2. 地上デジタル放送の送信技術

2-1. 中継局技術

(正会員) 澁谷 一彦[†]

キーワード 地上デジタル放送、放送波中継、マルチパス等化装置、ダイバーシチ受信装置、同一チャネル干渉除去装置、回り込みキャンセラ

表1 放送波中継における干渉妨害と各種補償器の関係

補償器の名称	処理領域	干渉妨害に対する改善効果				
		回り込み	マルチパス (GI内)	フェージング	マルチパス (GI越え)	同一チャネル干渉
マルチパス等化装置A	周波数	×	◎	×	×	×
マルチパス等化装置B	時間	×	○	×	×	×
マルチパス等化装置C	周波数	×	○	×	◎	×
ダイバーシチ受信装置	周波数	×	◎	◎	×	×
同一チャネル干渉除去装置	周波数	×	○	◎	○	◎
回り込みキャンセラ	時間	◎	○	×	×	×

◎:効果大 ○:効果あり ×:効果なし

1. ま え が き

地上テレビジョン放送をあまねく日本全国に展開するためには、アナログ放送と同様にデジタル放送でも数多くの中継局が必要となる。したがって、中継局設備のコスト削減は経済的な観点からも重要な課題であった。

地上デジタル放送の中継局には、TTL (Transmitter to Transmitter Link) と呼ばれる専用のマイクロ波回線で放送信号の供給を受けるタイプの局と、上位局の放送波を受信して放送信号とする、いわゆる放送波中継局と呼ばれるタイプの局がある。前者は、主に送信タイミングの調整を必要とするSFN (Single Frequency Network) 中継局や、何らかの理由で放送波中継が適用できない中継局に適用される。一方、後者は新たな周波数資源や専用回線設備を必要としないため、周波数有効利用と設備コストの両面で優れているが、上位局より広角に放射されたUHF帯の放送波を受信する際に、伝送信号の品質を劣化させるさまざまな干渉妨害を受ける。こうした干渉妨害は、受信アンテナの工夫や設置場所の選択だけでは対処できない場合が多い。このため、補償器と呼ばれる装置が広く使用されている。補償器には、高性能なLSIが搭載され、高度な信号処理技術が適用されている。

本稿では、地上デジタル放送の中継局技術として、補償器を中心に解説する。現在、使用されている補償器の仕様

と性能は、他の送信設備と同様に、地上デジタル放送送信設備共通仕様書 (通称、オレンジブック) で規定されている。表1に干渉妨害の種類と各種補償器の関係を示す。

2. SFNとMFN

地上デジタル放送方式 (ISDB-T) は、伝送方式にOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を採用しているため、複数の送信局が、同じサービスエリアに向けて、同じ周波数で放送を行うSFNが適用できる。しかし実際には、各送信局が異なる周波数で放送を行うMFN (Multi-Frequency Network) とSFNが、地域事情に応じて使い分けられている。一方、中継局での信号遅延時間をGI (Guard Interval: ガードインタバル) 長と比較して十分に小さくする必要のあるSFN放送波中継局と、ある程度 (ミリ秒オーダー) の遅延が許容されるMFN放送波中継局では、適用される補償器のタイプが異なる。

3. 中継装置の構成¹⁾

放送波中継局には、送受信アンテナを同一鉄塔に設置する送受非分離局と、受信アンテナを送信アンテナから空間的に離して設置する送受分離局の二つのタイプがある。

図1に放送波中継装置の構成例を示す。図1 (a) は送受非分離局の例を、図1 (b) は無給電光伝送装置を用いる送受分離局の例を示している。装置は、基本部と電力増幅部 (PA部) で構成されており、さらに基本部はフロントエンド部と励振部で構成されている。補償器は必要に応じて励振部の送信変換の前段に挿入される。電力増幅器 (PA: Power Amplifier) には、良好なIM (Inter Modulation) 特

[†] NHK 放送技術研究所

"Transmission Technologies for DTTB; Relay Station Technology for Digital Terrestrial Television Broadcasting" by Kazuhiko Shibuya (NHK Science and Technology Research Laboratories, Tokyo)

図1 放送波中継装置の構成例

2台方式など) などによって構成がさまざまに異なる。

4. マルチパス等化装置A, B^{1) 2)}

中継局で受信される上位局波は、直接波の他に、山岳や大地面等からの反射波が含まれている。また、上位局がSFNを構成している場合、他のSFN局からの放送波が、強いマルチパス波として受信されることもある。こうしたマルチパス妨害の対策としては、等化が有効である。オレンジブックで規定されているマルチパス等化装置には、A, B, Cの3タイプがあり、各中継局の事情に合わせて使い分けられている。

AタイプとBタイプのマルチパス等化装置の構成例を図2に示す。

Aタイプは、周波数領域処理型の補償器である。通常の受信機と同様に、時間領域のOFDM信号をFFT (Fast Fourier Transform) して周波数領域のキャリアシンボルとし、基準信号であるSP (Scattered Pilot) の観測値を利用して算出した伝送路応答で、キャリアシンボルを除算することで等化を実現している。ただし、雑音成分や残留歪みを除去するため、等化後のキャリアシンボルを硬判定して送信信号の推定値とし、IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) して時間領域信号に戻した後にGIを付加して出力する点が、通常の受信機とは異なる。Aタイプのマルチパス等化装置は、数シンボル程度の信号遅延が発生する

性と高い電力効率が要求されるため、フィード・フォワード (FF) 方式、アダプティブ・デジタル・プリディストーション (ADPD) 方式、アナログ・プリディストーション (APD) 方式などの歪み補償回路が適用される。なお、実際の中継放送装置は、PA部やフロントエンド部の増幅方式（複数波同時増幅、単独増幅）、各部の冗長方式（1台方式、

図2 マルチパス等化装置の構成例

図3 マルチパス等化装置Cの構成例

ため、ある程度の遅延が許容されるMFN中継局に主に適用される。

一方、Bタイプは、時間領域処理型の補償器である。入力信号を時間領域信号のまま、FIR（Finite Impulse Response）フィルタで等化して出力するため、信号遅延をGI長より小さくすることができる。ただし、FIRフィルタのタップ係数を決定するのに必要な伝送路応答は、Aタイプと同様にSPを利用して算出する。また、Bタイプのマルチパス等化装置には、第7章で述べる回り込みキャンセラと同様に、FIRフィルタを用いたフィードバック回路でマルチパスを等化する構成の装置もある。Bタイプのマルチパス等化装置は、回線構成上、中継局での遅延を小さくしたい場合に適用される。

5. マルチパス等化装置C¹⁾³⁾

Cタイプのマルチパス等化装置は、遅延時間差がGI内のマルチパスに加えて、GIを越えるマルチパス（GI越えマルチパス）も等化する機能を有する周波数領域処理型の補償器である。

放送波中継局の上位局波受信におけるGI越えマルチパス妨害の要因としては、SFNを構成している遠方の送信局からの放送波の他に、大型船舶や山岳からの反射波などが知られている。6章で述べる同一チャネル干渉除去装置もGI越えマルチパス妨害対策に用いることができるが、山岳反射で生じるGI越えマルチパス波のように、到来角度拡がりや遅延拡がり非常に大きい場合には、等化が現実的で有効な方法となる。

図3にCタイプのマルチパス等化装置の構成例を示す。

この装置は、まず、復調するシンボルを含む前後複数シンボルにわたる期間の入力信号を一つのブロックとしてFFTし、周波数領域信号とする。次に、得られた周波数領域信号を伝送路応答で除算することにより、先行波および

遅延波によるGI内およびGI越えマルチパスを一括して等化する。続いて等化後の複数シンボル期間に相当する周波数領域信号から、復調するシンボルのキャリアシンボルを分離、抽出する。さらに、得られたキャリアシンボルをハード判定して残留するマルチパス歪や雑音成分を除去した後に、IFFTして時間領域信号に変換し、GIを付加して出力する。データシンボルを含むすべてのキャリアシンボルのハード判定値を基準信号として伝送路応答を算出するため、先行波と遅延波を合わせて約1msの到来時間幅のマルチパスを検出することができる。GI越えマルチパスの等化に関しては、この他にもさまざまな方法が考案されており、技術的には、今後さらに進歩していくものと思われる。

6. ダイバーシチ受信装置¹⁾²⁾と同一チャネル干渉除去装置¹⁾⁴⁾

上位局との間の伝搬路上に湖や海が存在する場合や、上位局からの距離が非常に長い場合に、減衰量の大きなフェーディングが発生して希望波の受信電力を著しく低下させる場合がある。こうしたフェーディングの対策技術としては、空間的に分離して設置した複数のアンテナから出力される受信信号を選択・合成するスペースダイバーシチ受信技術が有効である。

一方、中継局は高い山の山頂付近に設置されることが多く、遠方から到来するさまざまな電波を受信しやすい環境にある。そのため、上位局波の受信にさまざまな電波が混信して同一チャネルの干渉妨害を引き起こす場合がある。さらに、ラジオダクトによる電波の異常伝搬も混信の原因になる。干渉妨害を引き起こす到来波には、変調内容が希望波と異なるISDB-T波（以下、異内容ISDB-T波）やGI越えマルチパス波に加えて、アナログテレビ放送波や国外からの放送波などが考えられる。こうした同一チャネルの干渉妨害の対策としては、複数のアンテナで上位局波を受信し、

図4 ダイバーシチ受信装置の構成例

図5 同一チャネル干渉除去装置の構成例

得られた受信信号を合成して干渉波成分を除去するアレーアンテナ技術が有効である。

オレンジブックで規定されている周波数領域処理型のダイバーシチ受信装置の構成例を図4に、アレーアンテナ技術を応用した周波数領域処理型の同一チャネル干渉除去装置（以下、干渉除去装置）の構成例を図5に示す。

どちらの装置も、複数のアンテナから出力される受信信号をそれぞれFFTして周波数領域のキャリアシンボルに変換した後、サブキャリアごとに重み付け合成するという点では同じである。異なるのは、ブランチごと、サブキャリアごとのキャリアシンボルに掛け合わせる重み係数とその生成法である。また、どちらの装置も合成後のキャリアシンボルを硬判定して、残留するマルチパス歪、干渉波成分および雑音成分を除去し、IFFTして時間領域信号に変換した後に、GIを付加して出力する。この点はAタイプのマルチパス等化装置と同様である。

重み係数の生成方法について説明する。ダイバーシチ受信装置では、サブキャリアごとに合成後のキャリアシンボルの C/N が最大になるように重み係数が生成される。こ

う合成法は最大比合成と呼ばれている。最大比合成とマルチパスの等化を同時に実現するための重み係数 $W(l, j, k)$ は、各サブキャリアにおけるキャリアシンボルの C/N が、そのサブキャリアの伝送路応答の振幅値に比例するという仮定の下に式(1)で表される。ここで、 l はブランチ番号、 j はシンボル番号、 k はサブキャリア番号、 N はブランチ数をそれぞれ示す。 $H(l, j, k)$ は各ブランチの伝送路応答であり、SPを利用して算出することができる。ただし、 $*$ は複素共役を意味している。

$$W(l, j, k) = \frac{H^*(l, j, k)}{\sum_{l=1}^N |H(l, j, k)|^2} \quad (1)$$

しかし、実際の中継装置では、フロントエンド部の受信変換がAGC機能を有しているため、ブランチ間に利得差が生じており、補償器が観測した伝送路応答と式(1)の $H(l, j, k)$ はそのままでは等しくない。そのため、実際にはブランチ間の利得差を考慮し、式(1)を補正して使用する必要がある。

一方、干渉除去装置の場合、重み係数はキャリアシンボ

ルの真値(推定値)と合成後のキャリアシンボルの誤差を最小とするMMSE (Minimum Mean Squared Error) 規範に基づき、N-LMS (Normalized-Least Mean Square) やRLS (Recursive Least Square) などの収束アルゴリズムを用いて算出される。この結果、干渉除去装置は、希望波と相関のない異内容ISDB-T波、GI越えマルチパス波、アナログテレビ波および他方式のデジタル放送波などの到来方向に、ヌルとなる指向特性を合成してこれらを抑圧・除去する。さらに希望波と相関のあるGI内マルチパス波などに対しては、これを積極的に受信してダイバーシチ効果を得るように動作する。また、ダイバーシチ受信装置と同様に、マルチパスの等化も同時に実現できる。

干渉除去装置の重み係数算出アルゴリズムに関しては、当初、SPを利用する方法が検討された。しかし、異内容ISDB-T波のように、干渉波がSPに関して希望波と同じ構造を持つ場合、互いのSPの受信タイミングが近接または一致すると、干渉波を除去できないという問題があることが判明した。そこで、合成後のキャリアシンボルの硬判定値をキャリアシンボルの真値とする判定指向アルゴリズムが検討された。しかし、キャリア変調方式がキャリアシンボルの振幅変化を伴うQAMで、干渉 D/U が低い場合に、従来の判定指向アルゴリズムを用いると、干渉波を希望波と見なして逆に希望波を除去してしまうミスカプチャ現象が生じることが判明した。そこで、当該サブキャリアの重み係数に加えて隣接キャリアの重み係数も用いて合成および硬判定を行い、硬判定前後の値の差が最も小さい硬判定値を真値として用いる、合成-比較-選択に基づく最優秀判定指向型のアルゴリズムが考案され、オレンジブックで規定されているスペックを達成するに至っている。

MMSE規範に基づいて動作する干渉除去装置は、ダイバーシチ効果が得られるため、フェージング対策にも用いることが可能である。また、収束アルゴリズムを用いて重み

係数を算出していることから、ダイバーシチ受信装置のように、フロントエンド部の利得差を考慮する必要がないなど、優れている点もある。しかし、伝送路応答の変化に対する追従性能など、動特性に関しては、フィード・フォワード処理を行っているダイバーシチ受信装置に遠く及ばない。実際、先に説明したダイバーシチ受信装置の構成は、地上デジタル放送の移動体受信にも応用することができる。

なお、重み付け処理をFIRフィルタで行う時間領域処理型のダイバーシチ受信装置⁵⁾や干渉除去装置⁶⁾も研究されているが、オレンジブックには規定されていない。ここでは、詳しい説明を省く。

7. 回り込みキャンセラ^{1) 7) 8)}

放送波中継によってSFNを構成する場合、中継局では送信と受信の周波数が同じになる。そのため、送信アンテナから放射された電波の一部が受信アンテナに回り込み、フィードバックループが形成されて、中継装置を発振させたり、伝送特性に大きな歪みを与えたりする。この対策に用いられる回り込みキャンセラは、FIRフィルタを用いてフィードバック信号の複製信号を生成し、入力信号から減算することで、フィードバック信号成分を打ち消す時間領域処理型の補償器である。

図6に回り込みキャンセラと、それを用いるSFN放送波中継局の構成例を示す。

詳しい導出過程は省略するが、FIRフィルタの伝送路応答を $W(j, k)$ 、送受信アンテナの特性を含む回り込み伝送路の応答を $C(j, k)$ 、電力増幅器のゲインを G 、観測点における伝送路応答を $F(j, k)$ とすると式(2)が成立する。ここで j はシンボル番号、 k はサブキャリア番号を示す。また、簡単化のため、送信変換および受信変換における周波数シフトは考慮しないものとする。

図6 回り込みキャンセラの構成例

$$F(j,k) = \frac{1}{1 - \{G \cdot C(j,k) - W(j,k)\}} \quad (2)$$

次に、キャンセル誤差 $E(j, k)$ を式 (3) で定義する。

$$E(j,k) = G \cdot C(j,k) - W(j,k) \quad (3)$$

フィードバック信号が完全に打ち消される条件は、 $E(j, k)$ がゼロになること、すなわち、 $F(j, k)$ の分母が1になることである。式 (3) を式 (2) に代入し、 $E(j, k)$ について解くと式 (4) が得られる。

$$E(j,k) = 1 - \frac{1}{F(j,k)} \quad (4)$$

回り込みキャンセラは、まず、観測点の信号をFFTして周波数領域のキャリアシンボルに変換し、SPやデータシンボルを含むすべてのキャリアシンボルの硬判定値を利用して観測点の伝送路応答 $F(j, k)$ を算出する。次に、式 (4) を用いて $F(j, k)$ より $E(j, k)$ を算出し、その結果をIFFTして時間領域のインパルス応答 $e(j, n)$ とする。ここで、 n は離散的な時間を示す。最後に、得られた $e(j, n)$ が最小となるようにFIRフィルタのタップ係数を修正、更新する。以上の動作を高速に繰り返すことで、風や雨などさまざまな要因で発生するフィードバック伝送路の応答の変化に素早く追従して、高いキャンセル性能を得ている。

一方、伝送路応答 $F(j, k)$ の算出に関しては、当初、SPのみを利用する方法が検討された。しかし、フィードバック伝送路の応答の変化に対する追従性能を重視して、1シンボル期間のSPを利用した場合には、遅延時間の長いフィードバック信号に対応できず、また、遅延時間の長いフィードバック信号への対応を考慮して4シンボル期間のSPを利用した場合には、逆にフィードバック伝送路の応答の速い変化に対応できないなど、要求される性能を満足できなかった。以上のことから、SPやデータシンボルを含む1シンボル期間のすべてのキャリアシンボルの硬判定値を利用する判定指向型の伝送路応答推定手法が考案され、要求性能を満足するに至っている。

また、回り込みキャンセラは負の D/U の環境、すなわち、受信信号に含まれる希望波成分のレベルよりフィードバック信号成分のレベルの方が高い環境でも安定に動作することが要求されるため、実際の回り込みキャンセラには、実にさまざまな工夫が施されている。

8. む す び

本稿で説明した補償器の他に、信号遅延が数100msと大

きいが、TS (Transport Stream) 出力の復調器にTS入力の変調器をカスケード接続した構成の補償器も開発されており、CNリセット装置と呼ばれている。この装置の仕様もオレンジブックで規定されている。また、オレンジブックには記載されなかったが、SFN放送波中継局に適用できる回り込みキャンセル機能付きの時間領域処理型干渉除去装置や⁹⁾、時間領域処理型のGI越えマルチパス等化装置¹⁰⁾なども研究されている。最後に、これらの補償器を開発・実用化した多くの関係者の方々の努力に深い敬意を表したい。

(2010年3月1日受付)

【文 献】

- 1) 全国デジタル送信設備検討会：地上デジタル放送用送信設備共通仕様書 (2007改定版)
- 2) 中原、濱住、渋谷、阿良田：“地上デジタル放送の放送波中継におけるスペースダイバーシティ受信の適用～周波数軸等化および等化判定を行う放送波中継の検討～”，映情学技報，25，50，BCS2001-26，ROFT2001-66，pp.13-18 (2001)
- 3) 今村、渋谷：“周波数領域等化型ガードインターバル越えマルチパス等化器の室内実験結果”，信学技報，MoMuC 2005-35，pp.27-32 (2005)
- 4) 竹内、成清、横畑、今村、濱住、渋谷：“地上デジタル放送の放送波中継のための合成－比較－選択に基づく最優秀判定指向型アダプティブアレー”，信学誌，J91-B，9，pp.1072-1085 (2008)
- 5) 中原、濱住、渋谷、佐々木：“スペースダイバーシティを用いた地上デジタル放送の放送波中継の検討”，映情学技報，25，31，BCS2001-11，pp.7-12 (2001)
- 6) 竹内、木村、濱住、渋谷：“ISDB-T用アダプティブアレーの開発－MMSEアダプティブアレーの放送波中継への応用－”，映情学誌，60，1，pp.66-75 (2006)
- 7) 今村、濱住、渋谷、佐々木：“地上デジタル放送SFNにおける放送波中継用回り込みキャンセラの基礎検討”，映情学誌，54，11，pp.1568-1575 (2000)
- 8) 今村、安藤、成清、渋谷、上田、曾我：“三登山中継局および須恵中継局におけるSFN放送波中継実験－全キャリアの判定値を用いる回り込みキャンセラのフィールド検証－”，信学技報，EMCJ2003-158，pp.45-50 (2004)
- 9) 竹内、成清、横畑、今村、濱住、渋谷、成尾、峯松：“同一チャネル干渉下におけるSFN放送波中継実験”，信学技報，OCS2006-64，OFT2006-49，pp.15-20 (2006)
- 10) 今村、濱住、渋谷：“地上デジタル放送用ガードインターバル越えマルチパス等化器－全キャリアの判定値を用いたマルチパス等化－”，信学技報，A・P2002-82，pp.19-24 (2002)

しぶや かずひこ
渋谷 一彦 1982年、NHK入局、富山放送局、放送技術研究所、技術局を経て、1996年より、放送技術研究所にて、Eス波混信対策、素材伝送、地上デジタル放送の放送波中継における各種干渉妨害の対策として、特に補償器の研究に従事。現在、放送技術研究所（放送ネットワーク）次世代地上放送研究グループ主任研究員。正会員。