Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment



齋藤 健太郎 (Kentaro Saito, Ph. D.)
東京工業大学 環境・社会理工学院 助教
(Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology)
電子情報通信学会 IEEE 他
受賞:電子情報通信学会 Best Tutorial Paper Award (2019年),電子情報通信学会
福子情報通信研究会論文賞 (2017年),電子情報通信学会
RISING2019 優秀ポスター発表賞 (2019年),他
研究専門分野:通信工学 無線通信 電波伝搬

あらまし

近年、スマートフォンやタブレット型端末等の普及 により移動通信分野のトラフィックは年々増加してい る、特に都市部等の人口密度の高い地域では、高層ビ ル内に在圏するユーザも効率的にネットワークに収容 するため、高さ方向も考慮した3次元的なサービスエ リア設計が必要とされている。本研究プロジェクトで は、このようなエリア設計を実現するため、高所環境 における電波伝搬特性を明らかにする事を目的とする。 商用の Software Defined Radio (SDR)無線機を用いて 小型チャネルサウンダを開発し、Unmanned Aerial Vehicle (UAV)に搭載して飛行する事で高所環境にお ける電波伝搬実験を行った。特に屋外の無線基地局か ら屋内のユーザに伝搬する電波の建物による侵入損失 について様々な角度から電波が到来する条件で損失特 性を解析し、新しい建物侵入損失モデルを構築した。 得られた知見は将来の移動通信システムのサービスセ ル設計に活用する事が期待される。

1。研究背景及び研究目的

近年、スマートフォンやタブレット型端末等の普及 により移動通信分野のユーザトラフィックは急激に増 加している。特に都市部等の人口密度の高い地域では ネットワークが混雑しやすい状況になっており、スモ ールセル等の小さなサービスセルを効率的に配置する 事が重要となっている。効率的なサービスエリア設計 のためには、無線チャネルどうしの干渉を抑えつつ圏 外となるエリアを作らないように無線セルを配置する 必要がある。しかし図1に示す通り、都市部の高層ビ ル内にはマクロセルやストリートマイクロセル等様々 な環境に設置されている基地局から電波が到来してお り、高層ビル内に在圏するユーザを効率的にネットワ ークに収容するためには2次元的なサービスエリア 設計ではなく高さ方向も考慮した3次元的なサービス エリア設計が重要となっている[1]。

適切なサービスエリア設計を行うためには、基地局 とユーザ端末の様々な位置関係における電波伝搬損失 特性を把握する事が重要である。特に高層ビル等に在 圏するユーザのエリア設計では、屋外無線基地局から 屋内ユーザへ伝搬する電波の建物侵入損失(Building Entry Loss: BEL)*1特性を明らかにする事が重要で あり、様々な実験が行われてきた[2-4]。高層ビル等の 建物への建物侵入損失については COST231 BEL モ デル[5]やITU-RP。2109モデル[6]等にもまとめられ ている。屋外から屋内に侵入する電波は窓から侵入す る波が主であり、基地局と端末の間に見通し伝搬路が 存在する場合は直線波の影響が顕著であり、見通しが 無い場合は窓際での回折波や周辺の建物からの反射波 の影響が強いと考えられている。

COST231 BEL モデルでは、電波の建物に対する水 平面での到来方位角に関する建物侵入損失特性は考慮 されているが、仰角に関する特性が考慮されておらず、 3 次元的なサービスエリア設計に用いるには不足して いる。これは、方位角・仰角を考慮した BEL モデルを 構築するためには、様々な送受信局の位置関係で伝搬 損失測定を行う必要があるが、従来の研究では無線局 は地上もしくは他の建物等に設置されており、測定可 能な条件のバリエーションが限られるという制約があ ったためである。そのため本研究プロジェクトでは商 用 Software Defined Radio (SDR)無線機を用いて Unmanned Aerial Vehicle (UAV)に搭載可能な小型チ ャネルサウンダ*2を開発した。開発したサウンダを UAV に搭載し、UAV のフライトレコーダに記録され た UAV 位置・姿勢情報と連動させる事で、高層ビル 環境での電波伝搬損失測定を行うシステムを開発した。

Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment

また、大学キャンパス内の研究棟とカフェテリアにおいて 4.9 GHz 帯で電波伝搬測定を行い、 窓の形状や 周辺の伝搬環境が屋外・屋内伝搬損失特性に与える影響について解析を行った。解析結果を元に COST 231 BEL の 3 次元 拡張モデルを提案した。



characteristics from various outdoor BSs to indoor MS have to be clarified.

図13次元無線サービスエリア構築における課題

2. COST231 BEL モデルの 3 次元拡張方式の提案

まず COST231 BEL モデル[5]について説明する。 COST231 BEL モデルでは、屋外の無線基地局(Base Station: BS)から屋内の移動局(Mobile Station: MS) への電波伝搬損失L_{total}を屋外伝搬損失L_{out}、屋内伝搬 損失L_{in}、建物侵入損失L_{tw}の3つの和で表す。

$$L_{\text{total}} = L_{\text{out}} + L_{\text{in}} + L_{\text{tw}} \tag{1}$$

$$L_{\rm out} = 32.44 + 20\log(f) + 20\log(S+d)$$
 (2)

$$L_{\rm in} = \alpha d \tag{3}$$

$$L_{\rm tw} = W_{\rm e} + WG_{\rm e} \left(1 - \frac{D}{s}\right)^2$$
$$= W_{\rm e} + WG_{\rm e} \left(1 - \cos(\theta)\right)^2$$

$$= W_e + WG_e(1 - \cos(\theta))^2$$
(4)

ここで、fは搬送周波数、Sは BS から建物窓中心まで の距離、dは窓中心から MS までの距離、Dは BS から 建物壁面までの距離になる。これらのパラメータの位 置関係を図 2 に示す。 α , W_e , WG_e はモデルパラメー タであり、 W_e は建物正面方向における建物侵入損失、 WG_e は電波の侵入角度が変化した際の建物侵入付加損 失を表す。

本研究プロジェクトでは、電波の建物侵入損失について水平方位角方向と仰角方向の角度特性についてモデリングするため、COST231 BEL モデルを下記の通り3次元に拡張する手法を提案した。

$$L'_{tw} = W_{e} + WG_{e,azm}(1 - \cos(\theta_{azm}))^{n_{azm}} + WG_{e,elv}(1 - \cos(\theta_{elv}))^{n_{elv}}$$
(5)

ここで $\theta_{azm} = \cos^{-1}(D_{azm}/S)$, $\theta_{elv} = \cos^{-1}(D_{elv}/S)$ で ある。 θ_{azm} は水平面上における方位角でなくS- D_{azm} 平 面における方位角である点に注意が必要である。建物 損失の水平方向角度特性は θ_{elv} が大きな領域ではフラ ットな特性に近づくが、 θ_{azm} をこのように定義する事 で上記の特性を表現する事ができる。また、提案モデ ルでは角度特性の次数 n_{azm} 、 n_{elv} もモデルパラメータ に含んでいる。



図 2 COST231 BEL モデルの 3 次元拡張

3. 4.9GHz 帯電波伝搬実験

3.1 UAV を用いた電波伝搬測定システム

図3に本稿で用いた4.9 GHz帯電波伝搬測定シス テム外観を、図4に測定システムのブロック図を示す。 商用ソフトウェア無線プラットフォームであるEttus Research 社製 USRP N210を用いて送受信機を構成 した。屋内の送信機は制御用 PC で制御され、4.89 GHz の無変調連続(CW)波を連続送信する。UAV に搭載さ れる受信機は軽量化のためRaspberry Pi で制御され ており、受信信号電力を連続的に測定し、ストレージ 内に記録する。受信機は軽量化のためプラスチックケ ースに移し外部からの電波等を遮蔽するためアルミホ イルで梱包している。USRPの電源はUAV のバッテ リーと共用とし、Raspberry Pi の電源は携帯用モバイ ルバッテリーから供給した。

実験に先立って送受信機を直接接続し、ケーブル損

Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment

失を含む測定システム全体の校正を行った。受信局の 無線機及びフライトレコーダは 100Hz のサンプリン グレートでそれぞれ受信信号電力とフライトログを記 録する。各時刻の UAV 位置は、水平方向移動速度は GPS 信号から、垂直方向移動距離は気圧計の値から算 出し、飛行開始の各地点での値からの差分で定義した。





図4 開発した UAV 伝搬測定システムブロック図

3.2 4.9GHz 帯電波伝搬実験

4.9 GHz 帯の建物侵入損失特性を明らかにするため、 大学キャンパス内で伝搬測定を行った。建物の種類が 伝搬特性に与える影響を調べるため、図 5(a)-(c)に示す 研究棟と図 5(d)-(f)に示すカフェテリア内ラウンジに おいてそれぞれ実験を行った。研究棟での測定では、 MS 位置は 6F の会議室の窓から 0.4m、2.4m、4.4m の 3 地点設定した。また、MS アンテナ高は床面から 1.7 m とした。 カフェテリアは一部の窓枠や柱部を除 いて側面はガラス張りとなっている。MS はラウンジ の中央地点に設置した。研究棟・ラウンジとも建物前 は芝生となっており、研究棟環境では南東方向へ、カ フェテリア環境では北西方向への緩やかな上りの傾斜 となっている。

屋外の UAV 局を仮想的な BS とし、様々な方向か ら電波が到来する場合の建物侵入損失を測定した。測 定コースは建物正面から 15 m 離れた地点から建物と 平行に 20 m 分設定した。測定コースに沿って 2 m 毎 に測定点を設定した。測定の際には UAV を各測定点 に設置し、高度約 15 m までゆっくり上昇させた後に 降下させた。 飛行中の UAV の位置は上述したように UAV のフライトログデータより確認し伝搬測定デー タと合わせて処理を行った。測定コース上の全測定点 で同様の測定を行う事により、建物正面の水平 20 m× 高さ 15 m の測定平面における受信電力を測定した。 他の測定パラメータを表 1 に示す。

得られた受信電力データに対し、水平方向2m、垂 直方向1mの窓長を用いて移動平均を計算し測定平面 内における伝搬損失分布を算出した。また最尤推定規 範により、測定結果より提案する BEL モデルのパラ メータを推定した。

表1 測定パラメータ

Radio equipment					
Center frequency	4.89 GHz				
Transmit power	11.5 dBm				
Transmit signal	CW				
Receiver dynamic range	From -120 dBm to -30 dBm				
Tx/Rx antennas	Dipole (2.14 dBi)				
Polarization	Vertical polarization				
Antenna height (UAV)	From 0 m to 15 m				
Indoor floor height	20 m (building), 7 m (cafeteria)				
Antenna height (indoor)	1.7 m from floor				
Receiver sampling rate	100 Hz				
Moving average	2 m (horizontal) 1 m (vertical)				
UAV equipment					
Flight controller	Flight controller DJI NAZA-M v2				
Flight recorder	DJI iOSD MARK II				
UAV sensor recording rate	100 Hz				

Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment



図5 4.9GHz带電波伝搬実験概要

3.3 4.9GHz 帯電波伝搬実験結果

研究棟における測定平面での受信電力分布を図6に示 す。屋内 MS の位置関係も付記する。図 6(a)が測定結果、 (b)が提案モデルによる予測値である。受信電力は BS が MS の位置に近づくにつれて急激に上昇した。水平方向 の受信電力特性に着目した場合、高高度エリアでは低高 度エリアよりも急激に受信電力が変化している事が分かる。 垂直方向の受信電力特性も同様の傾向が見られた。提案 BEL モデルでは、このような建物侵入損失の角度特性が 良く表現できている事が分かる。

本測定による BEL モデルパラメータ推定結果を表 2 に 示す。比較のため、5.25GHz で行われた既存研究[4]の 解析結果も示す。提案手法では、正面方向の建物侵入損 失Weは 5dB から 6dB 程度であり、既存文献[4]でのガラ ス窓における侵入損失とほぼ同程度であった。建物侵入 損失の水平方向角度依存性We,azmは研究棟では文献[4] とほぼ同程度であったが、カフェテリアではほぼ 0dB であ った。これはカフェテリアがガラス張りの円形のレイアウトに なっており、水平方向に対してはほぼ均質な伝搬環境に なっている事による。研究棟でも垂直方向角度依存性 W_{e,elv}はW_{e,azm}よりも大きいが、これは窓は一般的に横長 の形状であり、垂直方向の回折をより高い頻度で受ける事 によると思われる。このような水平・垂直方向で異なる建物 侵入損失特性を表現するためには、BEL モデルの 3 次 元拡張が必須である。図 6(c)に従来の COST231 モデル と提案モデルによるモデル誤差 CDFを示す。提案手法で はモデル誤差を 3dB 以下に改善できる事が分かる。

4. まとめ・将来展望

本研究プロジェクトでは、従来明らかにされてこな かった高所の電波伝搬特性を解明するために、UAV を 用いた電波伝搬測定システムを開発した。開発したシ ステムを用い、大学キャンパス内で 4.9GHz 帯 電波伝 搬損失測定を行った。様々な方向から到来する電波の 建物侵入損失特性の解析を行い、COST231 BEL モデ ルの3次元拡張方式を提案した。提案モデルは水平・

Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment

	Concrete wall	Glass window	Building	Cafeteria	Building	Cafeteria
Parameters		(5.05 CIL) [4]	(COCT 221)	(COCT 221)	Dunung	Carcteria
	(5.25 GHz) [4]	(5.25 GHz) [4]	(COST 231)	(COST 231)	(proposal)	(proposal)
$W_{\rm e}$ [dB]	22	6	10	18	6	5
$WG_{e,azm}$ [dB]	26	15	46	0	21	0
$WG_{\rm e,elv}$ [dB]	—	-			37	47
$n_{ m azm}$	2	2	2	2	0.9	2
$n_{ m elv}$	—	—			0.9	0.3
$\alpha \text{ [dB/m]}$	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6

表2 -	モデル	ノパラメ・	ータ推定	結果
------	-----	-------	------	----



図6 測定結果((a)受信電力分布(研究棟,実測), (b) 受信電力分布(研究棟,モデル), (c)モデル誤差CDF分布)

垂直の様々な方向から到来する電波の建物侵入損失を 精度良く予測する事でき、都市部等で求められている 3次元的なサービスエリア設計に利用される事が期待 される。

今後の展望としては、より精密な UAV の飛行制御・ 飛行位置の記録を行う事ができるようシステムを改良 し、測定の精度と信頼性を向上する予定である、また 指向性アンテナを用いた測定を組み合わせる事で、電 波の伝搬経路やその伝搬メカニズムの解明を行う予定 である。

用語解説

- *1 Building Entry Loss: 電波が建物外から建物内に 伝わる際に生じる電力損失
- *2 チャネルサウンダ:計測用の無線信号を送信し、受 信側での受信信号特性から電波の伝搬特性を計測 する装置

参考文献

[1] H. Omote, M. Miyashita, and R. Yamaguchi,

"Measurement of timespatial characteristics between indoor spaces in different los buildings,"in Proceedings of 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Nov 2015, pp. 1– 4.

- [2] J. Medbo, J. Furuskog, M. Riback, and J. E. Berg, "Multi-frequency path loss in an outdoor to indoor macro cellular scenario," in 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, March 2009, pp. 3601–3605.
- [3] H. Okamoto, K. Kitao, and S. Ichitsubo, "Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Prediction in 800-MHz to 8-GHz Band for an Urban Area," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 3, pp. 1059–1067, March 2009.
- [4] M. Alatossava, E. Suikkanen, J. M. H. Veli-Matti, and J. Ylitalo, "Extension of COST 231 Path Loss Model in Outdoor-to-Indoor Environment to 3.7 GHz and 5.25 GHz," in Int. Symp. Wireless Pers. Multimedia Commun., Sep. 2008, pp. 1–4.

Radio Propagation Measurement by UAV-based System and Building Entry Loss Modelling in High Altitude Environment

- [5] C. 231, COST Action 231 Digital mobile radio towards future generation systems - Final report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999.
- [6] ITU-R, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. Recommendation ITU-R P.1238-7, 2012. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/RREC-P.1238/

関連文献

- [1] Kentaro Saito. Qiwei Fan, Nopphon Keerativoranan, and Jun-ichi Takada, "Vertical Horizontal Building and Entry Loss Measurement in 4.9 GHz Band by Unmanned Aerial Vehicle," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 8, no. 2, pp. 444-447, April 2019.
- Kentaro Saito, Qiwei Fan, Nopphon Keerativoranan, and Jun-ichi Takada, "Site-Specific Propagation Loss Prediction in 4.9 GHz band Outdoor-to-Indoor Scenario", MDPI Electronics Journal 2019, 8(12), 1398, pp 1-16, Nov 2019.
- Kentaro Saito, Qiwei Fan, Nopphon Keerativoranan, Jun-ichi Takada, "4.9 GHz Band Outdoor to Indoor Propagation Loss Analysis in High Building Environment Using Unmanned Aerial Vehicle", 2019
 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2019.
- [4] Kentaro Saito, Qiwei Fan, Nopphon Keerativoranan, Jun-ichi Takada, "4.9 GHz band Outdoor-to-Indoor Radio Propagation Measurement by an Unmanned Aerial Vehicle", IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM) 2019, Aug. 2018.
- [5] Kentaro Saito, Qiwei Fan, Nopphon Keerativoranan, Jun-ichi Takada, "Vertical and Horizontal Building Entry Loss Measurement in 4.9 GHz Band by Unmanned Aerial Vehicle", COST Inclusive Radio

Communication Networks for 5G and Beyond (IRACON), 11th MCM, Sep. 2019.

- [6] 齋藤 健太郎, ハン キイ, キラティウォラナンノッポン, 高田潤一. "Unmanned Aerial Vehicleを用いた 4.9GHz帯屋外・屋内電波伝搬測定",電子情報通 信学会ソサイエティ大会, Sep. 2017.
- [7] 齋藤 健太郎, ハン キイ, キラティウォラナン ノッポン, 高田 潤一, "Unmanned Aerial Vehicleを用いた4.9GHz帯屋外・屋内電波伝搬損失測定"電子情報通信学会 技術研究報告(短距離無線通信), Vol. 117, No. 178, pp. 25-30, Jul. 2017.
- [8] ハン キイ, 齋藤 健太郎, 高田 潤一, "Unmanned Aerial Vehicleを用いた2.4GHz帯屋外-屋内電波伝 搬測定", 電子情報通信学会 技術研究報告(短距 離無線通信) -- (移動通信ワークショップ), Vol. 116, No. 481, pp. 129-133, Feb. 2017.

この研究は、平成28年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成29~令和元年度に実施されたものです。