2.1.2 for frequencies in the range 70 GHz to 86 GHz, the antenna gain G (dBi):

$$G(\varphi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{for} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

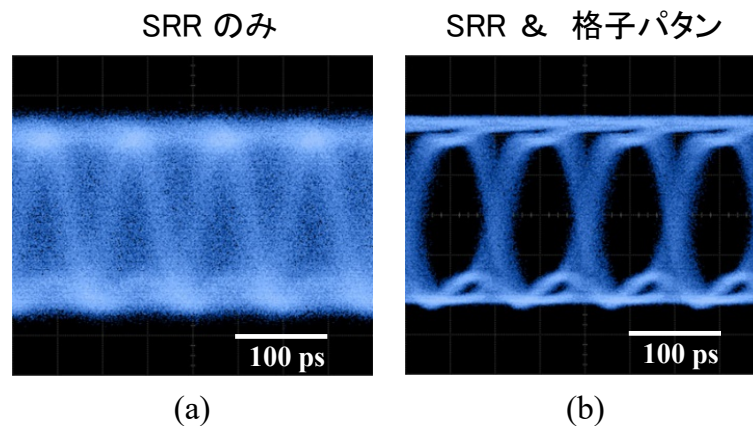
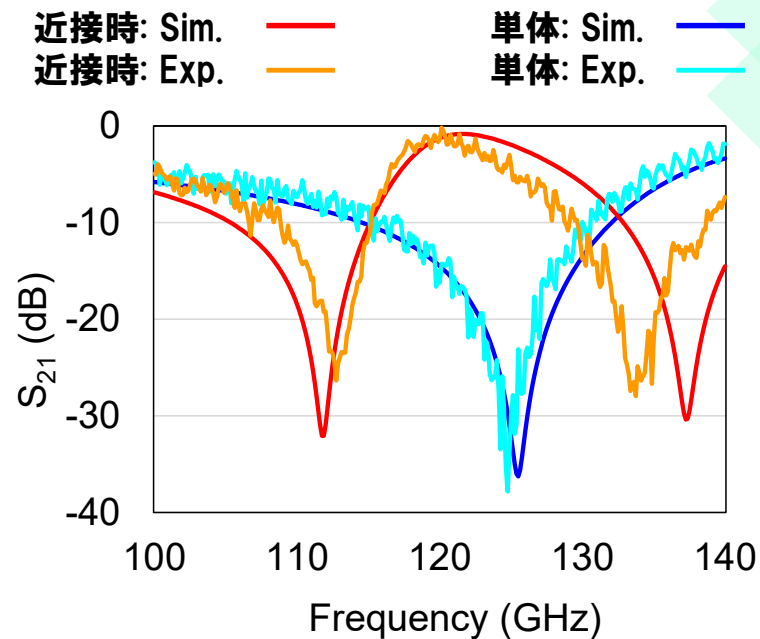
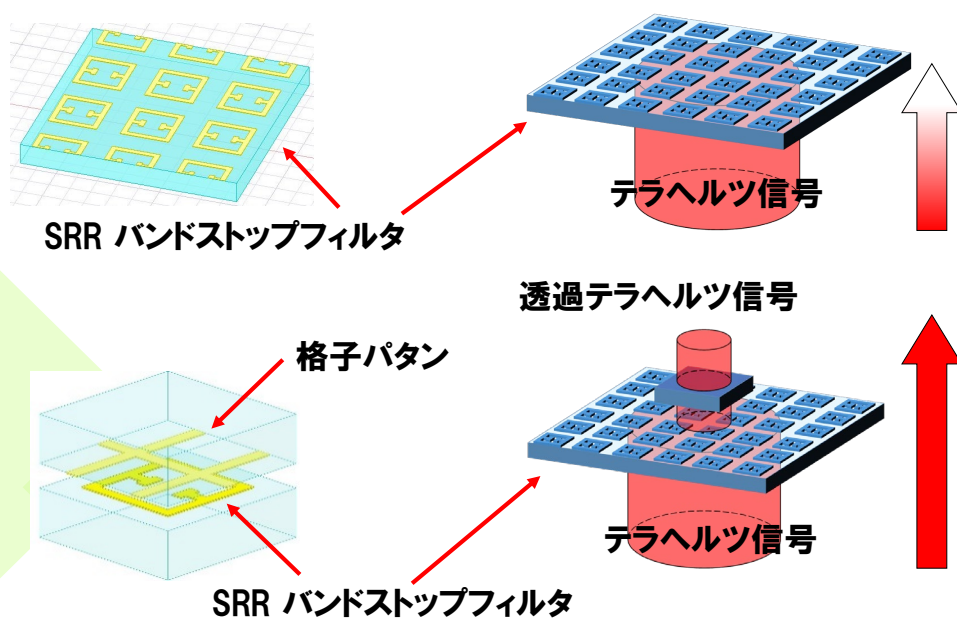
$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{for} \quad \varphi_m \leq \varphi < \max(\varphi_m, \varphi_r)$$

$$G(\varphi) = 29 - 25 \log \varphi \quad \text{for} \quad \max(\varphi_m, \varphi_r) \leq \varphi < 120^\circ$$

$$G(\varphi) = -23 \quad \text{for} \quad 120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

近接通信用機能性誘電体薄膜の研究

- 遠方界評価用に、300GHz 帯無線機の実験試験局免許取得
- 近傍界計測 ⇒ 遠方界への変換による評価を実施



ITU-R 勧告における電波伝搬モデル

電波伝搬モデル

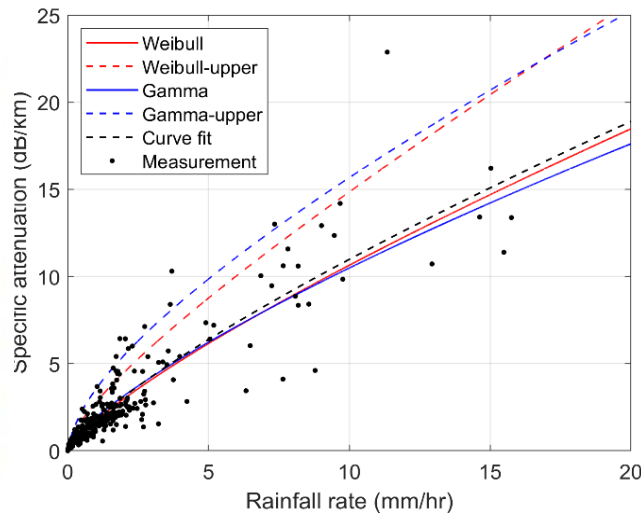
		Frequency
P.620	Propagation data required for the evaluation of coordination distances in the frequency range 100 MHz to 105 GHz	105 GHz
P.838	Specific attenuation model for rain for use in prediction methods	1000 GHz
P.1238	Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz	450 GHz
P.1410	Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz	60 GHz
P.1411	Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz	100 GHz
P.2001	A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz	50 GHz

材料モデル

		Frequency
P.527	Electrical characteristics of the surface of the Earth	1000 GHz
P.1238	Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz	450 GHz
P.2040	Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz	100 GHz

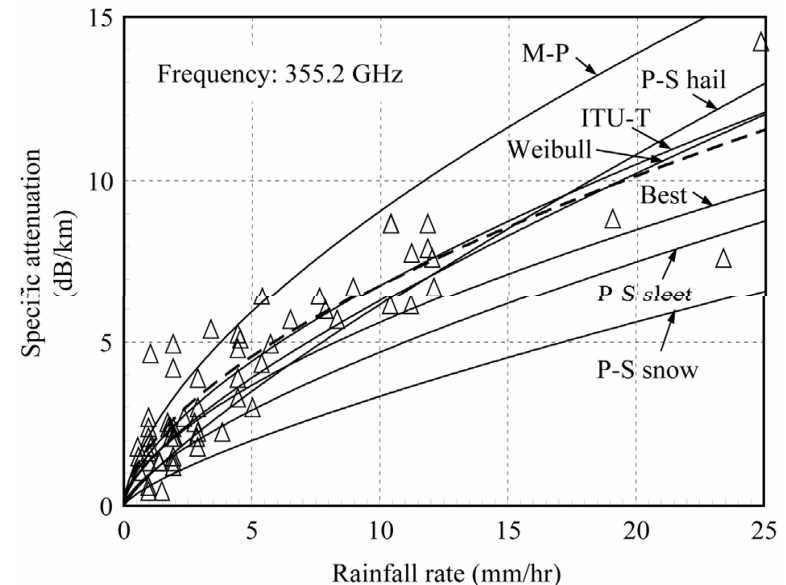
300 GHz 帯電波の大気・降雨減衰

- テラヘルツ帯電波の大気・降雨減衰に関する実験が報告され始めているが、降水量の大きい場合の減衰量を評価するには、長期間の評価が必要になること、無線機の性能により伝送距離が 100 m 程度しかとれていないことが多いため、減衰定数の精度に課題
- ITU-R 勧告 P. 838 のモデルや NICT 開発の AMATERASU など、降雨減衰や大気吸収の初期見積もりは可能



Fatemeh Norouziyan, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 68, NO. 1, pp. 451, JANUARY 2020

伝送距離 55 m

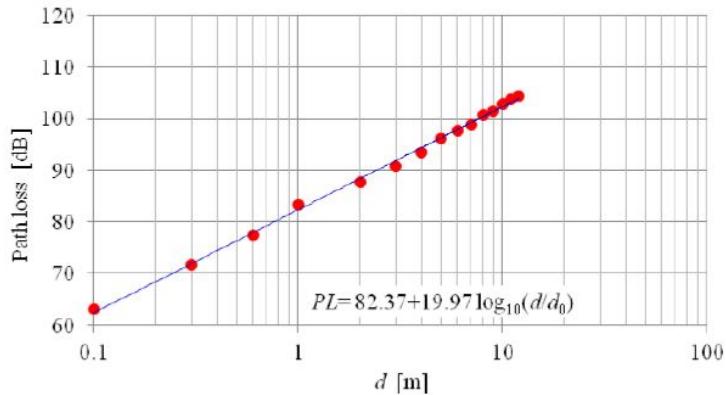


Seishiro Ishii, et al, Wireless Engineering and Technology 2(03):119-124

300 GHz 帯室内伝搬実験

- 300GHz帯での室内伝搬に関する実験の報告例が増加
- これまでの電磁波理論に基づく電波伝搬特性の結果と、大幅に変わるとい報告例は見られず

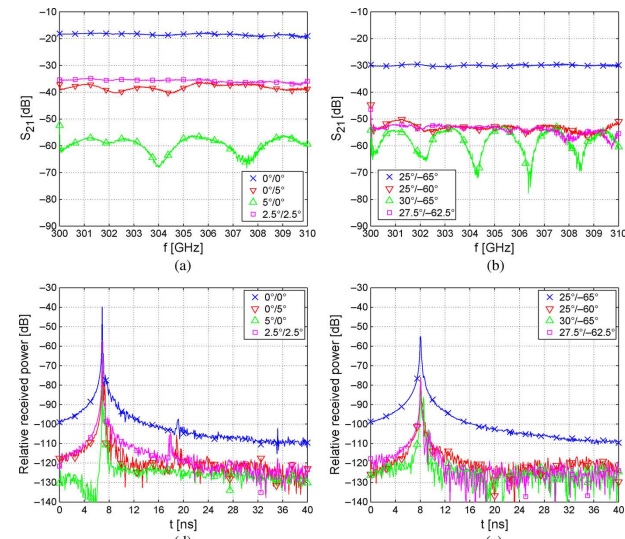
Path loss の距離依存性



(a) Office environment

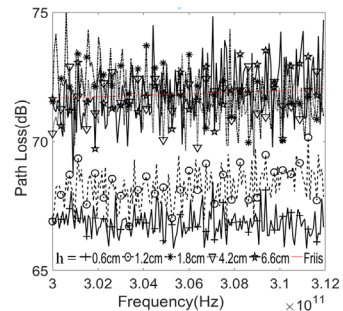
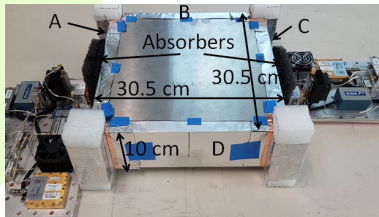
Hirokazu Sawada, et al., IEICE Communications Express, IEICE Communications Express 5(11), 2016.

チャネル特性



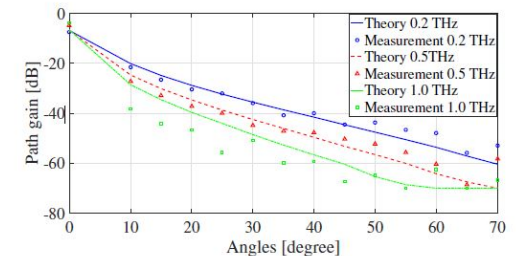
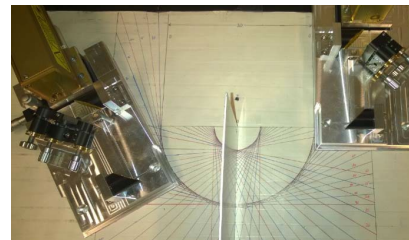
Sebastian Priebe, et al., IEEE Trans. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 59, NO. 5, pp.1688, MAY 2011

メタル筐体内チップ間通信



Jinbang Fu, et al., EUCAP, 2019.

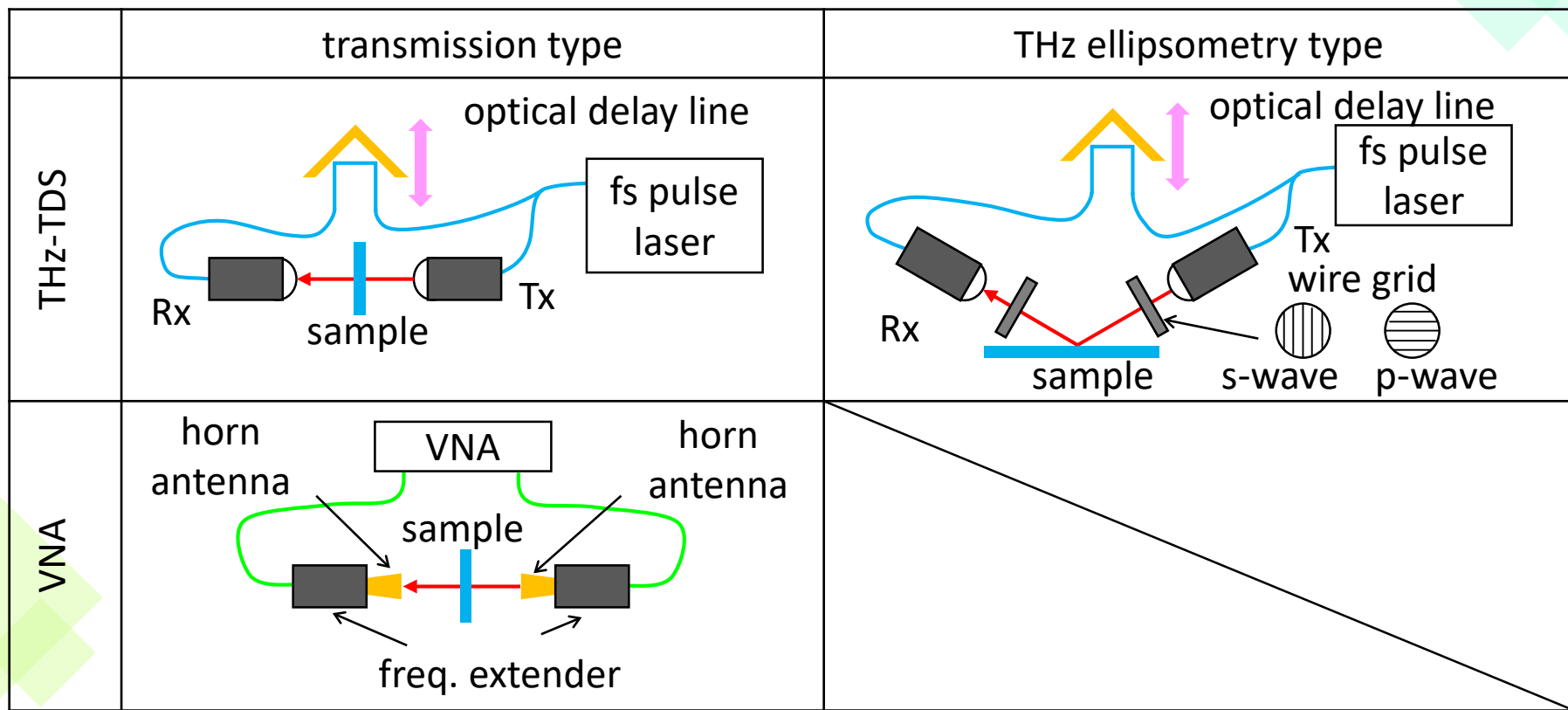
回折特性



Joonas Kokkonen, et al., 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016.

建材の 300 GHz 帯複素誘電率の測定

- THz-TDS (Time-domain Spectroscopy): Ultra wide band operation (0.1~ 1THz)
- Vector Network Analyzer (VNA): Stable operation



建材の 300 GHz 帯複素誘電率の測定

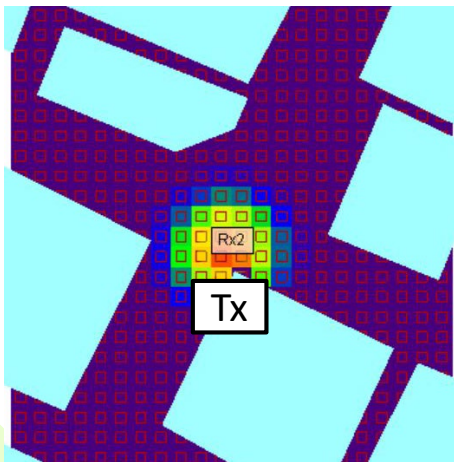
Material	Type	Real Part	Imag. Part
Glass	Float Glass	5.8~6.3	0.2~0.3
	Heat-Absorbing Glass	6.2~7.3	0.3~0.4
	Heat-Reflecting Glass	5.9	3
Wood	Depends on the direction of annual rings	2.2~3.7	0.1~0.2
Rubber		5.6	0.4
Teflon		2.1	0.002
Plastic		2.3	0.002

複素誘電率の実験値を使用した伝搬シミュレーション

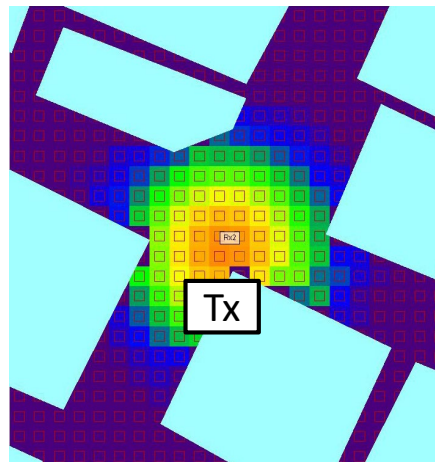
- Area where 33-Gbit/s data transmission can be achieved
 - Tx height: 3 m within a diameter of 3 m
 - 5 m within a diameter of 4 m
 - 10 m impossible to achieve 33-Gbit/s data

rate

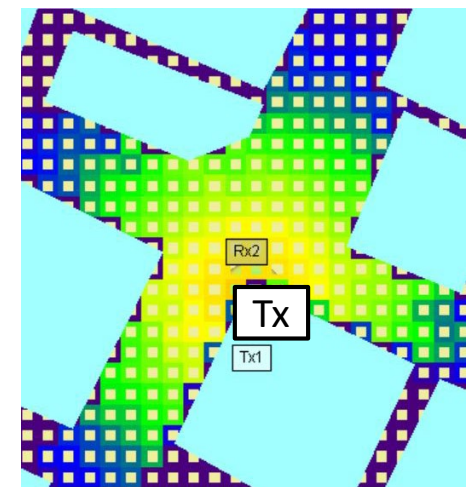
- 3 m (Street light)



- 5 m (Traffic Post)



- 10 m (Roof of building)

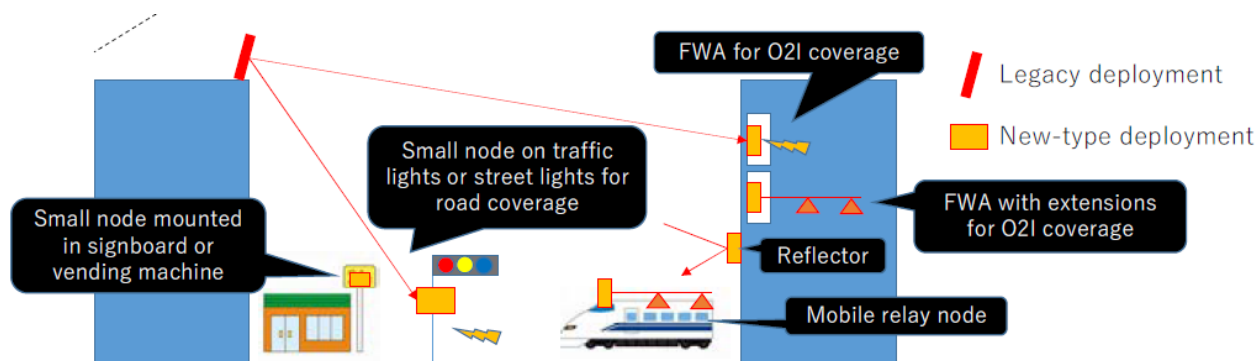


-90 dBm -30 dBm



New Network Topology の基地局配置の課題

- 高層ビルが密集するエリアで高密度に多数の基地局を配置
- 超高速伝送を実現するため、テラヘルツ波を利用（見通し通信が必要）



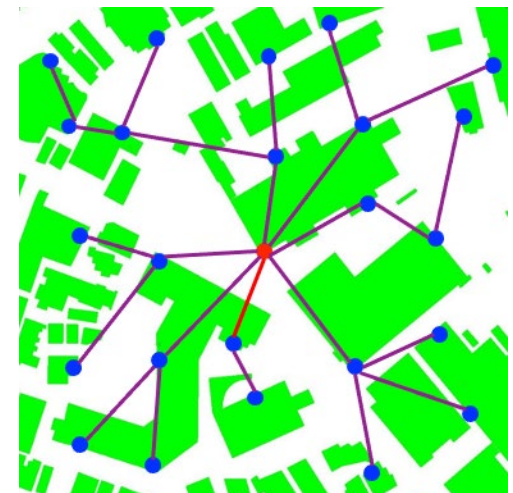
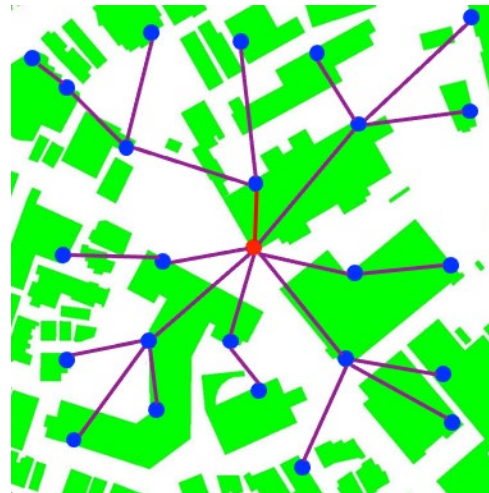
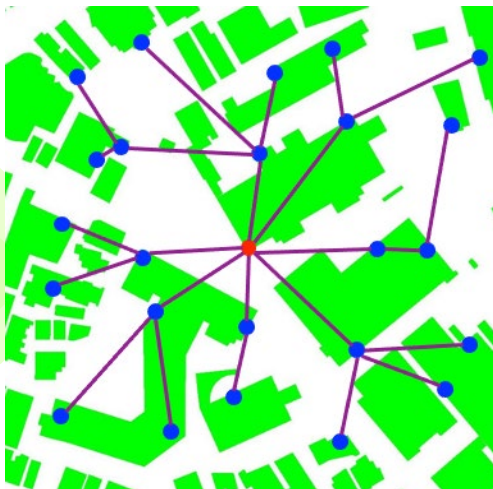
- 高さが大幅に異なる高層ビルや道路上に設置した基地局間の見通しを得ることが困難
- 高密度に配置した場合、基地局間での干渉が発生
- 多数の基地局をこれらの条件を満たすように、手動で配置するのは困難

基地局の自動配置アルゴリズムを検討

自動配置した基地局の結果

- 自動配置アルゴリズムにより10パターンの基地局配置を実施
- 子局は全て親局と4ホップ以内で接続可能
- 子局の78%が2ホップ以内に親局と接続可能

ホップ数	子局数
1	64
2	124
3	44
4	8
Total	240



SNR の累積分布確率

- 100Gbit/sデータ伝送に必要なSNR: 22dB
- バックホールリンクの99.5%は、降雨量が100mm/hrの場合でも所要SNRを上回ることを確認

