

# 屋外／屋内環境を模擬した地上端末からの干渉電力測定実験

三浦 周 渡邊 宏 濱本直和 辻 宏之 佐藤正樹 藤野義之

地上／衛星共用携帯電話システム (STICS) において地上回線を使用する端末が屋外または屋内で通話する場合の対衛星干渉電力を把握するために行った干渉電力測定実験について記述する。実験系は、STICS の干渉状況を模擬して IMT-2000 携帯電話端末と連続波送信機、疑似衛星局を用いて構成した。オフィスビル街と住宅街の屋外／屋内で実験を行い、STICS における精度の高い干渉量評価に有効な基礎データを得た。

## 1 まえがき

地上／衛星共用携帯電話システム (STICS)<sup>[1]</sup> において地上／衛星間周波数共用を実現するに当たっては、地上／衛星間で発生する干渉量を可能な限り精度良く把握する必要がある。衛星システム、地上システムの上り、下り計 4 回線に対して干渉経路が存在するが、そのうちの 1 経路として図 1 に地上回線を使用するデュアルモード端末からの送信波 (すなわち地上上り回線) が衛星上り回線に与える干渉を模式的に示す。この干渉経路は、地上回線で端末を多数収容することを想定すると衛星回線への干渉量が無視できず、周波数共用に向けて特に課題となる経路である。なお、この図は地上システム上り回線と衛星システム上り回線が同一周波数を共用するケースであり、これをノーマルモードと呼び、本研究の対象とする。

ここで、衛星上り回線と地上上り回線の周波数共用方式を説明する。STICS では衛星ビームを 100 ビーム程度で日本及び排他的経済水域をカバーすることを想定している (図 1 にはそのうちの 1 ビームのみを示している)。また、上り下りの周波数帯幅 30 MHz をそれぞれ複数のサブバンドに分割し、上記の各衛星ビームにサブバンドを多色配置で割り当てることで衛星システムの周波数再利用を行う。そのうえで、衛星システムと地上システムの周波数共用は、図 1 のようにサブバンド  $f_1$  を割り当てられている衛星ビームの外側に位置する地上セルがサブバンド  $f_1$  を使用することによって行う。衛星への干渉量を更に低減させることを目的として、衛星ビームの周りに地上システムがサブバンド  $f_1$  を使用できない空間的なガードバンドを設けることも検討している。

前述したように、ノーマルモードにおいて衛星で受信される地上端末からの干渉は、同一周波数を使用する全地上端末の送信波による累積干渉となり、これを

評価したい。その際、各地上端末からの送信波が衛星に与える干渉量は、端末送信電力と地上端末 - 衛星間伝搬路の減衰量によって決まるが、これらは一律でなく、各地上端末の使用環境に応じて異なる。したがって、STICS の地上端末から衛星への干渉量を精度良く見積もるためには、陸上移動通信の伝搬路と衛星移動通信の伝搬路の双方の特性を反映する必要がある。その干渉量は、多様な使用環境の条件を反映していることが求められる。図 2 に地上端末から STICS 衛星に与える干渉量に影響する要因を模式的に示す。考えられる要因として、通話地点の周辺地物の状況、基地局との距離・位置関係、基地局密度がある。このうち、通話地点の周辺地物の状況の違いは、端末が見通し状態のときの干渉量に対する変動量の違いとして現れる。また、基地局との距離・位置関係と基地局密度は、地上システムに IMT-2000 携帯電話システムを想定した場合、送信電力制御の影響により、通話地点ごとの端末送信電力の違いとして現れる。後者の端末送信電力については、IMT-2000 携帯電話を実験車に搭載した

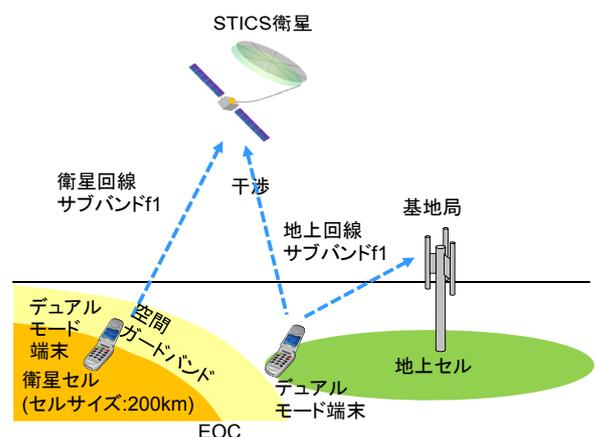


図 1 STICS 衛星上り回線への干渉経路 (ノーマルモード)

屋外走行実験による広域送信電力分布データが米国<sup>[2]</sup>、日本<sup>[3]</sup> から報告されている。

そこで、本研究で扱う課題は、上記に述べた通話地点の周辺地物の状況の違いによる対衛星干渉レベルの変動量を明らかにすることである。この変動量を定める要因として、通話場所が屋外か屋内かでの違いと、周辺地物の種類の違いが考えられる。通常地上－衛星間伝搬路の設計では周辺地物による遮へい量のみを考慮すればよいが、STICSの地上端末からの干渉の場合は端末の送信電力自体が変動し、特に屋内での送信電力は上昇するため、地上－衛星間伝搬路モデル<sup>[4]~[9]</sup>をそのまま使用することができない。統計調査によると携帯電話の利用場所は屋内が大半を占めると推定されることから、屋外通話時と屋内通話時の干渉量の違いは重要であり、定量的なデータを用いることで干渉評価の精度向上に役立つ。また、周辺地物の種類については、ビル街や一般住宅街など、周辺地物の種類によって変動量が異なると予想されるため種類ごとに妥当な変動量を設定することが望ましい。

上記の課題を受けて、NICTではSTICSの地上端末から衛星に対する干渉量に関し、屋外通話時と屋内通話時の干渉量の違いに関する定量的なデータを実験的に取得することを目的として、模擬実験を行っている<sup>[10][11]</sup>。実験では新たにIMT-2000携帯電話と連続波(Continuous Wave: CW)送信機を装備した移動局(STICSの地上端末に相当)、高所に設置したSTICS衛星に代わる疑似衛星局を要素とする実験系を構築し、代表的な周辺環境として、オフィスビル街<sup>[10]</sup>、住宅街<sup>[11]</sup>を想定して測定を実施し、干渉量の評価を行った。本稿では、この屋外／屋内干渉模擬実験全体を総括することを目的として、実験系及び測定結果の詳細を述べるとともに、オフィスビル街と住宅街の干渉の違いについて考察する。

## 2 実験系

地上端末によるSTICS衛星への干渉電力は、地上端末の送信電力と地上端末－衛星間伝搬損失に分離することができる。そこで本実験では、これらの特徴量を実験的に測定することとした。具体的には、地上端末の送信電力はIMT-2000携帯電話の送信電力をパワーメータにて測定する。また、地上端末－衛星間伝搬損失については地上端末に見立てたCW送信機で送出した電波を高所の疑似衛星局で受信して評価することとした。

図3は実験系の構成の模式図である。実験系は移動局と疑似衛星局で構成する。移動局の構成は、携帯電話送信電力測定系、基地局パイロット信号測定系、CW送信機系で構成する。携帯電話測定系と基地局パイロット信号測定系は、外部アンテナを共用している。これは、CW送信機からの送信波の両系への回り込みを抑圧するバンドパスフィルタを共用するためである。携帯電話からの1.9GHz帯の送信波は、ハイブリッドで分岐し一方をパワーメータで計測しPCで記録するとともに、他方を外部アンテナから出力する。携帯電話の送信電力の算出においては、携帯電話－外部アンテナ間の挿入損失の補正を行っている。また、基地局からの2.1GHz帯の信号を外部アンテナで受信し、基地局計測器(エリアテスタ)で計測してパイロット信号のコードごとの強度(RSCP: Received Signal Code Power)を記録する。送信機は2.335GHz、最大1Wの連続波を外部アンテナから送出する。高所に設置した疑似衛星局装置では、このCWをホーンアンテナ(半値角30度)で受信し、増幅後にスペクトラムアナライザにて計測し、PCで記録する。図4に実験系の移動局及び疑似衛星局の外観を示す。移動局は移動しやすいよう測定機材一式を台車に設置し、電源はバッテリーまたはコードリールを介して外部AC電源から供給している。疑似衛星局のホーンアンテナは試験用鉄

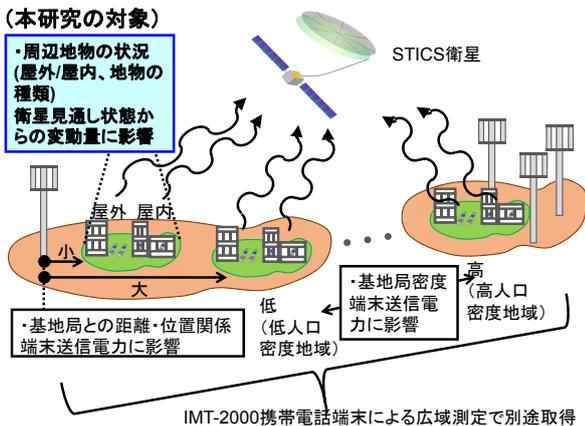


図2 地上端末からSTICS衛星への干渉量に影響する要因

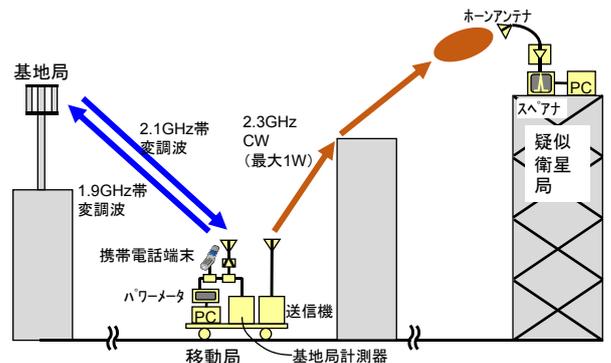


図3 実験系の構成の模式図



(a) 移動局

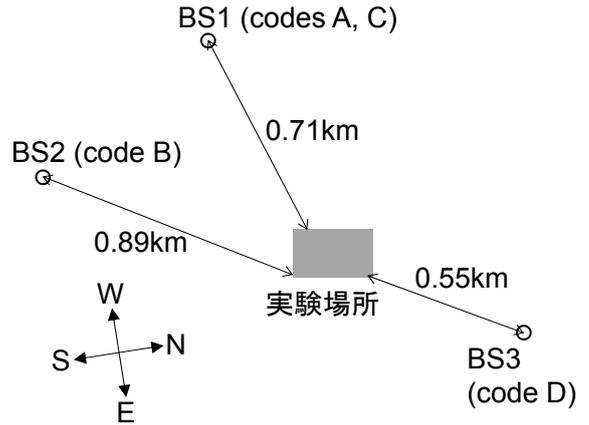
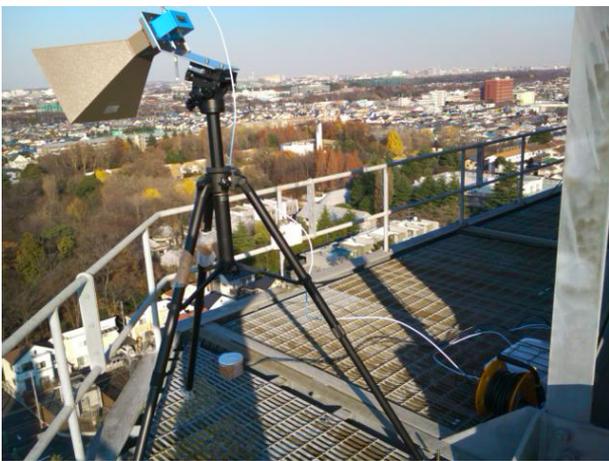


図5 実験場所と周辺基地局の位置関係



(b) 疑似衛星局

図4 実験系の外観

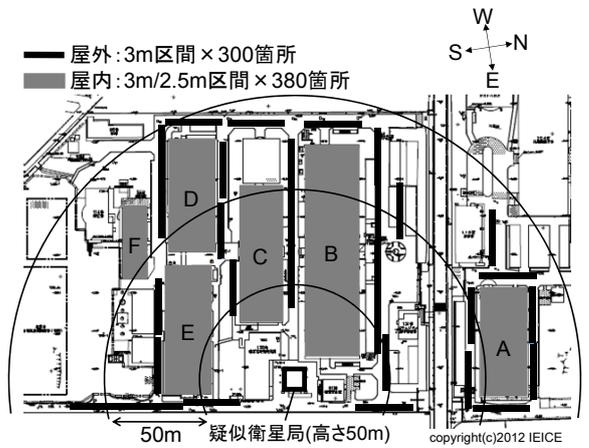


図6 測定区間

表1 測定条件

項目	条件	
移動局- 基地局間	携帯電話端末	IMT-2000 携帯電話、1.9 GHz 帯
	送信アンテナ	外部アンテナ (水平面内無指向性、利得 4 dBi、垂直偏波)
	送信アンテナ高	1.5 m
移動局- 疑似衛星 局間	送信機	無変調波、2.335 GHz、最大 1 W
	送信アンテナ	水平面内無指向性、利得 2 dBi、垂直偏波
	送信アンテナ高	1.5 m
	受信アンテナ	ホーンアンテナ (半値角 30 度、利得 16.6 dBi、垂直偏波)
	受信アンテナ高	50 m (オフィスビル街)、150 m (住宅街)

塔の屋外部分に増幅器ユニットとともに設置している (写真はホーンアンテナの設置状況を示す)。測定条件を表1にまとめる。実験では、移動局を走行させ各データ (携帯電話送信電力、疑似衛星局 CW 受信電力、基地局パイロット信号受信電力) を同時記録し、取得したデータを校正し、区間ごとに中央値を求め評価する。

### 3 オフィスビル街における実験

#### 3.1 実験環境

代表的な周辺環境のひとつとしてオフィスビル街を想定し、2010年12月にNICT小金井本部 (東京都小金井市) 構内の屋内外で測定を実施している。図5に実験場所と周辺基地局の位置関係を示す。図には周辺基地局のうち、全測定区間で最大強度をとるパイロット信号コード数が上位4コード (A~D) を送出する基地局3局を示している (パイロット信号コードと基地局の対応関係は、基地局計測器を携帯しRSCPの強度を判断材料として周辺基地局を探索した結果に基づく)。BS1のコードAのRSCPが全区間の9割以上で最大強度を記録したことから、簡単のため、全測定区間の対向基地局をBS1として分析を行う。図6に実験場所における測定区間の位置関係を示すとともに、表2に実験環境の概要をまとめる。

#### 3.2 実験結果

図7に屋外通話時及び屋内通話時の携帯電話 EIRP

表 2 実験環境の概要

項目		条件					
実験環境全般	実験場所	オフィスビル群周辺街路・屋内					
	周辺基地局	図5のBS1、コードAのRSCPが全測定区間の9割以上で最大強度を記録					
	測定区間長	屋外:3m、屋内:3m/2.5m					
	測定区間数	屋外:300箇所、屋内:380箇所					
	測定ポイント数/区間	50~60ポイント					
	測定区間-PS間水平距離範囲	22m~146m					
	測定区間-PS間仰角範囲	18°~66°					
屋内測定 の建物 の概要	建物	種類	総階数	測定階	部屋 (数/区間数)	廊下(区 間数)	
	A	オフィスビル (コンクリート)	4	1F	1	12	29
				4F	1	12	17
	B	オフィスビル (コンクリート)	4	1F	1	6	46
				4F	3	36	33
	C	オフィスビル (コンクリート)	4	1F	1	6	8
				4F	1	6	6
	D	オフィスビル (コンクリート)	4	2F	1	6	26
3F				1	4	20	
E	オフィスビル (コンクリート)	4	2F	3	24	36	
			3F	3	19	10	
F	1階建て建物 (コンクリート)	1	1F	1	12	6	

copyright(c)2012 IEICE

測定値のヒストグラムを示す。横軸は1チャンネル分(5 MHz)のEIRPを示している。屋内通話時のEIRPの範囲が屋外通話時より拡大しており、特に最大値が大きく異なり、平均値が高域側にシフトしている。後に示す表3にまとめるが、屋内通話時の携帯電話EIRPは平均値で11 dB、中央値で7 dB 屋外通話時に対して高い。屋内でのEIRP上昇は建物侵入損失によるものと推察される。参考までに、EIRPが-30 dBm/5 MHz以下を記録した屋内区間は基地局(BS1)側に面した窓のある廊下と部屋であり建物侵入損失が小さく、逆に、0 dBm/5 MHz以上を記録した屋内区間はBS1に対して建物の反対側の廊下と部屋であるため建物侵入損失が大きかったと推察される。

図8は送信機からCWを送信した際の疑似衛星局受信電力測定値のヒストグラムである。データは測定区間ごとの疑似衛星局との距離の違いによる距離減衰の差を補正している。横軸は屋外測定区間のうち目視により屋外で移動局から疑似衛星局が見通し状態と分類した130区間での平均受信電力との相対電力を示している。携帯電話EIRPとは逆に、屋内通話時の受信電力が屋外通話時に比べて小さいことがわかる。その差は平均値で17 dB、中央値で22 dBである。なお、屋外通話時のヒストグラムに見られる双峰性は、建物によるブロッキング状態と見通し状態の2状態を示している(参考までに図中波線に屋外見通し時ヒストグ

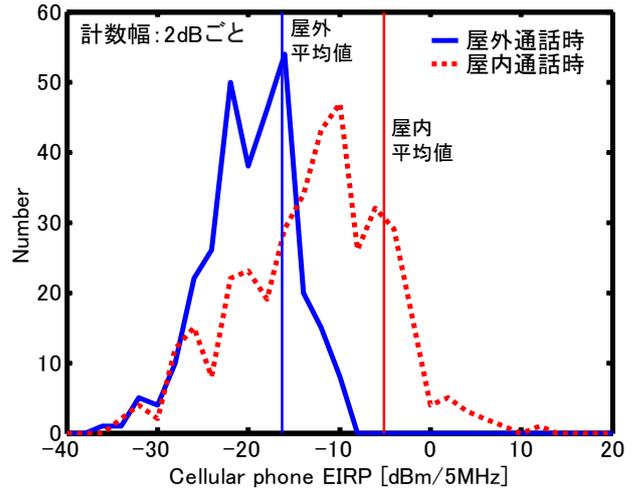


図7 携帯電話 EIRP 測定値のヒストグラム

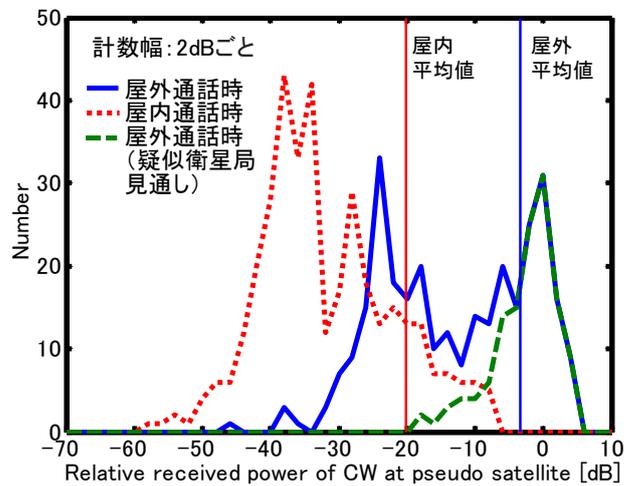


図8 疑似衛星局でのCW受信電力測定値の疑似衛星局見通し時に対する相対電力のヒストグラム

ラムを示す)。

上記の測定結果からわかることは、屋内において送信機からCWを送信した際の疑似衛星局受信電力の屋外に対する低下量が、屋内における携帯電話EIRPの屋外に対する上昇量より大きいことである。理由は、移動局から基地局への仰角に比べ移動局から疑似衛星局への仰角が高いために建物侵入損失が大きかったためと推察される。

移動局設置区間ごとに携帯電話送信波の疑似衛星局に対する相対干渉電力推定値を求めた結果のヒストグラムを図9に示す。図から、屋内通話時の相対干渉電力は屋外通話時の相対干渉電力に比べて小さいことがわかる。疑似衛星局までの減衰量に端末の送信電力の上昇分が加算され、干渉電力における屋内/屋外の差は減少しているものの、疑似衛星局までの減衰量が送信電力上昇量より大きいために、干渉電力としては

表4 実験環境の概要

項目		条件			
実験環境全般	実験場所	住宅街周辺街路・屋内			
	周辺基地局	測定地点と最近傍基地局との距離: 約200m(建物A)、約60m(建物B)			
	測定区間長	屋外: 3m, 屋内: 2~3m			
	測定区間数	屋外: 299箇所, 屋内: 98箇所			
	測定ポイント数/区間	50~60ポイント			
	測定区間-PS間 水平距離範囲	約200m(建物A) 約190m(建物B)			
	測定区間-PS間 仰角	30°以上			
屋内測定建物	建物	種類	総階数	測定階	部屋 (数/区間数)
	A	集合住宅 (木造)	2	1F	1 / 24
				2F	1 / 37
	B	集合住宅 (木造)	2	1F	1 / 37

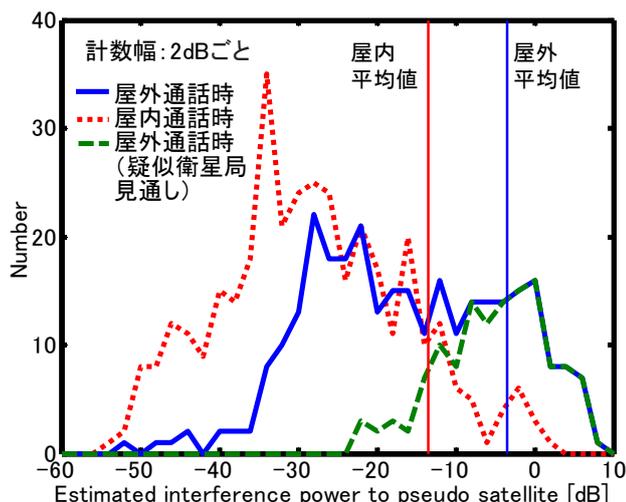


図9 携帯電話送信波の相対干渉電力推定値ヒストグラム

表3 実験結果のまとめ

評価項目	携帯電話EIRP		疑似衛星局でのCW 相対受信電力		携帯電話送信波の相 対干渉電力推定値	
	dBm/ 5MHz	dBm/ 5MHz	dB	dB	dB	dB
単位						
通話環境	屋外	屋内	屋外	屋内	屋外	屋内
平均値	-16.3	-5.1	-3.4	-20.1	-3.5	-13.4
中央値	-18.3	-11.0	-11.3	-33.1	-15.9	-28.0
最大値	-8.1	12.8	5.8	-6.4	8.6	2.5
最小値	-35.0	-32.9	-44.3	-57.1	-51.9	-54.0
区間数	300	380	299*	360*	299*	360*

\*測定不備の区間を除外

屋内通話時が小さい結果となっている。その差は平均値で10 dB、中央値で12 dBであり、平均電力では屋内通話端末10局で屋外通話端末1局の干渉電力に値することになる。屋外・疑似衛星局見通し時に対する相対値では、平均値で屋外通話時が-4 dB、屋内が-13 dB、中央値がそれぞれ-16 dB、-28 dBである。別途取得する通話地点ごとの端末送信電力をこの値で補正することにより、通話地点が屋外/屋内の違いに起因するSTICS衛星への干渉電力の変動量を干渉評価に含めることができる。表3にここまでの結果をまとめる。

## 4 住宅街における実験

### 4.1 実験環境

住宅街環境を想定して、2011年12月に千葉県のJR市川駅周辺で実験を行った。移動局の測定場所は、木造家屋2階建てのアパート2か所であり、疑似衛星局は高さ150mのタワービルに設置した。また、携帯電話は周辺基地局4局からの電波を受信した。基地局は、基地局計測器を携帯しRSCPの強度を判断材料として周辺基地局を探索している。携帯移動局の測

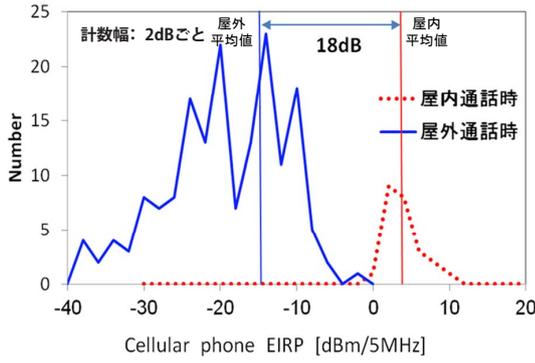
定は、木造アパート2階建てA棟の1階と2階、及び同じく木造アパートB棟の1階の計3か所の屋内とその周辺で実施した。木造アパートA棟は、周辺が住宅で囲まれ、また移動局-基地局間距離が比較的大きい。但し、2階は基地局及び疑似衛星局とも見通しの良い条件になっている。B棟の1階は、周辺住宅が少し離れており、基地局も近い場所にあり、1階ではあるものの基地局及び疑似衛星局の見通しが良い環境になっている。実験環境を表4にまとめる。

### 4.2 実験結果

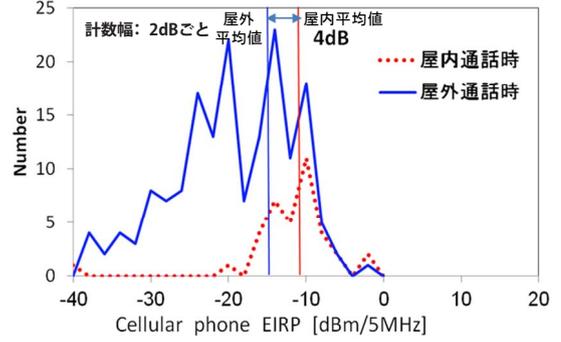
図10に屋外通話時及び屋内通話時の携帯電話EIRP測定値のヒストグラムを示す。横軸は1チャンネル分(5MHz)のEIRPを示している。全体的に、屋内通話時のEIRPが屋外通話時より高い値になっている。

図10(a)に示すA棟1階は、基地局との距離が離れており、また部屋がアパートの中央に位置しているため、基地局方向が隣の部屋で遮蔽され伝搬環境が悪くなりEIRPが高くなったと考えられる。図10(b)に示すA棟2階は、上階になり基地局の見通しが良くなったためEIRPが減少したと考えられる。図10(c)に示すB棟1階は、1階ではあるが基地局が近くにあり比較の見通し条件が良い場所にあることからEIRPが低い結果となったと考えられる。図10(d)に3か所全てをまとめた結果を示す。屋内EIRPは、屋外EIRPより平均で19 dB高い結果となった。また、3のオフィスビル街での測定結果と比較すると、屋内EIRPは住宅街が平均で-2 dBm、オフィスビル街が平均で-5 dBmであり、同程度かやや大きくなる結果が得られた。

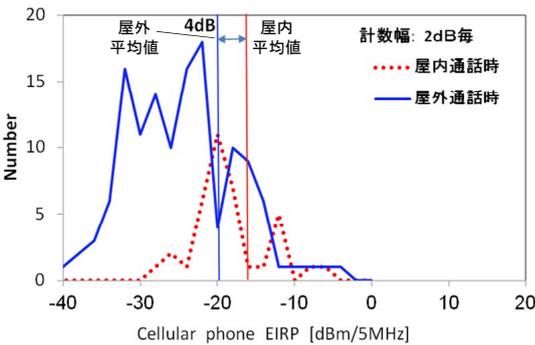
図11に移動局の送信機からCW波を送出した際の疑似衛星局受信電力のヒストグラムを示す。データは測定区間ごとの疑似衛星局との距離の違いによる距離



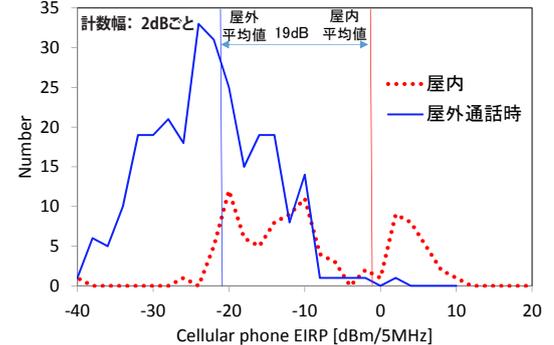
(a) A 棟 1 階



(b) A 棟 2 階

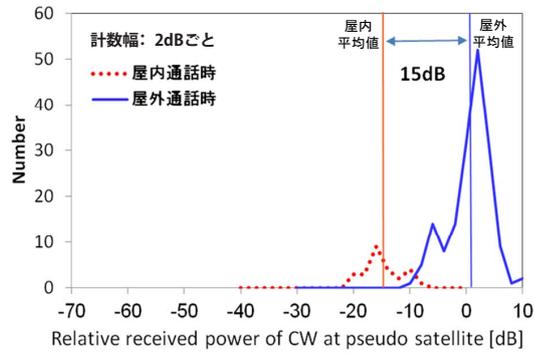


(c) B 棟 1 階

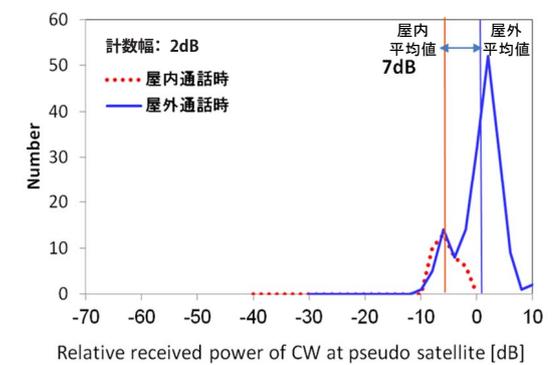


(d) 住宅街全データ

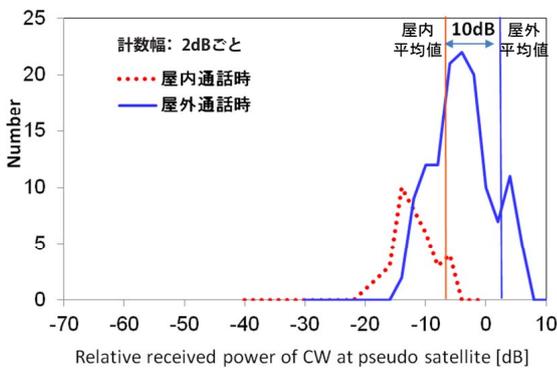
図 10 携帯電話 EIRP 測定値のヒストグラム



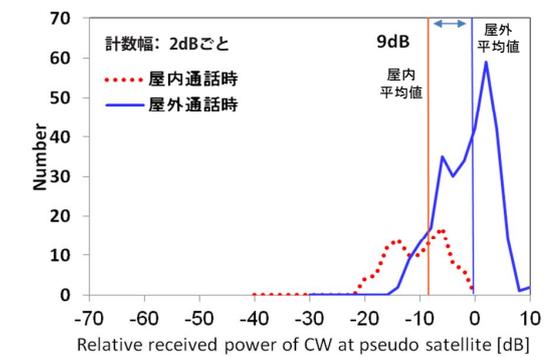
(a) A 棟 1 階



(b) A 棟 2 階



(c) B 棟 1 階



(d) 住宅街全データ

図 11 疑似衛星局での CW 受信電力測定値の疑似衛星局見通し時に対する相対電力のヒストグラム

減衰の差を補正している。携帯電話 EIRP の測定結果とは逆に、屋内通話時の受信電力が屋外通話時に比べて小さいことがわかる。屋外通話時のヒストグラムに見られる双峰性は、建物によるブロッキング状態と見通し状態の2状態を示している。3のオフィス街の測定結果と比べると、屋内使用時の受信レベルは木造建物屋内の方が高いことから、衛星への干渉量は木造建物の屋内が大きくなると推定される。

以上の結果をまとめると、住宅街の木造建物の屋外／屋内における携帯電話の EIRP は、屋内使用時が屋外使用時より高く、疑似衛星局の受信レベルは屋外使用時の方が屋内使用時より高い結果が得られている。オフィスビル街の結果と比較すると、木造建物の屋内使用時の衛星への干渉量はオフィスビル街の屋内と同等かそれ以上の影響があると考えられる。

## 5 まとめ

本研究では、STICS の地上端末から衛星に対する干渉量に関し、屋外通話時と屋内通話時の干渉量の違いに関する定量的なデータを実験的に取得することを目的として、オフィスビル街と住宅街の屋外／屋内で模擬実験を行った。模擬実験では移動局に IMT-2000 携帯電話と CW 送信機を搭載し、IMT-2000 携帯電話の送信電力を測定するとともに、CW 送信機からの電波を高所の模擬衛星局で受信することで移動局 - 疑似衛星局間の伝搬損失を測定した。オフィスビル街の鉄筋コンクリート建物の周辺屋外及び屋内での測定結果から、屋外通話と比較して屋内通話時における携帯電話 EIRP の上昇量より、CW 送信時の疑似衛星局受信電力の低下量が大きいことを確認した。その結果、簡易推定した携帯電話送信波の相対干渉電力は、屋外通話時に比べ屋内通話時が小さい結果が得られた。また、住宅街での木造建物の周辺屋外及び屋内での測定結果から、木造建物の屋内使用時の衛星への干渉はオフィスビル街の屋内と同等かそれ以上の影響があると考えられた。以上の結果から、STICS における精度の高い干渉量評価に利用できる有効な基礎データを得た。

## 6 謝辞

本研究は、総務省の研究委託「地上／衛星共用携帯電話システム技術の研究開発」により実施した。

### 【参考文献】

- 1 藁輪正, 田中正人, 浜本直和, 藤野義之, 西永望, 三浦龍, 鈴木健治, “安心・安全のための地上／衛星統合移動通信システム,” 信学論 (B), Vol. J91-B, No.12, pp.1629-1640, Dec. 2008.
- 2 P. D. Karabanis, S. Dutta, and W. W. Chapman, “Interference Potential

to MSS due to Terrestrial Reuse of Satellite Band Frequencies,” Proceedings of AIAA International Communications Satellite Systems Conference, AIAA-2005-2028, Rome, Sept. 2005.

- 3 渡邊宏, 三浦周, 浜本直和, 藤野義之, 鈴木龍太郎, “地上／衛星共用携帯電話システムの干渉量評価のための携帯電話端末送信出力測定実験,” 信学論 (B), Vol.J94-B, No.3, pp.419-422, March 2011.
- 4 M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.29, pp.317-325, Aug. 1980.
- 5 F. Ikegami, S. Yoshida, and M. Umehira, “Propagation factors controlling mean field strength on urban streets,” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.32, No.8, pp.822-829, Aug. 1984.
- 6 J. Walfisch and H. L. Bertoni, “A theoretical model of UHF propagation in urban environments,” IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol.36, No.12, pp.1788-1796, Dec. 1988.
- 7 COST 231 Final Report, Chapter 4.6, Building penetration, 1996.
- 8 三浦裕子, 小田恭弘, 多賀登喜雄, “建物侵入損失の高精度推定法,” 信学技報, A-P2001-150, pp.41-46, Nov. 2001.
- 9 H. Okamoto, K. Kitao, and S. Ichitsubo, “Outdoor-to-indoor propagation loss prediction in 800-MHz to 8-GHz band for urban area,” IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol.58, No.3, pp.1059-1067, March 2009.
- 10 三浦周, 渡邊 宏, 浜本直和, 辻宏之, 藤野義之, 鈴木龍太郎, “地上／衛星共用携帯電話システムの地上 - 衛星間周波数共用に向けた屋外／屋内干渉模擬実験,” 信学論 (B), Vol.J95-B, No.5, pp.677-688, May 2012.
- 11 佐藤正樹, 藤野義之, 三浦周, 浜本直和, 遠藤邦夫, 辻宏之, 若菜弘充, “地上／衛星共用携帯電話システムの干渉評価のための住宅街環境における地上携帯電話送信電力評価実験,” 2012年電子情報通信学会総合大会, B-3-28, March 2012.



三浦 周 (みうら あまね)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員  
博士 (情報科学)  
衛星通信、アンテナ

渡邊 宏 (わたなべ ひろし)

宇宙航空研究開発機構構安全・信頼性推進部主任開発員／元新世代ワイヤレス研究センター宇宙通信ネットワークグループ専門研究員 (2009年4月～2011年3月)  
衛星搭載機器、小型衛星システム、マイクロ波通信

濱本直和 (はまもと なおかず)

有人宇宙システム株式会社宇宙機システム部主幹技師／元新世代ワイヤレスネットワーク研究センター推進室研究マネージャー (2006年4月～2012年3月)  
衛星通信



辻 宏之 (つじ ひろゆき)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員  
博士 (工学)  
航空機・無人機通信システム、ミリ波帯高速移動体通信



**佐藤正樹** (さとう まさき)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室有期技術員  
衛星通信、アンテナ



**藤野義之** (ふじの よしゆき)

東洋大学工学部電気電子情報工学科教授／  
元ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員  
(～2013年4月)  
博士(工学)  
衛星通信、アンテナ、無線電力伝送