

航空機を用いた上空からの携帯基地局及び端末の干渉電力評価

辻 宏之 三浦 周 藤野義之 濱本直和

地上システムと衛星システムが同周波数帯でシームレスに統合した携帯電話システムを検討するに当たり、共用する地上系通信システムが衛星系へ与える干渉量を評価することは重要である。この評価の一環として、航空機を利用し上空から携帯基地局が衛星に与える干渉量を評価する実験を行った。本稿では、都市部に加え海上及び人口密度が低い地域での測定実験を行った結果をこの実験の概要説明と共に示す。

1 まえがき

近年、携帯電話を始めとする移動体通信サービスの社会的役割はますます増大しており、携帯電話の利便性や高機能化を受け、防災・減災・安全対策等での利用も検討されているが、地上系通信システムの災害に対する脆弱性などの問題からその活用は限られたものとなっている。地上携帯基地局の障害発生時や山間部や海上を含めどこにいても、人命救助や安否確認のための確実な通信を確保するため、また、携帯電話不感エリアの住民等や沿海域で活用する船舶、山間部での登山者など、携帯電話の不感対策には災害等の影響を受けにくい衛星通信ネットワークの活用が不可欠である。NICTでは、地上システムと衛星システムが同周波数帯でシームレスに統合した携帯電話システム（以下、「地上／衛星共用携帯電話システム」「Satellite-Terrestrial Integrated mobile Communication System (STICS)」と呼ぶ）の検討を行っている^[1]。このシステムを実現するに当たり技術的な課題として、広域のトラフィック分布・変動に応じて地上／衛星間の干渉を回避しつつ、衛星システムの周波数、電力、ビーム等のリソースを制御することで総合通信スループットを最大化するシステムの実現を目指すことが求められており、その実現に不可欠なデバイス及びアルゴリズムの基盤技術を確立することを目的として実施している^{[2][3]}。

一方、地上と衛星周波数の共用化技術を構築する上で、共用する地上系通信システムが衛星系へ与える干渉量を評価することは重要である。地上系通信システムが衛星系へ与える干渉量の評価の一環として、これまでシミュレータによる評価や地上での受信電力測定に加え、航空機を利用し上空から電力を測定する実験を行った^[4]。実験は、都市部上空に加え、海上及び人口密度が低い地域において行われた。本稿では、この

実験の概要説明と実験で得られたいくつかの結果を示す。

2 STICS 周波数共用化技術とシステム間干渉

STICSにおいて地上システムと衛星システムが同一の周波数帯域を使用する周波数共用化技術は、必要不可欠な基盤技術である。例として移動衛星業務(MSS)の上り回線1980～2010 MHzを想定した場合、地上システムと衛星システムが周波数帯域を共有する周波数同時使用方式と、地上システムと衛星システムが周波数帯域を分離する周波数分離使用方式の2通りの周波数共用方式が考えられる。周波数同時使用方式は、地上システムと衛星システムがそれぞれ全帯域を使用できるため周波数利用効率は高いものの、地上システムと衛星システム間の干渉のため高度な干渉回避技術を必要とする。一方、周波数分離使用方式は、地上システムと衛星システムの周波数帯域は分離されているため周波数利用効率は低下するものの、干渉回避技術を必要としない特徴がある。また、各周波数共用方式については、図1に示すように地上システムと衛星システムの上り／下り回線がそれぞれ同じであるノーマル方式と、図2の地上システムと衛星システムの上り／下り回線がそれぞれ逆であるリバース方式の2つの周波数デュプレックス方式が考えられる。周波数同時使用方式でのノーマル方式とリバース方式とでは、図1及び図2に示すように干渉経路がそれぞれ異なる。

周波数同時使用方式でのノーマル方式では、地上端末の数は非常に多く、累積した送信電力は衛星システムへ大きな干渉を与えることが考えられる。リバース方式においては、基地局の下り回線が衛星に与える干渉が問題となる。地上端末の送信電力特性については、

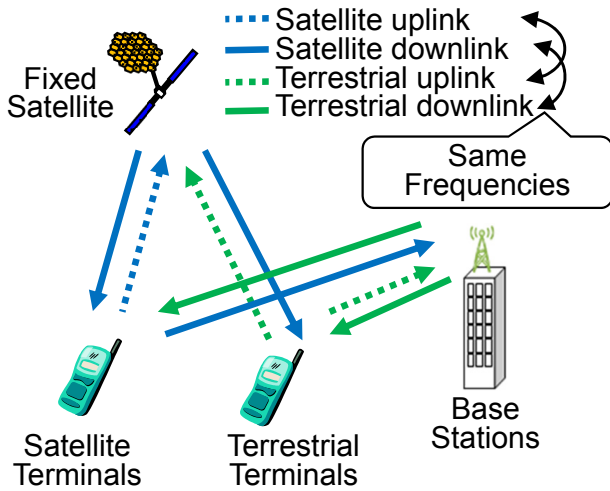


図1 周波数同時使用／ノーマル方式の干渉経路

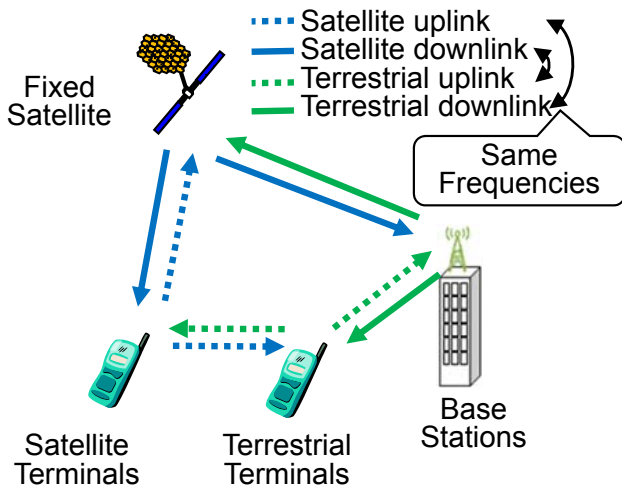


図2 周波数同時使用／リバース方式の干渉経路

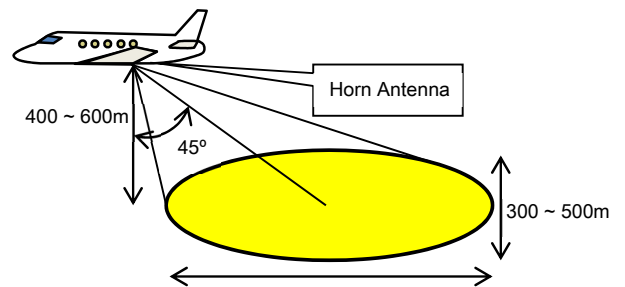
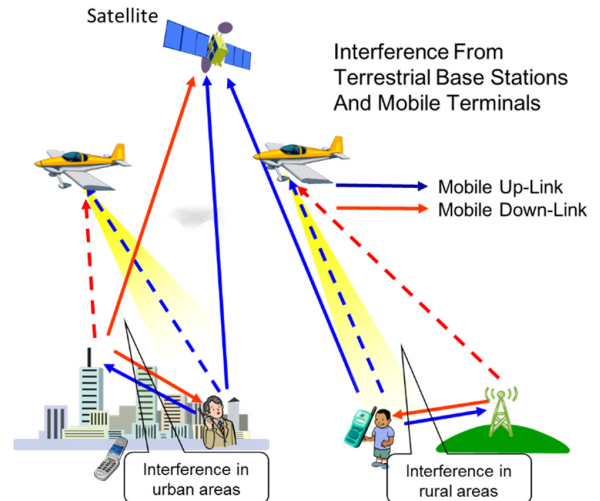


図3 航空機による干渉量測定

星セルのサービスエリアの一部を測定することにより、全体の干渉量を推測することを考える。図3に本実験の測定方法の概略図を示す。航空機に指向性アンテナ（本実験ではホーンアンテナ）を搭載し、都市部及び郊外などの上空から携帯電話基地局の下り回線及び携帯電話からの上り回線の静止衛星方向への電力測定を行うものである。

これまでにその統計的データがいくつか公開されているものの、音声やデータといった通信サービスの種類、時間、そして場所等に関連した詳細なデータの公表もしくは調査はなされていない。また、携帯基地局は端末と比較し数は少ないものの、出力が大きく衛星方向への放射に関してはこれまで検討された例がない。

3 上空からの干渉量測定

3.1 航空機による干渉量測定

前述の通り本実験の目的は、携帯電話基地局の下り回線及び携帯電話端末からの上り回線が衛星に与える干渉量を評価することである。静止衛星軌道上から直接干渉量の測定を行うことが理想であるが現実的には難しいため、航空機などを利用して想定されるSTICSの1つの衛星スポットビームにより決まる衛

3.2 測定システム

本実験では、図4の航空機(Cessna208B)下部の穴に標準ホーンアンテナ(利得: 15.6 dBi、ビーム幅: E面27度、H面30度)を設置することにより、地表からの携帯端末局の上り回線及び携帯基地局の下り回線の信号を受信する。このとき、静止衛星を想定した仰角方向の信号を受信するため、図3及び図4に示すようにホーンアンテナは水平から45°の角度に固定した。航空機内に搭載された装置により携帯端末局から8波(1.9GHz帯)、携帯基地局から8波(2.1GHz帯)の帯域5MHzの受信電力を同時に測定した。表1に測定対象周波数帯と図5に測定システム系統図を示す。また、航空機に取り付けたアンテナが指向するエリアとその面積を解析するためGPS情報とジャイロ情報を同時に取り込んでいる。



図4 測定に使用した航空機と受信用ホーンアンテナ

表1 受信周波数

	測定周波数 [MHz]
上り回線	1942.5, 1947.5, 1952.5, 1957.5
	1962.5, 1967.5, 1972.5, 1977.5
下り回線	2132.5, 2137.5, 2142.5, 2147.5
	2152.5, 2157.5, 2162.5, 2167.5

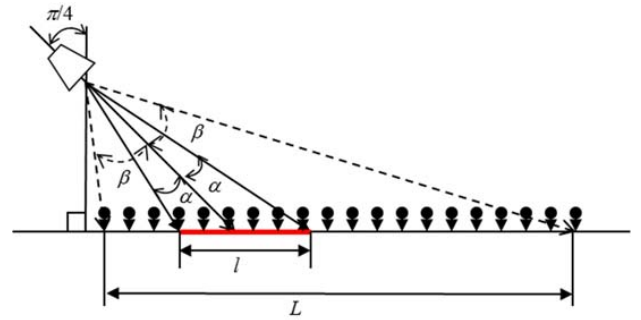


図7 航空機後ろ方向のモデル (E面)

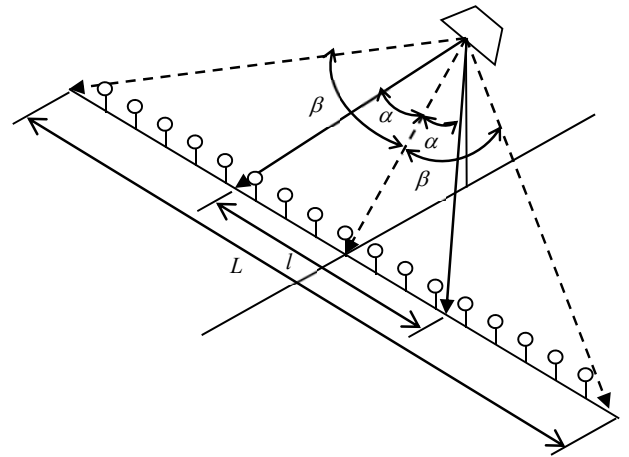


図8 航空機左右方向モデル (H面)

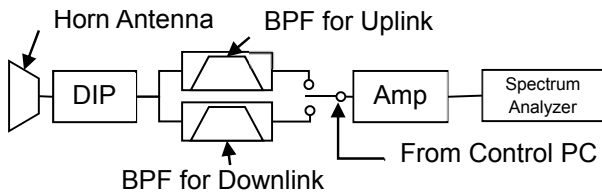


図5 測定システム系統図

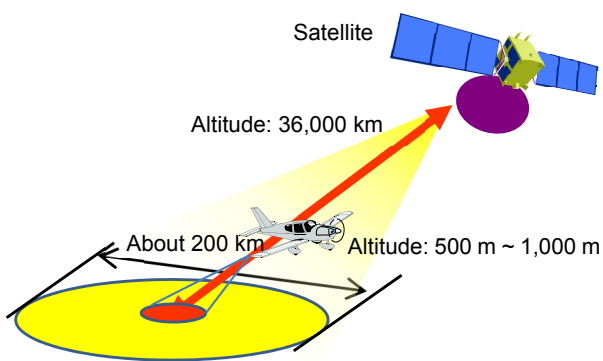


図6 航空機による測定値と衛星への干渉量の関係

4 航空機による測定値と衛星への干渉量の関係

本実験の最終目標は、図3のように航空機で観測された結果から、衛星に対する干渉レベルを評価することである。図6に航空機による測定値と衛星への干渉量の関係を示す。図6に示すように、航空機で得られた観測レベルから、衛星における全干渉レベルに変換する必要がある。このため、地表の干渉源の範囲と航空機で受信される電力との関係を示すことが重要である。以上の課題を解決するため、航空機で取得した受信電力結果を、衛星に与える干渉量に変換するためのモデル化及びシミュレーションを実施した。

4.1 航空機の受信電力モデル化

測定システムで得られた電力から地上における有効な範囲を算出する際、その受信アンテナのアンテナゲイン指向特性により影響を受ける。そこで、図7と図8に示す航空機の針路方向と左右方向の2つの方向におけるモデルを考える。ここで L は地表面に分布する受信アンテナに影響を与えるすべての発信源の範囲を示し、このときのアンテナ正面に対する角度を β とする。また、測定アンテナのフットプリントの範囲

(有効アンテナビーム長)を l とし、これに対するアンテナの角度を α と定義する。したがって、アンテナで受信される電力は、地表面に L の範囲に分布する送信源と測定アンテナのアンテナゲイン指向特性の積で決定されることになる。ここで地上における有効アンテナビーム長 l の範囲内に存在する送信点からの電力と、 L で定義される全体から送信され受信された電力の比がわかれば、受信電力に含まれる有効アンテナビーム長に存在する送信源電力の割合が計算され、結果として測定アンテナのフットプリントに対する地域からの衛星への干渉量が推定されることになる。

4.2 評価結果

実際に測定に使用した受信アンテナのE面とH面のアンテナゲイン指向特性を測定し、シミュレーションにより地上における有効アンテナビーム長 l の範囲内に存在する送信点と、全体から送信され受信された電力の比較を行った。ここで周波数は2110 MHzとし、高度は500 m、 L を十分大きな値とし、 l を変化させたときの受信電力に対する有効アンテナビーム長に存在する送信源からの電力の比を計算した。そのときの結果を図9に示す。

結果より、受信点中心からの角度 α が15度までは、角度に対する電力比がほぼ直線の関係となることがわかる。したがって、測定に使用したホーンアンテナにおいては、総受信電力の80%の角度をその有効面積を決定する範囲とすると精度が高い評価を得ることができると考えられる。80%の場合、E面では $\alpha=16.2$ 度、H面では $\alpha=16.6$ 度となった。これより、この測定系

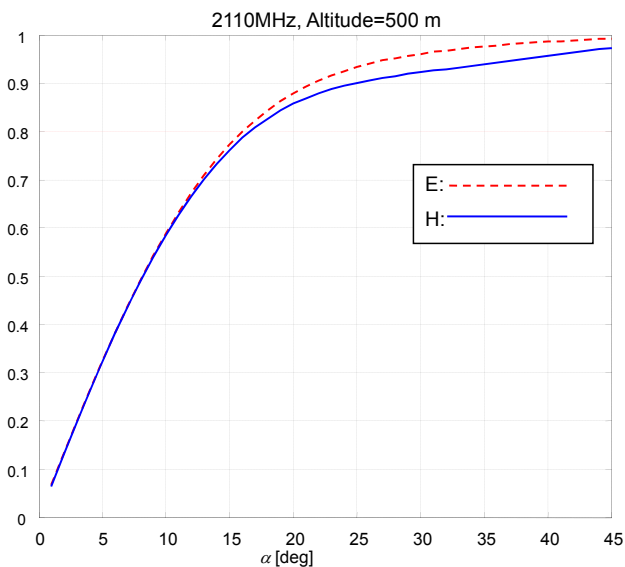


図9 全方位からの受信電力と有効アンテナビーム幅内の送信点からの受信電力の比

では航空機で受信された電力の80%が、 α で規定される有効アンテナビーム長の範囲から発信されたものと考えることができる。

5 測定実験

実験は日本の携帯基地局と端末の密度を考慮して、郊外と都市部を含むいくつかの地域で実施された。ここで都市部の仮定は、1平方キロメートルに10機のIMT基地局があるとし、郊外は、と1平方キロメートルにおける1つまたは2つの基地局があるとしている。測定実験は以下の手順で実施した。

- ① 海上上空でのデータ取得を目的として、太平洋上の銚子沖への測定を実施
- ② 長区間のデータの取得を目的として、調布空港から名古屋までの測定を往復で実施
- ③ 人口密集度が少ない地域のデータ取得を目的として名古屋から熊野灘沿いに潮岬までの測定を実施。

5.1 都市部及び海上上空測定結果

最初にホーンアンテナの方向、距離に対する特性、また、都市部で測定されたデータの補正を行うため、海上上空でデータを取得した。測定結果の一例として、調布空港離陸後、渋谷上空を通過し、関東平野北部から霞ヶ浦南部を經由し、利根川沿いに銚子に至り、銚

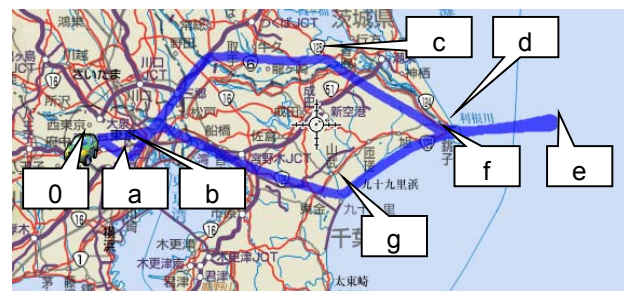


図10 銚子沖での測定経路の例

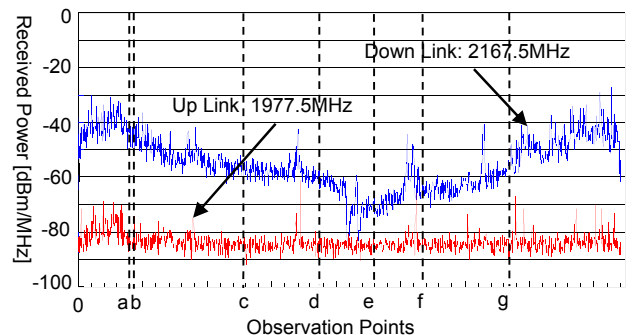


図11 調布-銚子沖間の測定電力例

子沖にフライト後、銚子岬に戻り、千葉上空を經由したときの経路図を図10に示し、このとき取得された受信電力を図11に示す。a点とb点は渋谷上空を、c点からd点、f点からg点については関東平野で比較的人口密度が低い地域を示し、d点からf点については海上上空の測定値を示す。またe点は折返し点である。

関東平野上空では、携帯端末上り回線からの受信強度は携帯基地局下り回線よりも約25～30dBほど低いことが確認された。また、携帯電話基地局からの下り回線においては、受信強度は都市部よりも郊外では約15dB程度低いことが確認された。

次に銚子沖の海上上空での観測例として、高度を約600mに保ち銚子岬を起点(0m)としたときの往復の受信電力を図12に示す。全体の傾向として復路(折返し点e点からf点へ向かう時)では、往路に比べて全体に10dB程度下がる傾向が見られる。これはホンアンテナが機体後方に向けて取り付けられているため、それによる指向性と考えられる。往路では40kmまでは距離に対する減衰が少なく、5dB程度であるが40kmを過ぎてからは距離の2乗に反比例する減衰に近づいている。また、復路については、同じく40kmまでは5dB程度の減衰が見られるが、40kmを過ぎてからは距離の2乗に反比例した減衰より少し少ない減衰が見られる。しかし、往路に比べてレベルの変動分が大きいところからノイズとの電力加算が原因でこのような特性になっていると推測される。

5.2 東京湾での測定結果との比較

東京湾上との測定結果の比較を表2にまとめる。この表では、東京湾と銚子沖においてそれぞれ日時が異なる3回ずつ測定を行った結果を示している。東京湾では2157.5MHz、銚子沖では1967.5MHzで約6dBの差が出ているが、その他の周波数ではほぼ3dB程度の差で受信レベルが測定されている。全体として、

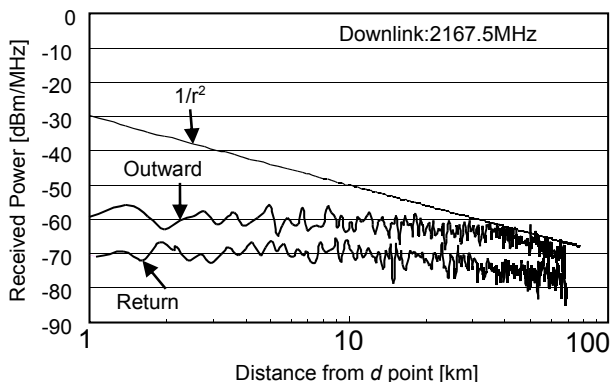


図12 銚子岬と折り返し点間の測定電力例

基地局から端末への下り回線は、上り回線よりおよそ20dB高くなっている。この傾向はこれまでの結果と一致している。一方、銚子沖携帯基地局の受信電力が、2137.5MHzと2157.5MHzにおいて、東京湾ではほぼ-67dBm/MHzから-61dBm/MHzに分布しているのに対し、銚子では-72dBm/MHzから-67dBm/MHz程度と6dB程度の差があり、東京湾での測定値より銚子での値が小さくなっている。一方、端末から基地局への上り回線では1947.5MHzと1967.5MHzにおいて東京湾ではそれぞれ-94dBm/MHzから-83dBm/MHzの分布に対して、銚子では-92dBm/MHzから-81dBm/MHzとなりほぼ同じ測定値が測定された。この結果から、下り回線からの影響は地域により差が大きく、都市部は基地局の数が多いため、全体的に高くなる傾向となる。一方、上り回線からの影響は都市部では局所的に高くなることもあるが、全体としては地域によらず変動が少ない傾向となる。

5.3 関東から紀伊半島区間の測定

日本全体からの放射量推定の根拠とするため、図13に示されるように関東地区から名古屋・紀伊半

表2 東京湾と銚子沖における受信電力の比較

測定条件	航空機から見た受信電力 (dBm/MHz)			
	1947.5 MHz	1967.5 MHz	2137.5 MHz	2157.5 MHz
東京湾-1	-82.6	-92.5	-61.1	-61.0
東京湾-2	-86.2	-94.4	-62.8	-67.0
東京湾-3	-84.8	-91.9	-60.7	-67.1
銚子-1	-88.9	-81.1	-66.7	-68.1
銚子-2	-88.0	-87.48	-68.7	-70.2
銚子-3	-91.6	-87.0	-69.0	-72.2

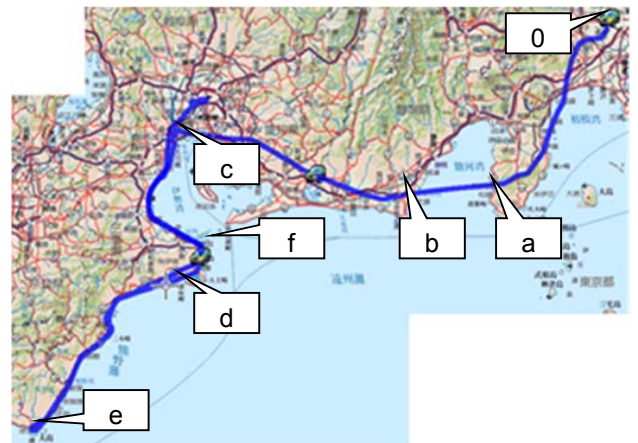


図13 関東-紀伊半島間での測定経路の例

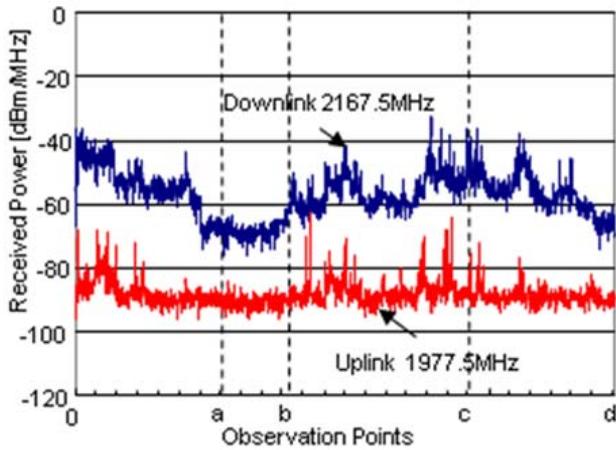


図 14 関東-名古屋地区間の測定電力例

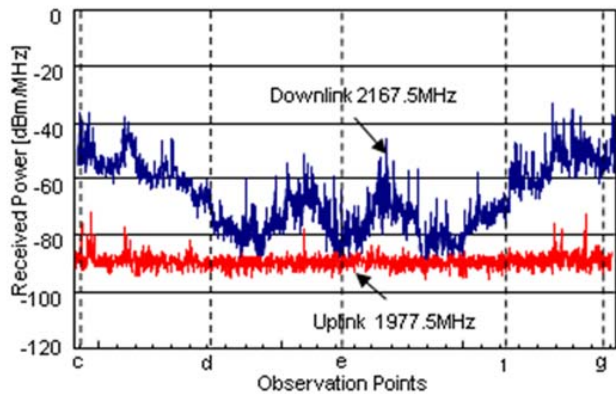


図 15 名古屋-熊野灘間の測定電力例

鳥東部区間での長距離のデータを取得した。この間、人口密度が高い地域として、関東平野、人口密度が少ない地域として伊豆半島、遠州灘、三河湾、海上として駿河湾での測定を行った。この測定データにより日本全体からの放射量を推定するための精度向上が期待できる。

図 13 の測定結果の一例として調布空港から名古屋までの受信測定電力を図 14 に示す。図 13 の 0 から c 点までが長距離フライトにおける測定データである。

ここでも、これまでの測定結果と同様に、携帯基地局上り回線受信強度は携帯基地局下り回線よりも約 25～30 dB ほど低いことが確認された。

5.4 人口密度が少ない地域での測定

これまでに測定されていないデータとして、人口密度が少ない地域(人口密度 100 人/km² 程度)のデータを紀伊半島熊野灘周辺のフライトにより取得した。

携帯基地局からの下り回線電力では、これまで取得したデータに比べて 20 dB 程度低い電力が取得された。これらのデータをモデル化し、干渉評価を行うことに

表 3 各地点での測定電力の比較

測定条件	飛行船または航空機から見た受信電力 [dBm/MHz]			
	1947.5 MHz	1967.5 MHz	2137.5 MHz	2157.5 MHz
東京湾 -1	-82.6	-92.5	-61.1	-61.0
東京湾 -2	-86.2	-94.4	-62.8	-67.0
東京湾 -3	-84.8	-91.9	-60.7	-67.1
銚子 -1	-88.9	-81.1	-66.7	-68.1
銚子 -2	-88.0	-87.48	-68.7	-70.2
銚子 -3	-91.6	-87.0	-69.0	-72.2
熊野灘 -1	-88.0	-85.3	-75.1	-79.4
熊野灘 -2	-88.4	-85.0	-71.5	-75.6

よりデータの精度を高くすることが期待される。測定結果の一例として名古屋から熊野灘地区間のフライトにおける測定電力を図 15 に示す。図 15 における d 点から f 点間は人口密度が少ない地域における熊野灘測定データである。d 点から e 点までが往路でのデータであり、e 点で折返し、f 点までが復路でのデータとなる。

熊野灘周辺では一般的に携帯基地局として観測される電力よりも 20 dB ほど少ない電力が測定されている。場所によってはノイズフロアに近いほど低い場所も観測されている。

表 3 は比較的受信レベルが低い海上での測定と比較したものであるが、熊野灘の 2137.5 MHz と 2157.5 MHz では銚子、東京湾に対して十分に小さい値となっている。これは熊野灘での基地局からのレベルが東京湾、銚子における海上での基地局からのレベルより 5 dB から 15 dB 程度低くなっている。

6 まとめ

本稿では、地上と衛星の周波数の共用化技術を構築する上で、共用する地上系通信システムが衛星系へ与える干渉量を評価するため、航空機を利用し上空から電力を測定する実験を行った。この実験では都市部上空に加え、海上や人口密度が低い地域など、様々な人口密度の異なる地域でのデータ取得を行った。また、航空機で得られた観測レベルから、衛星における全干渉レベルに変換するために、地表の干渉源の範囲と航空機で受信される電力との関係をモデル化し、シミュレーションを実施し受信電力と衛星への干渉量の関係を明らかにした。これにより、受信データの正規化を行いそれぞれの地域における干渉量を得た。

銚子海上上空と東京湾での測定により、上空での携

帯基地局の受信電力に差があること観測されたが、携帯からの干渉量はほぼ同程度であることが判明した。さらに関東地区から名古屋地区（東海道線沿線）の長距離のデータの取得結果により、人口密度により携帯基地局からの干渉量は40 dBほどの変動があり、携帯電話からの干渉量より高くなることが判明した。以上の結果より、干渉面からの判断では、STICSにおいては地上システムと衛星システムの上り／下り回線がそれぞれ同じであるノーマル方式の方が有効であると判断できる。

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 葛輪正, 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” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.12, pp.1629-1640, 2008.
- 2 T. Orikasa, M. Satoh, Y. Fujino, and A. Miura, “A study of beam direction variation of Large Deployable Reflector Antenna on orbit,” IAC-10.C3.2.3, Sept. 2010.
- 3 Y. Fujino, T. Minowa, N. Hamamoto, H. Tsuji, and R. Suzuki, “Research and Development plan for Satellite/Terrestrial Integrated mobile Communication System,” AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 1.2.4, AIAA, Edinburgh, June 2009.
- 4 H. Tsuji, Y. Fujino, N. Hamamoto, and R. Suzuki, “Interference Measurement Experiment of Mobile Base Station Downlinks Using an Aircraft in Satellite-Terrestrial Integrated Mobile Communication systems,” Proc. 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009), Bangkok, Thailand, Oct. 2009.



藤野義之 (ふじの よしゆき)

東洋大学理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

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



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