

地上／衛星間周波数共用方式の評価

三浦 周 濱本直和 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／衛星間の電波干渉を考慮して同一周波数帯を地上回線と衛星回線で共用する周波数共用方式の成立性を検証する目的で評価を行った。簡易干渉モデルによる各干渉経路の干渉量の評価、詳細干渉モデルによる同一チャンネル干渉下での地上／衛星回線の同時収容回線数の評価、衛星端末－地上基地局間の離隔距離の評価を行い、周波数共用の成立性を確認している。

1 まえがき

同一周波数帯を共用する地上回線と衛星回線に携帯端末によってシームレスに接続可能な、地上／衛星共用携帯電話システム (STICS) の研究開発が行われている¹⁾。STICS は、大型アンテナを用いたマルチビーム衛星システムの特徴を生かして、地上／衛星間で周波数共用を行うことを想定している。具体的には、割当て周波数帯域をサブバンドに分割し、衛星セルにサブバンドを割当て、地上回線にはその衛星セルの外側のエリアで同じサブバンドを割り当てることにより周波数共用を行う。ただし、衛星アンテナが衛星セルの外でも感度を持つため、地上-衛星間で電波干渉が発生する。また、衛星セルの内側で衛星回線を用いる端末と衛星セルの外側の地上端末／基地局の間でも電波干渉は発生する。したがって、これらの電波干渉を考慮して周波数共用条件を明らかにする必要がある。

そこで、NICT では STICS の周波数共用方式の成立性を検証するための評価を行った。まず、簡易な干渉モデルによる各干渉経路の干渉量の評価を行い、干渉経路ごとの干渉の特徴と周波数共用の見通しを確認した。次に、地上／衛星間干渉の存在下で、地上／衛星回線がともに成立し収容可能な回線数を定量的に把握することを目的として、同一チャンネル干渉下での地上／衛星回線の同時収容回線数の評価を行った²⁾。この同時収容回線数の評価には、地上系から発生する干渉について、基地局と端末の局数と送信電力に日本全国の現実のトラフィック分布をできる限り反映できる詳細干渉モデル³⁾を構築して使用した。この詳細干渉モデルには、NICT で実施してきた、様々な環境での地上携帯電話の送信電力測定⁴⁾⁶⁾の統計データを入力し、評価精度の向上を図った。さらに、地上／衛星間とは干渉のメカニズムが異なる衛星端末－基地局間の干渉に対しては、回線成立のための衛星端末－基地局

間の離隔距離の評価を行った。

以降では、**2** でまず、地上／衛星間周波数共用方式と干渉の概念について説明する。その後、**3** で簡易干渉モデルによる各干渉経路の干渉量の評価結果について述べる。さらに、**4** で詳細干渉モデルを用いた同一チャンネル干渉下の同時収容局数評価について報告する。加えて **5** で衛星端末－基地局間の離隔距離の評価結果を示す。最後に **6** において、本研究で得られた結論をまとめる。

2 地上／衛星間周波数共用方式と干渉の概念

STICS は、移動衛星業務に割り当てられた 2 GHz 帯 (上り 1980-2010 MHz、下り 2170-2200 MHz) を地上回線と衛星回線で共用することを想定している。その場合、地上回線に衛星上り／下りのバンドのどちらを割り当てるかによって図 1 のようにノーマルモード／リバースモードと呼ぶ 2 つの方式が考えられる。

周波数共用の方法は、図 2 (a) に示すように割当て周波数帯をサブバンドに分割し、衛星セルへ周波数繰り返し利用のために多色配置でサブバンドを割り当てる (図 2 (a) ではサブバンドは $f_1 \sim f_7$ の 7 つ)。そのうえで、図 2 (b) に示すように、ある衛星セルに割り当てたサブバンドは、地上系ではその衛星セルの外側のエリアで通信を行う地上回線に割り当てることで周波

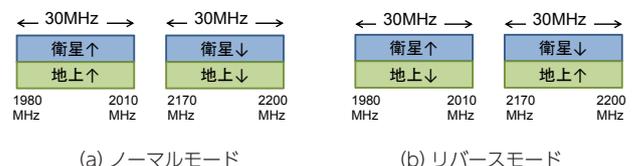


図 1 地上／衛星間周波数共用方式

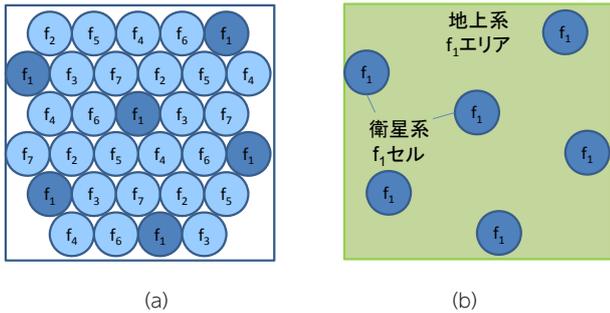


図2 周波数共有の概念(衛星系7セル繰返しの場合)。(a)衛星セルへのサブバンド割当て例、(b)地上系が衛星系と同一周波数を使用できるエリア

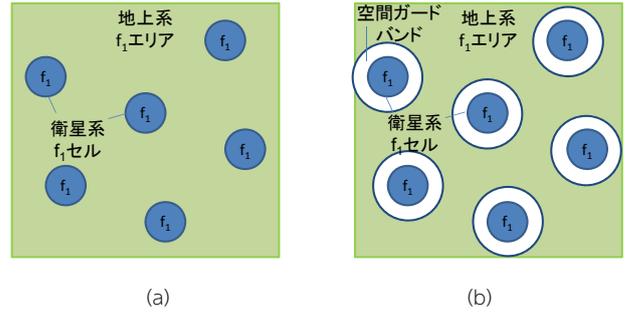
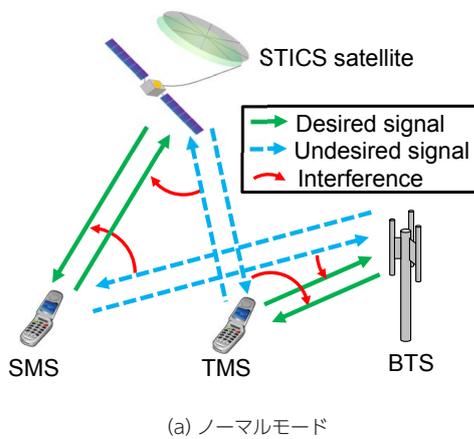
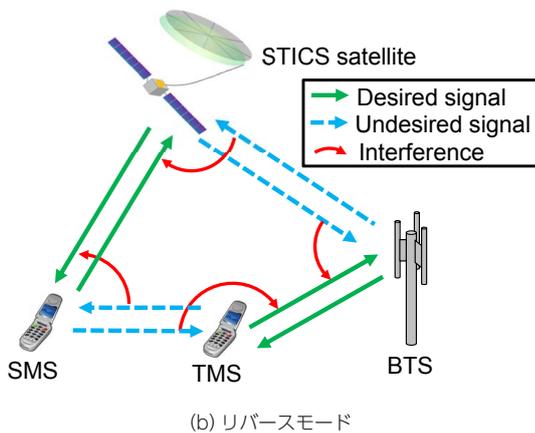


図4 空間ガードバンドの概念。(a)空間ガードバンドなし、(b)あり



(a) ノーマルモード



(b) リバースモード

図3 地上／衛星間干渉経路

数共有を実現する。

このように地上回線と衛星回線が同じサブバンドを使用するエリアを分けることで割当て周波数帯全体として周波数共有を行うが、1で述べた理由により地上系と衛星系の間で電波干渉が発生する。図3に干渉経路を示す(図中のSMSは衛星回線を利用する端末(以下、衛星端末と呼ぶ)、TMSは地上回線を利用する端

末(以下、地上端末と呼ぶ)、BTSは地上基地局とする)。干渉経路は希望波の4回線それぞれに対して存在し、希望波回線4回線のそれぞれについて与干渉回線として衛星、地上の2回線が存在する。ここで、地上系と衛星系の間での干渉のメカニズムは干渉経路が衛星-地上端末間(衛星伝搬路)であるか、衛星端末-基地局間(地上伝搬路)であるかによって大きく異なる。衛星-地上端末間の場合、伝搬距離がどの地上端末からもほぼ同等であるため、カバーエリア全体の多数の地上端末が累積的に衛星に干渉を与える。一方、衛星端末-基地局間の場合、衛星端末-基地局間距離によって干渉量が大きく変化する。衛星セルは直径200km程度と非常に大きいため、衛星セル中心付近での衛星端末が衛星セルの外側で同一周波数を使用する基地局に与える干渉はほぼ無視できる。基地局への干渉が影響するのは衛星端末が衛星セルエッジ付近に位置する特殊なケースである。

また、STICSでは、干渉回避策として図4に示す空間ガードバンドを設ける方法がある。これは、衛星セルの周りに、地上回線がその衛星セルと同じサブバンドを使用できない領域を設けるものである。空間ガードバンドの利点は地上-衛星間干渉を低減できることであるが、一方で地上回線の通信エリアを制限するため、その効果と制限を評価する必要がある。

3 簡易干渉モデルによる各干渉経路の干渉評価

3.1 評価の目的

干渉経路ごとの干渉の特徴と周波数共有の見通しを確認する目的で、簡易な干渉モデルによる各干渉経路の干渉量の評価を行う。評価は、単一の衛星/地上セルを対象として、図3に示したノーマルモード、リバースモード各4経路に対して行う。

3.2 評価方法

衛星セル、地上セルは各1個とし、各セルの中にケースによって1~複数の局を配置する。そしてその際の、希望波回線の電力に対する干渉波電力(CIR)を評価する。また、衛星ビームの周りに設ける空間ガードバンドを変化させ、空間ガードバンド量によるCIRの改善効果を確認する。その他の条件を以下に示すとともに回線条件を表1に示す。

- 地上回線はCDMA(チャンネル帯域幅5MHz)、衛星回線はFDMA(チャンネル帯域幅19.2kHz)とする。
- 最悪干渉ケースを想定して、衛星端末位置は衛星セルのEOC端、地上セル位置は空間ガードバンド端に設定する。
- 衛星回線の干渉評価において干渉源が地上端末の場合は、1局当たり干渉電力を一定(1mW~250mW)とする。干渉源が基地局の場合は、基地局1局による干渉電力が最大のケース(最大送信電力20Wと設定)を評価する。
- 地上回線に与える衛星回線からの干渉については、地上のCDMA復調器の拡散利得による干渉低減量を25dBとし、干渉源である衛星のFDMA信号が1チャンネル収容時と最大チャンネル数収容時を評価する。

- 地上回線の干渉評価における希望波受信電力は、文献[7]記載の要求受信電力で規定する(W-CDMA上り回線、下り共通制御チャンネルの要求受信電力)。

3.3 評価結果

3.3.1 ノーマルモード

(a) 衛星上り回線

図5にノーマルモード衛星上り回線の干渉経路と評価結果を示す。図5(b)の評価結果は、横軸は衛星ビームEOCと地上セルの距離であり、空間ガードバンド量とCIRの関係を示している。図から、CIRは地上端末1端末当たりの送信電力に依存することがわかる。また、図に示していないが干渉源となる地上回線数の増加によって干渉量は増加する。この結果から、本回線は共用可能と見込まれるが共用条件は端末送信電力と同時使用端末数に依存する。

(b) 衛星下り回線

図6にノーマルモード衛星下り回線の干渉経路と評価結果を示す。図6(b)の評価結果から、CIRは空間ガードバンドを取ることで大きく改善することがわかる。これは、本干渉経路は地上伝搬路であるため、干渉源である地上基地局と衛星端末間の伝搬損失

表1 回線条件

回線	チャンネル帯域幅 [kHz]	送信			伝搬路			受信		
		送信局	送信電力 [W]	アンテナ利得 [dBi]	伝搬距離 [km]	伝搬モデル	伝搬損失 [dB]	受信局	アンテナ利得 [dBi]	要求受信電力 [dBm]
衛星上り	19.2	衛星端末	0.2	0	36000	自由空間損失	190	衛星	47	
衛星下り	19.2	衛星	0.2	47	36000	自由空間損失	190	衛星端末	0	
地上上り	5000	地上端末	0.001~0.25	0	1	COST231-秦モデル	140	基地局	17	-116
地上下り	5000	基地局	20	17	1	COST231-秦モデル	140	地上端末	0	-117

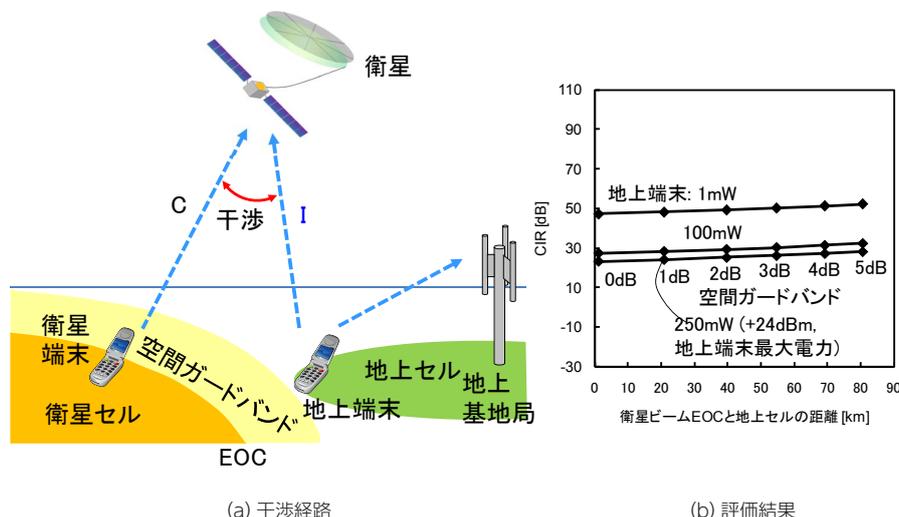


図5 ノーマルモード衛星上り回線の干渉経路と評価結果

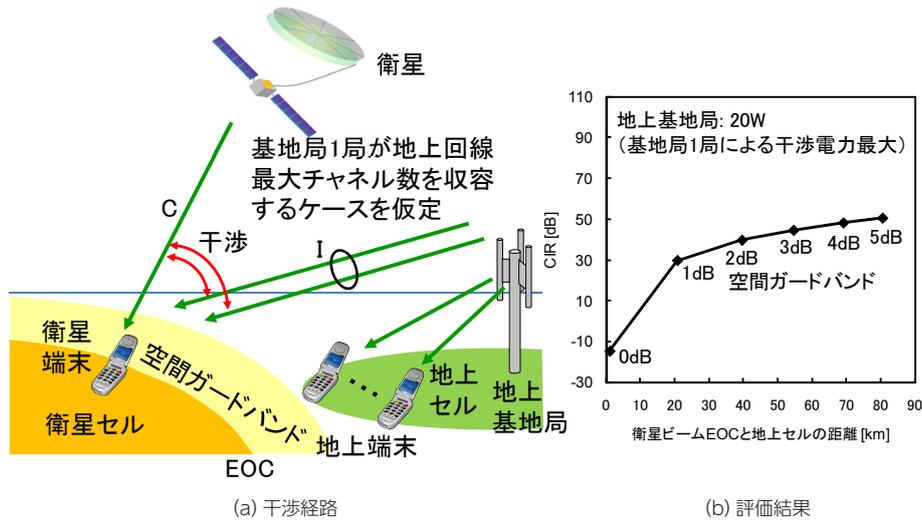


図6 ノーマルモード衛星下り回線の干渉経路と評価結果

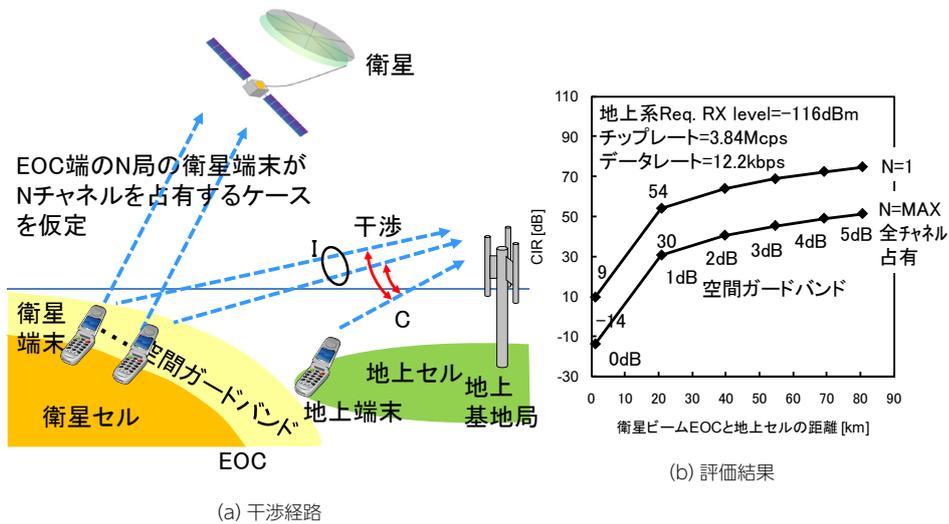


図7 ノーマルモード地上上り回線の干渉経路と評価結果

(COST231 - 秦モデル) の離隔距離による増減が大きい
ためである。この結果から、本回線のCIRは空間ガード
バンドの適切な設定により改善可能であり、共用可
能と見込まれる。

(c) 地上上り回線

図7にノーマルモード地上上り回線の干渉経路と
評価結果を示す。図7(b)の評価結果から、CIRは
衛星端末数と空間ガードバンドに依存することがわ
かる。衛星端末数N=MAX(全チャンネル占有時)で
CIR=-14dB(空間ガードバンド=0dB)、CIR=30dB(空
間ガードバンド=1dB)である。本干渉経路は地上伝
搬路であるため、離隔距離による伝搬損失の増減が大
きい。この結果から、空間ガードバンドの適切な設定
によりCIRは改善可能であり、本回線は共用可能と
見込まれる。

(d) 地上下り回線

図8にノーマルモード地上下り回線の干渉経路と
評価結果を示す。図8(b)の評価結果から、CIRは
衛星端末数に依存することがわかる。衛星端末数N=1
ではCIRは30dB近いが、N=MAX(全チャンネル占有
時)でのCIRは5~10dBと小さい。N=MAXのケー
スは災害時等で特定の衛星ビームに集中的に衛星トラ
フィックが発生したケースに相当する。その場合に
CIR改善のため空間ガードバンドをさらに取り場合
でも、地上間の干渉に比べてCIRの改善量は小さい。
また、空間ガードバンドを大きくとるほど地上端末の
通信可能場所に制限が発生する。この結果から、本回
線は衛星回線にトラフィック集中が発生する際に課題
があり、対策が必要と見込まれる。

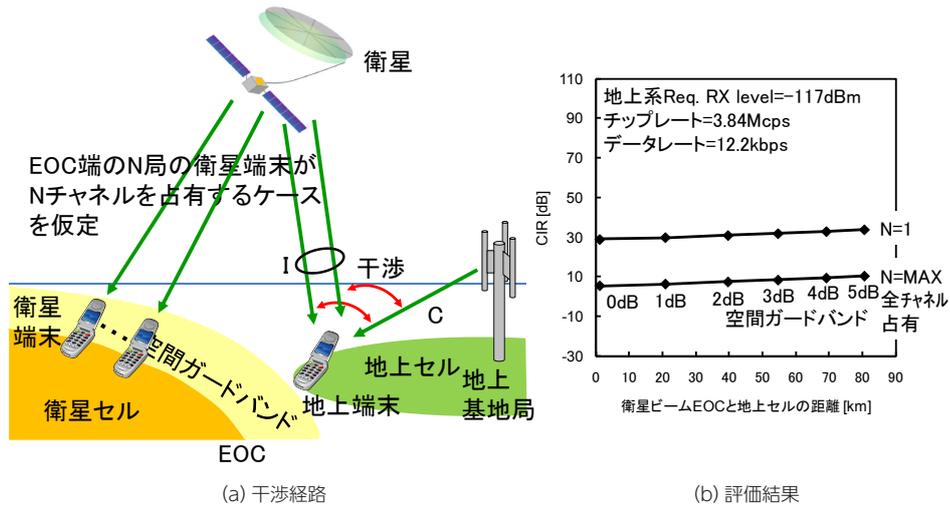


図8 ノーマルモード地上下り回線の干渉経路と評価結果

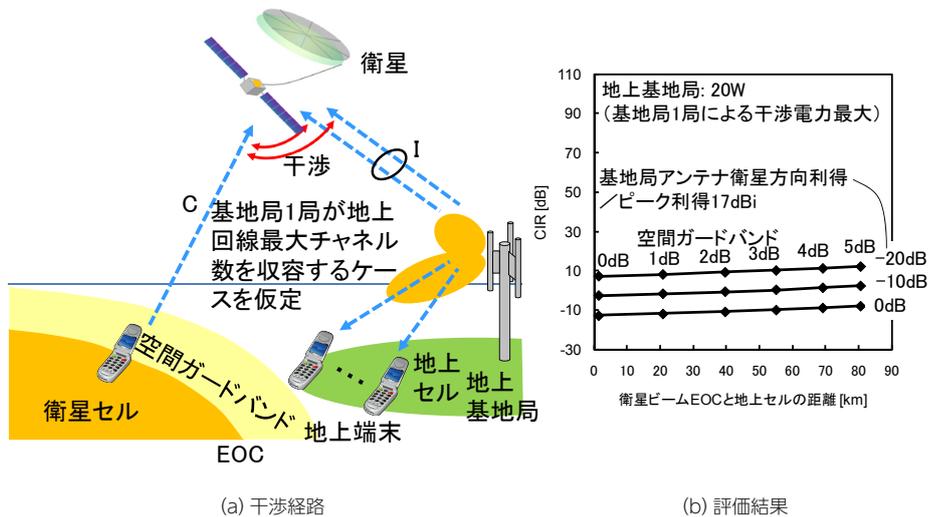


図9 リバースモード衛星上り回線の干渉経路と評価結果

3.3.2 リバースモード

(a) 衛星上り回線

図9にリバースモード衛星上り回線の干渉経路と評価結果を示す。図9(b)の評価結果から、CIRは基地局アンテナの衛星方向利得に依存することがわかる。CIRは衛星方向利得=ピーク利得のとき-13dB以上、衛星方向利得=ピーク利得-20dBのとき7dB以上である。なお、本評価は基地局送信電力が典型的な基地局1局の最大電力20Wの条件で行っており、現実的な1局当たり干渉電力はより小さいと推定されるが、ここでのCIRは基地局1局当たりの値であり、基地局数が増加すると干渉量は増加する。この結果から、本回線の共用には課題があり、対策が必要と見込まれる。

(b) 衛星下り回線

図10にリバースモード衛星下り回線の干渉経路と

評価結果を示す。図10(b)の評価結果から、CIRは空間ガードバンドを取ることで大きく改善することがわかる。これは、本干渉経路は地上伝搬路であるため、離隔距離による伝搬損失の増減が大きいためである。この結果から、本回線は空間ガードバンドの適切な設定により共用可能と見込まれる。

(c) 地上上り回線

図11にリバースモード地上上り回線の干渉経路と評価結果を示す。図11(b)の評価結果から、CIRは基地局アンテナの衛星方向利得と衛星端末数に依存することがわかる。衛星端末数N=MAXで衛星方向利得=ピーク利得のときCIRは-11dB以上、衛星方向利得=ピーク利得-20dBのときCIRは9dB以上である。N=MAXのケースは災害時等で特定の衛星ビームに集中的に衛星トラフィックが発生したケースに相当する。この結果から、本回線は許容衛星端末数と衛

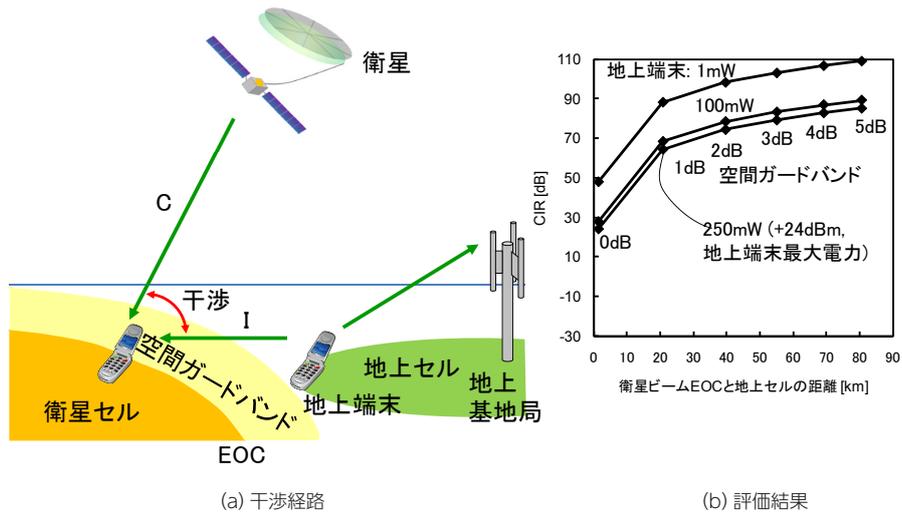


図 10 リバースモード衛星下り回線の干渉経路と評価結果

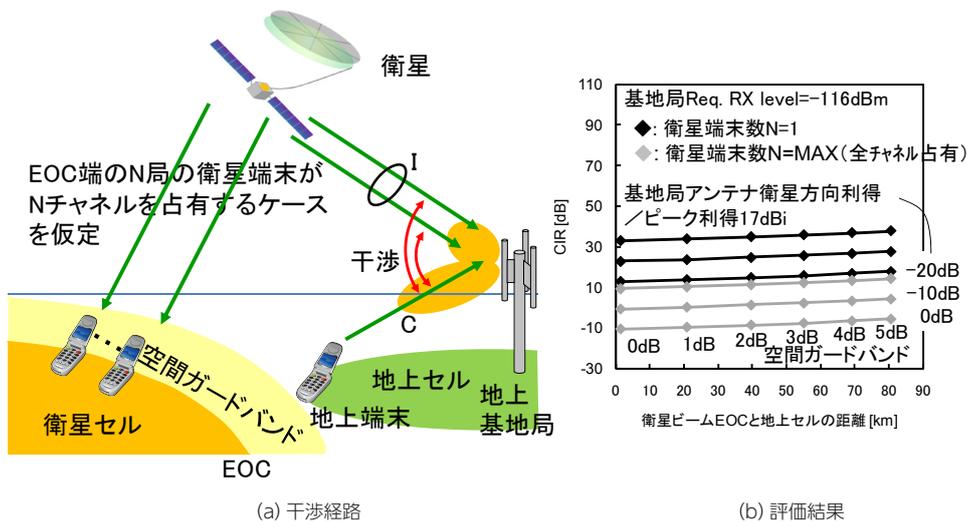


図 11 リバースモード地上上り回線の干渉経路と評価結果

星方向基地局アンテナ利得の制限、空間ガードバンドの組み合わせにより共用の可能性があるが、衛星回線にトラフィック集中が発生する際に課題があることを確認した。

(d) 地上下り回線

図 12 にリバースモード地上下り回線の干渉経路と評価結果を示す。図 12 (b) の評価結果から、CIR は空間ガードバンドを取ることによって大きく改善することがわかる。これは、本干渉経路は地上伝搬路であるため、離隔距離による伝搬損失の増減が大きいためである。この結果から、本回線は空間ガードバンドの適切な設定により共用可能と見込まれる。

3.4 まとめ

STICS の各干渉経路の干渉評価を、単一の衛星／地上セルによる評価によって行い、経路ごとの周波数

共用の見通しと課題を抽出した。ノーマルモードでは、衛星上り回線は共用可能と見込まれるが共用条件は地上回線の端末送信電力と同時使用端末数に依存することを確認した。地上下り回線の CIR が他の回線に比べて小さく、課題となるのは災害時等の 1 ビームに衛星回線が集中する場合であることを確認した。また、リバースモードでは、衛星上り回線では基地局の送信電力が大きいためには共用には課題があること、地上上り回線では災害時等の 1 ビームに衛星回線が集中する場合に課題があることを確認した。これらは、干渉経路が衛星伝搬路となるケースであり、伝搬距離がどの回線からもほぼ同等であるため、カバーエリア全体の干渉源数が累積的に干渉を与える。一方、干渉経路が地上伝搬路となる回線では、空間ガードバンドの効果によって大きく CIR が改善し、共用可能と見込まれることを確認した。

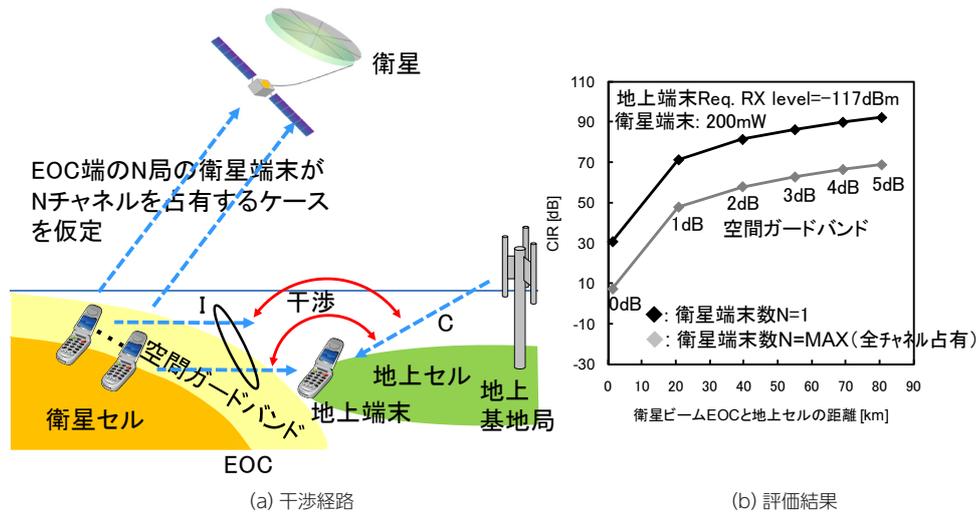


図 12 リバースモード地上下り回線の干渉経路と評価結果

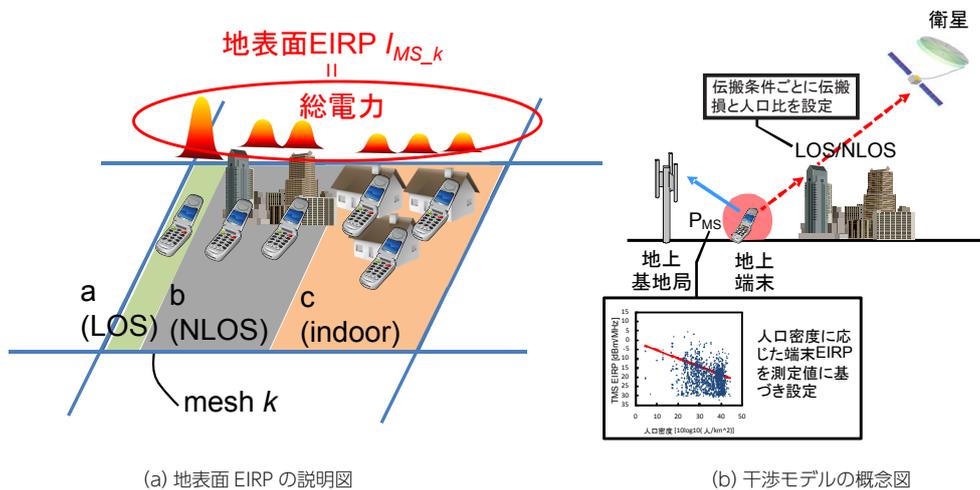


図 13 地上端末の干渉モデルの概念図

4 詳細干渉モデルを用いた同一チャンネル干渉下の同時収容局数評価

4.1 評価の目的

本節では、地上/衛星間の周波数共用に伴う同一チャンネル干渉を考慮したSTICSの同時収容局数の評価を行い、STICSのシステムとして成立性を検証する。前節の結果や航空機による上空からの地上携帯電話/地上基地局の送信電力測定実験によって、基地局からの上り回線の対衛星干渉量が大きい結果が得られた。そこで、周波数共用方式としてはノーマルモードが有利であると結論づけ、本評価はノーマルモードについて行う。

3で述べた評価結果から、地上系と衛星系の間での干渉のメカニズムは干渉経路が衛星-地上端末間(衛星伝搬路)であるか、衛星端末-基地局間(地上伝搬

路)であるかによって大きく異なることがわかった。衛星-地上端末間の場合、伝搬距離がどの地上端末からもほぼ同等であるため、カバーエリア全体の多数の地上端末が累積的に衛星に干渉を与える。一方、衛星端末-基地局間の場合、衛星端末-基地局間距離によって干渉量が大きく変化する。衛星セルは直径200km程度と非常に大きいため、基地局への干渉が影響するのは衛星端末が衛星セルエッジ付近に位置する特殊なケースである。また、空間ガードバンドの効果によって大きくCIRが改善する。

そこで、4の評価では、地上-衛星間の干渉経路が衛星-地上端末間のケースについて次節に示す方法で被干渉回線が所要 C/N_0 を満足する干渉回線の収容可能局数を計算する。衛星端末-基地局間干渉の評価については5で述べる。

4.2 干渉モデル

地上システムから衛星に対する干渉は、ノーマルモードでは地上端末からの干渉となる。地上端末の局数が非常に多いことを考慮すると、干渉量を特に精度良く見積もる必要がある。そこで、地上端末から衛星に対する干渉モデルを構築した。図13に地上端末の干渉モデルの概念図を示す。図13(a)に示すように干渉モデルは地表面 EIRP と呼ぶ、地表面の単位面積ごとの発生干渉量で定義する。その際、単位面積内の端末の通話環境 (LOS / NLOS / 屋内等) に応じて衛星への干渉量は異なることを勘案して、図中 a、b、c で示す伝搬環境のクラスごとの通話中端末の発生干渉量の総和をこの単位面積内の発生干渉量と考える。端末ごとの発生干渉量の定義は、図13(b)に示すように送信電力として地上干渉評価実験で得た人口密度対送信電力の測定値や、伝搬条件ごとの伝搬路損失と人口比などのパラメータを入力する。第 k メッシュの地上端末による発生干渉量を式 (1) で定義する。

$$I_{MS_k} = N_k \cdot R_{x_k} \left\{ \begin{array}{l} (i_{x_{km}} \cdot \Delta i_{x_{ka}}) \cdot r_{x_{ka}} + \\ (i_{x_{km}} \cdot \Delta i_{x_{kb}}) \cdot r_{x_{kb}} + \\ (i_{x_{km}} \cdot \Delta i_{x_{kc}}) \cdot r_{x_{kc}} + \dots \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで $i_{x_{ka}} \cdot \Delta i_{x_{ka}}$ 、 $i_{x_{kb}} \cdot \Delta i_{x_{kb}}$ 、 $i_{x_{kc}} \cdot \Delta i_{x_{kc}}$ 、…は第 k メッシュの携帯電話の人口クラスごと・伝搬環境ごとの送信電力であり、地上走行実験での測定値から算定する人口クラスごとの携帯電話送信電力 $i_{x_{km}}$ を、伝搬環境の違いによる電力差 $\Delta i_{x_{ka}}$ 、 $\Delta i_{x_{kb}}$ 、 $\Delta i_{x_{kc}}$ 、…で補正して求める。 $r_{x_{ka}}$ 、 $r_{x_{kb}}$ 、 $r_{x_{kc}}$ 、…は第 k メッシュの携帯電話の人口クラスごと・伝搬環境ごとの人口比である。 x_k (I、II、III、IV、…) は市街地、郊外等のサービス環境に対応した人口クラスを示す引数、 a 、 b 、 c 、…は屋外見通し / 見通し外、屋内等の伝搬環境を示す引数である。携帯電話送信電力 $i_{x_{km}}$ は、人口対送信電力の近似式から求める。伝搬環境ごとの電力差 $\Delta i_{x_{ka}}$ 、 $\Delta i_{x_{kb}}$ 、 $\Delta i_{x_{kc}}$ 、…は、移動通信の伝搬損失の推定式や測定値等を参考に決める。 $N_k \cdot R_{x_k}$ は第 k メッシュ内の同時通話数であり、第 k メッシュにおける人口 N_k と携帯電話の同時使用率 R_{x_k} から計算する。

4.3 評価方法

地上／衛星回線の回線条件をそれぞれ表2、3に示す。地上回線について、端末の局数と送信電力に日本全国の現実のトラフィック分布をできる限り反映するため、日本全国を国土院の標準地域メッシュ (2次メッシュ：約10km四方) で分割し、2次メッシュごとに局数と送信電力の総和を入力している。基地局数と送信電力は、それぞれ携帯電話基地局の全国各自治体無線局免許情報 (平成22年5月現在) による2次

メッシュに換算した局数と、定格出力の総和の30%としている。端末数は、2次メッシュごとの昼間人口数と、仮定した通話率 (1%) から算出している。端末送信電力は、日本国内走行実験による W-CDMA 地上携帯電話送信出力測定^[4] の統計処理に基づき推定した人口クラスごとの送信電力値を使用する。送信電力

表2 地上系の回線条件

回線パラメータ	設定値
通信方式	CDMA
上り周波数 (MHz)	1980-2010
下り周波数 (MHz)	2170-2200
サブバンド数	6
サブバンド帯域幅 (MHz)	5
情報レート (kbps)	9.6
1チャンネル占有帯域幅 (kHz)	5000
基地局の衛星方向利得 (dBi)	-3
基地局の地上方向利得 (dBi)	17
基地局送信電力	携帯電話基地局の全国各自治体無線局免許情報による定格出力の30%と仮定
基地局受信所要C/N0 (dB-Hz)	47.6
基地局アンテナ雑音温度 (K)	200
基地局給電損失 (dB)	0
基地局雑音指数 (dB)	1.5
端末アンテナ利得 (dBi)	0
端末送信電力	国内走行実験による携帯電話送信出力測定の統計処理に基づき人口クラスごとの送信電力値を推定 (1mW以下)
端末所要C/N0 (dB-Hz)	47.6
端末アンテナ雑音温度 (K)	80
端末給電損失 (dB)	0
端末雑音指数 (dB)	1.5

copyright(c)2013 IEICE

表3 衛星系の回線条件

回線パラメータ	設定値
通信方式	FDMA
上り周波数 (MHz)	1980-2010
下り周波数 (MHz)	2170-2200
サブバンド数	7
サブバンド帯域幅 (MHz)	4.3
情報レート (kbps)	9.6
1チャンネル占有帯域幅 (kHz)	19.2
衛星アンテナ開口直径 (m)	30
衛星アンテナセル内最低利得 (dBi)	47
衛星アンテナパターン	Rec. ITU-R S. 672-4
衛星アンテナサイドローレベル (dBi)	30
衛星総合送信電力 (kW)	2
衛星送信電力/チャンネル (mW)	200
衛星受信所要C/N0 (dB-Hz)	43.8
衛星アンテナ雑音温度 (K)	300
衛星給電損失 (dB)	1.1
衛星雑音指数 (dB)	1.5
端末アンテナ利得 (dBi)	0
端末送信電力 (mW)	200
端末所要C/N0 (dB-Hz)	43.8
端末アンテナ雑音温度 (K)	80
端末給電損失 (dB)	1
端末雑音指数 (dB)	1.5

copyright(c)2013 IEICE

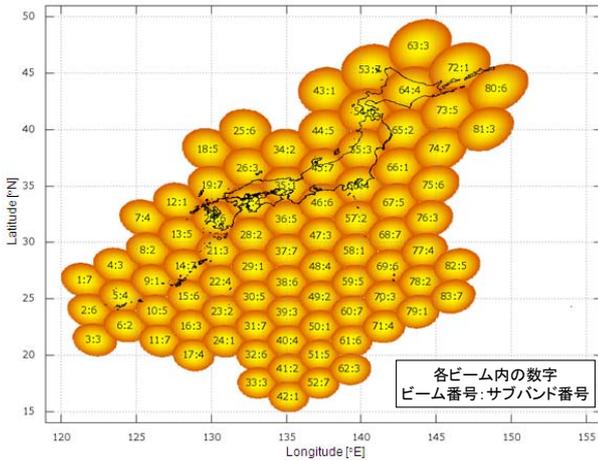


図 14 衛星ビーム配置

値は 1 mW 以下であり、携帯電話の最大送信出力(約 250 mW) より大幅に低い電力で送信している結果が得られている。

衛星回線のビーム配置を図 14 に示す。衛星ビームは、日本とその排他的経済水域を覆う 83 ビームとする。7 ビームを 1 クラスタとして 4.3 MHz ごとのサブバンドを割り当てる。衛星系の 1 回線当たり送信電力は 200 mW とする。衛星の総合送信出力を本研究では 2 kW と仮定し、最大回線数を 10,000 回線とする。端末は、平時は 83 ビームに均等に分布すると仮定する。災害時は、STICS の衛星中継器のチャネライジング機能(各衛星ビームに配分する周波数割当てを変更する機能)を用いて、1 衛星ビームに割当て可能な最大帯域幅(1 クラスタ 30 MHz) の回線数の端末が通話すると仮定する。

収容局数評価では、ある被干渉回線について、所要 C/N_0 の範囲内での与干渉回線の最大回線数を計算する。与干渉回線を地上回線単独(衛星回線による干渉を無視)、衛星回線単独(地上回線による干渉を無視)、衛星・地上回線両方(衛星系に最大回線数を与え地上系で収容できる最大回線数を計算)とする。

計算手順は、まず、開発した干渉評価シミュレータ⁸⁾を用いて端末配置、衛星ビーム配置、回線条件設定、周波数割当て等を行い、被干渉回線ごとに受信信号強度と与干渉量を計算する。次に、得られた結果を入力値として、以下の手順に基づき収容局数を計算する。

① 式(1)に基づき 1 回線ごとの平均干渉量を計算

$$\bar{I} = \frac{\sum_{m=1}^M I_m \cdot B}{M} \quad (2)$$

M : 被干渉回線と周波数が重なる与干渉回線数

I_m : 第 m 与干渉回線の干渉量

B : 第 m 与干渉回線と被干渉回線の帯域重畳率

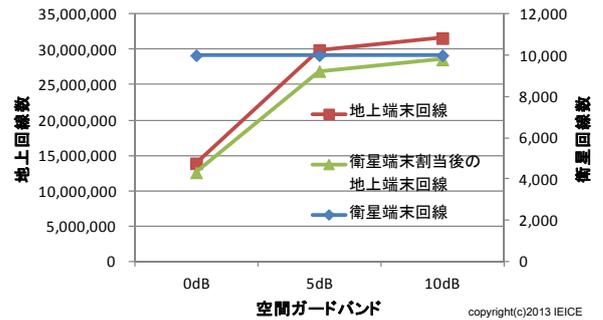


図 15 衛星上り回線成立時の同時収容回線数

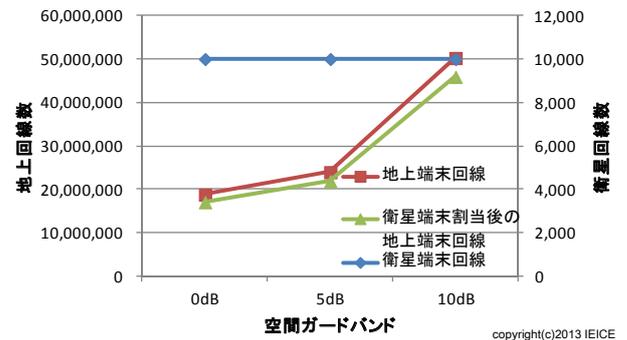


図 16 災害時衛星上り回線成立時の同時収容回線数

② 回線係数 a 、すなわちある被干渉回線が成立し所要 C/N_0 を満たす条件下での、与干渉回線の最大回線数を式(2)に基づき計算

$$\frac{C}{(a \cdot \bar{I} + N_0)} = \left[\frac{C}{N_0} \right]_{req} \quad (3)$$

また、地上-衛星間の干渉回避のために設ける空間ガードバンドの効果を確認するため、空間ガードバンドを 0 dB、5 dB、10 dB と変化させて評価を行う。

4.4 評価結果

衛星-地上端末間が干渉となるケースは希望波が衛星上り回線のケースと地上下り回線のケースがある。希望波が地上下り回線の場合には、計算の結果、干渉源となる衛星回線は最大の 10,000 回線が常に成立することがわかった。そこで衛星上り回線について評価結果を述べる。

衛星上り回線では、衛星セルの外で同一周波数を使用する全ての地上端末からのアップリンクが衛星への干渉となる場合と、他ビームの衛星端末から衛星へのアップリンクが干渉となる場合がある。それぞれを考慮した収容局数計算結果を図 15 に示す。衛星回線は常に成立し、回線数は上限の 10,000 回線である。地上回線数は、空間ガードバンドなし(0 dB)の場合、

衛星回線未割当て時で約 1,400 万回線、衛星回線を割り当てた条件では約 1,300 万回線であり、空間ガードバンドが 10 dB の場合に最大回線数を取ることがわかる。一方、地上回線の通信可能エリアは、本計算条件の場合空間ガードバンド 0 dB、5 dB、10 dB のときそれぞれ 100 %、88 %、31 % であり、空間ガードバンド増加に伴い狭くなる。

災害時を想定した評価の一例として、83 ビームのうち 1 クラスタ内の 7 ビームの割当て周波数を全て 1 ビームに割り当てて衛星上り回線成立時の収容局数を評価した結果を図 16 に示す。災害時においても平時と同様の傾向が見られ、衛星回線は上限の 10,000 回線が成立し、地上回線は 1,000 万回線以上収容可能であり、空間ガードバンドが 10 dB の場合に最大回線数を取ることがわかる。地上回線の通信可能エリアについても、平時と同様、本計算条件の場合空間ガードバンド 0 dB、5 dB、10 dB のときそれぞれ 84 %、65 %、31 % であり、空間ガードバンド増加に伴い狭くなることわかった。

5 衛星端末-基地局間干渉下での離隔距離の評価

本章では、干渉経路が衛星端末-基地局間での評価について述べる。3 で行った評価の結果、干渉経路が地上伝搬路となる本条件では、空間ガードバンドの効果によって大きく CIR が改善する。そこで、ワーストケースとして衛星端末が衛星セルエッジに位置するケースを対象として、共用が可能な離隔距離(空間ガードバンド)をより詳細な条件設定のもとで評価することとした。

(a) 希望波が衛星下り回線のケース

衛星下り回線では、衛星セルの外で同一周波数を使用する地上基地局からのダウンリンクが衛星端末への干渉となる。本研究ではワーストケースとして、衛星端末が衛星セルエッジに位置するケースを対象に、基地局が 1 局の場合と複数の場合を解析する。複数基地局は、一例として衛星端末近傍に 5 km 間隔で 9 局配置する。また、同一周波数を使用する他の衛星回線からの干渉が存在するケースについても解析する。評価では、衛星回線が所要 C/N₀ を満足する範囲で同一周波数を使用できる衛星端末-地上基地局の最低離隔距離と、その際の空間ガードバンド量を求める。

評価結果を表 4 に示す。表 4(a) に与干渉基地局数が 1 のケース、表 4(b) に与干渉基地局数が 9 のケース、表 4(c) に同一周波数を使用する他の衛星回線からの干渉があるケース(全 83 ビームの同一周波数衛星回

線干渉量の平均値を付与)を記載している。離隔距離から空間ガードバンドを求めるに当たり、衛星アンテナパターンを衛星軌道から地球表面に投影し、衛星セルのエッジから特定の離隔距離を取る方向の衛星アンテナ利得とセルエッジの衛星アンテナ利得との差を空間ガードバンドと定義している。また、伝搬路モデルとして拡張秦式に基づき 3 条件(Urban、Suburban、Open area)の伝搬路に対する計算結果を示している。与干渉基地局数の増加、衛星回線からの干渉の付加に応じて、衛星下り回線が成立するための離隔距離と空間ガードバンドが増加することがわかる。評価を行ったケースでは、離隔距離を 30.2 km (空間ガードバンド換算で 1.3 dB) 取れば、地上システムと衛星システムの周波数共用が可能であることがわかる。

(b) 希望波が地上上り回線のケース

地上上り回線では、衛星セル内の衛星端末からのアップリンクが、衛星セルの外で同一周波数を使用する地上基地局への干渉となる。本研究ではワーストケースとして、衛星端末が衛星セルエッジに位置するケースを対象に、衛星セル内の衛星端末が 1 端末の場合と、衛星セルに割当て可能な全チャンネルで通話する

表 4 衛星下り回線成立時の衛星端末-基地局間離隔距離と空間ガードバンド

計算ケース	伝搬環境		Urban	Suburban	Open area
	(a)与干渉基地局数=1(衛星回線からの干渉なし)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	3	6.6
空間ガードバンド		dB	0.1	0.3	1
(b)与干渉基地局数=9(衛星回線からの干渉なし)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	3.2	8.3	29.7
	空間ガードバンド	dB	0.1	0.3	1.3
(c)与干渉基地局数=9(衛星回線からの干渉あり:83ビーム平均値)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	3.3	8.6	30.2
	空間ガードバンド	dB	0.1	0.4	1.3

copyright(c)2013 IEICE

表 5 地上上り回線成立時の衛星端末-基地局間離隔距離と空間ガードバンド

計算ケース	伝搬環境		Urban	Suburban	Open area
	(a)与干渉衛星端末数=1(地上回線からの干渉なし)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	0.7	1.7
空間ガードバンド		dB	0	0.1	0.3
(b)与干渉衛星端末数=223(地上回線からの干渉なし)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	3.5	7.7	26
	空間ガードバンド	dB	0.1	0.3	1.1
(c)与干渉衛星端末数=223(地上回線からの干渉あり:干渉マージン6dB)	衛星端末(セルエッジ)-基地局 離隔距離	km	4.5	10.1	30.9
	空間ガードバンド	dB	0.2	0.4	1.4

copyright(c)2013 IEICE

場合、同一周波数を使用する他の地上回線からの干渉も存在するケースについて解析する。

評価結果を表5に示す。表5(c)の、同一周波数を使用する他の地上回線からの干渉があるケースでは、固定値(干渉マージン6dB)を付与している。与干渉衛星端末数の増加、地上回線からの干渉の付加に応じて、地上上り回線が成立するための離隔距離と空間ガードバンドが増加することがわかる。評価を行ったケースでは、離隔距離を30.9km(空間ガードバンド換算で1.4dB)取れば、地上システムと衛星システムの周波数共用が可能であることがわかる。

6 まとめ

STICSの周波数共用方式の成立性を検証するため、まず、単一の衛星／地上セルによる簡易干渉モデルによる各干渉経路の干渉量の評価を行い、干渉経路ごとの干渉の特徴と周波数共用の見通しを確認した。その結果、ノーマルモードでは、衛星上り回線は共用可能と見込まれるが共用条件は地上回線の端末送信電力と同時使用端末数に依存することを確認した。課題となるケースは基地局の送信電力が大きいことが原因となる場合(リバースモード衛星上り回線)と災害時等の1ビームに衛星回線が集中する場合(ノーマルモード地上下り回線、リバースモード地上上り回線)であることを確認した。これにより、周波数共用方式としてはノーマルモードとリバースモードのうちノーマルモードが有利であると結論づけられた。

続いて、ノーマルモードを対象として同一チャネル干渉下での地上／衛星回線の同時収容回線数の評価を行った。詳細干渉モデルの構築により、基地局と端末の局数と送信電力に日本全国の現実のトラフィック分布をできる限り反映できる現実的な評価が可能となった。平時のトラフィック配置で、衛星システム側は常に最大回線数(本評価の条件で10,000回線)の回線が収容でき、地上システム側も1,000万局以上の回線が収容できることを確認した。災害時のビーム配置においても一例を確認し、平時と同等の回線数が収容可能であることを確認した。また、平時、災害時ともに空間ガードバンドを増加させることで地上／衛星回線の同時収容局数を改善できる一方で、地上系の通信可能エリアが減少することを確認した。

さらに、衛星端末-基地局間干渉下での評価では、衛星端末が衛星セルエッジに存在するワーストケースについて評価を行い、衛星端末-基地局間離隔距離(空間ガードバンド)を取ることで周波数共用が可能であることを確認した。

以上の種々の周波数共用評価を行った結果から、

STICSにおいて、地上／衛星間の同一チャネル干渉下での周波数共用が成立性を有することを確認した。

7 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 菱輪正, 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 三浦周, 辻宏之, 遠藤邦夫, 藤野義之, 豊嶋守生, “地上／衛星共用携帯電話システムの収容局数評価について,” 信学技報, SAT2013 -19, pp.47-52, July 2013.
- 3 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衛星上り回線干渉量について—人口分布と伝搬環境を考慮した地上回線からの干渉モデルを用いた評価—,” 信学技報, SAT2010 -17, pp.37-42, July 2010.
- 4 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.
- 5 辻宏之, 三浦周, 藤野義之, 浜本直和, 若菜弘充, “地上／衛星共用携帯電話システム検討における航空機を利用した携帯電話端末および基地局からの干渉量測定実験,” 信学技報, SAT2011-12, pp.25-30, July 2011.
- 6 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.
- 7 石川義裕, 林貴裕, 岩村幹生, “FOMAの無線ネットワーク設計概要,” NTTDoCoMo テクニカルジャーナル, Vol.12, No.2, pp. 65-71, July 2004.
- 8 A. Miura, H. Watanabe, N. Hamamoto, Y. Fujino, and R. Suzuki, “On Interference Level in Satellite Uplink for Satellite/Terrestrial Integrated Mobile Communication System,” Proceedings of 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, AIAA 2010-8850, Anaheim, CA, Aug. 2010.



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

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



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