

周波数共用方式の課題と有効性について

袁 輪 正 三 浦 周

本稿では、地上／衛星共用携帯電話システム (STICS) の実現の鍵となる地上系・衛星系ユーザ共存方式として周波数共用方式と周波数分離方式を提案するとともに、高い周波数利用効率が期待できる周波数共用方式の原理と干渉問題及び回避・軽減策について述べる。また、理論検討並びに計算機シミュレーションによる周波数分離方式／共用方式の周波数利用効率の比較により周波数共用方式の有効性を示す。

1 まえがき

欧米では近年、モバイルブロードバンドの需要拡大に伴い、衛星移動サービス (MSS: Mobile Satellite Service) の補完を目的に携帯電話基地局 (ATC: Ancillary Terrestrial Component) を使用する衛星・地上統合通信システム (以下、「MSS/ATC」と呼ぶ。) —欧州では MSS/CGC (Complementary Ground Component) —への無線局免許が連邦通信委員会 (FCC) や欧州委員会 (EC) より付与されるなどしている (表1)。これらのシステムでは衛星系システムと地上系システムを同一周波数帯で共用することが大きな特徴である。

米国での MSS/ATC は、2003 年 FCC が ATC を衛星システムに導入するための MSS 免許に関する Report and Order を発表したことに始まる。FCC は

Lバンドの ATC 許可を MSV に、また Globalstar に Big LEO バンドの ATC 許可をそれぞれ与えた。その他、ICO と TerreStar は ATC 許可申請を提出しており、ATC の展開を活発に計画している。しかしながら、現時点でいずれの事業者も ATC サービスを提供するには至っていない^[1]。

我が国でも、本特集号 1 で述べられているように、地上／衛星共用携帯電話システム (以下、「地上システム」または「地上系」と呼ぶ。) と衛星移動通信システム (以下、「衛星システム」または「衛星系」と呼ぶ。) の周波数を共用するための衛星・地上共用通信システム (STICS: Satellite/Terrestrial Integrated Mobile Communication System) の検討がなされている^[2]。

本稿では、STICS の概念について説明したのち、地上系・衛星系ユーザ共存方式として周波数共用方式と周波数分離方式を提案するとともに、高い周波数利

表1 ATC 提供を計画している世界のサービス事業者

| サービス事業者 | 軌道 | カバレッジエリア | 周波数 | OBP | ISL | ライセンス |
|------------------------------------|-----|--|------|-----|-----|-------|
| LightSquared (旧 SkyTerra、旧 MSV) | GEO | 北アメリカ、中央アメリカ | Lバンド | 有 | 有 | FCC |
| Globalstar | LEO | 北アメリカ、南アメリカ、ヨーロッパ、オーストラリア、北アフリカ、アジアの一部 | Lバンド | 無 | 無 | FCC |
| Inmarsat | GEO | グローバル(北極と南極を除く) | Sバンド | 無 | 無 | EC |
| ICO | GEO | 北アメリカ | Sバンド | 無 | 無 | FCC |
| Eutelsat | GEO | ヨーロッパ全土、中近東、アフリカ、インド、アジアの大部分、南北アメリカ | Sバンド | 有 | 無 | EC |
| Terrestar | GEO | アメリカ、プエルトリコ、アメリカ領ヴァージン諸島、ハワイ、アラスカ | Sバンド | 有 | 無 | FCC |

※ OBP (オンボードプロセッサ)、ISL (衛星間リンク)

用効率が期待できる周波数共用方式について、その原理と、課題となる干渉問題及び回避・軽減策を述べる。その後、理論検討並びに計算機シミュレーションによる周波数分離方式／共用方式の周波数利用効率と空間ガードバンドの比較評価を行い、周波数共用方式の有効性を示す。

2 地上／衛星共用携帯電話システム (STICS)

衛星システムは見通しあり (LOS : Line of Sight) 環境において耐災害性、広域性、同報性の面で優位性があり、デジタルデバインドの解消や災害復旧時の支援といったサービス用途で有用であるものの、都市部や屋内などの見通しなし (NLOS : Non Line of Sight) 環境では利用できない。

一方地上システムは、通信速度の高速化、人口カバー率の増加、グローバル化が進んでいるが、地震や台風などの大規模自然災害時に通信障害が生じる可能性が高く、また航空機や船舶との通信手段を提供することもできないなど、地上システムのみでは真の「どこでも」通信を実現することは容易ではない。このため、衛星系と地上系でそれぞれの弱みを互いに補完するとともに、双方の強みを生かすことのできる STICS の実現が求められる。

STICS では、衛星系と地上系の通信ネットワークが統合されることで、同一周波数帯において同一の事業者によってサービスが提供される。衛星系と地上系はコアネットワークを経由して公衆交換電話網にて相

互接続が行われる。ユーザ端末はデュアルモード端末であり、衛星と地上のどちらのシステムへも自動的に切り替わることができる。(図1)。

STICS ではユーザ端末の小型化と省電力化を実現するため、衛星局に直径 30 m 級の大型アンテナを備える。さらに衛星局の機能として、デジタルビームフォーマ (DBF) を用いた 100 ビーム級のマルチビーム形成による高い周波数利用効率、高度な周波数分波・合波 (チャネライザ) による高い回線利用効率と高いチャンネル容量を実現するため、高性能なオンボードプロセッサを備える。

STICS では地上システムでのセル (以下、「地上セル」と呼ぶ。)と同様に、衛星システムでもセル (以下、「衛星セル」と呼ぶ。)を導入する。これにより周波数の再利用が可能となり、同一周波数のチャンネルを十分離れた場所で繰り返して使うことができる。

セルサイズについては、地上セルは、屋内ではピコセル (半径数十メートル)、都市部ではマイクロセル (数百メートル)、郊外ではマクロセル (数キロメートル) となる。一方、衛星セルの半径は緯度に依存するものの、数百キロメートル程度となる。

なお、日本の STICS と欧米の MSS/ATC (MSS/CGC) には技術的に大きな違いはないものの、欧米では衛星システムの電波がビル等で遮蔽される都市部を中心に地上システムで補完するのに対し、日本では地上システムが災害時や僻地において利用できない場合に衛星システムで補完することを目的としている。

STICS のシステム検討において、衛星系の回線設計を実施している²⁾。本特集号 2 以降で検討したA項

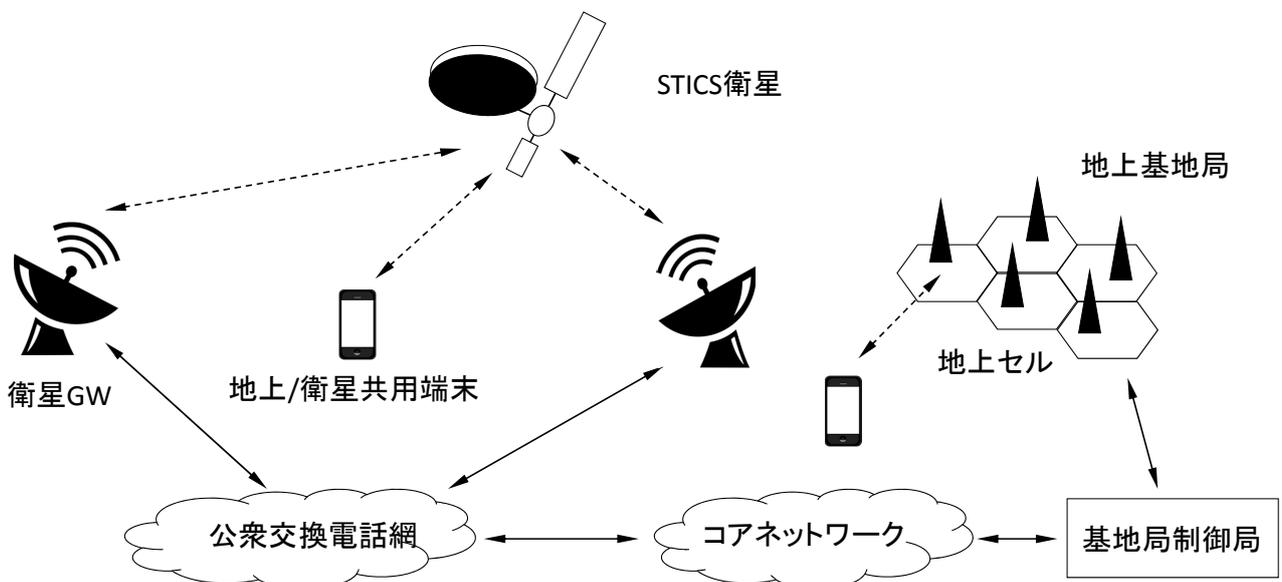


図1 地上／衛星共用携帯電話システム (STICS)

表2 音声通信の回線設計の前提条件⁽²⁾ copyright©2008 IEICE

| 項目 | 内容 |
|---------|--|
| 所要Eb/N0 | 6.7dB@ビット誤り率10e-3 |
| 誤り訂正符号化 | なし |
| 実装損失 | なし |
| 備考 | 符号化利得にて所要C/N0が5~6dB程度低減するため、マイナスマージンでも回線は成立する見込み |

表3 携帯端末による音声通信の回線設計例。(地)は地上局、(衛)は衛星、(携)は携帯端末を表す⁽²⁾ copyright©2008 IEICE

| 項目 | 単位 | フォワード | | リターン | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 地→衛 | 衛→携 | 携→衛 | 衛→地 |
| 送信系 | | | | | |
| 送信周波数 | GHz | 14.0 | 2.0 | 2.0 | 12.0 |
| 送信電力 | W | 0.001 | 0.2 | 0.2 | 0.001 |
| Tx アンテナ口径 | m | 5.0 | 30.0 | - | 2.0 |
| Tx アンテナ利得 | dBi | 54.7 | 47.0 | 0.0 | 45.4 |
| EIRP | dBm | 53.7 | 69.0 | 22.0 | 44.4 |
| 伝搬系 | | | | | |
| 自由空間損失 | dB | 206.5 | 189.6 | 189.6 | 205.2 |
| 降雨減衰 | dB | 3.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 |
| フェージング損失 | dB | 0.0 | 3.0 | 3.0 | 0.0 |
| 受信系 | | | | | |
| Rx アンテナ口径 | m | 2.0 | - | 30.0 | 5.0 |
| Rx アンテナ利得 | dBi | 46.7 | 0.0 | 47.0 | 53.4 |
| 受信雑音指数 | dB | 3.0 | 1.5 | 1.5 | 3.0 |
| G/T | dB/K | 19.1 | -23.8 | 20.9 | 27.3 |
| C/N0 | dB-Hz | 60.9 | 50.2 | 47.9 | 61.1 |
| 復調系 | | | | | |
| 受信C/N0 | dB-Hz | | 49.9 | | 47.7 |
| データレート | kbit/s | | 9.6 | | 9.6 |
| 所要C/N0 | dB-Hz | | 46.5 | | 46.5 |
| 回線マージン | dB | | 3.4 | | 1.1 |

の周波数共用方式の評価(干渉評価)や、イ項のアンテナシステムの設計は、この回線設計のうち携帯端末による音声通信の回線設計を参照して検討を行っているため、以下に参考として引用する。回線設計では、衛星に電気開口径 30 m 及びビームエッジでのアンテナ利得 47 dBi のアンテナを用いる。小型の携帯端末を用いる 9.6 kbps 音声通信のダブルホップの回線設計の前提条件及び回線設計を表 2,3 に示す。表 3 から、衛星に 30 m 級の大型アンテナを搭載することにより、音声通信では衛星端末に 0 dBi 程度の小型アンテナを採用してもシステム成立が可能であることがわかる。

3 地上/衛星共用方式

地上・衛星系ユーザが共存する方式としては、S 帯

(2 GHz 帯)を用いた移動衛星通信システムとして検討がなされており、STICS では図 2 に示すように周波数分離方式と周波数共用方式を考える。

周波数分離方式では、衛星系と地上系のそれぞれのシステムが運用される周波数帯域が分離されるため、衛星系と地上系のシステム間干渉は生じない。この方式では、衛星システムが一部の周波数帯域を使用し、残りの帯域を地上システムが使用する。

周波数共用方式では、衛星系と地上系のどちらのシステムも同一の周波数帯域で運用される。どちらの方式においても割り当てられた周波数帯を分割し、同一周波数の繰り返し利用を行うことで、周波数利用効率の向上が図られる。

また、図 2 に示すように周波数分離方式と周波数共用方式のどちらについてもノーマルモードとリバース

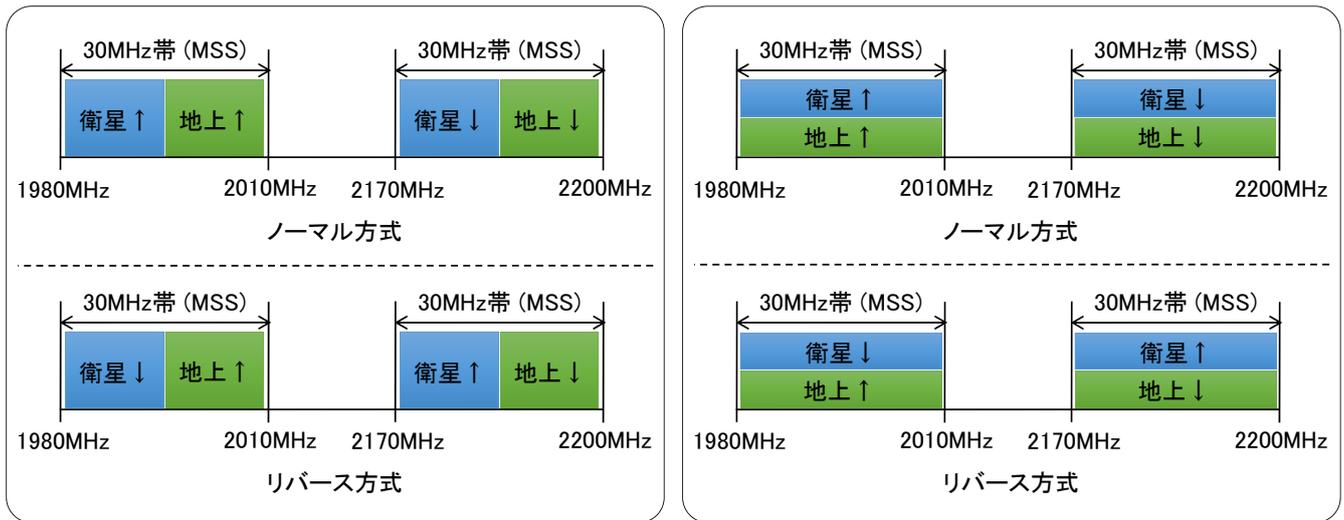


図2 周波数分離方式(左)と周波数共用方式(右)

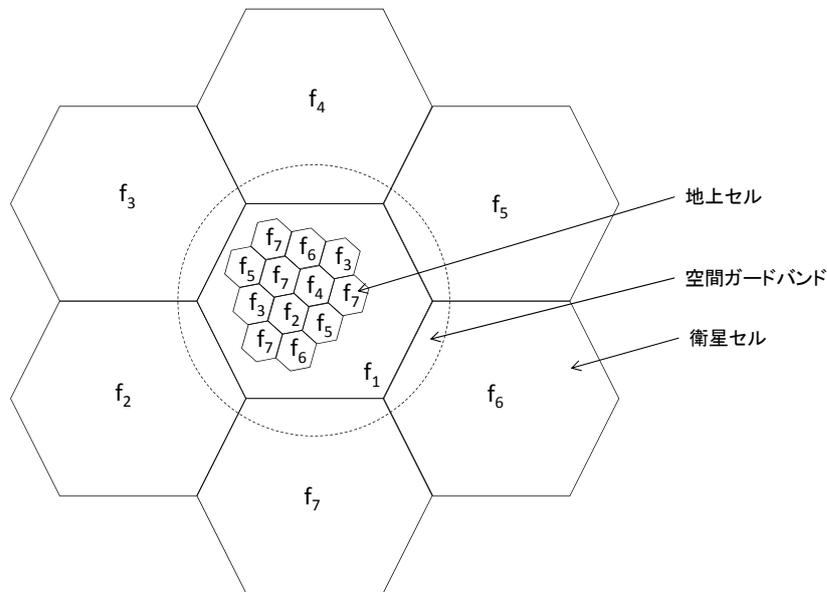


図3 周波数共用方式における周波数配置パターン

モードが考えられる。ノーマルモードでは、衛星アップリンクと地上アップリンクが同一帯域で、また衛星ダウンリンクと地上ダウンリンクが同一帯域で割り当てられる。一方、リバースモードは、衛星アップリンクと地上ダウンリンクが同一帯域で、また衛星ダウンリンクと地上アップリンクが同一帯域で割り当てられる。

周波数分離方式と周波数共用方式を比較すると、一般に周波数共用方式が分離方式に対して衛星システムと地上システムで帯域全体を共有するため周波数利用効率が高いことや、衛星システムのビーム当たりの帯域が広がる等のメリットがある。一方で周波数共用方式の実現には、衛星システムと地上システムで周波数を共用するための干渉対策が課題である。

4 周波数共用方式

周波数共用方式は、STICSにおいて衛星系と地上系の収容可能なユーザ数を最大化するために重要な方式である。本節では、STICSの周波数共用方式の原理と、本方式で課題となる干渉問題及び回避策について述べる。図3に周波数共用方式における衛星セルと地上セルの周波数配置パターンを示す。図は7セル繰り返しの周波数割当ての場合を示しており、 f_1 から f_7 が異なる周波数として割り当てられている。

衛星系と地上系の同一チャネル干渉を避けるためには、地上システムでは衛星システムで使用している周波数を除いて周波数繰り返しを行う必要がある。例えば、図1に示すように衛星セル f_1 の中では地上セル

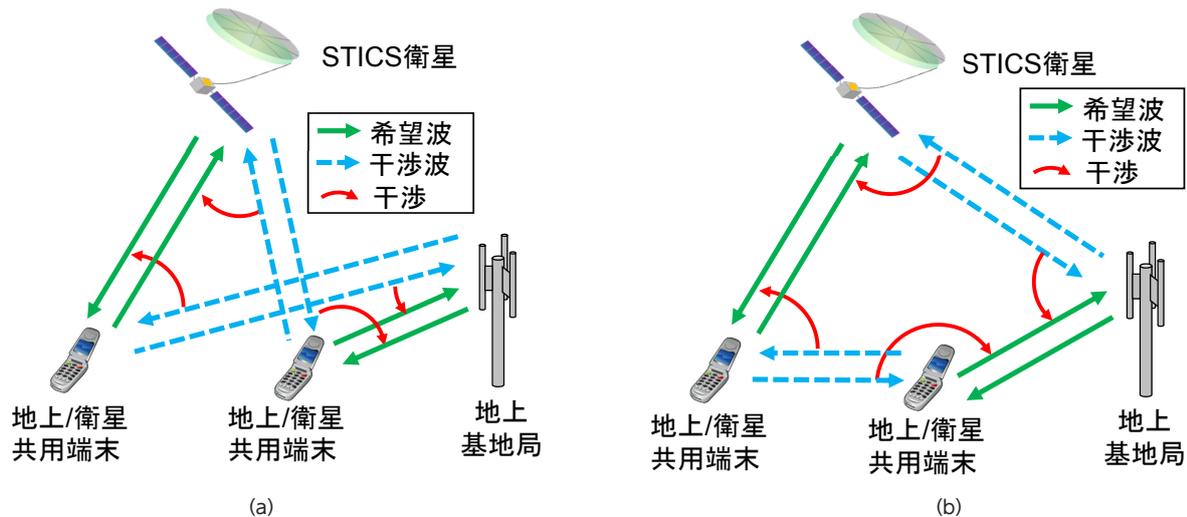


図4 周波数共用方式での干渉経路。(a) ノーマルモード、(b) リバースモード。

は f_1 を除いた $f_2 \sim f_7$ のみを使用して周波数繰り返しを行う。

さらにシステム間干渉を軽減するために、図3に示すように衛星セル f_1 の周りに空間ガードバンドを設定する。これは衛星セルを生成する衛星スポットビームのサイドローブから入射する同一チャネル干渉を軽減するためのものである。この空間ガードバンドにより、例えば図3に示すように衛星セル $f_2 \sim f_7$ 内で使用される地上セル f_1 の同一チャネル干渉を軽減できる。

STICSにおける衛星系と地上系との干渉は、衛星系と地上系のそれぞれのシステム内干渉と衛星系と地上系のシステム間干渉の2通りに分けられる。前者のシステム内干渉は、従来の衛星系と地上系で扱われている技術と同じのため、以下ではSTICSで重要となる後者のシステム間干渉を述べる。

図4に周波数共用方式ノーマルモード、リバースモードにおける衛星-地上間干渉の干渉経路を示す。干渉経路は希望波の4回線それぞれに対して存在するが、主に問題となる干渉は多数の地上系ユーザ端末や基地局からLOS環境で衛星に受信される同一周波数でのアップリンクの信号であると考えられる³⁾。ノーマルモードの場合1端末当たりの送信電力は小さいものの非常に多数の地上系ユーザ端末からの干渉を受ける。一方、リバースモードの場合干渉源となる基地局当たりの送信出力が地上系ユーザ端末より大きいが基地局数は少ない。こうした観点を含み、ノーマルモード、リバースモードのどちらがより適するかを詳細な干渉評価によって明らかにしていく必要がある。

周波数共用方式で発生する地上-衛星間干渉を回避・軽減するための対策として、先に挙げた空間ガードバンドが挙げられる。また、DBFによる柔軟なビー

ム形成機能により、衛星アンテナビームのサイドローブレベルを低減することにより、異なる衛星セル間の干渉や同一周波数を使う衛星セルと地上セル間の干渉を最小化することが可能となる。なお、DBFは意図的な妨害波や偶発的な干渉波を衛星アンテナビームにヌルを形成することで抑圧することも可能である。

5 周波数共用方式の有効性の評価

本節では、STICSの周波数共用方式の有効性を示すことを目的として、理論検討により、周波数分離方式と周波数共用方式の周波数利用効率の比較を行う。さらに、STICSシステムのモデルを仮定して、電波干渉をシミュレーションして周波数利用効率の比較を行う。周波数共用方式の電波干渉のイメージを図5に示す(図は希望波が衛星上り回線のケースである)。図に示すように衛星セルの周囲で、同一周波数で地上回線を使用する地上端末からのアップリンクが衛星上り回線の希望波への干渉となる。シミュレーションでは、STICSの干渉回避・軽減策として、4で述べた空間ガードバンド、衛星アンテナのサイドローブ低減の周波数利用効率に対する効果も検証する。なお、MSS/CGCについての同様の検討は例えば文献[4]などにある。

5.1 理論検討

地上/衛星間周波数共用方式の効果を検証するため、理論検討によって従来方式の周波数分離方式と周波数共用方式を比較する。

図6に理論検討の概念図を示す。理論検討は、周波数帯幅の違いによって地上系、衛星系を比較すること

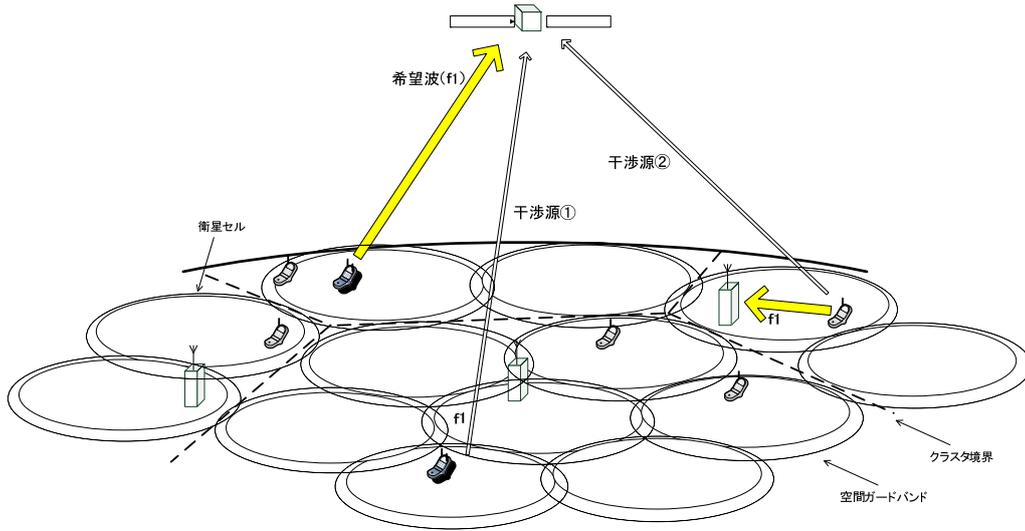


図5 周波数共用方式衛星上り回線の周波数干渉イメージ

とし、回線間の干渉は考慮しない。周波数分離方式(図上)では、IMT-2000 MSS バンド (30 MHz 帯域) の衛星バンドと地上バンドを2分割するとともに、衛星系をマルチビームで構成し、周波数繰り返しを行う(図では7周波数繰り返しの場合を図示)。これに対して周波数共用方式(図下)では、IMT-2000 MSS バンドの全帯域を衛星バンドと地上バンドで共用する。

衛星系の周波数を7周波数繰り返しとする場合の周波数利用効率の理論検討結果を表4に示す。表のように、衛星バンドの周波数利用効率の向上度は2倍、地上バンドの周波数利用効率の向上度は1.7倍となる。地上バンドの周波数利用効率の向上度は、周波数繰り返し数を細分化することによって2倍に近づけることができる。

以上の検討結果から、周波数共用方式は、分離方式に比べて衛星バンドの帯域幅を2倍にできること、また、周波数繰り返し数を細分化することによって地上バンドの帯域幅を2倍に近づけることができることを確認した。

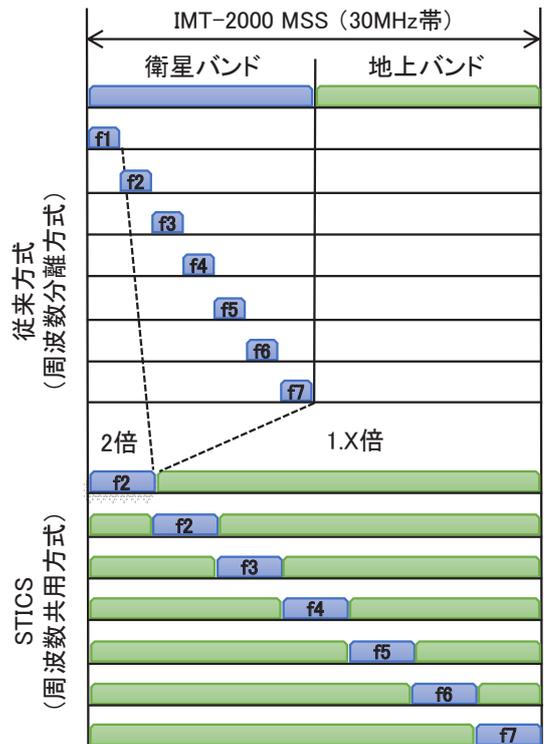


図6 周波数共用方式と周波数分離方式の理論検討の概念図

5.2 シミュレーション解析

周波数共用方式のシミュレーションを行い、最大回

表4 周波数利用効率の理論検討結果

| 衛星／地上バンド帯域幅 | 周波数共用方式 (STICS) | 周波数分離方式 (従来方式) | 周波数利用効率の向上度 |
|-------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| 衛星バンド帯域幅 | 30/7=4.28MHz (1色あたり) | 30/2/7=2.14MHz (1色あたり) | 4.28/2.14=2倍 |
| 地上バンド帯域幅 | 30*6/7=25.7MHz | 30/2=15MHz | 25.7/15=1.7倍 |

線数を求め、周波数分離方式と比較する。

5.2.1 解析モデル

本解析では、衛星システムに影響を与えない範囲で、地上システムの回線数をどこまで増やせるかを解析する。

条件を以下に示す。

- 対象とする回線：ノーマルモード周波数共用方式の衛星アップリンク回線を対象
- 基地局配置：3Gシステムを参考にセル半径を2.5 kmとして均一配置
- トラフィック分布：均一
- 衛星回線：FDMAによる7周波数繰り返しの等配分、チャンネル帯域幅19.2 kHz、最大回線数223回線/4.3 MHz

- 地上回線：CDMA、チャンネル帯域幅5 MHz
- 基地局当りの最大回線数：3Gシステムを参考に20回線/1周波数に設定
- 衛星端末：送信電力200 mW、アンテナ利得0 dBi
- 地上端末：送信電力は、本プロジェクトにおけるW-CDMA携帯電話端末の送信電力の実測結果を参考に1 mWとし、アンテナ利得は0 dBiに設定

シミュレーション解析に使用した評価モデルを図7に示す。衛星ビームは図の25ビームとする。衛星回線は中心の、周波数f7のビームを使用する回線を希望波とし、他の衛星回線からの干渉を考慮するため周辺の6つのf7ビームでも衛星回線を使用している条件とする。周波数f7を共用する地上回線は、25ビームの領域のうち、f7ビーム及びf7ビーム周囲に設ける空間ガードバンドを除く領域に配置する。

解析に使用した衛星アンテナパターンを図8及び図9に示す。サイドローブレベルが-20 dBの場合と、-30 dBの場合の2ケースについて行った。

5.2.2 解析結果

解析結果として空間ガードバンド VS 地上システム回線数のグラフを図10及び図11に示す。

地上システムの基地局の最大回線数に制限がない場合は、空間ガードバンドを広げることにより、地上システムからの干渉量が減少するので、地上システムの回線数は線形に増加する。しかし、実際には基地局の最大回線数に制限があるので、あるところから回線数は頭打ちとなり減少する。

解析の結果、回線数が最大となる空間ガードバンドが存在することを確認した。表5にその空間ガードバ

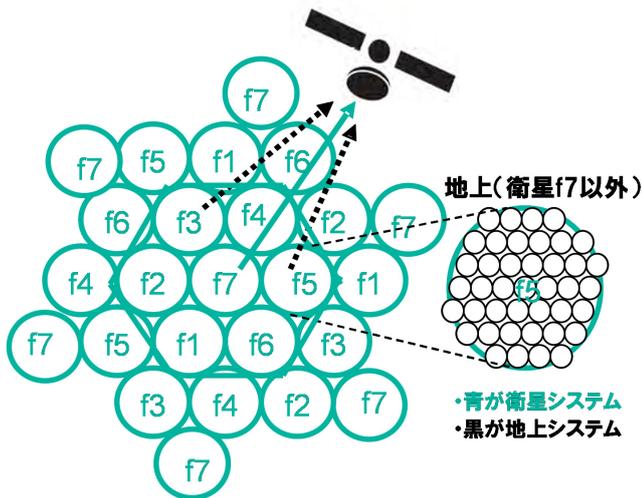


図7 周波数利用効率評価モデル

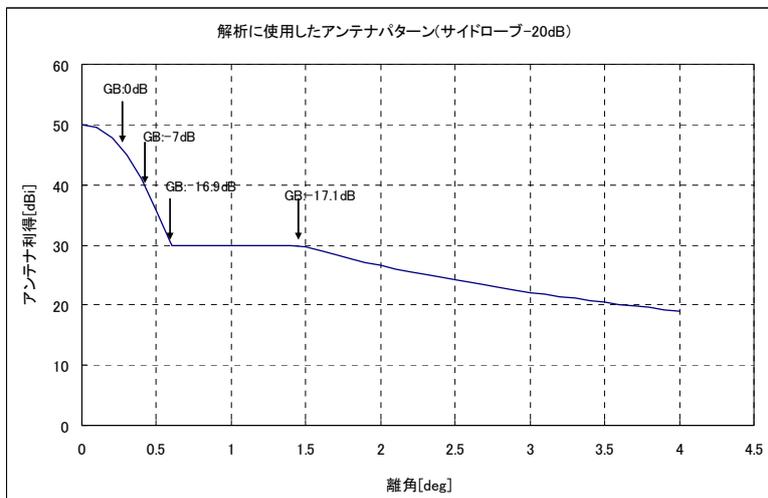


図8 解析に使用したアンテナパターン (サイドローブレベル: -20dB)

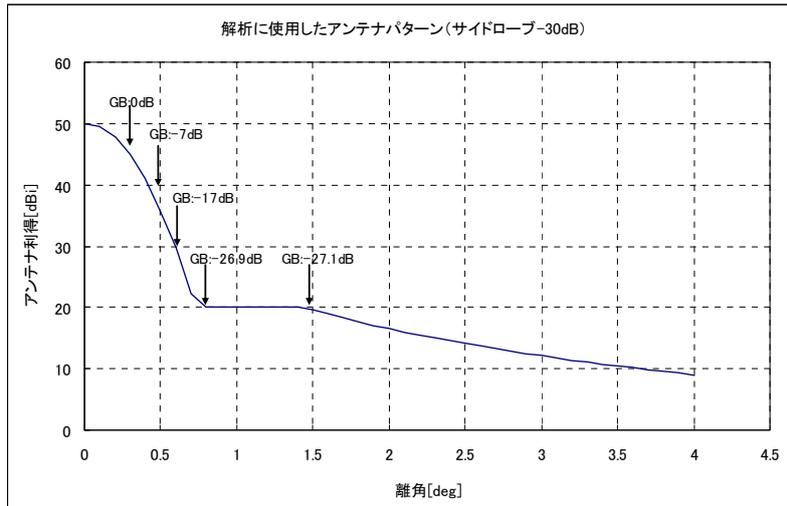


図9 解析に使用したアンテナパターン (サイドローブレベル: -30dB)

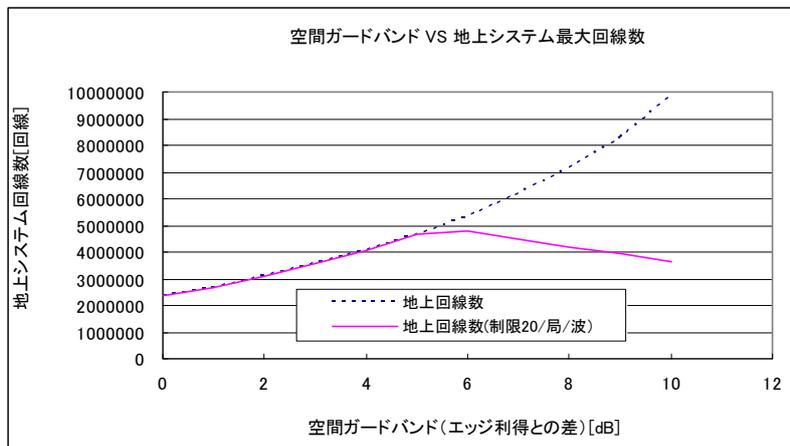


図10 空間ガードバンド対地上システム回線数の解析結果 (サイドローブレベル: -20dB)

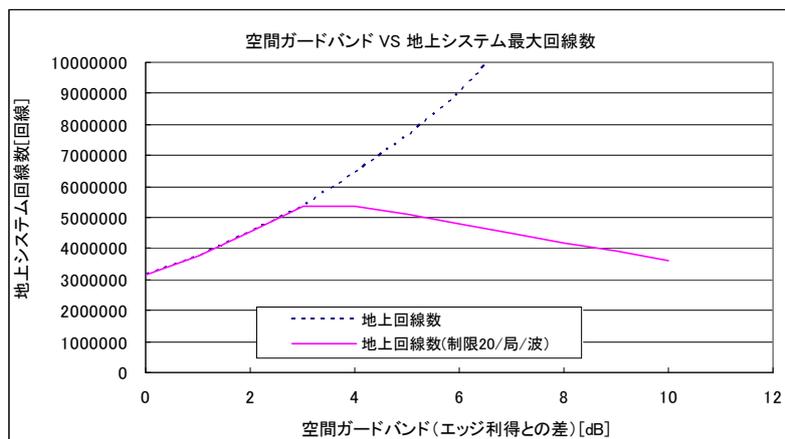


図11 空間ガードバンド対地上システム回線数の解析結果 (サイドローブレベル: -30dB)

表5 解析結果 (空間ガードバンドと最大回線数)

| サイドローブレベル | 空間ガードバンド | 地上システム最大回線数 |
|-----------|----------|--------------|
| -20dB | 6dB | 4,788,909 回線 |
| -30dB | 4dB | 5,386,204 回線 |

ンド量と地上システム回線数を示す。それぞれ、アンテナのサイドローブレベルにより異なり、サイドローブレベルが低いほど地上システムから衛星システムへの干渉量が低減するため、空間ガードバンド量は小さくなり、地上システム回線数も多くなることがわかる。

5.2.3 周波数分離方式と共用方式の比較

周波数分離方式と共用方式を比較した結果を表6及び表7に示す。分離方式と比較して共用方式では衛星システムの周波数利用効率は2倍となり、地上システムの周波数利用効率はサイドローブレベル -20 dB の場合 1.22 倍となり、サイドローブレベルが -30 dB の場合 1.37 倍となる。干渉を考慮すると、理論検討と比較して周波数共用方式の周波数有効利用のメリットが少なくなるが、周波数共用方式が衛星システム、地上システムとも周波数利用効率が高いことを確認した。

6 まとめ

本稿では、STICS の実現の鍵となる地上系・衛星系ユーザ共存方式として周波数共用方式と周波数分離方式を提案するとともに、高い周波数利用効率が期待できる周波数共用方式の原理と、課題となる干渉問題及び回避・軽減策について述べた。周波数共用方式の課題は衛星系と地上系のシステム間干渉であり、その対策として空間ガードバンド、衛星アンテナの低サイドローブ化等が重要であることを述べた。

また、理論検討並びに計算機シミュレーションを行い、周波数分離方式と周波数共用方式について周波数利用効率の比較を行った。その結果、干渉を考慮しない理論検討では、周波数共用方式は分離方式に比べて衛星バンドの帯域幅を2倍にできること、また、周波数繰返し数を細分化することによって地上バンドの

表6 周波数分離方式と周波数共用方式の比較 (サイドローブレベル: -20dB)

| | 周波数分離方式 | 周波数共用方式 |
|---------------|---|---|
| 衛星システム 回線数 | 1 ビームの帯域 15MHz/7=2.14MHz 1 ビームの回線数 2.14MHz/19.2kHz=111.5 回線 全回線数 25 ビーム×111.5 = 2,787.5 回線 | 1 ビームの帯域 30MHz/7=4.3MHz 1 ビームの回線数 4.3MHz/19.2kHz=223 回線 全回線数 25 ビーム×223 = 5,575 回線 |
| 地上システム 回線数 | 基地局数: 65,628 局 20 回線/局/1 周波数 周波数帯 3 波 回線数 65,628×20×3=3,937,680 回線 | 解析結果 4,788,909 回線 分離方式の 1.22 倍 |

表7 周波数分離方式と周波数共用方式の比較 (サイドローブレベル: -30dB)

| | 周波数分離方式 | 周波数共用方式 |
|---------------|---|---|
| 衛星システム 回線数 | 1 ビームの帯域 15MHz/7=2.14MHz 1 ビームの回線数 2.14MHz/19.2kHz=111.5 回線 全回線数 25 ビーム×111.5 = 2,787.5 回線 | 1 ビームの帯域 30MHz/7=4.3MHz 1 ビームの回線数 4.3MHz/19.2kHz=223 回線 全回線数 25 ビーム×223 = 5,575 回線 |
| 地上システム 回線数 | 基地局数: 65,628 局 20 回線/局/1 周波数 周波数帯 3 波 回線数 65,628×20×3=3,937,680 回線 | 解析結果 5,386,204 回線 分離方式の 1.37 倍 |

2 地上／衛星系協調制御技術

帯域幅を2倍に近づけることができることを確認した。他方、干渉を考慮した計算機シミュレーションでは、地上回線数が最大となる空間ガードバンドが存在することがわかった。周波数利用効率は、干渉を考慮すると理論検討と比較して少なくなるものの周波数共用方式が衛星システム、地上システムとも高いことを確認した。

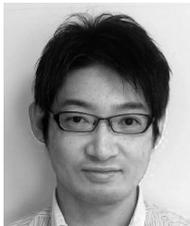
以上の結果から、STICSにおける周波数共用方式の有効性を確認した。

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 Roger Cochetti, "Mobile Satellite Communications Handbook," 2nd Edition, Wiley, 2014.
- 2 蓑輪正, 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.
- 3 D. Zheng and P. Karabinis, "Adaptive beam-forming with interference suppression and multiuser detection in satellite systems with terrestrial reuse of frequencies," IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2005) 2005.
- 4 V. Deslandes, J. Tronc, and A. L. Beylot, "Analysis of interference issues in integrated satellite and terrestrial mobile systems," in Proc. 5th ASMS and 11th SPSC, Cagliari, Italy, Sept. 13-15 2010, pp. 256-261.



蓑輪 正 (みのわ ただし)

ソーシャルICT推進研究センターソーシャルICT研究室主任研究員
博士(工学)
無線センサネットワークにおける分散アルゴリズムとそのIoT/ビッグデータ分析への応用



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