

衛星通信用周波数の有効利用のための  
伝送信号重畳・キャンセル技術に関する  
調査検討報告書

平成 20 年 3 月

財団法人 マルチメディア振興センター

## はじめに

衛星通信システムは同報性、広域性、移動性、耐災害性等に優れており、ユビキタスネットワーク社会において、ネットワークの高度化、ブロードバンドのデジタル・ディバイド解消、センサーネットワークの確立、高度道路交通システム(ITS : Intelligent Transport System)・地理情報システム(GIS : Geographic Information System)の創造的活用、ネットワークの高信頼性確保などいくつかの分野において、他のネットワークより優れた役割を果たしうる可能性を持っている。しかし、衛星通信システムに利用される周波数や静止軌道は、各国の衛星の打ち上げ数の増加に伴い年々逼迫してきており、既存周波数の有効利用技術や新しい軌道・周波数の確保のための技術検討が急務となっており、今後のグローバルな IP 化・ブロードバンド化に対応するため、衛星通信システムにおいても干渉に強く同じ帯域幅でより大容量の通信が可能な方式の導入が望まれている。また、今後の全国的な地上デジタル放送開始に伴い、デジタルコンテンツの流通がより一層増大することが想定され、衛星通信システムにおいても膨大なデジタルコンテンツの伝送に対応したシステムを早急に構築する必要がある。

このように、衛星通信により大容量の通信が可能な方式として、重畳・キャンセル技術の確立が必要であることから、同技術に関する調査検討を行うため、平成 19 年 7 月に調査検討会を設置し、このたび平成 19 年度の報告書を取りまとめた。

調査検討会の運営及びとりまとめについては、財団法人マルチメディア振興センターがこれを実施し、学識経験者、衛星通信事業者、関連するメーカーの専門家による検討を重ね、技術的な調査結果として本報告書にとりまとめたものである。

# 衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号・キャンセル技術に関する調査検討

## 目次

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| 第1章   | 調査検討の概要 .....                            | 1  |
| 1.1   | 調査検討の目的 .....                            | 1  |
| 1.2   | 調査検討会の体制及び運営 .....                       | 1  |
| 1.3   | 調査検討会の活動計画 .....                         | 2  |
| 1.4   | 調査検討会の活動 .....                           | 3  |
| 第2章   | 伝送信号重畳キャンセル技術に関する国内外の技術動向 .....          | 5  |
| 2.1   | 国内外の伝送信号重畳キャンセル技術の現状及び動向 .....           | 5  |
| 2.2   | 伝送信号重畳キャンセル技術の高度化と将来展望 .....             | 7  |
| 第3章   | 伝送信号重畳方式と信号キャンセル技術 .....                 | 9  |
| 3.1   | 伝送信号重畳キャンセル技術 .....                      | 9  |
| 3.2   | 伝送信号重畳の二つの基本構成 .....                     | 11 |
| 3.2.1 | P-P 対向回線による同レベル同一帯域信号の重畳 .....           | 11 |
| 3.2.2 | P-MP VSAT 回線の上り、下り回線重畳 .....             | 12 |
| 3.3   | レプリカ生成方式 .....                           | 13 |
| 3.3.1 | 遅延検出方式 .....                             | 13 |
| 3.3.2 | 不要波復調方式 .....                            | 21 |
| 3.4   | 伝送信号重畳・キャンセル技術の検討計画 .....                | 23 |
| 第4章   | 対向回線用遅延検出方式の検討 .....                     | 24 |
| 4.1   | 対向回線用遅延検出方式の概要 .....                     | 24 |
| 4.1.1 | P-P 対向回線衛星通信システムにおける遅延検出方式の概要 .....      | 24 |
| 4.1.2 | P-P 対向回線衛星通信システムにおける遅延検出方式キャンセルの検討 ..... | 24 |
| 4.1.3 | 遅延検出方式キャンセル装置の構成 .....                   | 25 |
| 4.2   | コンピュータシミュレーションによる理論評価 .....              | 29 |
| 4.2.1 | コンピュータシミュレーション系 .....                    | 29 |
| 4.2.2 | 各制御の動作検証 .....                           | 31 |
| 4.2.3 | EMF の出力特性 .....                          | 34 |
| 4.2.4 | キャンセル部信号波形 .....                         | 36 |
| 4.2.5 | C/N 対ビット誤り率特性 .....                      | 39 |
| 4.2.6 | コンピュータシミュレーションによる評価結果 .....              | 40 |

|        |                                  |    |
|--------|----------------------------------|----|
| 4.3    | 試験システムの構築における機能確認試験 .....        | 41 |
| 4.3.1  | 遅延検出方式キャンセル装置の概要 .....           | 41 |
| 4.3.2  | 試験システムの構築 .....                  | 47 |
| 4.3.3  | 周波数安定度試験 .....                   | 49 |
| 4.3.4  | 占有周波数帯幅試験 .....                  | 50 |
| 4.3.5  | スプリアス試験 .....                    | 52 |
| 4.3.6  | コンスタレーション試験 .....                | 54 |
| 4.3.7  | C/N 対ビット誤り率試験 .....              | 55 |
| 4.3.8  | キャンセル信号抑圧量試験 .....               | 56 |
| 4.3.9  | 隣接キャリアの影響下における伝送特性試験 .....       | 58 |
| 4.3.10 | 伝送路による非直線性に対する試験 .....           | 60 |
| 4.4    | 衛星システムにおける電波伝送試験 .....           | 63 |
| 4.4.1  | 試験システムの構築 .....                  | 63 |
| 4.4.2  | C/N 対ビット誤り率試験 .....              | 64 |
| 4.4.3  | キャンセル信号抑圧量試験 .....               | 67 |
| 4.4.4  | 隣接キャリアの影響下における伝送特性試験 .....       | 69 |
| 第5章    | VSAT 回線用不要波復調方式の検討 .....         | 72 |
| 5.1    | VSAT 回線用不要波復調方式の概要 .....         | 72 |
| 5.1.1  | VSAT 回線における不要波復調方式の概要 .....      | 72 |
| 5.1.2  | VSAT 回線における不要波復調方式キャンセラの検討 ..... | 73 |
| 5.1.3  | 不要波復調方式の改良 .....                 | 74 |
| 5.2    | コンピュータシミュレーションによる理論評価 .....      | 75 |
| 5.2.1  | コンピュータシミュレーション系 .....            | 75 |
| 5.2.2  | キャンセル信号抑圧量 .....                 | 77 |
| 5.2.3  | IB の C/N 対ビット誤り率特性 .....         | 79 |
| 5.3    | 試験システムの構築における機能確認試験 .....        | 81 |
| 5.3.1  | 不要波復調方式キャンセル装置の概要 .....          | 81 |
| 5.3.2  | 試験システムの構築 .....                  | 81 |
| 5.3.3  | 周波数安定度試験 .....                   | 83 |
| 5.3.4  | 占有周波数帯幅試験 .....                  | 84 |
| 5.3.5  | スプリアス試験 .....                    | 86 |
| 5.3.6  | コンスタレーション試験 .....                | 88 |
| 5.3.7  | C/N 対ビット誤り率試験 .....              | 89 |
| 5.3.8  | キャンセル信号抑圧量試験 .....               | 90 |
| 5.3.9  | 伝送路による非直線性に対する試験 .....           | 93 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 5.4   | 衛星システムにおける電波伝送試験 .....       | 96  |
| 5.4.1 | 試験システムの構築 .....              | 96  |
| 5.4.2 | C/N 対ビット誤り率試験 .....          | 100 |
| 5.4.3 | キャンセル信号抑圧量試験 .....           | 102 |
| 第6章   | 試験結果及び総合評価 .....             | 110 |
| 6.1   | 遅延検出方式キャンセル装置試験の結果と評価 .....  | 110 |
| 6.1.1 | コンピュータシミュレーションの結果と評価 .....   | 110 |
| 6.1.2 | 機能確認試験結果と評価 .....            | 110 |
| 6.1.3 | 電波伝送試験結果と評価 .....            | 112 |
| 6.2   | 不要波復調方式キャンセル装置試験の結果と評価 ..... | 114 |
| 6.2.1 | コンピュータシミュレーションの結果と評価 .....   | 114 |
| 6.2.2 | 機能確認試験結果と評価 .....            | 114 |
| 6.2.3 | 電波伝送試験結果と評価 .....            | 115 |
| 6.3   | 総合評価 .....                   | 117 |
| 参考文献  | .....                        | 119 |
| 略語・解説 | .....                        | 123 |
| 付録1   | 調査検討会設置要綱 .....              | 126 |
| 付録2   | 調査検討会構成員名簿 .....             | 128 |
| 付録3   | 作業部会設置要綱 .....               | 129 |
| 付録4   | 作業部会構成員名簿 .....              | 131 |

別冊 試験データ集

## 第 1 章 調査検討の概要

### 1.1 調査検討の目的

衛星通信システムは、広域にわたる同報通信、高速大容量の通信が可能であるという衛星特有の特徴を生かし、電気通信業務、人命・財産の保護及び治安維持等に利用されている。今後のグローバルな IP 化・ブロードバンド化に対応するため、衛星通信システムにおいても干渉に強く同じ帯域幅でより大容量の通信が可能な方式の導入が望まれている。

また、平成 21 年度から全国的なデジタル放送開始により、デジタルコンテンツの流通が今後より一層増大する事が想定され、衛星通信においても膨大なデジタルコンテンツの伝送に対応したシステムを早急に構築する必要がある。

しかしながら、近年の周波数逼迫の状況を踏まえると、衛星通信用周波数帯の拡大は困難な状況で、かつ、軌道位置も混雑していることから、同一周波数幅をより有効に利用した通信が可能な方式が期待されている。

このため、これを解決する一つ的手段として、上下回線の周波数帯域を重畳することにより、周波数利用効率を大幅に増大させるとともに、重畳信号による希望波分離の困難性に基づく強固な秘匿性といった特徴を有している重畳・キャンセル技術の評価すること、周波数有効利用を図り、伝送信号重畳・キャンセル技術の技術的条件について検討を行うことを目的とする。

### 1.2 調査検討会の体制及び運営

財団法人マルチメディア振興センターは、総務省との上記に係る調査検討の請負契約に基づき、学識経験者、電気通信事業者、関連するメーカー等の専門家による「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討会」(以下調査検討会という)を設置し、さらに具体的な作業を実施するために、「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する作業部会」(以下「作業部会」という)を設置して、調査検討活動を実施した。

調査検討会の設置要綱、作業部会の設置要綱並びに調査検討会及び作業部会の構成員名簿を付録 1～4 に添付した。

### 1.3 調査検討会の活動計画

本年の調査検討期間は、平成19年7月から平成20年3月までとする。なお、今後の予定を表1.3-1に示す。

表 1.3-1 調査検討全体スケジュール

| 実施内容                            | 平成18年度                                                              | 平成19年度                                              | 平成20年度                                             |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 試験システム構築<br>衛星システム構築            | 不要波キャンセル<br>装置製造(不要波復<br>調方式:P-MP<br>VSAT system)*1<br>↔<br>実験局免許取得 | 不要波キャンセル装<br>置製造(遅延検出方<br>式:P-P paired<br>system)*2 | 不要波キャンセル装<br>置製造(遅延検出方<br>式:P-MP VSAT<br>system)*1 |
| コンピュータシミュレーション<br>による理論机上検<br>討 | ←                                                                   | 理論解析及び検証<br><br>(C帯、Ku帯)                            | →                                                  |
| 地上局内折返しに<br>よる機能確認試験            | 伝送方式の基本特性、キャンセル信号抑圧量等<br>←→                                         |                                                     |                                                    |
| 衛星システムによる<br>電波伝搬試験             | C/Nに対するビット誤り率特性、キャンセル信号抑圧量等<br>←→                                   |                                                     |                                                    |
| まとめ                             | まとめ<br>↔                                                            | まとめ<br>↔                                            | 最終まとめ<br>↔                                         |

\*1 P-MP VSAT system: Point to Multipoint Very Small Aperture Terminal system

\*2 P-P paired system: Point to Point paired system

## 1.4 調査検討会の活動

調査検討会は学識経験者や企業関係者を構成員とし、技術的な検討を行った。また、本調査検討会の下に作業部会を設置し詳細な試験とデータの評価を実施した。平成 19 年度に調査検討会で検討・実施した項目は次のとおりである。

(1) 衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術とその動向(報告書第 2 章及び第 3 章)

(2) 対向回線用遅延検出方式の検討(第 4 章)

### ① コンピュータシミュレーションによる理論検討

伝送信号重畳・キャンセル技術について、実環境での試験に先立ち、コンピュータシミュレーション装置を利用して、理論検討を行った。

### ② 試験システムの構築における機能確認試験の実施

実環境でフィールド実験を行うための準備として、不要波キャンセル装置、信号変復調装置等を用い、室内折り返し装置等による伝送信号重畳・キャンセル技術の基礎的な機能確認試験を行った。

機能確認試験においては、伝送方式の基本特性として、次の測定を行った。

- 周波数安定度
- 占有周波数帯幅
- スプリアス
- コンスタレーション
- C/N(信号対雑音電力比)に対するビット誤り率特性
- キャンセル信号抑圧量
- 隣接キャリアの影響下における伝送特性評価
- 伝送路非直線性に対する耐性

### ③ 衛星システムにおける電波伝送試験の実施

人工衛星を用いた実環境の試験として基本的なキャンセル特性の実施検証を行うため、不要波キャンセル装置を用いたフィールド上の基礎検証を行った。

電波伝送試験においては、次の測定を行った。

- C/N(信号対雑音電力比)に対するビット誤り率特性
- キャンセル信号抑圧量
- 隣接キャリアの影響下における伝送特性評価

(3) VSAT 回線用不要波復調方式の検討(第 5 章)

### ① コンピュータシミュレーションによる理論検討

### ② 試験システムの構築における機能確認試験の実施

機能確認試験においては、伝送方式の基本特性として、次の測定を行った。

- 周波数安定度



- 占有周波数帯幅
- スプリアス
- コンスタレーション
- C/N(信号対雑音電力比)に対するビット誤り率特性
- キャンセル信号抑圧量
- 伝送路非直線性に対する耐性

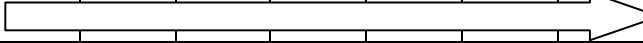
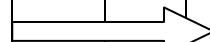
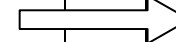
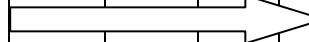
### ③衛星システムにおける電波伝送試験の実施

電波伝送試験においては、次の試験を行った。

- C/N(信号対雑音電力比)に対するビット誤り率特性
- キャンセル信号抑圧量

平成 19 年度の全体スケジュールを表 1.4-1 に示す。

表 1.4-1 平成 19 年度スケジュール

|                         | 6 月                                                                                  | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 10 月 | 11 月 | 12 月                                                                                  | 1 月                                                                                   | 2 月 | 3 月 |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
| 調査検討会                   |                                                                                      | ▲   |     |     |      |      |                                                                                       |                                                                                       | ▲   | ▲   |
| 作業部会                    |                                                                                      |     | ▲   | ▲   | ▲    | ▲    | ▲                                                                                     | ▲                                                                                     | ▲   |     |
| コンピュータシミュレーションによる理論机上検討 |  |     |     |     |      |      |                                                                                       |                                                                                       |     |     |
| 地上局内折返しによる機能確認試験        |                                                                                      |     |     |     |      |      |                                                                                       |  |     |     |
| 衛星システムによる電波伝搬試験         |                                                                                      |     |     |     |      |      |                                                                                       |  |     |     |
| 評価及び取りまとめ               |                                                                                      |     |     |     |      |      |  |                                                                                       |     |     |

## 第2章 伝送信号重畳キャンセル技術に関する国内外の技術動向

### 2.1 国内外の伝送信号重畳キャンセル技術の現状及び動向

近年、情報技術の発展により従来の音声主体の通信から動画像などのマルチメディアコンテンツを中心とした通信へと移行し、特にインターネットの目覚ましい発展により、有線通信においては FTTH（光ファイバ）、ADSL などの高速インフラが普及し、ブロードバンド通信が一般世帯にまで浸透してきている。

一方、無線通信においても同様に、第三世代移動通信や FWA(Fixed Wireless Access)、無線 LAN (Local Area Network) などが高速無線インフラとして普及している。

衛星通信は、1958 年に米国において開始され、我が国においては、1963 年に衛星通信による日米間のテレビ中継伝送実験が実施され、衛星通信の幕開けとなった。その後、衛星通信技術は目覚しく発展し、離島や僻地、また航空機や船舶などの移動体向けに衛星インターネットサービスが提供され、さらに地上デジタル放送の再送信手段や次世代高速無線アクセス技術である WiMAX のバックボーン回線としても検討されており、通信容量の大容量化や通信速度の高速化が進んでいる。

しかし、衛星通信の普及に伴い、静止衛星が増加し、これにより、静止軌道の混雑が著しくなっている。通信衛星は、電波干渉を避けるため隣接する通信衛星との間隔は3度程度必要とされているが、我が国に衛星通信サービスを展開している通信衛星の数は、東経 124 度から東経 169 度の間に 11 機（予備衛星を除く）である[参考文献 1]。これらの通信衛星の間隔は平均 4 度であり、非常に密集した状態にある。さらには、静止軌道は我が国と経度の近い韓国、中国を始めとするアジア地域や南半球のオセアニア地域の国々と共用しなければならない。このような理由から衛星通信における周波数の有効利用が求められている。

衛星通信の周波数有効利用を図る方法の一つとして、自局送信信号と他局送信信号を同一周波数に重畳する方式が検討されている[参考文献 1,2,3,4,5]。この方式では各地球局は自局送信信号と他局送信信号が同一周波数上に重なった信号を衛星から受信する。このため、他局からの送信信号を受信するために、地球局では自局からの送信信号を不要波としてキャンセルする必要がある。信号重畳方式の不要波キャンセルする技術については、表 2.1-1 に示すとおり、現在までに様々な研究がなされている。

これらの研究をみると、不要波はそのレプリカ信号を受信信号から減算する方法により除去される点は共通しているが、レプリカの生成方法については大きく二つの手法に分類される。

第一の手法は、送信データからレプリカ信号を生成する手法である[表 2.1-1 文献 1,2,4,5]。自局送信信号は衛星を中継し、不要波として再び自局に返ってくる。地球局では自ら送信した信号を遅延させることにより、不要波のレプリカを生成することができる。この場合、減算タイミングとして送信信号が衛星・地球局間を往復する時間を推定する必要がある。静止衛星は赤道上 36,000km にあるが、衛星は静止軌道において、1 日に約±50km の範囲

で変動するため、正確に送信信号の衛星・地球局間往復による遅延時間を推定するのは容易ではない。

第二の手法は、受信信号からレプリカを生成する方法である[表 2.1-1 文献 3]。地球局では受信信号から信号の電力差を利用し不要波である自局送信信号を復調し、レプリカを生成する。生成したレプリカ信号を受信信号から減算することで不要波をキャンセルする。この場合、減算タイミングはレプリカ生成の処理時間分を遅延させれば良いため、送信信号からレプリカを生成する手法に比べ、減算タイミングの調整は容易である。しかし、自局送信信号を一旦復調するため復調誤りの影響がある。このために、他局送信信号に SSMA(Spread Spectrum Multiple Access)を採用することにより、自局送信信号の電力密度を他局送信信号のそれより大きくするようにしている[表 2.1-1 文献 3]。

第一の手法を VSAT システムに適用する場合、パイロット信号が必要になる。第二の手法は VSAT システムに適用できるが、実用として実際に適用した例はない。また、対向方式については、自局と他局の信号のレベル差を利用できないため、第一の手法を応用して、レプリカを生成することにより可能となると考えられる。

表 2.1-1 現在までの研究の概要

| 文献                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 概要                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[1] M.D.Dankberg,M.J.Miler、M.G.Mulligan、<br/>SELF-INTERFERENCE CANCELLATION<br/>FOR TWO-PARTY RELAYED<br/>COMMUNICATION, The ViaSat Inc. ,<br/>United States Patent, Patent<br/>No.5596439,1997, Jan, 21.</p> <p>[2] M.D. Dankberg, M.J. Miler, M.G.Mulligan,<br/>SELF-INTERFERENCE CANCELLATION<br/>FOR TWO-PARTY RELAYED<br/>COMMUNICATION, The ViaSat Inc. ,<br/>United States Patent, Patent No.6011952,<br/>2000, Jan, 4.</p> | <p>本研究は、米国特許となっており、シミュレーション結果はないが、送信信号からレプリカを生成する事を提案している。</p> <p>レプリカ信号の振幅、位相、衛星・地球局間の往復時間はパイロット信号により推定している。</p> <p>VSAT システムへの適用も考えられる。</p>                       |
| <p>[3] T.Sugiyama, H.Kazama, M.Morikura,<br/>S.Kubota, S.Kato, "Burst Mode<br/>Interference Cancellation for Superposed<br/>Transmission of SSMA-QPSK Signals<br/>And TDMA-QPSK Signal in Nonlinear<br/>Channels, "IEEE GLOBECOM'93, pp.<br/>1612-1616, 1993.</p>                                                                                                                                                                     | <p>本研究では、受信信号から不要波を復調することによりレプリカを生成している。他局送信信号に SSMA を採用することにより残留信号の影響を小さくしている。</p>                                                                                 |
| <p>[4] 石田 則明、「帯域共用衛星通信方式」、信学論<br/>(B)、vol.J82-B, no.8, pp.1531-1537, Aug<br/>1999.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>本研究では、送信信号からレプリカを生成している。衛星・地球局間の往復時間を測定する回路を提案しており、往復時間を正確に調整できるシミュレーションを行っている。レプリカ信号の振幅や位相の誤差により生じる残留信号が希望波信号に与える影響について深く検討している。</p> <p>VSAT システムへの適用も考えられる</p> |
| <p>[5] 俊長 秀紀、小林 聖、大幡 浩平、風間 宏志、<br/>「重畳伝送を適用するマルチメディア衛星通<br/>信用干渉除去法の検討」、信学技報、<br/>SAT2000-86, Dec 2000.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>本研究では、送信信号からレプリカを生成している。データはフレーム構成になっており、フレームの先頭にあるパイロット信号により、フレーム毎にレプリカ信号の振幅、位相、衛星・地球局間の往復時間を推定している。</p> <p>VSAT に似た形態の適用を考えている。</p>                            |

## 2.2 伝送信号重畳キャンセル技術の高度化と将来展望

総合的な周波数有効利用の程度は、同一周波数の空間的な繰り返し頻度を示す空間利用率、チャンネル当たりの通話時間率を示す時間利用率、帯域当たりのチャンネル数を示す帯域利用率で表され、これらの向上が有効である。このうち最も直接的に利用周波数を減らす方法は帯域利用効率の向上であり、このために既存技術として最も寄与したのが多値変調技術である。QPSK (Quadri Phase Shift Keying : 4 相位相変調)、は BPSK (Binary Phase Shift Keuing : 2 相位相変調) に比べ、同帯域で 2 倍の情報を伝送することが可能である。多

値 QAM (Quadrature Amplitude Modulation: 多値振幅位相変調) は、たとえば 16QAM であれば BPSK と比べ同帯域で 4 倍の情報量となる。多値変調技術と合わせて、コサインロールオフフィルタの導入が狭帯域化に寄与した。さらに、最近の研究で変形コサインロールオフによる波形伝送系が提案され、ここでは従来のコサインロールオフよりも、さらに狭帯域化が図れることを示している。

また、帯域利用率の向上を目的とした新たな衛星通信方式として提案された伝送信号重畳衛星通信方式がある。この方式は、従来の多元接続方式のなかで、最も一般的に普及している FDMA(Frequency Division Multiple Access)方式において、自局送信信号の衛星からの受信波を相殺するキャンセル装置を付加することにより、同一偏波、同一周波数での双方向を可能としている。

伝送信号重畳キャンセル技術は、自局送信信号と他局送信信号を同一の周波数帯に重畳することにより、周波数利用効率を大幅に増大させる。さらに、希望する他局からの送信信号を受信するためには、自局の送信信号を不要波としてキャンセルすることが必要であるが、自局信号を知りえない他者はキャンセルが困難なことから、強固な秘匿性を有している。

高精度なレプリカの生成方式がいくつか研究されているが、実際の衛星通信システムでは、降雨減衰やシンチレーションなどの影響を受けて、受信信号の振幅・位相は常に変動する。この変動等によって生じる振幅・位相のキャンセル誤差は残留干渉量として現れ、希望波である対向局受信信号に干渉を与える。

このため、この残留干渉量を抑圧するために、受信信号の振幅・位相に高速かつ正確に追従するキャンセル技術の確立が必要である。

## 第3章 伝送信号重畳方式と信号キャンセル技術

### 3.1 伝送信号重畳キャンセル技術

衛星通信では自局と他局の送信信号は別々の周波数を用いて通信を行っているため周波数の利用効率が低い。そこで周波数利用効率を高めるため伝送信号重畳方式が検討されている。伝送信号重畳方式とは、従来別々の周波数を用いて伝送していた自局送信信号と他局送信信号の周波数を同一帯域に重畳し送受信を行う通信方式であり、周波数の有効利用を図るものである。しかし衛星から受信した信号には、希望信号である他局からの送信信号に加え、自局の送信信号及び雑音が干渉波として重畳されている。このため受信側では自局の送信信号のレプリカ信号を生成し、受信信号から減算することで希望信号を取り出す、信号キャンセル装置が必要になる。しかし信号キャンセル装置の精度によりキャンセル後の信号にも残留誤差が発生しこれが干渉となる。つまり残留信号を減らす事が、伝送信号重畳方式に置ける最も重要な技術要素である。

伝送信号重畳方式は、VSAT システムと対向回線システムへの適用が検討されている。

図 3.1-1 に VSAT システムを例にした伝送信号重畳・キャンセル技術概念図を示す。VSAT 型伝送信号重畳方式とは、1つのハブ局と数千の VSAT 局（子局）からなる VSAT システムに伝送信号重畳方式を適用したものである。VSAT システムではハブ局と VSAT 局は受信性能に差があり、約 10dB～13dB の電力密度比を持つ。また Inbound（インバウンド、IB）信号は Outbound（アウトバウンド、OB）信号に比べて狭帯域のため複数の信号を重畳できる。このため VSAT 局では不要波キャンセル装置が無くても、ハブ局からの信号を復調できる。またハブ局では受信信号を復調することで自局の送信信号のレプリカを生成し、受信信号から減算することで希望信号を取り出す。

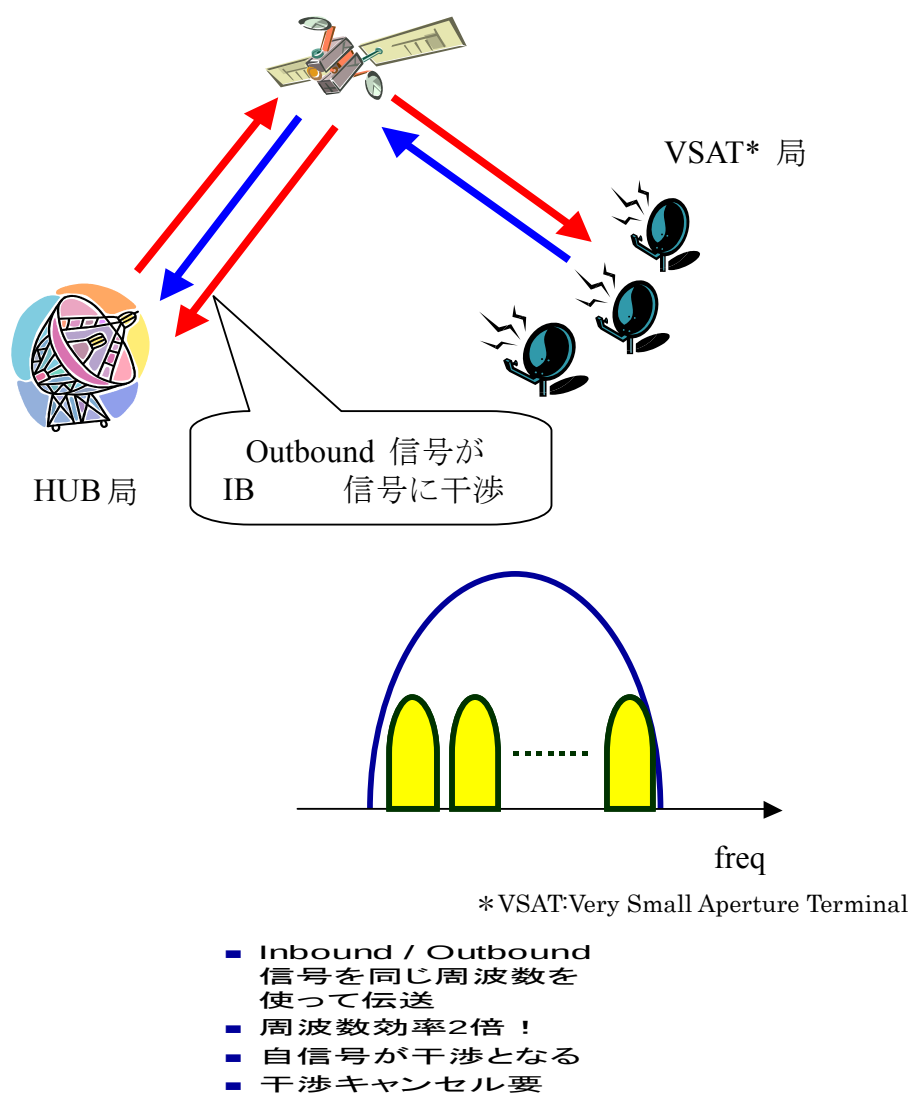


図 3.1-1 伝送信号重畳・キャンセル技術概念図

### 3.2 伝送信号重畳の二つの基本構成

衛星通信を用いた二つの地球局間の通信では、VSAT システム回線および対向回線の二つの基本構成があり、自局の送信信号と他局の送信信号は周波数帯域を分けて伝送している。伝送信号重畳方式では、自局送信信号と他局送信信号の周波数を同一帯域に重畳し周波数の有効利用を図るものである。以下に、P-P 対向回線及び P-MP VSAT 回線での信号重畳方式の構成を述べる。

#### 3.2.1 P-P 対向回線による同レベル同一帯域信号の重畳

対向する地球局間で、従来、個別の周波数帯域で伝送していた、比較的広帯域の信号の対向回線（P-P paired system）を、同一帯域の周波数に重畳して伝送する。この場合は、P-MP VSAT 回線方式と異なり、対向する2つの無線局（A、B）の信号の電力は、ほぼ等価である。対向回線による同レベル同一帯域信号の重畳を図3.2-1に示す。

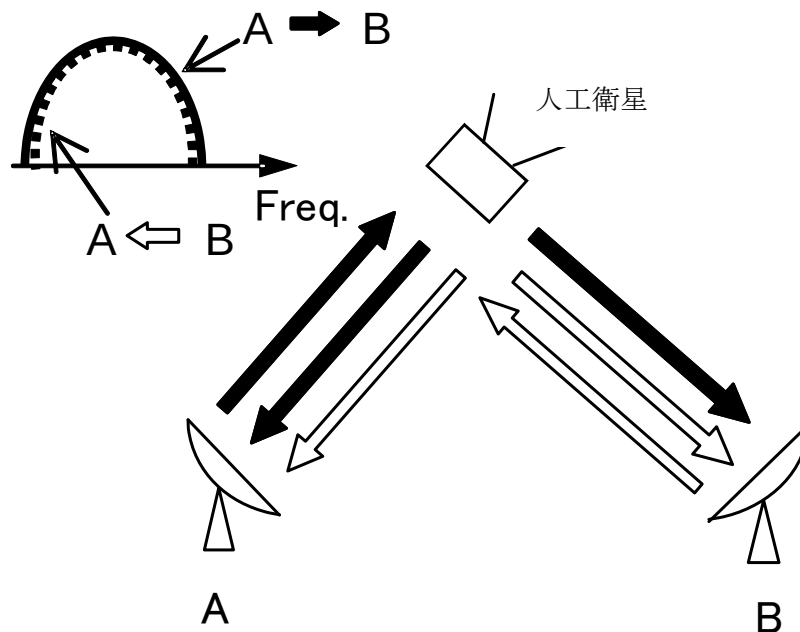


図3.2-1 対向回線による同レベル同一帯域信号の重畳



### 3.2.2 P-MP VSAT 回線の上り、下り回線重畳

P-MP VSAT 回線は、一つのハブ局と多数の VSAT 局（子局）の間の 1 対 N のスター型回線であり、ハブ局からは広帯域の OB 信号が、VSAT 局からは狭帯域の IB 信号が複数キャリアで FDM 方式により伝送される。この場合、ハブ局と VSAT 局の受信性能を踏まえて、OB 信号は IB 信号に比べ大きな電力で伝送される。この OB 信号（上り）と IB 信号（下り）の周波数を同一帯域に重畳して伝送する。P-MP VSAT 回線の上り、下り回線重畳を図 3.2-2 に示す。

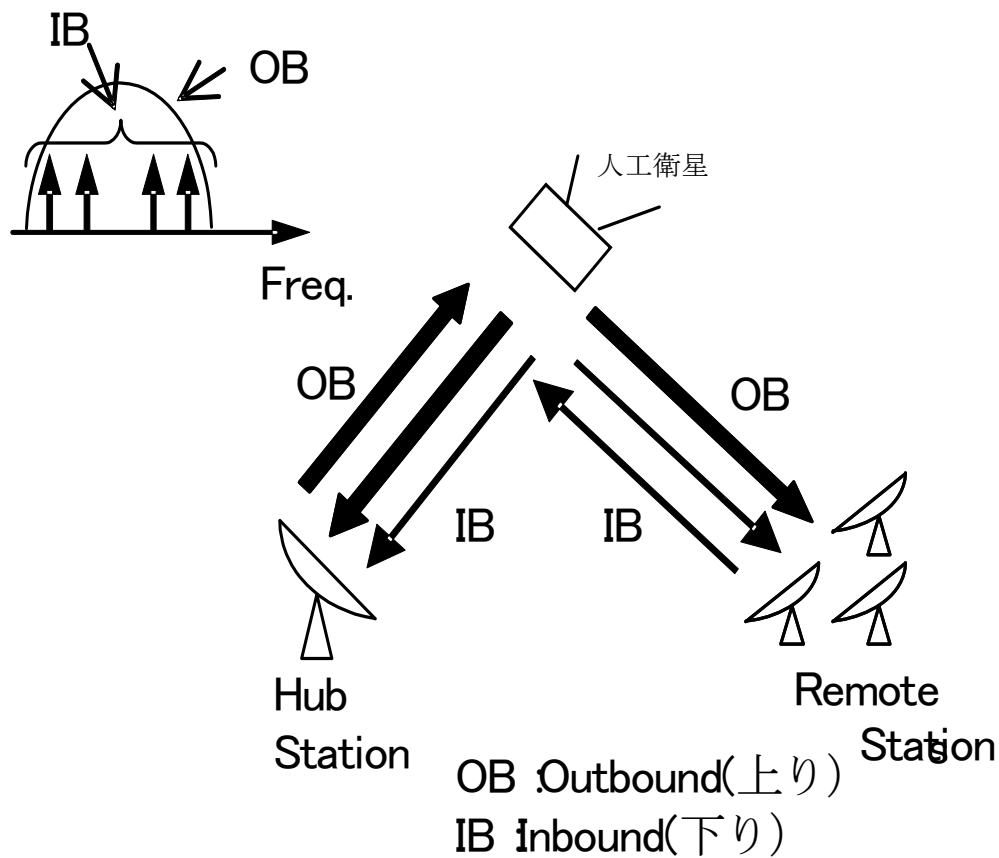


図 3.2-2 P-MP VSAT 回線の上り、下り回線重畳

### 3.3 レプリカ生成方式

伝送信号重畳方式では、従来帯域を分けて伝送していた自局送信信号（往きの回線）と他局送信信号（帰りの回線）が同一周波数帯域に重畳されている。このため、受信側では互いに自局の送信信号が不要波（干渉波）となり、希望波の復調のためには、不要波（自局送信信号）と同じ周波数、位相、振幅を持ったレプリカを再生し、受信信号から差し引く操作、すなわちキャンセル操作が必要である。不要波となる自局送信信号のレプリカを如何にして正確に作るか、又、不要波とレプリカのキャリアとタイミング位相を如何に精度よく合わせるかについて、複数のレプリカ生成方式が提案されている。

レプリカ生成法としては大別して、(1) 受信信号から不要波を復調・抽出し、レプリカとする方式、及び(2) 衛星・地球局間往復の遅延を測定し自局データをその遅延量だけシフトして作る遅延検出方式がある。(1)の方式は不要波復調方式と呼ばれ、VSAT 回線のように不要波の電力が希望波の電力より十分大きい場合には非常に簡易な方法である。一方、遅延検出方式は送信及び受信信号が同レベルの対向回線（P-P paired system）にも適用可能な方式である。このため、より適用範囲の広い遅延検出方式についての調査検討を実施することとした。

遅延検出方式に関しては測距符号を用いる方法や受信データ列のみから遅延時間を検出する方法等、複数の実現手段について検討した結果、後者の方法でレプリカのタイミングを決定することとした。

#### 3.3.1 遅延検出方式

遅延検出方式は、衛星地球局間一往復の遅延を検出し、自局が持つ送信データを衛星・地球局間往復の遅延量だけずらしてレプリカを作成し、受信信号から引く方式である。

遅延検出方式を図 3.3-1 に、遅延検出方式の構成を図 3.3-2 に示す。

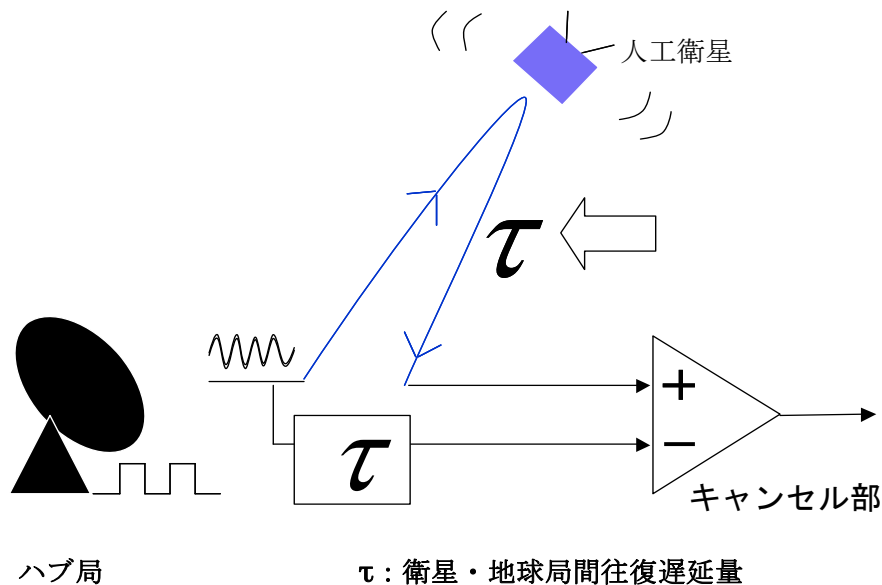


図 3.3-1 遅延検出方式



ここで EMF に入力されたデータは、衛星を経由していないものである。衛星を経由して受信された信号は RateConv でサンプリング周波数を調整後、レプリカ信号とともに EMF に入力される。つまり衛星を経由データは、往復遅延時間（約 250ms）だけ遅れて EMF のもう一方の端子に入力される。このようにして衛星経由データが受信された瞬間に、待ち構えているデータと一致し拡張マッチドフィルタがこれを検出する。この検出信号をトリガーにして FIFO 出力を起動し、そのデータ列を変調波に変換 (Mod3) することにより、受信信号 (RateConv 出力) とタイミングが一致したレプリカが生成される。これらの両信号をキャンセル部 (Timing & Phase Error Det) に入力することにより不要波のキャンセルが行われる。この様子を図 3.3-4 の動作タイミングに示す。

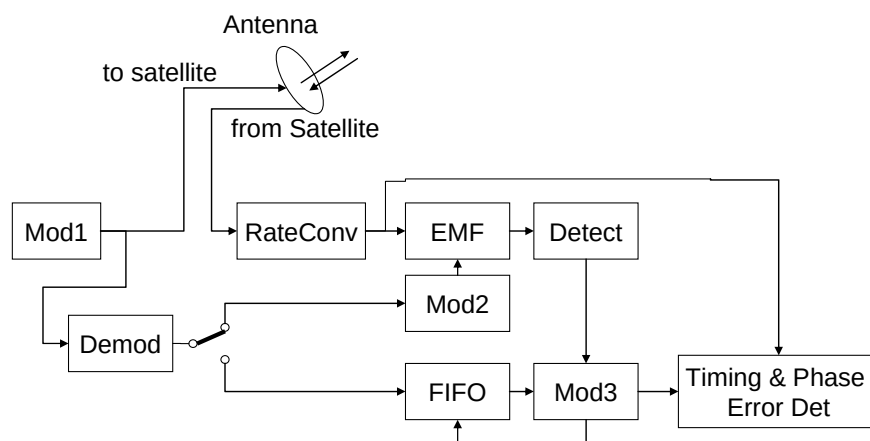


図 3.3-3 遅延検出による信号キャンセル装置のブロックダイアグラム

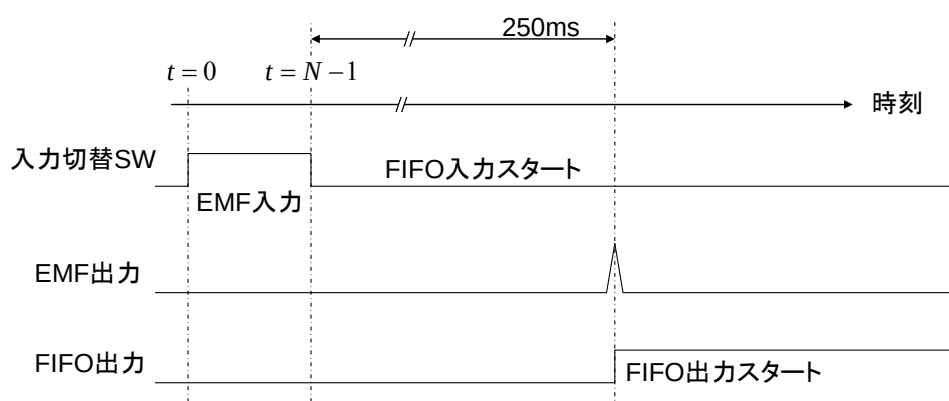


図 3.3-4 動作タイミング

図 3.3-5 に EMF の構成を示す。時刻  $k$  における送信信号（およびそのレプリカ信号）

を  $x_k$  とすると、 $N$  シンボル分の送信信号レプリカが EMF に入力された時点で、レプリカ信号側のタップ付き遅延線の状態は図に示すように、 $x_{N-1}, \dots, x_2, x_1, x_0$  となる。この状態は、時刻  $N$  以降、固定される。時刻  $l$  ( $l \geq N$ ) における受信信号を  $r_l$  とする。このときの EMF 出力信号は次式で表される。

$$v_l = \sum_{k=0}^{N-1} r_{l-k} x_{N-k}^*$$

上式で示されているように、EMF では時刻  $0$  から  $N$  までの区間のレプリカ信号と受信信号との相互相関を計算している。EMF 出力信号の振幅  $|v_l|$  は、レプリカ信号と同じパターンの受信信号が到来したとき、ピークを出力する。ピーク検出器(Detect)では、EMF 出力振幅のピーク位置を検出し、もうひとつのレプリカ生成変調器(Mod3)にトリガ信号を出力する。トリガ信号を受け取った Mod3 は、FIFO メモリからデータを読み出してレプリカ生成を開始する。このとき生成されたレプリカは送信信号を伝搬遅延時間分だけ遅延した信号になっているが、EMF の検出時間誤差 (0.5 シンボル程度) はタイミング誤差として残る。受信信号とレプリカ信号は Timing & Phase Error Det に入力され、残留シンボルタイミング誤差および位相誤差を検出し、(4)に述べたフィードバック制御により誤差の微調・最小化を行う。

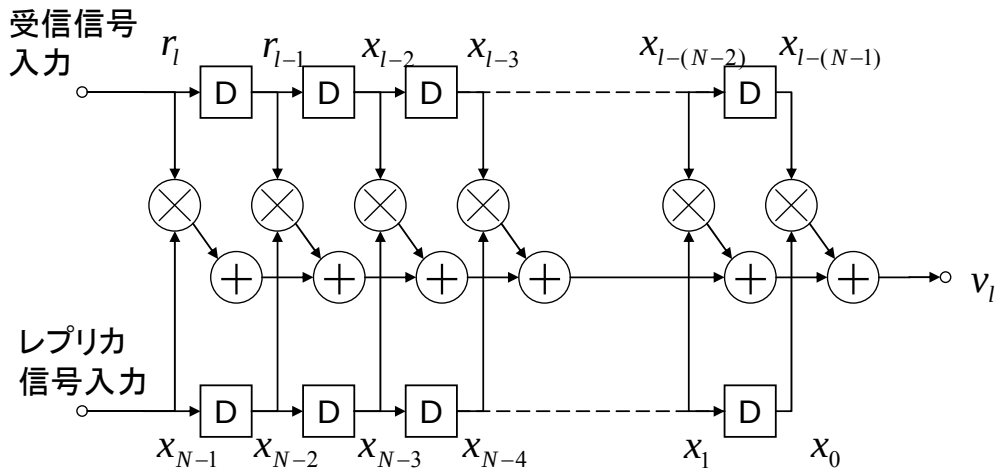


図 3.3-5 拡張マッチドフィルタの構成

### (3) 装置化の全体構成図

図 3.3-6 にソースコード並びに装置化構成図を示す。本図の上の系は受信信号伝送部、下の系はレプリカ生成部である。レプリカ生成部は自局送信変調波を一旦復調判定し EMF に入力するためのデータ列を作る。本系にはレート変換を行う機能(Interpolator, Down Sampler)、復調位相制御のための Rotator、復調系 Dem, Demapper が含まれる。(3) に述べた原理により、図中 EMF によってタイミング検出を行い、生成したレプリカ変調信号を FIFO から出力させる。最終段 Cancellor では受信信号から、それと大まかに同期（1 シンボルの十分の一程度以内）したレプリカを減算（キャンセル）する。このとき、受信信号とレプリカ両者のタイミング、キャリア位相、レベルの三つが完全に一致していない場合 Cancellor 出力にはそれぞれの要因に応じた残留誤差が現れる。本提案構成では、三つの誤差情報を検出するそれぞれのアルゴリズムにより最終段に三つのフィードバックループ（Interpolator でタイミング制御、Rotater で両系の周波数&位相制御, AGC で両系のレベル制御）を形成しレプリカ信号を制御・微調する。

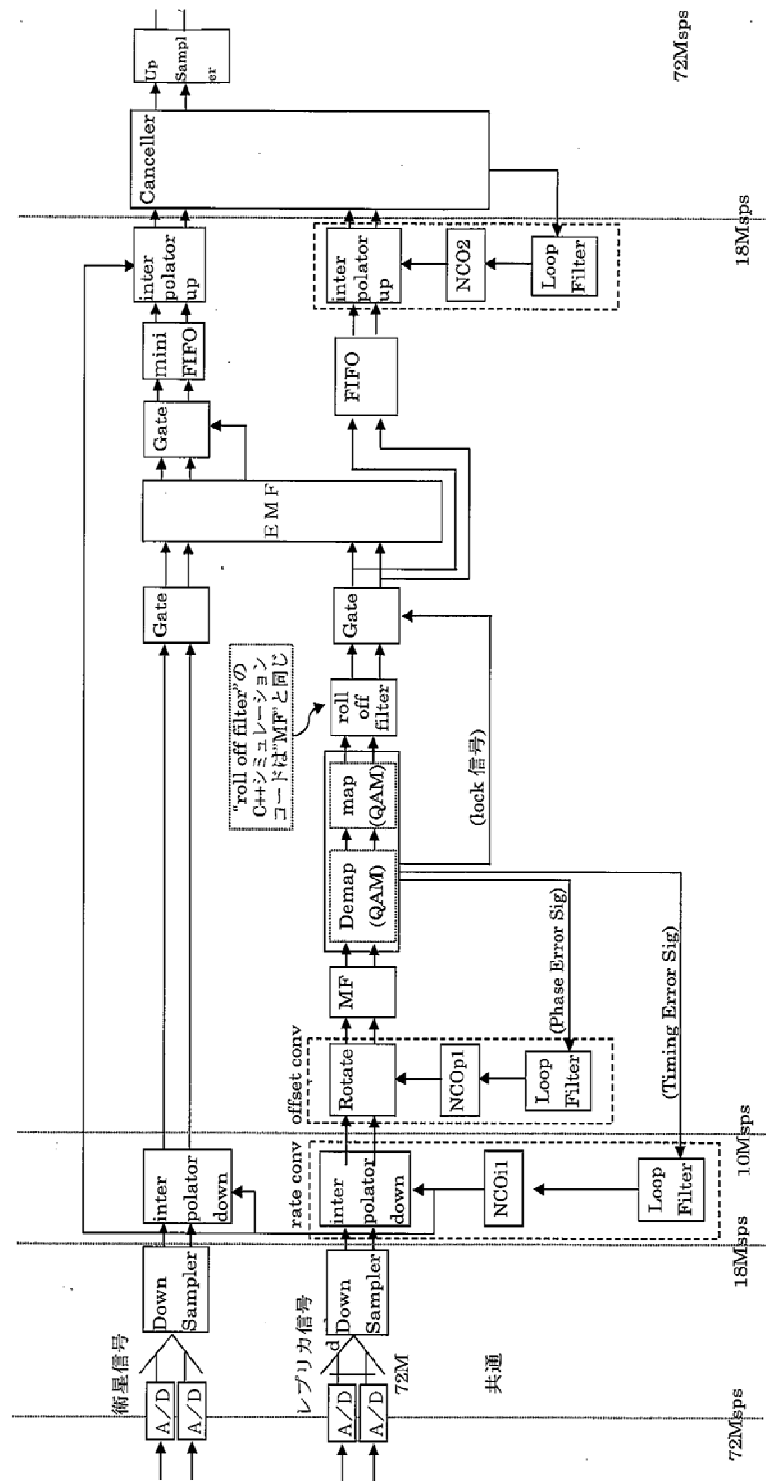


図 3.3-6 遅延検出方式キャンセル装置

#### (4) 遅延検出方式の検討事項

本システムの設計上のいくつかの検討事項について記す。

##### (a) EMF タップ数 N

EMF タップ数 N は、遅延時間推定精度に大きな影響を与えると考えられるため、設計に当たっては、タップ数 N の最適化を行う必要がある。

N を大きくすると、積分区間が長くなるために、雑音および近いパターンが発生したことによる誤検出の確率が減少する。しかし、実際の受信信号にはキャリア周波数オフセットが含まれているため、積分区間が長くなると、周波数オフセットによる位相回転により相関値が低下する問題がある。EMF 入力のサンプリング周波数  $f_s$ 、周波数オフセット  $\Delta f$  とすると、EMF 積分区間内の位相回転量は次式で与えられる。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi\Delta f N}{f_s}$$

システムにおける許容周波数偏差を決めて、 $|\Delta\theta|$  の許容値を決定する必要がある。これまでの検討により N=32 または 64 とする。

##### (b) ピーク誤検出および見逃し時の復帰

送信信号パターンおよび雑音によっては、ピーク位置の誤検出およびピーク位置を見逃す場合がある。運用開始から一定の時間後もキャンセルできない場合、運用者による再起動方式をとることとする。

##### (c) 超低 C/N での制御ループの設計

上項の後半に示したように、本システムでは EMF により粗い精度 (1/10 シンボル程度) で遅延測定を行った後、最終段の Canceller においてその残留誤差信号から三つの制御ループを形成し、タイミング、位相、レベルの微調を行う。ここで、キャンセル装置として求められる精度はタイミング、位相については 5~10 度程度 (残留誤差 < -20dB)、またレベルについては両者の誤差が直接残留電力として効いてくるため 0.1~0.2dB (残留誤差 17~14dB に相当) 程度の高い精度の制御が要求される。一方、本方式では同一帯域内の等レベルな信号重畳を想定していることから、これら三つの制御ループは非常に低 C/N での動作となり、ループのアルゴリズムや時定数の設計に下記の注意が必要である。

##### (c)-1 キャリア周波数オフセット

両者のキャリア周波数に  $\Delta\text{kHz}$  の差があったとき、 $1/\Delta\text{ms}$  の間にキャンセル装置入力において 360 度の位相回転が生ずる。つまり 1ms では  $\Delta \times 360$  度回転する。EMF で 0.5 シンボル以内の測定をした後は、両キャリア周波数は自走する。両キャリアの 5kHz の初期周波数があった場合、180 度の大きな位相回転を生ずる計算になる。従って、Rotator には最大周波数偏移 (5kHz) を追従する AFC 機能を付加する。



(c)-2 タイミングドリフト（衛星軌道位置変動）

一方、キャンセル部では、上記キャリア位相偏移の他に衛星ドリフトによりタイミング誤差が時間とともに増大して生ずる。タイミング誤差の変動速度は、仮に衛星が 1km/H で動いたとすると、1ms の間に変動する遅延量は

$$\frac{1}{300000} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{1000} = \frac{1}{10.8 \times 10^{11}} = \frac{1}{10^{12}} = 10^{-3} ns$$

つまり、 $10^{-3}$  ns/ms 程度であり、この値は 10Msps のデータ（シンボル長  $10^2$  ns）に対しては ms 当り  $10^{-5} \times 360$  度程度と非常に小さく、キャンセル装置のタイミング追尾が ms オーダーで動作する限り大きな問題にはならない。

(5) 遅延検出方式の基本仕様

表 3.3-1 に遅延検出方式の基本仕様を示す。

表 3.3-1 遅延検出方式の基本仕様

| 項目                              | 仕様                       | 備考          |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|
| 変調方式                            | QPSK                     |             |
| IF 周波数                          | 140 MHz                  |             |
| 伝送速度                            | 5, 10, 20 Msps           |             |
| サンプルレート                         | 72MHz                    |             |
| 量子化ビット数                         | 受信系 12bit<br>レプリカ入力 8bit |             |
| EMF (Extended Matched Filer) 段数 | 32 または 64 (TBD)          |             |
| 受信入力レベル変動                       | 幅で 1 dB                  |             |
| 受信周波数変動                         | 幅で 5kHz                  |             |
| レプリカキャリア位相誤差                    | 10 度 (残留 > 20 dB 相当)     | 目標値 5 度     |
| レプリカタイミング誤差                     | 10 度 (残留 > 20 dB 相当)     | 目標値 5 度     |
| レプリカレベル誤差                       | 0.2 dB (残留 > 14 dB 相当)   | 目標値 0.1 dB  |
| 不要波抑圧量                          | > 20 dB                  | 目標値 > 25 dB |
| 動作応答時間                          | TBD                      | 検討事項        |

### 3.3.2 不要波復調方式

不要波復調方式は、受信信号のみから不要波を復調しレプリカを生成し、受信信号から引く方式である。不要波復調方式を図3.3-7に、不要波復調方式の構成を図3.3-8に示す。

- 特長: 衛星遅延の測定不要
- 受信信号から不要波を復調しレプリカとする

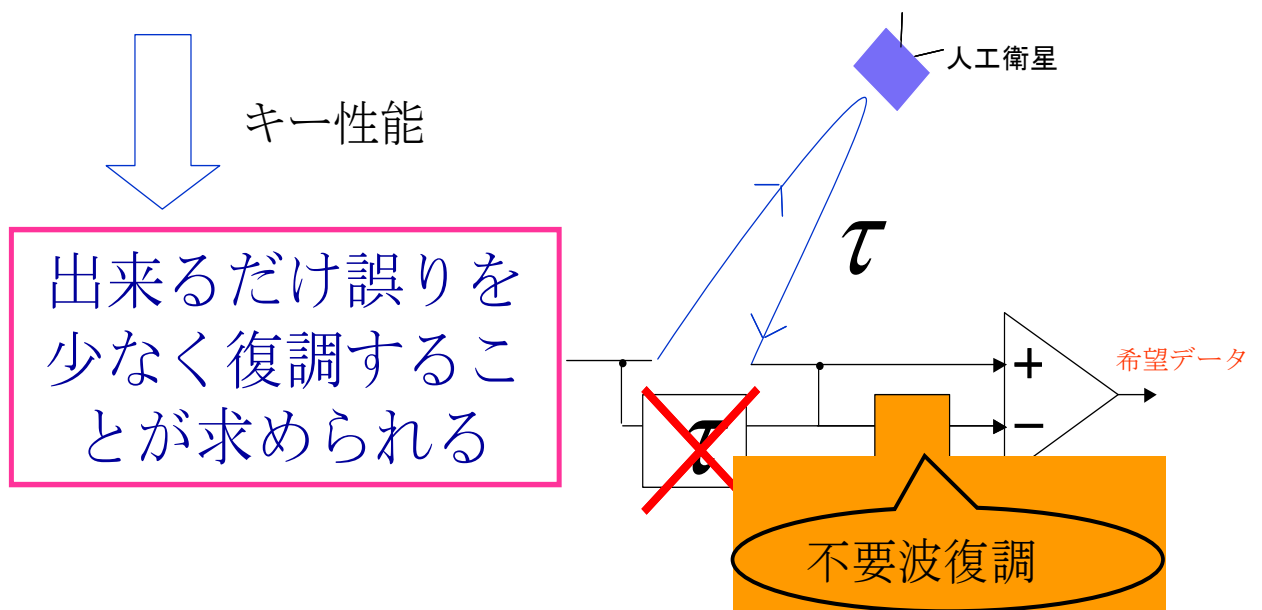


図 3.3-7 不要波復調方式

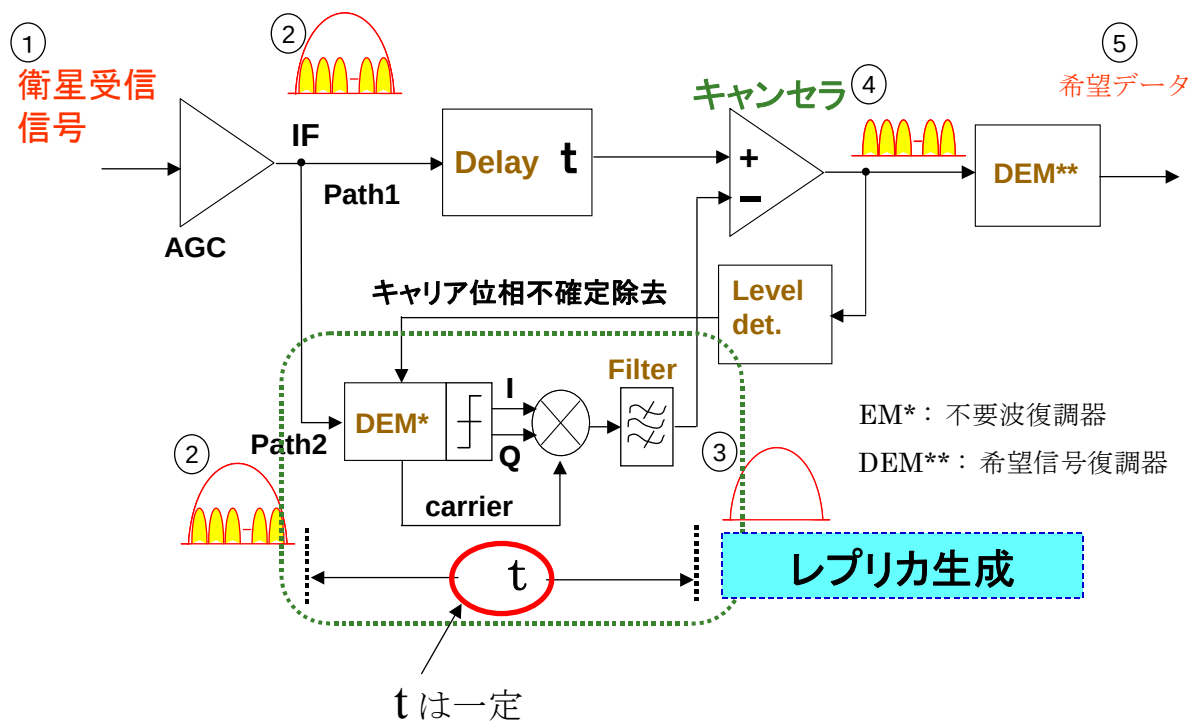


図 3.3-8 不要波復調方式の構成

### 3.4 伝送信号重畳・キャンセル技術の検討計画

伝送信号重畳・キャンセル技術について、コンピュータシミュレーションによる理論的な性能検証を実施した後、試験システムによる機能確認試験、および衛星システムによる電波伝送試験を行うことで、最終的には、伝送信号重畳・キャンセル技術に関する技術的条件について検討を行うものである。

伝送信号重畳・キャンセル技術は、衛星上で、自局送信信号と他局送信信号が重畳された信号から、自局が送信した信号のレプリカ信号を逆位相で加える(キャンセルする)ことにより、他局信号を受信するものである。

ここで、生成するレプリカの精度が重要となるが、レプリカ生成方式には不要波復調方式および遅延検出方式の二つの方式を検討し、不要波キャンセル装置内の FPGA(Field Programmable Gate Array) に実装する方式および各々の伝送信号重畳の構成パターンで検証を行う。

- 不要波復調方式 : P-MP VSAT 回線 \*1
- 遅延検出方式 : P-P 対向回線 \*2

\*1 P-MP VSAT system: Point to Multipoint Very Small Aperture Terminal system

\*2 P-P paired system: Point to Point paired system

次頁以降に示すとおり、P-P 対向回線に遅延検出方式による伝送信号を重畳させる構成を適用し、コンピュータシミュレーション、試験システムによる機能確認試験、および衛星システムによる電波伝送試験の検証を行った。また、P-MP VSAT 回線に不要波復調方式による伝送信号を重畳させる構成を適用し、これに性能改善を行い、試験システムによる機能確認試験、および衛星システムによる電波伝送試験の検証を行った。

なお、試験結果のうち、データ量の多いものについては、別冊に収録している。

## 第4章 対向回線用遅延検出方式の検討

### 4.1 対向回線用遅延検出方式の概要

#### 4.1.1 P-P 対向回線衛星通信システムにおける遅延検出方式の概要

P-P 対向回線におけるキャンセル技術として、一対のペア回線から構成される回線について遅延検出方式の検討を実施した。

P-MP VSAT 回線では、VSAT 局ではハブ局からの希望信号（OB:アウトバウンド）は VSAT 局から折り返される干渉信号（IB:インバウンド）に比べて十分に高いためにそのまま復調でき、キャンセルはハブ局において自局の信号を復調し、受信信号から引くことだけで希望信号（IB 信号）を得ることができた。

これに対して、P-P 対向回線では双方の局で自局の信号が、等レベルで干渉信号となるため、双方にキャンセル装置が必要となる。またキャンセルすべき自局信号（OB 信号）は干渉となる他局信号（IB 信号）と等レベルとなるために、不要波復調方式では復調不可能である。干渉信号の除去は、信号の衛星往復時間を測定し、自局信号をその分だけ遅延させることによって可能となる。

このような衛星往復遅延時間の測定にはいくつかの方法が考えられる、一つは図 3.3-3 に示した拡張マッチドフィルタ（EMF : Extended Matched Filter）によってデータの特定箇所の相関から遅延を測定する方法（遅延検出方式と呼ぶ）であり、二つ目は一定周期の符号を連続して送信し、受信側においてそれと同じローカル符号を同期させ両者の位相関係から遅延時間を測定する方法（遅延測定方式と呼ぶ）である。両者それぞれに長短があるが、装置化の容易さから、ここでは前者（遅延検出方式）を採用することとした。同方式の基本構成を図 3.3-2 に示す。

#### 4.1.2 P-P 対向回線衛星通信システムにおける遅延検出方式キャンセラの検討

遅延検出方式では、技術的に以下の 3 点が機能および性能を決めるポイントとなる。先に示した図 3.3-1 において、EMF までの系を EMF 前段、以降を EMF 後段と呼ぶ。まず EMF 前段は衛星から受信される信号(衛星信号)と自局送信変調波からそのベースバンド情報の I・Q 成分を取り出し、レプリカ信号を生成するための復調部系に分けられる。復調された自局信号の任意の部分のデータを EMF の待ち受け段に入力する。一方、受信信号は EMF のもう一方の端子に入力され 3.3.1 (2) に述べた原理によって両系のパターンとの相関計算により衛星から折り返されるその部分のパターンの一致を検出し、遅延時間が検出される。最大衛星遅延分のデータを蓄積しているバッファ回路 (FIFO) は、このパターン検出信号によって起動され、衛星からの受信信号とほぼ同じタイミングで吐き出される。このようにして得られた両系の信号列は EMF 後段のキャンセル部に入力される。キャンセル部では、両系の周波数、位相の同期とレベル制御を行い、精度の高いキャンセルを実現する。本キャンセル装置の性能を決めるポイントは以下の通りである。

- EMF 前段のレプリカ生成系の波形伝送特性

- 拡張マッチドフィルタ（EMF）の段数とパターン検出確度
- EMF 後段部の周波数、位相、レベル制御機能

以下、各々の項目について説明する。

#### (1) EMF 前段のレプリカ生成系の波形伝送特性

本システムは衛星信号とレプリカ信号の二つの信号の流れとなっており、最終段のキャンセル部での両系の I および Q の波形は一致している必要がある。このためのレプリカのロールオフフィルタ等は、送信局のパラメータと一致している必要がある。

#### (2) 拡張マッチドフィルタ（EMF）の段数とパターン検出確度

マッチドフィルタのパターン検出の確度（miss-detection、false detection の最小化）は入力信号の C/N の他には段数（フィルタのタップ数）で決まる。本システムでは、衛星往復の遅延時間は 247～253ms の幅に収まることが予め分かっているため、マッチドフィルタは 6ms の Window と呼ばれる幅だけ開かれるように設計する。タップ数として 32 または 64 段を検討する。

#### (3) EMF 後段部の周波数、位相、レベル制御機能

EMF によって、両系のタイミング同期が取られるが、キャンセル装置の性能を 30dB 近く取るためにはキャリア、タイミング共に 3 度程度の誤差に抑えなければならない。EMF 後段のキャンセル部には、このための、位相追尾 (Rotator)、タイミング追尾 (Interpolator) および AGC 機能を備えている。

### 4.1.3 遅延検出方式キャンセル装置の構成

図 3.3-6 上段は衛星からの受信入力、下段は変調器からの信号を A/D 変換(12 ビット)したサンプルレート 72MHz の信号である。本装置は、5Msps、10Msps、20Msps の 3 つの伝送レートの試験を想定しており、まず下段入力では、各レートに対応するためのレート変換を行う Down Sampler が置かれている。その後、タイミング同期と信号の補完を行う Interpolator、キャリア位相同期のための Rotator、受信信号の最適フィルタ MF (Matched Filter)、復調器 (Demapper) から構成される。復調信号 (Demapper 出力) は再び Rolloff フィルタを経由して、自局送信機からの変調波と同じ波形の信号に整形され、その先頭部 64 シンボル(または 32 シンボル)は復調器の同期完了信号である Lock 信号によって、EMF に供給される。同様に後に続くデータ列は順次バッファ回路 (FIFO) に蓄積される。一方、衛星からの受信信号は衛星信号系を通り、衛星往復遅延量だけ遅れて EMF を通過する。既に EMF に蓄積され待機しているデータと衛星データ列のパターンが一致したとき、EMF から「検出」信号が出力され、それによってバッファ回路 (FIFO) データの出力 (レプリカ) を起動する。これにより、タイミングがほぼ同期した衛星信号、レプリカ信号は各々最終段の Canceller 回路に入力される。Canceller 回路の機能は、衛星信号とレプリカ信号の周波数、タイミングの高精度な同期をとることと、両信号のレベル差を補正するこ

とである。これら三つの機能を持つ Cancellor 部のタイミング位相同期を図 4.1 - 1 に、キャリア位相同期を図 4.1 - 2 に示す。

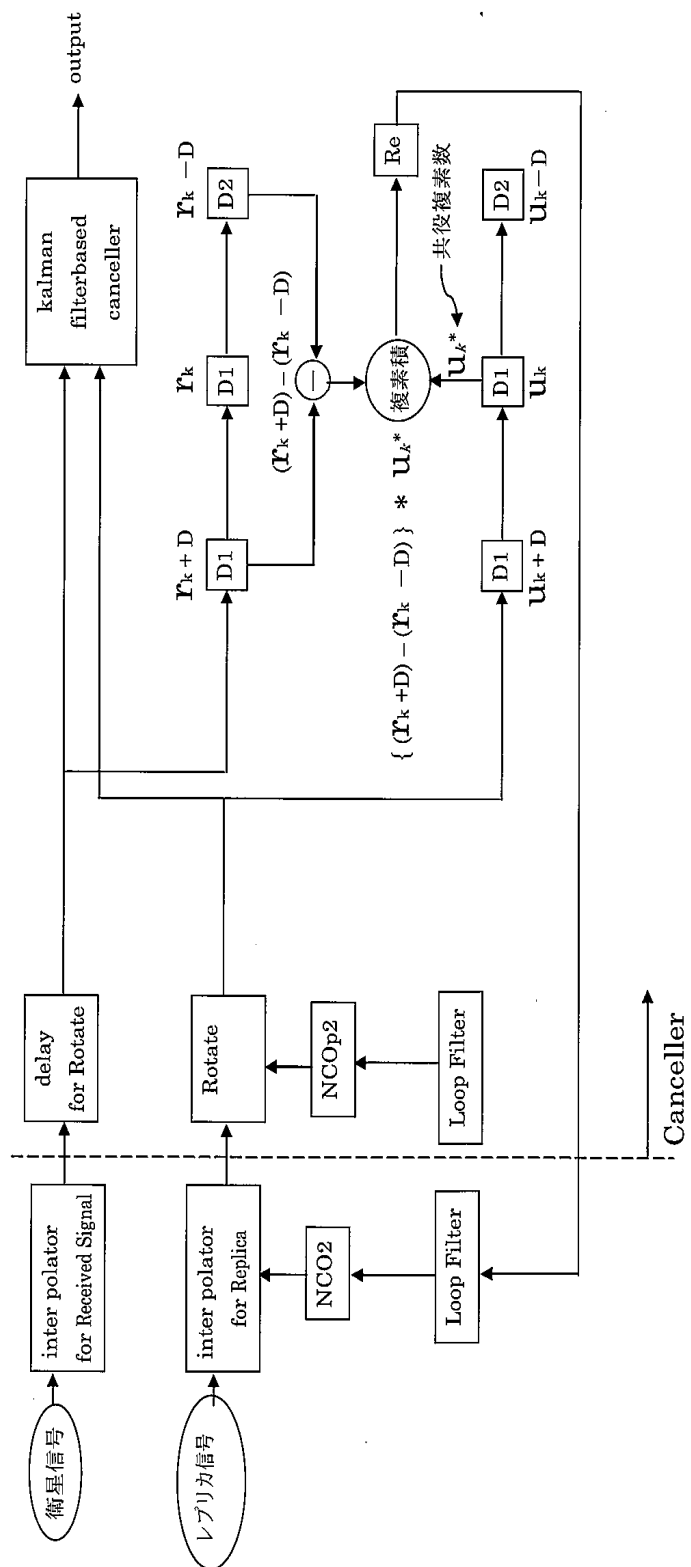


図 4.1-1 Canceller 部のタイミング位相同期



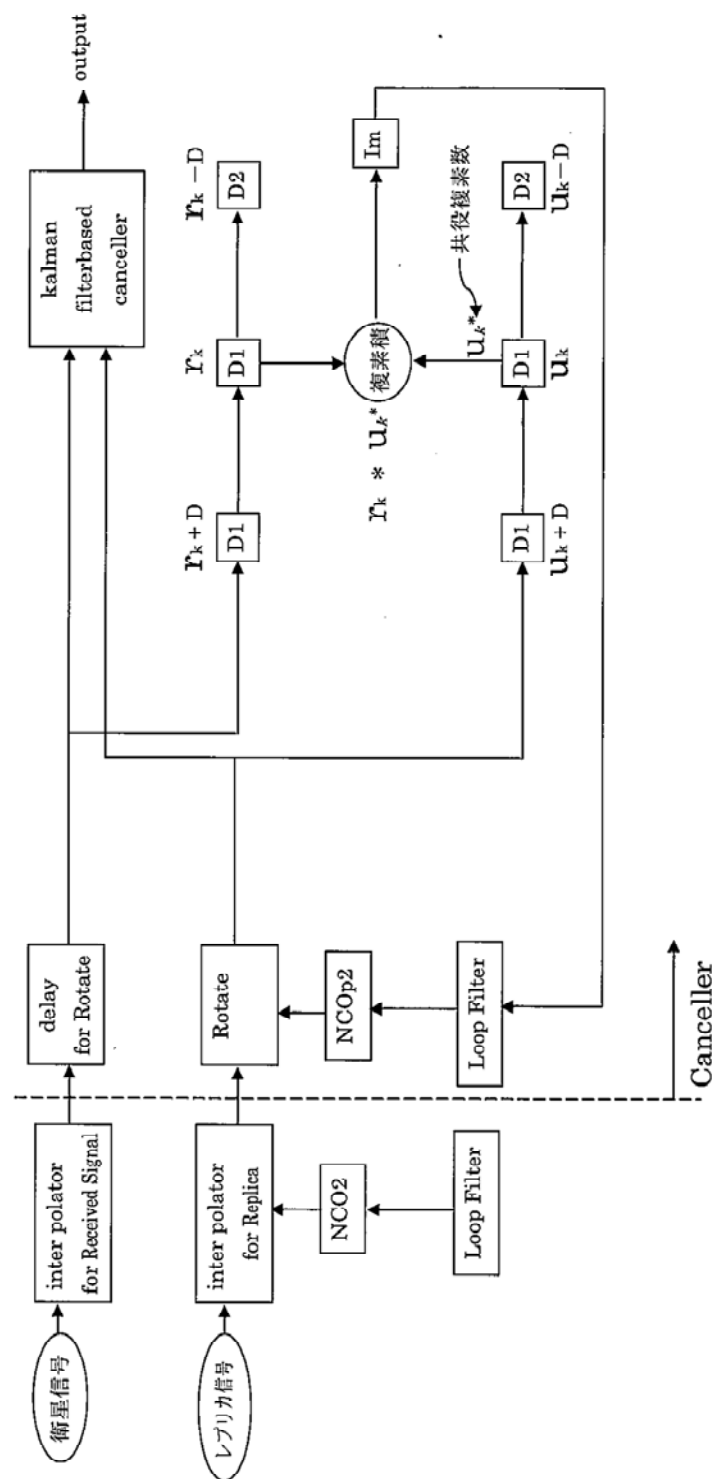


図 4.1-2 Canceller 部のキャリア位相同期

## 4.2 コンピュータシミュレーションによる理論評価

伝送信号重畳方式では同一周波数帯域上での送受信を行う通信システムを利用する。このため受信信号には他局からの希望信号に加え、自局の送信信号が干渉波として重畳されている。希望信号の抽出には、干渉波のレプリカを生成し、受信信号から減算する信号キャンセル装置が必要になる。レプリカ信号は自局の送信信号に衛星・地球局間往復の遅延を与えて生成する。衛星・地球局間往復時間は約 250msec であるが、静止衛星も微小に動くため一定ではない。またレプリカ信号と受信信号のタイミングがわずかでもずれると一定のレベルの電力が残留誤差として発生する。よって遅延検出方式では高精度に衛星・地球局間往復遅延時間を測定する手法が求められる。対向回線方式ではレプリカ生成に衛星・地球局間往復時間を高精度に測定し、不要波のキャンセルを行う。また対向回線方式の信号重畳方式では希望波と不要波のレベルがほぼ同一であり、レプリカのタイミング決定は非常に低 C/N で行われなければならない問題がある。そこで遅延検出方式では低 C/N で動作可能な拡張マッチドフィルタ(EMF: Extended Matched Filter)を用いた高精度な遅延測定を採用することとした。この手法の有効性をコンピュータシミュレーションにより検証し、EMF による同期確保と希望波の抽出をおこなうことにより対向回線方式に適用可能であることが確認できた。

ここで開発された遅延検出方式ソースコードは C++でコーディングされ、VHDL (VHSIC Hardware Description Language) に変換され、不要波キャンセル装置内の FPGA (Field Programmable Gate Array) に実装される。

### 4.2.1 コンピュータシミュレーション系

遅延検出方式の C++ソースコードによる性能検証のためのシミュレーション系を図 4.2-1 に示す。図において、変調器 A は自局からの送信信号変調器、変調器 B は相手局からの信号変調器を示す。この場合、キャンセル装置にとっては、信号 A は不要波に、信号 B は希望波になる。両信号は疑似衛星入力(アップリンク)で合成される。衛星往復遅延としてここでは疑似衛星内部に一定量の遅延があるものと想定している。衛星からの信号(A+B)には熱雑音が付加されてキャンセル装置に入力される。一方、信号 A はそのレプリカ生成のために送信側で二分岐され、直接キャンセル部に入力される。キャンセル部においては、受信信号(A+B)からレプリカ A が引き算され、希望信号 B のみが出力として取り出される。キャンセル部の性能評価のために C/N に対するビット誤り率(BER)を測定し評価をした。

また、表 4.2-1 には遅延検出方式のシミュレーション諸元を示す。この諸元で C++ソースコードによるシミュレーションを行い機能の確認および性能の検証を行った。

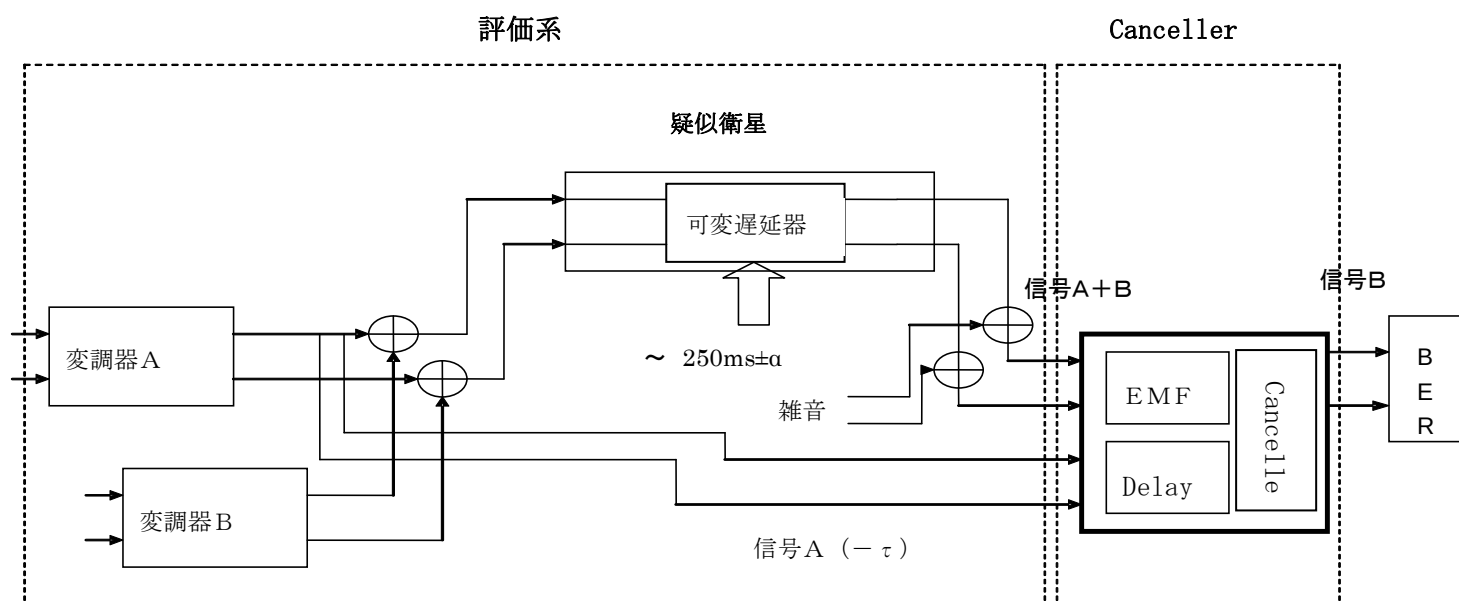


図 4.2-1 遅延検出方式のシミュレーション構成

表 4.2-1 遅延検出方式のシミュレーション諸元

| 諸元         | 仕様                    | 備考          |
|------------|-----------------------|-------------|
| 変調方式       | QPSK                  | (自局、他局共)    |
| 伝送速度       | 5Msps, 10Msps, 20Msps |             |
| サンプリングレート  | 72MHz                 |             |
| 量子化数       | 12 ビット/サンプル           |             |
| 入力レベル変動    | ±1dB 以内               | AGC 機能      |
| キャリア周波数変動  | ±5kHz 以内              | AFC, APC 機能 |
| マッチドフィルタ段数 | 32 または 64 段           |             |

#### 4.2.2 各制御の動作検証

##### (1) 振幅制御

振幅制御の動作検証を行った。図4.2-2にキャンセル部の衛星信号の入力とレプリカ信号に振幅差を与えた信号を入力した場合のキャンセル部の出力を示す。この結果より出力が0に収束していくことがわかり、振幅補償が極めて高速に行えていることが確認できる。

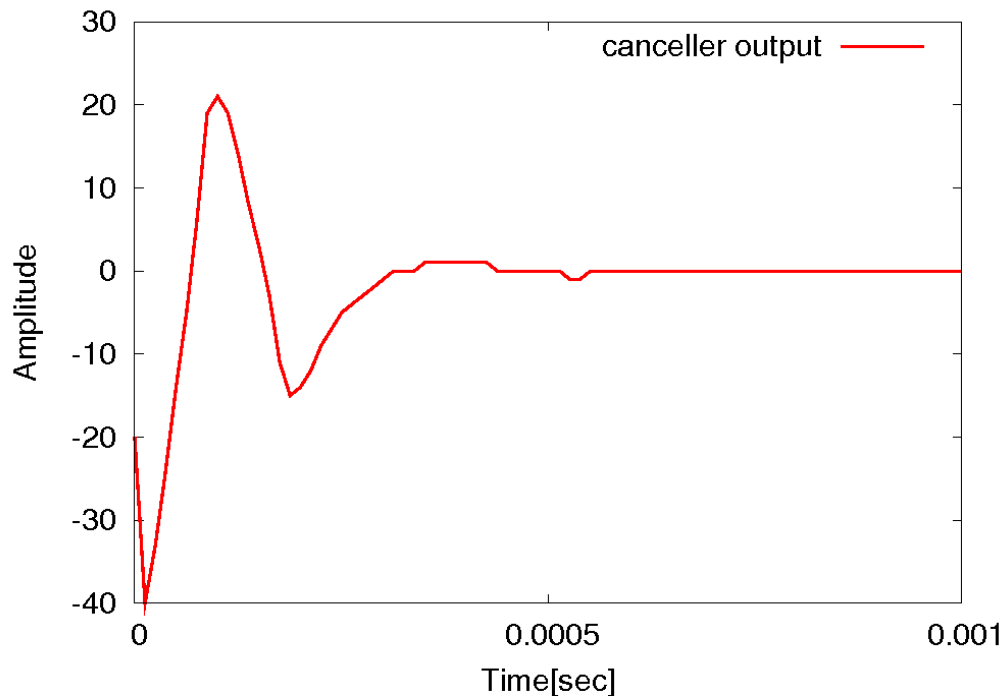


図4.2-2 キャンセル部応答特性

## (2) 位相制御

位相制御の動作検証を行った。図 4.2-3 はレプリカ生成系復調器出力コンスタレーションを示す。赤は入力信号に対して位相誤差のない QPSK のマッピングポイントを示す。これに対して緑は、入力信号に  $30^\circ$  の位相誤差を加えた場合であり、同信号は位相制御により赤の QPSK マッピングポイントに引き込むことが確認できる。

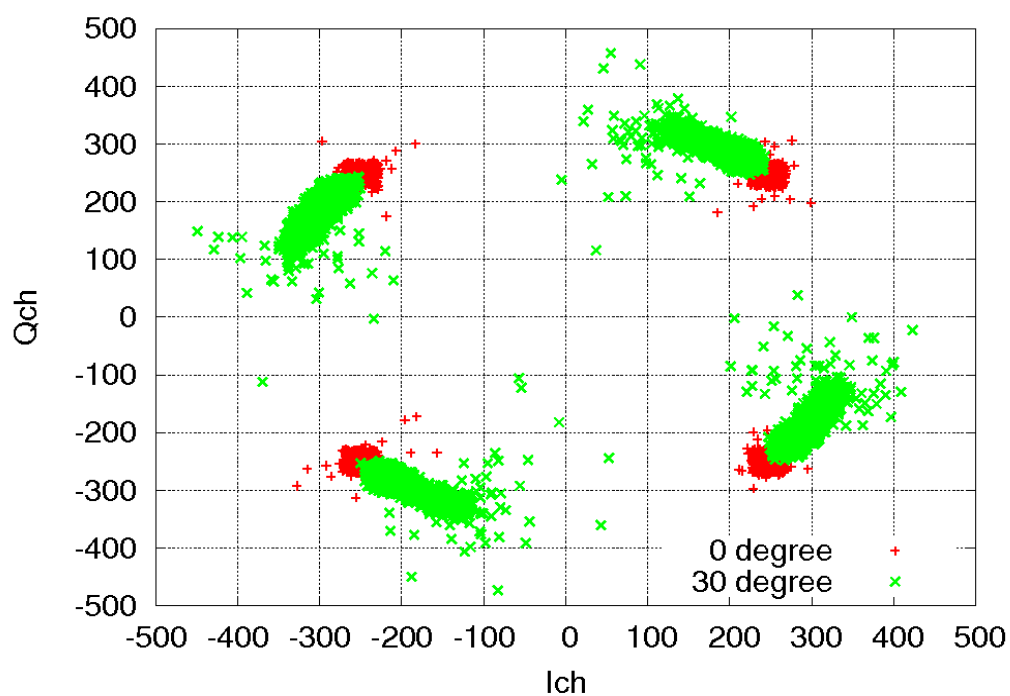


図 4.2-3 レプリカ生成系復調器出力コンスタレーション

(緑＝入力信号に  $30^\circ$  の位相誤差を加えた場合、赤＝位相誤差なし)

### (3) タイミング制御

図4.2-に伝送速度 20Msps の場合についてタイミング制御の動作検証を行い、EMF 入力部における衛星信号（赤）、レプリカ信号(緑)の波形を示す。この結果より両信号は、ほぼ同期がとれタイミング誤差が収束していることが確認できる。伝送速度 5Msps および 10Msps の場合は、20Msps より速度が遅いことから、20Msps での動作確認で十分であると考えられる。

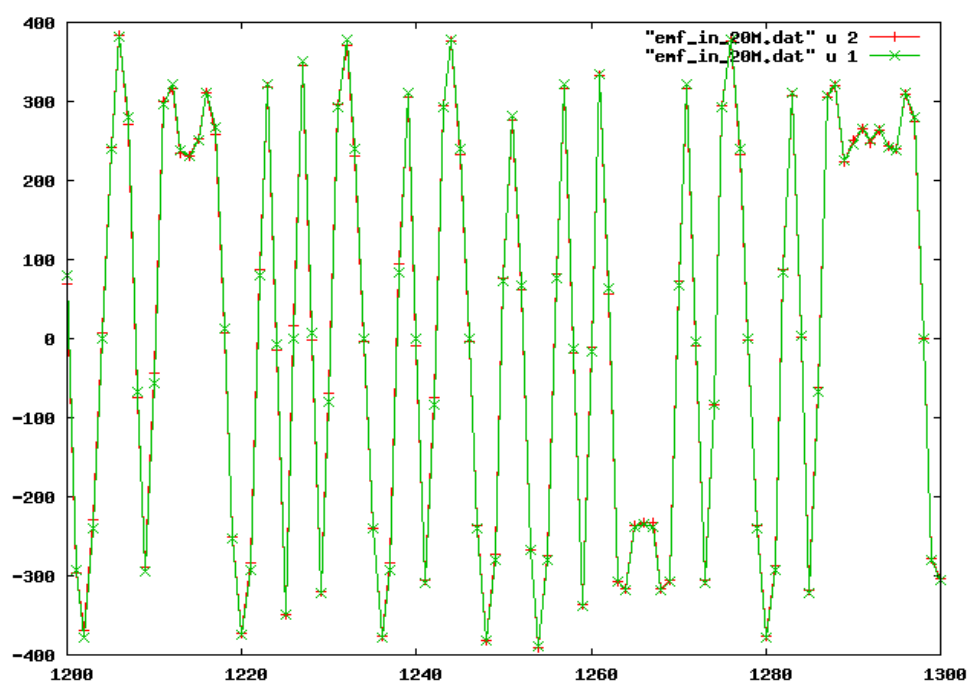


図4.2-4 EMF 入力部において衛星信号、レプリカ信号の波形(20Msps)  
衛星信号（赤）、レプリカ信号(緑)

#### 4.2.3 EMF の出力特性

EMF の出力特性、すなわち衛星からの受信信号と地球局の生成したレプリカ信号との相関特性を示す。図 4.2-5 は伝送速度 20Msps、64 段（タップ）、自局信号（OB 信号）のみの場合の EMF 相関特性を示す。この結果より相関する位置に最大のピーク値出力されていることが確認できる。

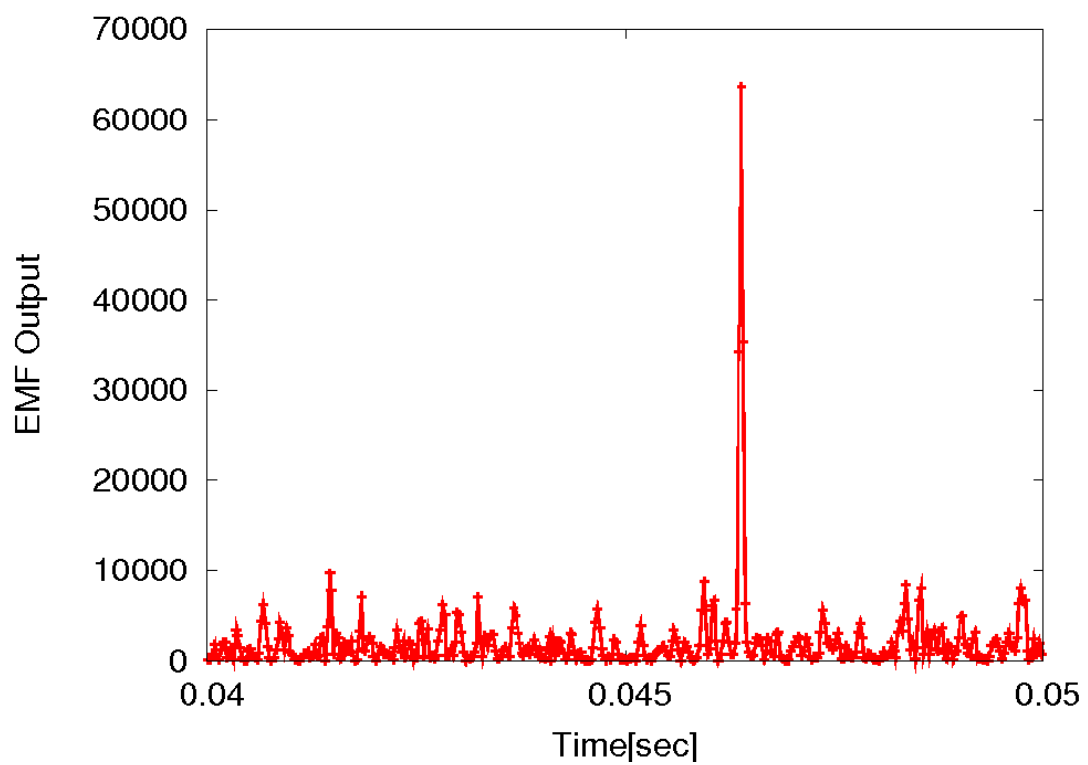


図 4.2-5 EMF 相関特性 (20Msps、64 段、IB なし)

次に自局信号に他局信号を重畳した信号を EMF に入力した場合の出力特性を示す。図 4.2-6 は、伝送速度 20Msps、64 段、他局信号 (IB 信号)ありの場合の EMF 相関特性を示す。自局と他局信号の D/U は 0dB である。この結果より相関する位置に最大のピーク値出力されていることが確認できる。ただし自局のみの場合に比べてピーク値以外の出力も上がっているため、正しいピーク値を検出する最適な閾値の検討が必要である。

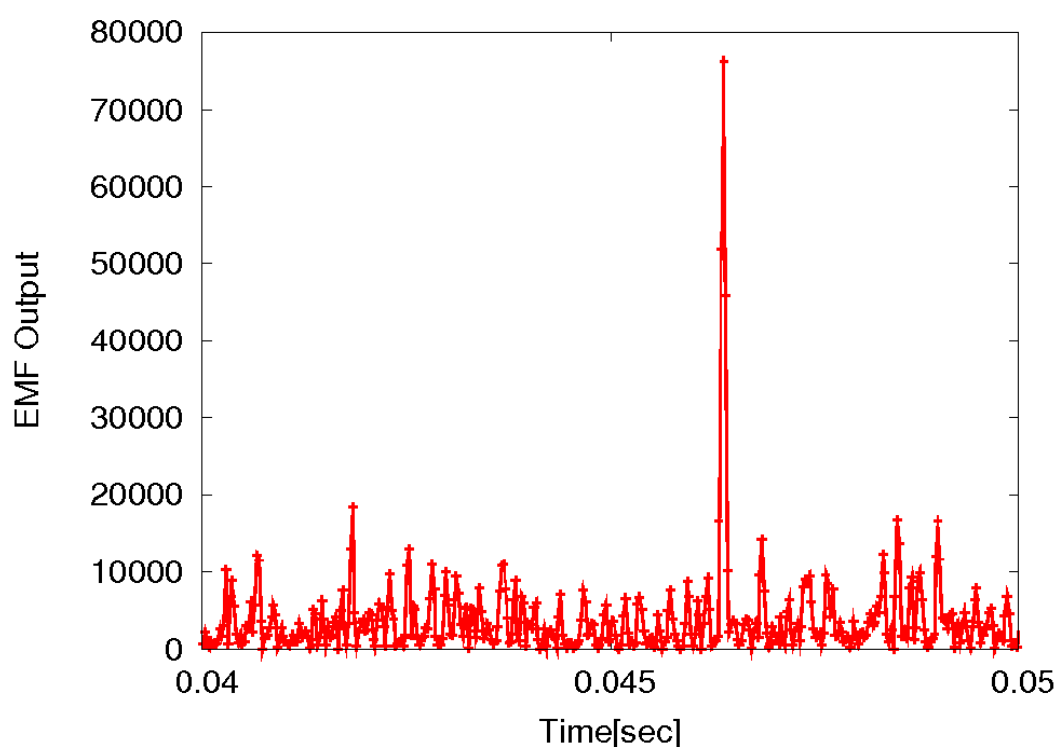


図 4.2-6 EMF 相関特性 (20Msps、64 段、IB あり)



#### 4.2.4 キャンセル部信号波形

キャンセル部の動作検証を行った。図 4.2-7 に伝送速度 5Msps 信号において自局信号 (OB 信号) をキャンセル部へ入力した場合の出力波形とスペクトルを示す。出力波形から、キャンセル後 (緑) に残留誤差が発生していることが確認できる。残留誤差の原因として量子化誤差または演算誤差が考えられる。また、これをスペクトルでみると伝送速度 20Msps の場合は、図 4.2-8 に不要波のキャンセル特性を示す。この結果から、伝送速度 20Msps の場合 40dB 程度、抑圧されていることが確認できる。

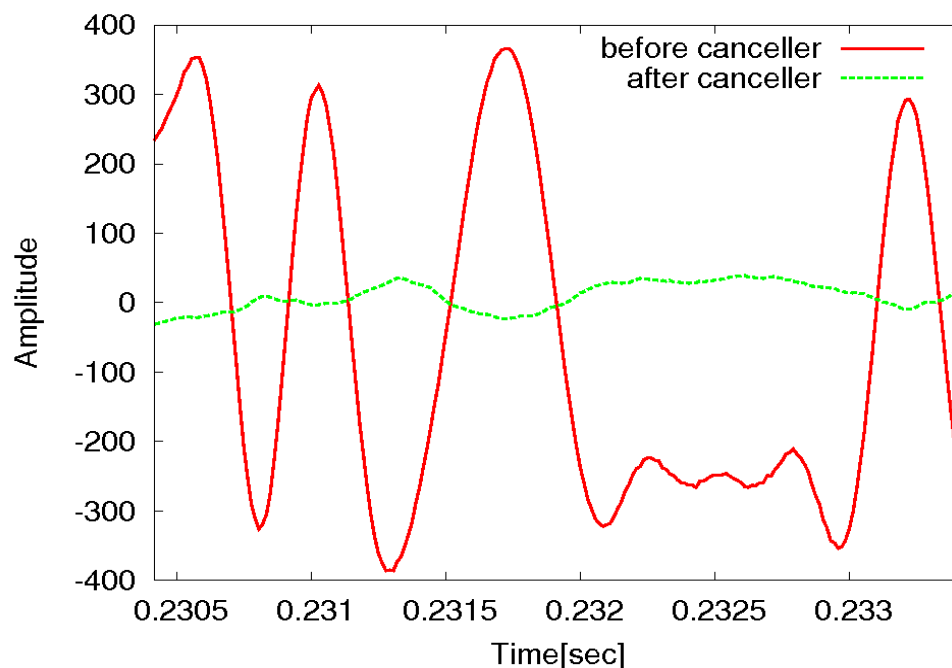


図 4.2-7 キャンセル部の入出力波形 (信号速度: 5Msps)

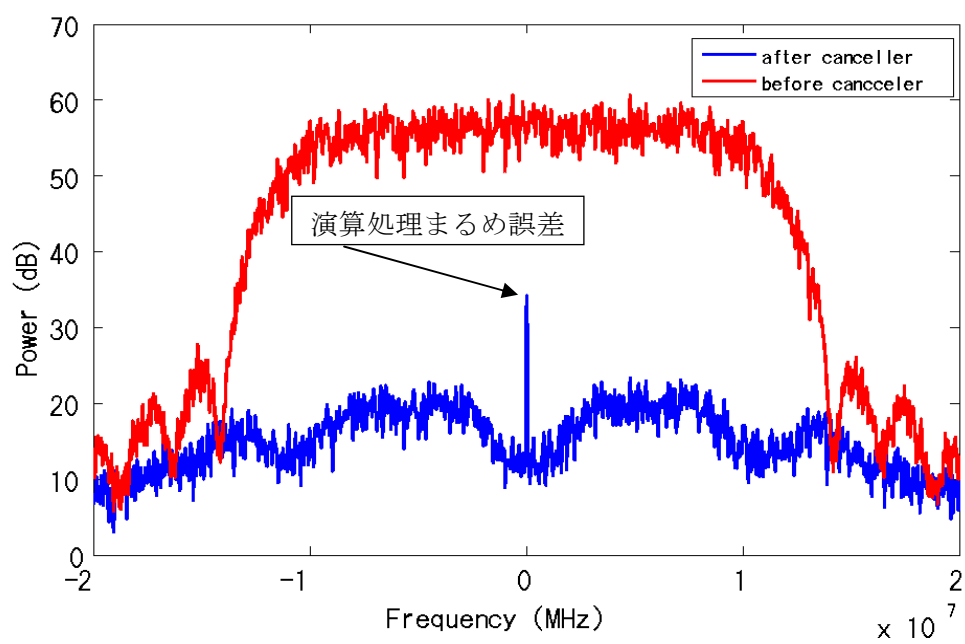


図 4.2-8 不要波のキャンセル特性 (伝送速度: 20Msps)

次に自局信号（OB 信号）に他局信号（IB 信号）を重畳した信号をキャンセル装置に入力した場合のスペクトルを示す。伝送速度 20Msps の場合は、図 4.2-9 にキャンセル特性を示す。この結果から自局信号と他局信号のスペクトルを比較すると各伝送速度において抑圧されていることが確認できる。また、自局と他局信号の電力比がほぼ同いため、キャンセル装置で自局信号がキャンセルされると出力は入力に比べて電力が半分になり 3dB 下がるからと考えられる。

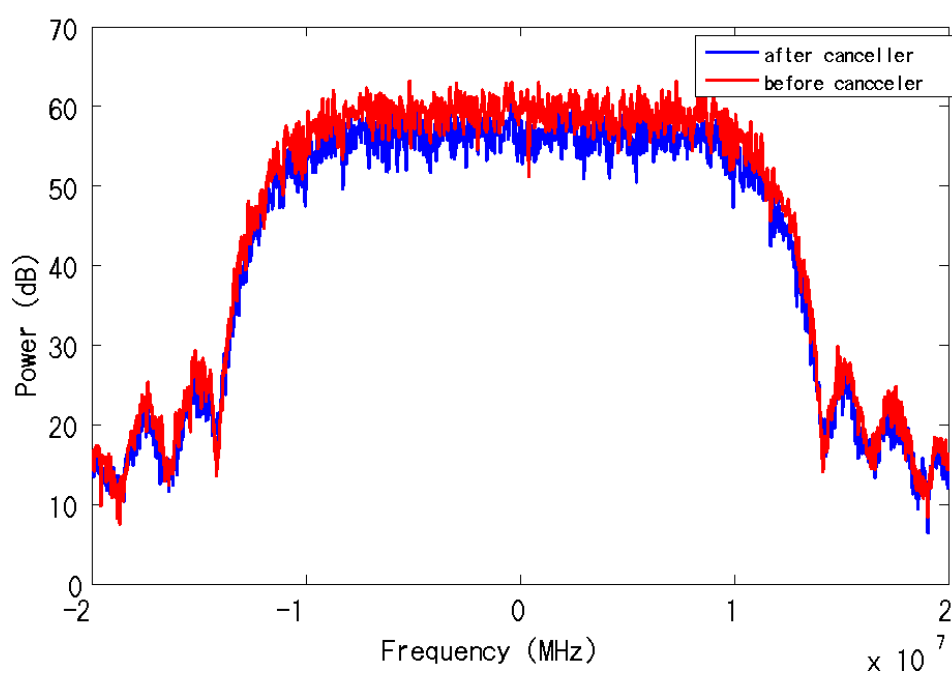


図 4.2-9 キャンセル特性（赤＝OB+IB, 青＝IB）20Msps

#### 4.2.5 C/N 対ビット誤り率特性

遅延検出方式におけるキャンセル後の信号を復調し、信号の C/N に対する誤り率特性を求めた。図 4.2-10 にキャンセル後における IB 信号の符号誤り率特性を示す。各信号の伝送速度において理論値(QPSK 信号の理論上の BER)に比べて、約 1dB 以内の劣化であり、見込みどおり遅延検出方式によって希望信号が取り出せることがわかる。

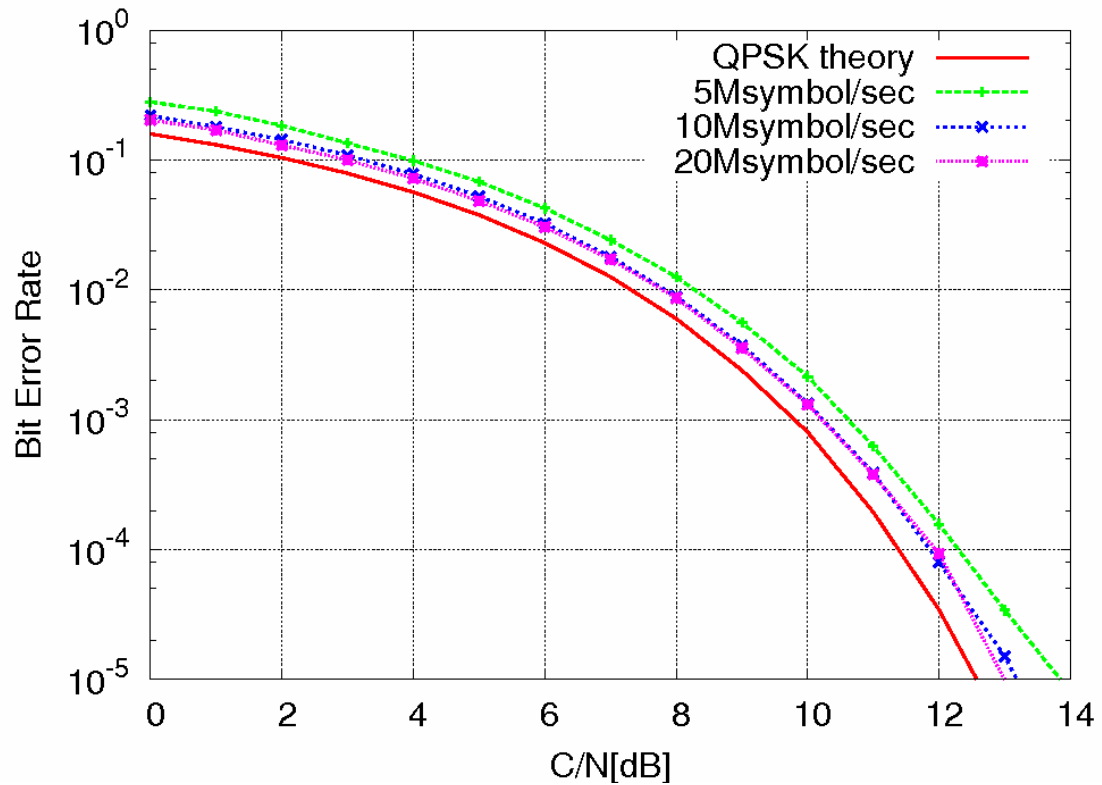


図 4.2-10 キャンセル後における IB 信号の符号誤り率特性

#### 4.2.6 コンピュータシミュレーションによる評価結果

対向回線方式に適用できる遅延検出方式でシミュレーションを行った。QPSK 方式でクロック周波数が 72MHz、伝送信号速度が 5 Msps, 10 Msps および 20 Msps の自局信号に同じ他局信号を重畳させる条件の下、コンピュータシミュレーション（波形作成・解析）により、遅延検出方式の性能を検証した。この結果、信号キャンセル後の信号波形とスペクトルから不要波をキャンセルできることが確認できた。具体的には伝送信号レートが 5Msps の場合 25dB 程度、10Msps の場合 30dB 程度、20Msps の場合 40dB 程度、抑圧されることを確認した。またキャンセル後の信号を復調しビット誤り率（Bit Error Rate : BER）を求めた。各信号レートにおいて理論値に比べて、約 1dB 以内の低下であり、遅延検出方式で希望信号が取り出せることが実証された。（第 6 章参照）

## 4.3 試験システムの構築における機能確認試験

### 4.3.1 遅延検出方式キャンセル装置の概要

対向回線に用いる遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術に関する試験装置（以下、「遅延検出方式キャンセル装置」という）のハードウェアは平成 18 年度に使用した、「不要波復調方式キャンセル装置」と同様の技術をベースとしたものを採用し、一部については遅延検出方式の回路設計を新たに検討し、使用した。装置は、図 4.3-1 のブロック図のように、中心部分となるデジタル処理回路（FPGA：ALTERA 社 EP2S130F1020CS）とその周辺に置かれた A/D・D/A 及び変復調装置等で構成される。一方、心臓部である FPGA の処理プログラムの構成は図 3.3-6 に示されている。

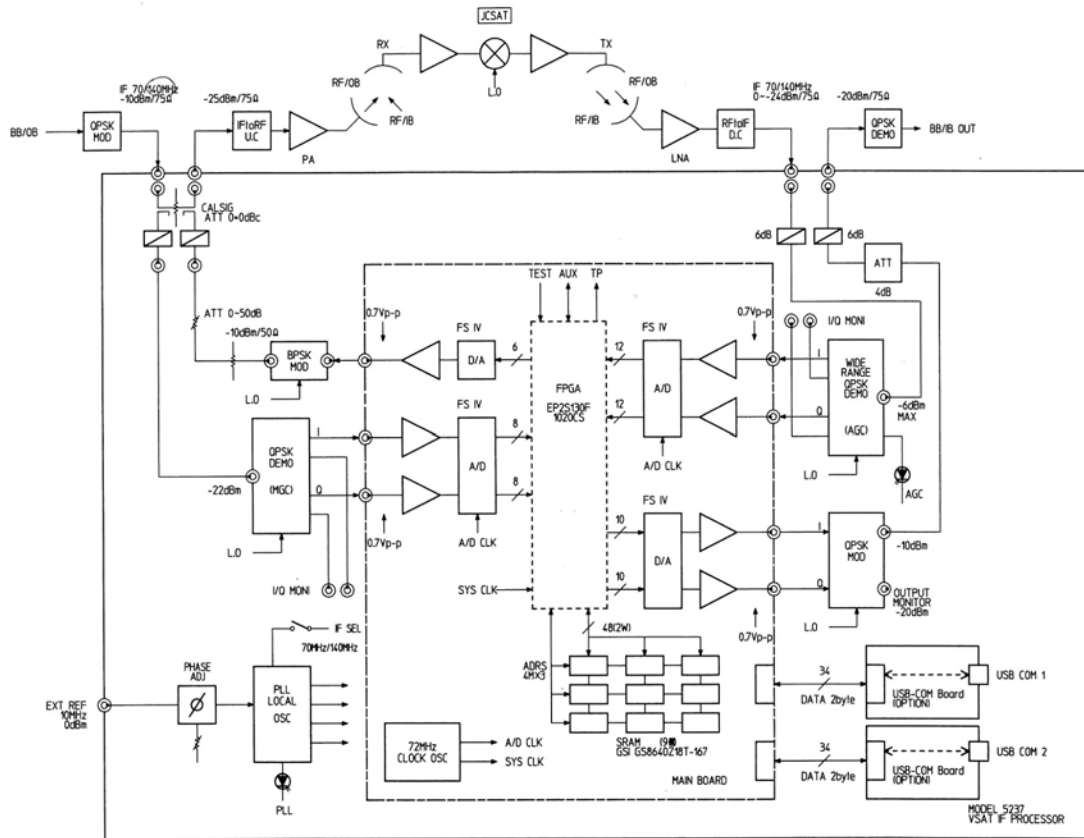


図 4.3-1 不要波キャンセル装置ブロック図

#### (1) EMF（拡張マッチドフィルタ）の FPGA シミュレーションによる検証

遅延検出方式の中心となる、拡張マッチドフィルタ（EMF）を FPGA シミュレーションによって検証した。FPGA シミュレーションとは、VHDL で記述された FPGA 用の処理プログラムを汎用コンピュータの上で動作させることによって、FPGA 動作を詳細にチェックすることを目的としている。実機の FPGA に比べると多量の検証用データを取得することが可能であるが、実行スピードが非常に低下するという欠点がある。

以下に示す検証結果はコンピュータシミュレーションの結果ともよく一致している。

● コンピュータシミュレーション条件

- 受信信号：VSA で生成した 10M シンボルデータ（10 $\mu$ s 遅延）
- レプリカ信号：VSA で生成した 10M シンボルデータ

- (1) 10M シンボルデータをレプリカ信号側と 10 $\mu$ s 遅延させた同一の信号を衛星信号側に入力する。（図 4.3-2 EMF 動作タイミング）
- (2) レプリカ信号側に入力した 10M シンボルデータが DEMAP で位相及びタイミング同期が確立すると Phase ロック信号①、Timing ロック信号②が出力され、EMF に 32 シンボル分のデータがロードされる③と同時に遅延メモリにたくわえられる④。  
（図 4.3-3 EMF 動作タイミング）
- (3) レプリカ信号より 10 $\mu$ s 遅れて衛星受信側信号が EMF に入力されると、先に EMF にロードしたレプリカ側信号と相関演算し最大相関時に EMF マッチ信号①を出力する。この EMF マッチ信号をトリガとしてレプリカ信号③及び受信信号②を同時にメモリから読み出しキャンセル装置から出力される。（図 4.3-4 EMF マッチ後のデータ出力シーケンス）
- (4) キャンセル装置に入力されたレプリカ信号と受信信号は減算器によりキャンセルされ差分データが出力される④。（図 4.3-4 EMF マッチ後のデータ出力シーケンス）

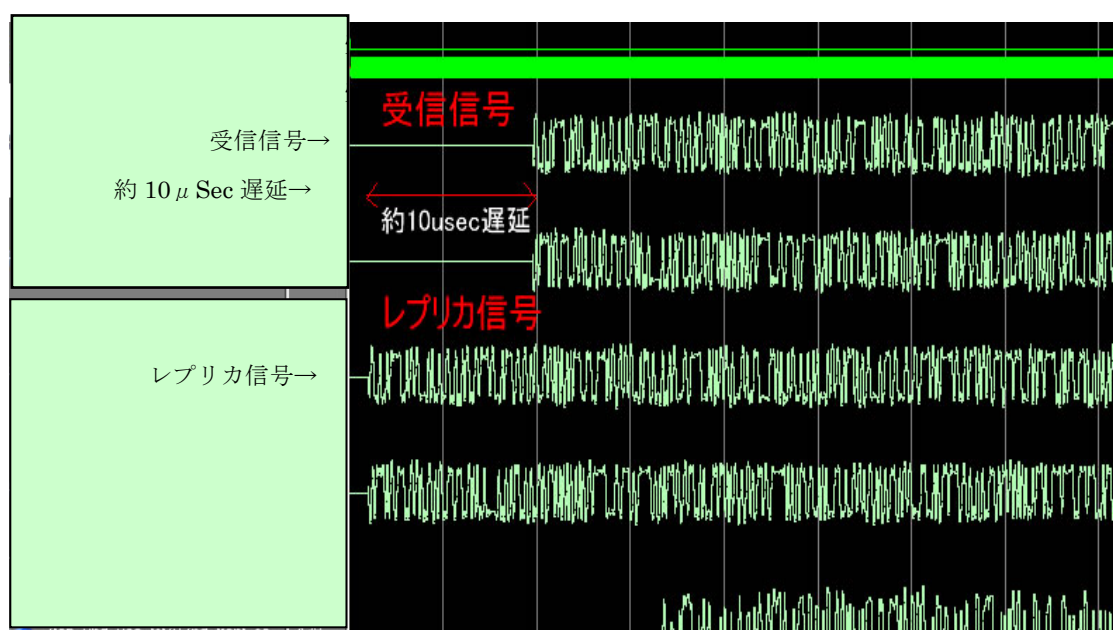


図 4.3-2 EMF 動作タイミング

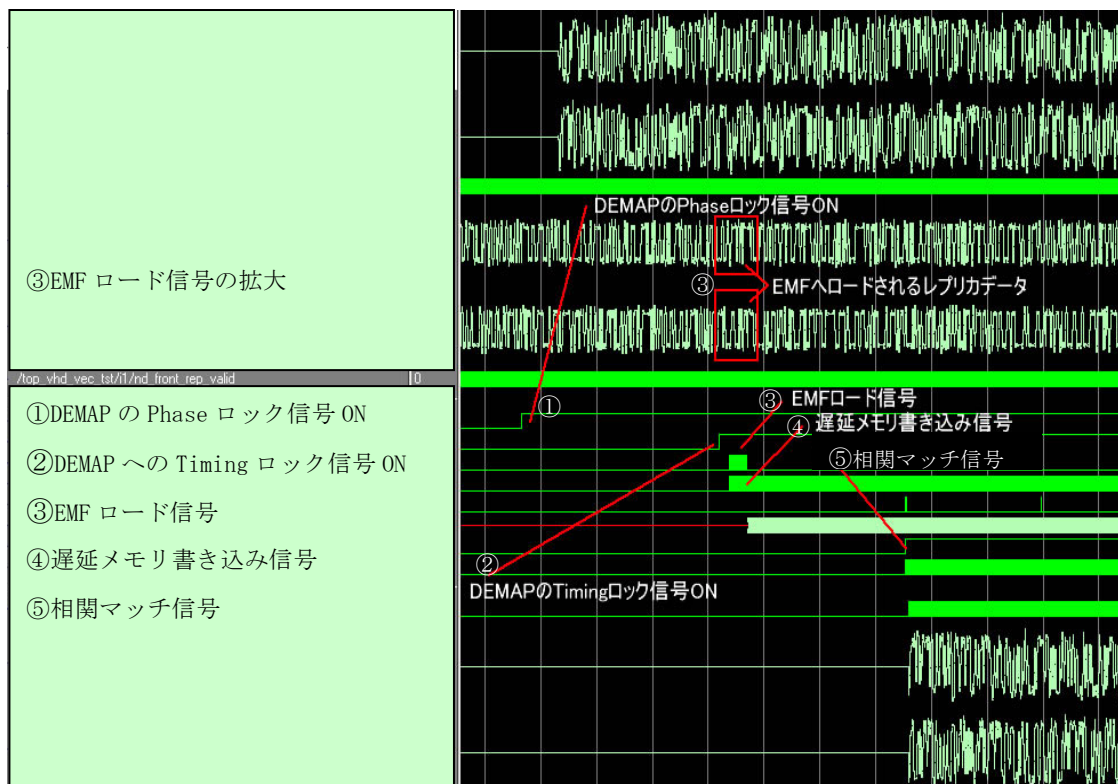


図 4.3-3 EMF 動作タイミング



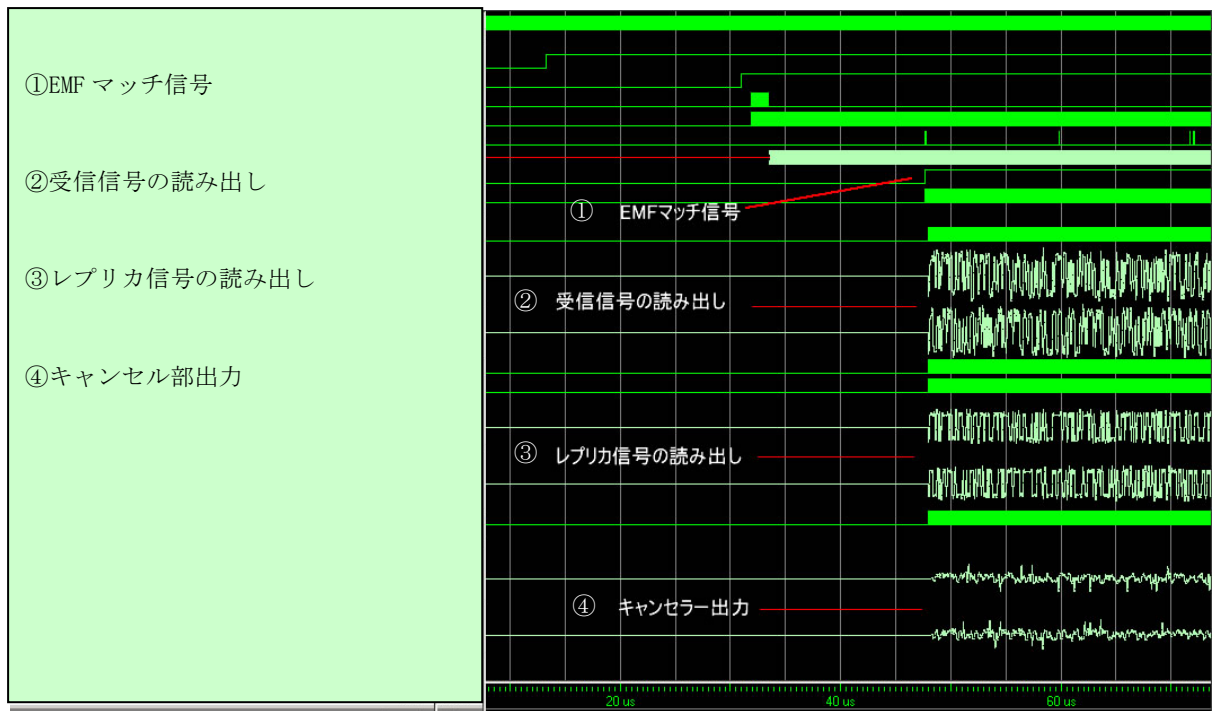


図 4.3-4 EMF マッチ後のデータ出力シーケンス

## (2) EMF の実機による検証

### ● 検証条件

- 受信信号 : VSG による 20M シンボルデータ
- レプリカ信号 : VSG による 20M シンボルデータ

図 4.3-5 に EMF 検証ブロック図を、またに動作検証データを図 4.3-6 示す。EMF の動作検証データは下記に示した通りである。レプリカ信号がロック後、約 1msec 遅れた SAT 側受信信号が EMF に入力されマッチ検出を確認した。

EMF検証ブロック図

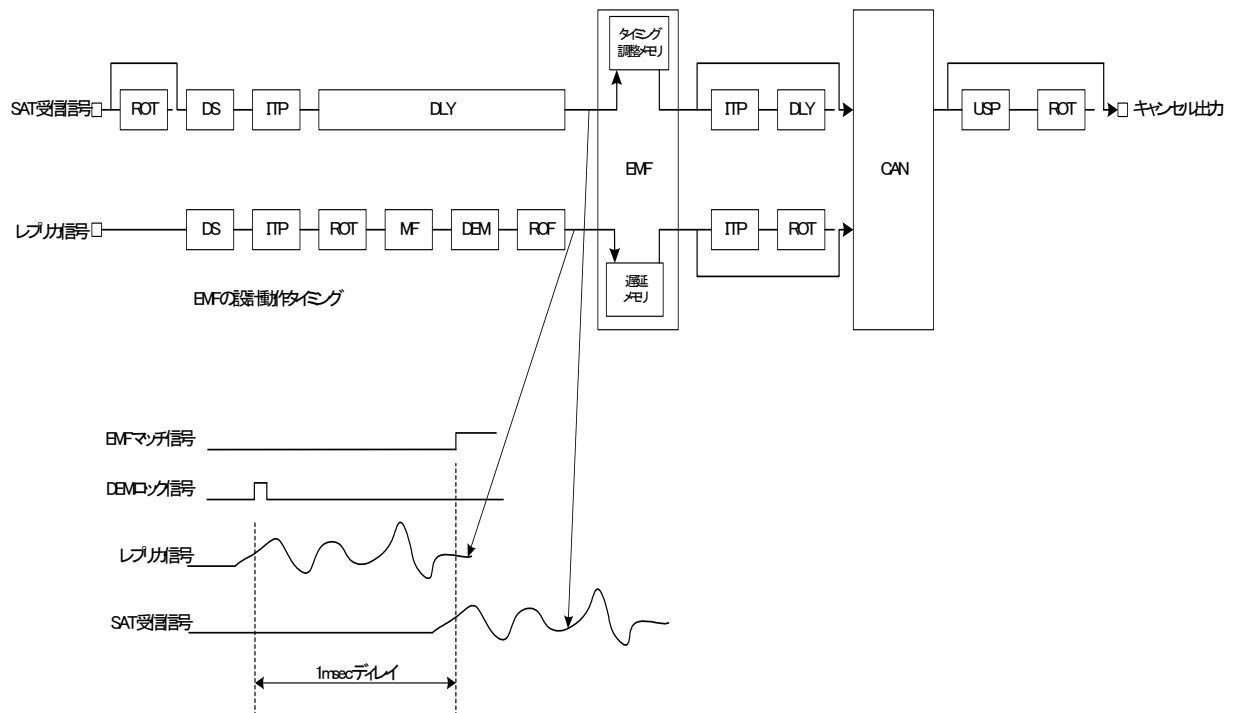
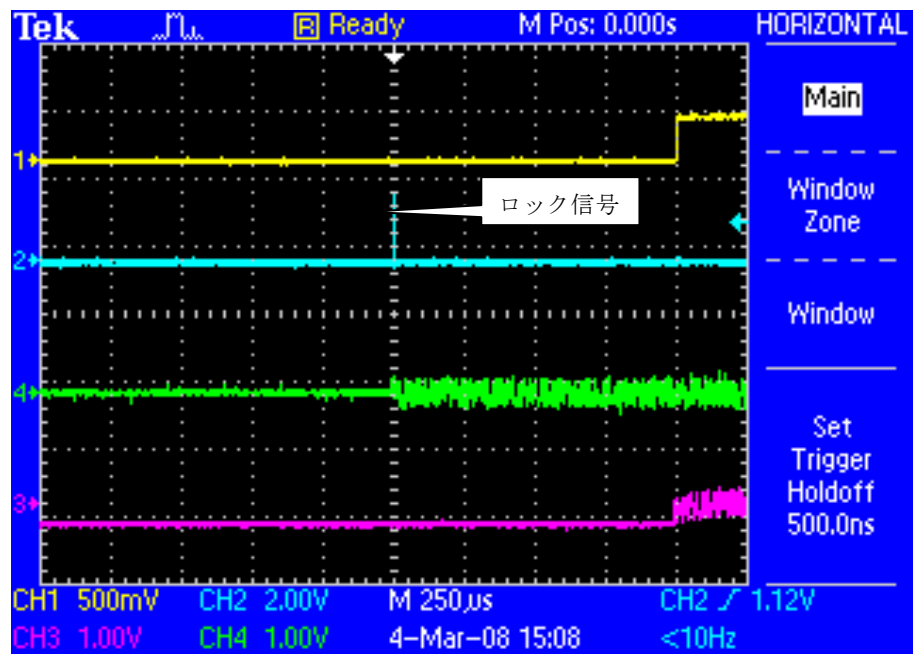


図 4.3-5 EMF 検証ブロック図

桃色の SAT 受信信号を入力後、黄色のマッチ信号検出が HI レベルに遷移した。その後信号がキャンセルされていることをスペアナで確認した。



測定データ

- (黄色) …マッチ検出信号 (HI レベルでマッチ検出状態を示す)
- (青色) …ロック信号 (HI パルス)
- (緑色) …レプリカ信号
- (桃色) …SAT 側受信信号

図 4.3-6 EMF の動作

#### 4.3.2 試験システムの構築

実環境でフィールド試験を行うための準備として、遅延検出方式キャンセル装置、信号変復調装置等を用い、室内折り返し装置等による遅延検出方式の伝送信号重畳・キャンセル技術の基礎的な確認試験を行った。室内機能確認試験に際しては、IF 信号の折り返しによる機能確認試験が、外部からの影響を受けにくく、キャンセル装置の機能確認に適していると考えられることから、本件の試験では、IF 信号の折り返しによる機能確認試験を実施した。なお、伝送路における非直線性の試験では、衛星の増幅器（TWTA）の特性の影響が大きいことから、Ku 帯および C 帯による機能試験も実施している。

図 4.3-7 に、遅延検出方式簡易型室内折り返し試験系統図（IF 信号）を示す。図の左側から、IB 信号および OB 信号を不要波キャンセル装置に入力し、右側から出力し、その結果を測定する。図 4.3-8 には Ku 帯及び C 帯の送受信系を使った室内折り返し試験系統図を示す。図の左側から、信号発生器(SG)の信号により A 局側を IB 信号とし、B 局側を OB 信号として、不要波キャンセル装置に入力し、図の右側に出力し、その結果を測定する。なお、遅延検出方式キャンセル装置の FPGA の処理プログラムは、C++で作成されたコンピュータシミュレーションのソースコードから VHDL による記述に変換され、作成された。

測定場所は、JSAT 横浜衛星管制センターであり、測定器は、スペクトラムアナライザ 4440A、4407B、ベクトル信号発生器 E4438C、BER 測定器 MP1762 を使用した。測定時期は、平成 20 年 1 月から 3 月までである。

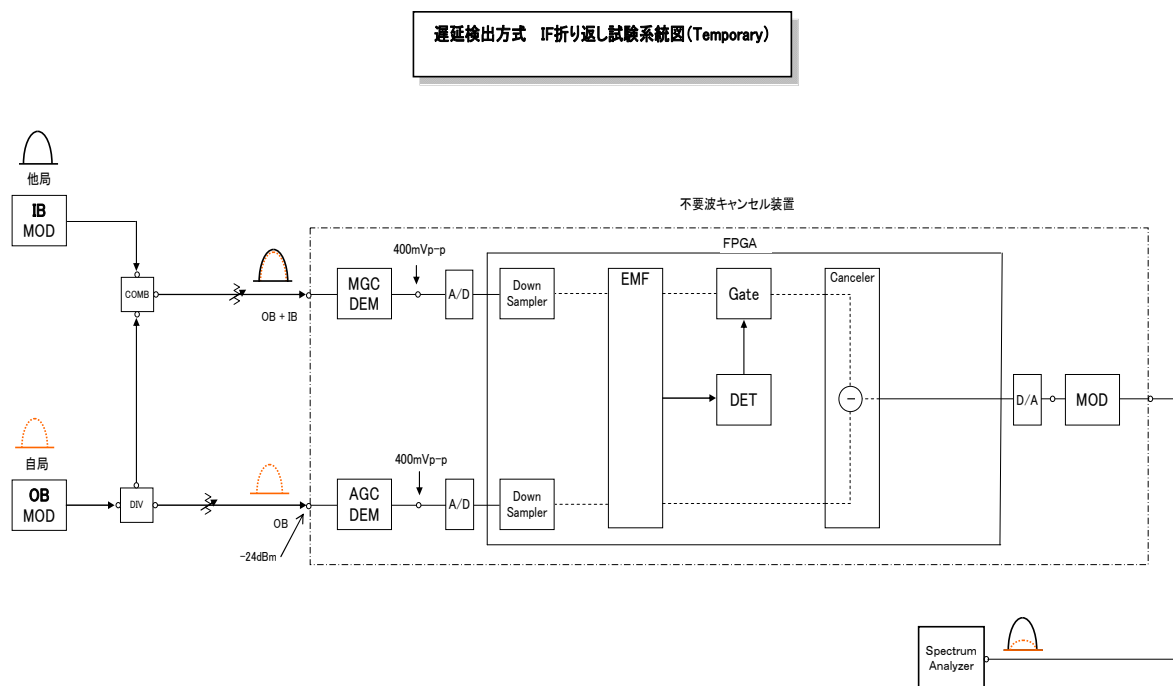


図 4.3-7 遅延検出方式簡易型室内折り返し試験系統図

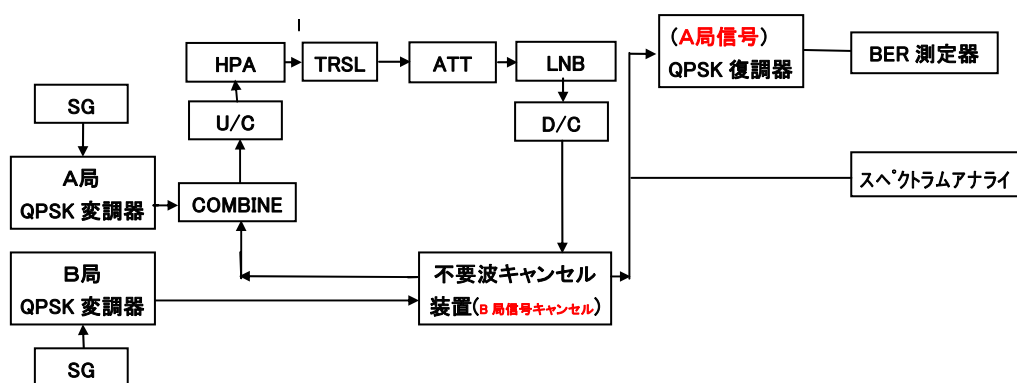


図 4.3-8 Ku 帯及び C 帯室内折り返し試験系統図

#### 4.3.3 周波数安定度試験

表 4.3－1 にキャンセル装置出力の周波数安定度を示す。周波数は IF（140 MHz）を中心とする。本装置は、表 4.3－1 に示すように、十分な周波数安定度を持っている。

表 4.3-1 IF 信号の周波数安定度

| 時刻   | 周波数(MHz)   | 偏差(Hz) |
|------|------------|--------|
| 0:00 | 140.000650 | 0      |
| 0:10 | 140.000650 | 0      |
| 0:20 | 140.000650 | 0      |
| 0:30 | 140.000650 | 0      |
| 0:40 | 140.000650 | 0      |
| 0:50 | 140.000650 | 0      |

#### 4.3.4 占有周波数帯幅試験

電波法の規定では、衛星通信における占有周波数帯幅の規定値は、次の通りである<sup>1</sup>。

$$\text{占有周波数帯幅} = 2 \times K \times \text{ビットレート}$$

係数  $K$  は装置の周波数特性で決まり、本試験装置は、ロールオフフィルタ 0.35 を使用しているため、 $K$  の値は 0.585 である。

試験装置送信機の占有周波数帯幅をスペクトルアナライザにより、測定した。図 4.3-9、図 4.3-10、図 4.3-11 に結果を示す。それぞれの占有周波数帯幅は、以上の電波法に基づく規定値以内であることを確認した。

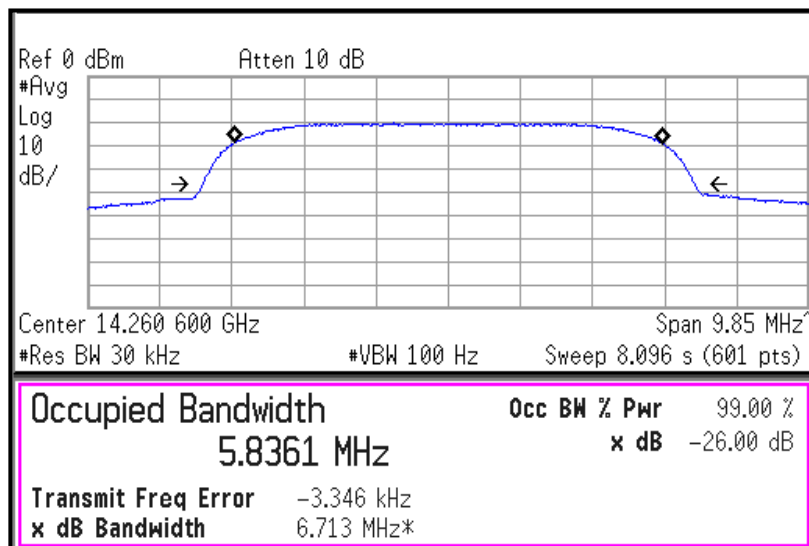


図 4.3-9 試験装置送信機（電波型式 G7W ビットレート 6.01Mbps）

（図は、周波数 14.2606MHz において、占有周波数帯幅 5.8361MHz を示す。横目盛りは、0985MHz であり、縦目盛りは、10dB である。分解能(ResBW)は、30kHz であり、表示の性能を示すビデオ帯域幅(VBW)は、100kHz である。）

<sup>1</sup>「電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号) 別紙 2 第 3 衛星関係 1 システム別審査要領 (1) 通信衛星を用いて固定衛星業務(放送衛星業務を合せて行う場合を含む)を行う無線局 エ技術審査 (オ) 占有周波数帯幅の許容値 PSK 及び QAM 方式」

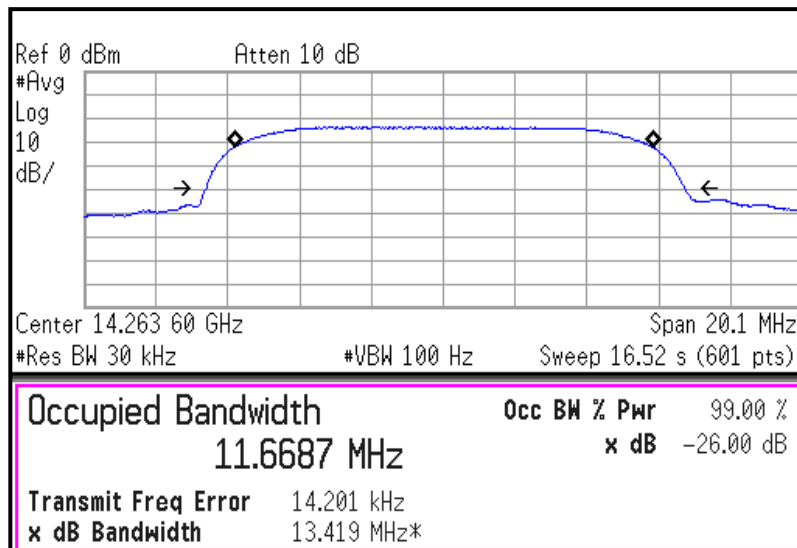


図 4.3-10 試験装置送信機（電波型式 G7W ビットレート 12.1Mbps）

（図は、周波数 14.2636MHz において、占有周波数帯幅 11.6687MHz を示す。横目盛りは、2.01MHz であり、縦目盛りは、10dB である。分解能(ResBW)は、30kHz であり、表示の性能を示すビデオ帯域幅(VBW)は、100kHz である。）

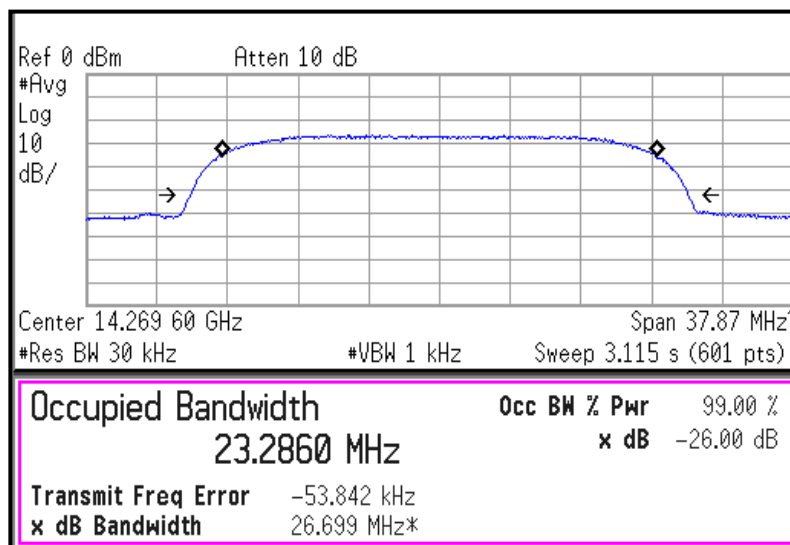


図 4.3-11 試験装置送信機（電波型式 G7W ビットレート 24.1Mbps）

（図は、周波数 14.2696MHz において、占有周波数帯幅 23.286MHz を示す。横目盛りは、3.787MHz であり、縦目盛りは、10dB である。分解能(ResBW)は、30kHz であり、表示の性能を示すビデオ帯域幅(VBW)は、100kHz である。）



#### 4.3.5 スプリアス試験

電波法の規定では基本周波数の平均電力より 60 dB 低い値がスプリアスの許容値となっている。Ku 帯および C 帯のスプリアスを測定し、それぞれ図 4.3-12 および図 4.3-13 にスプリアス示す。これらの試験結果より、電波法に基づく規定値以内<sup>2</sup>であることを確認した。

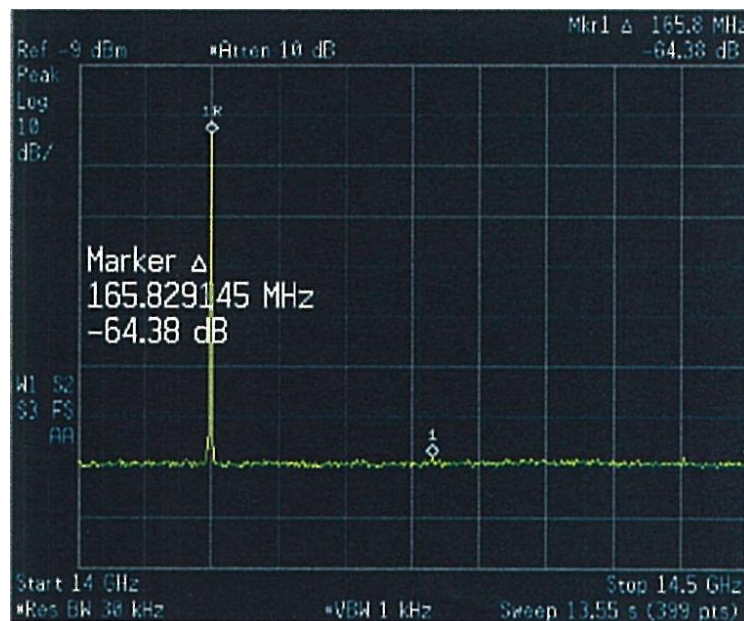


図 4.3-12 Ku 帯スプリアス

<sup>2</sup>「宇宙無線通信を行う無線局（インマルサット船舶地球局、インマルサット携帯移動地球局及び航空機地球局（1,626.2MHz を越え 1,660.5MHz 以下の周波数の電波を使用するものに限る）を除く。）の送信設備のスプリアス発射又は不要発射の強度の許容値」総務省告示第 1228 号（無線設備規則別表第 3 号の 4 2）平成 17 年 10 月 21 日

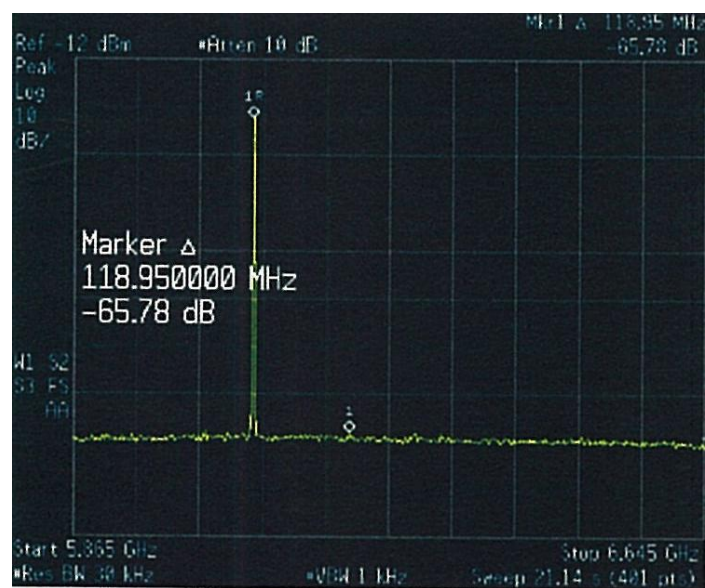


図 4.3-13 C 帯スプリアス

#### 4. 3. 6 コンスタレーション試験

図4.3-14にOB信号を20 Mspsとして、IB信号20 Mspsの場合の遅延検出方式キャンセル装置の出力信号のコンスタレーションを示す。観測されたコンスタレーションは、IB信号について良好なQPSKの特徴を示し、IB信号の復調が可能であることを示している。

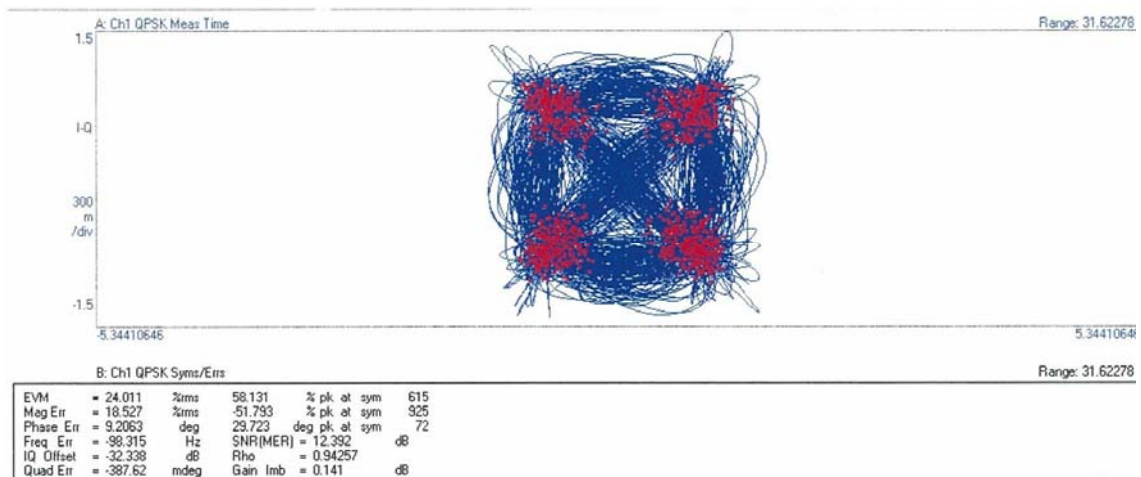


図4.3-14 遅延検出方式キャンセル装置によるコンスタレーション  
(OB : 20 Msps、IB : 20 Msps)

#### 4.3.6 C/N 対ビット誤り率試験

図4.3-15はOB信号及びIB信号が共に20 Mspsの場合のC/Nに対するビット誤り率(BER)特性を示す。BERが $10^{-2}$ 時のC/NはMODEM単体及びQPSK理論値と比べると、約2dB程度の低下に収まり、実用的な値となっている。なお、CDM550MOD単体によるC/N対BER特性は、室内折り返しを含まないキャンセル装置によるC/N対BER特性であり、この値は、予測どおり、C/N対BER特性の理論値とほぼ同等となることが確認された。

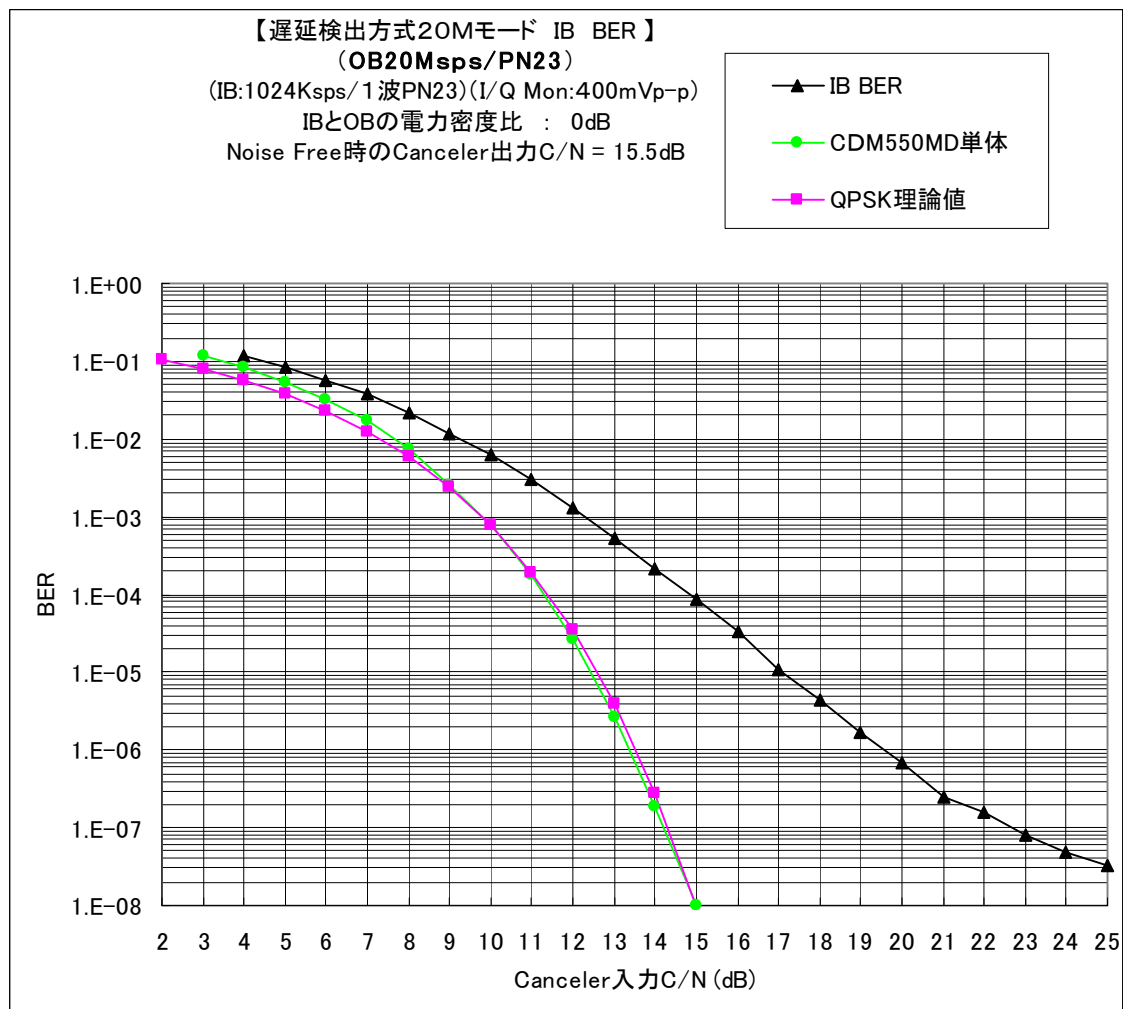


図4.3-15 OB/IB : 20 Msps 時の C/N 対 BER 特性 (IB)

#### 4.3.7 キャンセル信号抑圧量試験

図4.3-16に伝送速度 20Msps において自局信号（OB 信号）のみを遅延検出方式キャンセル装置へ入力した場合の不要波（OB 信号）のキャンセル特性を示す。図に示すように、20Msps の場合、18 dB 程度抑圧されていることが確認できる。シミュレーション結果値とはほぼ一致する。なお、中央付近の鋭いピークは回路内の信号リークに起因するもので、抑圧量としては無視できる。

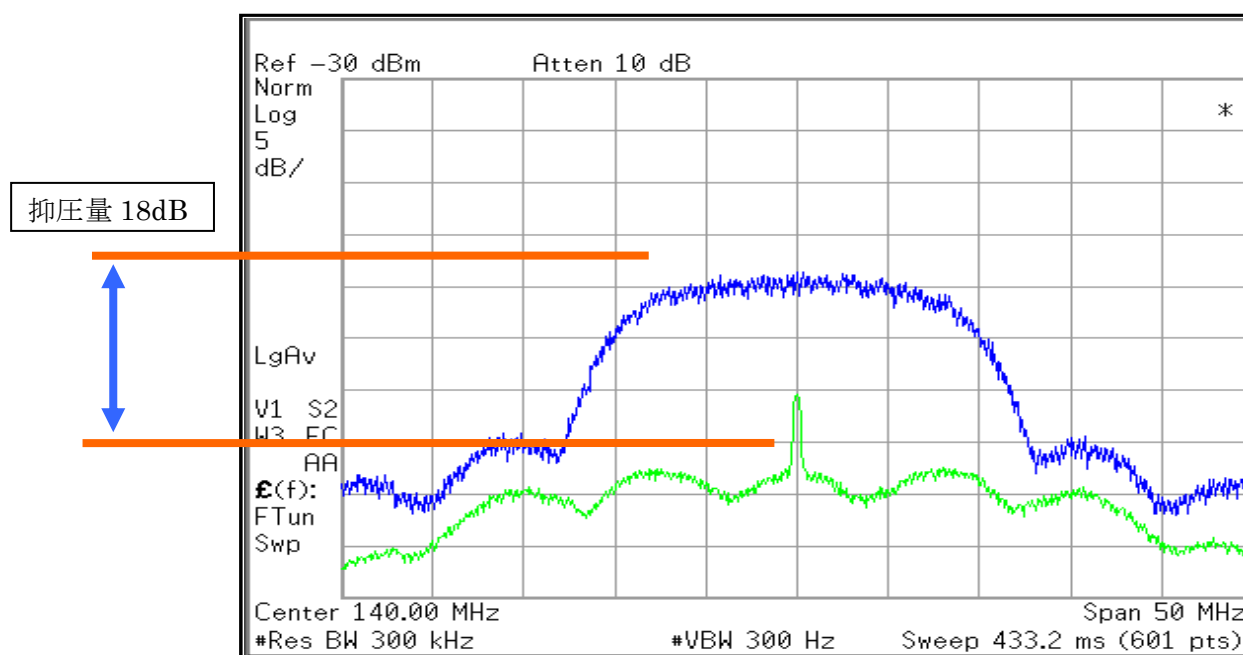


図4.3-16 不要波のキャンセル特性（伝送速度：20Msps）

青色：キャンセル前    緑色：キャンセル後

中心周波数のスペクトラムは Local Leak

次に自局信号（OB 信号）に他局信号（IB 信号）を重ねた信号をキャンセル装置に入力した場合のスペクトルを示す。OB と IB の電力密度比は 0 dB、伝送速度 20Msps は、図 4.3-17 にキャンセル特性を示す。この結果から自局信号と他局信号のスペクトルを比較すると各伝送速度において 3dB 程度、下がっていることがわかる。これは自局と他局の送信電力比がほぼ同いため、キャンセル装置で自局信号がキャンセルされると出力は入力に比べて電力が半分になり 3dB 下がるからと考えら、予測どおりの結果である。

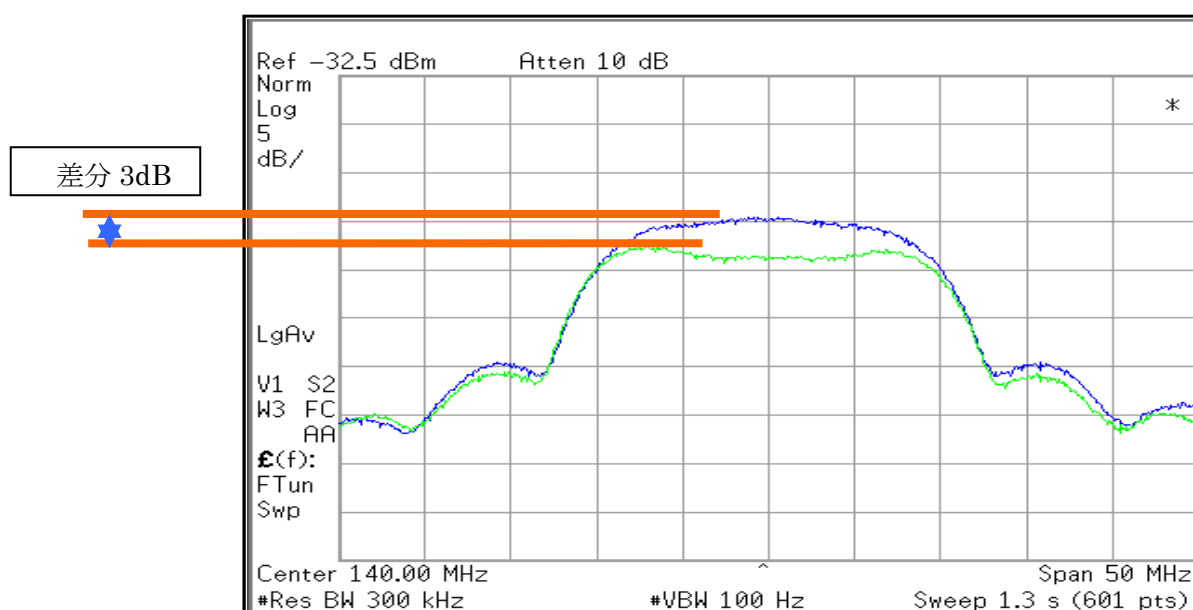


図 4.3-17 不要波のキャンセル特性（伝送速度：20Msps）

青色：キャンセル前（OB+IB 信号） 緑色：キャンセル後

#### 4.3.8 隣接キャリアの影響下における伝送特性試験

衛星通信回線では複数のチャンネルが存在して各々キャリアが存在する。本試験では、シンボルレートの周波数に相当する 1.4 倍離れた周波数に隣接キャリアを入力して測定を行い、所望キャリアに与える影響を確認する事を目的とした。20Msps の場合、 $20\text{M} \times 1.4 = 28\text{MHz}$  離れた位置に隣接キャリアを送出している。図 4.3-18 は、IF 信号室内折り返し時に、IB 信号及び OB 信号が 20 Msps で、隣接キャリアとして 28 MHz はなれたところに 5 Msps の信号を送出した場合の遅延検出方式キャリア装置による C/N に対する BER 特性を示す。この C/N 対 BER 特性は、前節で示した隣接キャリアが無い場合の C/N 対 BER 特性と比較すると特性の低下が見られ隣接キャリアの影響が認められる。

なお、4.3.6 項で見られたとおり、MODEM 単体での C/N 対 BER 特性は、理論値とほぼ同等であるから、隣接キャリア 5Msps の影響における IB 信号/OB 信号 20Msps での C/N 対 BER 特性は、理論値から  $\text{BER}=10^{-2}$  で C/N が、約 4dB 程度低下していることが確認された。これは、通常必要とされる C/N が理論から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性である。

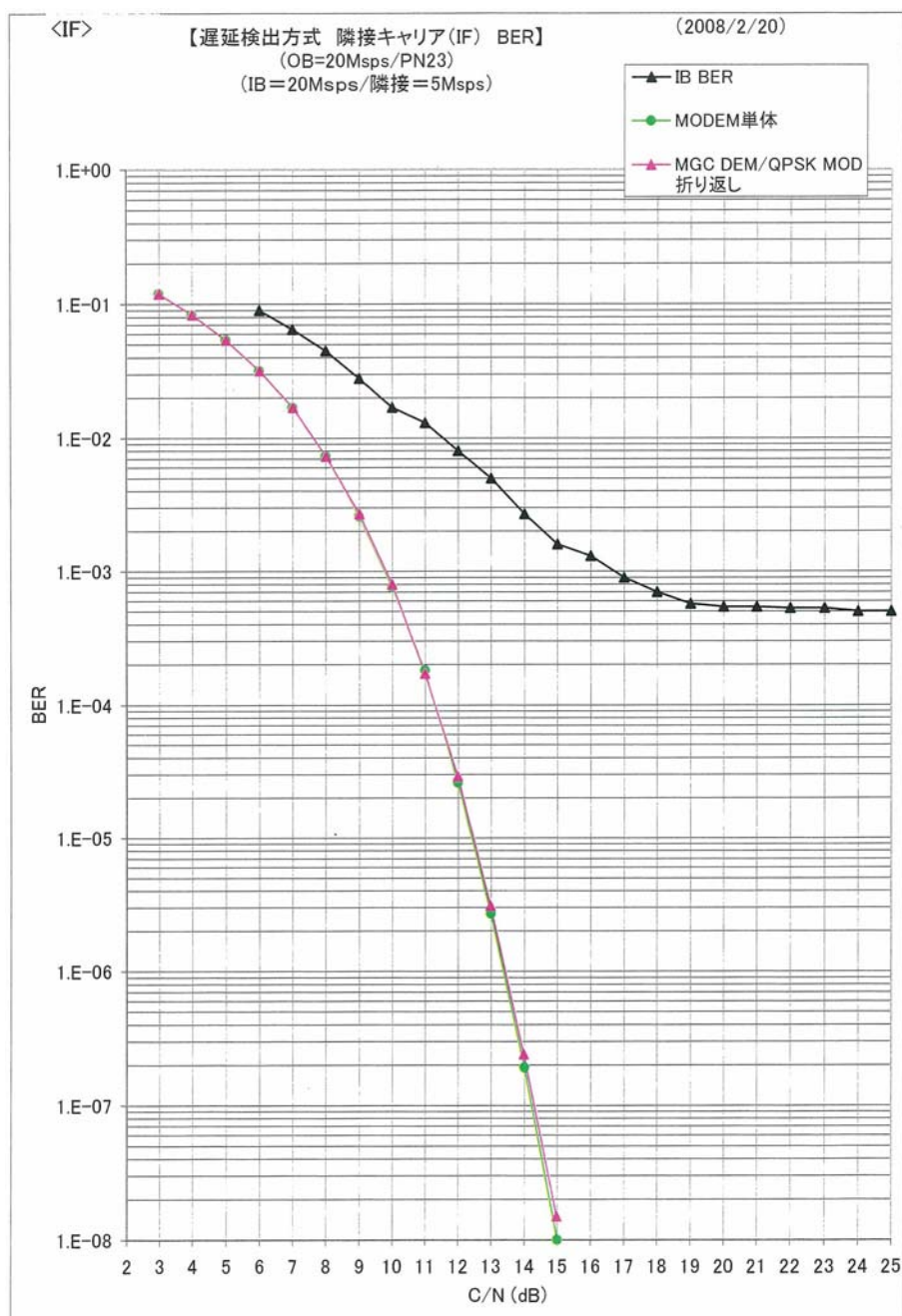


図 4.3-18 IF 信号室内折り返し時の隣接キャリア特性  
 (IB/OB : 20 Msps、隣接キャリア : 5 Msps)



#### 4.3.9 伝送路による非直線性に対する試験

衛星通信回線においては、伝送信号は衛星搭載の送信機（多くは TWTA）のひずみ特性（非線形性）の影響を受ける。そのために、伝送信号のレベルを適切に保つことが必要である。遅延検出方式キャンセル装置の C/N 対 BER 特性が伝送路の非直線性によって受ける影響の程度を、伝送信号レベルを伝送路の最大伝送レベルに対して、3 dB、6 dB 及び 10 dB 低い出力バックオフ(OBO)の場合について C/N 対 BER 特性としてデータを取得した。試験には Ku 帯及び C 帯の室内折り返し装置を用いた。

図 4.3-19 および図 4.3-20 にそれぞれ Ku 帯および C 帯での試験結果を示す。両試験とも IB 信号と OB 信号は共に 20 Msps である。衛星通信回線で通常使用される範囲の OBO である 6dB 及び 10 dB では、BER=10<sup>-2</sup>において、Ku 帯では、OBO が 6dB で 2dB 程度の低下及び OBO が 10dB では、ほぼ同等となっているが、C 帯では、OBO が 6dB 及び 10dB とともに、6dB 程度の低下となっている。一方で、通常は利用されない高出力レベルである OBO が 3 dB のケースでは、Ku 帯および C 帯ともに伝送系の強い非直線性の影響を受けている。このように、適切なレベルが保たれた伝送路であればキャンセル技術が適用できることがわかる。

なお、4.3.6 項で見られたとおり、MODEM 単体での C/N 対 BER 特性は、理論値とほぼ同等であるから、OBO が 10dB では、IB 信号/OB 信号 20Msps での C/N 対 BER 特性は、理論値から BER=10<sup>-2</sup>で C/N が、Ku 帯では約 2dB 程度低下していることが確認された。これは、通常必要とされる C/N が理論から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性である。

また、C 帯は、Ku 帯より、大気減衰（Ku 帯で、約-3×10<sup>-2</sup>dB/km, C 帯で、約-6×10<sup>-3</sup>dB/km）など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、Ku 帯で有効であれば問題はな

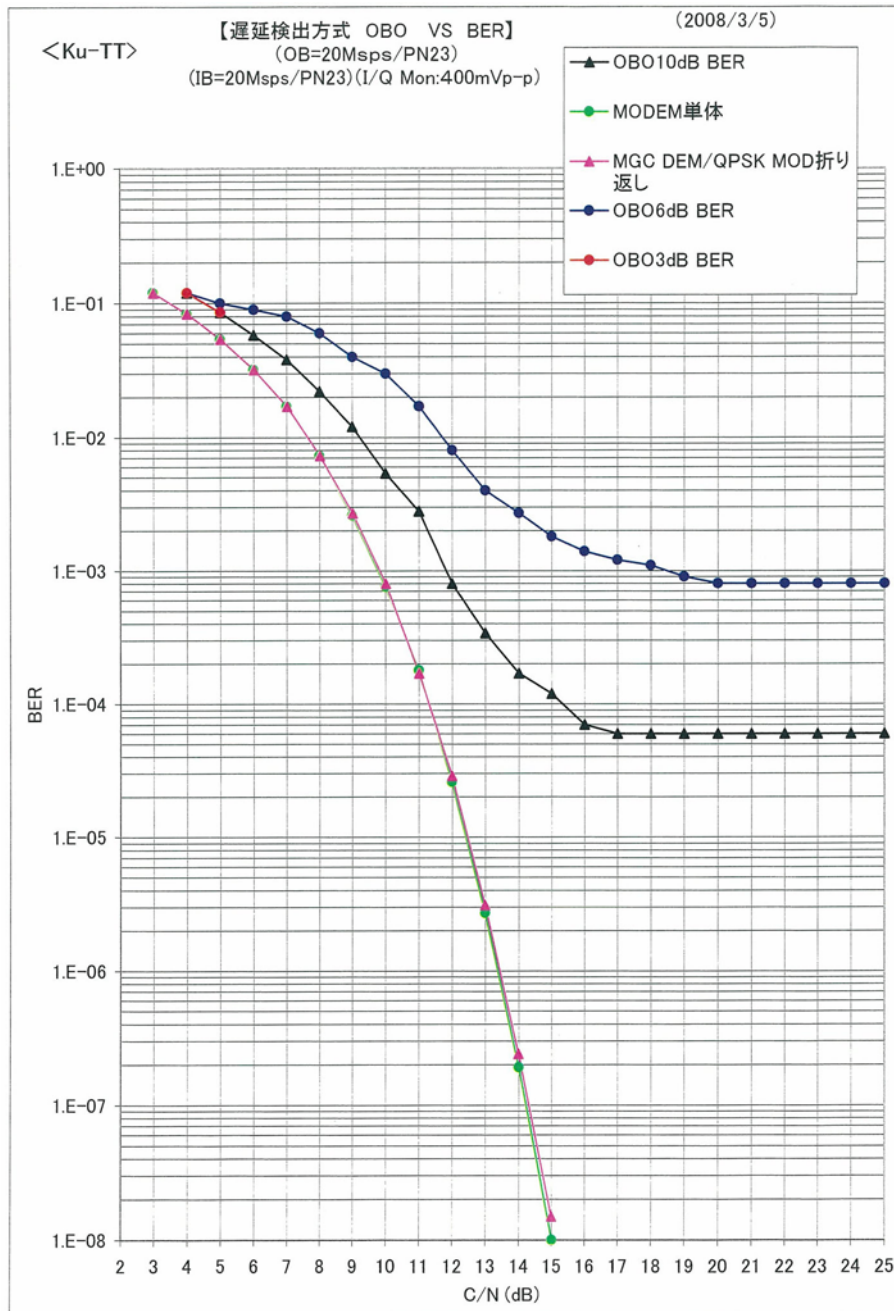


図 4.3-19 伝送路の非直線性における Ku 帯室内折り返し時の C/N 対 BER 特性  
(OBO : 3 dB、6 dB 及び 10 dB 、IB/OB : 20 Msps)

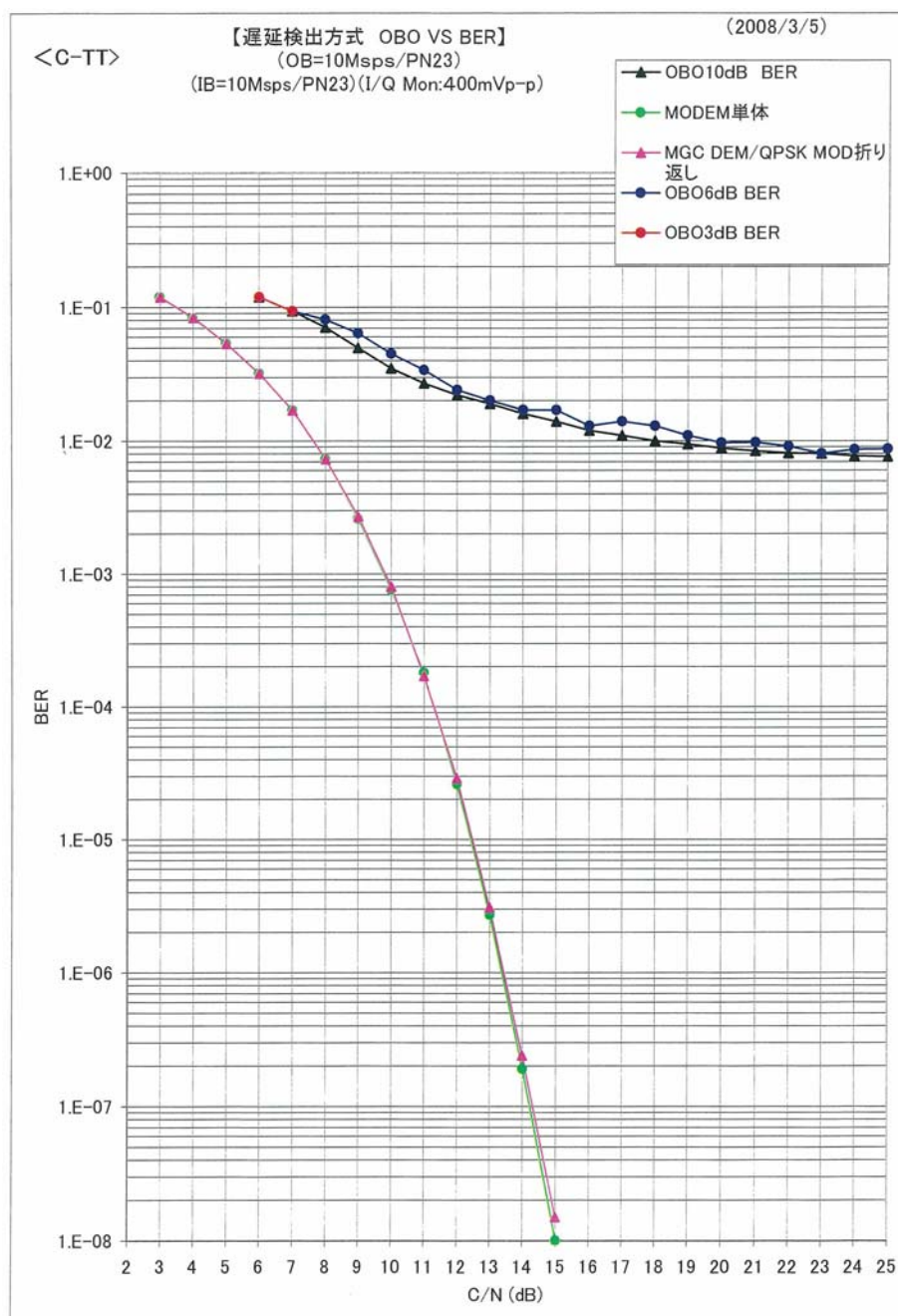


図 4.3-20 伝送路の非直線性における C 帯室内折り返し時の C/N 対 BER 特性  
(OBO : 3 dB、6 dB 及び 10 dB 、IB/OB : 20 Msps)

## 4.4 衛星システムにおける電波伝送試験

### 4.4.1 試験システムの構築

試験システムでは、OB 信号と IB 信号に対応する地球局に遅延検出方式キャンセル装置を挿入し、それぞれが自局の希望する信号のみを抽出し、復号する。図 4.4-1 に本検討で実施した Ku 帯及び C 帯の衛星伝送回線によるキャンセル装置試験の系統図を示す。図では、右側の A 局からの IB 信号が衛星を介して、左側の B 局で、B 局自身が送信した OB 信号とともに受信する。B 局では、受信信号を不要波キャンセル装置により、復調し、出力を測定する。

測定場所は、JSAT 横浜衛星管制センターであり、測定器は、スペクトラムアナライザ 4440A、4407B、ベクトル信号発生器 E4438C、BER 測定器 MP1762 を使用した。測定時期は、平成 20 年 2 月から 3 月までである。

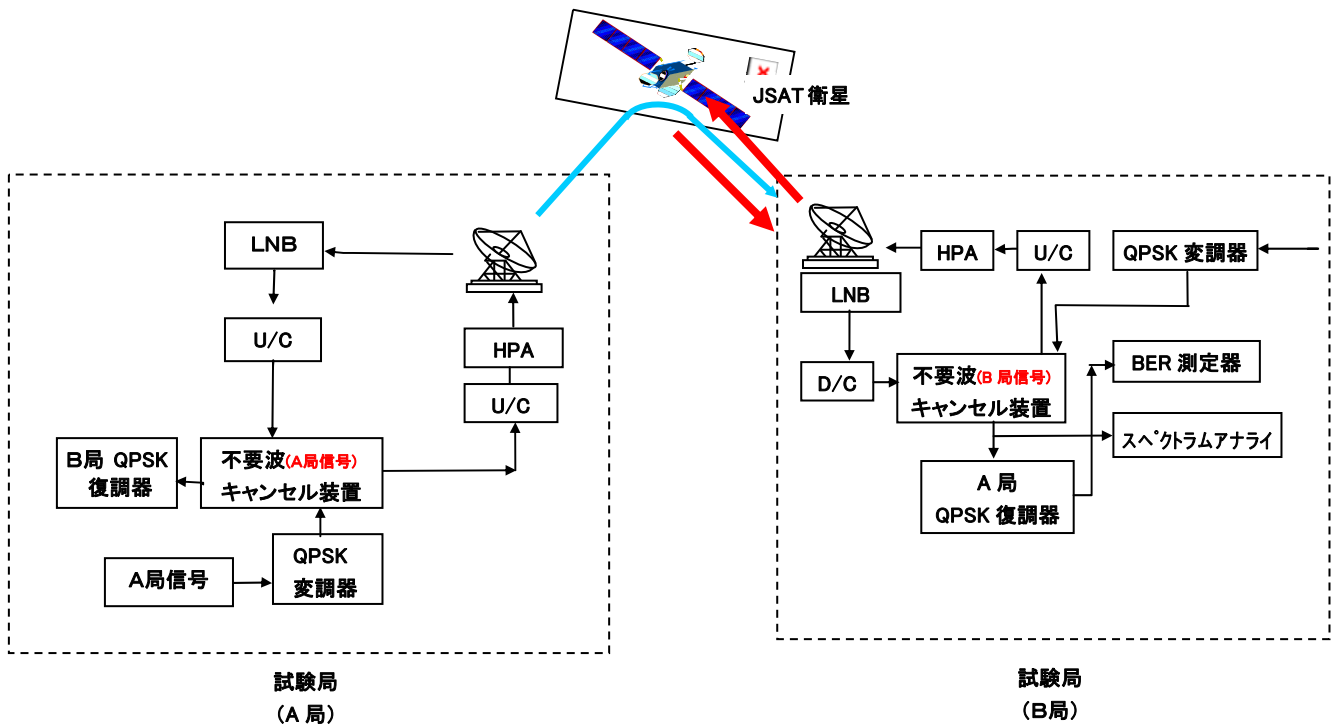


図 4.4-1 Ku 帯及び C 帯衛星伝送回線による遅延検出方式キャンセル装置試験系統図

#### 4.4.2 C/N 対ビット誤り率試験

図 4.4-2 および図 4.4-3 に Ku 帯および C 帯における衛星通信回線利用時の遅延検出方式キャンセル装置の C/N に対する BER 特性を示す。IB 信号と OB 信号は共に 20 Msps である。BER=10<sup>-2</sup>における室内機能確認試験での C/N は、4.3.6 項で示したとおり 9dB 程度であり、Ku 帯の衛星回線による C/N は、12dB 程度であり、約 3dB の低下である。C 帯では若干の低下があるもののキャンセル動作の確認はできている。

また、4.3.6 項で見られたとおり、MODEM 単体での C/N 対 BER 特性は、理論値とほぼ同等であるから、Ku 帯衛星通信回線利用時の遅延検出方式キャンセル装置の C/N に対する BER 特性は、理論値から BER=10<sup>-2</sup>で C/N が、約 4 dB 程度低下していることが確認された。これは、通常必要とされる C/N が理論値から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性である。

また、C 帯は、Ku 帯より、大気減衰 (Ku 帯で、約-3×10<sup>-2</sup>dB /km, C 帯で、約-6×10<sup>-3</sup>dB /km) など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、Ku 帯で有効であれば問題はないと考えられる。

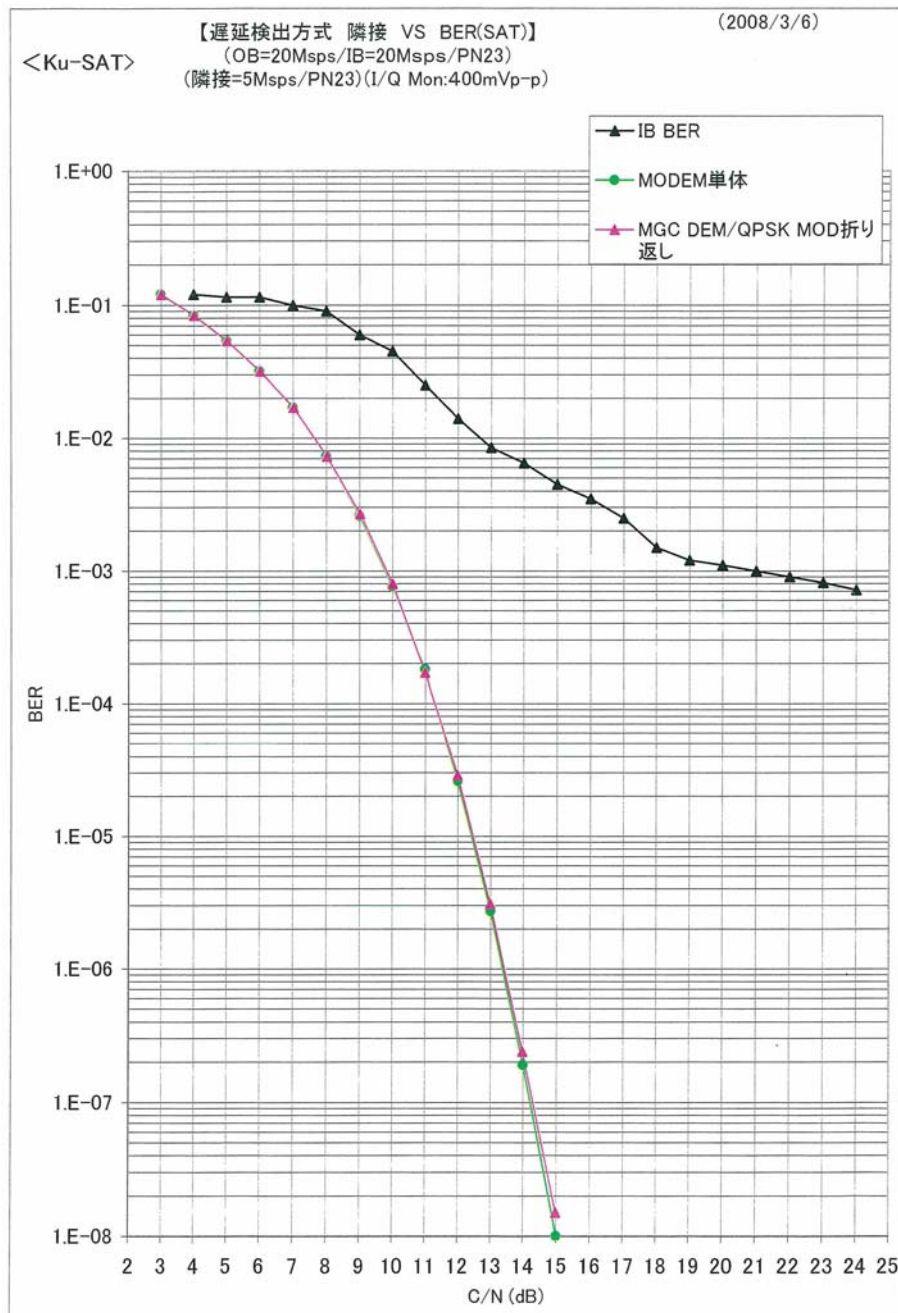


図 4.4-2 Ku 帯衛星通信回線における C/N 対 BER 特性 (IB/OB : 20 Msps)

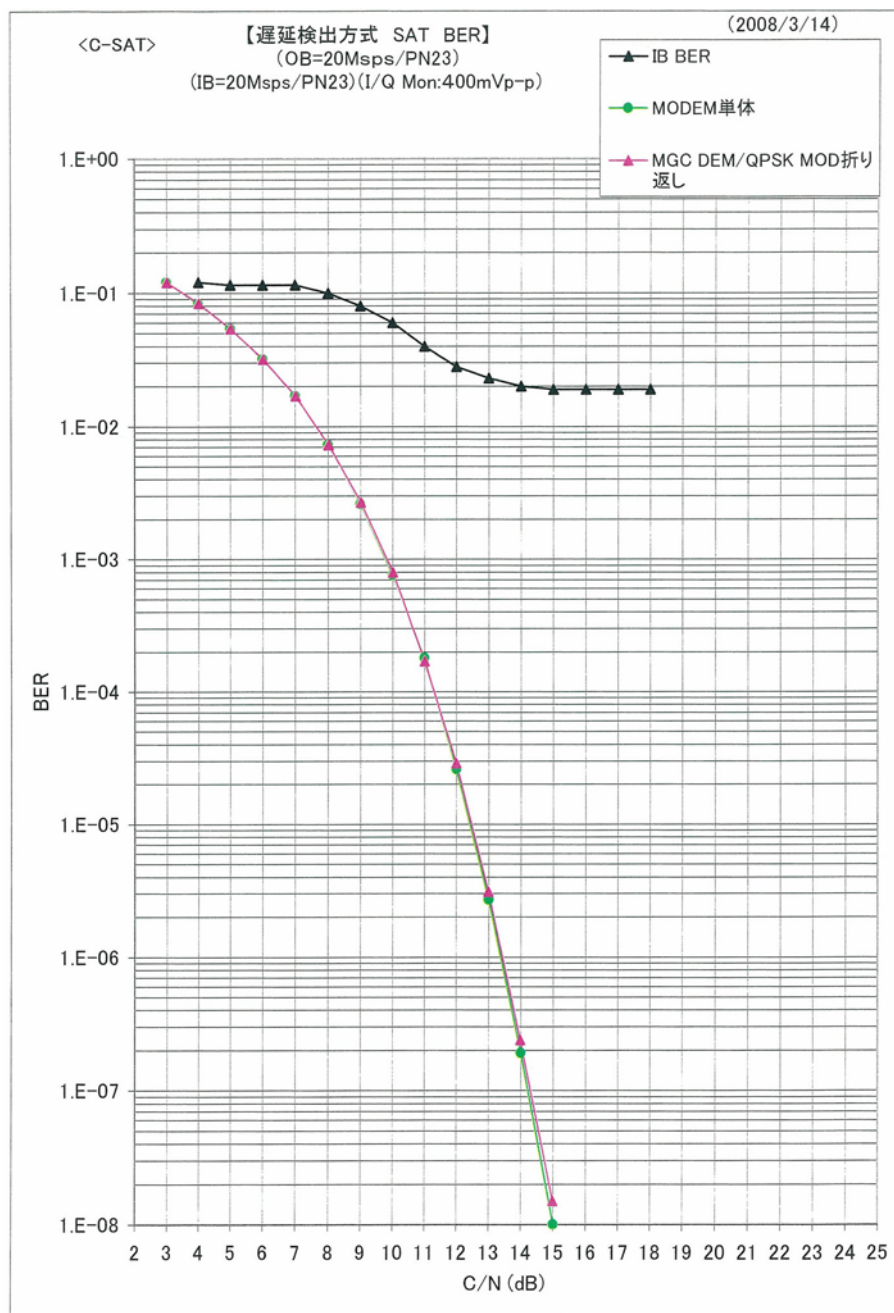


図 4.4-3 C 帯衛星通信回線における C/N 対 BER 特性 (IB/OB : 20 Msps)



#### 4.4.3 キャンセル信号抑圧量試験

図4.4-4および図4.4-5は、それぞれ Ku 帯および C 帯の衛星回線を用いた場合の遅延検出方式キャンセル装置のキャンセル信号抑圧波形を 20 Msps について示す。図ではキャンセル信号抑圧量を示すために、OB 信号のみを用いて実験を行った。この結果、衛星回線を用いた場合でも遅延検出方式キャンセル装置は、伝送信号のキャンセル信号抑圧量が 6dB 程度であることが確認できた。また、キャンセル信号抑圧量は、室内機能確認試験での値より低下しており、実際の衛星通信回線を用いて試験したことから、回線品質の影響を受けていることがわかる。なお、キャンセル信号抑圧量は数 dB あれば十分と考えられる。

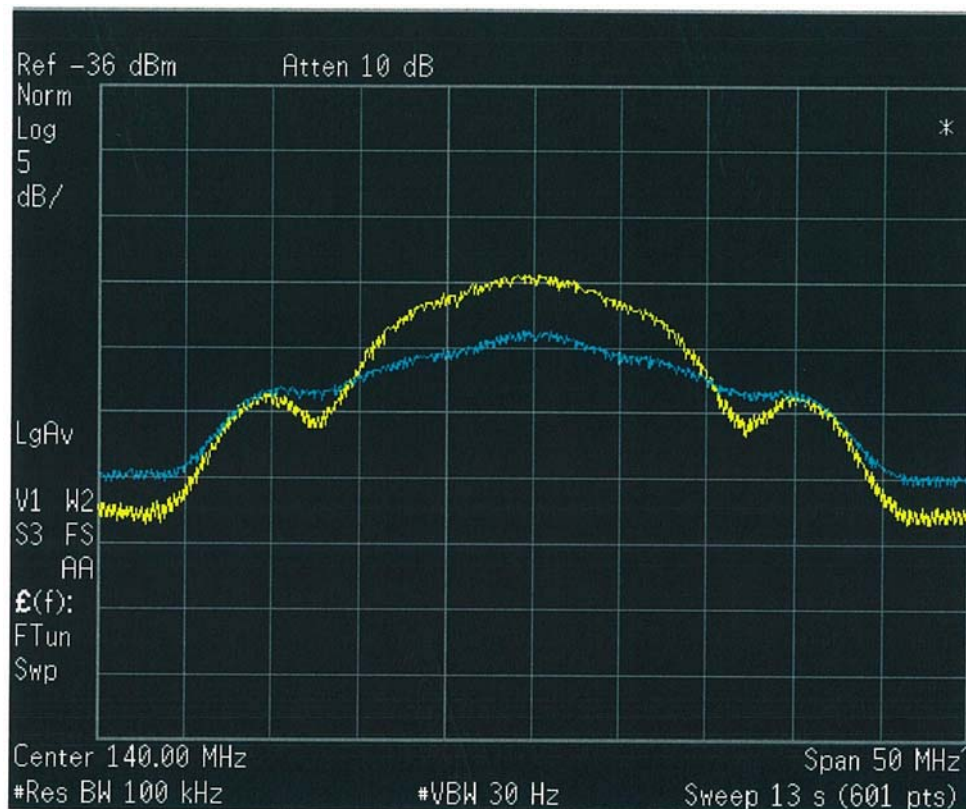


図 4.4-4 Ku 帯衛星伝送時のキャンセル信号抑圧波形

(OB のみの入力信号。OB : 20 Msps)

(黄色トレースは OB 入力信号、青トレースはキャンセル装置出力)



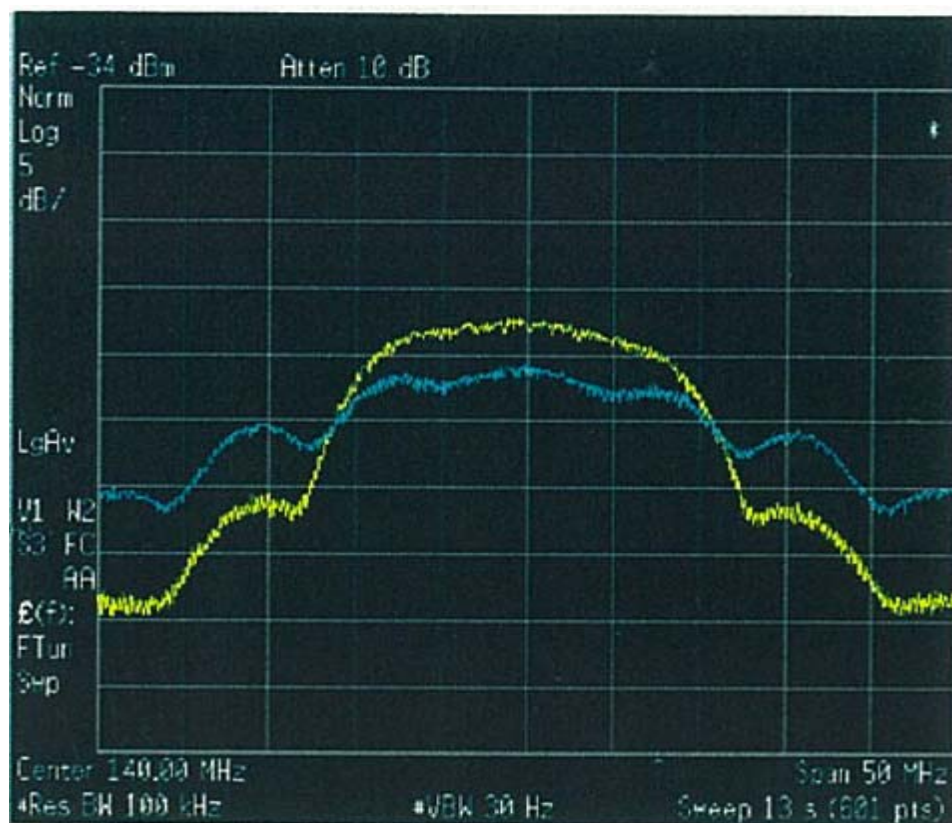


図4.4-5 C帯衛星伝送時のキャンセル信号抑圧波形

(OB のみの入力信号。OB : 20 Msps)

(黄色トレースは OB 入力信号、青トレースはキャンセル装置出力)

#### 4.4.4 隣接キャリアの影響下における伝送特性試験

衛星通信回線上には複数のチャンネルが設定されている。本試験では隣接したチャンネルに信号が存在する場合の影響を評価するために、OB 信号レートの 1.4 倍の周波数だけ離れた隣接キャリア(20Msps の場合、28MHz)を同時に入力し、遅延検出方式キャンセル装置の C/N に対する BER 特性を取得した。

図 4.4-6 および図 4.4-7 は、それぞれ Ku 帯および C 帯における衛星通信回線について、OB 信号と IB 信号が共に 20 Msps において、隣接キャリア 5Msps の場合の遅延検出方式キャンセル装置の C/N 対 BER 特性を示す。この結果、 $BER=10^{-2}$  における C/N は、Ku 帯衛星回線による場合は、12dB 程度であり、室内機能確認試験での C/N 対 BER 特性（4.3.6 項参照）から約 3dB の低下である。C 帯では、やや低下がみられるもののキャンセル動作は確認できた。

また、4.3.6 項で見られたとおり、MODEM 単体での C/N 対 BER 特性は、理論値とほぼ同等であるから、Ku 帯衛星通信回線利用時の遅延検出方式キャンセル装置の C/N に対する BER 特性は、理論値から  $BER=10^{-2}$  で C/N が、約 4 dB 程度低下していることが確認された。これは、通常必要とされる C/N が理論値から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性である。

また、C 帯は、Ku 帯より、大気減衰（Ku 帯で、約  $-3 \times 10^{-2}$  dB/km, C 帯で、約  $-6 \times 10^{-3}$  dB/km）など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、Ku 帯で有効であれば問題はな

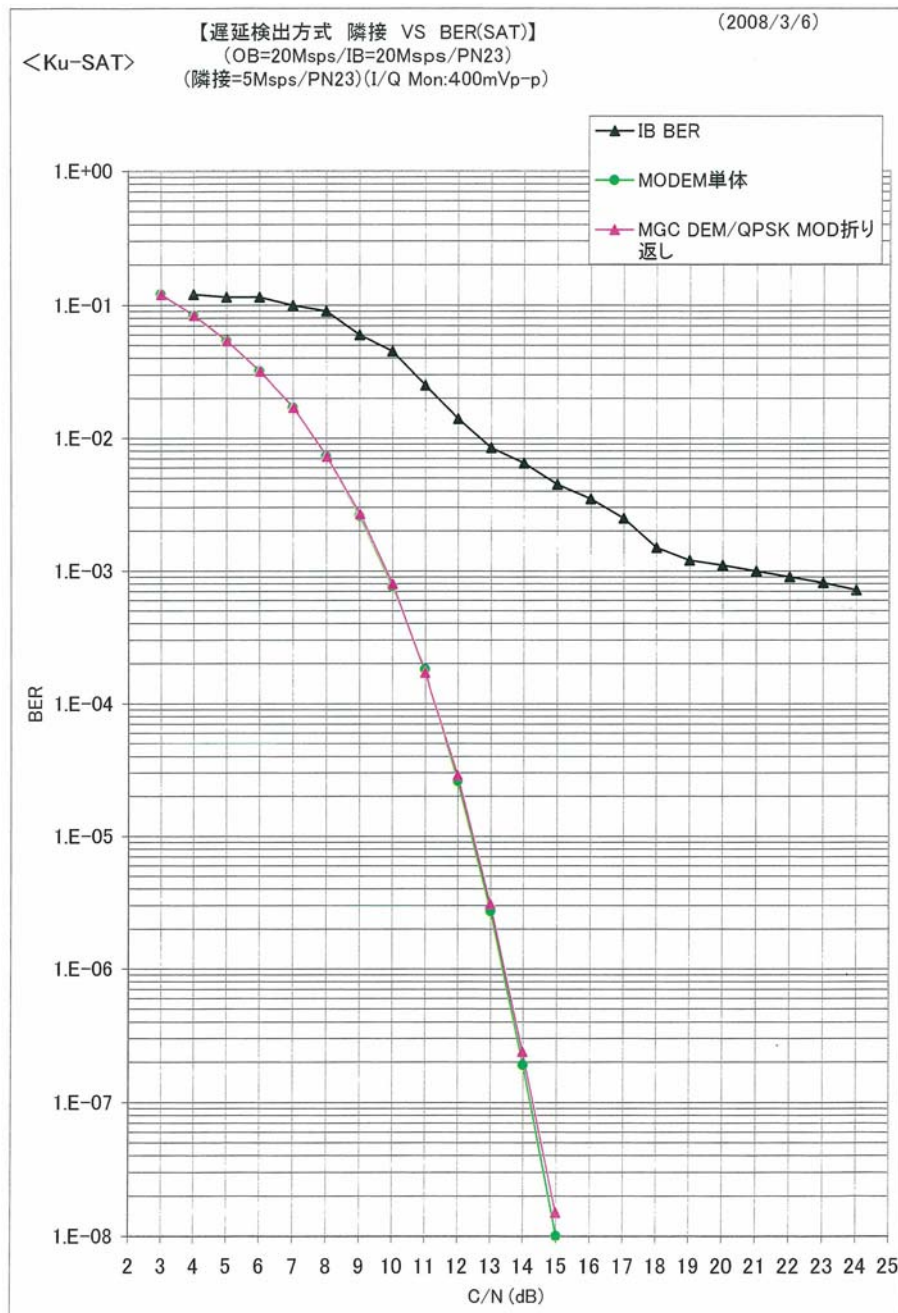


図 4.4-6 隣接キャリアが存在する場合の Ku 帯における C/N 対 BER 特性  
(IB/OB : 20 Msps、隣接 5Msps(中心から 28MHz 離れた周波数))

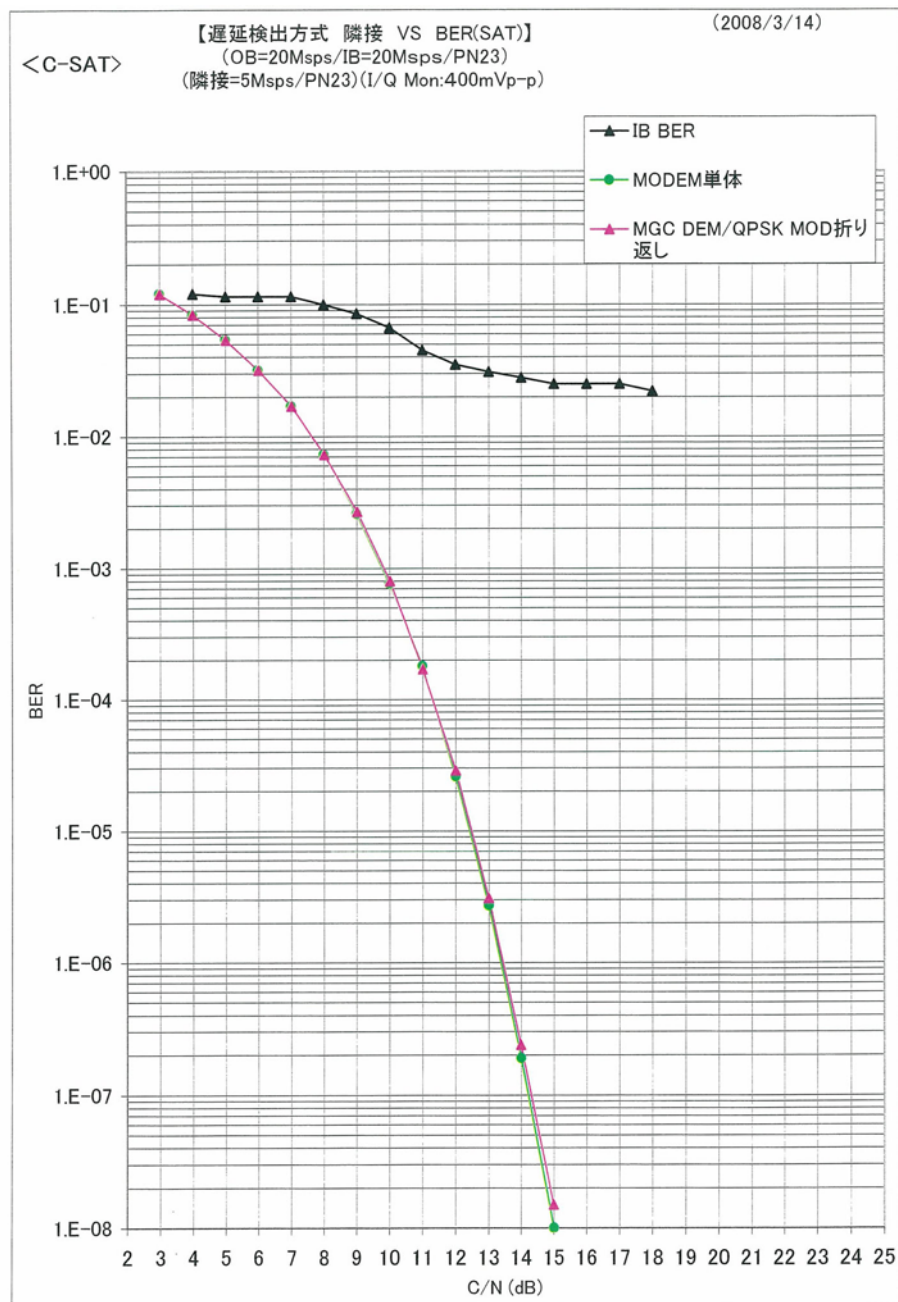


図 4.4-7 隣接キャリアが存在する場合の C 帯における C/N 対 BER 特性  
 (IB/OB : 20 Msps、隣接 5Msps(中心から 28MHz 離れた周波数))

## 第5章 VSAT 回線用不要波復調方式の検討

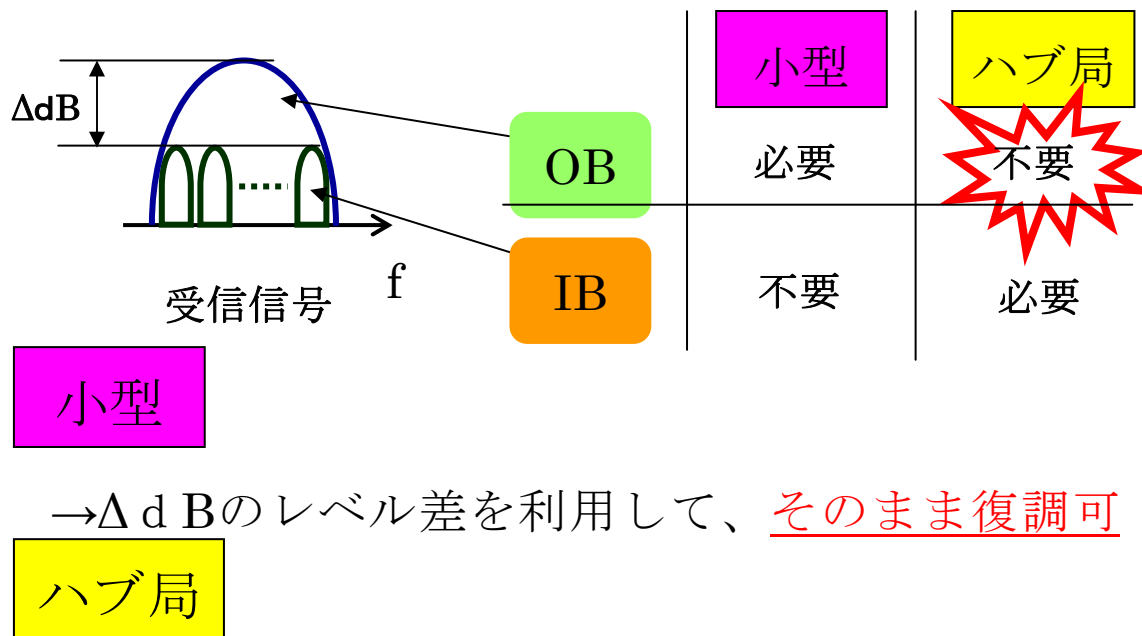
### 5.1 VSAT 回線用不要波復調方式の概要

#### 5.1.1 VSAT 回線における不要波復調方式の概要

VSAT システムでは、ハブ局と子局間の受信性能 (G/T) に差があるため、通常アウトバンド信号に対する衛星送信電力密度はインバンド信号のそれより電力密度差  $\Delta$  dB だけ高く設定される。不要波復調方式の原理は、重畳された受信信号を二分岐し、その一方ではアウトバンド信号を復調してレプリカを作り、他方では復調に要する時間だけ遅延させ両者の差分をとる方法である。すなわち、インバンド信号とアウトバンド信号との電力密度差を利用して、受信信号から不要信号 (アウトバンド信号) を復調することにより、レプリカを生成する。

本方式では、遅延測定が不要なので、回路が簡単であり、誤りなくアウトバンドを BER=0 で復調できれば、データ列は実際の送信信号と完全に一致することになる。実際には追うとバウンドの復調に際してはインバウンド信号は雑音とみなされるので、電力密度差に応じた復調誤りが発生することを考慮する必要がある。すなわち、インバンドとアウトバンドに十分なレベル差がある場合のみ不要波復調方式が適用できる。

VSAT システムにおける不要波復調方式のポイントを図 5.1-1 に示す。



→ 不要なOB信号の キャンセルが必要

図 5.1-1 VSAT システムにおける不要波復調方式のポイント

不要波復調方式の VSAT 衛星通信システムキャンセラの構成を図 5.1-2 に示す。キャンセラは主に、不要波復調部、レプリカ生成部、減算部から構成されている。受信信号は直行検波器で準同期検波し I/Q 信号に変換後、ADC (Analog-to-Digital Convertor) でサンプリングされる。入力された信号は位相補償を行う Rotator、サンプリング変換を行う Interpolator を通り、二つの経路に分かれる。一つは不要波復調部、レプリカ生成部で処理され減算部に入力される。もう一つは遅延ブロックを通り、減算部へ入力される。その後、減算部で受信信号からレプリカ信号を減算し、その差信号を Interpolator でサンプリング変換し、IB 信号の復調器へ出力する。

The diagram illustrates a software-defined radio receiver architecture. The input IF signal is processed by a Quadrature demod block, which outputs I and Q signals. These signals pass through ADC blocks. The resulting digital I and Q signals are then processed by Rotate and Interpolator blocks, which are controlled by NCO (Numerically Controlled Oscillator) blocks. The Interpolator outputs Q and valid signals. The valid signal is fed into a subtraction unit (減算部) and a replication generation section (レプリカ生成部). The replication generation section includes a QPSK Map, Rolloff Filter, and Up Sampler. The subtraction unit also includes a subtraction block and an AGC (Automatic Gain Control) block. The AGC block outputs a request signal to the Interpolator. The Interpolator outputs I and Q signals to an Inbound Demodulator. The Q signal is also fed into a FIFO (First In First Out) buffer. The FIFO buffer outputs a Symbol Timing Error signal to a Loop filter, which controls the NCO. The FIFO buffer also outputs a Symbol Phase Error signal to a Loop filter, which controls the NCO. The FIFO buffer outputs a Symbol Timing Error signal to a Loop filter, which controls the NCO. The FIFO buffer also outputs a Symbol Phase Error signal to a Loop filter, which controls the NCO. The FIFO buffer outputs a Symbol Timing Error signal to a Loop filter, which controls the NCO. The FIFO buffer also outputs a Symbol Phase Error signal to a Loop filter, which controls the NCO.

図 5.1-2 不要波キャンセラのブロック図

### 5.1.3 不要波復調方式の改良

不要波復調方式によるキャンセル技術については、性能改善として以下の点について、検討した。

1. FPGA に実装する interpolator 内部のタイミング係数及び数値制御発信器 (NCO) 内部のループ・フィルタ係数の最適化 (図 5.1-2 参照)
2. AGC 回路の改善によるロールオフ・フィルタのレベル係数の最適化

この結果、不要波復調方式については、レプリカ生成処理(FPGA)及びロールオフ・フィルタ等の改善を行うこととし、これによりキャンセル装置全体の性能の改善を図ることとした。

この改良を行った試験装置を用いて、機能確認試験及び電波伝送試験をそれぞれ実施した。

## 5.2 コンピュータシミュレーションによる理論評価

### 5.2.1 コンピュータシミュレーション系

C++により、実際の系を想定したシミュレーションを行った。コンピュータシミュレーション全体図を図5.2-1に示す。

OB信号とIB信号、及び雑音を発生させ、C++によりコンピュータシミュレーションを行った。以下に、不要波復調方式によるキャンセル信号抑圧量及びIB信号のC/Nに対するBER特性について報告する。

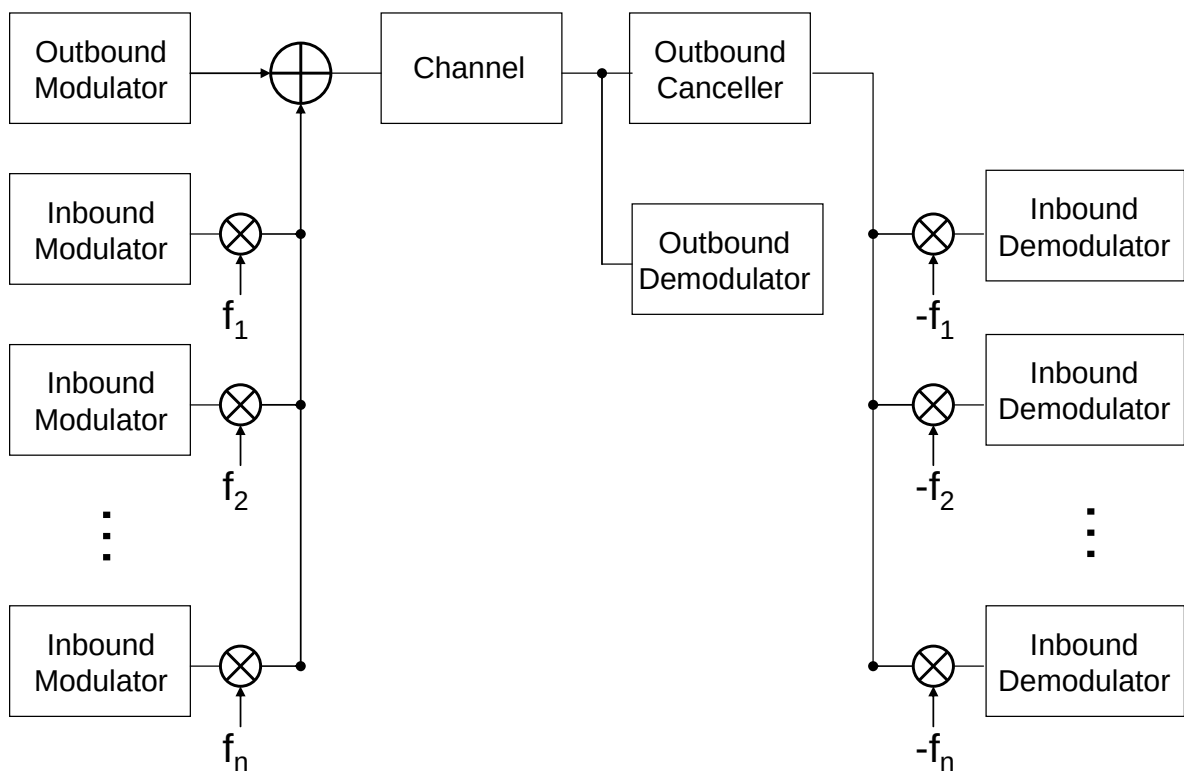


図5.2-1 シミュレーション全体図

#### (1) シミュレーション諸元

シミュレーション諸元は、次の通りである。

- (1) OB 信号 5Msps、10Msps、20 Msp s (QPSK)
- (2) IB 信号 1 Msp s 、1 波 (DQPSK)
- (3) 熱雑音 OB に対して 19~27dB、IB に対して 6~14dB の雑音を与えた。
- (4) OB 信号と IB 信号の電力密度比は、13dB とする。



(2) IB 信号配置図

OB 信号に対する IB 信号配置図を OB 信号が 5Msps、10Msps 及び 20Msps について、それぞれ、図 5.2-2、図 5.2-3 および図 5.2-4 に示す。

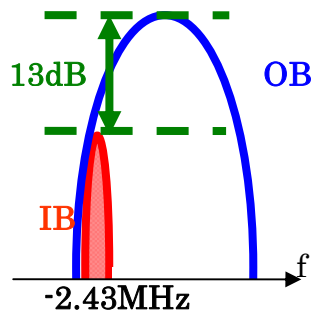


図 5.2-2 IB 配置モデル OB 信号 5Msps, IB 信号 1Msps

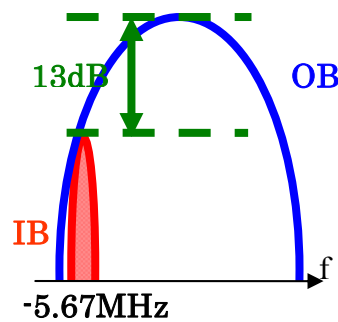


図 5.2-3 IB 配置モデル OB 信号 10Msps, IB 信号 1Msps

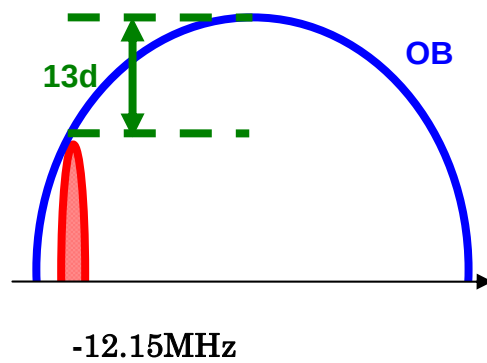


図 5.2-4 IB 配置モデル OB 信号 20Msps, IB 信号 1Msps

### 5.2.2 キャンセル信号抑圧量

OB 信号 5Msps 及び IB 信号 1 Msps の場合における、キャンセル前とキャンセル後の信号を、図 5.2-5 に示す。同様に、OB 信号 10Msps 及び IB 信号 1 Msps の場合における、キャンセル前とキャンセル後の信号を、図 5.2-6 に示す。さらに、OB 信号 20Msps 及び IB 信号 1 Msps のキャンセル前とキャンセル後の信号を、図 5.2-7 に示す。

この結果、キャンセル信号抑圧量は、5Msps、10Msps および 20Msps の場合に、それぞれ 35dB 以上となっていることがわかる。

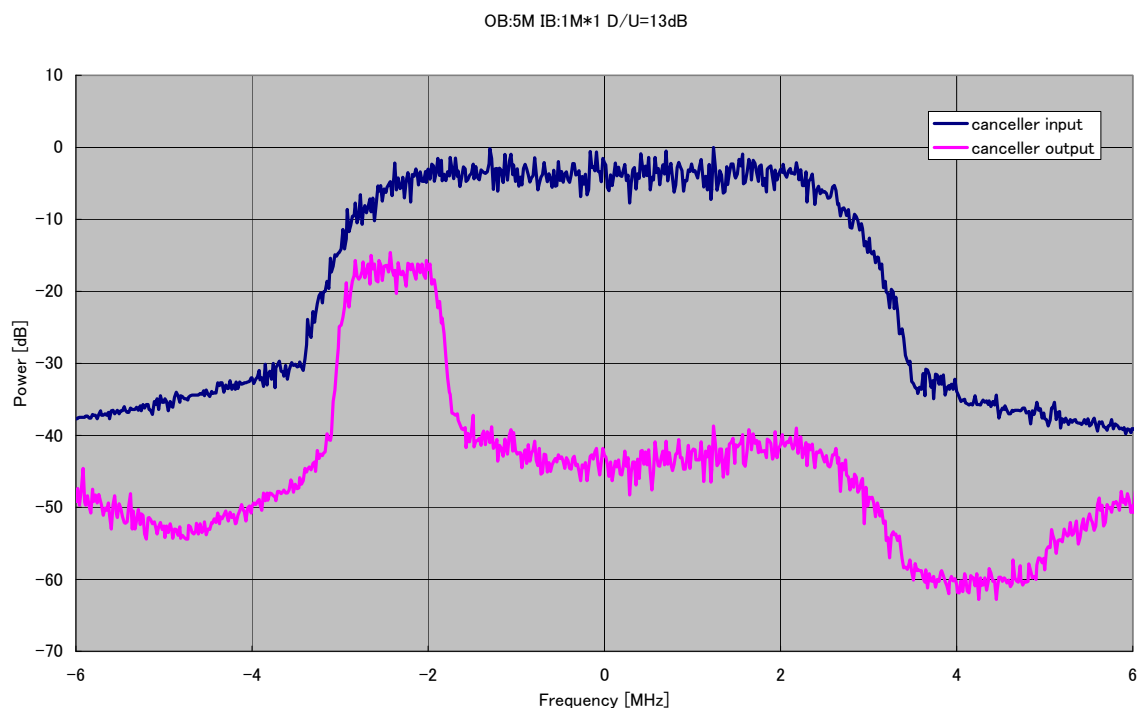


図 5.2-5 キャンセル前の信号（青線）とキャンセル後の信号（赤線）  
（OB 信号 5Msps、IB 信号 1Msps）

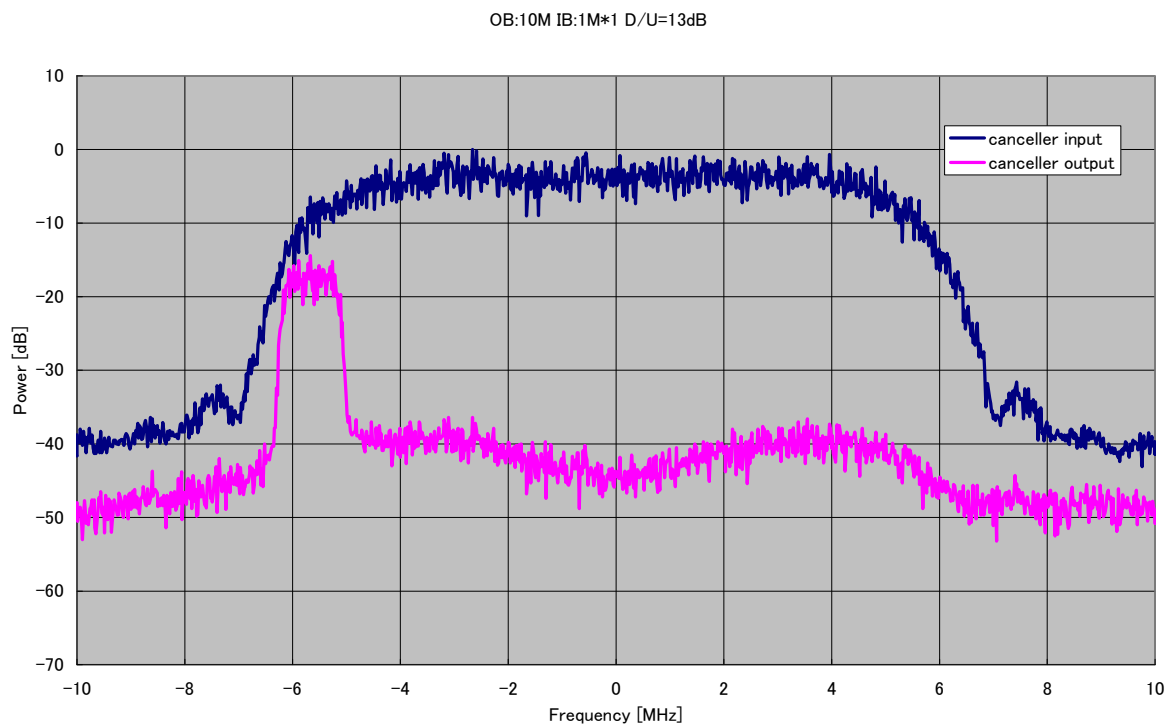


図 5.2-6 キャンセル前の信号（青線）とキャンセル後の信号（赤線）  
（OB 信号 10Msps、IB 信号 1Msps）

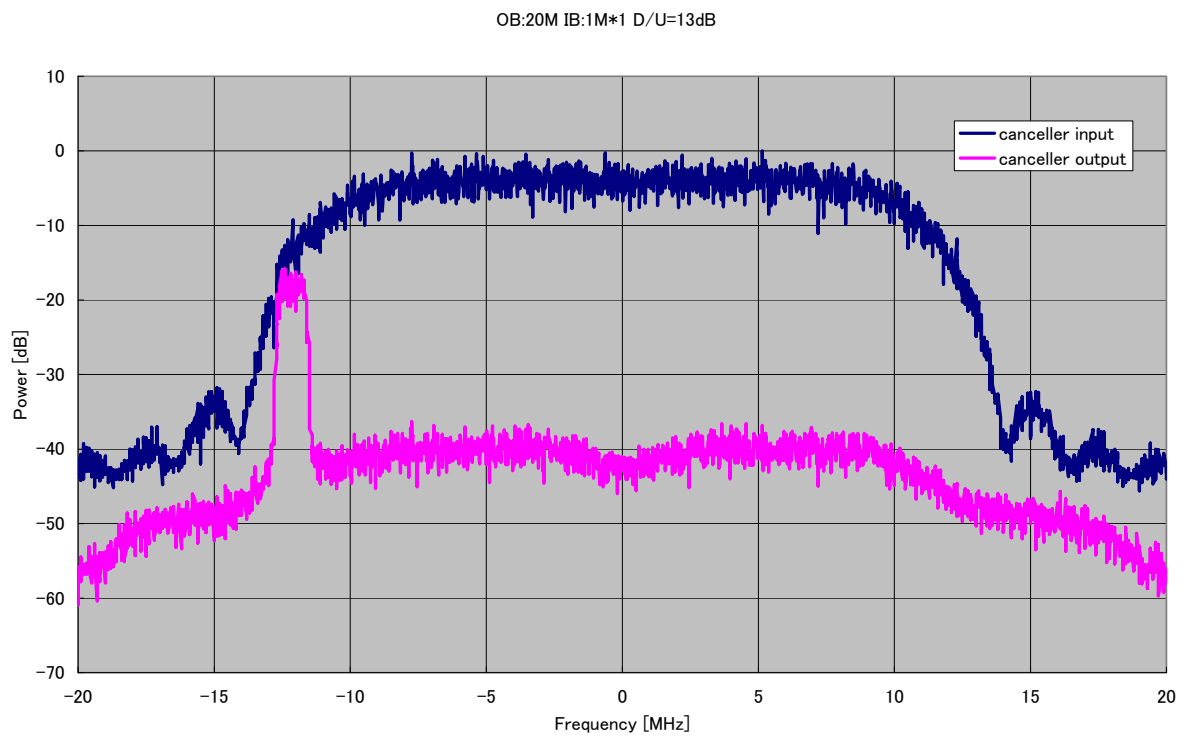


図 5.2-7 キャンセル前の信号（青線）とキャンセル後の信号（赤線）  
（OB 信号 20Msps、IB 信号 1Msps）

### 5.2.3 IB の C/N 対ビット誤り率特性

OB 信号 5Msps における IB 信号 1 Msps の C/N に対するビット誤り率 (BER) 特性を図 5.2-8 に示すとともに、同様に、OB 信号 10Msps における、IB 信号 1 Msps の C/N に対するビット誤り率 (BER) 特性を図 5.2-9 に示す。さらに、OB 信号 20Msps における、IB 信号 1 Msps の C/N に対するビット誤り率 (BER) 特性を図 5.2-10 に示す。

その結果、IB 信号の C/N に対するビット誤り率特性(BER)については、OB 5 Msps の場合、 $BER=10^{-2}$  において、 $C/N=9\text{dB}$  となり、理論値から 1dB 程度の低下であり、全体として、1～2dB の低下である。また、10Msps の場合、 $BER=10^{-2}$  において、 $C/N=10\text{dB}$  となり、理論値から 2dB 程度の低下であり、全体としても 2dB 程度の低下である。さらに、20Msps においても、 $BER=10^{-2}$  において、 $C/N=11\text{dB}$  となっており、理論値から 3dB 程度の低下であり、全体としても 3dB 程度の低下である。

以上により、今回検討した回路について、IB の C/N 対ビット誤り率特性は、理論値と整合していることが示された。

#### (1) OB : 5Msps、IB : 1Msps の場合

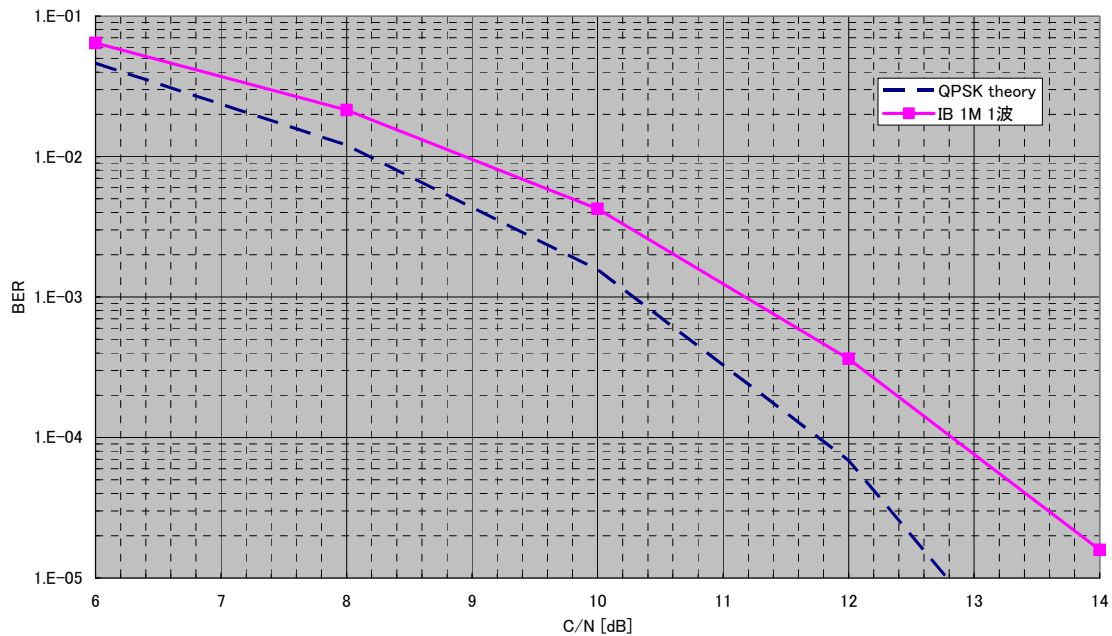


図 5.2-8 IB BER 特性 OB 信号 5Msps, IB 信号 1Msps

(2) OB : 10Msps、IB : 1Msps の場合

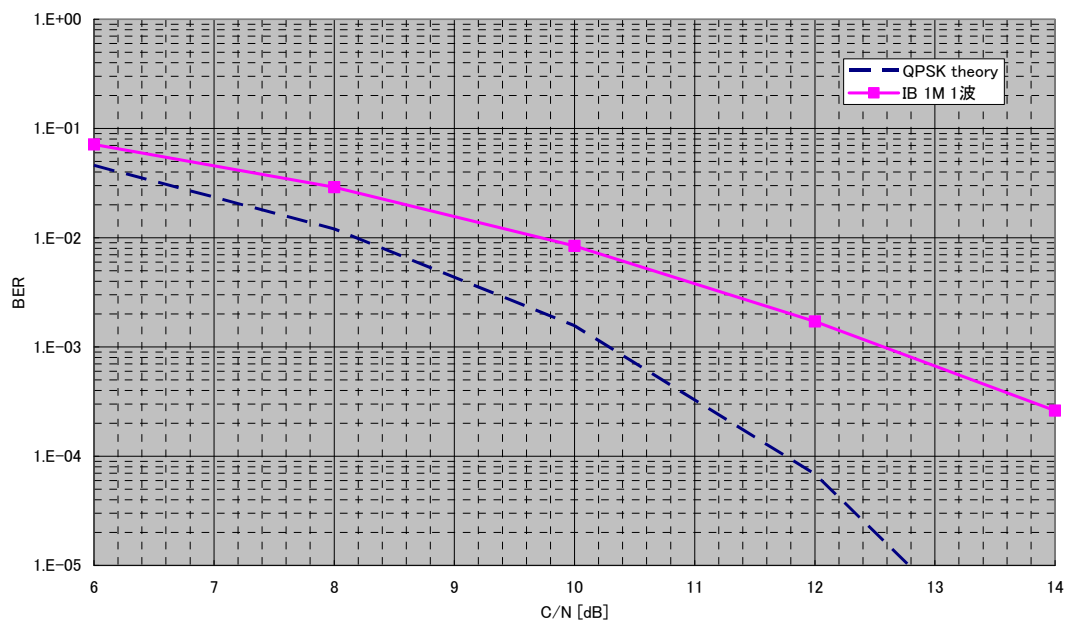


図 5.2-9 IB BER 特性 OB 信号 10Msps, IB 信号 1Msps

(3) OB : 20Msps、IB : 1Msps の場合

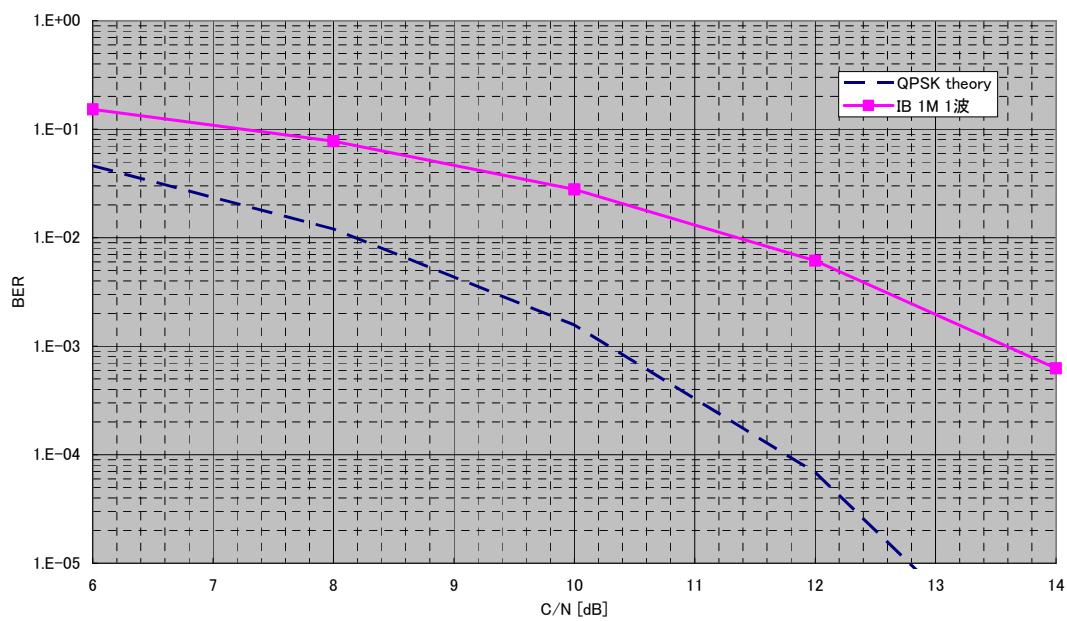


図 5.2-10 IB BER 特性 OB 信号 20Msps, IB 信号 1Msps

## 5.3 試験システムの構築における機能確認試験

### 5.3.1 不要波復調方式キャンセル装置の概要

VSAT 回線に用いる不要波復調方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性を確認するために、5.1.3 項で示した性能改善を行い、室内機能確認試験および衛星回線による機能確認試験を実施した。

### 5.3.2 試験システムの構築

実環境でフィールド試験を行うための準備として、不要波復調方式キャンセル装置、信号変復調装置等を用い、室内折り返し装置等による伝送信号重畳キャンセル技術の基礎的な確認試験を行った。室内機能確認試験に際しては、IF 信号の折り返しによる機能確認試験が、外部からの影響があまりないことから、キャンセル装置の機能確認に適していると考えられ、本件の試験では、IF 信号の折り返しによる機能確認試験を主に実施した。なお、伝送路における非直線性の試験では、衛星の増幅器（TWTA）の特性の影響が大きいことから、Ku 帯および C 帯による機能試験も実施している。

図 5.3-1 に P-MP VSAT 回線の IF 信号室内折り返し試験系統図を示す。試験系統図では、左側の 4 つの VSAT 室内装置(IDU : Indoor Unit)からの信号を IB 信号とし、また、ベクトル信号発生器からの信号を OB 信号として、不要波キャンセル装置に入力し、図の右側への出力を測定した。また、図 5.3-2 に、Ku 帯及び C 帯室内折り返し試験系統図を示す。同図では、Ku 帯及び C 帯の送受信機を室内折り返し装置によって結合し機能確認試験を実施している。

測定場所は、JSAT 横浜衛星管制センターであり、測定器は、スペクトラムアナライザ 4440A、4407B、ベクトル信号発生器 E4438C、BER 測定器 MP1762 を使用した。測定時期は、平成 19 年 7 月から平成 20 年 3 月までである。

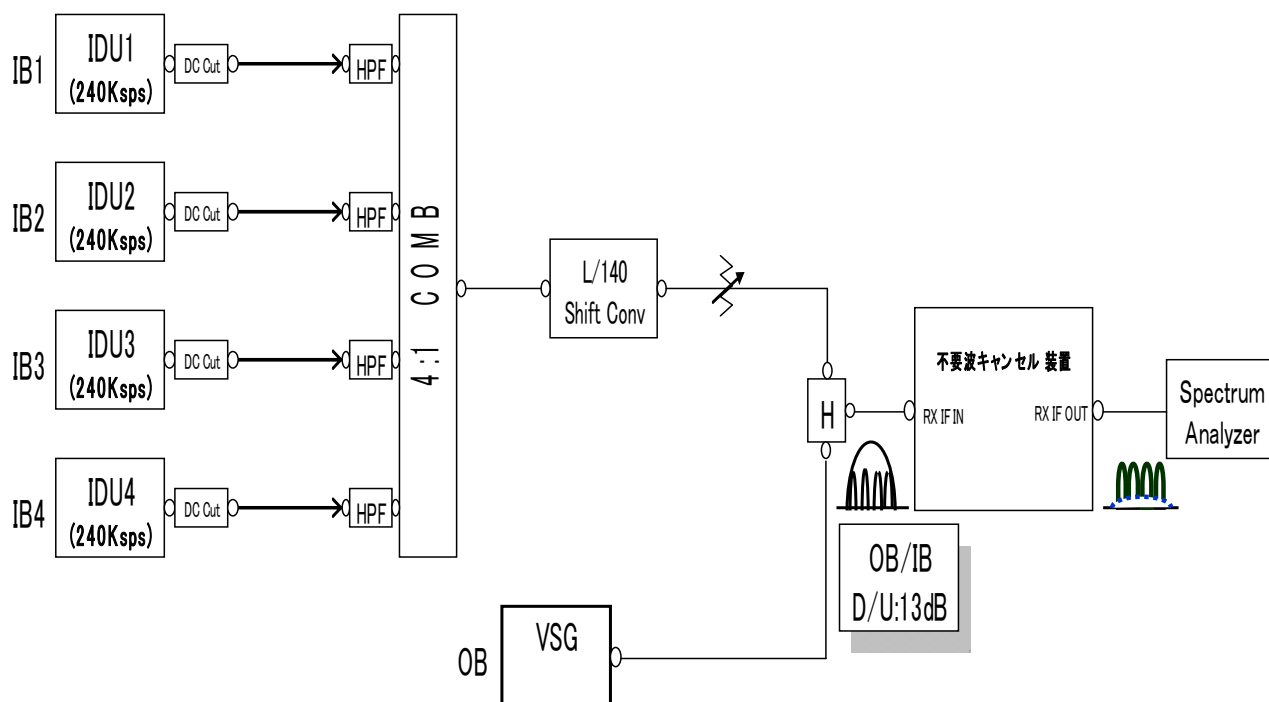


図 5.3-1 IF 信号室内折り返し機能確認試験系統図

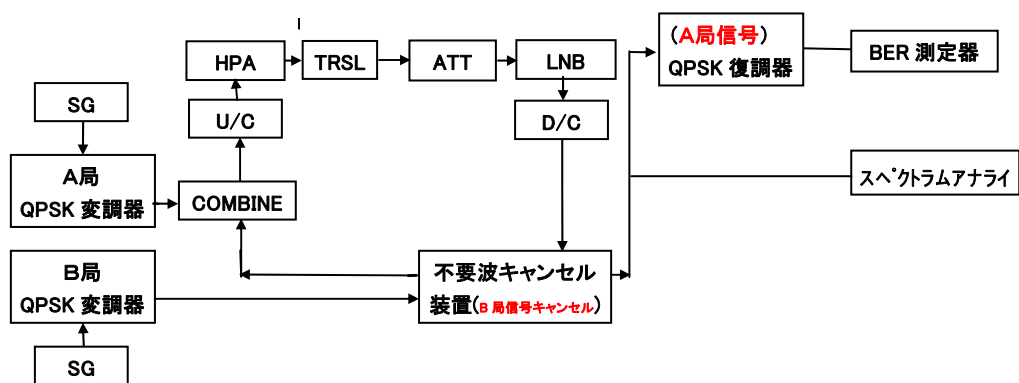


図 5.3-2 Ku 帯及び C 帯室内折り返し機能確認試験系統図

### 5.3.3 周波数安定度試験

Ku 帯での室内折り返し試験の設定で、不要波復調方式キャンセル装置からの IF (140 MHz) 出力信号の長時間に亘る周波数安定度を表 5.3-1 に示す。試験を 2 回実施した結果を示す。周波数安定度は $\pm 0.03\text{ppm}$  程度であった。C 帯での折り返し試験でも同程度の安定度が得られている。

表 5.3-1 Ku 帯室内折り返し時の周波数安定度試験の結果

| 時刻    | 周波数(MHz)  | 偏差(Hz) | 時刻    | 周波数(MHz)  | 偏差(Hz) |
|-------|-----------|--------|-------|-----------|--------|
| 11:00 | 140.00021 | 0      | 11:00 | 140.00021 | 0      |
| 11:10 | 140.00021 | 0.35   | 11:10 | 140.00021 | 0.17   |
| 11:20 | 140.00021 | 0.7    | 11:20 | 140.00021 | 0.35   |
| 11:30 | 140.00021 | 1.0    | 11:30 | 140.00021 | 0.52   |
| 11:40 | 140.00021 | 1.4    | 11:40 | 140.00021 | 0.7    |
| 11:50 | 140.00021 | 1.7    | 11:50 | 140.00021 | 0.87   |



#### 5.3.4 占有周波数帯幅試験

電波法の規定では、衛星通信における占有周波数帯幅の規定値は、次の通りである<sup>3</sup>。

$$\text{占有周波数帯幅} = 2 \times K \times \text{ビットレート}$$

係数Kは装置の周波数特性で決まり、本試験装置は、ローloffフィルタ 0.35 を使用しているため、K の値は 0.585 である。

試験装置の送信機の占有周波数帯幅を測定した結果を、図 5.3-2、図 5.3-3 および図 5.3-4 に示す。この結果より、電波法に基づく規定値以内であることを確認した。

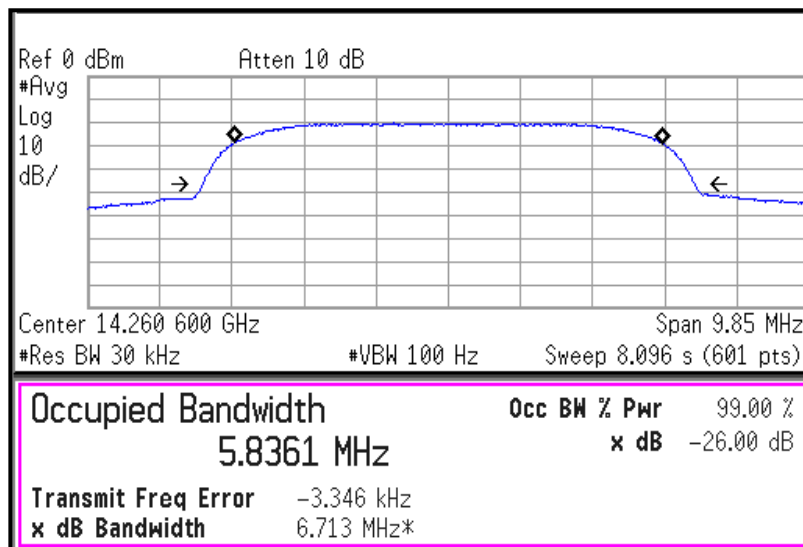


図 5.3-2 試験装置送信機(電波型式 G7W ビットレート 6.01Mbps)

<sup>3</sup>「電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号) 別紙 2 第 3 衛星関係 1 システム別審査要領 (1) 通信衛星を用いて固定衛星業務 (放送衛星業務を合せて行う場合を含む) を行う無線局 エ技術審査 (オ) 占有周波数帯幅の許容値 PSK 及び QAM 方式」

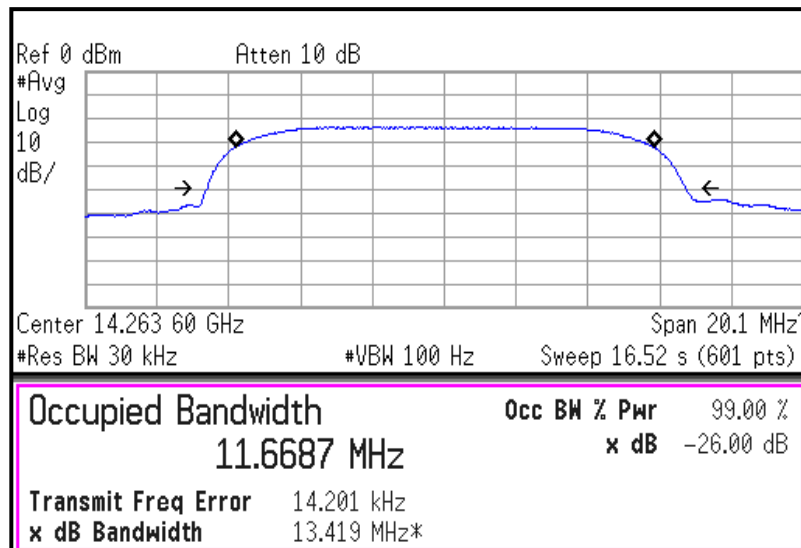


図 5.3-3 試験装置送信機（電波型式 G7W ビットレート 12.1Mbps）

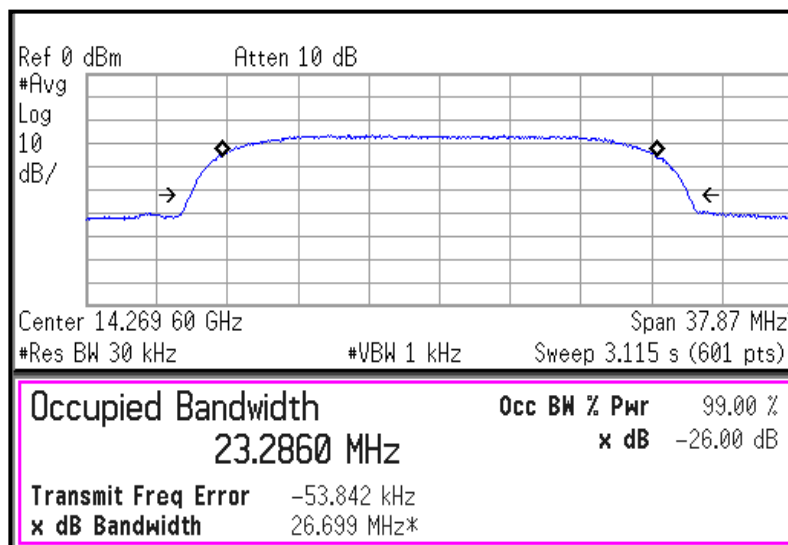


図 5.3-4 試験装置送信機（電波型式 G7W ビットレート 24.1Mbps）

#### 5.3.5 スプリアス試験

電波法の規定では基本周波数の平均電力より 60 dB 低い値がスプリアスの許容値となっている<sup>4</sup>。Ku 帯および C 帯のスプリアスの測定結果をそれぞれ図 5.3-5 および図 5.3-7 に例示する。測定結果は使用した各試験局において、スプリアス強度が電波法に基づく規定値以内であることを確認した。

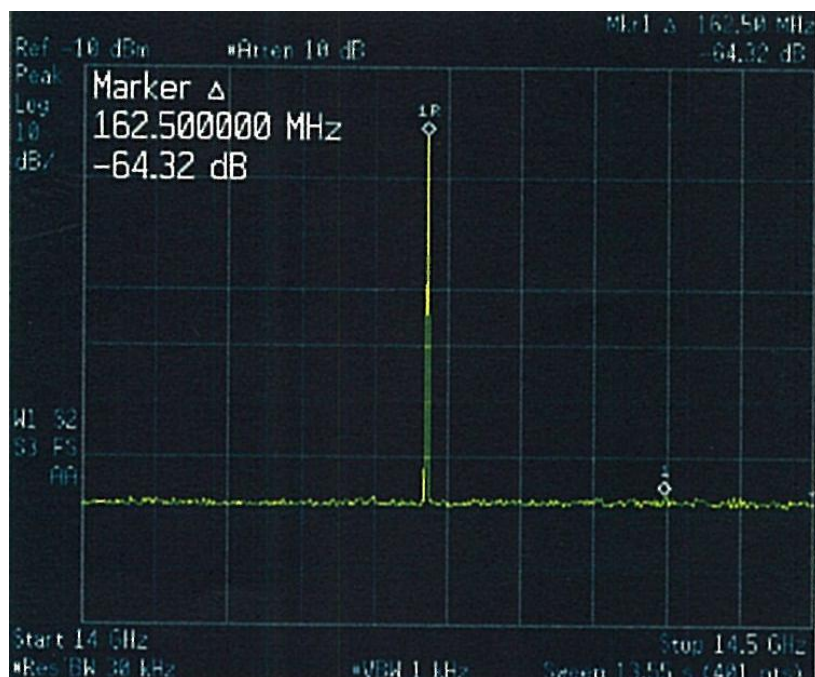


図 5.3-5 Ku 帯スプリアス

<sup>4</sup> 「宇宙無線通信を行う無線局（インマルサット船舶地球局、インマルサット携帯移動地球局及び航空機地球局（1,626.2MHz を越え 1,660.5MHz 以下の周波数の電波を使用するものに限る）を除く。）の送信設備のスプリアス発射又は不要発射の強度の許容値」総務省告示第 1228 号（無線設備規則別表第 3 号の 4 2）平成 17 年 10 月 21 日

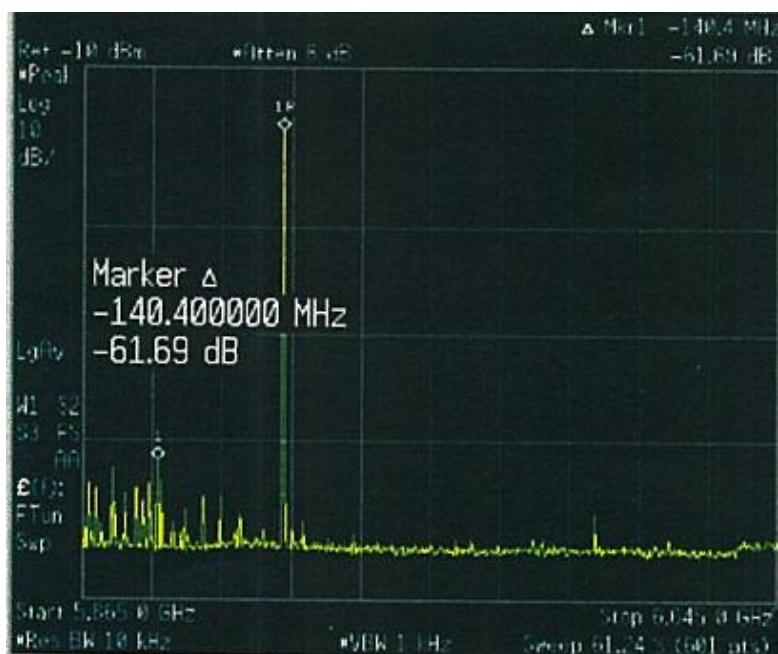


図 5.3-6 C 帯スプリアス

### 5. 3. 6 コンスタレーション試験

図5.3-7にはIF信号折り返し時のOB信号のコンスタレーションの測定例（キャンセル後の信号）を示す。OB信号5 Mspsであり、図5.3-8の下部にはキャンセル動作のレプリカとなるアップサンプラー出力（キャンセル信号復調波、図5.1-2参照）を示す。アップサンプラー出力においてはキャンセル動作に必要な高純度のキャンセル信号が復調されていることがわかる。

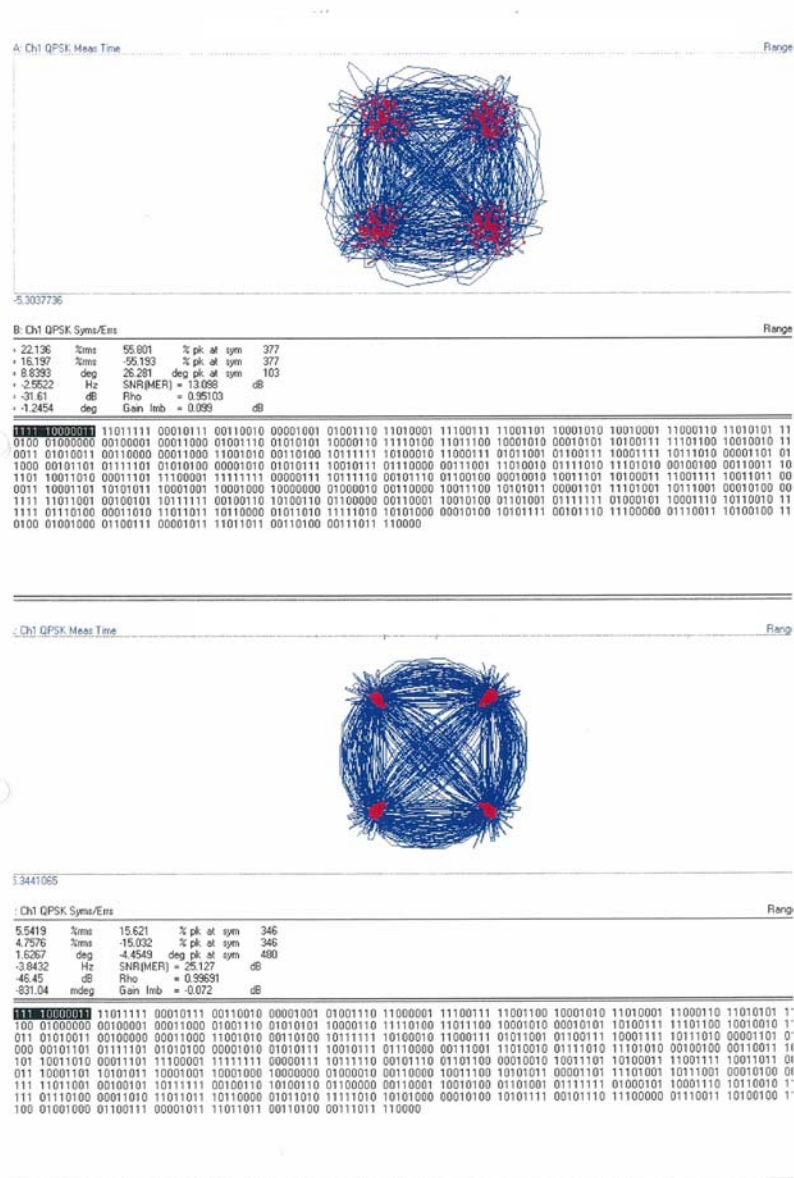


図5.3-7 不要波復調方式キャンセル装置コンスタレーション。

(OB : 5Msps、IB : 240ksps、下はアップサンプラー出力)

### 5. 3. 7 C/N 対ビット誤り率試験

図 5.3-9 は IF 信号折り返し時の不要波復調方式キャンセル装置の IB 信号に対する C/N 対 BER 特性を OB 信号 5 Msps について示す。この図において破線（緑）は QPSK の理論値、青の実線はシミュレーション値、赤の実線は試験値を示す。その結果、OB 信号 5 Msps で  $BER=10^{-2}$  において  $C/N=13\text{dB}$  程度であり、C/N 対 BER 特性は、理論値と比べ 6 dB 程度の低下となっている。

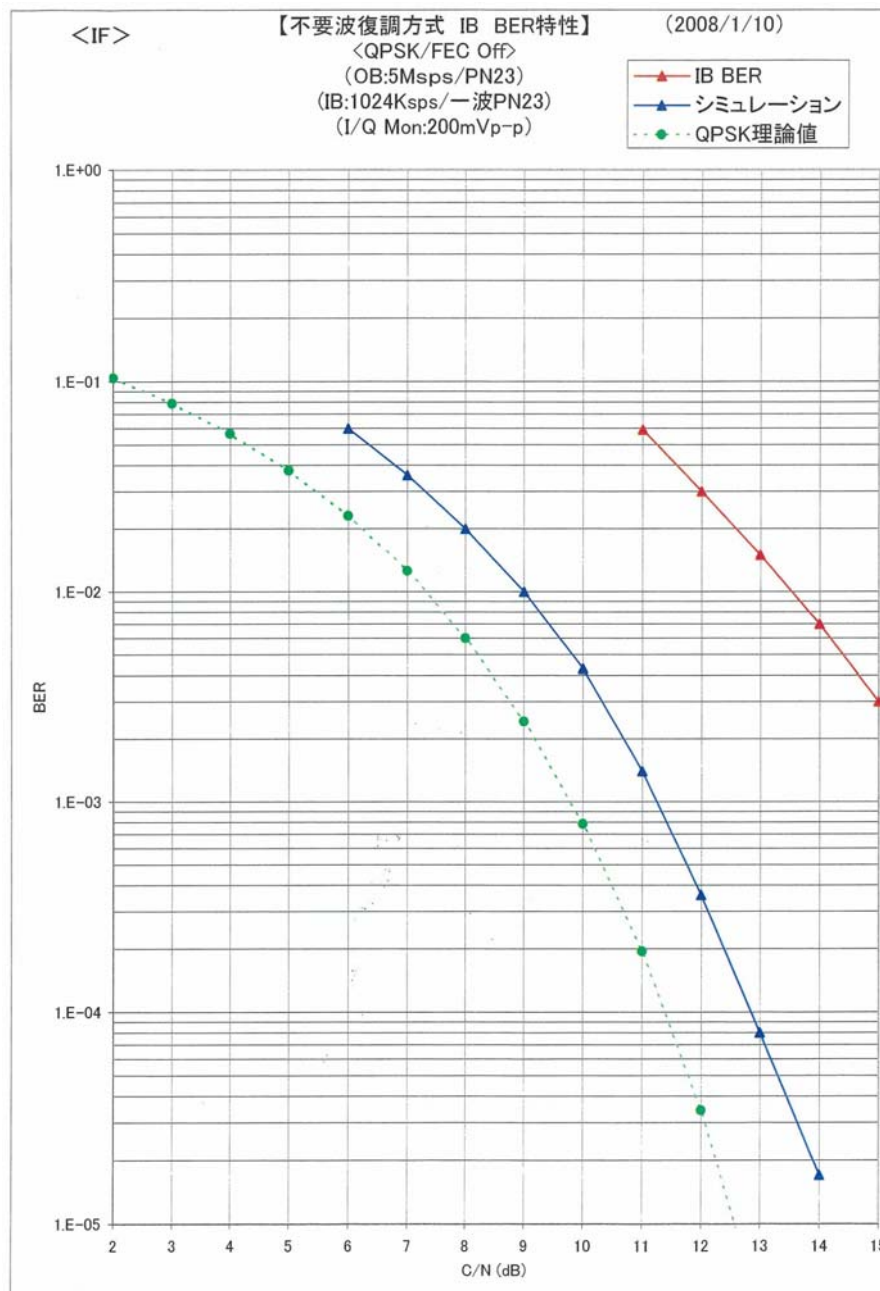


図 5.3-8 IF 信号折り返し時の IB 信号の C/N 対 BER 特性  
(OB :5 Msps、IB :1024Ksps)

### 5. 3. 8 キャンセル信号抑圧量試験

OB 信号を 5Msps に、IB 信号を 240ksps とし、OB 信号と IB 信号の電力密度比を 13dB として重畳し、且つノイズ量を変化させて、不要波復調方式キャンセル装置によるキャンセル信号抑圧量を測定した。OB 信号 5Msps (青)、IB 信号 240ksps (赤) のキャンセル前の波形を図 5.3-10 に示し、C/N 無限大のキャンセル波形を図 5.3-11 に示し、C/N=24dB でのキャンセル波形を図 5.3-12 に、C/N=18dB のキャンセル波形を図 5.3-13 に示す。

この結果より、C/N 無限大の場合は 28dB 程度、C/N24dB の場合は 22dB 程度、C/N18dB の場合は 18dB 程度の抑圧量として確認できた。不要波復調方式キャンセル装置により、伝送信号のキャンセルができていることが確認された。

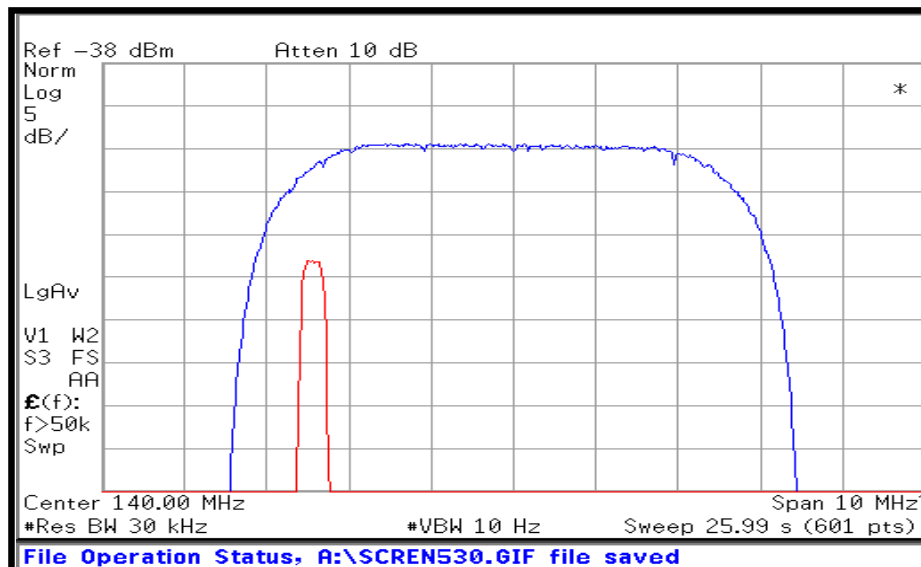


図 5.3-9 キャンセル前の波形(OB 信号 5M(青)、IB 信号 240k(赤))

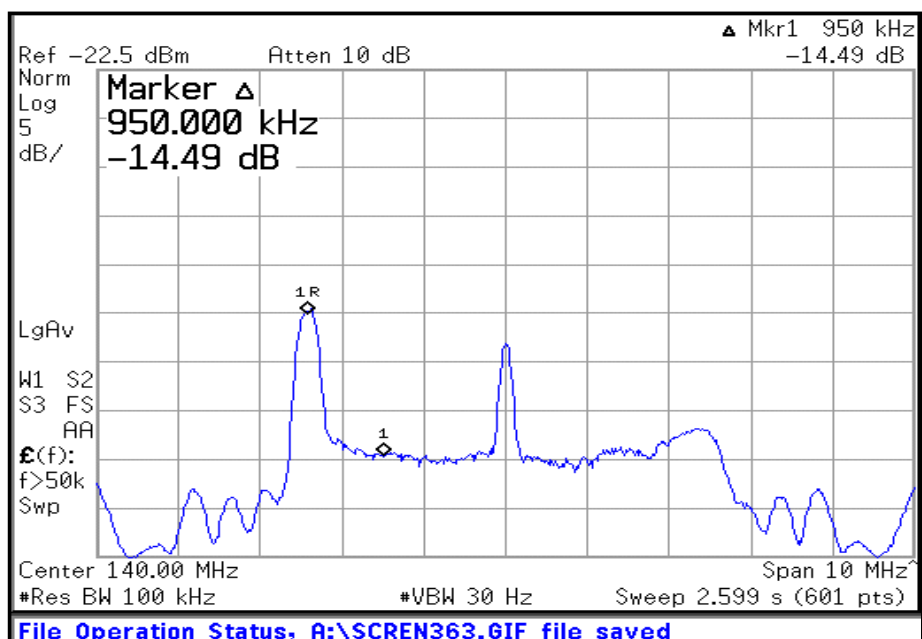


図 5.3-1 0 キャンセル後の波形  
(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps、C/N 無限大) (キャンセル信号抑圧量 28dB)

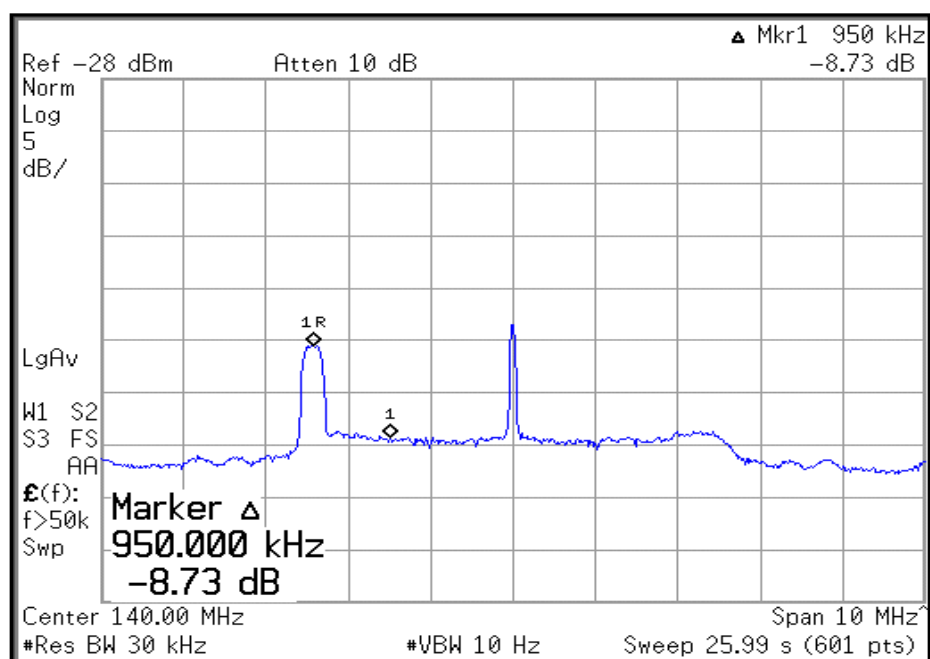


図 5.3-1 1 キャンセル後の波形  
(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps、C/N24dB) (キャンセル信号抑圧量 22dB)



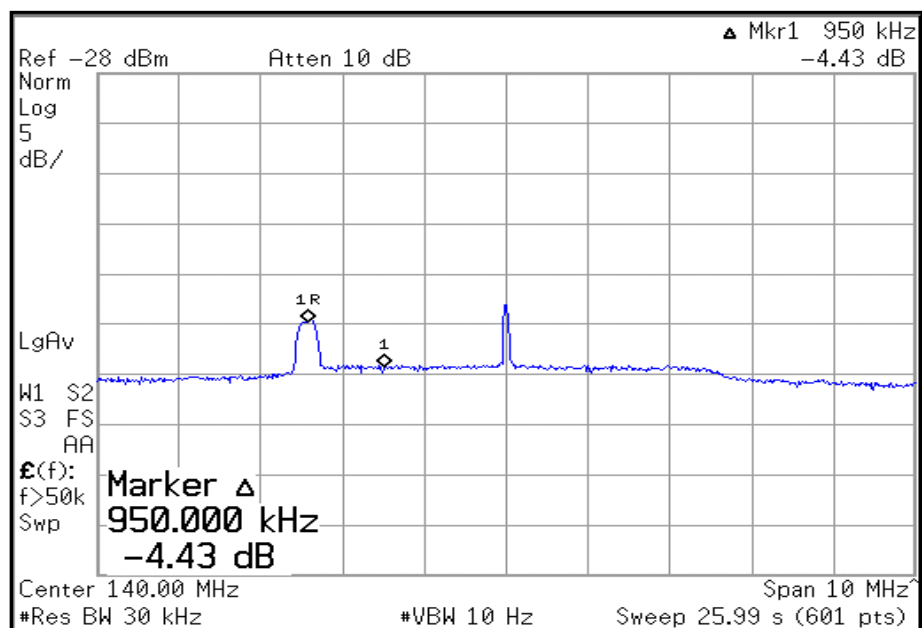


図 5.3-1 2 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps、C/N18dB) (キャンセル信号抑圧量 18dB)

#### 5. 3. 9 伝送路による非直線性に対する試験

衛星通信回線においては、伝送信号は衛星搭載の送信機（多くは TWTA）のひずみ（非線形性）特性の影響を受ける。そのために、伝送信号のレベルを適切に保つことが必要である。不要波復調方式キャンセル装置の C/N 対 BER 特性が伝送路の非直線性によって受ける影響の程度を、伝送信号レベルを伝送路の最大伝送レベルに対して、3dB、6dB 及び 10 dB 低いレベルの出力バックオフ（OBO）の場合について C/N 対 BER 特性としてデータを取得した。試験には Ku 帯及び C 帯の室内折り返し装置を用いた。

不要波復調方式キャンセル装置の Ku 帯および C 帯における OBO による C/N 対 BER 特性をそれぞれ図 5.3-1 4 および図 5.3-1 5 に示す。OBO によって C/N 対 BER 特性が変化しており、伝送路における非直線性が影響を与えていることがわかる。OBO が 10dB では、 $BER=10^{-2}$  において C/N=14dB から 16dB 程度であり、室内機能確認試験での C/N 対 BER 特性（5.3.7 項参照）から 1 dB から 3dB 程度の低下であり、伝送路における非直線性が不要波復調方式キャンセル装置のキャンセル動作にあまり影響を与えていないことを示している。

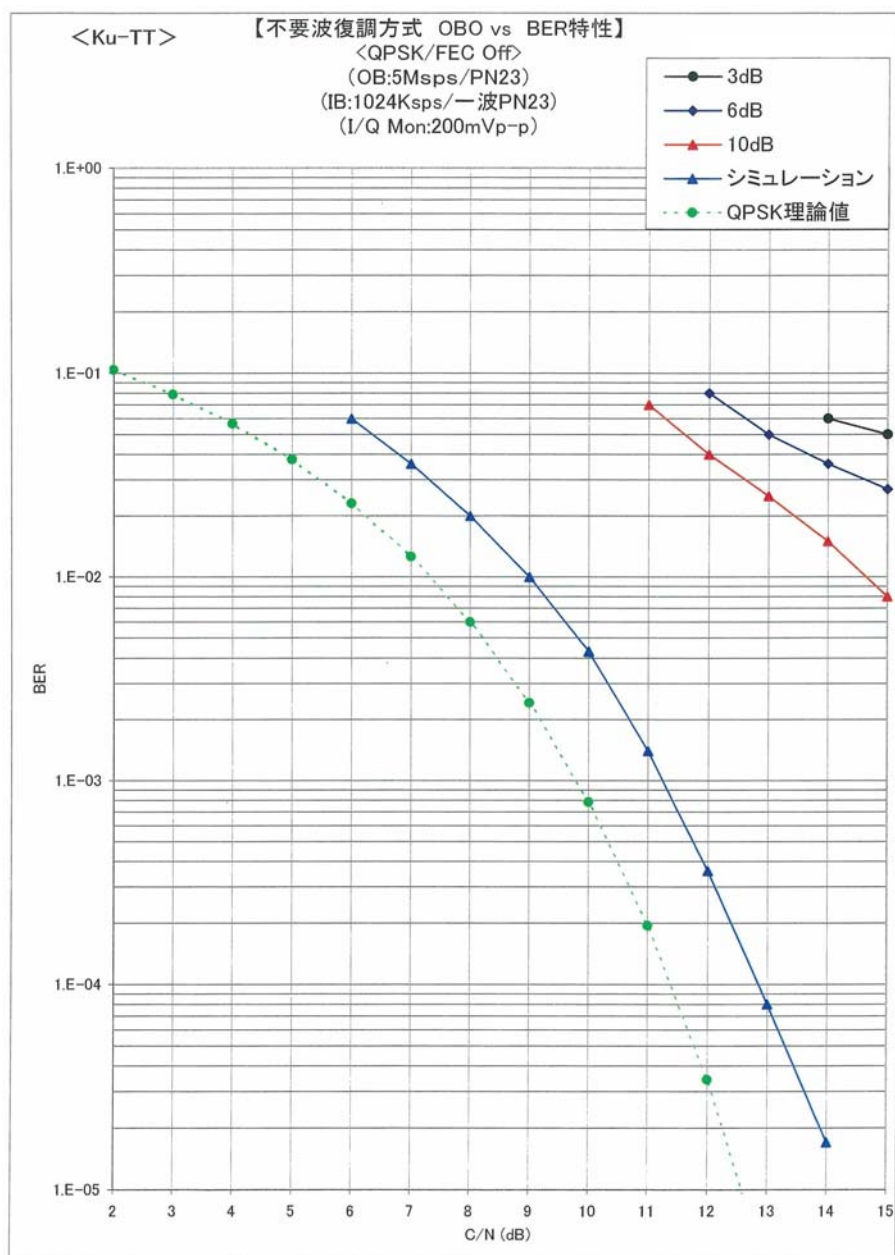


図 5.3-1 3 Ku 帯の非直線性における OBO による C/N 対 BER 特性  
 (OB 5Msps、IB 1024Ksps、OBO 3dB、6dB、10dB)

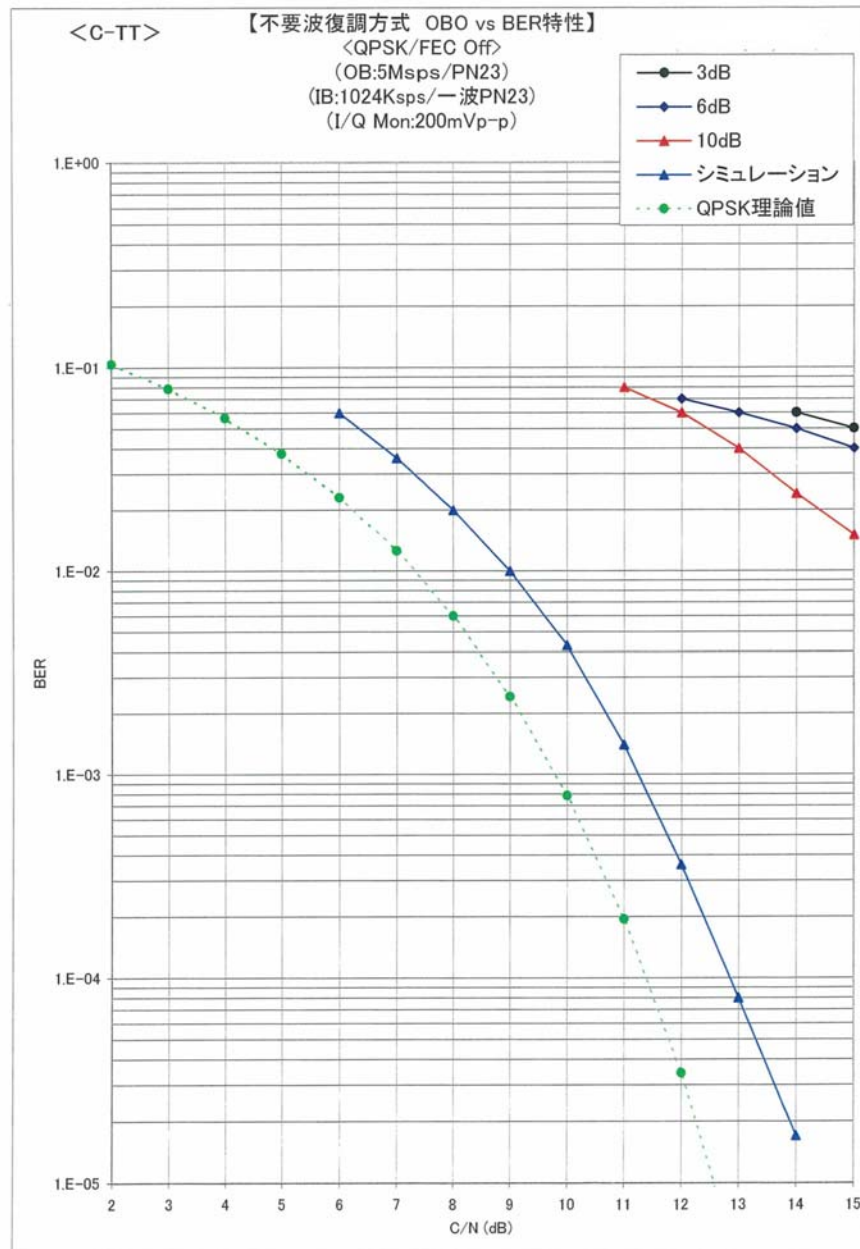


図 5.3-1 4 C 帯の非直線性における OBO による C/N 対 BER 特性  
 (OB 5Msps、IB 1024Ksps、OBO 3dB、6dB、10dB)

## 5. 4 衛星システムにおける電波伝送試験

### 5. 4. 1 試験システムの構築

人工衛星を用いた実環境の試験として基本的なキャンセル特性の実施検証を行うため、VSAT 衛星通信システムを介した不要波復調方式キャンセル装置を用いた機能確認試験を行った。図 5.4-1 に P-MP Ku 帯 VSAT 回線衛星折り返し試験系統図を、図 5.4-4 に P-MP C 帯 VSAT 回線衛星折り返し試験系統図を示す。また、図 5.4-2 に Ku 地球局 1.2m アンテナの写真を、図 5.4-3 に Ku 地球局 5.5m アンテナの写真を、図 5.4-5 に C 地球局 4.9m と 1.9m アンテナの写真を示す。試験系統図では、図の左側の VSAT 局から送信された IB 信号を衛星を介して、図の右側の地球局で、自身の送信した OB 信号とともに受信する。この受信信号を、不要波キャンセル装置で、復調し出力し、その結果を測定する。

測定場所は、JSAT 横浜衛星管制センターであり、測定器は、スペクトラムアナライザ 4440A、4407B、ベクトル信号発生器 E4438C、BER 測定器 MP1762 を使用した。測定時期は、平成 20 年 1 月から 3 月までである。

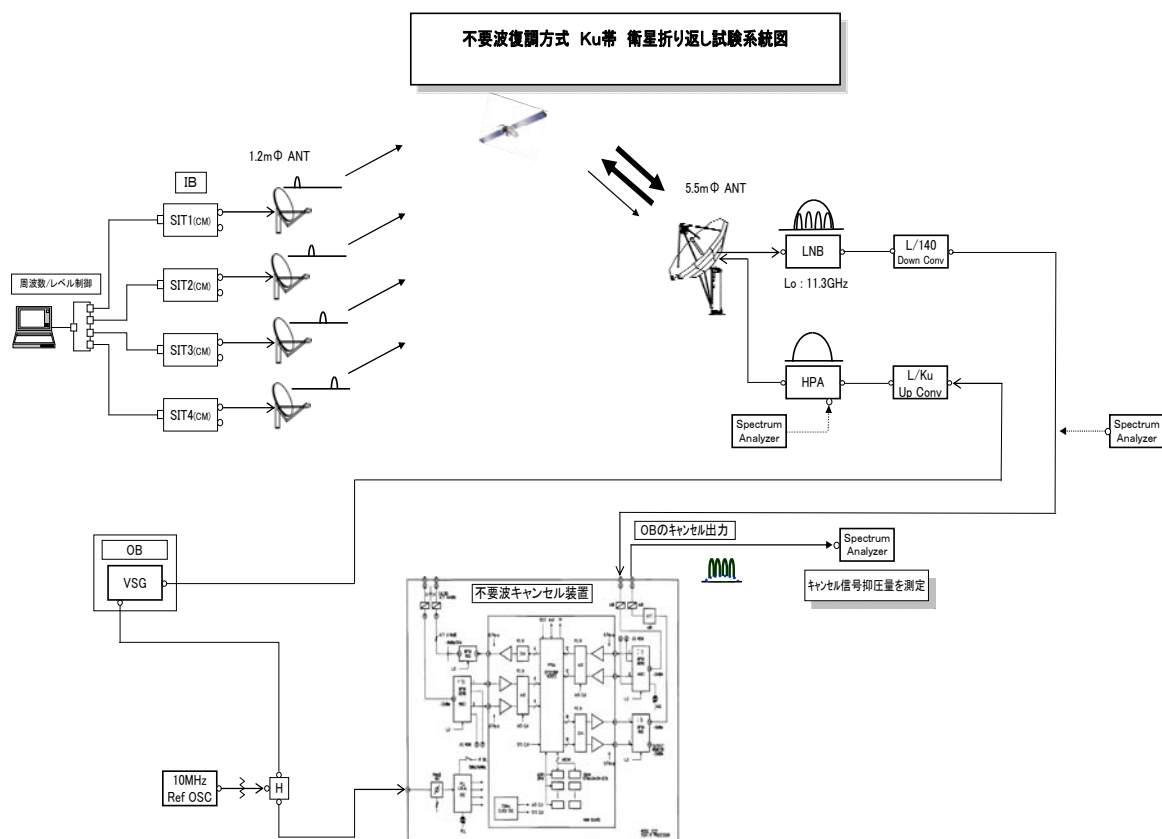


図 5.4-1 P-MP Ku 帯 VSAT 回線 衛星折り返し試験系統図



図 5.4-2 Ku 帯地球局 1.2m アンテナの写真



図 5.4-3 Ku 帯地球局 5.5m アンテナの写真





図 5.4-5 C 帯地球局 4.9m と 1.9m アンテナ



#### 5. 4. 2 C/N 対ビット誤り率試験

不要波復調方式キャンセル装置における衛星回線を介した C/N 対 BER 特性の試験結果を示す。図 5.4-6 および図 5.4-7 は、それぞれ Ku 帯および C 帯における OB 信号 5 Msps で IB 信号 1024 ksps 一波の場合の C/N 対ビット誤り率(BER)特性である。衛星回線においても不要波復調方式キャンセル装置による伝送信号のキャンセルができていることが確認された。

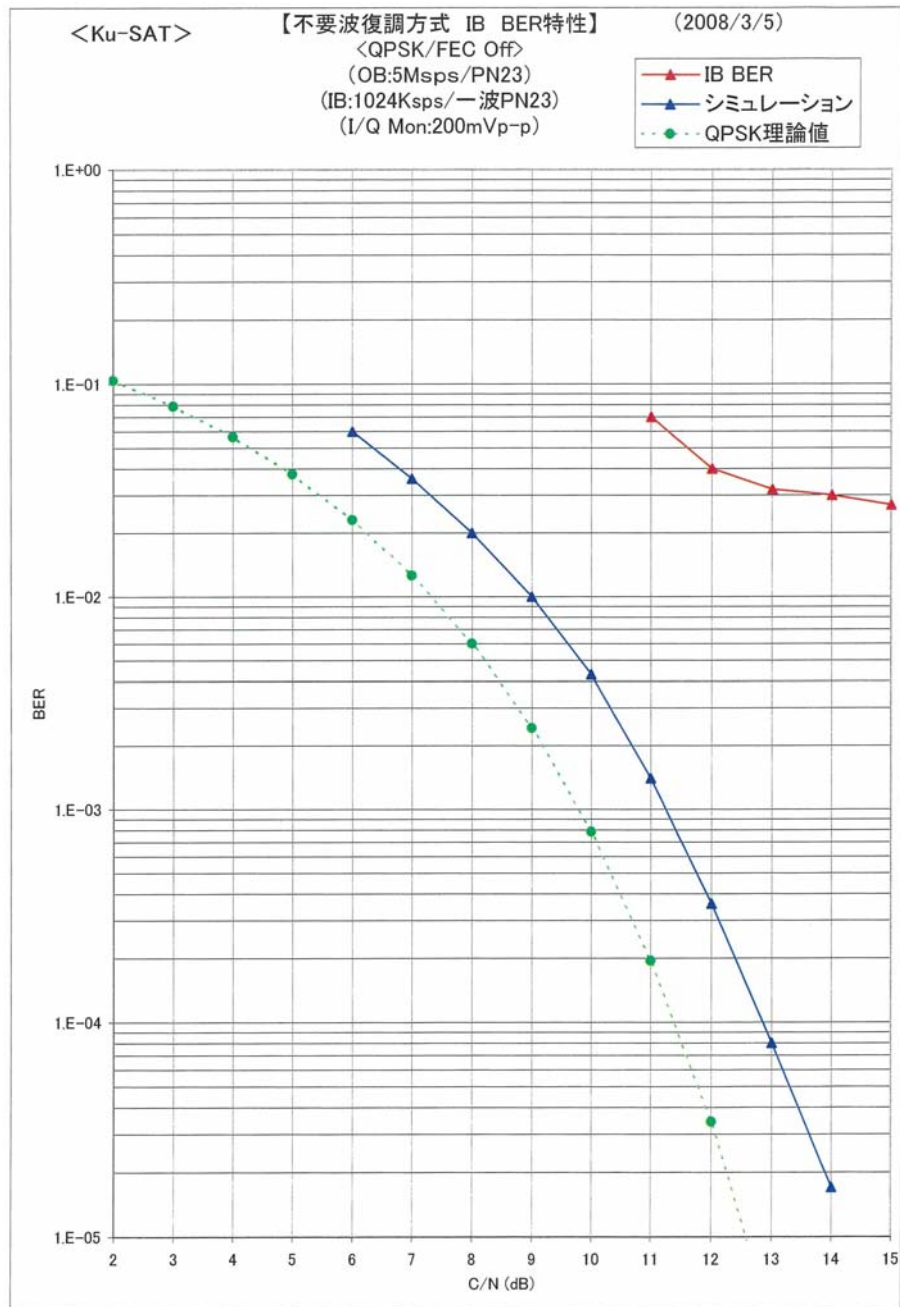


図 5.4-6 Ku 帯衛星回線における C/N 対 BER 特性  
(OB : 5 Msps、IB : 1024 ksps 一波)

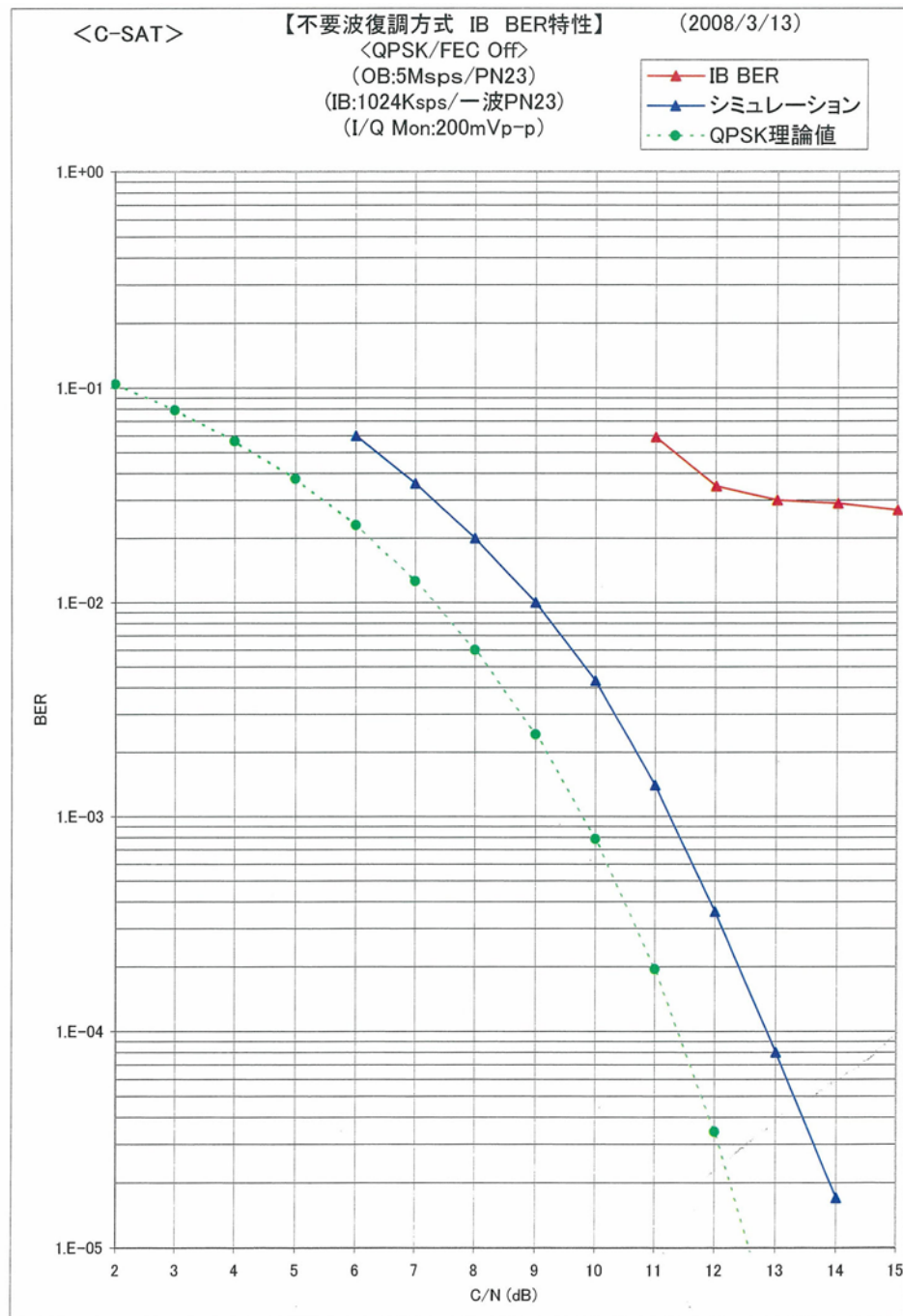


図 5.4-7 C 帯衛星回線における C/N 対 BER 特性  
(OB : 5 Msps、IB : 1024 ksps 一波)

### 5. 4. 3 キャンセル信号抑圧量試験

#### (1) Ku 帯での試験結果

不要波復調方式キャンセル装置に Ku 帯衛星回線を介して OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps とし、OB 信号と IB 信号の電力密度比 13dB の大きさに重畳し、キャンセル信号抑圧量を測定した。IB 信号が 1 波のキャンセル前波形を図 5.4-8 に、キャンセル後波形を図 5.4-9 に、IB 信号が 2 波のキャンセル前波形を図 5.4-10 に、キャンセル後波形を図 5.4-11 に、IB 信号が 4 波のキャンセル前波形を図 5.4-12 に、キャンセル後波形を図 5.4-13 に示す。この結果より、IB 信号が 1 波の場合は 24dB 程度の、IB 信号が 2 波の場合は 24dB 程度の、IB 信号が 4 波の場合は 23dB 程度の抑圧量として確認できた。

衛星回線を介した場合でも、IB 信号が増えても不要波復調方式キャンセル装置によって、伝送信号のキャンセルができることが確認された。

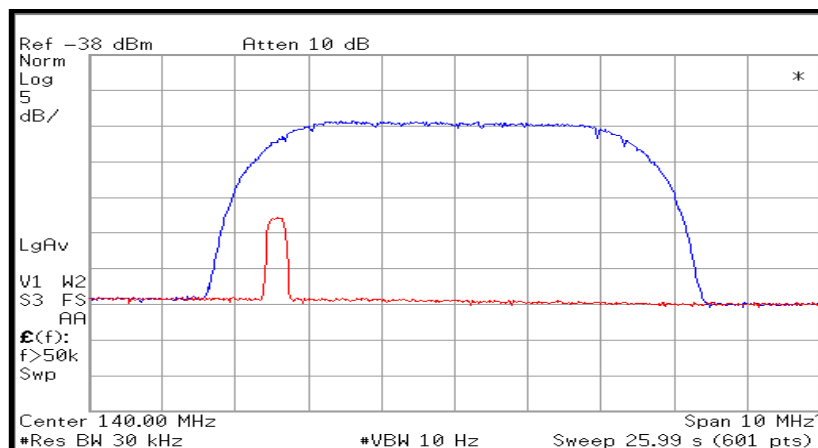


図 5.4-8 OB 信号(青)5Msps、IB 信号(赤)240ksps 1 波のキャンセル前の波形

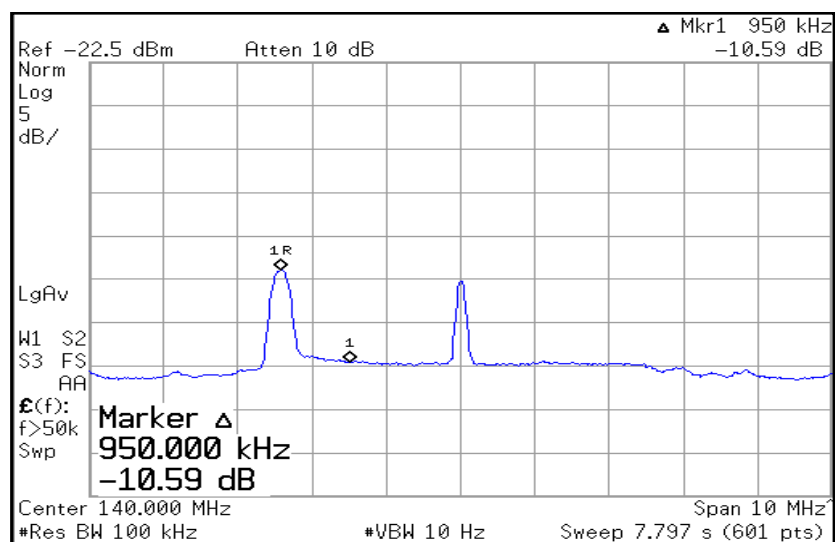


図 5.4-9 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps 1 波) (キャンセル信号抑圧量 24dB)

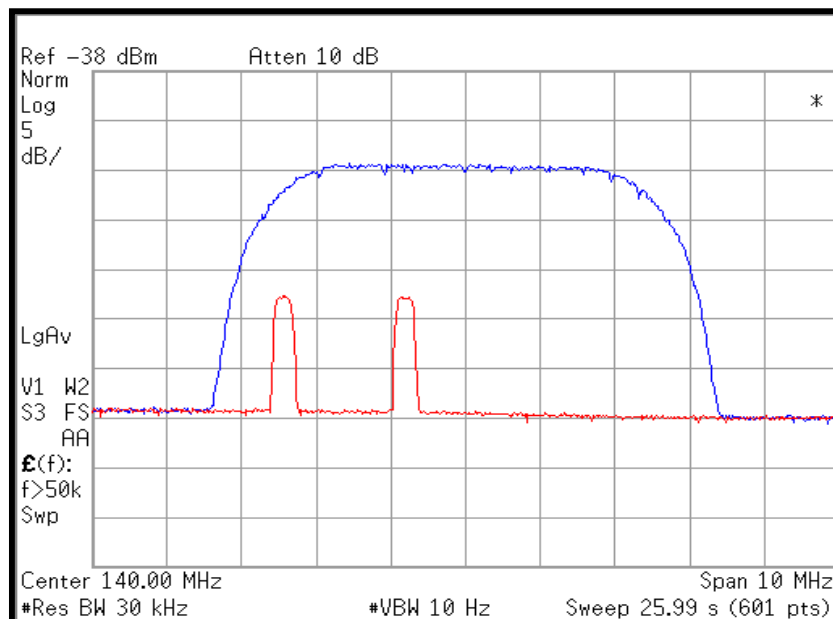


図 5.4-1 0 OB 信号(青)5Msps、IB 信号(赤)240ksps 2 波のキャンセル前の波形

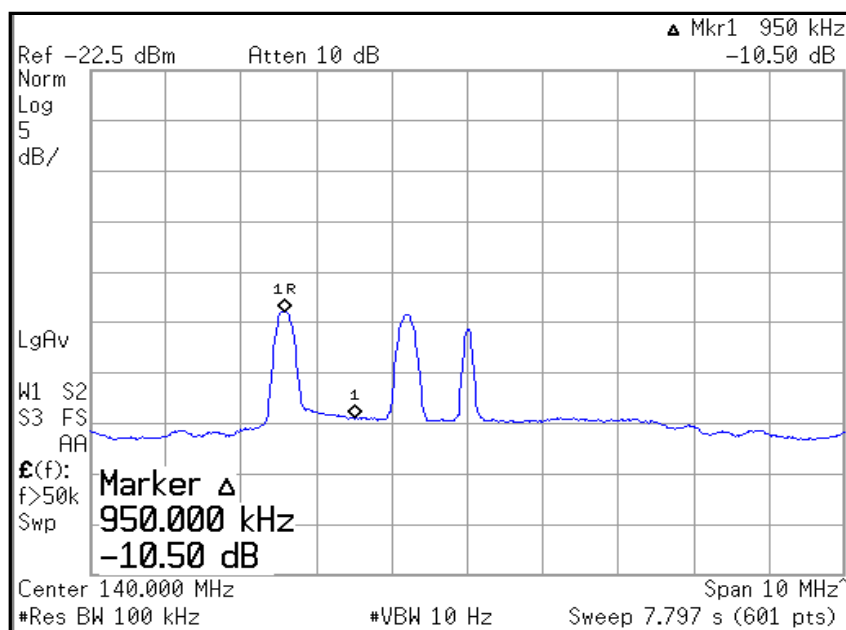


図 5.4-1 1 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps 2 波) (キャンセル信号抑圧量 24dB)

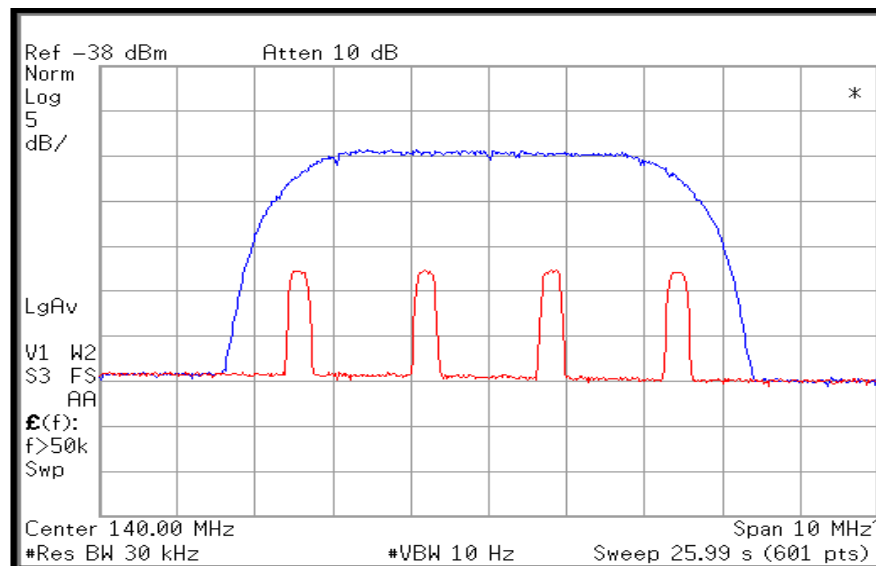


図 5.4-1 2 OB 信号(青)5Msps、IB 信号(赤)240ksps 4 波のキャンセル前

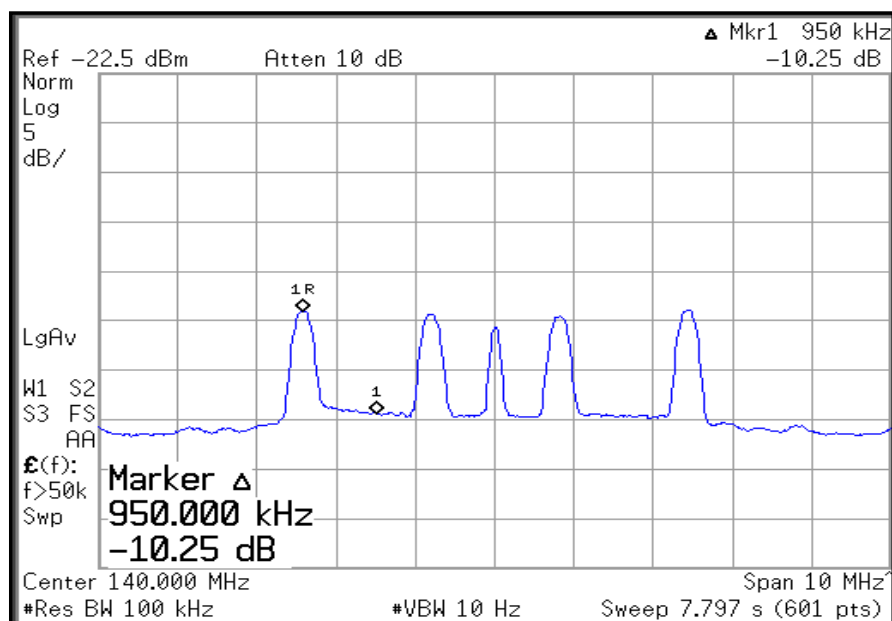


図 5.4-1 3 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps 4 波) (キャンセル信号抑圧量 23dB)

## (2) C 帯の試験結果

C 帯を用いた実環境の試験として基本的なキャンセル特性の実施検証を行った。

OB 信号 5Msps に IB 信号 240ksps を OB 信号と IB 信号の電力密度比 13dB で重畳し、キャンセル量を測定した。IB 信号が 1 波のキャンセル前波形を図 5.4-1 4 に、キャンセル後波形を図 5.4-1 5 に、IB 信号が 2 波のキャンセル前波形を図 5.4-1 6 に、キャンセル後波形を図 5.4-1 7 に、IB 信号が 4 波のキャンセル前波形を図 5.4-1 8 に、キャンセル後波形を図 5.4-1 9 に示す。この結果より、IB 信号が 1 波の場合は 18dB 程度の、IB 信号が 2 波の場合は 19dB 程度の、IB 信号が 4 波の場合は 18dB 程度の抑圧量として確認できた。シミュレーション結果とほぼ一致する。

衛星回線を介した場合でも、IB 信号が増えても不要波復調方式キャンセル装置によって、伝送信号のキャンセルができることが確認された。

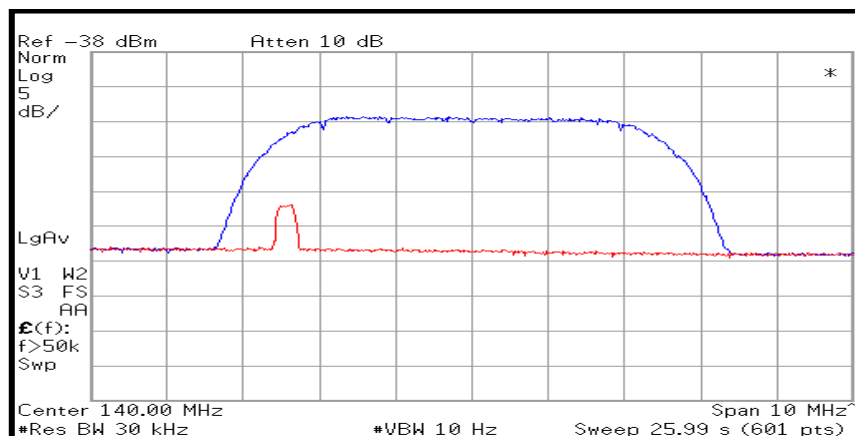


図 5.4-1 4 OB 信号(青)5Msps、IB 信号(赤)240ksps 1 波のキャンセル前

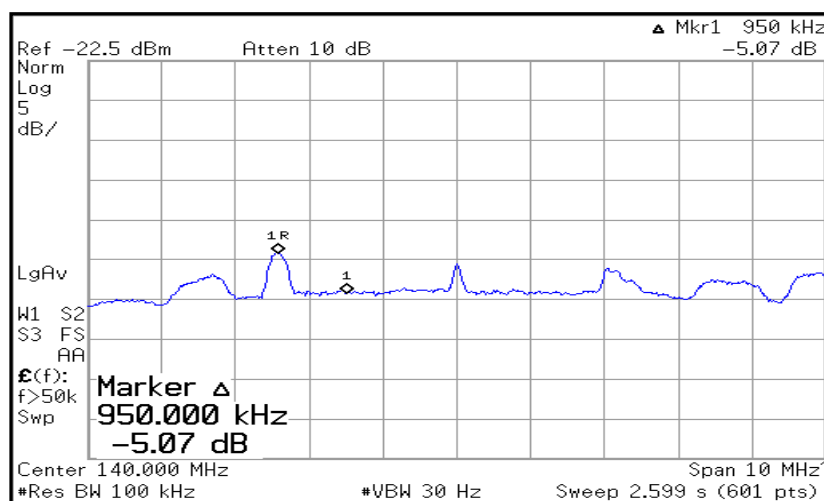


図 5.4-1 5 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps 1 波) (キャンセル信号抑圧量 18dB)



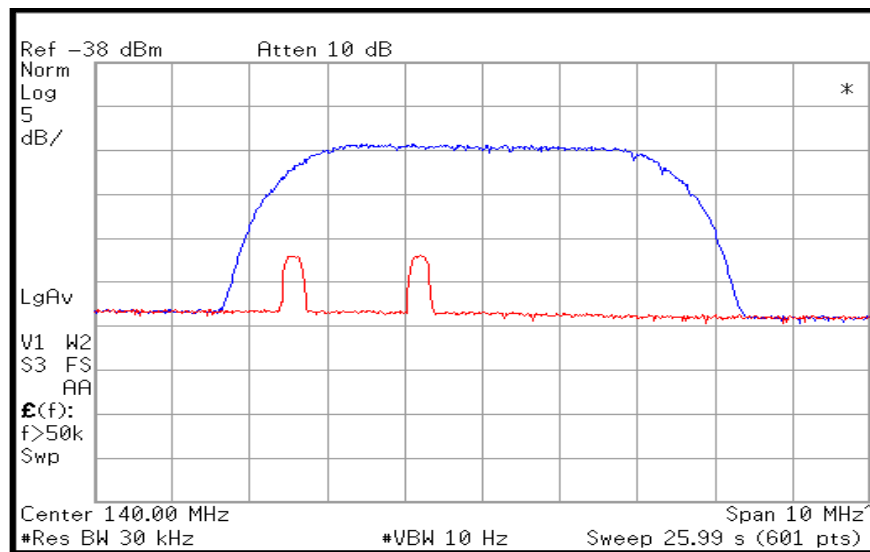


図 5.4-1 6 OB 信号(青)5Mps、IB 信号(赤)240ksps 2 波のキャンセル前

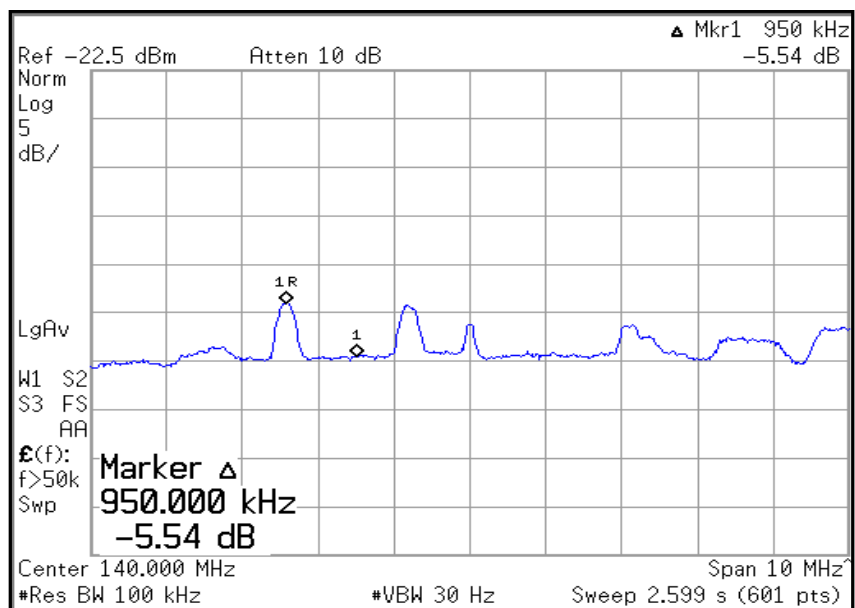


図 5.4-1 7 キャンセル後

(OB 信号 5Mps、IB 信号 240ksps 2 波) (キャンセル量 6dB, OB 抑圧量 19dB)

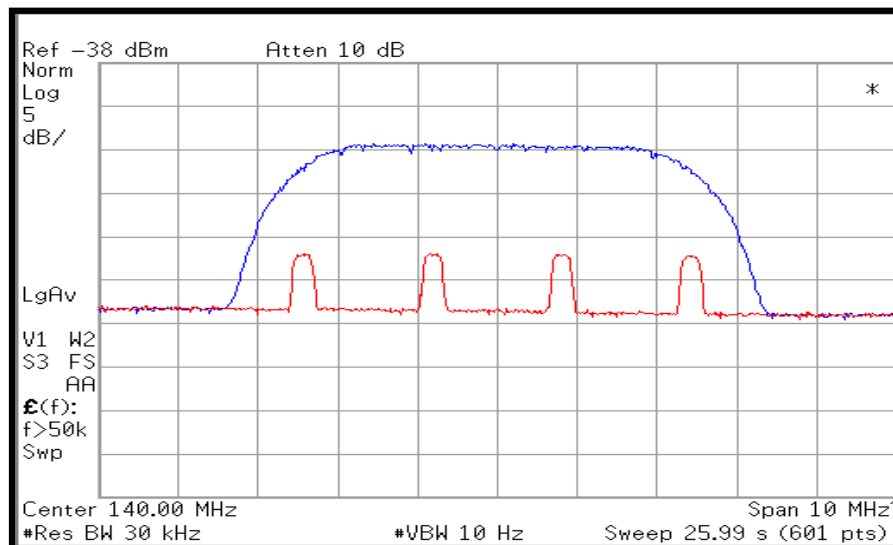


図 5.4-1 8 OB 信号(青) 5Msps、IB 信号(赤) 240ksps 4 波のキャンセル前

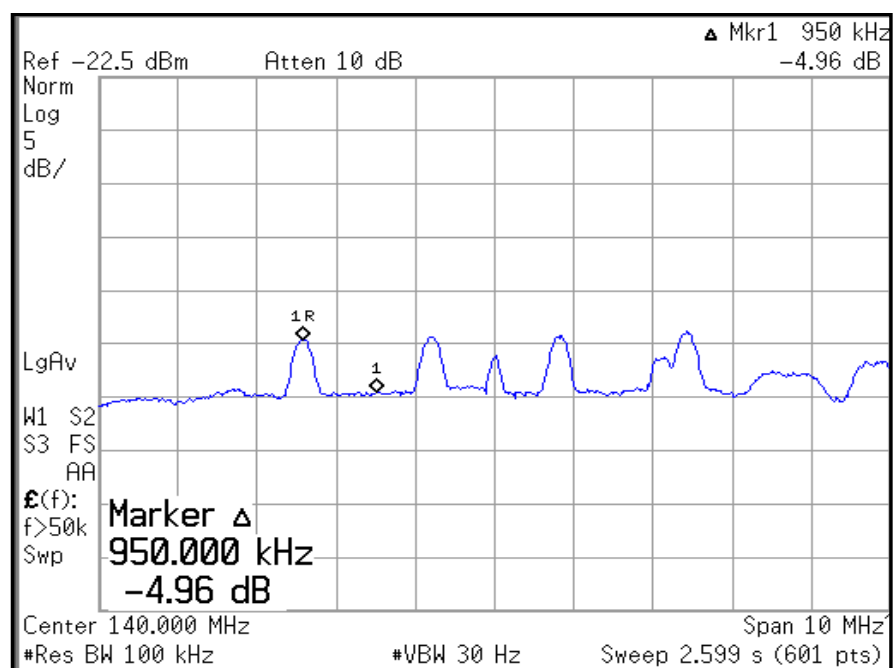


図 5.4-1 9 キャンセル後の波形

(OB 信号 5Msps、IB 信号 240ksps) (キャンセル信号抑圧量 18dB)

## 第6章 試験結果及び総合評価

### 6.1 遅延検出方式キャンセル装置試験の結果と評価

#### 6.1.1 コンピュータシミュレーションの結果と評価

対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の性能検証のために、C++によりコンピュータシミュレーションモデルを構築し、系全体のコンピュータシミュレーションを行った。コンピュータシミュレーションでは、OB 信号およびIB 信号を、5Msps、10Msps および 20 Msps とし、コンピュータシミュレーションを実施し、以下の結果が得られた。

- 遅延検出方式における試験装置の制御方式の動作を検証し、パラメータ（位相、振幅、タイミング等）を決定することができた。
- 遅延検出方式における試験装置において、EMF の動作を確認するとともに、動作パラメータ（相関長 64 ステップ等）を決定することができた。
- 遅延検出方式によるキャンセル信号抑圧量については、OB の信号が、20Msps の場合 40dB 程度に、抑圧されることを確認した。これにより、コンピュータシミュレーションにおいて、遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術が有効であることが確認された。
- 遅延検出方式による C/N に対するビット誤り率(BER)特性については、IB の各信号レートにおいて理論値に比べて、全体として約 1dB 以内の C/N の低下であることを確認した。これにより、コンピュータシミュレーションにおいて、遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術が有効であることが確認された。
- 以上の試験結果により、コンピュータシミュレーションにおいて、対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性が、確認された。

#### 6.1.2 機能確認試験結果と評価

対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の試験装置（以下、「遅延検出方式キャンセル装置」という）を試作し、室内機能確認試験が実施された。遅延検出方式キャンセル装置は FPGA 及びその周辺回路である変復調装置、A/D・D/A 変換器で構成されている。装置の中心要素である FPGA には ALTERA 社製（型番：EP2S130F1020CS）が使用された。試験システムの中心部である FPGA の動作プログラムは、C++で作成されたコンピュータシミュレーションのソースコードから VHDL による記述に変換されてから作成された。以上の遅延検出方式キャンセル装置により、IF レベル及び C 帯並びに Ku 帯の室内折り返し機能確認試験が実施され、以下の結果を得た。

- 周波数安定度については、室内機能確認試験及び衛星通信回線による電波伝送試験

を実施するのに十分な周波数安定度を持っていることが確認された。

- 占有周波数帯域、スプリアス、コンスタレーションについて必要なデータを取得し、試験装置が、電波法などに基づく、所定の性能であることを確認した。
- 遅延検出方式キャンセル装置における C/N に対する BER 特性については、20 Msps の場合には、 $BER=10^{-2}$  程度が音声通信として必要なビット誤り率であることから、 $BER=10^{-2}$  で評価することとすると、 $BER=10^{-2}$  で理論値と比較して、2dB 以内の低下であり、通常必要とされる C/N が理論値から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性であることから、遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性が確認された。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。従って、遅延検出方式キャンセル装置および遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性は確認できたといえる。
- 遅延検出方式キャンセル装置のキャンセル信号抑圧量として、20Msps の場合で、最大 18dB の抑圧を確認した。キャンセル信号抑圧量としては、数 dB あれば十分であると考えられることから、実用上は、十分な値と考えられる。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。従って、遅延検出方式キャンセル装置および遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性は確認できたといえる。
- 遅延検出方式キャンセル装置における隣接キャリアの影響下における伝送評価特性としては、20 Msps の場合、隣接チャンネル信号が存在することにより、影響が確認されたが、理論値に比較して、 $BER=10^{-2}$  で 4dB 程度の低下であり、通常必要とされる C/N が理論値から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性であり、動作確認については十分な値が得られた。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。従って、遅延検出方式キャンセル装置の有効性は確認できたといえる。

なお、実用の上では、一般に誤り訂正符号を利用する場合があります、この場合は、さらに特性が改善される。

- 遅延検出方式キャンセル装置における伝送路による非直線性に対する特性としては、出力バックオフ (OBO) が 10dB、6dB 及び 3dB について C/N 対 BER 特性を取得した。衛星通信回線で通常使用される範囲の OBO である 6dB 及び 10 dB では、若干の低下が見られた程度であった。一方で、通常は利用されない高出力レベルである OBO が 3 dB のケースでは伝送系の強い非直線性の影響を受けている。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。さらに、C 帯は、Ku 帯より大気減衰(Ku 帯で約 $3 \times 10^{-2}$  dB /km, C 帯で、約 $6 \times 10^{-3}$  dB /km)など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、Ku 帯で機能が確認されれば、C 帯での改善は期待できるため、実際上の問題はない

と考えられる。このように、適切なレベルが保たれた伝送路であれば、対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術が有効であることが確認できた。

- 以上のとおり、遅延検出方式キャンセル装置における室内機能確認試験の結果により、対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性が確認された。

### 6.1.3 電波伝送試験結果と評価

C 帯及び Ku 帯の衛星通信回線を用いて、対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の機能確認試験を、室内機能確認試験で使用した遅延検出方式キャンセル装置を用い、実施した。本試験は、実環境である衛星通信回線を介しており、より実用に近い結果が期待できるところであり、以下の結果が得られた。

- 遅延検出方式キャンセル装置の C/N に対するビット誤り率(BER)特性としては、室内機能確認試験に比べ、低下が見られたが、主として、衛星通信回線を使用したために雑音等の外乱によるものと考えられ、Ku 帯の  $BER=10^{-2}$  における OB/IB 信号 20Msps において、理論値に比べて、4 dB 程度の低下であり、通常必要とされる C/N が理論値から 6dB 程度の範囲であることを考慮すると許容範囲内の特性であり、動作確認としては有効な値が確認されたといえる。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。さらに、C 帯は、Ku 帯より大気減衰 (Ku 帯で、約  $-3 \times 10^{-2}$  dB /km, C 帯で、約  $-6 \times 10^{-3}$  dB /km) など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、Ku 帯で機能が確認されれば、C 帯での改善は期待できるため、実際上の問題はないと考えられる。従って、遅延検出方式キャンセル装置の有効性は確認できたといえる。

なお、実用の上では、一般に誤り訂正符号を利用する場合があります、この場合は、さらに特性が改善される。

- 遅延検出方式キャンセル装置のキャンセル信号抑圧量としては、上記と同様に衛星通信回線を使用したために雑音等の外乱により、室内機能確認試験に比べて性能が低下しているが、Ku 帯および C 帯では、OB 信号 20Msps において、6dB 程度のキャンセル量が観測され、キャンセル信号抑圧量は数 dB あれば十分と考えられることから、動作確認にとしては十分な値が得られた。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。従って、遅延検出方式キャンセル装置の有効性は確認できたといえる。
- 遅延検出方式キャンセル装置における隣接キャリアの影響下における C/N に対するビット誤り率(BER)特性としては、隣接キャリアの影響による特性の低下が観測され

たが、Ku 帯における OB/IB 信号 20Msps での低下は、隣接キャリアのない場合から 1dB 程度の低下であり、理論値と比べても 5dB の低下であることから、動作確認としては有効な値が確認されたといえる。また、20Msps での可能性が確認されれば、10Msps および 5Msps でのキャンセル信号抑圧量の改善は期待できるところである。さらに、C 帯は、Ku 帯より大気減衰 (Ku 帯で、約  $-3 \times 10^{-2}$  dB /km, C 帯で、約  $-6 \times 10^{-3}$  dB /km) など伝送上の外乱は、少ないと考えられることから、実際上の問題はないと考えられる。従って、遅延検出方式キャンセル装置の有効性は確認できたといえる。

なお、実用の上では、一般に誤り訂正符号を利用する場合があります、この場合は、さらに特性が改善される。

- 以上のとおり、衛星回線を介した機能確認試験の結果により、対向衛星回線における遅延検出方式による伝送信号重畳・キャンセル技術は、対向方式の衛星通信システムに適用できることが確認された。

## 6.2 不要波復調方式キャンセル装置試験の結果と評価

### 6.2.1 コンピュータシミュレーションの結果と評価

VSAT 用不要波復調方式の伝送信号重畳・キャンセル技術によるキャンセラおよびテスト用の各ユニットを C++ のリファレンスモデルを構築し、系全体のコンピュータシミュレーションを行った。コンピュータシミュレーションでは、OB 信号 5Msps、10Msps および 20 Msps とし、IB 信号 1 Msps の複数波を発生させ、各信号レートについて、キャンセル信号抑圧量及び IB 信号の C/N に対する BER 特性を測定した。その結果、以下の点が確認された。

- 不要波復調方式によるキャンセル信号抑圧量としては、OB 信号と IB 信号 1 波の場合のキャンセル量として約 35dB 以上が、確保されることが確認できた。平成 18 年度での同様の試験結果と比べて、平成 19 年度の性能改善（回路等の変更）を反映した上で同程度の値が得られており、シミュレーション上でも有効な技術であることが確認できた。
- 不要波復調方式における C/N に対する BER 特性については、OB の信号が 5 Msps に対しては、全ケースとも理論値に比べ 1～2dB 低下している。10Msps では、全ケースで、2dB 程度の低下となり、20 Msps では全ケースで約 3dB 程度の低下である。これらの BER 特性の低下は、コンピュータシミュレーションにおいて、平成 18 年度の結果と比べて、平成 19 年度の性能改善（回路等の変更）を反映した上で同程度の値が得られており、コンピュータシミュレーション上でも有効な技術であることが確認できた。
- 以上のコンピュータシミュレーションの結果から、平成 19 年度における性能改善のための回路等の改善を行った場合において、平成 18 年度における不要波復調方式の試験結果とほぼ同等の結果が得られたことが確認できた。これは、平成 19 年度に設計した改善部分について、コンピュータシミュレーション上もほぼ理論値に近い特性が得られたことが示されているものであり、平成 19 年度に実施した性能改善が有効であることが確認されたものである。また、不要波復調方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性を確認した。

### 6.2.2 機能確認試験結果と評価

試作した VSAT 用不要波復調方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の装置（以下、「不要波復調方式キャンセル装置」という）を用いて、IF 信号及び C 帯並びに Ku 帯の室内折り返し機能確認試験を実施し、以下の結果が確認された。

- 周波数安定度、占有周波数帯域、スプリアス、コンスタレーションについて必要なデータ取得を実施し、電波法等に基づく所定の性能であることを確認した。
- 不要波復調方式キャンセル装置によるキャンセル信号抑圧量としては、最大 28dB の抑圧を確認した（5Msps の場合）。平成 18 年度における不要波復調方式の試験結果では、30dB 以上の抑圧量となっているが、これは、固定パターンの信号により得られたものであるが、平成 19 年度に設計した性能改善による回路等の改善を行った上で有効な値が得られており、また、この結果から、キャンセル信号抑圧量としては、数 dB あれば十分と考えられることから、今回実施した機能確認試験により、十分な性能改善結果が得られているものと考えられる。
- 不要波復調方式キャンセル装置における C/N に対する BER 特性については、理論値と比べると低い値となっている。しかし、平成 18 年度の同様の試験結果と比較してみると、OB 信号 5Msps では、全体として、平成 19 年度の不要波復調方式の試験結果では、約 3dB 程度改善されている。以上により、今回実施した機能確認試験により、十分な性能改善結果が得られているものと考えられる。
- 不要波復調方式キャンセル装置による伝送路における非直線性に対する特性としては、出力バックオフ(OBO)が 10dB、6dB 及び 3dB についてキャンセル抑圧量データを取得し、10 dB 以上の場合には、伝送路における非直線性の影響をあまり受けないことから、OBO としては、10dB 程度確保する必要性が確認された。
- 以上から、VSAT 用不要波復調方式による伝送信号重畳・キャンセル技術の有効性が確認されるとともに、機能確認試験により、性能改善結果が得られることが確認された。

## 6. 2. 3 電波伝送試験結果と評価

C 帯及び Ku 帯の衛星通信回線を用いた VSAT 用不要波復調方式キャンセル装置による機能確認試験を実施し、以下の結果が確認された。

- 不要波復調方式キャンセル装置による C/N に対する BER 特性としては、平成 19 年度の不要波復調方式キャンセル装置の性能改善の試験結果は、平成 18 年度の不要波復調方式キャンセル装置の試験結果と比べて、Ku 帯および C 帯での OB 信号 5Msps で、全体として、約 3dB 程度の改善が見られ、性能改善が確認できた。  
 なお、Ku 帯および C 帯で取得された C/N に対する BER 特性の、室内機能確認試験結果からの低下は、主として、衛星通信回線を使用したために雑音等の外乱によるものと考えられる。
- 不要波復調方式キャンセル装置によるキャンセル信号抑圧量としては、Ku 帯の OB 信号 5Msps の場合は 24dB 程度の抑圧量であり、C 帯の OB 信号 5Msps の場合は 20dB



程度の抑圧量であることが、確認できた。これらの値は衛星通信回線を使用したために、固有の振幅・位相雑音等の外乱により室内機能確認試験での抑圧量から低下しているが、キャンセル信号抑圧量としては数 dB あれば十分と考えられることから、平成 19 年度に実施した性能改善による回路等の変更を反映したものとして、十分な特性が得られたものといえる。なお、変更前の試験結果については、信号を固定パターンとしているが、ここではランダムパターンとしている。

- 以上により、VSAT 用不要波復調方式による伝送信号重畳・キャンセル技術が、VSAT による衛星通信システムに適用できることが確認されるとともに、電波伝送試験により、性能改善結果が得られたことが確認された。

### 6.3 総合評価

対向回線による衛星通信システムにおいて、不要波を復調しキャンセルする方式について、検討し、コンピュータシミュレーションを行うとともに、室内折り返しによる機能確認試験および衛星通信回線による機能確認試験を行った。この結果、遅延検出方式を対向回線に適用して希望波を取り出す基本的なキャンセル動作を確認するとともに、C/N に対する BER 特性等の技術データを取得することができ、対向方式の衛星回線に、遅延検出方式の伝送信号重畳・キャンセル技術を適用できることが確認された。

また、VSAT 回線による衛星通信システムにおいて、不要波を復調しキャンセルする方式について検討し、コンピュータシミュレーションを行うとともに、室内折り返しによる機能確認試験及び衛星通信回線による機能確認試験を行った。その結果、性能改善が得られることが確認された。

なお、製品化にあたっては、近い将来に販売が予定されている演算精度の向上した FPGA を用いた場合、回路の精度が一桁程度高められる見通しであり、C/N に対する BER 特性について、理論値に近い特性となることが見込まれる。

## おわりに

平成 19 年度は、対向回線の衛星通信システムに、伝送信号を重畳させる構成で、レプリカ生成方法に遅延検出方式を適用して、コンピュータシミュレーション、試験システムによる室内機能確認試験及び衛星通信回線を介した機能確認試験を行った。この結果、遅延検出方式を対向回線に適用して希望波を取り出すキャンセル動作を確認し、各種の技術データを取得することができた。

また、平成 19 年度に性能改善を施した VSAT 回線用不要波復調方式について、コンピュータシミュレーション、室内機能確認試験及び衛星通信回線を介した機能確認試験を行った。その結果、平成 19 年度の性能改善により、VSAT 回線用不要波復調方式については、性能改善が図られることが確認された。

本年度の結果は、今後、VSAT 回線衛星通信回線におけるレプリカ生成方法に遅延検出方式を採用する際の検討資料として活用されることが期待される。

おわりに、審議にあたり適切なご指導を頂いた総務省総合通信基盤局電波部衛星移動通信課をはじめ、本調査検討会において審議にご尽力を頂いた田中主査、各委員並びに作業部会の各委員に厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 「衛星通信ガイドブック 2006」、サテマガ・ビー・アイ（有）、P45、Mar 2006
  
- [2] M.D. Dankberg, M.J. Miler, M.G. Mulligan; SELF-INTERFERENCE CANCELLATION FOR TWO-PARTY RELAYED COMMUNICATION, The ViaSat Inc. United States Patent, Patent No.5596439, 1997, Jan, 21.
  
- [3] M.D. Dankberg, M.J.Miler, M.G.Mulligan; SELF-INTERFERENCE CANCELLATION FOR TWO-PARTY RELAYED COMMUNICATION, The ViaSat Inc. United States Patent, Patent No.6011952, 2000, Jan, 4.
  
- [4] T. Sugiyama, H. Kazama, M. Morikura, S. Kubota, S. Kato; Burst Mode Interference Cancellation for Superposed Transmission of SSMA-QPSK Signals and TDMA-QPSK Signal in Nonlinear Channels, IEEE GLOBECOM'93, pp.1612-1616, 1993.
  
- [5] 石田 則明、「帯域共用衛星通信方式」、信学論（B）、vol.J82-B, no.8, pp.1531-1537, Aug 1999.
  
- [6] 俊長 秀紀、小林 聖、大幡 浩平、風間 宏志、「重畳伝送を適用するマルチメディア衛星通信用干渉除去法の検討」、信学技報、SAT2000-86, Dec 2000.
  
- [7] 原 孝雄、市川 通啓、岡田 実、山本 平一、「VSAT 衛星通信における周波数再利用キャリア重畳方式と信号キャンセラの設計」、信学論（B）、vol.J88-B, no.7, pp.1300-1309, July 2005.
  
- [8] H. Kobashi, M. Osato, T. Hara, M. Okada, H. Yamamoto; Signal Cancellation for Satellite Frequency Reuse by Carrier Super-positioning Multi-level Modulation, ISCC, June 2006.
  
- [9] 山本 平一、「衛星通信」、pp.200-210, 丸善株式会社、平成5年9月30日発行

(参考)

衛星通信においては、誤り訂正符号の利用は一般的であり、以下に誤り訂正符号について説明する。

誤り訂正符号とは、データ転送における誤り制御システムである。メッセージ送信者がメッセージに冗長性を付与することで、追加情報を送信者に要求することなく、受信者が誤りを（ある時間以内に）検出し訂正することを可能にするものである。

衛星通信では、長距離において大量の情報を伝送するため、誤り訂正符号の使用が一般的であり、ブロック符号、畳み込み符号、リードソロモン符号、ターボ符号、LDPC 符号などが利用される。

## ア 動作原理

誤り訂正符号は、転送すべき情報に予め設定されたアルゴリズムに従って冗長性を付与することで可能となる。それぞれの冗長ビットは常に、多数の本来の情報ビット群を引数とする複雑な関数となっている。

誤り訂正符号は、ノイズ平均化の手法を利用している。個々のデータビットが転送すべき複数のシンボルに関わっているため、一部がノイズによって破壊されても本来のユーザーデータをそこから引き出すことができるのである。

## イ 誤り訂正符号の種類

誤り訂正符号はブロック符号と畳み込み符号に分類される。

### (1) ブロック符号

ブロック符号では、入力情報のビット列やシンボル列を固定サイズのブロック（パケット）に分割した上で符号化する。

ブロック符号には様々な種類があるが、最も有名な符号はコンパクトディスクや DVD やコンピュータのディスクドライブで広く使われているリード・ソロモン符号であろう。他にもゴレイ符号、BCH 符号、ハミング符号などがある。

ハミング符号は、情報機器の主要なメモリである NAND 型フラッシュメモリでの誤り訂正に使われている。これは、2 ビット誤り検出・1 ビット誤り訂正方式である。ハミング符号はより信頼性の高い SLC (single level cell) NAND でのみ使われている。より高密度な MLC (multi level cell) NAND では、もっと強力な多ビット訂正が可能な ECC として、BCH 符号やリード・ソロモン符号が使われている。

## （２）リードソロモン符号

リードソロモン(Reed-Solomon)符号は、シンボル単位で誤り訂正を行う符号である。誤りが集中して生じるバーストでの誤り訂正を小さく抑えるためには、シンボル単位で誤り訂正ができると一度に数ビットの訂正ができる。リードソロモン符号の ITU-T の標準規格では、業界標準で、7dB 程度の符号化利得がある。

## （３）畳み込み符号

畳み込み符号では、過去の情報データを用いて符号化される。任意長のビット列やシンボル列を対象とし、必要ならブロック符号に変換可能である。また、畳み込み符号はビタビアルゴリズムを使って復号化されることが多い。

## （４）ブロック符号と畳み込み符号の連結による誤り削減

ブロック符号と畳み込み符号を連結することで、誤り訂正能力を高めることができる。一般に畳み込み符号を基本とし、畳み込み符号の復号器で起きた誤りをブロック符号で訂正する。1986 年にボイジャー2 号が天王星に接近した際に初めて使われて以来、この手法は人工衛星や宇宙探査での通信に標準的に使用されている。

## （５）ターボ符号

誤り訂正符号における最近（1990 年代初期）の進展としてターボ符号がある。1993 年にフランスの Berrou 氏らによって提案された。この方式では、2 つ以上の比較的単純な畳み込み符号を用い、インタリーバ（情報ビットの並び替えを行い、情報ビットの偏りをなくすことにより符号化複合化の処理を容易にする装置）と呼ばれる機構によってブロック符号を生成し、シャノン限界（通信伝送路の伝送容量の理論限界の最大を示す）に迫る性能を発揮する。

ターボ符号の最初の商用利用の 1 つとして 携帯電話の通信方式 CDMA2000 1x (TIA IS-2000) がある。NASA の火星探査ミッション（マーズ・リコネッサンス・オービター）などで利用されている。また、平成 17 年 12 月には、日本の通信機器製造会社が、誤り率 2 % の情報に適用でき、符号化利得 10dB 以上である、ターボ符号による誤り訂正装置 (LSI) を発表している。

## （６）LDPC 符号(低密度パリティチェック符号)

低密度パリティ検査(Low Density Parity Check : LDPC)符号は、1962 年に Robert G. Gallager 氏が開発したが、当時は、符号長 (n) が大きいと計算量が莫大になるなどの理由ですぐに忘れ去られてしまった。その後 1999 年に MacKay らによってシャノン限界（通信伝送路の伝送容量の理論限界の最大を示す）に近い誤り訂正特性を実現することを再評価され、注目を集めている。LDPC 符号では、情報を多くの 0 とわずかな 1 からなる

行列を用い、符号化し、基本となる復号処理を何度も反復して並列処理することにより、復号する。現在では衛星デジタル・テレビ放送の DVB-S2 や、IEEE802.16e(モバイル WiMAX)等にも採用されている。ターボ符号より優れた誤り訂正が期待される。

## 略語・解説

| 略号     | 正式名称                                           | 日本語訳・内容                                                                                                                                                                                                                    |
|--------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADC    | Analog to Digital Conveter                     | アナログ信号をデジタル信号に変換する回路。                                                                                                                                                                                                      |
| AGC    | Automatic Gain Control                         | 電子回路の一種で、入力信号のレベルの大小にかかわらず出力を常に一定に保つための補助回路。                                                                                                                                                                               |
| AWGN   | Additive White Gaussian Noise                  | 加法的白色正規雑音。全ての周波数で同じ強さを持ち（白色）、振幅が正規分布を持つ雑音。                                                                                                                                                                                 |
| BER    | Bit Error Rate                                 | ビット誤り率。                                                                                                                                                                                                                    |
| C band | C 帯                                            | マイクロ波の周波数帯の名称、上り 6GHz 帯、下り 4GHz 帯。                                                                                                                                                                                         |
| C/N    | Carrier to Noise Power Ratio                   | 搬送波対雑音比、信号対雑音電力比。                                                                                                                                                                                                          |
| DEM    | Demodulator                                    | 信号復調器                                                                                                                                                                                                                      |
| DQPSK  | Differential Quadrature Phase Shift Keying     | 差動四相位相偏移変調。デジタル信号の変調方式のひとつで、変調された 4 つの位相にそれぞれ 2 ビットのデータを割り当てることのできる方式のこと。                                                                                                                                                  |
| D/U    | Desired Signal to Undesired Signal Power Ratio | 信号対干渉電力比。電気通信分野では処理対象の情報を信号（Signal と呼び、雑音（Noise）との量との比率（S/N）によって通信の品質を表現する。これを信号対雑音比といい、対数表現の dB（デシベル）で表す。S/N、SNR : Signal to Noise Ratio、SN 比（エスエヌ比）と略することが多い。Desired Signal to Undesired Signal Ratio、D/U ratio ととも呼ばれる。 |
| EIRP   | Equivalent Isotropically Radiated Power        | 実効等方放射電力。出力と送信アンテナの利得との積                                                                                                                                                                                                   |
| FDM    | Frequency Division Multiplexing                | 複数の回線を束ねて 1 つの 1 本の回線を共用する多重化技術の一つ。共用回線の周波数帯域を等分して複数の回線に割り当て、合成波として送受信を行なう方式。                                                                                                                                              |
| FDMA   | Frequency Division Multiple Access             | 周波数分割多元接続方式。多元接続方式の一つ。与えられた周波数帯域を一定の周波数間隔で分割して複数のチャネルを作り、送信側は空いているチャネルで信号を送る方式。                                                                                                                                            |
| FPGA   | Field Programmable Gate Array                  | プログラミンクすることができる LSI のこと。マイクロプロセッサや ASIC の設計図を送りこんでシミュレーションすることができる。                                                                                                                                                        |



| 略号                | 正式名称                                                    | 日本語訳・内容                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| G/T               | Gain over Temperature                                   | 受信局の性能を示す指数。アンテナ利得と受信機雑音指数の比で表す。                                                              |
| IB                | Inbound                                                 | あるシステムやネットワークが外部から受信されたデータのこと。                                                                |
| IQ 信号             |                                                         | 実部— I (In-phase) 信号、<br>虚部— Q (Quadrature-phase) 信号                                           |
| K band            | K 帯                                                     | 無線通信の周波数帯の一つで、12～18GHz の周波数帯。衛星通信で使用される。                                                      |
| OB                | Outbound                                                | あるシステムやネットワークから外部に送信された情報のこと。                                                                 |
| OSC               | Oscillator                                              | 発振器                                                                                           |
| PCMA              | Paired Carrier Multiple Access                          | 周波数分割多元接続方式において、下りのキャリアを同一周波数帯域に重ねて重畳する方式。                                                    |
| P-MP VSAT System  | Point to Multipoint Very Small Aperture Terminal System | P-MP ネットワークの接続形態のうち、ひとつのシステムが複数のシステムと接続されているような接続形態。                                          |
| P-P paired system | Pont to Point paired system                             | 対向回線システム。                                                                                     |
| QPSK              | Quadrature Phase Shift Keying                           | 4 位相偏移変調。デジタル値をアナログ信号に変換する変調方式の一つ。位相のずれた複数の波の組み合わせで情報を表現する位相偏移変調方式の一種。                        |
| SCPC              | Single Channel Per Carrier                              | キャリアごとの単一チャネルを意味する。SCPC は各チャネルが各々のキャリアを持つ衛星通信の形態。                                             |
| SSMA              | Spread Spectrum Multiple Access                         | スペクトル拡散多元接続。多元接続方式の 1 つ。与えられた周波数帯域をそれぞれ異なる符号形式(コードパターン)で分割して複数のチャネルを作り、各局に割り当てる方式 (CDMA) の別名。 |
| TDM               | Time Division Multiplexing                              | 複数の回線を束ねて 1 つの 1 本の回線を共用する多重化方式の一つ。共用回線を使用する時間を分割し、複数の回線に順番に割り当てる方式。                          |
| TDMA              | Time Division Multiple Access                           | 時分割多元接続方式。一つの周波数帯の電波を時間軸上で等間隔に分割 (分割単位をスロットと呼ぶ) し、デジタル化した情報をこのスロットに乗せて伝送する方式。                 |

| 略号    | 正式名称                                            | 日本語訳・内容                                                                                        |
|-------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VSAT  | Very Small Aperture Terminal                    | 陸上に開設する通信衛星用の超小型地球局。                                                                           |
| VHDL  | VHSIC Hardware Description Language             | VHSIC の仕様記述用に米国国防省を中心に標準化されたハードウェア記述言語。言語使用が論理記述からアナログ回路の動作記述まで可能にするための、各種ライブラリ、パッケージが用意されている。 |
| WiMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access | 2005 年 IEEE（米国電気電子学会）で承認された、固定及び移動無線通信の標準規格である IEEE 802.16 規格の一般名称。                            |

引用：情報通信・法令用語辞典（財電気通信振興会）  
IT 用語辞典 e-Word (<http://e-words.jp/>)

## 付録 1 調査検討会設置要綱

### 「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術 に関する調査検討会」設置要綱

平成 19 年 7 月 31 日

財団法人マルチメディア振興センター

#### 1 名称

本検討会は、「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討会」（以下「調査検討会」という。）と称する。

#### 2 背景と目的

##### （1）背景

衛星通信システムは、広範囲にわたる長距離通信及び同報通信が可能であるという衛星特有の特徴を生かし、電気通信業務、人命・財産の保護及び治安維持等に利用されているところであるが、今後のグローバルな IP 化・ブロードバンド化に対応するため、衛星通信システムにおいても干渉に強く同じ帯域幅でより大容量の通信が可能な方式の導入が望まれている。また、平成 21 年度から全国的なデジタル放送開始により、デジタルコンテンツの流通が今後より一層増大することが想定され、衛星通信においても膨大なデジタルコンテンツの伝送に対応したシステムを早急に構築する必要がある。

そのため、近年の周波数逼迫の状況を踏まえると、衛星通信用周波数幅をより有効に利用して通信を行う周波数有効利用技術が重要となる。

##### （2）目的

本調査検討会では、上下回線の周波数帯域を重畳することにより、周波数利用率が大幅に増大し、第三者傍受が不可能であるといった強固な秘匿性等の特徴を有する重畳・キャンセル技術を利用した衛星通信システムの技術的条件の検討を行うことを目的とする。

#### 3 調査検討項目

本調査検討会は以下の項目について調査検討を行い、その結果をとりまとめる。

- （1）衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討
- （2）コンピュータシミュレーションによる理論検討
- （3）試験システムの構築における機能確認試験

- (4) 衛星システムにおける電波伝送試験

#### 4 構成

- (1) 本調査検討会は、主査、副主査、委員及びオブザーバにより構成し、その構成員は別紙のとおりとする。
- (2) 本調査検討会には、必要に応じて作業部会を置くことができ、その構成員は調査検討会において定める。

#### 5 運営

- (1) 調査検討会は、主査が招集し、主宰する。
- (2) 主査は、主査を補佐する副主査を指名することができる。
- (3) その他、調査検討会の運営に関する事項は、調査検討会において定める。

#### 6 設置期間等

- (1) 調査検討会は、財団法人マルチメディア振興センターに設置する。
- (2) 調査検討会は、設置の日から別途定める日までの間（3年間を予定）設置する。

#### 7 事務局

調査検討会の事務局は、財団法人マルチメディア振興センターが行う。

#### 8 成果の公表等

- (1) 調査検討会における検討事項に関する成果を公表する場合には、原則として、財団法人マルチメディア振興センター及び総務省の承認を得るものとする。
- (2) 調査検討結果の報告書に関するすべての著作権は、総務省に帰属する。

## 付録 2 調査検討会構成員名簿

衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討会

構成員名簿(平成 19 年度)

(会社／機関名 50 音順、敬称略)

|       | 氏 名   | 所 属                                                         |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------|
| 主査    | 田中 將義 | 学校法人 日本大学<br>生産工学部 電気電子工学科 教授                               |
| 副主査   | 岡田 実  | 国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学<br>情報科学研究科 教授                          |
| 委員    | 井原 俊夫 | 学校法人 関東学院大学 教授<br>電気電子情報工学科長                                |
| 委員    | 平良 真一 | 独立行政法人 情報通信研究機構<br>新世代ワイヤレス研究センター<br>宇宙通信ネットワークグループ 研究マネジャー |
| 委員    | 加藤 聡彦 | 国立大学法人 電気通信大学<br>大学院 情報システム学研究科 教授                          |
| 委員    | 水野 秀樹 | 学校法人 東海大学<br>開発工学部 情報通信工学科 教授                               |
| 委員    | 堀 俊和  | 国立大学法人 福井大学<br>大学院工学研究科 情報・メディア工学専攻 教授                      |
| オブザーバ | 井手 信二 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 課長補佐                          |
| オブザーバ | 工藤 誠之 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 係長                            |
| オブザーバ | 小澤 亮二 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 総務技官                          |
| 事務局   | 中田 一夫 | 財団法人マルチメディア振興センター                                           |
| 事務局   | 佐川 永一 | 財団法人マルチメディア振興センター                                           |
| 事務局   | 伊東 正道 | 財団法人マルチメディア振興センター                                           |

## 付録 3 作業部会設置要綱

### 「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術 に関する作業部会」設置要綱

平成 19 年 7 月 31 日

財団法人マルチメディア振興センター

#### 1 名称

本作業部会は、「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する作業部会」（以下「作業部会」という。）と称する。

#### 2 背景と目的

##### （1）背景

衛星通信システムは、広範囲にわたる長距離通信及び同報通信が可能であるという衛星特有の特徴を生かし、電気通信業務、人命・財産の保護及び治安維持等に利用されているところであるが、今後のグローバルな IP 化・ブロードバンド化に対応するため、衛星通信システムにおいても干渉に強く同じ帯域幅でより大容量の通信が可能な方式の導入が望まれている。また、平成 21 年度から全国的なデジタル放送開始により、デジタルコンテンツの流通が今後より一層増大することが想定され、衛星通信においても膨大なデジタルコンテンツの伝送に対応したシステムを早急に構築する必要がある。

そのため、近年の周波数逼迫の状況を踏まえると、衛星通信用周波数幅をより有効に利用して通信を行う周波数有効利用技術が重要となる。

##### （2）目的

上下回線の周波数帯域を重畳することにより、周波数利用効率が大幅に増大し、第三者傍受が不可能であるといった強固な秘匿性等の特徴を有する重畳・キャンセル技術を利用した衛星通信システムの技術的条件の検討を行うことを目的とし、「衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討会」が設置される。その下部組織として「作業部会」を設置し、詳細にわたり検討を行うことを目的とする。

#### 3 作業部会検討項目

本作業部会は以下の項目について細部にわたり検討を行い、その結果をとりまとめ、「調査検討会」にて議論を行うものとする。

- (1) 衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する調査検討
- (2) コンピュータシミュレーションによる理論検討
- (3) 試験システムの構築における機能確認試験
- (4) 衛星システムにおける電波伝送試験

#### 4 構成

- (1) 本作業部会は、作業部会リーダー、副リーダー及びメンバーにより構成し、その構成員は別紙のとおりとする。

#### 5 運営

- (1) 作業部会は、作業部会リーダーが招集し、主宰する。
- (2) 作業部会リーダーは、リーダーを補佐する副リーダーを指名することができる。
- (3) その他、作業部会の運営に関する事項は、作業部会において定める。

#### 6 設置期間等

- (1) 作業部会は、財団法人マルチメディア振興センターに設置する。
- (2) 作業部会は、設置の日から別途定める日までの間（3年間を予定）設置する。

#### 7 事務局

作業部会の事務局は、財団法人マルチメディア振興センターが行う。

#### 8 成果の公表等

- (1) 作業部会における検討事項に関する成果を公表する場合には、原則として、財団法人マルチメディア振興センター及び総務省の承認を得るものとする。

## 付録 4 作業部会構成員名簿

衛星通信用周波数の有効利用のための伝送信号重畳・キャンセル技術に関する作業部会  
構成員名簿（平成 19 年度）

（敬称略）

|       | 氏 名   | 所 属                                        |
|-------|-------|--------------------------------------------|
| リーダー  | 岡田 実  | 国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学<br>情報科学研究科 教授         |
| 副リーダー | 安藤 清武 | JSAT 株式会社 技術本部<br>技術開発部長                   |
| 委員    | 原 孝雄  | 国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学<br>情報科学研究科 准教授        |
| 委員    | 武田 養造 | JSAT 株式会社 技術本部<br>技術開発部担当課長                |
| 委員    | 沢井 義次 | 株式会社ミックス<br>営業部                            |
| 委員    | 牛窪 誠一 | 株式会社ミックス<br>技術部                            |
| 委員    | 仰木 一孝 | 日本通信機株式会社 取締役<br>マイクロ波事業担当<br>マイクロ波技術部主管部長 |
| 委員    | 城田 俊哉 | 日本通信機株式会社<br>マイクロ波技術部 デバイスグループ課長           |
| 委員    | 大久保 寛 | 日本通信機株式会社<br>マイクロ波技術部 システムグループ主事           |
| 委員    | 高橋 博英 | 日本通信機株式会社<br>営業 1 部 営業 2 グループ 担当課長         |
| オブザーバ | 井手 信二 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 課長補佐         |
| オブザーバ | 工藤 誠之 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 係長           |
| オブザーバ | 小澤 亮二 | 総務省<br>総合通信基盤局 電波部<br>衛星移動通信課 総務技官         |
| 事務局   | 中田 一夫 | 財団法人マルチメディア振興センター                          |
| 事務局   | 佐川 永一 | 財団法人マルチメディア振興センター                          |
| 事務局   | 伊東 正道 | 財団法人マルチメディア振興センター                          |