

ヘテロジニアスネットワークにおける干渉量評価のための屋外、 屋内及び屋外-屋内伝搬特性測定

西森健太郎^{†a)} 小松原 祥[†] 北尾光司郎^{††b)} 今井 哲朗^{††c)}

Measurements of Propagation Characteristics on Outdoor, Indoor and
Outdoor-Indoor Environment for Evaluation on Interference
in Heterogeneous Networks

Kentaro NISHIMORI^{†a)}, Sho KOMATSUBARA[†], Koshiro KITAO^{††b)},
and Tetsuro IMAI^{††c)}

あらまし LTE-Advanced におけるヘテロジニアスネットワークでは、マクロセルのほかに周波数利用効率の向上を目的として、ピコセルやフェムトセルがマクロセル内でオーバレイされる。しかしながら、こういった同一周波数を用いるセルがマクロセル内に存在すると、セル間干渉が問題となる。マクロセル、ピコセル、フェムトセルでは、アンテナの設置形態（屋外/屋内における置局、アンテナ高など）が異なるため、アンテナの設置環境に応じた干渉量評価が必要となる。この評価のために、WINNERII や ITU-R P.1238-6 などの伝搬モデルが提案されているが、例えば、WINNERII モデルでは、マクロ-フェムトセル間の屋外伝搬特性が見通し外の場合は厳密に評価できない場合がある。そこで、本論文では、ヘテロジニアスネットワークで想定されるセルサイズが 300 m 以内における屋外-屋外間、屋外-屋内間、屋内-屋内間の電界強度測定を実施する。得られた測定結果より、伝搬損、屋内侵入損/屋内区間における伝搬損、短区間中央値の標準偏差について、WINNERII(屋外、屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルとの比較を行い、WINNERII/ITU-R P.1238-6 モデルと測定結果を用いて、干渉量評価に関するケーススタディを行う。マクロ-フェムトセル間における干渉量として、Signal to Interference plus Noise power Ratio (SINR) 特性を評価する。従来モデルに実験で得られた結果を組み合わせることで、従来モデルで厳密にカバーできない範囲である、フェムト-マクロセル間の屋外見通し外伝搬特性及び屋内侵入伝搬損を評価できるとともに、これらのパラメータが SINR 特性に与える影響が大きいことを明らかにする。

キーワード ヘテロジニアスネットワーク、フェムトセル、屋内-屋外伝搬、WINNERII モデル、SINR

1. ま え が き

近年の携帯電話や無線 LAN などの普及により、ワイヤレスシステムでは限られた周波数帯域で高速伝送を実現することが重要な課題である。最新の携帯電話システムである Long Term Evolution (LTE) の高速化システムである LTE-Advanced の無線インタフェー

スの基本検討が現在行われている。LTE-Advanced では従来のセルラ環境であるマクロセルに加え、大容量のトラフィックが集中して発生する駅周辺や屋内などのローカルエリア環境も重視した Radio Access Network (RAN) の検討が行われている [1], [2].

このローカルエリアに基地局 (Base Station : BS) を小型化して配置することにより、高トラフィックエリアをカバーできることはもちろん、BS を小型化することで低消費電力・低コスト化も実現できる。このように、大規模なサービスエリア (マクロセル) と小さなサービスエリア (ピコセル, フェムトセル) が混在して成形される RAN はヘテロジニアスネットワークと呼ばれている [3]. 一般に、Cognitive 無線で検討されているような異種システム間におけるネット

[†] 新潟大学工学部, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, 8050 Ikarashi, Nishi-ku, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} (株) NTT ドコモ, 横須賀市

NTT DOCOMO INC., 3-5 Hikari-no-oka, Yokosuka-shi, 239-8536, Japan

a) E-mail: nishimori@ie.niigata-u.ac.jp

b) E-mail: kitaok@nttdocomo.co.jp

c) E-mail: imait@nttdocomo.co.jp

ワーク構成もヘテロジーニアスネットワークと呼ばれる [4], [5] が, ここでは, LTE-Advanced という単一の無線インタフェースで RAN を構成することを前提としている [3].

マクロセルのサービスエリアが数百メートルから数キロメートルであるのに対し, フェムトやピコセルといったセル形態ではセル半径が数十メートルとなる. すなわち, ヘテロジーニアスネットワークでは, 各システムのセルサイズが異なるため, セル間干渉の影響が通常のセル形態とは異なり複雑となる. また, フェムト BS (Femto BS : F-BS) はあらかじめ登録した端末 (User Equipment : UE) のみがアクセス可能な Closed Subscriber Group (CSG) をもつことができる. 反対に, CSG 機能をもたないマクロセル UE (Macro UE : M-UE) は F-BS から干渉を受ける/干渉を与える可能性が生じる [3]. よって, M-UE と F-BS 間の干渉を本検討の対象とする.

このセル間干渉を厳密に把握するためには, 基地局の設置条件が異なるマクロセルにおける屋外伝搬, フェムトセルにおける屋内伝搬, 及びマクロ-フェムトセル間の屋外-屋内間干渉の伝搬特性を統一的に把握する必要がある. 更に, ヘテロジーニアスネットワークではマクロセルでも小セル化を行うことが前提となっており, そのセルサイズは 300 m 以下である [3]. すなわち, 比較的短い送受信間距離での伝搬特性を厳密に把握することも重要である.

このような想定を考慮した伝搬モデルが提案されている [6]. これは WINNERII モデルと呼ばれる. WINNERII モデルは LTE-Advanced のシステム評価に使用されている ITU-R M.2135 モデル [7] の基礎となっているモデルであり, 広く引用されているために採用した. また, WINNERII モデルは数十から数キロメートルの伝搬距離を考慮した場合のマクロセル, マイクロセル, 屋外-屋内伝搬などの伝搬損式と短区間中央値の標準偏差が示されている [6]. また, 屋内の伝搬モデルとして, ITU-R P.1238-6 モデルが WINNERII モデルよりも広く利用されており, このモデルを本検討では採用した. ただし, WINNERII モデルにおいて, 屋外-屋内間での干渉モデルにおいては, 屋外伝搬部分を見通し外 (Non Line of Sight : NLOS) を考えた場合, 伝搬損式がストリートセルモデルを前提として作成されている. すなわち, ヘテロジーニアスネットワークにおける干渉量評価を考える場合, 使用モデルによっては必ずしも評価に適していない場合がある.

そこで, 本論文では, マクロ-フェムトセルが比較的近くに配置される最悪条件を想定した, 屋外, 屋内及び屋外-屋内間の電界強度測定を実施した. 得られた結果について, 伝搬損, 短区間中央値の標準偏差, 及び屋外-屋内伝搬の屋内侵入損/屋内区間の伝搬損に関し, WINNER II(屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルにおける推定式と比較し, WINNER II(屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルが適用できる範囲を明らかにする. また, 測定結果と WINNER II(屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルを比較した結果を反映して, 従来モデルと測定結果を用いる F-BS→M-UE, M-UE→F-BS 間の干渉量評価に関するケーススタディを行った. この評価では, マクロ-フェムトセル間の干渉モデル (LOS/NLOS の違い) による特性及び干渉数による特性評価を行う. 干渉の評価は実際の伝搬測定より得られた結果と従来モデルのパラメータを含めた干渉量の評価を計算機シミュレーションで行った. 評価の結果から, 従来モデルだけではなく測定結果を反映したパラメータが Signal to Interference plus Noise power Ratio (SINR) 特性に与える影響が大きいことを示す. 更に, フェムトセルの送信電力を変化させ, マクロ-フェムトセル間の相互干渉を最も低減できるフェムトセルの送信電力を明らかにする.

以下, 本論文の構成を述べる. **2.** では, ヘテロジーニアスネットワーク及びセル間干渉の問題について説明する. **3.** では, WINNER II(屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルについて述べる. また, 屋外, 屋内及び屋外-屋内伝搬の受信電力特性から, 伝搬損, 屋外-屋内伝搬における屋内侵入伝搬損, 及び短区間中央値の標準偏差に関し, WINNER II(屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6(屋内) モデルと比較し, 両者の差異について考察する. **4.** では, **3.** の結果から, 従来モデルと実測結果のパラメータを用いた計算機シミュレーションによる干渉量評価を行うとともに, 干渉量を低減するためのフェムトセルの送信電力も明らかにする.

2. ヘテロジーニアスネットワークにおけるセル間干渉

2.1 ヘテロジーニアスネットワーク

図 1 にヘテロジーニアスネットワークの構成図を示す. 図 1 に示すように, 本研究ではマクロセルのセル内にマイクロセル, ピコセル, フェムトセル, 中継局

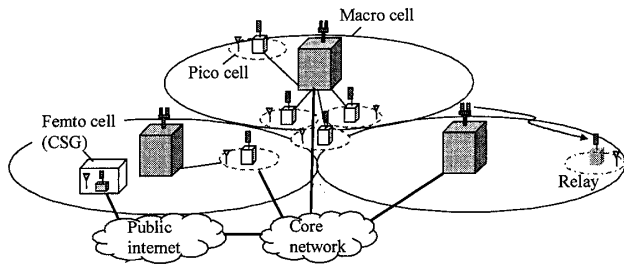


図 1 ヘテロジニアスネットワークの構成
Fig. 1 Configuration of heterogeneous networks.

が存在する環境を想定する [1]~[3]. ピコセルの役割としては, 単位周波数当りの通信容量を向上させるため小セル化を行っている. マクロセルのセル半径は数百メートル~数キロメートルであるが, 図に示すように, 数十メートルから百メートル程度のサービスエリアを対象とするピコセルがマクロセル内に配置される. また, 屋内用のシステムとしてフェムトセルが採用されている. また, サービスエリアの増大を主な目的として, 中継局(リレー)も用いられている.

2.2 ヘテロジニアスネットワークにおける課題

従来のセルラシステムでは, 例えば UE 側への干渉を考慮すると, UE と通信を行う BS (所望信号) と干渉となる BS (干渉信号) の送信電力は同じである. よって, 他セルからの干渉は BS からの距離からある程度推定できる. よって, 比較的干渉量の見積りは容易であるといえる. また, 隣接するセル間は異なる周波数を用いる周波数繰返しを行うことでこういった問題を解消してきた. ヘテロジニアスネットワークでは Pico BS (P-BS) や F-BS, 中継局などの様々な BS がマクロセルの中で混在することにより, 従来の RAN では生じないような大きなセル間干渉が発生する [3]. 図 2 に, ヘテロジニアスネットワークにおけるセル間干渉の例を示す. 図 2 に示すように, Frequency Division Duplex (FDD) システムを考えると干渉には四つのパターンがあり, F-BS から M-UE (干渉 1), M-UE から F-BS (干渉 2), M-BS から F-UE (干渉 3), F-UE から M-BS (干渉 4), への干渉である. 図 2 ではフェムトセルを対象として図示しているが, ピコセルでも同様となる.

ここで, F-BS はあらかじめ登録した UE のみがアクセスできるようにする (Closed Subscriber Group) CSG 機能をもつことができる. CSG 機能をもつ基地局 (F-BS) は, F-BS が登録した端末のみ (F-UE) と通信を行うことができる. すなわち, M-UE

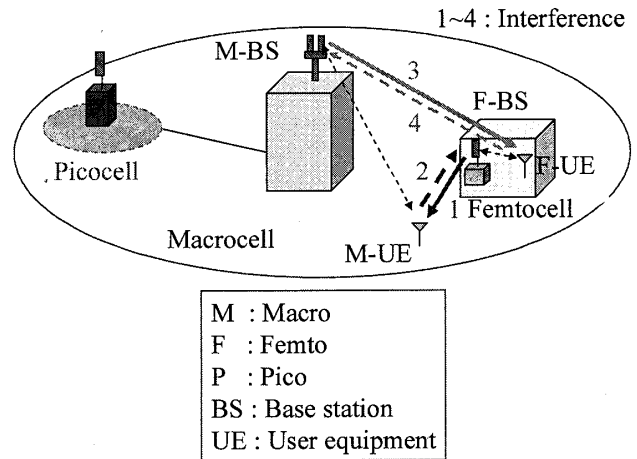


図 2 ヘテロジニアスネットワークにおけるセル間干渉
Fig. 2 Interference between cells in heterogeneous networks.

は F-BS と通信を行うことができない. ここで, M-UE と M-BS の通信周波数と F-BS が使用する通信周波数が同じとなるとこれが干渉となる (干渉 1, 2). しかも, この干渉は F-BS, M-UE の間ではチャンネル切替などの制御ができない. 一方, M-BS と F-UE の間 (干渉 3, 4) では, F-UE が干渉量に応じて, M-BS 若しくは F-BS のいずれかで通信を行うことが選択できる. よって, 先に述べた干渉のうちで, 図 2 に示す干渉 1 (F-BS から M-UE への干渉) と干渉 2 (M-UE から F-BS への干渉) が最も深刻な問題であるといえる. 一方, ピコ (フェムト) セルとマクロセルの間では干渉量に応じて, M-UE が使用するセルを切り換える方法も提案されている [9]. よって, 本検討では最も干渉問題として深刻になると予想されるマクロ-フェムトセル間における干渉 1, 2 を対象とする. 以下, WINNER II (屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6 (屋内) モデルと測定結果を比較することで, マクロ-フェムトセル間の干渉量評価に必要な伝搬パラメータを明らかにする.

3. 屋外, 屋内及び屋外-屋内伝搬における受信電力測定結果

3.1 WINNERII 及び ITU-R P.1238-6 伝搬モデル

本論文では, 測定結果と WINNERII (屋外, 屋外-屋内)/ITU-R P.1238-6 (屋内) モデルを比較, 検討する. 本節では, 本論文で使用する従来の伝搬モデルについて述べる.

まず, 屋外-屋外伝搬は, WINNERII モデルにお

ける C2(LOS/NLOS) モデルを採用した. この伝搬損失式は, 高所-低所間の典型的なセルラ環境の伝搬損失を表す式であり, この伝搬損失は LOS($L_{C2,LOS}$), NLOS($L_{C2,NLOS}$) でそれぞれ以下の式で与えることができる.

$$L_{C2,LOS} = 26.0 \log_{10}(d) + 39.0 \\ + 20.0 \log_{10}(f_c[\text{GHz}]/5.0) \\ (10 \text{ m} < d < d_{BP}), \quad (1)$$

$$L_{C2,NLOS} = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) \\ + 34.46 + 5.83 \log_{10}(h_{BS}) \\ + 23.0 \log_{10}(f_c[\text{GHz}]/5.0) \\ (50 \text{ m} < d < 5 \text{ km}), \quad (2)$$

ここで, d , f_c はそれぞれ送受信間距離 [m], 搬送波周波数である. h_{BS} は基地局アンテナであり, 本検討では 22.5 m となる. d_{BP} はブレイクポイント値であり, $d_{BP} = 4h_{BS}h_{UE}f_c[\text{Hz}]/c$ ($c = 3 \times 10^8$ [m/s]) で与えられる. 本検討では, 端末アンテナ高 h_{UE} が 1.0 m, 測定周波数が $f_c = 2.2$ [GHz] となるため, $d_{BP} = 660$ m となる.

屋外-屋内間の伝搬損失式はモデル A2 を採用した. A2 における伝搬損失 L_{A2} は以下のとおりである.

$$L_{A2} = L_b(d') + L_{tw} + L_{in} \\ (d' = d_{out} + d_{in}), \quad (3)$$

$$L_b(d') = L_{B1,LOS}(d') \\ (3 \text{ m} < d_{out} + d_{in} < 1000 \text{ m}), \quad (4)$$

$$L_{tw} = 14 + 15(1 - \cos \theta)^2, \quad (5)$$

$$L_{in} = 0.5d_{in}, \quad (6)$$

ここで, L_b , L_{tw} , L_{in} はそれぞれ BS から UE までの伝搬損失, 屋内における侵入損失, 屋内における伝搬損失を表す. d_{out} , d_{in} はそれぞれ屋外-屋内間の距離, 屋内での距離に相当し, $d_{out} + d_{in}$ が M-UE と F-BS の距離となる. 屋内における侵入損失について, θ は入射角となる. ここで, 式 (4) において, $d_{out} + d_{in}$ が送受信距離となっている. よって, 屋外-屋内伝搬における屋内侵入損失/屋内区間の伝搬損失のみを考える場合, 式 (3) から屋外区間における伝搬損失 $L_b(d_{out})$ を差し引いた値を求めることでこれを得ることができる.

$L_{B1,LOS}$ は屋外環境において, マイクロセルの LOS 環境で用いられている式であり, 以下の式で与えら

表 1 WINNERII/ITU-R P.1238-6 モデルにおける短区間中央値の標準偏差

Table 1 Standard deviation of small fading by WINNERII/ITU-R P.1238-6 models.

Model	Standard deviation [dB]
WINNERII, C2 (Macro cell, LOS)	4
WINNERII, C2 (Macro cell, NLOS)	8
WINNERII, B1 (Micro cell, LOS)	3
WINNERII, A2 (Outdoor to Indoor)	7
ITU-R P.1238-6, Indoor	8~10

れる.

$$L_{B1,LOS} = 22.7 \log_{10}(d) + 41.0 \\ + 20 \log_{10}(f_c[\text{GHz}]/5.0) \\ (10 \text{ m} < d < d_{BP}), \quad (7)$$

ここで, d_{BP} はブレイクポイントとなる距離であり, この場合の基地局アンテナ高は 16 m であり, $d_{BP} = 470$ m となる.

B1 の NLOS モデルについては, ストリートセルモデルを対象としており, 道路幅や交差点からの距離などのパラメータが存在するため, 今回の実験と比較することは困難である. そこで, B1 の NLOS モデルでは, B1 の LOS モデルに建物における回折波で L_d [dB] の伝搬損失が追加されるものと定義することとした [10].

最後に, 屋内-屋内間の伝搬損失式については, ITU-R の P.1238-6 モデルを採用した [8]. これは以下の式で与えることができる.

$$L_{Indoor} = 10\alpha \log_{10}(d) + 20.0 \log_{10}(f_c[\text{MHz}]) \\ - 28.0 + L_f, \quad (8)$$

ここで, α は伝搬損失係数であり, 2 GHz 帯では, 2.8~3.0 の範囲で与えられる. L_f は基地局と端末の階数が違う場合の天井・床による伝搬損失である.

また, 表 1 に WINNERII モデル及び ITU-R の P.1238-6 モデルで示されている短区間中央値の標準偏差を示す.

3.2 測定環境

図 3 に屋外における測定環境を示す. 測定は新潟大学の工学部で行った. M-UE は図 3 のコース 1 から 10(①~⑩) を一定速度で歩行した. M-UE は図 3 に示す距離を各コースで移動している. M-BS と F-BS は図 3 の屋上 (6F) と 4F にそれぞれ配置した. M-BS

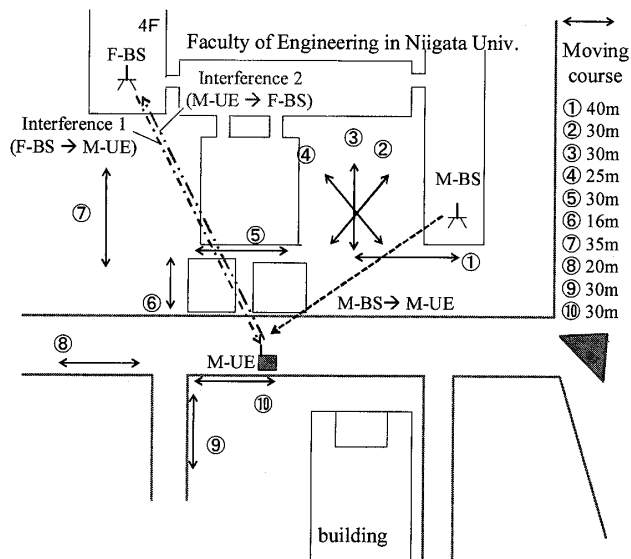


図 3 屋外における測定環境
Fig. 3 Measurement environment in outdoor scenario.

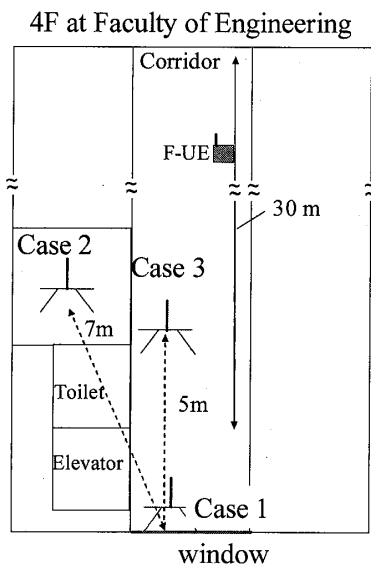


図 4 屋内における測定環境
Fig. 4 Measurement environment in indoor scenario.

と F-BS のアンテナ高はそれぞれ 22.5, 16.0m である。M-UE のアンテナ高は 1.0m である。干渉 1(F-BS から M-UE), 干渉 2(M-UE から F-BS) の特性は両者の間の受信電力を取得することで得た。なお, M-UE と M-BS, F-BS の間の距離の範囲はそれぞれ約 40~140, 40~100m となっている。

図 4 に屋内における測定環境を示す。屋外-屋内間の伝搬特性を明確に把握するために, 図 4 に示す 3 か所に F-BS のアンテナを配置し, 図 3 のコース 1 から 10 を考慮した場合の受信電力をそれぞれ取得した。

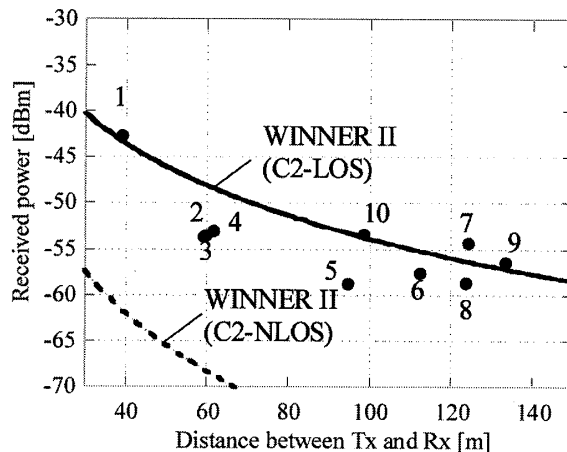


図 5 屋外 (M-BS-M-UE 間) 環境における受信電力距離特性
Fig. 5 Received power versus transmit distance in outdoor scenario (M-BS and M-UE).

図に示すように, 廊下の窓際にアンテナを配置した場合 (Case 1), 屋内の部屋内にアンテナを配置した場合 (Case 2), 廊下の窓より 5m 離れた場所にアンテナを置いた場合 (Case 3) の全 3 パターンで測定を行った。ここで Case 1 と Case 2 及び Case 3 の伝搬損の差を求めることで, 屋外-屋内伝搬の屋内侵入損及び屋内区間の伝搬損を得ることができる。また, F-UE が図 4 に示す約 30m の区間を移動しながら, F-UE と F-BS の間の受信電力特性を取得した。なお, 比較のため, 図に示す移動範囲 (約 30m) を F-UE が 3F で移動する場合も測定した。

送信周波数は 2.2 GHz であり, M-UE(F-UE) は M-BS 若しくは F-BS から送信される送信電力 10 W の CW 信号を受信した。瞬時受信電力は 5 kHz サンプルング (0.2ms 間隔) で取得し, 受信電力から短区間中央値を求めた。短区間中央値は 1m 間隔で 0.1m ずつずらしながら求めた。また, 測定した全てのコース (コース 1~10) の短区間中央値の特性を結合し, 全てのコースの短区間中央値の分布特性からこの標準偏差を求めた。

3.3 伝搬損特性の比較

図 5 に M-BS と M-UE 間を考慮した場合の実験結果による受信電力と WINNERII の C2 モデル (LOS/NLOS) から得た受信電力の距離特性を比較した。実測結果では, 図 3 のコース 1 から 10 の M-UE の移動範囲の midpoint と M-BS との距離と受信電力の中央値の関係をプロットしている。また, 各コースの番号を図 5 にはそれぞれ図示している。図から明らかなよ

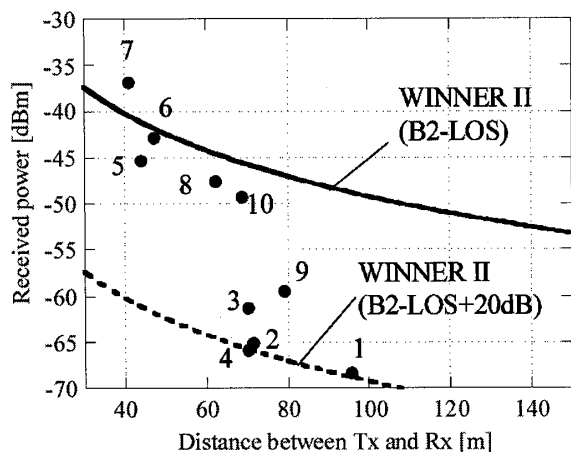


図6 屋外-屋内 (M-UE-F-BS 間) 環境における受信電力距離特性
 Fig. 6 Received power versus transmit distance in outdoor to indoor scenario (F-BS and M-UE).

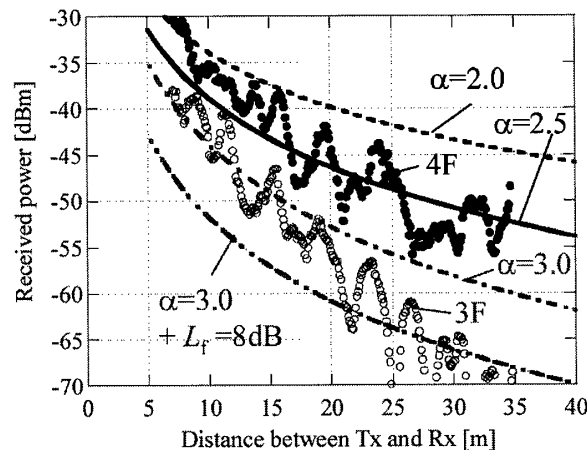


図7 屋内 (F-UE-F-BS 間) 環境における受信電力距離特性
 Fig. 7 Received power versus transmit distance in indoor scenario (F-BS and M-UE).

うに、M-BSとM-UE間の伝搬損はほぼLOS環境とみなすことができる。これは、M-BSが屋上に設置されており、この建物がこの周辺では最も高いためであり、しかも、M-UEとM-BS間の距離が140m以下であるためである。また、コースによっては、5dB以内の範囲であるが、C2-LOSモデルより受信電力が低くなっていることも確認できる。

次に、F-BSを図4のCase 1に配置した場合のF-BSとM-UE間の受信電力特性を図6に示す。実測結果では、図3のコース1から10のM-UEの移動範囲の中心とF-BS(Case 1)との距離と受信電力の中央値の関係をプロットしている。WINNERIIモデルでは、B2(LOS)モデル及び、B2モデルから建物の回折損として20dB加えた結果をそれぞれ示している。この場合は、F-BSに近くに位置するコース5~8, 10ではほぼLOSとみなすことができることが確認できた。一方、F-BSとの間に建物が存在するコース1~4, 9においては、建物の回折損を加えた結果の方がよく傾向が合うことが確認できた。すなわち、F-BSとM-UE間ではLOS環境とNLOS環境の両方の評価が必要となることが明らかとなった。

図7に、屋内環境における測定結果とITU-R P.1238-6モデルとの比較を示す。実測結果では、F-BSはCase 1の位置に配置されており、図中の4F(3F)はF-UEの1m区間ごとの受信電力の中央値を求め、これを0.1mずつずらして得た結果を4F(3F)の場合についてそれぞれ示している。図から明らかのように、F-UEが4Fを移動する場合は、伝搬損係数 $\alpha = 3.0$

とすると、ITU-R P.1238-6モデルによる受信電力が明らかに小さすぎ、伝搬損係数 $\alpha = 2.5$ とすると良い一致を示している。一方、F-UEが3Fに位置する場合は、送受信距離が20m以下では、 $\alpha = 3.0$ とすると両者の結果はよく一致しているが、20m以上では3Fと4Fの間の床による伝搬損である8dBを損失として与えることで両者の結果がよく一致することが確認できた。ITU-R P.1238-6モデルはもともと複数の部屋をまたぐ場合の伝搬損特性を想定しており、4FにF-UEが移動する場合のように、見通しがほぼ確保できている廊下を想定する場合は、伝搬損係数を3.0とすると大きく与えすぎることが分かった。

3.4 屋外-屋内伝搬における屋内侵入損/屋内区間の伝搬損の比較

図8に、図4におけるCase 2とCase 3がCase 1に対してどの程度受信電力が低下するかをプロットした結果を示す。WINNERIIモデルにおける「屋外-屋内伝搬における屋内侵入損/屋内区間の伝搬損」は、3.1に示すように、式(3)から屋外区間における伝搬損 $L_b(d_{out})$ を差し引いた値に対応する。Case 2/Case 3とCase 1の位置関係とCase 1への入射角度 θ を実際の測定結果から与えることで、式(3)から屋外区間における伝搬損 $L_b(d_{out})$ を差し引いた値も図8にプロットした。ここで、Case 1は窓から0.1m ($d_{in} = 0.1m$)の場所にアンテナを配置しており、 d_{out} を50mとすると、 $L_b(d_{out} + d_{in}) - L_b(d_{out})$ は0.02dBとなる。また、式(6)は0.05dBとなる。更に、Case 1のそばの窓の大きさは1m以上あり、第一フレネルゾーンの

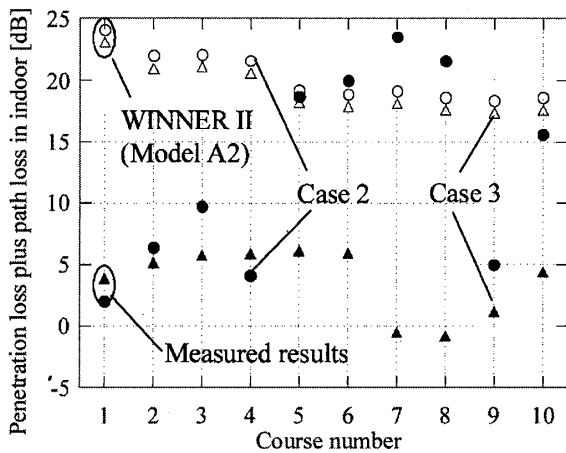


図 8 屋内侵入伝搬損特性
Fig. 8 Penetration loss plus path loss in indoor.

条件も満たしている。よって、Case 1 は窓の中にあるが、屋外環境とみなしてもさしつかえないと考えられる。

図 8 から、実測結果と WINNERII モデルが良い一致を示しているのは、Case 1 では測定コースが LOS 環境とみなせる場合 (コース 5~8, 10) である。すなわち、WINNERII モデルで想定している、屋外は LOS 環境で屋内に入ると見通し外となる環境 (モデル A2) では、WINNERII モデルと実測結果は同様の傾向を示している。一方、Case 1 が NLOS 環境となる場合 (コース 1~4, 9) では、Case 1 での伝搬損も大きくなるため、この場合の測定結果は、WINNERII モデルで与える損失よりも 15 dB 以上小さくなることが分かった。すなわち、WINNERII モデルでは干渉量が小さく出る傾向にあることが確認できた。ただし、本測定では、F-BS と M-UE 間の干渉量が厳しくなる環境を考慮し、建物の窓のすぐそばに F-BS が位置する環境を想定した。WINNERII モデルとの更なる比較のためには、F-BS と建物の窓との距離が更に大きい場合や F-BS が窓の裏側ではなく壁の裏側にある場合の特性を考慮する必要がある。

3.5 短区間中央値特性の比較

短区間中央値を得るために、まず、各測定コースの受信電力と送受信距離の関係より、長区間変動特性を差し引いた結果を求めている。その後、これらの結果を結合し、全コースを考慮した測定結果を得た。この各コースを結合した特性から得た累積確率分布 (CDF: Cumulative Distribution Function) を図 9 に示す。また、F-BS が Case 1 の場合、3.3 の結果より、LOS/NLOS 環境に分かれることから、図 10 に

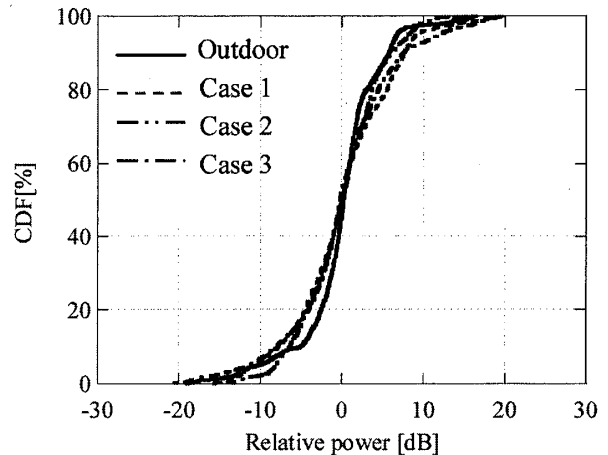


図 9 全コースを考慮した短区間中央値の累積確率分布
Fig. 9 Cumulative distribution function of small section median when considering all courses.

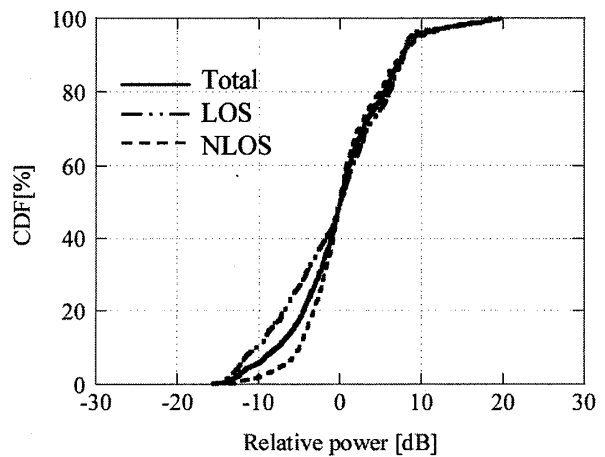


図 10 LOS, NLOS の違いによる短区間中央値の累積確率分布 (F-BS, Case 1)
Fig. 10 Cumulative distribution function of small section median due to the difference between LOS and NLOS (F-BS, Case 1).

LOS と NLOS の違いによる短区間中央値の CDF 特性を示す。図 9 の短区間中央値の分布より得た標準偏差を表 2 に示す。Case 3 は Case 1 に対し窓から 5m のみ部屋の中にアンテナを設置した結果であるため、Case 3 の結果はほぼ Case 1 と同様の傾向を示している。Case 2 は Case 1 と Case 3 に対し、やや小さい変動となっている。

表 1 の WINNERII/ITU-R P.1238-6 のモデルとの結果を比較すると、屋外環境の実測結果は、WINNERII の C2-LOS モデルよりも 1 dB 高く、NLOS モデルよりも 2 dB 低い結果となっている。屋外-屋内伝搬に関しては、WINNERII と比較して 1~2 dB 低い値となっている。屋内では標準偏差が 5.1 dB となり、

表 2 短区間中央値の標準偏差 (測定結果)
Table 2 Standard deviation of small fading
(measured results).

Model	Standard deviation [dB]
Outdoor	5.1
Indoor	5.1
Outdoor-Indoor (Case 1)	6.1
Outdoor-Indoor (Case 1, LOS)	6.9
Outdoor-Indoor (Case 1, NLOS)	5.3
Outdoor-Indoor (Case 2)	4.8
Outdoor-Indoor (Case3)	6.6

ITU-R モデルよりも約 3 dB 低い値となった。これは、今回の対象が測定区間が 30 m であり、ITU-R モデルよりも対象としている距離の範囲が狭いためであると考えられる。

4. マクロ-フェムトセル間干渉量評価

本章では前章の実験結果から、従来モデルと実測モデルを組み合わせた伝搬パラメータを用いたマクロ-フェムトセル間の干渉量評価を行う。ただし、今回の実測データは 1 箇所での測定より得られた結果である。また、後述するシミュレーションパラメータも限定された値である。一般化された伝搬モデルを用い、かつシステム評価をより厳密に行うためには更なる検討が必要であり、本検討における干渉量評価は一つのケーススタディという位置づけである。

4.1 シミュレーション環境

表 3 に 3. から得られた結果をもとに決定した伝搬モデルを示す。まず、伝搬損失は 3.3 の結果より、WINNERII モデル (屋外, 屋外-屋内) と ITU-R P.1238-6 モデル (屋内) を採用することにした。ただし、F-BS と M-UE の間の屋外伝搬特性が NLOS となる場合は WINNERII モデルでは適切なモデルが存在しない。また、この場合、B1-LOS モデルから回折損失 L_d として 20 dB 与えたモデルが実測結果と良い一致を示すことから、NLOS の場合は B1-LOS のモデルに損失を 20 dB 加えることとした。また、屋内での伝搬では、見通しがほぼ確保できる場合は、伝搬損失を大きく見積もりすぎるため、測定結果より伝搬損失係数 α を 2.5 とした。今回の評価では、ITU-R P.1238-6 モデルである式 (8) における L_f の代わりに表 3 に示す壁の損失を与えている。これは、今回の干渉量評価ではフロア間の特性を評価しないためである。壁の損失は図 8 より得られた Case 3 と Case 2 の受信電力の中央値の差である 5.6 dB として評価した。

表 3 評価に用いた伝搬パラメータ
Table 3 Propagation parameters.

Parameter	Value
Pathloss (M-BS, M-UE, LOS)	Model C2 (Eqn.(1))
Pathloss (F-BS, M-UE, LOS)	Model B1 (Eqn.(7))
Pathloss (F-BS, M-UE, NLOS)	Model B1 (Eqn.(7))+ 20 dB
Pathloss (F-BS, F-UE)	ITU-R (Eqn.(8)), $\alpha = 2.5$
Pathloss in indoor	10.9 dB (Measured result)
Wall penetration	5.6 dB (Measured result)
Std. of small fading	Measured results in Table 2

表 4 シミュレーションに用いたパラメータ
Table 4 Simulation parameters.

Parameter	Macro	Femto
Cell radius	289 [m]	40 [m]
BS Tx power	46 [dBm]	10~30 [dBm]
UE Tx power	27 [dBm]	10~30 [dBm]
BS ant. gain	14 [dBi]	5 [dBi]
UE ant. gain	0 [dBi]	0 [dBi]
Noise power	-174 [dBm/Hz]	-174 [dBm/Hz]
Height (BS)	22.5 [m]	16.5 [m]
Height (UE)	1.0 [m]	16.5 [m]

屋外-屋内伝搬における屋内侵入損/屋内区間の伝搬損失に関しては、3.3 の結果より WINNERII モデルが必ずしも適用できないことが明らかとなった。よって、図 8 より得られた Case 1 と Case 2 の受信電力の中央値の差である 10.9 dB をこの損失として与えた。なお、この値は WINNERII モデルで与える結果よりも約 6~13 dB 低い値となり、干渉量評価としては WINNERII モデルよりも厳しめの評価を行うことになる。なお、これら 2 個のパラメータは、今回は測定結果から得ているが、実際の環境に照らし合わせて使用することが望ましいと考えられる。

最後に、短区間中央値の標準偏差については、WINNERII モデルでは、先に示したように F-BS と M-UE の間の屋外伝搬特性が NLOS となる場合は適切なモデルが存在しない。一方、測定では評価すべき全てのパラメータが求められているため、表 2 の実測結果をシミュレーションで用いることにした。

表 4 にマクロセルとフェムトセルにおける計算パラメータを示す。表 4 において、基本的なセル半径やアンテナパラメータは文献 [3] から引用した。文献 [3] より、瞬時変動はレイリーフェージングを仮定した。

図 11 に本検討におけるマクロセルとフェムトセルの配置図を示す。図 11 では、マクロセル数 $N_M = 1$ 、フェムトセル数 $N_F = 3$ の場合を示している。本来、マクロセルを考える場合、マルチセルを評価すべきである [3] が、本検討では、フェムトセルとの干渉のみ

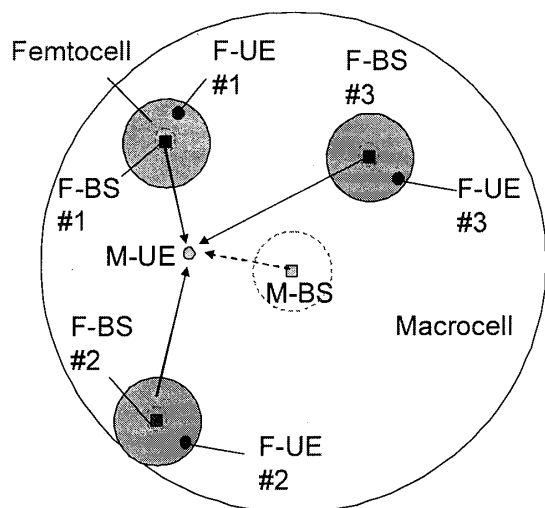


図 11 マクロセルとフェムトセルの配置図 (フェムトセル数 $N_F = 3$ の場合)

Fig. 11 Layout of macro and femto cells (Number of femto cells, $N_F = 3$).

の影響を考慮するため孤立セルで評価を行った。ここでは円形セルを考慮して、マクロセルの中心に M-BS を配置し、マクロセルの半径内にランダムに M-UE が配置されるものとした。ただし、極端に品質が良くなるケースを除外するため、M-BS より 35 m 以内の区間は除外した [3]。一方、フェムトセルは図に示すように、マクロセル内に配置されるものとし、複数のフェムトセルを考慮して検討を行った。フェムトセルの数は 1~4 個とした。また、F-BS はフェムトセルの中心に配置され、F-UE はフェムトセルのセル内にランダムに配置されるものとした。フェムトセルの場合も同様に、F-BS から 5 m 離れた位置では F-UE を配置しないという制限を設けている [3]。M-BS 及び F-BS において中央から 35 m, 5 m の範囲に UE を配置しない理由は、送受信距離が非常に短くなると急激に伝搬損が小さくなるため、著しく受信電力が大きくなり、この影響を除外するためである。また F-BS のセル内には M-UE が入らないように設定した。F-BS 及び M-UE の数は 1~4 個とした。M-UE, F-BS/F-UE の位置を 10000 回変えた場合の SINR をそれぞれ計算し、累積分布を算出した。なお、SINR は所望信号電力、干渉信号電力、熱雑音電力をそれぞれ P_s , P_i , P_n とすると以下の式で与えることができる。

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{P_i + P_n} \quad (9)$$

4.2 マクロ-フェムトセル間干渉量評価

図 12 に、干渉 1 (F-BS → M-UE) を考慮した場合の

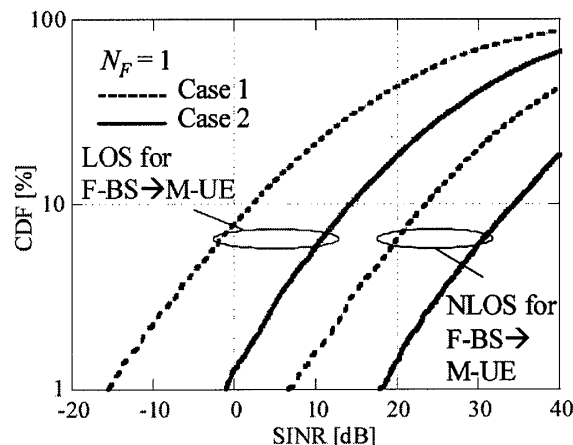


図 12 SINR の累積分布 (F-BS から M-UE への干渉 1, 干渉波数, $N_F = 1$)

Fig. 12 Cumulative distribution function of SINR (Interference 1, $N_F = 1$).

SINR の累積確率分布特性を示す。ここでは、F-BS の送信電力を 30 dBm とした。また、この結果は、Case 1 及び Case 2 に F-BS が位置する場合を想定した結果である。F-BS の数 (N_F) を 1 とした。更に、3. の結果より、F-BS から M-UE への干渉波の屋外伝搬が LOS の場合と NLOS の場合で評価した。図 12 より、CDF = 10% で見ると、干渉 1 の屋外伝搬が NLOS の場合と干渉 1 の屋外伝搬が LOS でかつ Case 2 の場合は SINR が 10 dB 以上となっていることが確認できる。すなわち、これらの場合は干渉の影響が小さいといえる。一方、干渉 1 の屋外伝搬が LOS でかつ Case 1 の場合は SINR が 2 dB となり干渉除去が必要となる。干渉 1 の屋外伝搬が LOS/NLOS により CDF 値に関係なく約 20 dB の SINR の差が観測される。LOS/NLOS の違いで生じる SINR の差はフェージングやシャドローイングによっても影響を受けるが、本結果より干渉 1 の屋外伝搬が NLOS となったことによる伝搬損の増加分 (20 dB) が大きく影響を与えている。なお、フェムトセルの送信電力と SINR の特性に関しては後述する。

図 13 に、干渉 2 (M-UE → F-BS) を考慮した場合の SINR の累積確率分布特性を示す。干渉の条件と F-BS の設置条件は図 12 と同じである。M-UE の数 (N_M) を 1 とした。干渉 2 では、F-UE から F-BS に信号が送信され、これが所望信号となる。ここでは、F-UE の送信電力を図 12 と比較するため 30 dBm としている。図 13 より、SINR の傾向は干渉 1 と同様となることが確認できた。この場合は、CDF = 10% で見ると、干渉 2 の屋外伝搬が NLOS でかつ Case 2 の場

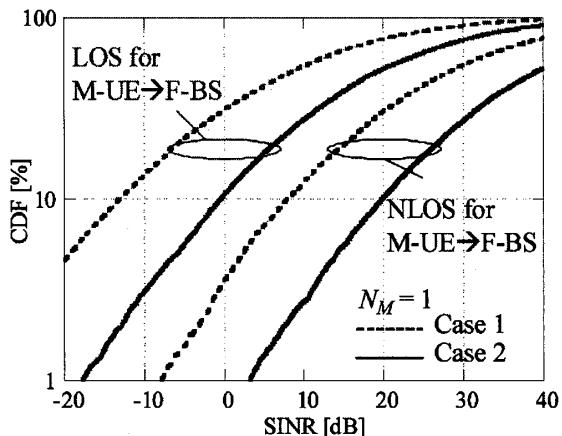


図 13 SINR の累積分布 (M-UE から F-BS への干渉：干渉 2, 干渉波数, $N_M = 1$)
 Fig. 13 Cumulative distribution function of SINR (Interference 2, $N_M = 1$).

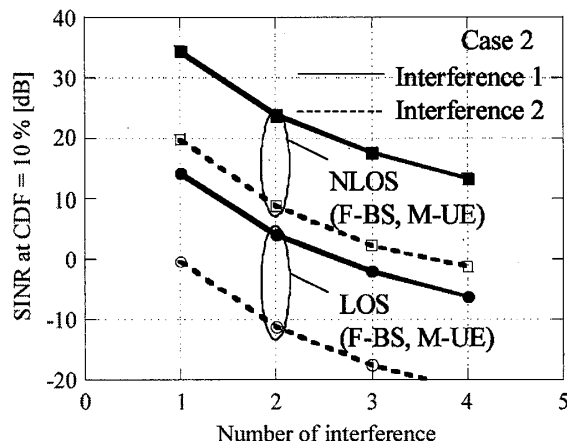


図 14 干渉波数に対する SINR の関係 (CDF = 10%)
 Fig. 14 SINR versus number of interference (CDF = 10%).

合のみ SINR が 10dB 以上となる。また、干渉 2 の屋外伝搬が LOS の場合は、Case 1, Case 2 ともに SINR が 0dB 以下となる。すなわち、干渉 2 の方が干渉 1 よりも深刻となることが確認できた。干渉 2 の SINR が干渉 1 のそれよりも低下する理由は、まず、M-BS/F-BS 間の送信電力・アンテナ利得比 (干渉 1) 及び F-UE/M-UE 間の送信電力・アンテナ利得比 (干渉 2) に起因する。これらの影響を考慮すると、M-BS の送信電力とアンテナ利得が F-BS のそれらよりも大きいことから、干渉 1 が干渉 2 の場合よりも SINR が高くなる。また、これ以外には、フェムトセルの伝搬損とマクロセルの伝搬損の差が干渉 1 と 2 の SINR の違いに影響を与えるが、総合して考えると、M-BS の送信電力とアンテナ利得が F-BS のそれらよりも高いことが干渉 1 と 2 の SINR の差に最も影響を与えている。このように、今回の検討の伝搬モデルでは、伝搬損係数を実際の環境に照らし合わせて用いているため、WINNERII モデル及び ITU-R モデルを単独で使用するよりも厳密な干渉量評価が実現できる。

図 14 に干渉数に対する SINR 特性を示す。SINR 特性は累積値 10% 値を用いた。F-BS の設置条件は Case 2 を想定している。図から明らかなように、干渉数に関係なく、F-BS と M-UE の間の屋外伝搬を LOS と NLOS にみなすことで SINR が大きくかわることが分かった。F-BS と M-UE の間の屋外伝搬を NLOS とみなす場合、干渉 1, 干渉 2 の場合で干渉数が 2 波, 4 波それぞれ存在しても SINR = 10dB を達成できる。一方、F-BS と M-UE の間の屋外伝搬が LOS となる場合、干渉 1 の場合は、干渉数が 1 波の場合のみ

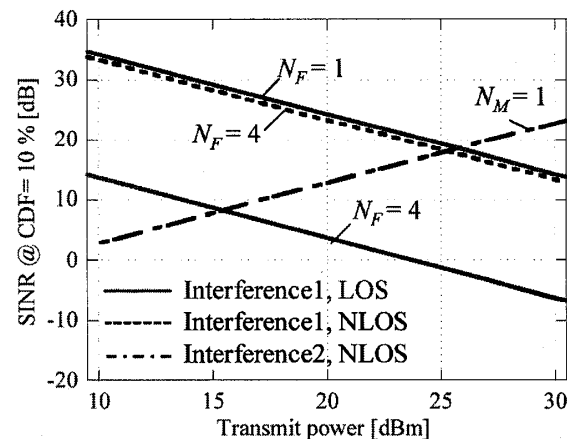


図 15 フェムトセルの送信電力に対する SINR (CDF = 10%)
 Fig. 15 SINR versus transmit power by femto cell (CDF = 10%).

SINR が 10dB 以上となる。干渉 2 に関しては、たとえ干渉数が 1 波であっても SINR が 0dB 程度となり干渉除去が必要となることが確認できる。以上の結果より、マクロ-フェムトセル間の干渉量評価を考える場合は、F-BS と M-UE 間の屋外伝搬が LOS か NLOS であるかを考慮することが非常に重要であることが明らかとなった。

最後に、図 15 にフェムトセルの送信電力を変化させた場合の干渉 1, 干渉 2 の SINR 特性を示す。図には SINR の累積確率の 10% 値を示した。ここでは干渉 1, 2 で F-BS, F-UE の送信電力を 10dBm~30dBm までそれぞれ変化させている。干渉 1 では、F-BS を 1 局 ($N_F = 1$) と 4 局 ($N_F = 4$) とし、マクロ-フェムトセル間の伝搬損モデルが LOS 及び NLOS 環境における特性を図示した。干渉 2 では M-UE が 1 局

($N_M = 1$)とした場合の特性を示している。図から明らかのように、干渉1(2)では、送信電力の増大に伴い SINR が低下(増大)している。すなわち、図15から干渉1と2の両方を最も低減できるフェムトセルの送信電力を得ることができる。干渉1において、F-BSとM-UE間の伝搬損モデルがLOSで $N_F = 1$ の場合と、NLOSで干渉局数が $N_F = 4$ の場合は、フェムトセルの送信電力が26 dBmで干渉1,2が最小となる。一方、F-BSとM-UE間の伝搬損モデルがLOSの場合は、 $N_F = 4$ とすると、フェムトセルの送信電力を16 dBmとすることで干渉量を最小にできる。 $N_F = 4$ の場合で、LOSとNLOSで比較すると、干渉量を最も小さくできる送信電力は約10 dBの差があることが確認できた。

5. むすび

本論文では、ヘテロジニアスネットワークのセル間干渉を明らかにすることを目的とし、屋外-屋外間、屋外-屋内間、屋内-屋内間の電界強度測定を実施した。また、屋内若しくは数百メートル程度の伝搬損や干渉評価に適用可能なWINNERII/ITU-R P.1238-6モデルと実測結果を比較し、従来モデルの適用領域を明らかにした。今回の測定結果からは、見通しが確保できる屋外伝搬は実測結果とWINNERIIモデルがよく一致することが確認できた。一方、フェムト-マクロセル間干渉を模擬するための屋外-屋内伝搬に関し、屋外伝搬部分がNLOSとなる場合には、WINNERIIモデルはストリートセルのみを扱うことができる。この場合は実測結果より、WINNERIIモデルのLOSモデルから建物で発生する1回折を与えることで、実測結果とよく一致することが確認できた。更に、屋外-屋内伝搬における屋内侵入損/屋内区間の伝搬損に関しては、屋外伝搬部分がLOS環境である場合は、測定結果とWINNERIIモデルで提案されている式とよく一致するが、屋外伝搬部分がNLOSとなると実験結果はWINNERIIモデルで与えられる損失よりも15 dB以上低くなることが分かった。短区間中央値の標準偏差に関しては、測定区間が従来モデルよりやや短いこともあり、その標準偏差が1~3 dB程度従来モデルよりも低くなっているが、WINNERIIモデルでは模擬できない領域(F-BSとM-UE間、屋外伝搬部分がNLOSの場合)も測定できており、得られた結果は本検討の干渉量評価に十分寄与できると考えられる。

最後に、実験結果と従来モデルを組み合わせた伝

搬パラメータを用いてマクロ-フェムトセル間における干渉量をSINRで評価した。評価の結果、干渉1(F-BS→M-UE)/干渉2(M-BS→F-UE)にかかわらず、F-BSとM-UEの屋外伝搬部分がLOSかNLOSかでSINRが20 dB程度変化することを明らかにし、従来の伝搬モデルだけでなく、今回の測定結果を反映させることがヘテロジニアスネットワークの干渉量評価で重要であることを示した。干渉1,2の両方を最も低減できるフェムトセルの送信電力に関しては、マクロ-フェムトセル間の屋外伝搬がLOSの場合は、両者の屋外伝搬がNLOSとなる場合に比べて10 dB程度送信電力を下げなければならないことも明らかにした。

今後の課題としては、短区間中央値の標準偏差に関しては、測定区間を更に増やすことで従来モデルとの比較を行っていきたい。また、WINNERIIモデルでも屋内モデル(A1モデル)が提案されており、本実験結果、ITU-R P.1238-6モデルとの比較を検討する予定である。更に、今回の測定では、端末アンテナを2素子として受信電力を測定しているが、今回の検討では検討範囲外であるため使用していない。今回得られた結果より、干渉が深刻になる範囲については干渉除去を端末アンテナでも行っていく必要があるため、今後、端末アンテナにおける空間角度広がり特性を反映させた干渉除去特性についても検討を進めていく予定である。

謝辞 本検討に関し、屋外実験に御協力頂いた西森研究室の皆様へ感謝致します。

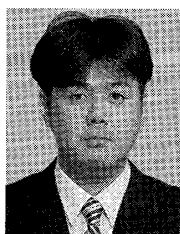
文 献

- [1] 3GPP, TR 36.814 (V9.0.0), "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects," March 2010.
- [2] A. Khandekar, N. Bhushan, J. Tingfang, and V. Vanghi, "LTE advanced: Heterogeneous networks," European Wireless 2010, pp.978-982, April 2010.
- [3] 丹野元博, 森本彰人, 阿部哲士, 岸山祥久, 中村武宏, "LTE-Advancedにおけるヘテロジニアスネットワーク," 信学技報, RCS2009-317, March 2010.
- [4] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.23, no.2, pp.201-202, Feb. 2005.
- [5] J. Mitola, III, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," Proc. 6th International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC), pp.3-10, Nov. 1999.
- [6] WINNER II channel models, <http://www.ist-winner.org/deliverables.html>
- [7] Rep. ITU-R M.2135, "Guidelines for evaluation of ra-

dio interface technologies for IMT-Advanced,” ITU-R Report, 2008.

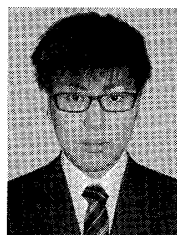
- [8] Rec. ITU-R P.1238-6, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz,” ITU-R Recommendations, 2009.
- [9] J. Sangiamwong, Y. Saito, N. Miki, T. Abe, S. Nagata, and Y. Okumura, “Investigation on cell selection methods associated with inter-cell interference coordination in heterogeneous networks for LTE-advanced downlink,” Proc. European Wireless 2011, April 2011.
- [10] 進士昌明 (編), 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会, 1992.

(平成 24 年 1 月 6 日受付, 4 月 19 日再受付)



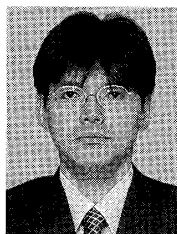
西森健太郎 (正員: シニア会員)

平 6 名工大・工・電気情報卒。平 8 同大学院修士課程了。同年日本電信電話 (株) 入社。以来、主として移动通信基地局用アダプティブアンテナ, MIMO ハードウェア構成及び屋外・屋内測定評価技術, コグニティブ無線における干渉回避技術に関する研究に従事。平 18 デンマーク国オールボー大学客員研究員。平 21 新潟大・工・准教授。博士 (工学)。平 12 年度本会学術奨励賞。平 14 IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award。平 20 本会ソフトウェア無線研究会最優秀論文賞。平 23 年度本会論文賞受賞。IEEE 会員。



小松原 祥 (正員)

平 24 新潟大・工・情報工学卒。同年, (株) 高助に入社。在学中, ヘテロジーニアスネットワークにおける干渉量評価に関する研究に従事。



北尾光司郎 (正員)

平 6 鳥取大・工・電気電子卒。平 8 同大学院工学研究科博士前期課程了。同年 NTT (株) 入社。以来, 移動伝搬に関する研究開発に従事。平 11 年 1 月 (株) NTT ドコモに転籍。平 21 鳥取大大学院工学研究科情報生産工学専攻博士後期課程了。現在, (株) NTT ドコモ先進技術研究所研究主任。IEEE 会員。



今井 哲朗 (正員)

平 3 東北大・工・電気卒。同年 NTT (株) 入社。以来, 陸上移動通信に関する電波伝搬, アンテナ及び回線設計法の研究開発に従事。平 4 NTT ドコモに転籍。平 14 年 9 月東北大大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士課程了。現在, (株) NTT ドコモ先進技術研究所主任研究員。平 10 年度本会学術奨励賞受賞。平 18 年度本会論文賞受賞。IEEE 会員。

〈アンテナ考学〉

新しい技術は新しい周波数で

正源 和義 (放送衛星システム)

放送衛星搭載用アンテナの研究はいかに日本を効率良くカバーするかが課題であった。当初, 反射鏡径の制約の中で円偏波の交差偏波特性をよくしつつ給電ホーン形状を工夫することが研究テーマであったが, 1980 年代, 鏡面修整アンテナによって任意形状の成形ビームができたことは夢の実現であった。この背景には衛星本体の大型化により比較的大口径の反射鏡が使えるようになったこと, コンピュータ性能の向上で大規模な繰返し演算が可能になったことがある。原理は古くからあったが他の

技術の進展で実用可能になった方式は他にも多くあるが, 鏡面修整技術も研究はタイミングが重要という一つの例であった。

次の目標は状況 (降雨減衰分布) に合わせてビーム形状を変える (増力ビームを作る) 技術である。これはグレーティングローブ (サイドローブ) 抑圧との闘いであるが, サブアレー方式フェーズドアレーアンテナにせよ, アレー給電反射鏡アンテナにせよ, ペンシルビームアンテナを仮定した放射パターンマスクを満たすことは限界がある。新しい技術には新しい基準 (規則) が必要であり, そのためには, 既存の枠組みではだめで, 新しい周波数の開拓が必要である。