

## 複数周波数帯同時利用時の屋内電波伝搬に関する検討

寺島 裕樹<sup>†</sup> 橋本 綾<sup>†</sup> 児玉 昭宣<sup>†</sup> 周東 雅之<sup>†</sup> 雨澤 泰治<sup>†</sup> 佐藤 慎一<sup>†</sup>

<sup>†</sup>株式会社モバイルテクノ 〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい4-4-5

E-mail: <sup>†</sup> {terashima.yuki, togura.aya, kodama.akinobu, suto.masayuki, amezawa.yasu, sato\_shinichi}@jp.fujitsu.com

**あらまし** ISM帯においては、無線LANの利用拡大に加えてIoT/M2Mの利活用が積極的に進められていることからトラフィックが急増し周波数が逼迫することが懸念されている。そこで、単一のシステムにおいて複数周波数帯域を柔軟かつ同時に利用することで無線リソースを有効に活用し、周波数利用効率の向上を図ることが求められている。複数周波数帯を同時にかつ効果的に利用するためには、複数周波数帯同時利用時の周波数帯毎の電波伝搬特性を把握することが重要である。本稿では、複数周波数帯同時利用時の電波伝搬特性を電波暗室及び屋内環境を模擬したシールドルームで測定したので報告する。

**キーワード** ISM帯, 無線LAN, 屋内電波伝搬, 複数周波数同時利用

### A Study on Indoor Radio Propagation Employing Multiband Simultaneous Transmission

Yuki TERASHIMA<sup>†</sup> Aya HASHIMOTO<sup>†</sup> Akinobu KODAMA<sup>†</sup> Masayuki SUTO<sup>†</sup>

Yasuharu AMEZAWA<sup>†</sup> and Shinichi SATO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Mobile Techno Corp. 4-4-5 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa, 220-0012 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {terashima.yuki, togura.aya, kodama.akinobu, suto.masayuki, amezawa.yasu, sato.shinichi}@jp.fujitsu.com

**Abstract** The spectrum shortage of the industrial, scientific and medical radio bands is concerned, since the utilization of internet of things and machine to machine communications has been actively promoted, in addition to expanding the use of wireless local area network. It is required to effectively utilize spectrum resources employing multiple frequency bands flexibly and simultaneously to improve spectral efficiency. In order to employ multiple frequency bands simultaneously and effectively, it is important to grasp radio propagation characteristics when employing multiple frequency bands simultaneously. In this paper, we report radio propagation characteristics employing multiple frequency bands simultaneous transmission in an anechoic chamber and a shielded room simulating an indoor environment.

**Keywords** ISM band, Wireless LAN, indoor radio propagation, multiband simultaneous transmission

#### 1. はじめに

無線LANの利用拡大に加え、スマートフォンの普及によるモバイルトラフィックの増大により無線LANへのオフロードが進展し、ISM帯でのトラフィックが急増している。また、近年ではスマートメータやセンサネットワーク等のIoT/M2Mの利活用が進められ、これらの周波数帯の更なるトラフィック増が懸念され、周波数利用効率の向上が課題となっている[1]。周波数利用効率を向上させる技術として、複数のチャネルを束ねるチャネルボンディング技術等が実用化されてきているが、単一の周波数帯の中での工夫にとどまっている[2]。また、異種の無線通信システムを上位レイヤで制御し組み合わせることにより、複数の周波数帯を利用するヘテロロジニアスネットワークが検討されているが、無線通信システムが複数必要になることに加えて、データの振り分け等をする装置も必要となる[3]。

そこで、単一のシステムにおいて複数周波数帯を柔軟かつ同時に利用することで無線リソースを有効に活用し、周波数利用効率の向上を図ることが求められて

いる[4]。同時に複数周波数帯を有効活用することで、従来までの単一周波数帯のみを利用していた場合と比較し、周波数利用効率の向上が期待できる。

複数周波数帯を同時にかつ効果的に利用するためには、複数周波数帯同時利用時の周波数帯毎の電波伝搬特性を把握することが重要である。単一周波数帯での電波伝搬特性の報告[5][6][7][8]は多々あり、IEEE802.11 TGnでは5GHz帯や2.4GHz帯における屋内伝搬特性を統計的に解析したチャネルモデルを定義している[9]。また、無線LANが利用されるオフィスや住宅などの屋内環境においては、人が動くことにより電波伝搬特性が変動することが報告されている[10][11]。しかし、複数周波数帯同時利用時の屋内電波伝搬特性については明確にされていない。

本稿では、複数周波数帯同時利用時の電波伝搬特性を電波暗室及び屋内環境を模擬したシールドルームで測定したので報告する。また、電波伝搬測定結果から複数周波数帯同時利用システムの効果について考察する。

## 2. 複数周波数帯同時利用システム

複数周波数帯同時利用システムの概念図を図1に示す。複数周波数帯同時利用システムは、単一のシステムにおいて、無線リソースの有効活用を目的に、複数の周波数帯を柔軟かつ同時に利用することで、周波数利用効率を向上させることができるシステムである。複数周波数を同時利用することで、一括受信処理が可能となり、例えば周波数帯毎の受信電力差を利用したダイバーシチ効果により同期性能や誤り制御能力の向上が期待できる。複数周波数帯を同時利用する事による効果を把握するためには、複数周波数帯同時利用時の周波数帯毎の電波伝搬特性を把握することが重要である。

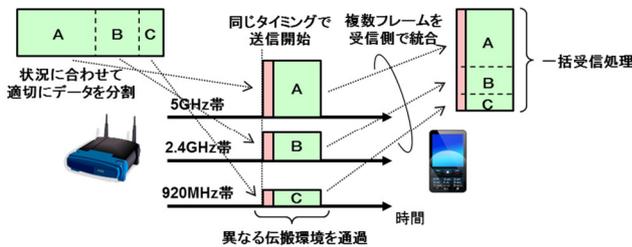


図1 複数周波数帯同時利用システム概念図

## 3. 電波伝搬測定

### 3.1. 測定概要

複数周波数帯同時利用システムにおける電波伝搬特性を把握するために、図2に示す構成で電波伝搬測定を実施した。送信機は、3台のベクトル信号発生器を用い、各ベクトル信号発生器間で基準発振器を共通とし、送信タイミングをトリガにより制御し同一時刻で送信可能な構成とした。受信機は、3台のシグナルアナライザを用い、各シグナルアナライザ間で基準信号発振器を共通とし、受信タイミングをPCから制御し同時受信可能な構成とした。同時に送受信された各周波数帯の信号はPCでオフライン解析し、複数周波数帯同時利用時の電波伝搬特性を調査した。

無線LANが主に屋内で利用されることから、複数の反射物(テーブル、棚、精密機器など)を配置して受信アンテナに反射波が複数到来する屋内模擬環境をシールドルームに作成した。また、基本的な電波伝搬特性を取得するために電波暗室での測定も実施した。電波暗室の見取図を図3に、シールドルームの見取図を図4に示す。

また測定した周波数帯は、920MHz、2.4GHz、5.4GHzの3周波数帯とした。

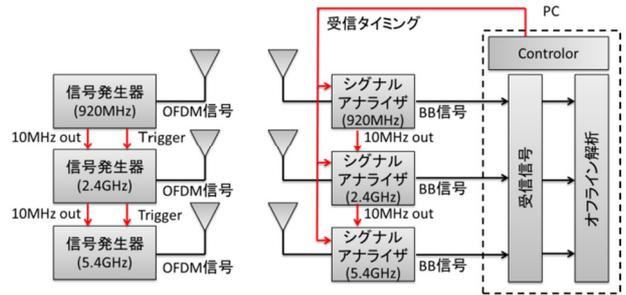


図2 電波伝搬測定の構成

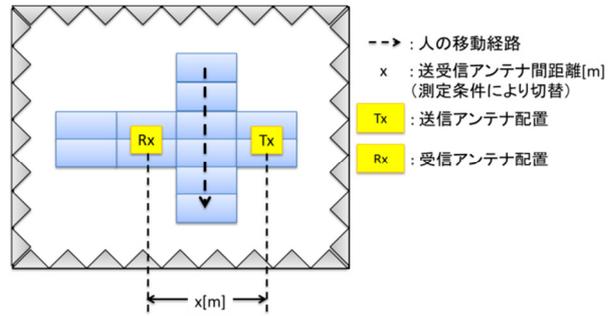


図3 電波暗室

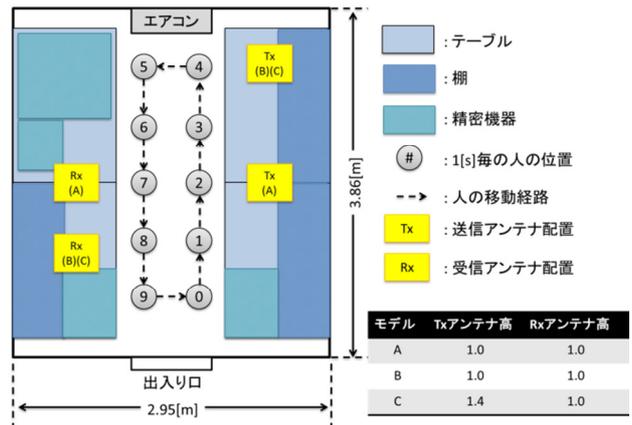


図4 シールドルーム(屋内模擬環境モデル)

### 3.2. 距離減衰特性

電波暗室において測定した距離減衰特性を図5に示す。同図において自由空間距離減衰の理論式と比較を行った。自由空間の距離減衰の理論式は

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

で表される[12]。ここで、 $d$ はアンテナ間距離[m]、 $\lambda$ は波長[m]である。

図5より、複数周波数帯同時利用においても周波数帯毎の距離減衰特性は自由空間の距離減衰の理論式とほぼ一致することを確認した。このことより、平均的には距離減衰量の小さな低い周波数帯を有効活用することでダイバーシチ効果が期待できると考えられる。

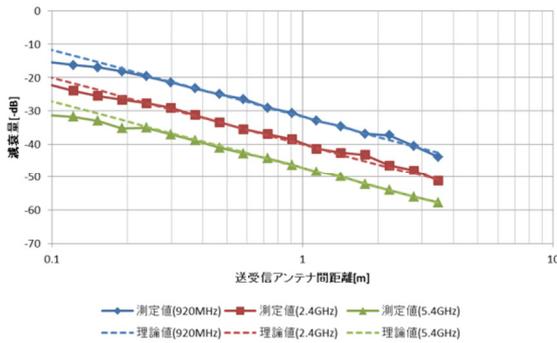


図5 1波モデルの距離減衰特性

### 3.3. 複数波モデル減衰特性

電波暗室において大地反射2波モデルの環境で距離減衰を測定し、理論式と比較した。大地反射2波モデルの距離減衰の理論値は

$$L(d) = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \left| \sin \left( \frac{\pi 2h_t h_r}{d} \right) \right| \right)^2 \right)$$

で表される[12]。ここで、 $d$ はアンテナ間距離[m]、 $\lambda$ は波長[m]、 $h_t$ は送信アンテナ高[m]、 $h_r$ は受信アンテナ高[m]である。大地反射2波モデルの減衰特性の測定結果を図6に示す。図6より、大地反射2波モデルにおいても理論式とほぼ一致することが確認できた。この結果から、周波数帯毎のパスの経路や伝搬遅延時間はほぼ同一であることが確認できた。

更に多くの波の合成の影響を調べるために、シールドルーム内において送受信アンテナ間距離に対する受信電力の測定を行った。測定は送受信アンテナの位置のみ変更し、人や物の周囲環境の変化はない静的環境で測定した。測定結果を図7に示す。送受信アンテナ間距離に対する受信電力の変動は周波数間で無相関であり、受信電力変動は周波数が高いほど急峻であることが確認できた。これは、受信信号が多くの素波の合成波であり、合成される素波の位相は波長により異なるためだと考えられる。このことより、単一周波数で通信する場合、その周波数帯の減衰量が大きいと通信ができなくなってしまうが、複数周波数帯を同時利用することでより品質の高い通信路(周波数帯)を積極的に利用できることを確認した。

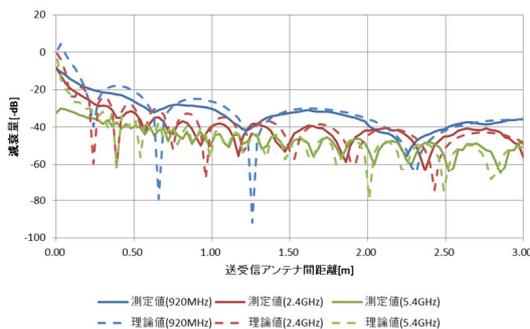


図6 大地反射2波モデルの距離減衰特性

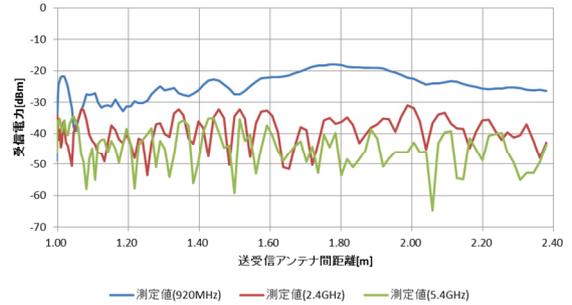


図7 屋内模擬環境モデルの受信電力特性

### 3.4. 直接波遮蔽の影響

電波暗室内で1波モデルの環境を構築し、人が送受信アンテナ間を遮る方向に移動した場合の減衰量を図8に示す。送受信アンテナ間距離は1.8[m]とした。図中には第一フレネル半径を図示している。第一フレネル半径は

$$R_n = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

で表され、 $\lambda$ は波長[m]、 $d_1$ は送信点から送受信アンテナと移動方向の交点、 $d_2$ は受信点から送受信アンテナと移動方向の交点である[12]。

人の遮蔽位置が第一フレネル半径内に入ると減衰量が大きくなることが確認できた。1つの波に着目すると複数周波数帯同時利用システムでは、複数周波数帯の電力が同時に低下することになるが、3.3章で確認した通り、複数波が到来するような環境であれば、波長の違いにより同時に電力が低下することは無いと考えられる。

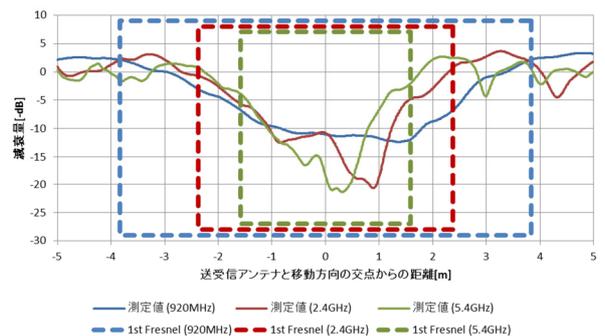


図8 1波モデルの人の遮蔽の影響

### 3.5. 屋内模擬環境における電波伝搬特性

シールドルーム内に構築した屋内模擬環境において、人が移動することによる環境変化が電波伝搬特性に与える影響を測定した。人の動きは図4に示す①~⑨までを移動速度約0.6[m/s]で2周し、約20[s]間の測定を実施した。

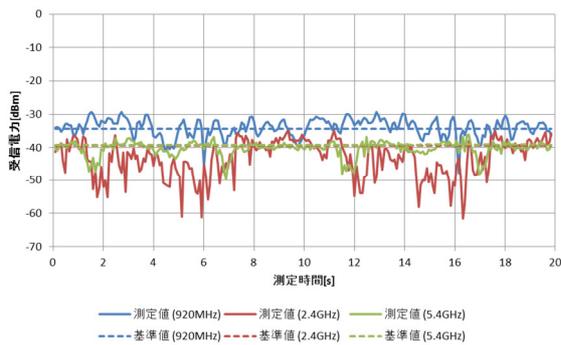
送受信アンテナ配置を変更し、3つの異なる模擬環境(モデル(A), (B), (C))で測定し解析をした。

図 9 に時間対受信電力特性を示す．図中の基準値は人がいないときの受信電力を表している．図 9 の結果より人の移動による受信電力の増減は，周波数帯間で相関が無いことがわかる．人の移動により遮る波への影響は 3.4 章で測定した通り同一の傾向になるが，受信電力は受信アンテナで複数の波が合成される際の位相に関係するため，波長の違いが受信電力を無相関に変動させると考えられる．また，人の遮蔽による受信電力の変動は，環境間で異なることがわかる．これは送受信アンテナ配置を変えることで直接波と反射波の経路が変わり，人が遮るパスが変化しているためだと考えられる．このことから，人の移動などによる環境の変化があったとしても，複数周波数帯を同時利用することでより品質の高い通信路(周波数帯)を積極的に利用できることを確認した．

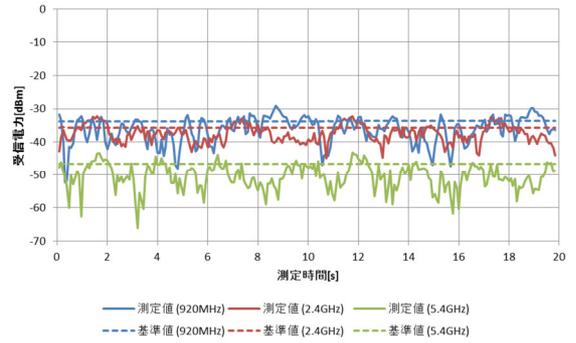
図 10 に受信信号から推定した伝搬路推定値の自己相関特性を示す．伝搬路推定値の自己相関特性は

$$\rho(\tau) = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{k=1}^{N_{sc}} \frac{\sum_{n=1}^N h_{kn}(0)h_{kn}^*(\tau)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |h_{kn}(0)|^2 \sum_{n=1}^N |h_{kn}(\tau)|^2}}$$

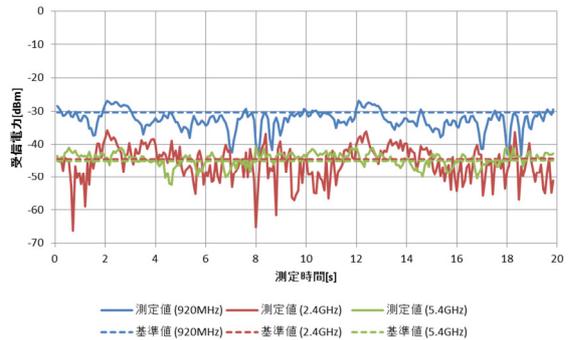
で表される[10]．ここで， $k$ はサブキャリアインデックス ( $N_{sc}$ 個)， $n$ は時間サンプルのインデックス ( $N$ 個)， $h_{kn}(0)$ と  $h_{kn}(\tau)$ は基準時刻 0 と基準時刻から時間 $\tau$ だけ離れた周波数応答である．モデル(A)(C)では周波数が高いほどコヒーレント時間が短い傾向になっているが，モデル(B)では低周波数のコヒーレント時間が高周波数に漸近している．これは，送受信アンテナの配置によって受信電力に影響しやすいパスの位置が変わり，人の移動経路内の変動が周波数毎に異なることが原因と考えられる．



(a) モデル(A)



(b) モデル(B)



(c) モデル(C)

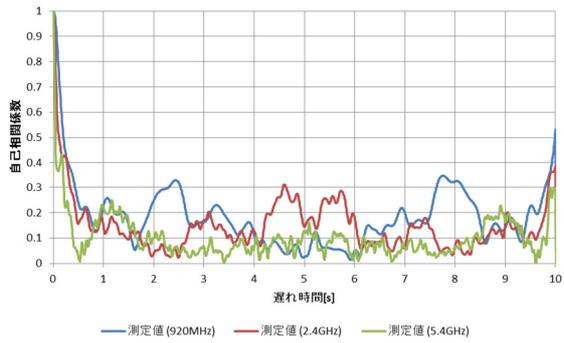
### 図 9 屋内模擬環境モデルの時間対受信電力特性

図 11 にドップラスペクトル特性を示す．ドップラスペクトル特性は，自己相関特性の周波数解析により得られる．一般的に屋内環境での人の移動によるドップラスペクトルは，Bell shape に従うと言われており理論式は，

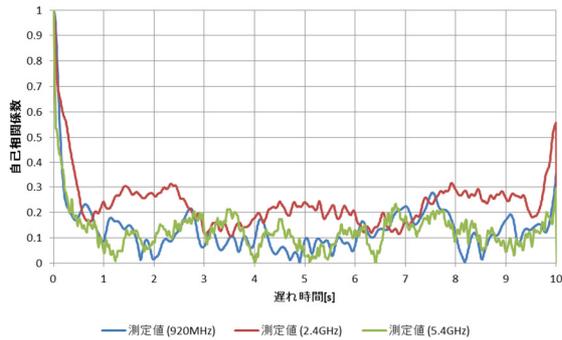
$$S(f) = \frac{1}{1 + A \left(\frac{f}{f_d}\right)^2} = \frac{1}{1 + 9 \left(\frac{f}{v_0/\lambda}\right)^2}$$

で表される[9]．ここで， $\lambda$ は波長[m]， $v_0$ は環境の変動速度である．理論式とのカーブフィッティングにより求めた環境の変動速度を表 1 に示す．この際，ドップラスペクトルは平均電力で正規化し，DC キャリアを除いた $\pm 10$ [Hz]の範囲で最小二乗法を適用した．

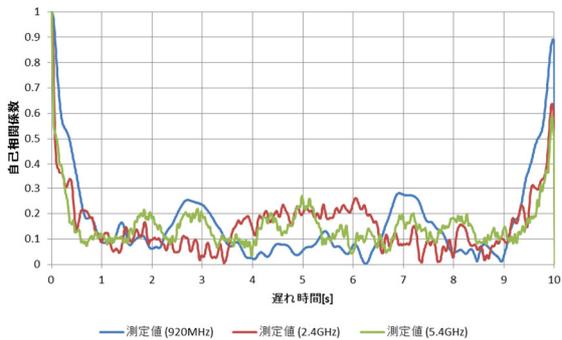
表 1 から分かる通り，環境の変動速度は比較的小さいことを確認した．このことから，単一周波数で通信する場合は，その周波数帯の受信電力が落ち込んだ場合にある程度の期間受信品質が低い状態が継続してしまうが，複数周波数帯同時利用では受信品質の良い周波数帯を選択や合成することで，受信品質が低い状態が継続することの回避が可能になると考えられる．



(a) モデル(A)

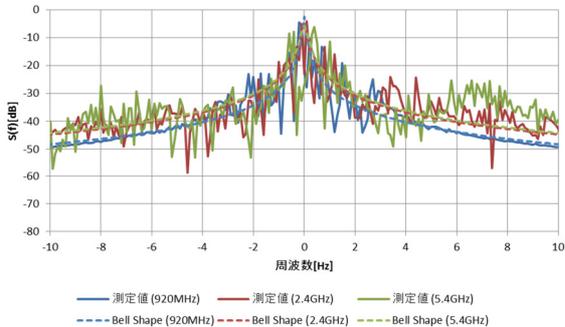


(b) モデル(B)

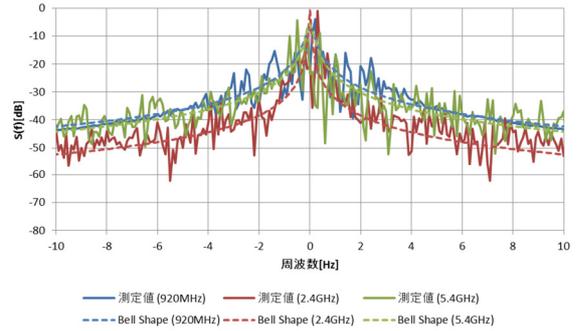


(c) モデル(C)

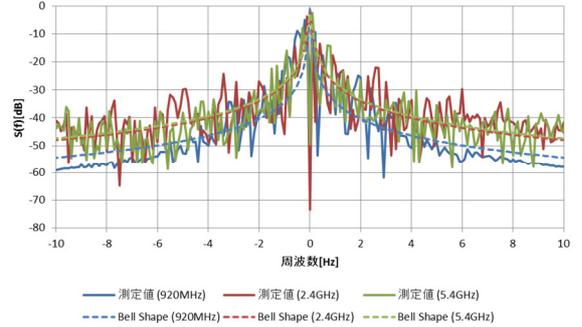
図 10 屋内模擬環境モデルの自己相関特性



(a) モデル(A)



(b) モデル(B)



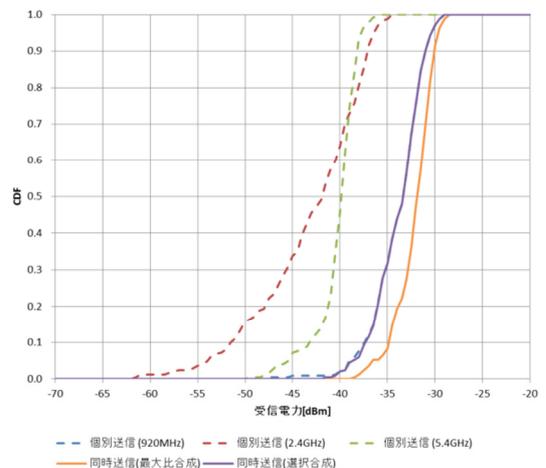
(c) モデル(C)

図 11 屋内模擬環境モデルのドップラスペクトル

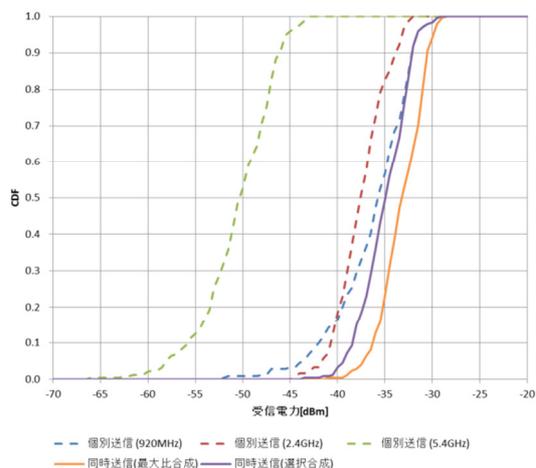
表 1 屋内模擬環境毎の変動速度[m/s]

	920[MHz]	2.4[GHz]	5.4[GHz]
モデル(A)	0.05	0.04	0.02
モデル(B)	0.18	0.01	0.02
モデル(C)	0.02	0.02	0.01

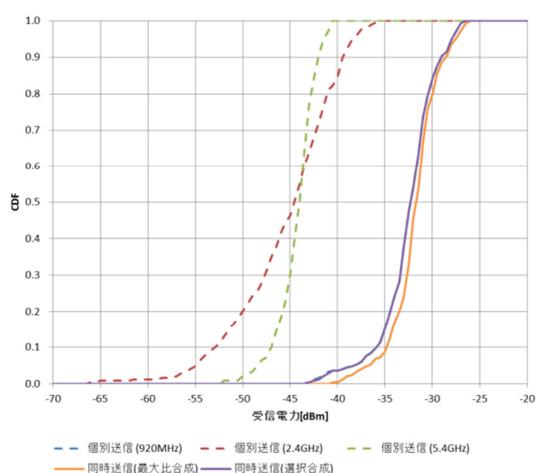
図 12 に 920MHz, 2.4GHz, 5.4GHz の周波数を選択合成した場合と最大比合成した場合の受信電力の分布を示す. 環境によって改善度は異なるが, モデル(B)のように 920MHz 帯と 2.5GHz 帯の受信電力が漸近している場合には, 下位 5% で約 5dB 改善していることから複数周波数帯同時利用の効果が確認できた.



(a)モデル(A)



(b) モデル(B)



(c) モデル(C)

図 12 屋内模擬環境モデルの周波数ダイバーシチ効果

#### 4. まとめ

本稿では、920MHz、2.4GHz、5.4GHzの複数周波数帯を同時利用した場合の電波伝搬測定結果を示した。

人の影響がない静的環境では、平均的には距離減衰量の小さな低い周波数帯を有効活用することでダイバーシチ効果が期待でき、複数反射波がある環境では品質の高い通信路(周波数帯)を積極的に利用できることを確認した。また、周波数帯毎のパスの経路や伝搬遅延時間はほぼ同一であることが確認できた。

人の影響がある動的環境では、人の移動による受信電力の増減は、環境や周波数帯間で相関が無いことが確認できた。また、環境の変動速度は比較的小さいことを確認した。このことから、単一周波数で通信する場合は、受信品質が低い状態が継続してしまうが、複数周波数帯同時利用システムは、受信品質の良い周波数帯を選択や合成できるため、受信品質が低い状態を回避することを解析的に確認した。

今後はこれらの特徴を活かした受信アルゴリズムの検討を行う予定である。

**謝辞** 本研究は総務省の研究委託「複数周波数帯域の同時利用による周波数利用効率向上技術の研究開発」により実施したものである。

#### 文 献

- [1] 総務省, “電波政策ビジョン懇談会 最終報告書,” 2014年12月.
- [2] IEEE802.11ac, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer specifications, Amendment 4: Enhancement for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz,” Dec. 2013.
- [3] 阪口 啓, 三瓶 政一, “クラウド連携ヘテロジニアスネットワークの展望,” 信学技報, no.19, pp.21-26, Feb. 2013.
- [4] 総務省, “電波資源拡大のための研究開発研究開発課題便覧,” 2016年10月.
- [5] D.M.J. Devasirvatham, et al., "Four-frequency radiowave propagation measurements of the indoor environment in a large metropolitan commercial building," Global Telecommunications Conference, vol.2, pp.1282-1286, 2-5 Dec. 1991.
- [6] E. Almazrouei, et al., "Measurement and analysis of NLOS identification metrics for WLAN systems," PIMRC, 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on, pp.280-284, 2-5 Sept. 2014.
- [7] Y. A. S. Dama, et al., "Indoor Channel Measurement and Prediction for 802.11n System," VTC Fall 2011 IEEE, pp.1-5, 5-8 Sept. 2011.
- [8] A.K. Jagannatham, V.O. Erceg, "MIMO indoor WLAN channel measurements and parameter modeling at 5.25 GHz," IEEE 60th Vehicular Technology Conference, vol.1, pp.106-110, 26-29 Sept. 2004.
- [9] V. Erceg, et al., "TGn Channel Models," doc.: IEEE 802.11-03/940r4, May 2004.
- [10] 水谷慶, 坂口啓, 高田潤一, 荒木純道, “時変動屋内 MIMO 伝搬路のドップラスペクトル解析,” 信学全大, B-1-14, Mar. 2006.
- [11] 北尾光司郎, トランゴクハオ, 今井哲朗, 大巻信貴, 奥村幸彦, “屋内環境における人体遮蔽による受信レベル変動の周波数特性,” 信学技報, vol. 115, no.450, AP2015-201, pp.59-63, 2016年2月.
- [12] 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論,” Microwave Workshop and Exhibition 2005.