

博士論文

自己干渉および外来干渉抑圧技術を活用した FM 放送システムの
実現に関する研究

(Study on realization of FM broadcasting system using self-interference and external-
interference suppression technique)

2025 年 3 月

恵良勝治

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 災害時におけるラジオの役割	1
1.3 研究の目的と意義	5
1.4 論文の構成	7
第2章 ラジオ放送の要素技術	8
2.1 ラジオ放送のしくみ	8
2.2 電波伝搬	12
2.3 FM ラジオ受信機	14
2.4 番組伝送用の各中継回線	16
2.5 FM ラジオ放送の現行関連規定	18
第3章 FM 同期放送技術	21
3.1 同期放送とは	21
3.2 デジタル型 FM 変調器の開発	29
3.3 SFN フィールドアナライザ	36
第4章 自己干渉および外来干渉抑圧技術	57
4.1 FM 自己干渉抑圧装置	57
4.2 FM 干渉抑圧装置	73
第5章 新 FM 伝送方式による同期放送技術	87
第6章 社会実装への取組み	98
6.1 「みちびき」災害・危機管理通報を活用した被災対応	98
6.2 同期放送技術を活用した「南海トラフ地震臨時情報」の発信	104

6.3 臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討	110
6.4 臨時災害放送局関係法令（抜粋）	118
第 7 章 結論	122
謝辞.....	123
参考文献.....	124

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本のラジオ放送は開始から2025年3月に100年を迎える。その100年の間に受信機は鉱石ラジオから真空管，トランジスタ，そしてDSP（デジタル信号処理）へと進化し，その受信感度も格段に向上してきている。FMラジオ放送はAMラジオ放送に比較して高音質・高品質の放送メディアとして1969年の放送開始以来，音楽放送を中心に広く国民生活に定着している。現在NHKが県域単位で全国1系統，民間放送は99社が県域を原則として，1または2系統の放送を実施している。

1.2 災害時におけるラジオの役割¹⁾

令和6年度版総務省の情報通信白書²⁾によると，FMラジオ放送は，各地の地上系民間基幹放送事業者393社が放送を行っている。そのうち，原則として市町村の一部の区域を放送対象地域とするコミュニティFMは342社であり，2010年度末から96社増加している。また，地域に密着したコミュニティFMは災害時においても自治体の災害情報を発信する放送局としての役割が重要となってきた。

2011年に発生した東日本大震災において，震災発生時に利用したメディアとしてラジオの評価が最も高く，震災発生時はラジオが唯一の情報を入手する手段であった。震災発生直後，東北電力管内で約450万戸の大規模な停電があり，乾電池で動くラジオ受信機やカーラジオが情報取得手段として身近にあったことや放送の即時性や輻輳がない等の強みなどから，ラジオがもっとも評価されたとの指摘もある。さらにNHK放送文化研究所が行った調査においては，「震災1時間後，家中の電池をかき集めてラジオのニュースを聞いた」，「停電が続いたので家族みんなでコタツに入り，懐中電灯の明かりの中でラジオの地震情報を聞いた。普段からよく聞いて聞き慣れた声なので安心感があった」などの声があがっている。また，被災住民への災害情報・避難情報等の災害情報提供手段として，自治体が臨時災害放送局を開設する例が多々見受けられた。岩手県花巻市など，早いところでは震災当日に開設され，災害情報をはじめ，給水炊き出し等の救援情報等を提供し，被害の軽減，被災者の生活安定に寄与した。

東日本大震災によって、鉄道、電気、ガス、道路などのライフラインが壊滅的な被害を受けたが、放送ネットワークについても例外なく震災の被害を受けた。民間放送事業者のラジオ送信所については図1.1のように東北放送の荒井ラジオ送信所は津波により、床上数センチに浸水があった。屋外1m超の津波でフェンスが倒壊し、エアコン室外機が破損するなど、敷地内の被害が甚大であった。さらに、停電にともない、非常用発電機によって電源を確保し放送を継続していたが、立入禁止区域となり、重油の補給が困難となったため停波した。その後は、八木山の本社から一部地域に向けて放送を継続した。



図1.1 津波による被害を受けた東北放送 荒井ラジオ送信所¹⁾

放送設備の災害対策の強化については、2010年の放送法改正において放送設備の安全・信頼性に関する技術基準が設けられ、現在、放送事業者はこれに基づき予備電源設備、予備送信設備といったバックアップ設備の整備に取り組んでいるところであるが、首都直下型地震、南海トラフ巨大地震等が想定される状況下、放送設備の災害対策のより一層の強化も求められるところである。

1.2.1 ラジオ放送の強靱化に関する現状と課題¹⁾

以下にAMラジオ放送の現状と課題について記載する。

(1) ラジオ放送設備（ラジオ送信所等）の安全性

AMラジオ放送送信所は、敷地全面にアース線を埋設する必要性や、AMラジオ放送電波が地表に沿って伝搬するという電波の特性などから、平野部に広大な敷地が必要とされる結果、一般に海や河川の近くに設置されている場合が多い。具体的には、民間AMラジオ放送事業者の親局47局のうち、45局が海辺または河川の近くに立地している。このような送信所は、津波や洪水などの災害時において、被害を受けやすいと考えられる。

(2) AM ラジオ放送送信アンテナの老朽化

AMラジオ放送が使用している中波は波長が長いため、電波を効率よく送信するために大規模な送信アンテナが必要となる。このため、図1.2に示すようにAMラジオ放送の送信所、特に送信アンテナは大規模となり、その更新には多額の費用を要する。また、FMラジオと異なり、AMラジオ放送では送信アンテナの大きさに応じた固有の周波数のみ使用可能なため、送信アンテナを他の事業者と共用することが困難であり、その結果1社あたりの更新費用が大きくならざるを得ない。さらに、送信アンテナの工事には長期間を要することなどから、別の場所に移転して整備する場合、広大な敷地を必要とするため、土地の確保が困難である。

以上によりAMラジオ放送の送信アンテナの更新については高額のコストがかかるため、更新計画を立てることが困難な状況となっているとの結果が出ている。このように、送信アンテナの老朽化への対応の遅れにより災害時における送信所の被害が大きくなり、機能不全とならないよう、適切に更新が行われることが課題となっている。

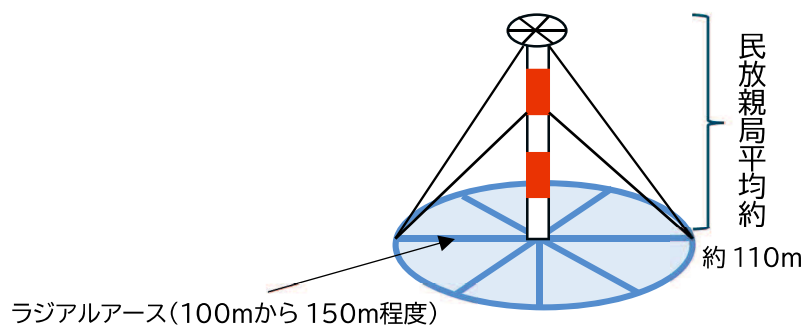


図 1.2 AM ラジオ放送送信アンテナ概要図

(3) AM ラジオ放送難聴

電子機器等の普及や建造物の構造の変化（高層化・堅牢化）により，都市部においてラジオの難聴が生じている．また，山間部や離島等の地理的・地形的な要因による難聴，外国波混信による難聴も依然として存在している．東京に所在する民間AMラジオ放送事業者における聴取者からの受信相談では，「ラジオに雑音が入り聞きにくい」，「雑音で聞きたくても聞こえない」という内容が多数を占めている．

AM ラジオ難聴には，主に以下の種類がある．

1. 都市型難聴

ビル等の建築物による遮断や，電波を透過しにくいコンクリート壁による電界の低下や，電子機器類からの電気雑音の影響により，ラジオは良好な受信が困難となる（都市型難聴）．NHKへのラジオ受信相談（首都圏）では，最近，聴取者からの相談傾向として，AMラジオ放送への雑音障害に関する相談の割合が増加しており，雑音障害の原因として，コンピュータ等のデジタル機器，冷蔵庫，照明器具などの家電製品によるものが多くなっている．

2. 地理的・地形的難聴

ラジオの周波数は，地表波が山岳等を越える際に減衰するため，受信に必要な電界強度が確保できず，送信点と受信点の間に山がある場合，良好な受信が困難となる（地理的・地形的難聴）．

3. 外国波混信による難聴

中波は，昼間は地表に沿って伝搬し，長距離を伝搬しないが，夜間は電離層の反射により長距離を伝搬するため，外国波が日本に到達することにより混信が発生し，良好な受信が困難となる（外国波混信）．

総務省では、2014年4月にAMラジオ放送の難聴（都市型難聴，外国波混信，地理的・地形的難聴）対策や災害対策を目的としてFM補完中継局（AMラジオ放送を補完するFM中継局）の開設を可能とするための制度整備（「基幹放送用周波数使用計画」の変更等）を行った。

1.3 研究の目的と意義

前述したように2011年に発生した東日本大震災において，震災発生時に利用したメディアとしてラジオの評価が最も高く震災発生直後はラジオが唯一の情報を入手する手段であった．東日本大震災によって甚大な被害に遭われた市町村では，災害情報，被災者支援情報，生活関連情報等を提供する臨時災害放送局が図1.3に示すように29の市町が中継局を含め約35局開設された³⁾．その後，2016年4月に発生した熊本地震や九州地方，中国地方の豪雨災害の際においても臨時災害放送局が開設，運用されている．

山口放送ラジオは2014年にFM補完放送を実施するにあたりAMラジオ放送の災害対策や難聴対策として取り組んだが，AMラジオ放送のエリアはFMエリアよりも非常に広いといった特徴がある．そこで筆者はFMでも同一の周波数での放送エリアを広くすることがリスナーのメリットと確信し，電波の有効利用にもつながるFM同期放送でこのFM補完放送を実現したいと方針を決めた．そして日本海側は隣接する韓国のFM混信を考慮し，86.4MHzを探し出して，日本海側は86.4MHz，瀬戸内海側は親局（山口局）に割り当てられた92.3MHzの2波で県内をカバーすることにした．

本研究の最終目的は災害時に開設する臨時災害放送局においてFM同期放送技術を活用することで同一周波数のエリアを拡張，広範囲に被災地域へ早期に情報を届けることで被害を軽減し，多くの人々の生命及び財産を救うことにある．

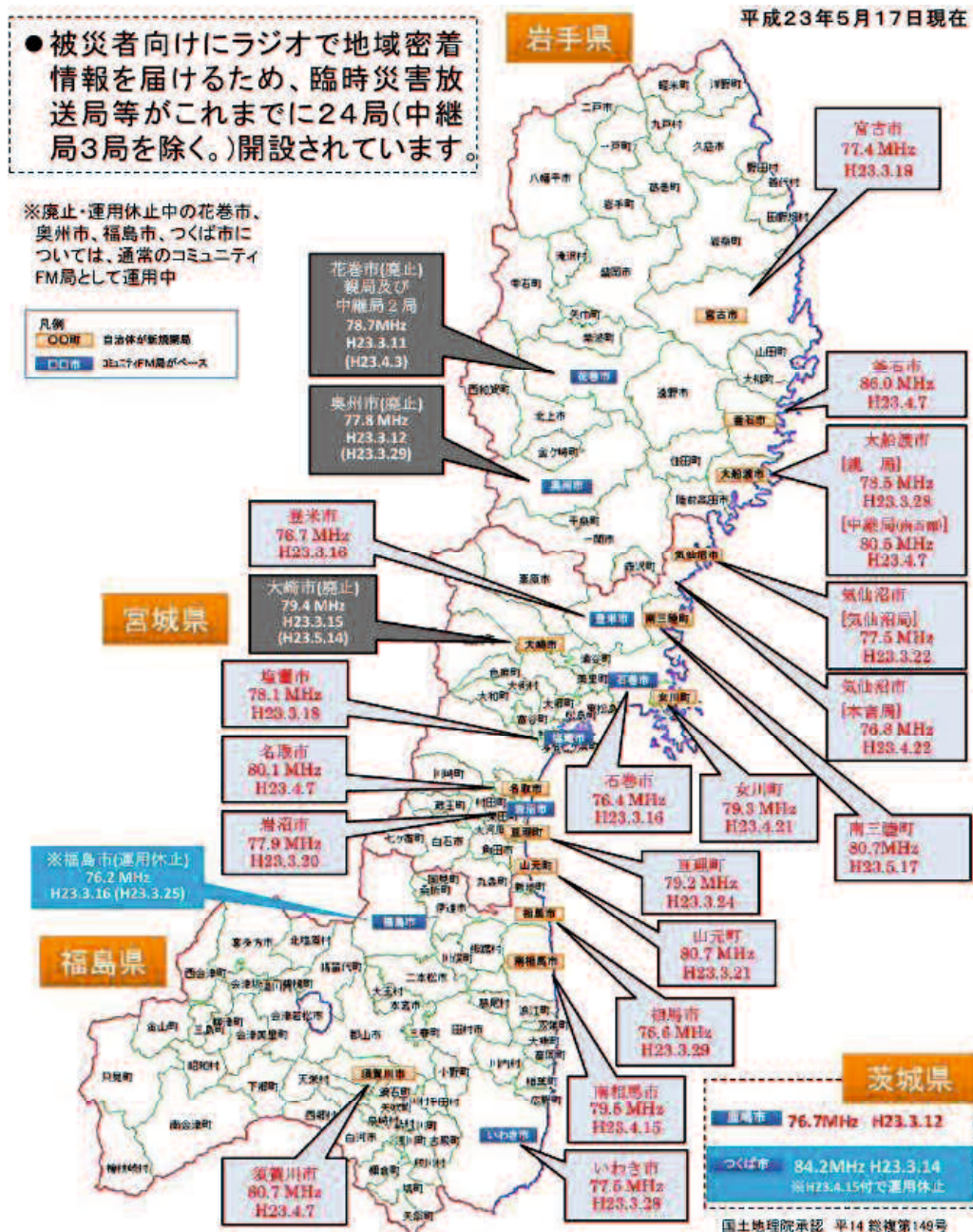


図 1.3 東日本大震災に伴う臨時災害放送局の開設状況 (2011 年 5 月時点) ³⁾

1.4 論文の構成

本論文は図1.4のように構成する。

第1章では研究に至った背景とラジオ放送の強靱化に関する現状と課題そして、研究の目的と意義について述べる。第2章ではラジオの要素技術について、ラジオ放送のしくみ、電波伝搬とアンテナ、ラジオ受信機、そしてFMラジオ放送の現行関連規定を説明する。

本論として、第3章でFM同期放送の技術的条件、既存FM局の同期放送導入状況等、FM同期放送技術を取り纏める。第2章では要素技術を基に取り組んだ、デジタル型FM変調器を用いた同期放送技術、そして同期放送の測定用として開発したSFNフィールドアナライザについて述べる。第4章では中継回線を必要としない放送波中継方式による同期放送技術を述べる。そして第5章では本研究の成果として、災害時における臨時災害放送局開設にあたっての問題点を解決すべく、新たなFM伝送システムによる同期放送技術を述べる。第6章では社会実装への取り組みとして、準天頂衛星「みちびき」を活用した被災対応実証や、同期放送技術を活用した臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討会について説明し、第7章の結論として、新たなFM放送システムが社会に及ぼす影響について取り纏める。

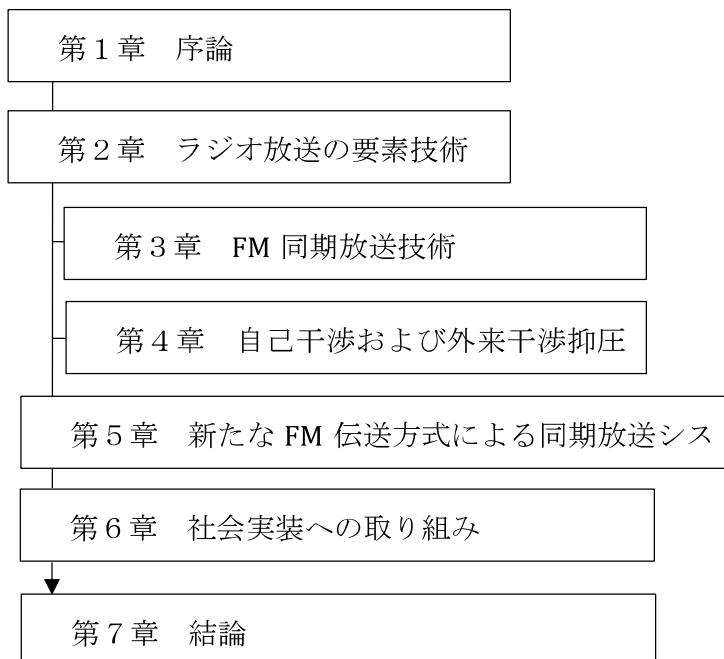


図 1.4 論文の構成

第2章 ラジオ放送の要素技術

2.1 ラジオ放送のしくみ

2.1.1 放送の発展²⁾

電波が人間社会に登場したのは19世紀の後半であり、電波利用の歴史は100年あまりにしか過ぎない。電波利用の歩みにおける重要な出来事としては、海上における人命の安全確保の手段として発展した無線電信の開始、新聞と並ぶ生活に密着したマスメディアとして定着したラジオ放送の開始、映像を家庭にもたらし娯楽の大きな部分を占めるに至ったテレビ放送の開始、宇宙空間の利用により国際通信の拡大をもたらした衛星通信の開始が挙げられる。

(1) 無線電信の開始

電波の存在が理論的に提唱されたのは1864年のことであり、英国のマックスウェルによってであった。さらに、1888年にドイツのヘルツは電磁波の存在を初めて実証した。これを受けて電磁波を通信に利用する研究が進み、1895年にはイタリアのマルコーニが電波でモールス信号を送る実験に成功した。これが無線電信の始まりである。日本における無線電信の研究については、マルコーニの無線電信の実験に遅れることなくわずか1年の1896年（明治29年）に逓信省電気試験所に無線電信研究部が設置され、1897年（明治30年）には東京湾内で1海里の無線電信実験に成功した。

無線の利用は船舶の安全を確保することを主眼に実用化が進められ、日本においては、1908年（明治41年）に銚子をはじめ国内の数ヶ所に無線電信局が設置され、本格的に無線電信業務が始まった。また、1912年のタイタニック号の遭難事件を契機として海上安全通信の面での国際協力も進み、1914年にはロンドン（英国）において「海上における人命の安全に関する国際会議」が開催されている。

一方、1912年（明治45年）には日本で初めて無線電話が製作され、1916年（大正5年）には一般公衆通信の取扱いが開始された。その後、有線・無線の電話接続、電話加入者と無線電話との通話が開始され、さらに1934年（昭和9年）には短波を使用した日本初の国際電話が開設されるに至った。戦前においては、電波の利用は、海上の人命安全のための通信、国際通信、軍事利用のための通信などの分野に限定されていた。

(2) ラジオ放送の開始

世界初のラジオ放送は、1920年にピッツバーグ（米国）で開始された。ラジオは受信機さえあれば誰でも放送を聴くことができる画期的な情報メディアとして登場し、手軽に、かつ新聞等の活字メディアよりも速く、情報を入手することが可能になった。日本においては、1925年（大正14年）に東京放送局が、次いで大阪放送局、名古屋放送局がラジオ放送を開始した。翌年には、全国規模の放送を目指すために3つの放送局を統合して（社）日本放送協会が発足し、以後の放送事業の中心的な存在となっていた。ラジオの普及によって、電波は、無線通信、無線電話のような単なる情報伝達手段としての通信方法という枠を越え、より生活に密着したメディアとしての地位を獲得した。

2.1.2 FM ラジオ放送（超短波放送）⁴⁾

FMラジオ放送（超短波放送）は、1959年に音楽番組を主体としてモノラルで開始され、1969年にステレオ化された。音楽放送の高忠実度伝送という特長をそのまま生かし、さらにモノラル放送との両立性が図られている。

FMラジオ放送は、AMラジオ放送や短波放送よりも周波数が高い超短波帯のうち、76から95MHzの電波を使用し、高品質の音声放送を行うため周波数変調方式を用いている。周波数変調された電波は、連続雑音やパルス雑音など振幅性の雑音妨害が加わった場合でも、振幅制限器により振幅成分を除去することができるため雑音に強いという特長がある。また、音声の帯域幅もAMラジオ放送の7.5kHzに比べ15kHzと広く、高品質な音声放送を行うことができる。

さらに、変調信号による周波数偏移を大きくすることにより、SN比（Signal to Noise ratio:信号対雑音比）がよくなり、したがってダイナミックレンジも広くとれる。ただ、あまり大きく取りすぎると占有周波数帯域幅が広がりすぎるため、日本では200kHzの占有周波数帯域幅に収めるために、最大周波数偏移は $\pm 75\text{kHz}$ としている。このように、FMラジオ放送における高品質な音声は、振幅変調を用いるAMラジオ放送や短波放送よりも広い占有周波数帯域幅を使用することにより得られている。

2.1.3 変調方式とその特長

放送局で映像や音声などの信号を電波にのせることを変調という。電波となる高周波電流を搬送波、映像や音声信号を変調信号と呼び、この搬送波に変調をのせる方法として、現在の放送では振幅変調、周波数変調、デジタル変調方式が用いられている。

周波数変調（FM）方式は、変調信号の振幅に応じて、搬送波の周波数を変化させる方式である。周波数変調の波形は図2.1に示すとおり、振幅変調の場合とは異なり、搬送波の振幅は一定で、変調信号の振幅に応じ搬送波の周波数が変化する。変調信号に応じて周波数が変化することを周波数偏移という。

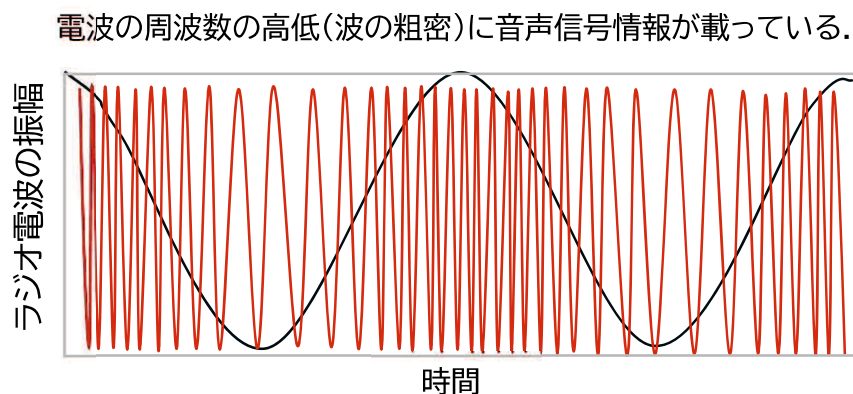


図 2.1 FM:Frequency Modulation（周波数変調）

周波数変調の変調度は、周波数偏移がその方式で定められた最大周波数偏移に達したとき100%としている。周波数変調では、変調の程度を表すのに変調度に対し、変調指数が使用される。変調指数は、式(2.1)で示す。

$$\text{変調指数 } m = \frac{\text{周波数偏移 } FM}{\text{変調周波数 } fs} \quad (2.1)$$

として表され、搬送波の中心周波数からの片寄りの度合いや、側帯波のスペクトルを表している。周波数変調の場合も振幅変調と同じように、搬送波を中心として、その上下に側帯波を生じる。しかし、振幅変調の場合と異なり、一定の変調周波数で変調しても、図2.2に示すように、その変調周波数の間隔で無数の側帯波を生ずる。

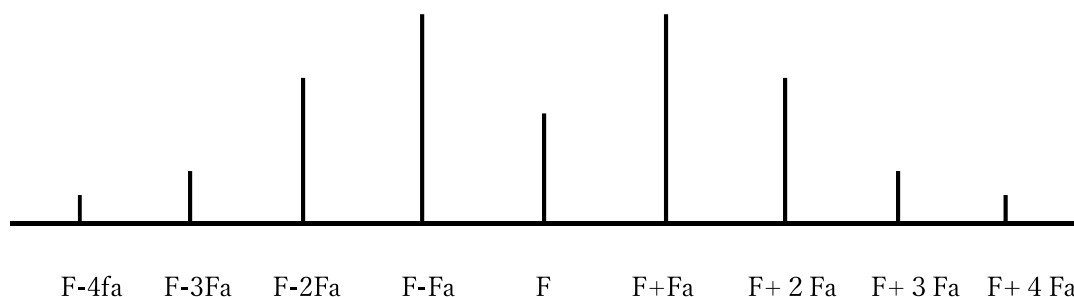


図 2.2 周波数変調の場合の側帯波

このように側帯波が無数に生じるので，周波数変調の場合の帯域幅 W はきわめて広くなるが，実用上は式(2.2)のカーソン則という近似式で表される．

$$W = (\text{最大周波数偏移 } \Delta FM + \text{変調周波数 } fs) \times 2 \quad (2.2)$$

FMラジオ放送のステレオ化は，モノラル放送との互換性を保つためパイロットトン方式が採用されている．この方式は，左と右の音声信号を加えた和信号と左と右の信号の差信号を用いて，差信号で副搬送波を振幅変調（搬送波抑圧）したものと和信号を合成した後，主搬送波を周波数変調している．この場合でも，最大周波数編移はモノラル放送の場合と同じとなっている．

図2.3にパイロットトン方式におけるベースバンド信号の周波数配列を示す．パイロットトン方式は，ステレオ用副搬送波を抑圧して伝送するため，搬送波抑圧AM-FM方式ともいわれる．

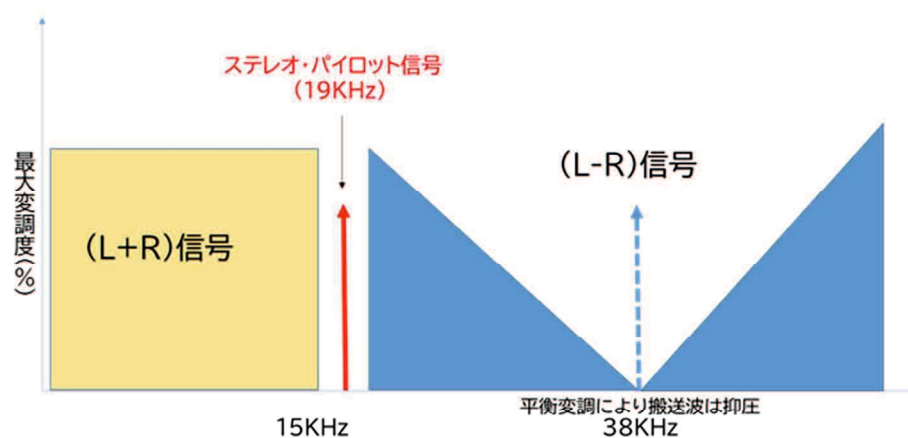


図 2.3 FM ラジオ放送のベースバンド信号の周波数配列

2.1.4 FM ラジオ放送用周波数

FMラジオ放送における側波帯は、AMラジオ放送の側波帯より広く、音声信号の周波数と振幅によって決まる。これら両側波帯を含む帯域幅が占有帯域幅で、FMラジオ放送では上下200kHzである。日本ではFMラジオ放送の周波数帯域は76.1 MHzから89.9MHzが割り当てられたが、2014年（平成26）に90.0 MHzから94.9MHzが加えられたため76.1 MHzから94.9MHzが使用可能となり、現在ではFM補完放送（ワイドFMラジオ放送）などでも使用されるようになった。なお、アメリカでは放送開始当時40MHz帯であったが、その後88MHzから108MHzに変更されている。

2.2 電波伝搬

2.2.1 電波の伝わり方⁴⁾

電波は、図2.4に示すように送信アンテナから放射されて、受信アンテナに到着するまでの経路によって、直接波、反射波、屈折波、回折波、地上波、および散乱波の6種類に分類される。また、電波がどのような経路によって伝搬するかを電波の伝搬様式といい、電波の伝搬様式の分け方として、次の3つに分類できる。

1. 地上波（①直接波、②大地反射波、③地表波）
2. 対流圏波（④対流圏反射波、⑤対流圏屈折波、⑥対流圏散乱波）
3. 電離層波（⑦電離層反射波、⑧電離層散乱波）

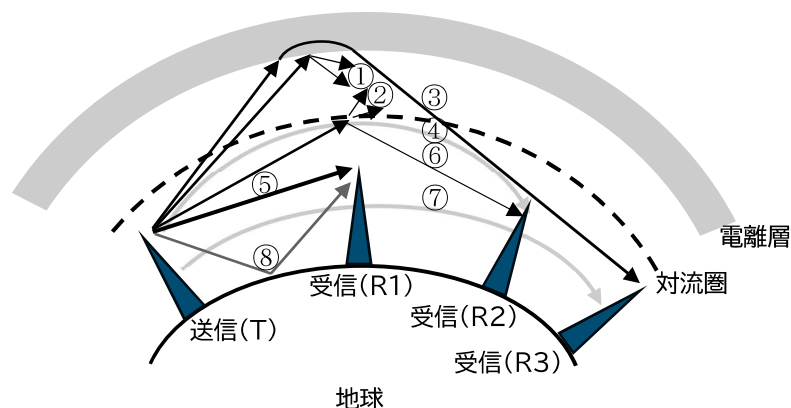


図 2.4 電波の伝わり方

なお、AM波とFM波の周波数別の電波の伝わり方は以下となる。

- ・AM波（中波300 kHzから3,000kHz）近距離:地表波

遠距離:電離層反射波

- ・FM波（超短波30 MHzから300MHz）近距離:直接波，大地反射波

遠距離:対流圏散乱波，電離層散乱波

電波伝搬は周波数に加え季節や距離，地形や気温，時間帯などの諸条件で異なる。また周波数が30MHz以上になると電離層による反射がなくなり，電離層（F層）も突き抜けて再び地球へは戻ってこない。超短波の伝搬は地上波だけとなり受信範囲が制限される。また超短波は，光の性質に似て電波の直進性が強く，屈折することも少なくなるので，山やビル陰などの見通し外では受信しにくくなる。よって受信できる範囲を広くするため送信アンテナの位置を山頂や高い鉄塔に設置するのが一般的である。

2.2.2 超短波（VHF 帯）の異常電波

超短波は夏期の主に昼・夕方に約100km付近に局地的な突発的に特殊な大気の層，スプラディックE層が発生し異常伝搬となることから近隣国のFMラジオ放送の混信妨害を受けることがある。大気中のいろいろなガスは，太陽の紫外線やX線等により電離して自由電子を発生させる。この電子は，ある高さのところに集積して，性質の異なるいくつかの電離層を形成し，地上60km位から500km位の高さの間にあり，下からD層，E層，F層と呼ばれ，これらの電離層は，緯度・経度，昼夜，季節，太陽の活動状況により，密度，高さ，層の厚さがそれぞれ特徴的な変化する。

超短波放送のFM電波は，この電離層によって反射されたり，吸収されたり突き抜けたりします。その様子は，電離層の状態により変化する。地上約100km前後に形成されている電離層をE層という。ほぼ同じ高さのところはかなり高い周波数の電波（VHF帯）まで反射をする密度の高い，きわめて薄い層が突発的に形成されることがある。これをスプラディックE層（Sporadic E Lay, Es, Eスポ）と言う。日本付近では春から夏にかけて昼間に多く発生するが，夜間にも発生することがある。他の季節にも発生するが，反射される周波数も低くなり，頻度も少なく，障害はほとんどなくなる。スプラディックE層が発生すると，図2.5に示すように，いままで電離層を突き抜けてしまっていたFM電波が1000kmから2000km以上も遠くまで届く。

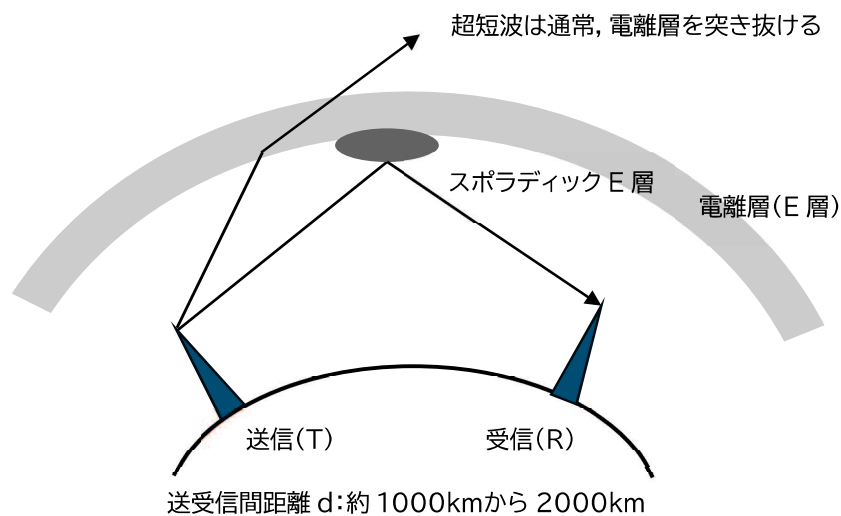


図 2.5 スプラディック E 層伝搬図

FMラジオ放送では，送信アンテナからの直接波あるいは直接波と大地反射波の合成波を利用しており，空間波は通常発生しないため，放送範囲は中波や短波放送より狭いが，遠距離における混信がほとんどないという特徴がある．

2.3 FM ラジオ受信機

標準的なFMラジオ放送用受信機はスーパーヘテロダイン方式を採用しており，中間周波数は通常10.7MHz，帯域幅は200kHzである．FM方式では，音声信号の高い周波数領域における雑音の影響が大きいため，送信側で音声信号の高域成分を強調するプリエンファシスにより送り出し，受信側で音声信号を復調したのち，送信側のプリエンファシスと逆特性をもつディエンファシスを通してている．これにより低域から広域まで均一の周波数特性の得るとともに，高域の雑音を低減させている．図2.6にFMステレオ受信機の構成を示す．

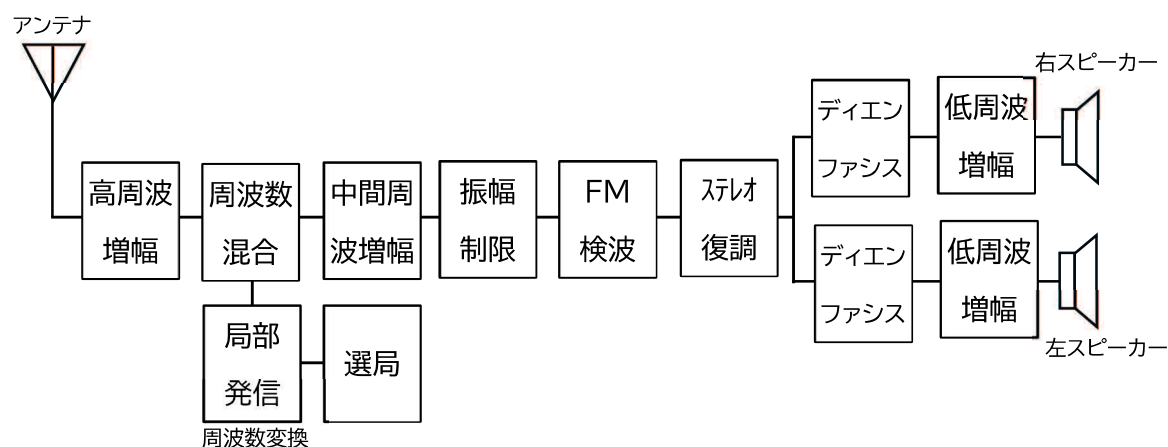


図 2.6 FM ステレオ受信機の回路構成

図 2.6 の各ブロック概要を説明する.

1. アンテナ

FM 信号を受信する装置. 通常, $\lambda/4$ やダイポールアンテナが使われる.

2. 高周波増幅 (RF 増幅)

受信した微弱な FM 信号を増幅する.

3. 周波数混合 (ミキサ)

局発発振器 (LO) と受信信号を混合し, 中間周波 (IF) に変換する.

例: FM ラジオ放送の受信周波数 88~108MHz を 10.7MHz の中間周波に変換.

4. 中間周波増幅 (IF 増幅)

中間周波数の信号を増幅し, 不要な周波数をフィルタリングする.

5. 振幅制限 (リミッタ回路)

リミッタ動作により信号の振幅が一定以上になるよう, 振幅成分をカットする.

6. FM 検波

FM 信号の周波数変調を復調して L+R 信号, L-R 信号のキャリア変調成分, 及び 19 kHz パイロット信号を含むステレオ複合信号 (コンポジット信号) に変換する.

7. ステレオ復調

FM 検波回路からの複合信号から, 各信号をフィルターにより分離する.

パイロット信号から 38kHz の基準副搬送波をつくり L-R 信号を復調し L+R と L-R 信号を用いて左右の信号 (L/R) を分離する.

8. ディエンファシス

送信側で行ったプリアンファシスを補償するために逆の処理であるディエンファシスを行う。ディエンファシスにより元の音声信号の周波数特性が復元できる。

9. 低周波（オーディオ）増幅

復調された音声信号をスピーカやイヤホンで聞けるレベルまで増幅する。

10. 左右スピーカ

増幅された音声信号を空気振動に変換し、音声として出力する。

2.4 番組伝送用の各中継回線

映像音声を送送する番組伝送用の中継回線について、記載する。

1. TTL 中継方式（Transmitter to Transmitter Link：送信所と送信所を結び番組を送送する固定無線回線）（図 2.7）

上位局から下位局へTTL専用回線で番組伝送を行い、下位局でFM変調し放送を行う。主にM/N帯（7GHz帯デジタル音声）を用いた安定なデジタル専用回線で構築できるが、専用の送受信装置とパラボラアンテナ設備などの建設費用が高い。

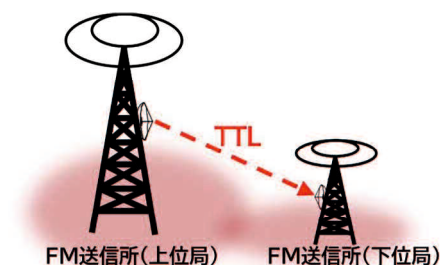


図 2.7 TTL 専用中継回線方式

2. 有線中継方式（図 2.8）

光ファイバー等の有線を用いたIP信号による伝送方式でIPキャリアからの借用回線で構成する。伝送装置と回線借用費が必要で災害時にケーブル破損の危険もあることから、一般的には予備回線として他のIPキャリアとの併用が用いられる例が多い。

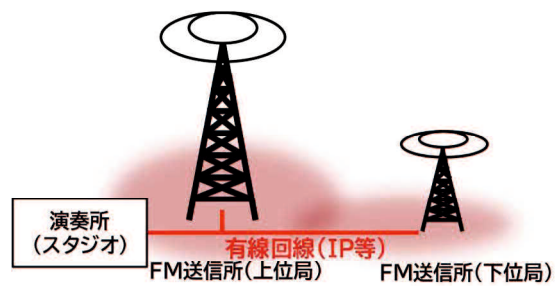


図 2.8 有線伝送方式

3. 放送波中継方式（図 2.9）

上位局の放送波を中継回線とするので特別の回線は不要になり圧倒的にコストを低減できる。ただし上位局と下位局を同一周波数とする場合は，受信への回り込み波を抑圧する必要がある。

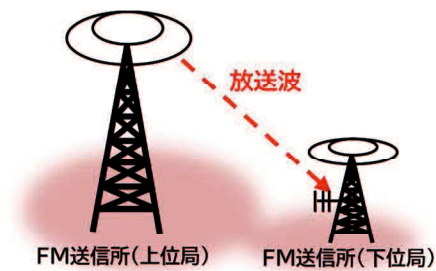


図 2.9 放送波中継方式

2.4.1 災害発生時に臨時災害放送局を同一周波数で複数置局する中継方式について

臨時災害放送強を複数設置する場合の各中継方式の特徴を表2.1に示す。

表 2.1 各中継方式の特徴

各種中継回線方式	整備コスト	設置時間	災害時のリスク
TTL 中継方式	中継装置の他，別途アンテナ系の設備が必要なため高額となる。	設備の構築と中継用周波数の選定に時間を有する。	専用の中継回線のため安定した回線を確保。
有線中継方式	伝送装置と専用回線の構築が必要。 なお別途，回線費が発生する。	設備の構築と回線の手配に時間を有する。	災害時，回線断のリスクが高い。

放送波中継方式	上位局を受信するため別途、中継回線を整備する必要がなく最も安価に構築できる。	上位局を受信するのみのため、中継回線の設置時間は必要ない。	別途、中継回線を構築しないため、リスクは低い。
---------	--	-------------------------------	-------------------------

以下に補足を記載する。

1. TTL 中継回線を使用する場合は放送用周波数の他、中継回線用周波数の選定や伝送用アンテナ系の設備も別途必要となる。
2. 有線中継方式は伝送用の回線手配や伝送装置が必要。IP 回線を使用する場合は遅延揺らぎ抑圧装置⁵⁾が必要。また、断線などの回線の物理的な障害や通信の輻輳による接続障害などを受けやすい。
3. 放送波中継方式は災害時に迅速に複数置局することが可能であるが、同一周波数の場合、受信への回り込み波を抑圧する必要がある。

よって、回り込み波を抑圧できれば放送波中継方式が災害時に最も効率的な中継方式といえる。

2.5 FM ラジオ放送の現行関連規定

無線設備規則（昭和25年11月30日 電波監理委員会規則第18号）

別表第一号（第5条関係）

周波数の許容偏差の表

周波数帯	無線局	周波数の許容偏差（Hz 又は kHz を付したものを除き百万分率）
29.7MHz を超え 100MHz 以下	地上基幹放送局 (2) その他の地上基幹放送局	20

別表第二号（第6条関係）

第1 占有周波数帯幅の許容値の表

電波の型式	占有周波数帯幅の許容値	備考
F3E	200kHz	地上基幹放送局及び 54MHz を超え 585MHz 以下の周波数の電波を使用して放送中継を行う固定局の無線設備

(電波の偏波面)

第35条 超短波放送を行なう地上基幹放送局の送信空中線は、その発射する電波の偏波面が水平となるものでなければならない。ただし、総務大臣が特に必要と認める場合は、この限りでない。

(信号対雑音比)

第36条の5 超短波放送を行なう地上基幹放送局の送装置の号対雑音比は、1,000Hzの変調周波数により主搬送波に(±)75kHzの周波数偏移を与えたとき、55dB以上となるものでなければならない。

FMラジオ放送局の周波数の選定方法

下表の条件を満足する周波数を選定すること。

他の FM ラジオ放送局と放送区域が重複する場合の制限	当該 FM ラジオ放送局の周波数と、 $10.7 \pm 0.1\text{MHz}$ 差の関係にある周波数以外を選定。	
自局の予定放送区域内における他の FM ラジオ放送局からの干渉検討	周波数差 0kHz	混信保護比 36dB
	100kHz	33dB
	200kHz	7dB
	300kHz	-10dB
	400kHz	-25dB
他の FM ラジオ放送局の放送区域内における干渉検討	他の基幹放送局の放送区域フリンジにおける自局の電波の予想電界強度値が、上記 5 に示す混信保護比を満足する周波数を選定。	
放送波中継回線に対する干渉検討	(4) 放送波中継回線に対する自の電波の予想電界強度値が次の混信保護比を満足する周波数を選定。	
	周波数差 0kHz	混信保護比 60dB
	100kHz	55dB
	200kHz	40dB
	300kHz	10dB
	400kHz	-20dB
	500kHz	-30dB
	600kHz	-40dB
	700kHz	-50dB

	800kHz	-60dB
	(5) 上記 (1) のほか、受信空中線の指向性、偏波面及び中継局の受情設備の干渉除去のための措置を考慮.	
自局の予定放送区域内における他の FM ラジオ放送局に対する干渉検討	99MHz を超え、108MHz 以下の周波数の電波を使用する地上基幹放送局を用いて行うマルチメディア放送（以下この表において「V-Low マルチメディア放送」という。）の放送局又は他の FM ラジオ放送局の周波数と次に示す関係になる周波数以外を占有周波数帯幅の上限から下限までを考慮して選定.	
一般無線局からの FM ラジオ放送受に対する干渉検討	一般無線局の周波数と次に示す関係になる周波数以外を選定. ① $(f-2IF)\pm 400\text{kHz}$ ② $((f-IF)\times 2\pm IF)\pm 400\text{kHz}$ ③ $f/2\pm 400\text{kHz}$ ④ $2f\pm 400\text{kHz}$ ここで、「f」は自局の周波数及び「IF」は FM ラジオ放送受信機の間周波数を示す.	
受信障害対策中継局における検討	(1) 申請局が難聴対策を行おうとする放送区域に係る基幹放送局が超短波放送を行う基幹放送局の場合にあっては、当該基幹放送局と同一周波数を. ただし、干渉等の理由により当該基幹放送局と同一周波数を選定できない場合は割り当て可能な周波数で当該期間放送局の周波数の近傍のものから選定 (2) 申請局が難聴対策を行おうとする放送区域に係る基幹放送局が AM ラジオ放送を行う基幹放送局の場合にあっては、割り当て可能な周波数のうち、低い周波数から選定 (3) 複数の周波数を使用して再送信を行う場合にあっては、当該周波数の差が 600kHz 以上となる周波数を選定	

第3章 FM 同期放送技術

3.1 同期放送とは

FM同期放送とは、図3.1に示すように、放送区域が重複又は隣接する複数の送信所が同一の周波数により同一の番組を同時に放送する技術であり、干渉妨害領域における受信劣化を抑制するための管理又は調整等を行うものである。

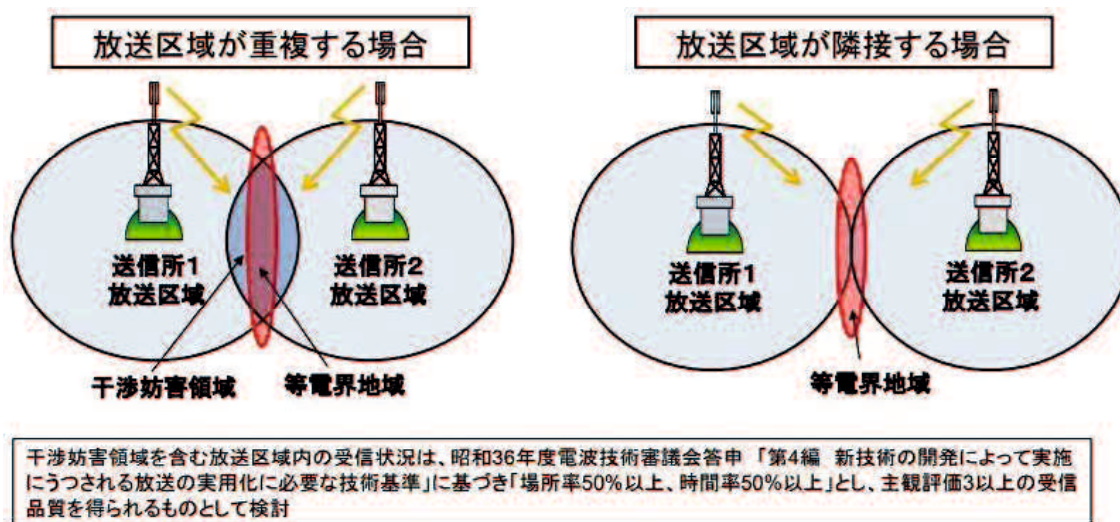


図 3.1 同期放送概念図

FM同期放送の実現については1990年代に技術的な検討が行われ「FM同期放送の技術基準答申」としてまとめられた。その一部を表3.1に示すように干渉妨害を低減するための受信機側での必要な所要D/U（希望波と干渉波の比Desired to Undesired Signal Ratio）があまりに厳しく、FMラジオ放送での同期放送の構築は現実的に困難と考えられた。実際の同期放送を行う上でこの技術基準がいかに非現実的であったかを図3.2（注:モデル図）を用いて説明する。すなわち、同期放送を行うためには2局間の電界が等しい地点（D/U=0dB）での受信品質である主観評価で3以上が得られなければこの地点は放送エリアとは出来ない。そのためこの地点の電界を法定電界の48dB μ V/m以下に設定することになり放送エリアとするためには別の周波数が必要（非同期放送）になる。よって、同期放送が成立するための唯一の条件は「D/U=0dBの地点で評価3以上の音声品質が得られること」が必要となる。

表 3.1 FM 同期放送の置局の技術基準答申（平成 10 年度電気通信審議会答申）⁷⁾

時間差 Δt	D/U 比	時間差 Δt	D/U 比
2 μ s	3dB 以上	2 μ s	9dB 以上
5 μ s	6dB 以上	5 μ s	12dB 以上
10 μ s	8dB 以上	10 μ s	17dB 以上
20 μ s	14dB 以上	20 μ s	20dB 以上
50 μ s	30dB 以上	50 μ s	36dB 以上
100 μ s	37dB 以上	100 μ s	45dB 以上

(a) 主観評価 3

(b) 主観評価 4

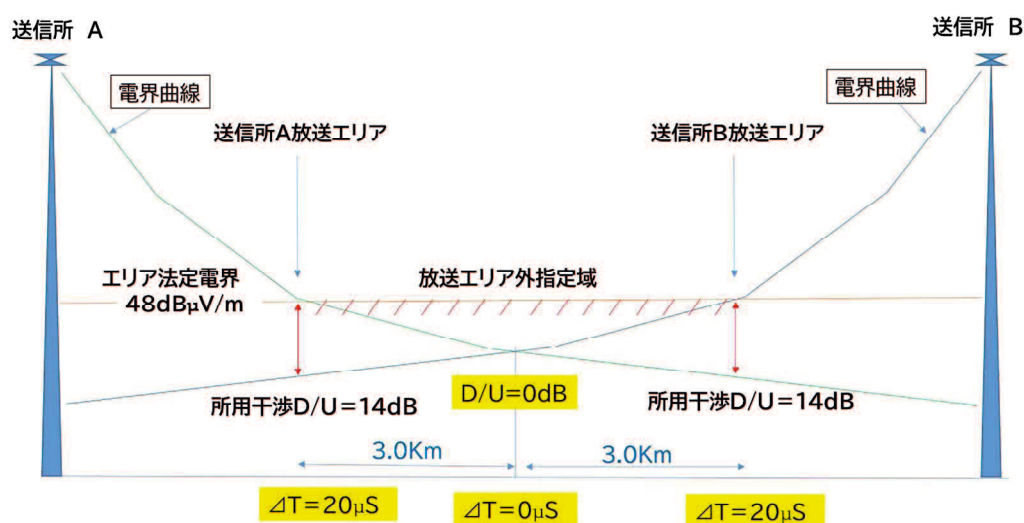


図 3.2 技術基準を満足させるモデル図（平成 10 年度電気通信審議会答申）^{7) 8)}

3.1.1 FM 同期放送の技術的条件

令和2年情報通信審議会答申「諮問第2023号FM同期放送の技術的条件」⁹⁾についての検討結果が報告されている。

1. 適用範囲

この技術的条件は、放送区域の一部が重複又は隣接するFMラジオ放送局（FM補完中継放送局及びコミュニティ放送局を含む。）のうち、同一の周波数を使用して同時に同一番組を放送するものであって、相互に同期放送の関係にある基幹放送局に適用する。

2. FM 同期放送の使用周波数帯

FM同期放送が使用する周波数帯は、既存のFMラジオ放送と同じ、超短波（76MHzから95MHz）の周波数とする。

3. 搬送周波数差

相互に同期放送の関係にある各送信所の搬送周波数の差は2Hzを超えないものとし、0.2Hz 以内とすることを目標とする。

4. 最大周波数偏移差

相互に同期放送の関係にある各送信所の最大周波数偏移の差は1kHzを超えないものとし、1Hz以内とすることを目標とする。

5. 同期放送の関係にある局以外の FM ラジオ放送局との混信

相互に同期放送の関係にある局以外のFMラジオ放送局との混信については、平成10年度電気通信技術審議会答申「諮問第92号FMラジオ放送の置局に関する技術的条件」に基づき、自局FMラジオ放送局の放送区域の全ての地点において、次の混信保護比を確保すること。

周波数差 (kHz)	0	100	200	300	400
混信保護比 (dB)	36	22	6	-8	-20

6. 同期放送の関係にある FM ラジオ放送局との混信

相互に同期放送の関係にあるFMラジオ放送局との混信については、平成10年度電気通信技術審議会答申「諮問第92号FMラジオ放送の置局に関する技術的条件」に基づくFMラジオ放送局間の混信保護比の適用対象外とする

7. 偏波面

原則として水平偏波とし、垂直偏波を用いることにより、偏波面効果による受信改善が期待できる場合は、垂直偏波を用いることができることとする。

8. 干渉妨害領域を推定するための同期評価テーブル

FM同期放送の放送区域の設定に当たっては、干渉妨害領域における電波が同期の技術的条件を満たしている場合でも発生する干渉妨害領域を推定するための遅延時間差

と混信保護比の条件（同期評価テーブル）に留意しつつ，等電界地域を含む干渉妨害領域の受信品質の確保に努めることが望ましい．同期評価テーブルは，次表のとおり．

表 3.2 FM 同期放送における遅延時間差と混信保護比の条件（同期評価テーブル）

相互に同期関係にある 基幹放送局間の 搬送周波数差及び 最大周波数偏移差	許容される 遅延時間差 (μ s)	混信保護比 (dB)		
		主観評価 2	主観評価 3	主観評価 4
搬送周波数差 2Hz 以内 かつ 最大周波数偏移差 1kHz 以内	0	0.0	0.3	1.7
	1	0.0	0.7	1.9
	5	1.1	2.6	4.4
	10	2.0	4.6	7.6
	26.3	9.5	11.8	13.8
	53	5.0	7.6	10.7
	100	8.3	13.5	20.0
搬送周波数差 0.2Hz 以内 かつ 最大周波数偏移差 1Hz 以内	0	0.0	0.0	0.0
	1	0.0	0.0	0.0
	5	0.4	1.3	2.3
	10	1.1	2.8	4.8
	26.3	6.3	10.0	12.8
	53	3.4	7.1	12.0
	100	7.0	13.1	19.4

3.1.2 地上デジタル放送における同期放送技術

同期放送は現在では「地上デジタル放送」（以下「地デジ」）のネットワーク構成においてSFN（Single Frequency Network）として知られ実用化されている．「地デジ」開始以前のアナログTV放送は放送のエリアが重なり合う場合はそれぞれがお互いの干渉波とみなされるので必ず異なるチャンネルでエリアをカバーしていた．アナログTVでは固定受信が主体であったため域内の視聴者には何の不都合も生じなかった．「地デジ」の規格策定にあたっては地上放送特有のマルチパス干渉（アナログTV放送ではゴーストとして知られている．）を除去することが解決すべき課題の1つであった．このため送信側では符号化された映像/音声信号に対しガードインターバルを付加し，受信機側では「地デジ」受信波に対しOFDM復調後にFFT処理をした信号の等化処理を行うことでマルチパスによる干渉受信障害を除去している．

このことが、複数の送信所からの同期放送波を同時に受信する受信機ではマルチパスの影響を受けたことと等価なものであるため、SFNの構築を可能にした。また「地デジ」開始に当たっては既存のアナログ放送を維持しながら空きチャンネルを使って従来のアナログ放送エリアをカバーしなければならなかった。しかしUHF帯で利用できる空きチャンネルが圧倒的に少なく、重なり合う複数のエリアを同一周波数で放送を行うSFNが活用された。このSFNの導入により、地デジの使用帯域はVHF帯の返還やUHF帯の利用帯域の削減等、周波数有効利用にも役立っている。

ラジオ放送においては、従来のAMラジオ放送では周波数精度の高い搬送波を用いた同一周波数放送としての運用例は多く見受けられ、FMラジオ放送については平成10年度にFM同期放送の実現に向けて審議がなされた。答申された報告書では、FM同期放送を実現する為に設定した送信側の条件である表3.1のFM置局の技術的基準答申に示すように、干渉妨害を低減するための受信側での必要な所要D/Uがあまりに厳しく、FMラジオ放送での同期放送の構築は現実的に困難と考えられた。

3.1.3 既存 FM 局の同期放送導入状況

FM 同期放送の導入が放送事業者により進められている。山口放送が高精度な同期方式により2015年から順次導入しているFM 補完中継局の他、地域コミュニティ放送では複数エリアを同期放送により構築する例がある。また、スポット的な小規模エリアの補完についてはギャップフィラー装置（GF）が実用化、制度化されており、導入が進められている。

山口放送で導入されているFM 同期放送について、図3.3に示す。2015年7月、山口局（親局）を92.3MHzで開局し、同年11月に美祢局を山口局からの放送波中継方式で放送を開始した。美祢市は従来からAM難聴地域であったため聴取者には従来型の90MHz以下のFM受信機で聴取可能なように事前のフィールド調査で90MHz以下の帯域で空いている周波数を確保して開局を急いだ。以降2021年8月に豊田局を開局し現在14局で放送している。周波数は日本海側では86.4MHz、瀬戸内側では92.3MHzで同期放送を行い、番組中継方式は、TTL中継方式と放送波中継方式を採用した。なお既存のNHKは域内を16局の送信所から15波の周波数を使用し、民放局は11局の送信所から10波の周

波数を使用して県域をカバーしている。(送信局所毎に異なる周波数で放送することは全国的にも一般的である)

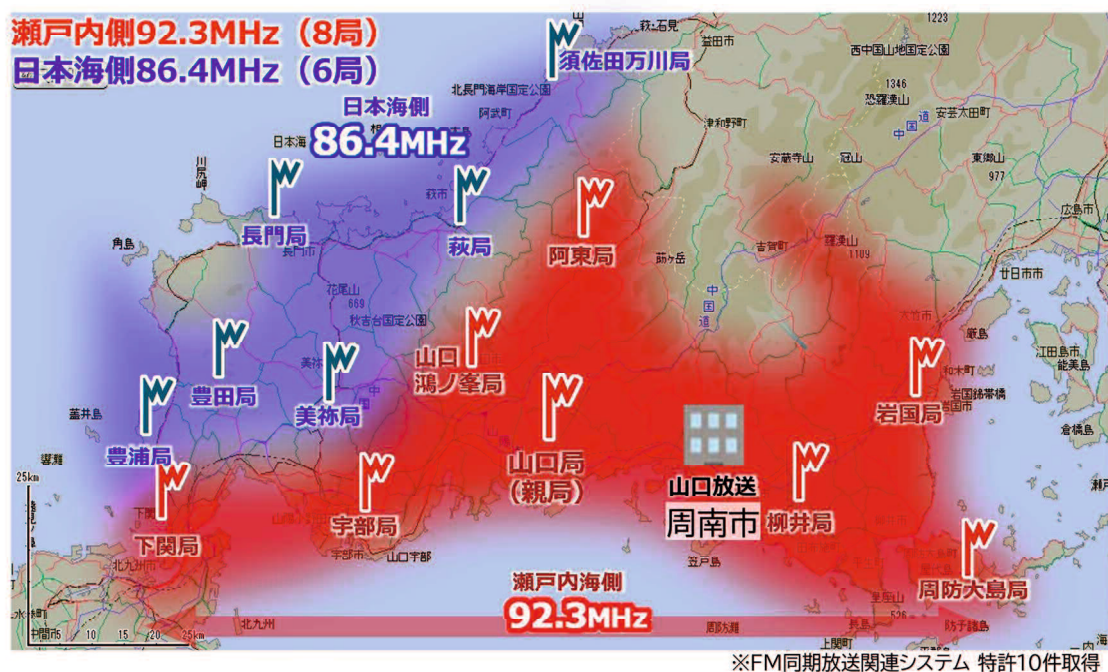


図 3.3 山口放送 FM ネットワーク図 (2025 年 3 月現在)

3.1.4 各種同期方式

複数局を置局する同期放送を実現するためには、2つの方式について概要をまとめた。

1. 独立同期方式

同期放送を行う放送局ごとに独立した基準信号 (GPS 等による) を取得し、それぞれの局で、周波数、音声遅延等を制御して行う同期方式である。

この方式は、基準信号を各局で取得するので、中継回線としては音声信号のみを伝送すればよく比較的簡便な方式であるが、上位局と同等の精度を有する基準信号を取得する必要がある。下位局にFM 変調器を置く場合、変調特性が上位局と同等になるよう調整する必要がある。

2. 従属同期方式

上位局から各放送局に基準信号を伝送し、この基準信号に従い (従属)、搬送波周波数、音声遅延等を制御して行う同期方式である。この方式は、上位局から基準となる

信号を送る手段が必要である。このため、下位局では、あらたな基準信号の取得が必要となる。FM 変調器を置く場合、変調特性が上位局と同等になるよう調整する必要がある。

独立同期方式で使用する基準信号は近年GPS 等を利用し各局で独立して精度の高い基準信号を簡易に取得できる手法が確立されている。一方、従属同期方式では、基準信号は中継回線を通して各局に配信されるため、精度が損なわれないよう中継回線毎に管理を行う必要がある。このため、各局が独立してFM 同期放送を実現し、後から下位局を容易に追加できる、独立同期方式が、早期の立ち上げに適していると考えられる。

3.1.5 同期放送技術の設計手法

FM 同期放送では、お互いのエリアが重なった場合、等電界となる地域で受信妨害が発生するため、図3.4に示す手順に従い1から5の手順を繰り返し、最適な放送エリアとなるよう調整する必要がある。また、自治体等の災害発生場所を想定し、臨時災害放送局による情報伝達手段として活用できるよう、あらかじめ放送対象エリア、置局場所、同期方式、中継回線の種類等の検討を行っておくことが重要である。

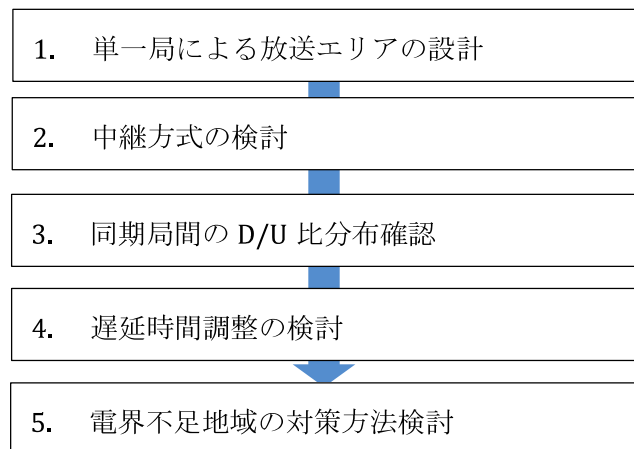


図 3.4 同期放送技術の検討手順

1. 単一局による放送エリアの検討

同期放送を行う各局の置局位置や送信諸元（送信高、空中線電力、アンテナ構成、送信方向、受信アンテナ高）を設定し、電界シミュレーションにより全局の電界強度分布を計算し、放送エリアを設計する。

2. 中継方式の検討

各局の電界強度計算結果，STL の電界強度計算，設置場所状況の把握を行い，適切な中継方式を検討する．中継点の設置環境によっては，送信点を必ずしも避難所の近傍とせず中継が可能で必要なエリア確保が可能な場所を選定することも考慮する．

3. 同期局間の DU 比分布確認

電界シミュレーションにより，同期局のDU 比電界分布を把握する．等電界エリアにおいて遅延時間調整などが必要となる．

4. 遅延時間調整の検討

計算したDU比分布から等電界エリアで受信改善が必要となる地域を選定し，その地域の遅延時間が最小となるように同期局の送出タイミングを調整する．

各放送局間の遅延時間差 Δt を式(3.1)に記述する．

$$\Delta t(\mu s) = \frac{d1 - d2}{C} \quad (3.1)$$

C : 電波伝搬速度 299,792,458 (m/s)

d1 (km) : 送信所 A と測定ポイントとの距離

d2 (km) : 送信所 B と測定ポイントとの距離

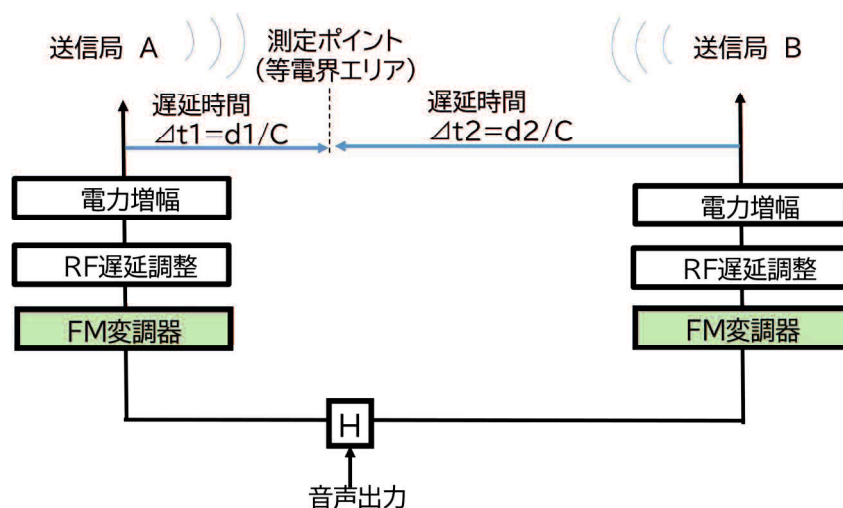


図 3.5 測定ポイントでの遅延時間

図3.5において送信局A，送信局Bの電波送出タイミングを一致させるには，測定ポイントまでの距離が短い送信局Aの電波は， Δt (μs) だけ送信局Bの電波より早く測定ポイントに到達する．よって測定ポイントにおいて送信局A，送信局Bの電波が同時に到達するには，送信所Aの電波送出タイミングを Δt (μs) だけ遅らせるようRF遅延調整を行うことで受信改善を行う．

3.2 デジタル型 FM 変調器の開発⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

デジタルFM変調器の開発について，従来からの課題とその解決について示す．

3.2.1 FM 同期放送の実現に向けた事前検討

FM同期放送のシステム開発に先立ち，アナログ型の同期放送の品質は送信側の条件を見直すことで実用に供するかを確認するために図3.6の系統で実験を行った．この系統では1台の変調器で干渉エリアを模擬しているため受信機にとっては理想的な同期放送の環境が実現されていることになる．この実験を通して次のことが判明した．

1. 理想的に構成された場合の同期放送の受信品質は干渉する2波のD/Uと遅延時間差に依存する．
2. 遅延時間差が大きくなるほど聴感上問題ないと考えられる所要D/Uは大きくなる．
3. この所要D/Uは表1に示した「FM ラジオ放送置局の技術的条件の参考資料として主観評価4を得る条件」として報告されている値に対し，干渉する2波の遅延時間差にもよるが，6から20dB程度下回り同期放送の実現性を示唆する値が得られた．
4. 同期放送受信時の一定の聴感上の音声品質を得るための所要D/Uは従来の周波数弁別型の「FM 直線検波器」，PLL (Phase Lock Loop) を用いた「アナログ型受信機」や「デジタル処理型の受信機」等では大きく異なり，「デジタル処理型の受信機」が優位である．また各受信機の設計上の個体差（メーカー別や機種別）でも所要D/Uが異なる．
5. 2波が干渉し合っている同期放送の音声品質の計測（歪率等）を安定的に行うことは，従来型の受信機では困難であり主観評価に頼らざるを得ない．
6. 以上の考察結果から同期放送の構築は「物理的な性能で同一性を確保できる変調器」の実現と「同期放送の受信特性（D/Uと遅延時間差）を利用したネットワーク作り」により十分可能性があると判断した．

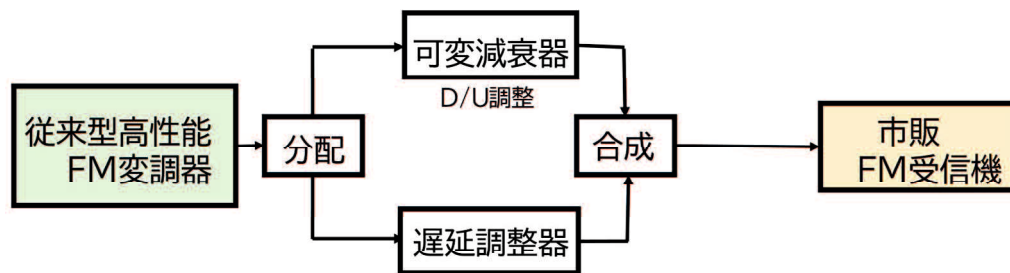


図 3.6 理想型 FM 同期放送の実験系統

3.2.2 同期放送の実現に向けた課題

FM変調器の物理的性能の同一性

実際の同期放送技術は図3.7に示すように異なる送信所に置かれる2台のFM変調器を利用することとなる．この2台（又はそれ以上）の変調器からのFM変調波を全く同一（コヒーレント）に物理的同一性を確保して送信できれば理想型に近い同期放送が実現できることになるので，これを開発目標とした．

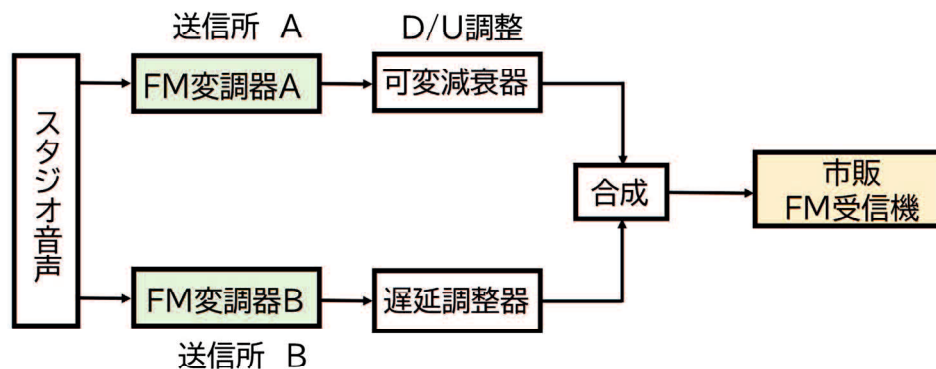


図 3.7 実際の同期放送確認のための実験系統

変調器の物理特性を次の1から5に示す．

1. FM 送信周波数
2. ステレオ・コンポジット信号の FM 変調度
3. ベースバンド信号の振幅と位相特性
4. 入力音声とステレオ・パイロット信号の位相関係
5. 音声入力から FM 出力までの総合遅延時間

これらのパラメータの個別のFM変調器における正確な再現性の確保と，運用時の環境温度変化等に影響されないように音声入力からFM出力までの全処理をデジタル方式で設計・製作することとした．最終的に完成に至ったFM変調器の系統を図3.8に示す．

音声の入力形式はデジタルフォーマットのAES/EBU（Audio Engineering Society/Europe Broadcasting Union）とし，クロック並びにRF周波数安定度の確保のためにGPS（Global Positioning System）やQZSS（Quasi-Zenith Satellite System）を用いた時刻校正型の高精度OCXO（Oven Control Crystal Oscillator）発振器を採用した．

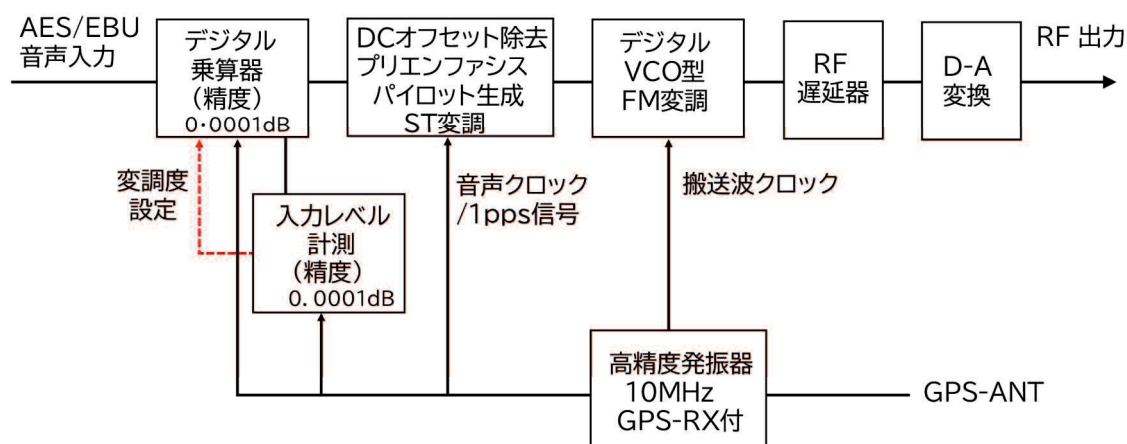


図 3.8 高精度デジタル型 FM 変調器系統図

周波数安定度の改善や位相雑音特性の改良等数度の試作を経て全デジタル型FM変調器を完成させ，2015年7月に大平山送信所（防府市）より本放送を開始した．1号系と2号系の変調器は完全な同一性を実現した．またこのときの音声同期方式は次に示す AES/EBU信号のフレームに同期させる従属同期方式を採用していた．

3.2.3 ネットワークでの時間的同期性

SFNによる同期放送を構築する際には図3.9に示すように，スタジオから複数の送信所へ音声信号を伝送するが，その経路の違いにより各変調器までの音声信号に伝送遅延差が生じる．コンボジット信号の時間的同期性を確保するためには音声信号とステレオ・パイロット信号位相を2局間で正確に同期させる必要がある．すなわち2つの局に置かれる変調器への音声入力信号について，音声信号の同じ時間タイミングでステレオ・

パイロット信号の立ち上がりを同一の位相で制御することが必要である． これを実現する方式として

1. 入力される AES/EBU 信号のフレーム信号（4ms）の立ち上がりのタイミングを利用する従属同期方式
2. 外部の基準となる信号（例えば GPS 信号の 1pps のタイミング）を利用する独立同期方式

の2つを検討した． それぞれの方式には特徴があり， 従属同期方式は回路構成が簡単になるが各送信所で受信されるAES/EBUのフレーム周波数が高安定でかつ， 伝送される各局間で同期している必要がある． 独立同期方式ではGPSの1pps信号並びに， 各送信所への音声伝送遅延時間により生ずる遅延時間の計測と変調器への遅延設定（ステレオ・パイロット信号の立ち上がり時間を一致させるために）が必要になる．

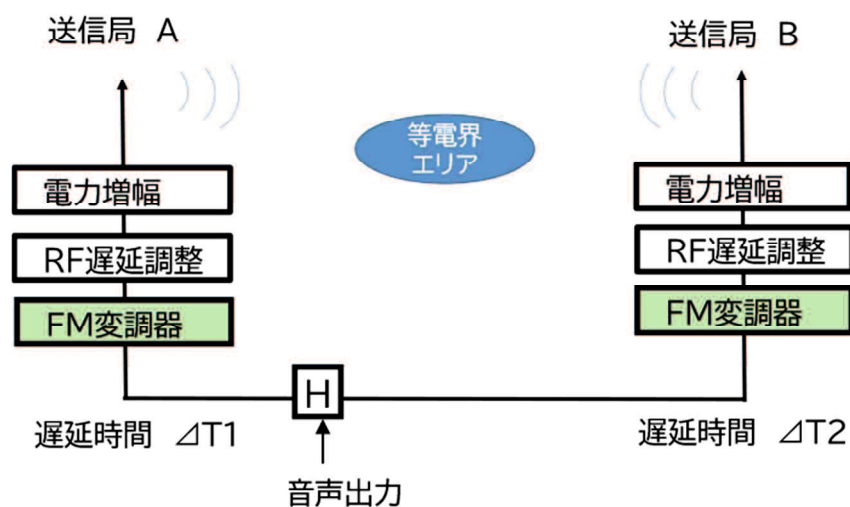


図 3.9 音声中继回線により生ずる音声遅延差

3.2.4 同期放送の実現に向けて

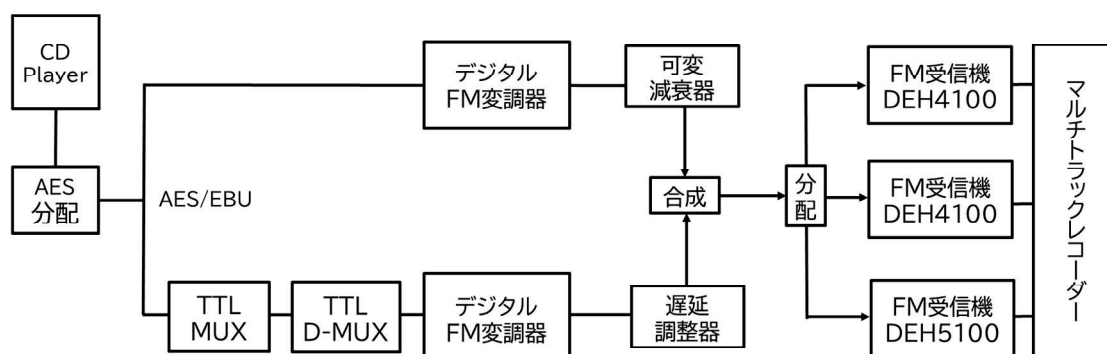
(1) 音声伝送系の課題の抽出

スタジオ-送信所間の伝送は現在3種類に大別されマイクロ波によるSTL (Studio Transmitter Link) /TTL (Transmitter Transmitter Link) 方式 と放送波中継方式並びにIP伝送方式等がある。筆者は従来から多用されているマイクロ波STL/TTL方式および放送波中継方式を採用した。図3.10にマイクロ波伝送した場合に生ずる同期性の課題を調査するための実験系統を示す。一方の系統には音声AES/EBU信号（以下断りの無い限り音声信号と略す）をそのままFM変調器入力とし、他方にはSTL/TTLのTX (Transmitter) -RX (Receiver) を経由した音声信号をFM変調器入力とした。

その結果

1. STL/TTL 伝送後の音声信号のフレーム信号周波数は STL/TTL の受信部に内蔵される基準発振器の周波数に依存し、スタジオ送出時の特性は保存されない。
2. STL/TTL 伝送で採用されている「信号を圧縮・伸張する特性」により伝送された音声信号のレベルが変動する。(0.1dB 程度) これは各 FM 変調器間の変調度差となる。
3. 音声信号レベルと信号周波数成分の変化により音声信号の時間的な平均直流レベル (DC オフセット) が変動する。これは各 FM 変調器間での平均送信周波数の偏差となる。

以上のことが判明した。



ATTによるDU値(0~10dB)と遅延時間(0 μ s~52.6 μ s)を変化させ、同期放送品質を確認。

図 3.10 マイクロ伝送時の同期性の確認

(2) 音声伝送系で生ずる課題の解決

1. 時間的同期方式について

ステレオ・コンポジット信号の時間的同期を確保するために、GPS等の1ppsを基準にした独立同期方式を採用することとした。すなわち、スタジオでの音声の始点を1ppsの立ち上がりとしそれに同期したステレオ・コンポジット信号変調処理やDCオフセット平均化処理等をこの1ppsと同期させ、送信所までの遅延時間を予め測定しておくことで、全局の時間的同期を一致させることが出来る。今回の独立同期方式の実現例を図3.11に示す。

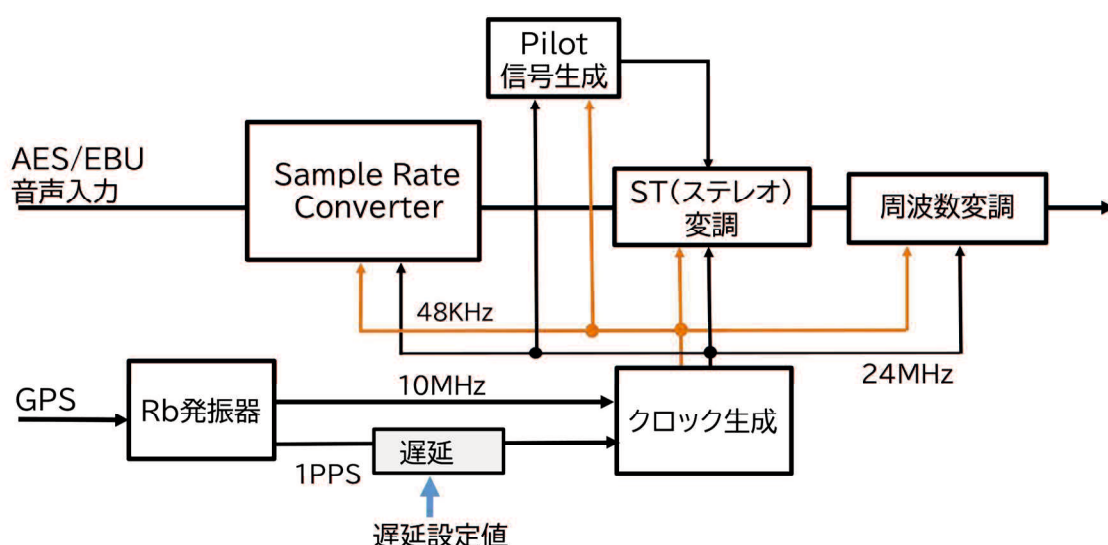


図 3.11 独立同期方式における音声伝送同期の概略系統

図中1ppsの遅延設定値はこの送信所までの音声伝送遅延時間に等しく設定する。

2. 変調度誤差の補償について

音声の信号レベル変動は直接FM変調度の変化となり、例えば伝送系において0.1dBの変化があれば信号1kHzで75kHzの定格最大変調時に750Hzの周波数偏移差を生ずる。この変調度偏差はFMが単一周波数であり同期放送下では瞬時的に周波数が異なる2波が存在するため、受信機のリミッタ効果（AM性雑音を抑制しS/N特性を改善するために用いられる）により混変調成分を発生させる。（図3.12参照）この影響を調べるために図3.3の試験装置を用いて一方の変調度を変化させると、2波の変調度偏差により発生する混変調と同一の周波数偏移差の音（0.1dBの場合750Hz）の唸りが干渉音として

観測された。このため最大変調度偏差を聴感上問題ないといえる10Hz以内に設定できるように入力音声信号に対し、0.0001dBステップのデジタルATT（Attenuator）機能を追加した。

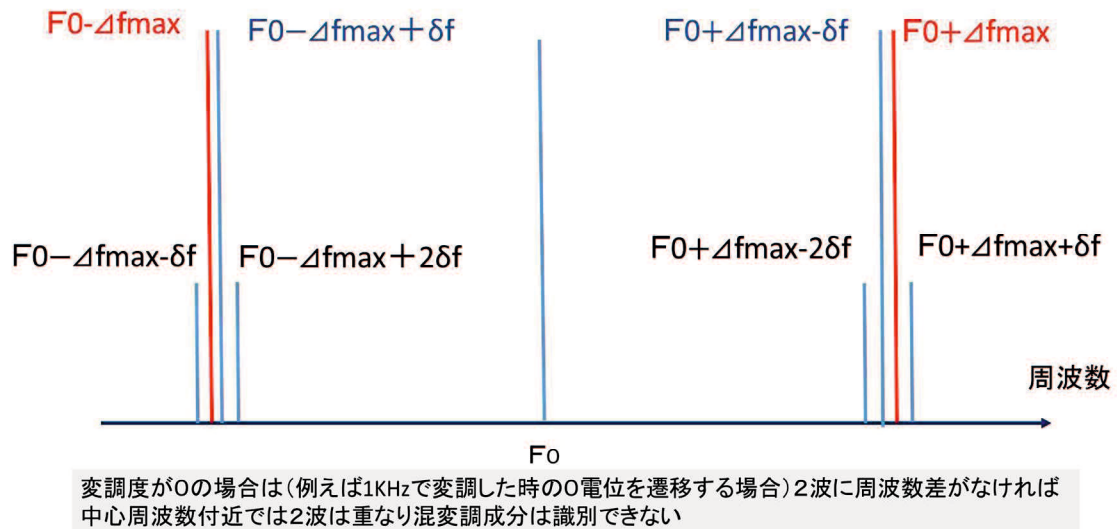


図 3.12 変調度に偏差がある場合の受信機におけるリミッタによる混変調成分の発生の様子

3. 平均直流レベル変動

平均直流レベル（DCオフセット）の変動は直接FM変調波の平均周波数変動となるので伝送路が異なる場合には同様に複数の送信所の送信波の平均中心周波数が異なってしまう。同期放送においてはDCオフセット量が相対的に同一であれば周波数偏差に起因する障害を抑えることが出来ることになるので、各変調器の音声平均化处理（DCオフセット除去）を1秒パルス信号などの基準信号に同期させて同一のDCオフセット量を得る高精度のDCオフセット除去機能を開発し内蔵した。以上により複数の音声伝送路で動作する各FM変調器の同期性と同一性を確保した。

(3) 高精度デジタル型 FM 変調器の主要性能

表3.3に今回開発した高精度デジタル型FM変調器の同期特性に関する主要な性能を示す。表中の個体間偏差とは、複数のFM変調器を製作した場合の任意の2台の性能偏差の最大値を示す。同一伝送路の誤差が異経路に比べて小さいのは、同一送信所では1号系と2号系の変調器が同一の高性能・高精度発振器に同期して動作しているからである。

表 3.3 同期放送用・高精度デジタル型 FM 変調器の主要性能

主要諸元	単体性能	個体間偏差
・無変調時の出力周波数	偏差 $\leq 0.2\text{Hz}$	$\leq \pm 0.4\text{Hz}$
・最大周波数偏移量	偏差 $\leq 1\text{Hz}$	$\leq 2\text{Hz}$
・平均変調周波数の中心の揺れ量	偏差 $\leq 1\text{Hz}$	$\leq 0\text{Hz}$
・プリアンファンスの周波数特性偏差	偏差 $\leq \pm 0.5\text{dB}$	$\leq 0.00\text{dB}$
・ステレオ変調パイロット位相差偏差	偏差 $\leq 1^\circ$	$\leq 0^\circ$

音声同期タイミング誤差（独立同期の場合）

同一伝送路	1号系/2号系	0.1 μS 以下
異経路伝送路	SFN局間	0.2 μS 以下

3.3 SFN フィールドアナライザ¹¹⁾¹²⁾

FM同期放送エリアを構築するにあたり課題となるのは異なる2つの送信所からの放送波が重なる点で干渉する同期放送品質の確認である。従来はこの計測は特殊な信号をスタジオより送出するため、試験放送を行う期間中の深夜の放送休止時間にしか実施出来なかったが、今回開発したSFNフィールドアナライザにより、試験放送期間においても通常の放送波での実施が可能となった。ここでは本装置について記載する。

3.3.1 装置の概要

SFNフィールドアナライザの概略系統を図3.13に示す．系統図に示すようにRF入力を選択分離受信の2波に対してそれぞれ受信する2系統とし，それぞれが共通の1 ppsの入力タイミングで同期して動作するデジタル型の復調器を装備した．（復調器の概略系統を図3.14に示す．）

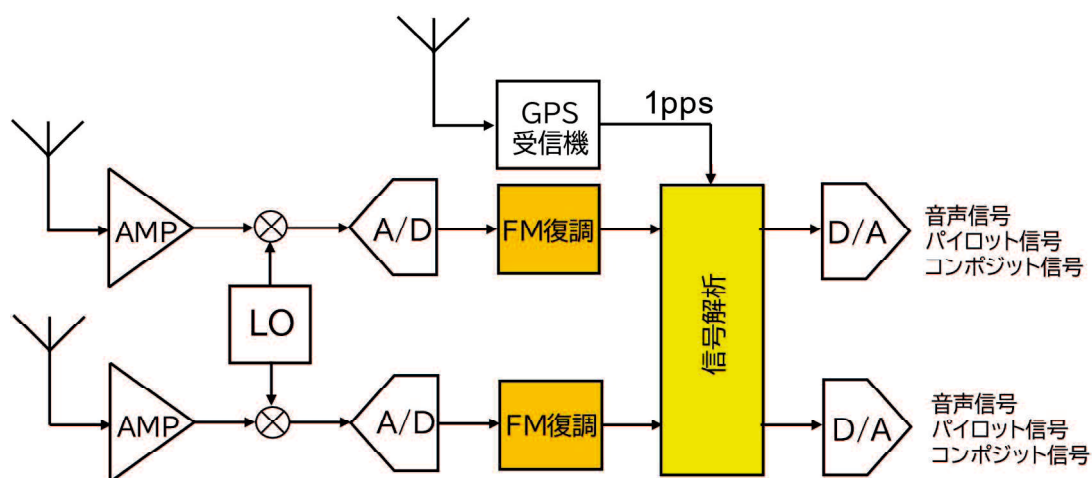


図 3.13 SFN フィールドアナライザ 概略系統図

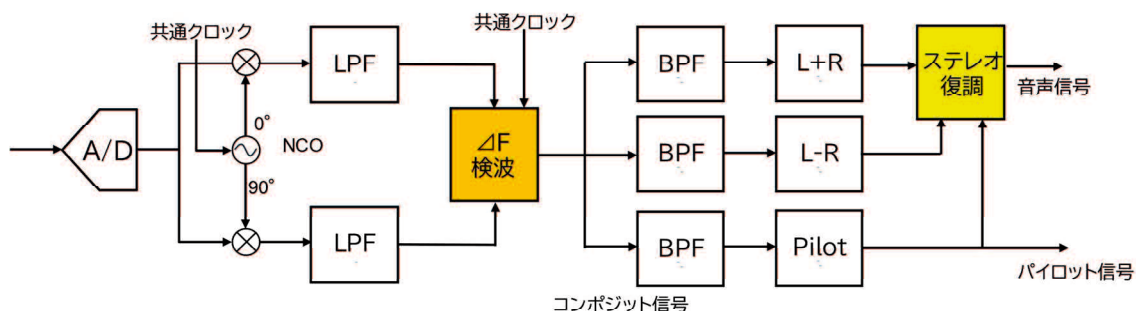


図 3.14 SFN フィールドアナライザ 復調部（1 系統分）

また各復調器のFM主要諸元について表3.4に示す．この中で本FM復調器の特徴は2台の復調器が全く同一のタイミングで動作し同一の復調性能を有している．また復調デジタル出力は変調側の変調度を絶対値で計測できる機能を有している．即ち，最大変

調度75kHz時の出力は838861（-20dBFS時 24bitMAX 2^{23} の1/10）と校正された値を取るように構成している．2つの復調器は1個のFPGA（Field Programmable Gate Array）の中で構成し同一のクロックで並列動作させることで物理的，時間的な同一性を確保した．

表 3.4 デジタル FM 復調器仕様と性能

定格	仕様	
受信周波数	76.1MHz～94.9MHzの人任意の1波	
受信感度	10dB μ V	
受信入力数	2	
ディエンファシス	50 μ s	

項目	性能	2台間偏差
周波数特性	± 0.5 dB以内(50Hz～15kHz)	0.0dB
左右分離度	60dB以上 (100Hz～10kHz)	0.0dB
ひずみ率	0.3%以下 (50Hz～15kHz)	0.0dB
S/N	70dB以上	0.0dB

(注意)AES-EBU デジタル出力端で規定(入力レベル:60dB μ V)

復調器の同一性の確認については，RFの入力1及び2にFM変調波を分配して，同一の入力としてそれぞれ得られた復調出力をD/A変換する前のデジタル部で比較することにより確認した．またすべてのパラメータの計測はデジタル形式のベースバンド処理により実行しアナログ要素の誤差の影響を受けない状態で実現した．

3.3.2 装置の機能

この新たに開発したSFNアナライザの固有の機能について以下に示すが，最大のポイントは選択分離受信波を前提に通常の放送波を受信して計測することである．

1. 2局間の遅延時間差測定

受信する2局の各送信所からのRF遅延時間差を測定する．

2. 2局間の変調器間の物理特性偏差の測定

同一のタイミングで動作しているデジタル型復調器の特性を利用して、同期放送の受信品質に大きな影響を与える2局間の送信機の平均変調度の偏差および、平均中心周波数偏移の偏差を測定する。

3. 同期放送下での音声品質特性測定

同期放送の品質の評価法としては従来主観評価が用いられてきたが、客観的な数値として評価できる評価パラメータを選定し通常の放送波での同期放送音声品質を測定する。これらの機能の実現法について以下に示す。

3.3.3 放送波を使用した遅延時間差測定について

通常の放送波を用いて遅延時間差を測定する方法について新しく開発したアルゴリズムによる方法を含め以下の3つの手法による計測を行い、それぞれの手法による測定結果を相互参照できるようにした。図3.15にFM波をデジタル復調した時のスペクトラム（ステレオ・コンポジット信号）を示す。（ただし、実際に取り扱うデータは通常見慣れたアナログの形式ではなく信号の安定性と再現性を確保するため復調後のデジタル値のまま利用している。）

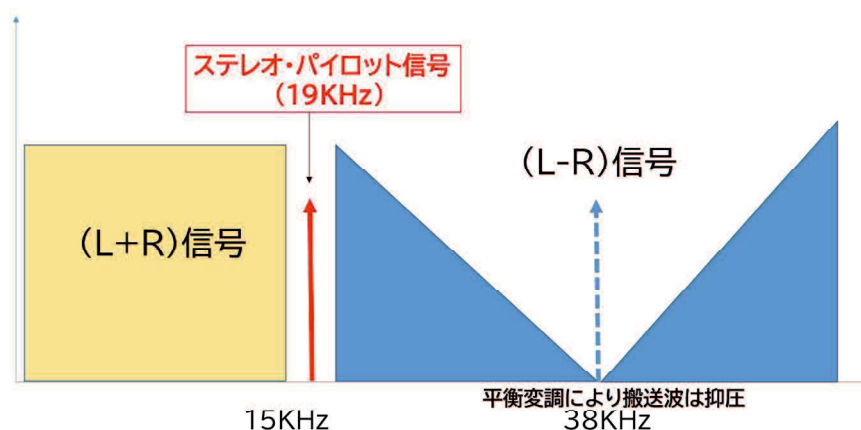


図 3.15 FM 変調のステレオコンポジット信号スペクトラム

1. ステレオ・パイロット信号による計測

独立同期方式で同期放送を実現する条件として、各送信所の変調器は1pps信号に同期して変調波を送出しているため、任意の受信点で受信するパイロット信号の位相を1ppsのタイミングで計測すれば、その地点までの遅延時間を知ることが出来ることになる。

以下その手法について示す．図3.15の復調されたステレオコンポジット信号からパイロット信号のみを抽出する．そのパイロット信号をヒルベルト変換してI,Q成分の信号に変換する,このRF入力1とRF入力2のパイロット信号のI,Q成分から $\theta (= \tan^{-1}(Q/I))$ を用いて各パイロット波の位相を計測することが出来る．このことを図3.16に示す．

たとえば，位相差の計測値が $\theta(\text{rad})$ ，パイロット周波数 $f_p = 19\text{kHz}$ とすると遅延時間差 τ は

$$\tau = \left(\frac{1}{f_p}\right) * \frac{\theta}{2\pi} \quad (3.2)$$

として得られる．

この方法は遅延時間差がパイロット周波数の1周期にあたる $52.6\mu\text{s}$ 以内であることが予め知れていれば有効であるが，位相差計測値が周期性を持つため長い遅延時間差がある場面では絶対値を知ることが出来ない欠点がある．

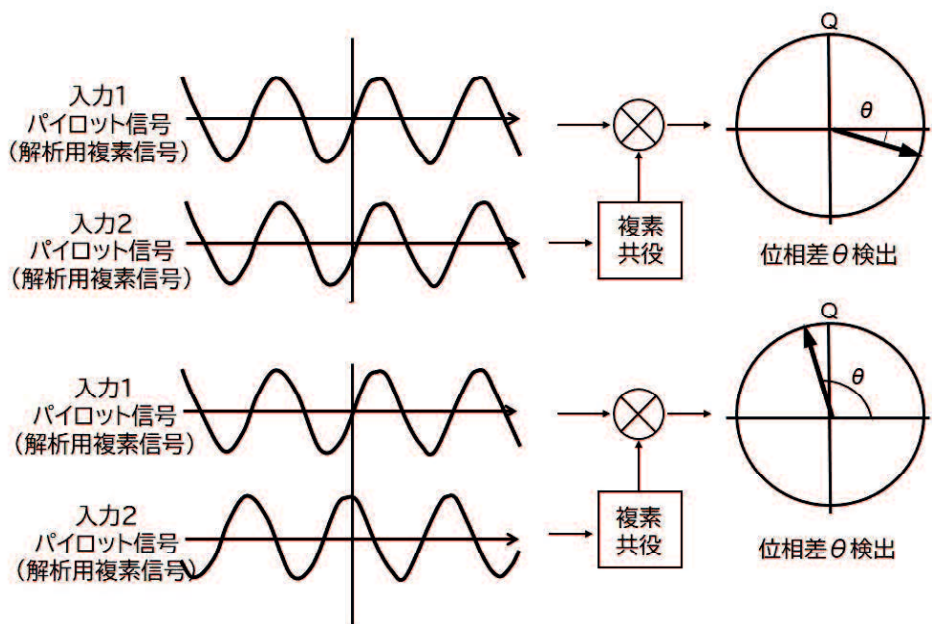


図 3.16 パイロット信号の位相検出

また，今回の計測では2局の送信所の変調器が先に示した表3.4の性能を満たしていることを前提としているが，従来からFM同期放送として同一の周波数を用いて実施している場合は一般に音声信号とパイロット信号の時間同期が管理されていない場合があり，その場合も本計測法で遅延時間差を計測することはできない．

2. 音声信号を時間軸で計測する方法

上記の欠点を補う方法として復調したデジタル音声信号（ここでは上記コンボジット信号の（L+R）成分）を利用して計測を行う方法を考案した．それは，選択分離度が十分取れていない場合に干渉雑音は周波数成分の高い方から影響を与えるため，ステレオ復調後のL及びRの信号はステレオ副搬送波に含まれる干渉雑音が畳み込まれてくるからである．このためもっとも干渉雑音が少ない（L+R）成分を対象とした．また一般の放送波では高域の周波数成分はすくないので取り扱う信号は5kHzの低域濾波器を通して使用している．2つのデジタル形式の音声信号からその時間差を計測する方法を図3.17に示すように，パイロット信号による計測とは異なり時間軸での比較減算を行う．

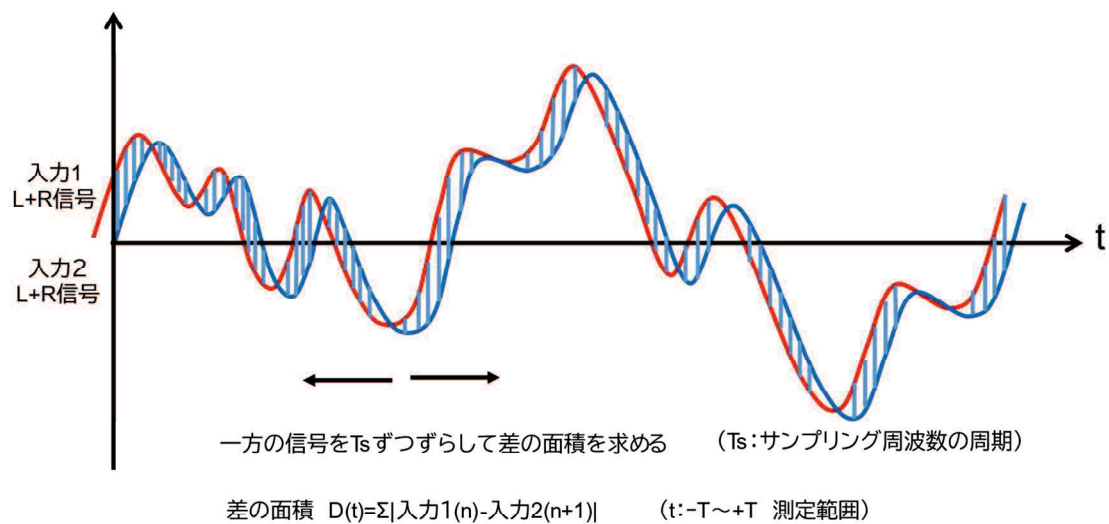


図 3.17 音声信号の遅延時間計測（L+R）信号

移動減算を行うクロック周波数が音声信号周波数に対して十分大きくないため減算の最小値は必ずしもクロック周波数精度とは同期しない．このため図3.18に示すように極小値計測から最小値が起る時間を補間して計測値として求めている．この方式の特徴は回路構成にもよるが，遅延時間差を20msの範囲で計測することが容易である．

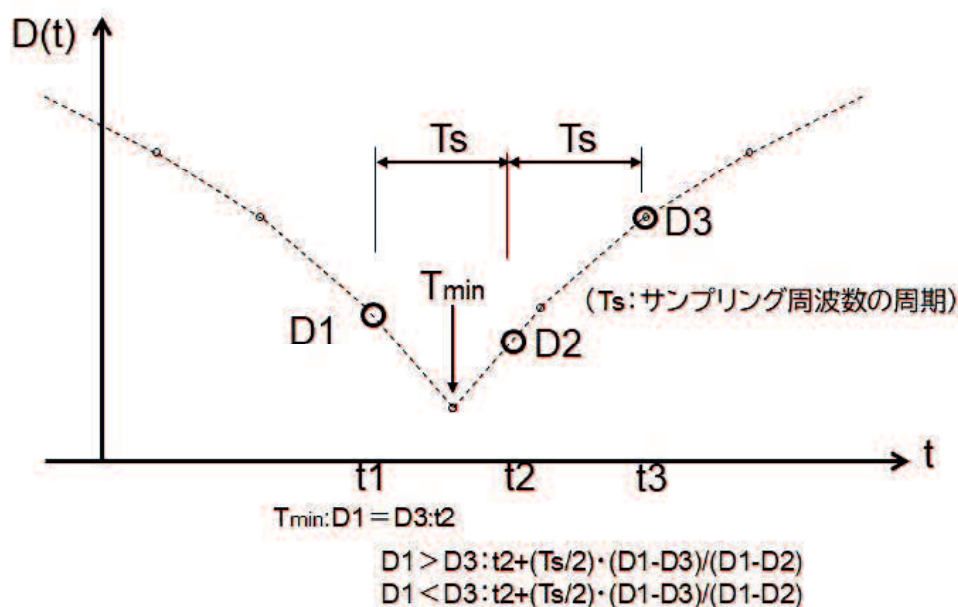


図 3.18 サンプリング点から外れた最小値の予測手法

ただし、先に述べたように2局間の信号の同一性を利用して最小値計測を行っているため、それぞれのFM変調器がアナログ信号入力による変調の場合は表3.4の変調度の同一性が担保されていないことが多く、その場合は十分な精度で計測することは困難となる。

3. 音声信号を周波数軸で計測する方法

上記1, 2の方式とも計測にはそれぞれ制約条件が伴う。このため2で用いるデジタル音声信号（L+R）の周波数成分の比較を行うことで2つの遅延時間差を求める方法を考案した。概略の系統を図3.19に示す。

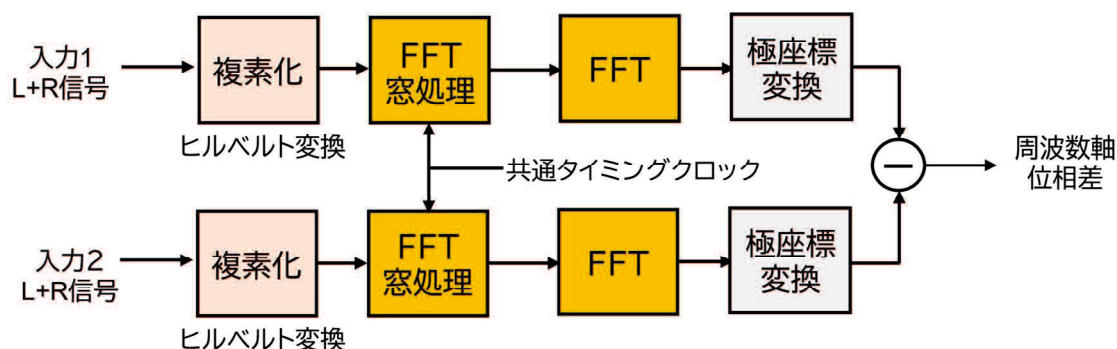


図 3.19 周波数軸を用いた遅延時間計測系統図

2つの復調されたデジタル音声信号（L+R）を全く同一のタイミングで一定の時間軸幅で取り込む。この取り込んだ2つのデジタル音声信号をそれぞれ直交した2つの搬送波（I,Q成分と呼ぶ）を用いてヒルベルト変換を行い、その変換された信号をFFT（Fast Fourier Transform）により周波数成分として取り出す。このIに含まれる周波数成分とQに含まれる周波数成分は当然同一のものであるので各周波数成分のIとQの値でその周波数成分の位相角 $\theta(= \tan^{-1}(\frac{Q}{I}))$ を知ることが出来る。すなわち、2つの信号のそれぞれの周波数成分の各々について計測位相 $\theta_1(f)$ 、 $\theta_2(f)$ が得られる。

これについて

$$\theta_0(f) = \theta_1(f) - \theta_2(f) \quad (3.2)$$

として表したものを図3.20に示す。

横軸は周波数方向であり $\theta_0(f)$ の離散点を結んだ線の傾きは2つの信号の遅延時間差に従うことになるので、遅延時間差 τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{\theta_0(f_1) - \theta_0(f_2)}{f_1 - f_2} \quad (3.3)$$

として計測できることになる。この方法は音声信号の周波数成分の位相差のみに着目しているので2局間のFM変調器の変調度偏差等には依存しないで正確な測定が可能である。

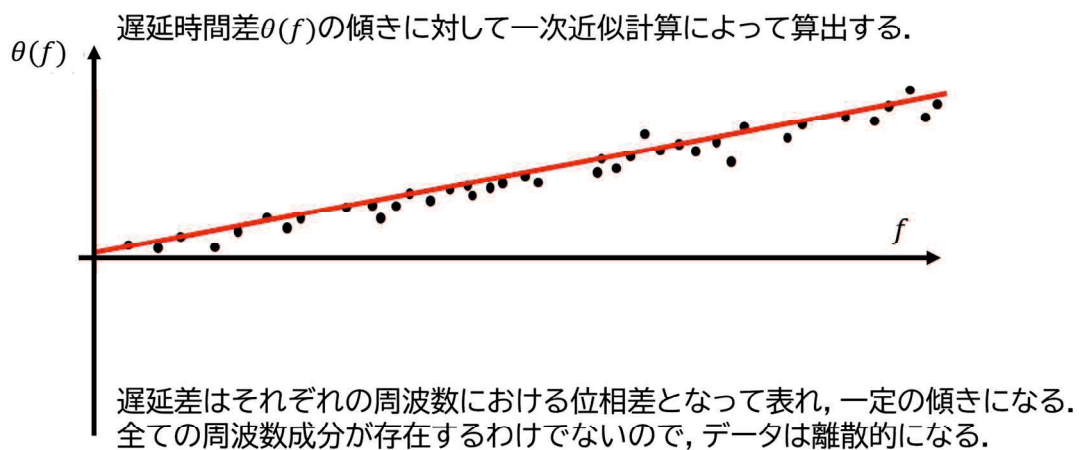


図 3.20 周波数軸に表現された位相差

3.3.4 送信所間の性能偏差測定について

同期放送においては同期を形成する2つの送信所のFM変調特性の同一性が重要であることは既に述べた。ここでは2つの送信所間の物理的な変調特性の偏差を通常の放送波を受信しながら測定する方法について示す。

以下に示す計測法は今回開発したデジタル型FM復調器にFM変調度を校正した復調感度を持たせたことで実現したものである。

1. 局間の平均変調度偏差測定

平均変調度を測定する為に使用するデータは遅延時間差計測に用いたものと同じくRF入力1とRF入力2の復調信号を同一のタイミングで抜き取った音声デジタル信号(L+R)である。

FM復調は送信側のFM変調波の周波数偏移に比例して音声レベルを出力することであるので、絶対値校正されたFM復調器で出力される音声信号レベル(デジタル値)はその値が瞬時の周波数偏移量を示している。このためある一定区間(時間平均を取るのに十分な時間)の音声デジタル信号データ列をプラス側に絶対値として折り返してその平均処理を行うことで平均周波数偏移が計測できる。この様子を図3.21に示す。こうして得られる各入力の平均周波数偏移の差が平均周波数偏移偏差となる。

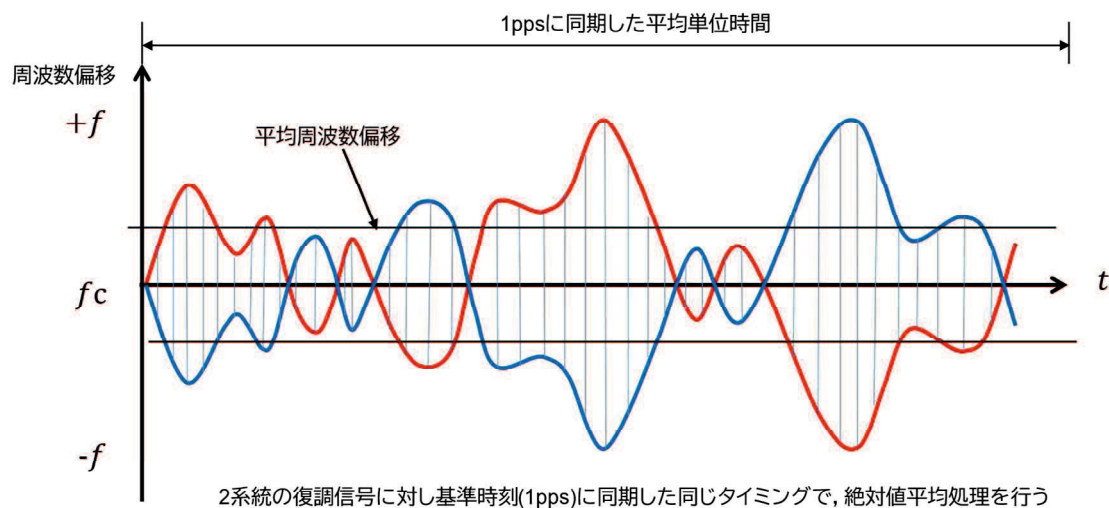


図 3.21 平均変調度偏移の測定

2. 局間の平均中心周波数（DC オフセット）偏差

同期放送で干渉雑音の大きな要因となるのが2局間の送信波の平均中心周波数の変化が時間的に異なる場合である．この平均中心周波数を計測する方法についてのべる．平均中心周波数はデジタル音声信号の正負の符号をつけたまま一定区間の加算と平均処理を行うことで計測できる．2入力間の差をとることで平均中心周波数偏差として計測できる．この様子を図3.22に示す．

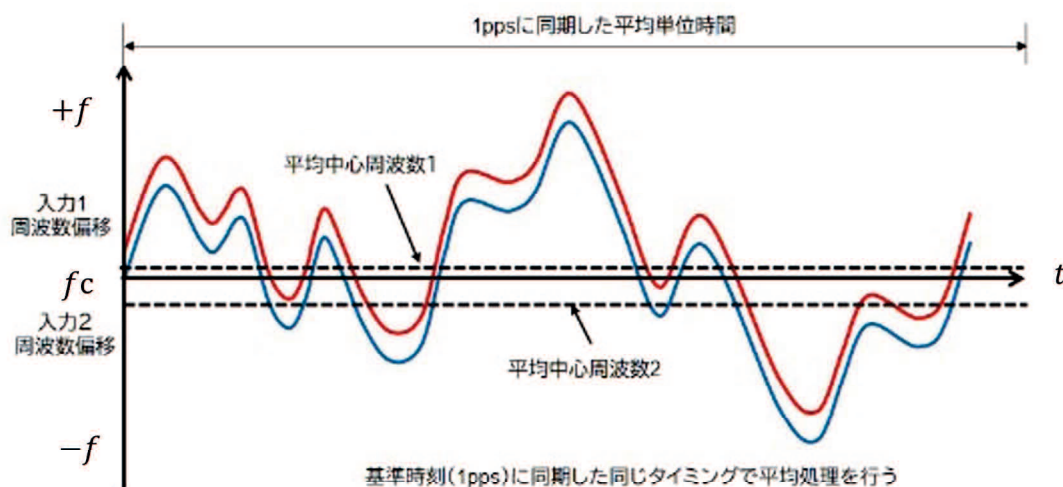
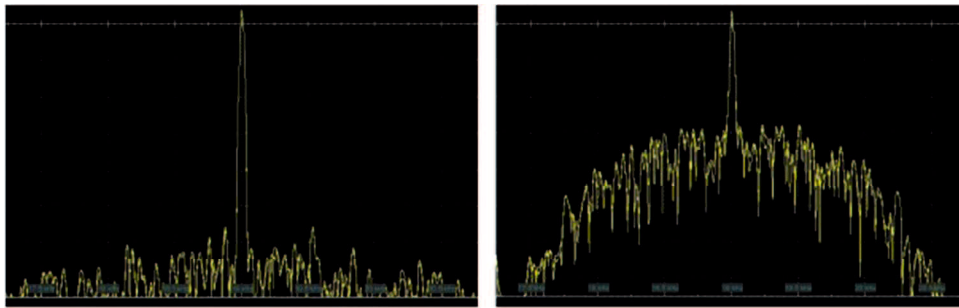


図 3.22 平均中心周波数の測定

3.3.5 同期放送の音声品質の測定について

同期放送においては，干渉しているフィールドにおいて放送波音声の受信品質を客観的に測定する手段はなかった．今回実際の放送波の中に常に存在するパイロット信号に着目し音声品質測定の代替手段と出来ないかを検討した．すなわち，先に述べたように同期放送下では干渉D/Uと遅延時間差に応じて受信音声品質が変化する．これはパイロット信号も同様に影響を受けることが観測された．この様子を図3.23に示す．図ではパイロット信号をスペアナで観測した時の波形を示しており左が干渉が少ないとき，右が干渉が多いときのそれである．この観測データから次の方法によりパイロット信号の干渉雑音比（ここではパイロット信号エラーレシオと定義する．）を計測してその値と主観評価のデータとの相関を調査することとした．



パイロット信号の干渉が少ない場合 パイロット信号の干渉が多い場合

図 3.23 パイロット信号の復調後のスペクトラム

1. パイロット信号エラーレシオ（Pilot Signal Error Ratio）の計測

PSER（Pilot Signal Error Ratio）の計測の系統図を図3.24に示す．デジタル方式でFM復調されたコンポジット信号からパイロット信号をBPFを用いて抽出し，ヒルベルト変換により複素化を行う．

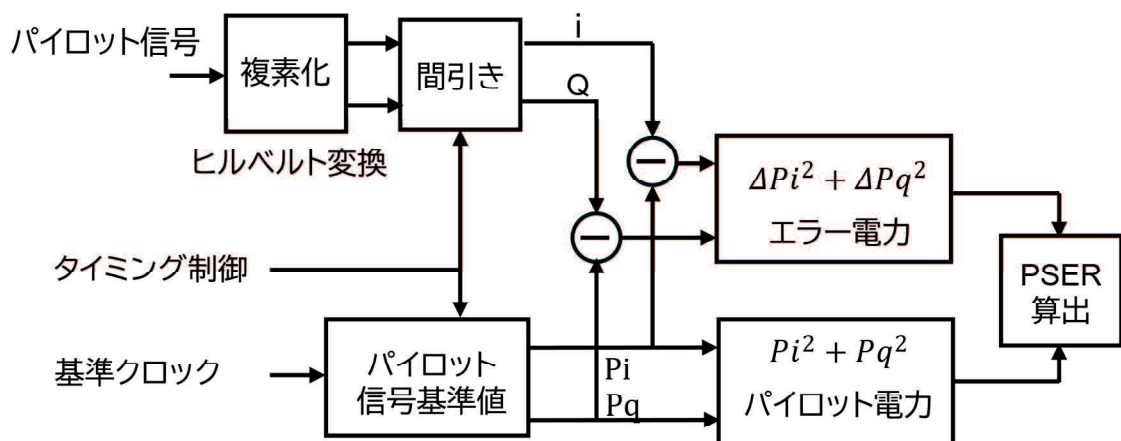
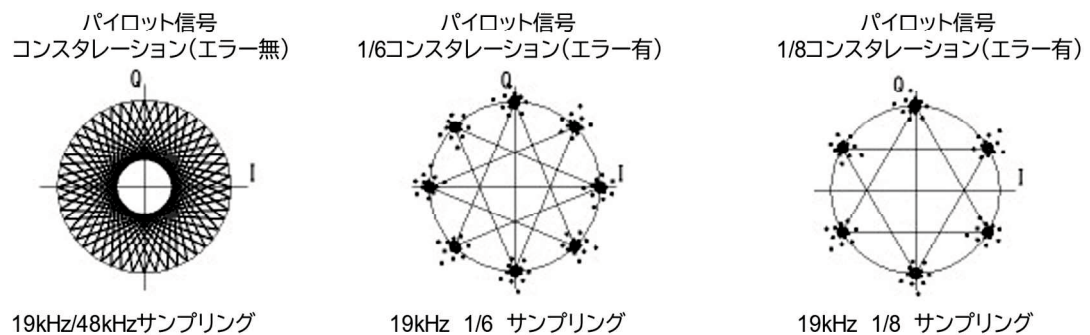


図 3.24 パイロット信号エラー比（PSER）測定系統

この複素化されたパイロット信号は複素平面では図3.24の左に示すコンスタレーションを描くことになる（サンプリング周波数は48kHz）．この48の点の隣接する距離は位相角では 7.5° （ $360^\circ/48$ ）と近接するので本システムでは干渉雑音の誤判定を避けるためにこのコンスタレーション全体の点の8分の1の6点を計測の対象とした．（図3.25の右図参照 系統図では間引きに相当する）



- ・19kHz コンスタレーションをそのまま表示すると、基準点間が近くエラーがあると見づらくなる (サンプリング周波数は48kHz)
- ・基準とする点を間引くことで見やすくなる
- ・間引くと情報量が少なくなるので、適度な間引きとして、1/6または、1/8とした。

図 3.25 パイロット信号のコンスタレーション

一方干渉が無い場合のパイロット信号のコンスタレーションは既知であるので基準となるクロックを用いて複製し、受信したパイロット信号との差分をとり干渉がおきたときの干渉雑音によりこの基準星座点から離れる距離を測定する。(図3.26参照)

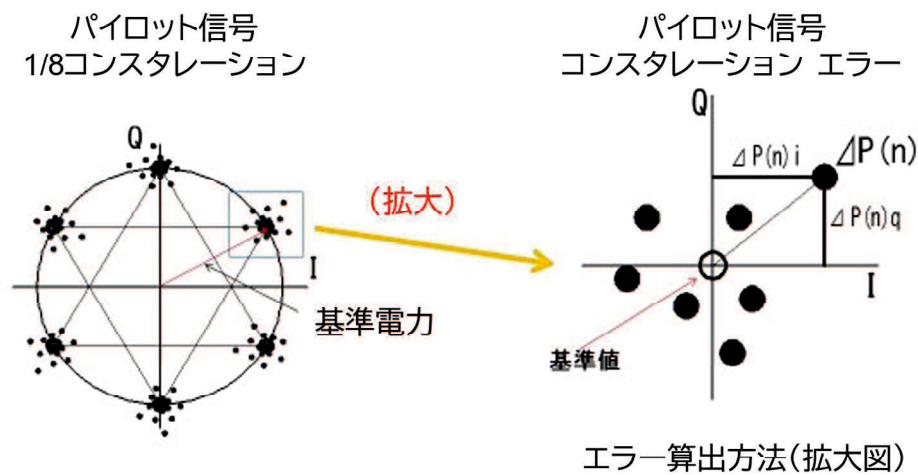


図 3.26 パイロット信号エラー比の計測

2. PSER (Pilot Signal Error Ratio) の定義

上記にて得られたパイロット信号のI成分を P_i 、Q成分を P_q とするとパイロット電力 P_{power} は

$$P_{power} = P_i^2 + P_q^2 \quad (3.4)$$

でありまた干渉により生ずるエラーを $\Delta P(n)$ としその直交成分を $\Delta P_i(n)$ 、 $\Delta P_q(n)$ とするとエラー電力は

$$\Delta P(n) = \Delta P_i^2(n) + \Delta P_q^2(n) \quad (3.5)$$

と計測出来る。

これを用いてPSER (Pilot Signal Error Ratio) を次にて定義する。すなわち

$$PSER = 10 \cdot \log_{10} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{power}(i)}{P_{error}(i)} [\text{dB}] \quad (3.6)$$

である。

3. PSER の計測例

2波干渉時のD/Uと遅延時間差に対してPSERを測定した結果を図3.24に示す。計測条件は評価素材としてラジオ放送で多くの割合を占めるアナウンサーによる読み上げトークシーン（1分間の尺）を作成し、2台の変調器で同期して変調をかけた上で干渉が起こらない無変調時（音声の無音検知を行い）を除いて1分間の平均値を採用した。

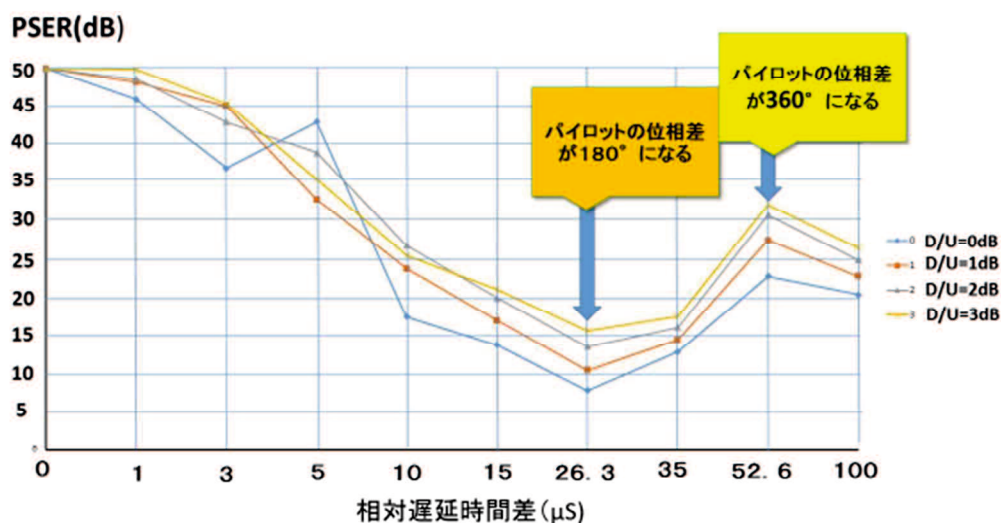


図 3.27 PSER 対 遅延時間差特性

図3.27に示すように、26.3 μ s（パイロット信号の位相差が互いに180°となる時）でPSERの極小値が生ずる。これは2つの干渉し合う信号で受信機ではパイロットが打ち消されて受信できなくなるために劣化が起こっているからである。それ以降53 μ s（パイロットの位相が1周して互いに同相となる）まではPSERは増加傾向になる。

3.3.6 主観評価の例

同期放送時の受信音声の品質について、干渉D/Uと遅延時間差に対して主観評価実験を行った。評価素材はPSER計測に使用したトークシーンを20秒の尺に短縮して使用した。評価者は同期放送の関係者7名で行い、通常の5段階評価とし評点の最高点と最低点を1個ずつ除いて5名の平均値を評点とした。評価点の基準は次とした。

評点 5:原音との違いがわからない

評点 4:干渉音を認めるが気にならない

評点 3:干渉音があるのがやや気になる

評点 2:干渉音が多く原音との違いが気になる

評点 1:干渉音で原音が聞きづらい

その結果を表 3.5 に示す。

表 3.5 音声主観評価（トークンシート）

		遅延時間差(μ s)									
		0	1	3	5	10	15	26.3	35	53	100
D/U(dB)	0	5	5	3.2	3.2	3.8	2	1	1	1	1
	1	5	5	3.6	3.6	3	2	1	1	1.2	1
	2	5	4.6	4.2	3.8	3.2	2.6	1.4	1	2	1.4
	3	4.4	4.6	5	4	3.6	2.6	2	1	2.2	2
	4			5	5	3.6	2.8	1.4	2	2.4	2
	5			4.2	4	3.4	3	1.8	1.8	3	1.8
	6				4.6	3.6	3.2	1.8	2.2	3	2.2
	7				4.4	4.2	3.2	1.8	2	3	2.6
	8					4	3.6	2	2.2	3	2.6
	9						3.4	3	2.4	3	3
	10							3.6	3	3	3.2
		評価値4以上		評価値3～4		評価値2～3		評価値2以下			

PSERと主観評価の詳しい相関については次章で示すが，表3.5からはパイロットの位相差が 180° になる $26.3\mu\text{s}$ まで PSERと主観評価は減少（品質が劣化方向）していく．また，パイロットの位相差が 360° となる $53\mu\text{s}$ ではPSERと主観評価はともに増大して $100\mu\text{s}$ では減少する．このことからPSERと主観評価は同一の傾向を示し相関があることがわかる．よって，PSERは同期放送の遅延時間差に限らずFMステレオ放送なら音声品質の評価に使用できる．

3.3.7 Pilot 品質と主観評価の相関について

図3.28に0から $26.3\mu\text{s}$ 以内でのPSER-主観評価の相関図を示す．

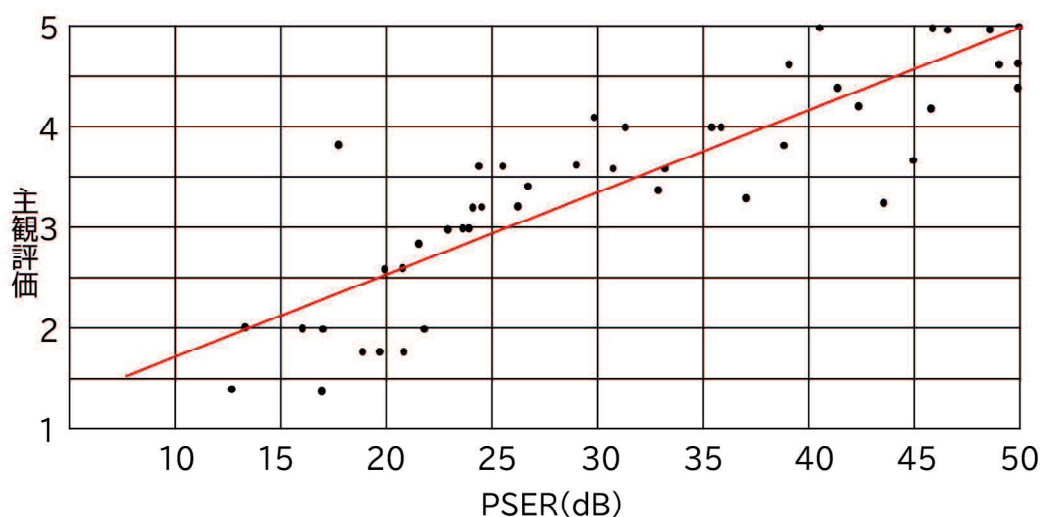


図 3.28 PSER 対 主観評価 相関図

PSERと主観評価の間には強い相関が見られ，PSERを同期放送の品質を示す客観値として利用できることがわかった．なお，一般に市販されているカーチューナーやポケット型携帯ラジオは弱電界時や強いマルチパス信号を受けて（同期放送時の干渉に酷似）パイロット信号を良好に再生できない場合は自動的にモノラル受信に切り替えて品質を維持する等の手段が取られていることが多いが，今回製作したFM復調器は干渉時のパイロット信号をそのまま用いてステレオ復調後の音声を出力しているので音声品質とパイロット信号品質の関係は保たれている．

このため、カーチューナーで試聴するときの主観評価値とは異なることになる。（一般にカーチューナーの方が受信品質は良くなることを事前の実験で確認済である。）今回試作した装置の外観を図3.29に示す。

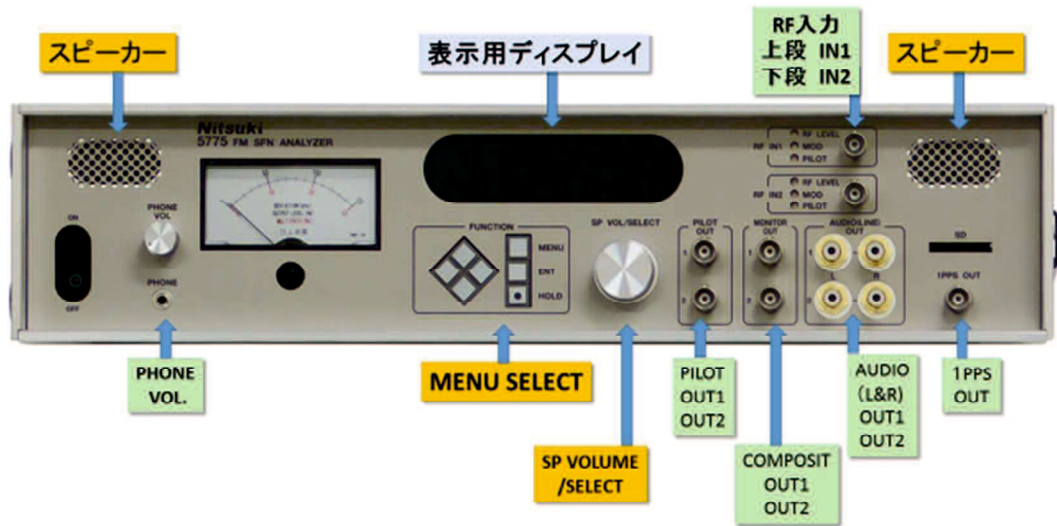


図 3.29 SFN フィールドアナライザ外観

3.3.8 その他の機能

本装置をFM同期放送はもとより通常のFM放送についてもフィールドでの使用を便利にする補助的な機能を持たせた。その機能を表3.6に示す。

表 3.6 SFN フィールドアナライザのその他の計測・表示機能

機能	備考
FM帯域のRFスペクトル表示	2RF(76.1~94.9MHz)入力に対して(分離受信確認用)
RF入力レベルの表示	2受信入力に対して(dB μ V)
RF入力レベル比の表示	上記2入力の差分(dB)として
復調音声信号の波形表示	2受信入力に対して
復調音声信号のスペクトル表示	0~5kHz帯域にて
パイロット信号の位相	基準1ppsの立ち上がりを0°基準として(0~ $\pm$ 180°)
SINAD測定	試験トーン信号(1kHz等)受信時
S/N測定	同上

3.3.9 実フィールドにおける検証

本装置を実際の同期放送エリアで試験した結果について、測定例を用いて以下に示す。

(1) 試験エリアの特徴

今回の試験地点はFM-KRY山口局とそのエリア内に建設したFM-KRY柳井局の同期放送エリアで行った。試験地点（山口県上関町）を図3.30に示す。

（図中において赤線で山口局の放送エリア，青線で柳井局の放送エリアを示している。）

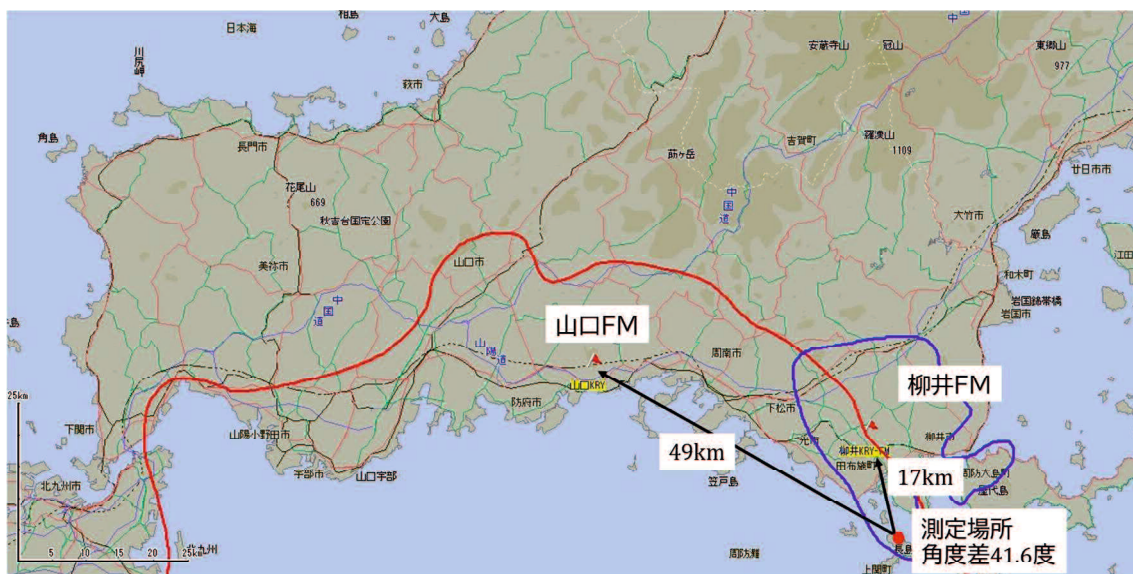


図 3.30 実フィールドにおける測定試験地点

この地点は山口局と柳井局が弱電界（50dB μ V以下）で等電界で重なる地点であり，特に山口局からは海上伝搬受信で，柳井局からは丘回折で受信する複雑な地形のポイントである。受信試験の様子を図3.31に示す。

試験は2018年10月14日（日）夕方に実際のオンエア放送波を用いて行った。図に示すように2基の2素子八木アンテナを用い，それぞれ山口局（アンテナ1）と柳井局（アンテナ2）を選択分離受信するように設置した。選択分離受信の様子を図3.32に示す。



図 3.31 実フィールドにおける検証の様子（測定地点：山口県上関町）

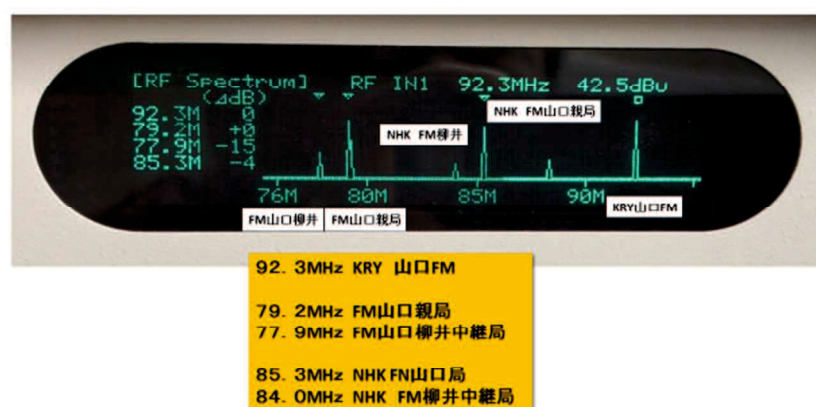


図 3.32 選択分離受信の状況

図3.32は受信アンテナ1で山口局の選択分離受信の様子を示しているが、受信アンテナ2では柳井局を選択受信している。（スペクトラム写真は略）アンテナ1では約10～15dBの分離受信が出来ていることがわかる。

(2) 送信所間の FM 変調波の偏差測定

図3.33に各送信所のFM波の変調特性とその偏差についての測定結果を示す。図に示すように平均中心周波数（DCオフセット量）は偏差-0.1Hzであり平均変調度（トーションにて）は0.0023dBの誤差を持っていることがわかる。

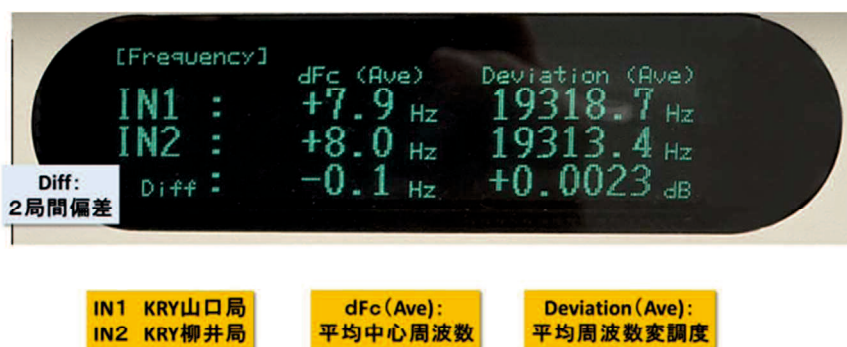


図 3.33 2 局間の周波数変調特性の測定

(3) 送信所間の遅延時間差測定

図3.34に2局間の遅延時間差についての測定結果を示す。図において、上段が時間軸で音声信号の畳み込み法計測した結果、下段に周波数軸FFTで測定した結果を示す。先に2局の変調度が一致していることを示したようにこのような環境下では時間軸法と周波数軸法では大きな差異は生じないことがわかる。なおこの遅延時間差は当初の設計値通りの値を示している。また、画面右側に2局を受信したパイロット信号の位相とパイロット位相差から計測される遅延時間差を表示している。即ち遅延時間差 Δt は下記により求めている。

$$\Delta t = \frac{1}{19\text{kHz}} * \frac{262^\circ - 98^\circ}{360} = 23.97\mu\text{s} \quad (3.1)$$

であり、上記の2方式による計測値と一致している。

注)この山口局と柳井局の同期放送エリアでは他にも2局の電波が等電界となる地点が複数存在する。このうち強電界（70dB μ V以上）で等電界となる地点を選んで2局の遅延時間差が0 μ sとなるように設定しており、結果として上関町地点ではこの遅延時間差となっている。

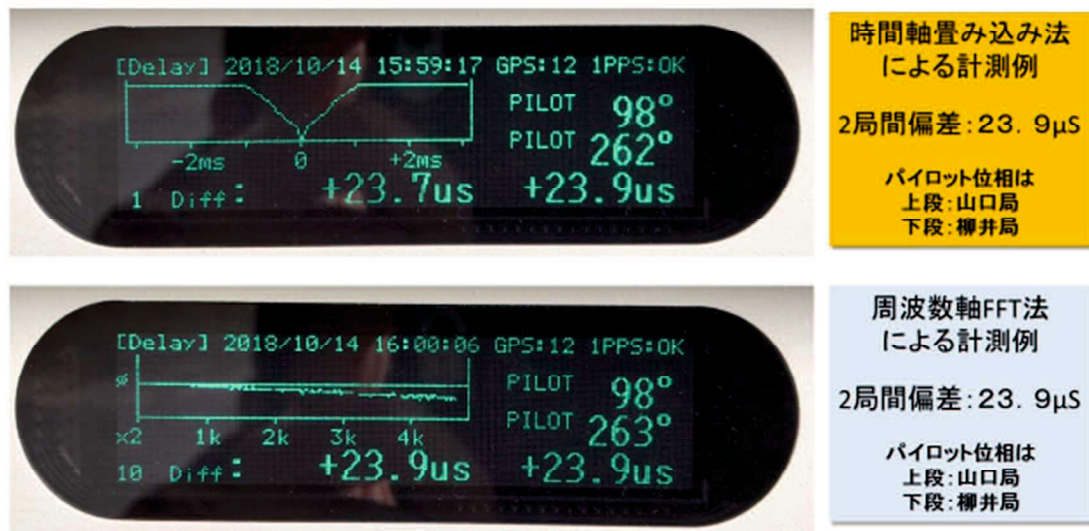


図 3.34 遅延時間差測定

同期放送受信の品質測定

図3.35にPSERを用いて計測した同期放送受信の測定例を示す。PSERの測定値は前述と同じ選択分離受信を行った時のD/U条件下（10～15dB）での計測値である。それはこの地点（D/U=0dB，2波の遅延時間差=23.9 μ s）で一般家庭の聴取者が固定受信機で受信し，2素子八木アンテナ程度の選択指向性を持つアンテナで良好な受信状況を確保した時の得られる受信品質と想定した。この時RF-IN1（山口局）はPSER=28dB；主観評価換算3+）RF-IN2（柳井局）はPSER=32dB（主観評価換算4+）が得られることがわかる。また移動時の受信環境ではカーチューナー等が用いられ，その場合はこのような環境下ではモノラル受信に切り替わり主観評価は4以上が得られることを確認している。



図 3.35 同期放送の PSER による品質測定例

3.3.10 考察と今後の課題

FM同期放送の遅延時間や放送品質を計測できる装置を開発することで、干渉しているフィールドでもPSER測定が受信品質管理に有効であることも検証し、本装置の実用性が確認できた。なによりもこの装置の開発により、地方ローカル局の限られた技術部員が放送休止の夜間に作業することなく、放送中に測定することで作業効率が大きく向上した。

第4章 自己干渉および外来干渉抑圧技術

4.1 FM 自己干渉抑圧装置¹¹⁾¹³⁾

4.1.1 まえがき

上位局と下位局で同じ周波数を用いる単一周波数ネットワーク（SFN）は限られた周波数資源を有効に利用できる手法であるが放送波中継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が受信アンテナに回り込み、中継装置を発振させたり信号の品質を劣化させたりする問題がある。

現行の地上デジタル放送においては回り込みキャンセラ¹⁴⁾によって解決がなされているが、これはデジタル変調方式であることを利用して回り込み波を解析することで実現している。アナログ変調方式であるFMラジオ放送では回り込み波を解析することが困難であったため、FMラジオ放送の中継では回り込みキャンセラが実用化されていなかった。FMラジオ放送においてもデジタル信号処理を用いたマルチパス歪の除去について報告がなされているが¹⁵⁾、上位局よりレベルの高い回り込み波を除去することは検討されていない。

今回、FMラジオ放送波でも解析が可能な時間軸相関を使って回り込み波の遅延プロファイルを解析し、適応フィルタと組み合わせて減算する方式で上位局よりレベルの高い回り込み波のキャンセルを可能とした。また、適応型アンテナ合成を併用することで信号品質の劣化を抑えたFMラジオ放送用の自己干渉抑圧（回り込みキャンセラ）を実現できたので報告する。

4.1.2 同期放送の概要

(1) 同期放送について

同期放送は、同一の放送エリア内において2つの送信所（例えばそれぞれ上位局、下位局と呼ぶ）からの送信波周波数を同一にすることであたかも上位局の送信電力が増加したごとくにサービスエリアの拡大を行える技術といえる。しかし上記の2局からの送信波が重なる地点ではこの2局間の送信波が同期状態に無い場合は一方が他方の干渉波となり受信信号の品質を劣化させることになる。すなわち、同期放送とは2つの送信

所からの信号が重なる地点においてお互いの時間的相関を強くさせることであたかも1つの信号しか存在しないようにすることと等価になる。

具体的には、2つの送信波による受信D/U=0dB、すなわち等電界地点において、2つの信号がコヒーレントであること（送信周波数、変調度が一致していること）、2つの信号の遅延時間が等しいこと（音声遅延時間、RF遅延時間が一致していること）を実現することといえる⁹⁾。お互いに干渉しあう同期放送の2波が遅延時間差を持つ場合は音声の品質劣化となるが、等電界地点で遅延時間差を0に設定することで遅延時間差が生ずる受信点では必然的にD/Uが大きくなり音声品質の劣化は小さくなる。同期放送ネットワークを構成する上でベースバンド信号の伝送手段としては次の3方式が実用化されている。

1. マイクロ波帯を用いたSTL (Studio to Transmitter Link) -TTL (Transmitter to Transmitter Link) 方式

主にM/N帯を用いた安定なデジタル専用回線で構築できるが機器と建設費用が高い。

2. VHF帯を用いたSTL-TTL方式

VHF帯（160/60MHz）によるデジタル専用回線で構築する。マイクロ波帯に比較すると費用は低めになるが市街地雑音や混信の影響を受けやすい。

3. IP伝送方式

光ファイバー等の有線を用いたIP信号による伝送方式である。IPキャリアからの借用回線であり、一般的には伝送時に生ずる受信信号の遅延時間揺らぎを安定化させる機器⁴⁾が必要となる。また予備回線として他のIPキャリアとの併用やVHF帯のSTL-TTLが用いられる例が多い。

(2) 放送波中継による同期放送網の実現

放送波中継により上位局と同一周波数で中継局を構成する場合の利点と課題を次に示す。

1. 放送波を中継回線とするので特別の回線は不要になり圧倒的にコストを低減できる。
2. 送信と受信の周波数が同じであるため送信アンテナから放射された電波が受信アンテナに回り込み、中継装置を発振させたり信号の品質を劣化させることがある。

3. 下位局の送信電波は必ず上位局の受信電波より図4.1に示す信号処理時間分遅れるため、遅延時間を上位局と同じにすることはできない。

このため放送波中継による同期放送の実現は困難と考えられてきた。しかし上位局との中継局の重複エリアが小規模であるなら②の課題を解決する回り込みキャンセルが実現できれば大きなコストメリットや周波数有効利用が期待できる。

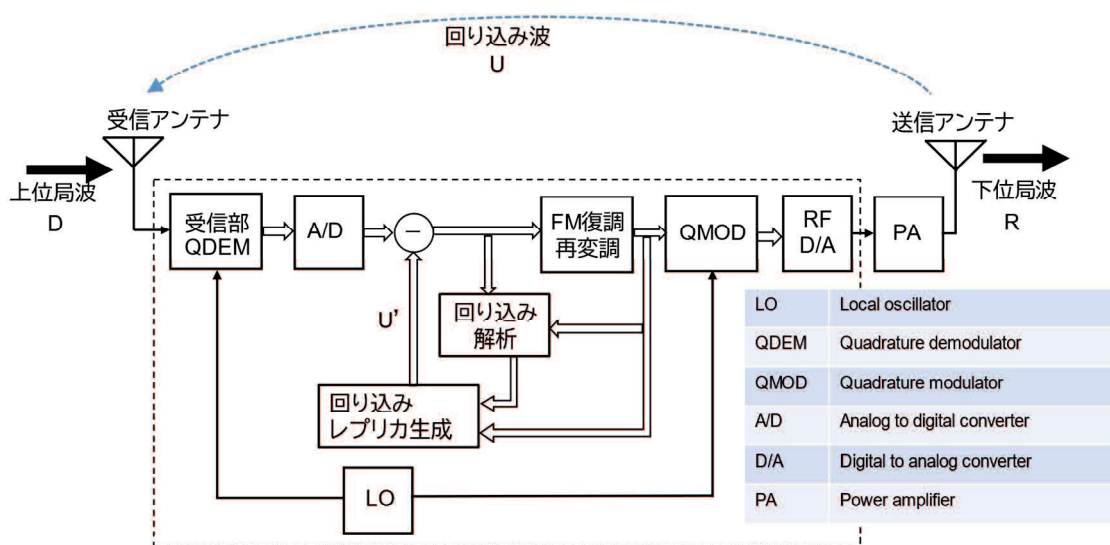


図4.1 FM回り込みキャンセル構成例

4.1.3 FM 回り込みキャンセル

FMラジオ放送用の回り込みキャンセル装置とPA（Power Amplifier）で構成したSFN放送波中継局の構成例を図4.1に示す。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。回り込みキャンセルは送信波が受信アンテナに回り込んで受信される回り込み波のレプリカ信号を内部で生成し、受信信号から減じることで回り込み波を打ち消す装置である。同じ鉄塔に送信アンテナと受信アンテナを設置する場合、中継送信波の回り込み波は上位局波に対して大きなレベルで受信されることがある。そのため、回り込み回り込み装置はマイナスD/Uとなる受信環境でも動作しなければならない。

(1) FM 波の信号処理方式

図4.1において受信したFM信号は受信部でローカル周波数信号（LO）を使って直交復調（QDEM）し，I成分とQ成分をA/D変換する．減算器と回り込み解析部，回り込みレプリカ生成部は，回り込み波を打ち消す部分である．FM復調再変調部はFM変調信号をコンポジット信号まで復調し，再度FM変調を行うことで信号レベルを一定にしたFM変調信号にする．その後，直交変調（QMOD）してD/A変換器でRF周波数の送信信号を出力する．QDEMからQMODの間は，I成分とQ成分によって構成される複素信号で処理を行う．上位局波を D ，回り込み波を U ，回り込みレプリカ信号を U' とすると，下位局波 R は次式で表すことができる．

$$R = (D + U) - U' \quad (4.1)$$

受信信号は上位局波 D と回り込み波 U が合成された信号 $D+U$ となり，回り込み波を完全に打ち消すには U と U' を一致させて下位局波 R が上位局波 D と同じになるようにすればよい．

(2) 回り込みキャンセル部

図4.2に回り込み解析部と回り込みレプリカ生成部によって構成される回り込みキャンセル部を示す．

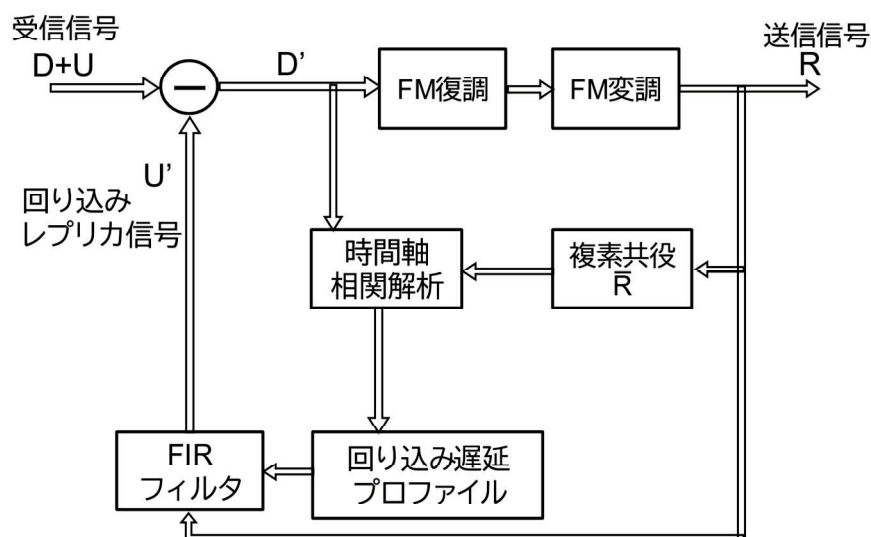


図4.2 回り込みキャンセル部

1. FM復調部

受信信号をFM復調しコンポジット信号を生成する。この時、受信信号に含まれる干渉や雑音成分が上位局信号に対しC/N（Carrier to Noise Ratio）がFMスレシヨルドと呼ばれるC/N $\geq$ 12dBであれば、FM復調の帯域利得特性によりS/Nに対してFM改善利得分（コンポジット信号の場合20dB以上）だけ高いS/Nの復調信号が得られる。このことがFMラジオ放送が高品質放送とされているところである。（AM方式のS/N（Signal to Noise Ratio）は一般にS/N=C/NであるがFM方式のS/Nは伝送するベースバンド信号の帯域(f_h)よりも広い伝送帯域幅（BW）を必要とするため復調時にその帯域幅分の改善利得が得られる。ここで $BW = 2 * (FM + fh)$ 、FMは最高周波数偏移であり改善利得 β はC/N $\geq$ 12dBにおいて $\beta = 2 * \frac{FM}{fh}$ である）すなわち、キャンセル部において回り込み信号がC/N $\geq$ 12dBに抑圧できれば希望波である上位局信号が改善利得を得て品質良く復調されることになる。

2. FM変調部

復調したコンポジット信号を再度FM変調する。この過程で送信信号は受信信号のレベル変動の影響を受けない一定レベルのFM変調信号とすることができる。この信号は送信部へ送られて送信波となるが、分岐された信号は相関解析部とFIRフィルタ部へ送られ、それぞれ相関参照信号と生成する回り込みレプリカ信号の元信号となる。

3. 時間軸相関解析部

受信信号に含まれる回り込み波を検出する部分であり、回り込みキャンセルの中核部分である。回り込みキャンセル後の受信信号 D' と、再変調した送信信号の複素共役信号 $\bar{R}$ をベクトル乗算した信号に対して、時系列の畳み込み演算を行う。

サンプリングごとの時間を k として、それぞれサンプリングごとの上位局波を D_k 、回り込み波を U_k 、送信信号の複素共役信号を $\bar{R}_k$ とすると、回り込みレプリカ信号がまだ生成されていないときの受信信号 D' は $D + U$ であり、遅延時間 τ の畳み込み演算結果 $E(\tau)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} E(\tau) &= \sum_{k=0}^K (D_k + U_k) \cdot \overline{R_{k+\tau}} \\ &= \sum_{k=0}^K D_k \cdot \overline{R_{k+\tau}} + \sum_{k=0}^K U_k \cdot \overline{R_{k+\tau}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

受信される回り込み波は、送信信号の回り込み波であるので変調による時系列の変化は送信信号と極めて強い相関を持つ。一方、上位局波は送信信号に対して中継遅延だけ前の時系列の信号であり、数10kHzの帯域で時間変化するFM変調信号は、数10μs以上の中継遅延があると送信信号との相関は非常に弱くなる。畳み込み演算する時間 K は、上位局波と送信信号の畳み込み演算結果がゼロに近くなる時間として、音声信号の主たる周波数成分が数100Hzから数kHzであること、パイロット信号が19kHzであること、副搬送波の中心周波数が38kHzであることを考慮して、100Hz以上を対象とし19kHzと38kHzは100Hzの整数倍であることから、100Hzの1周期分となる過去10ms区間の畳み込み演算を行うこととした。（ $K=10\text{ms}$ ）

$$\sum_{k=0}^K D_k \cdot \overline{R_{k+\tau}} \cong 0 \quad (4.3)$$

$$E(\tau) \cong \sum_{k=0}^K U_k \cdot \overline{R_{k+\tau}} \quad (4.4)$$

式(4.3)とすれば、式(4.2)は式(4.4)となり、遅延時間 τ の回り込み波のレベルと位相を示すベクトル値を検出することができる。畳み込み演算を行う遅延時間 τ は、送信信号が受信アンテナに直接回り込む時間から、反射で戻ってくる回り込み波の遅延時間までを計算すればよい。回り込みレプリカ信号が生成されて遅延時間 τ の回り込み波がキャンセルされると、式(4.2)の値はゼロに近づいていく。つまり、 $E(\tau)$ は遅延時間 τ の回り込み波のキャンセル残を示す。

4. 回り込み遅延プロファイル部

遅延プロファイル部は、遅延時間ごとに検出した回り込み波のレベルと位相を保持、更新していく。更新係数を μ 、回り込み波のキャンセル残を検出する単位時間を m とすると、検出単位時間ごとの遅延時間 τ の回り込み波のレベルと位相を表すベクトル値 $C(\tau, m)$ の逐次更新式は次式になる。

$$C(\tau, m) = C(\tau, m-1) + \mu \cdot E(\tau, m) \quad (4.5)$$

更新係数 μ の値は、0から0.1の範囲で過去10ms間の変調度に依存して可変させている。FMはアナログ変調であることから時間軸相関の確からしさが一定ではなく、変調度が大きいほうが正しい相関を得やすい。そのため、変調度が大きいときに0.1に近づけ、変調度が小さいときは0に近づけるという可変型の更新係数を採用している。

5. FIR フィルタ部

回り込みレプリカ信号は、適応型のFIRフィルタによって生成している。遅延時間 τ の回り込みレプリカ信号は、送信信号 R を遅延時間 τ だけ遅らせて、遅延プロファイル部で得られた $C(\tau, m)$ をベクトル乗算することで生成される。複数の遅延時間の回り込みレプリカ信号を合成した信号が回り込みレプリカ信号 U' となり、これを受信信号から減算することで回り込み波をキャンセルする。

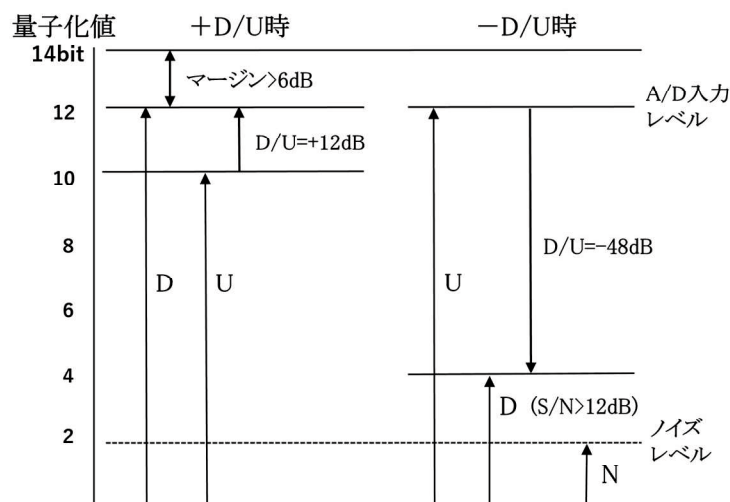


図4.3 A/Dコンバータのダイナミックレンジ

(1) 回り込みキャンセル部の動作概要

1. 初期状態

装置の初期状態とは上位局波が存在し、中継送信は行っていない状態とする。この時、回り込み波は存在しないので上位局波のみのFM復調信号が得られる。

2. 送信開始

次にFM復調信号を再変調して送信を開始する。この時、送信電力は回り込み波の信号レベルに合わせて回り込みレプリカ信号が生成されるように、徐々に電力を増力していく必要がある。回り込み波のレベルに合わせて遅延プロファイルを更新し、順次回り込み波のキャンセルを行いながら送信電力を所定値まで増力する。

3. 定常動作状態

所定の送信電力に達した後は回り込み波の時間的変動（回り込みレベル変動や位相変動）に対して適応的に係数を更新して追従する。

(2) 回り込み波のキャンセル限界について

図4.3に受信入力レベルと回り込みD/Uとの関係を量子化ビット数14ビットのA/Dコンバータを用いた例を示す。

縦軸はA/Dコンバータのダイナミックレンジを示し、Dは上位局希望波レベル、Uは回り込み波レベル、Nはノイズレベルを示す。回り込み波のキャンセル限界はA/Dコンバータのダイナミックレンジが大きな要素となるため、AGCを前置させてA/Dコンバータへの入力レベルを一定化している。回り込みD/Uが正（上位局希望波>回り込み波）のときは上位局波レベルが支配的で、D/Uが負（上位局希望波<回り込み波）のときは回り込み波レベルが支配的になる。D/U=0dBのときは合成レベルが2倍となる場合があるので、マージンとして6dB以上を確保し、A/Dコンバータの入力レベルとしている。

図の左側はD/Uが正（+12dB）のとき、図の右側はD/Uが負のときを示している。A/D入力レベルはマージンを見込んで12ビットのレベルとし、ノイズレベルを2ビット、上位局希望波のS/Nは12dB以上を確保するとすれば、D/Uが負の限界はおおよそ-48dBと計算できる。（A/D入力後のレベルは電圧で計算するので1ビットあたり約6dBで計算できる）

このことから、A/Dコンバータの量子化ビット数が14ビットであれば回り込みキャンセル限界として-48dB程度が期待できる。周波数偏移のみが情報であり、レベルが小さくても復調できるということはFM変調の最大の利点である。

(3) 非定常動作処理

FMの回り込み波のキャンセル処理をする上で次の3点が非定常の動作処理となる。

1. 回り込み発振検知

回り込み波のキャンセル残が上位局波より大きくなると回り込み波を送信することになるので、回り込み発振状態に陥ることになる。回り込み発振状態を検知した場合は、送信出力を直ちに減力し回り込み発振状態が継続しないようにする必要がある。

2. 無音状態の継続

無音時には無変調となり周波数が中心周波数に停滞する。この時、上位局波と送信波、回り込み波は時間変化のない変調信号となるため、時系列の畳み込み演算結果は正しく回り込み波を検出することができない。このため、無音検知を行った上で遅延プロファイルの更新を停止するなどの対策が必要となる。

3. 単一トーン信号の継続

試験放送信号として使われるトーン信号（1kHz等）の場合も変調信号は繰り返しのパターンとなるため無音時と同様なことが起こることがある．この場合も単一トーン信号の検知を行って遅延プロファイルの更新を停止するなどの対策が必要となる．

2と3の対策として上記のように遅延プロファイルの更新を停止する方法は対策の一つであるが，更新を停止するとその間の変動に追従することができないという問題がある．そのため，受信の中心周波数に対して送信の中心周波数をわずかにシフトするという方法を検討した．周波数のシフト量は，無音のとき過去10msの総和が0になる値として100Hzとする．畳み込み演算を行うと回り込み波と相関参照信号は信号の相関を得ることができるが，100Hz異なる上位局波に対しては相関が0になる．このことによって，無音の状態においても回り込み波と上位局波を分離して相関を得ることが可能になる．

この方法は単一トーン信号が継続した場合にも有効であり，変調内容によらず安定した回り込みキャンセルを実現することができる．受信と送信の周波数が異なることによる影響については，フィールドで等電界となる受信点において品質の劣化が考えられるが，100Hzの周波数シフトとすることで聴感上の影響を少なくしている．回り込みD/Uが厳しい条件下での安定した動作のためには有効な手段と考える．

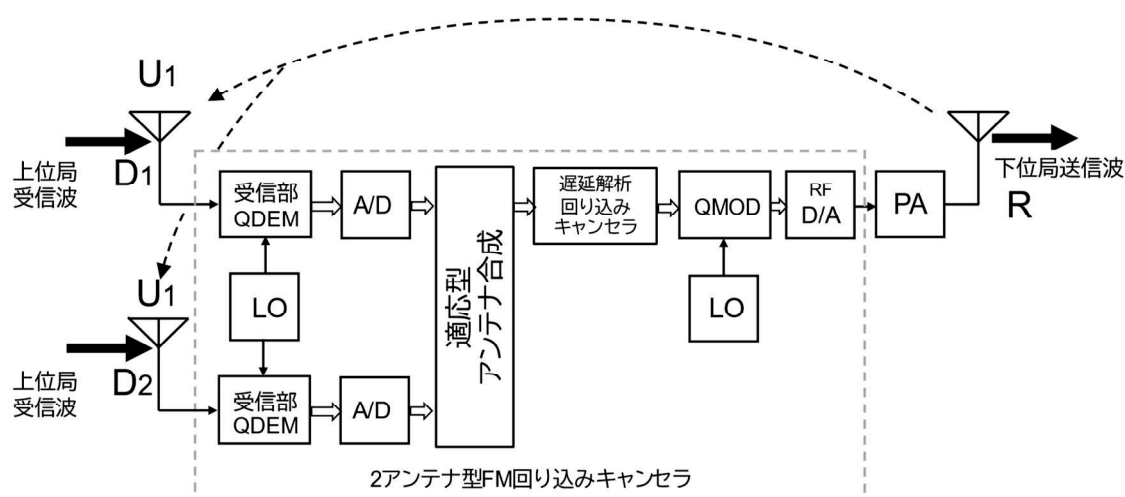


図4.4 2アンテナ型回り込みキャンセル装置構成例

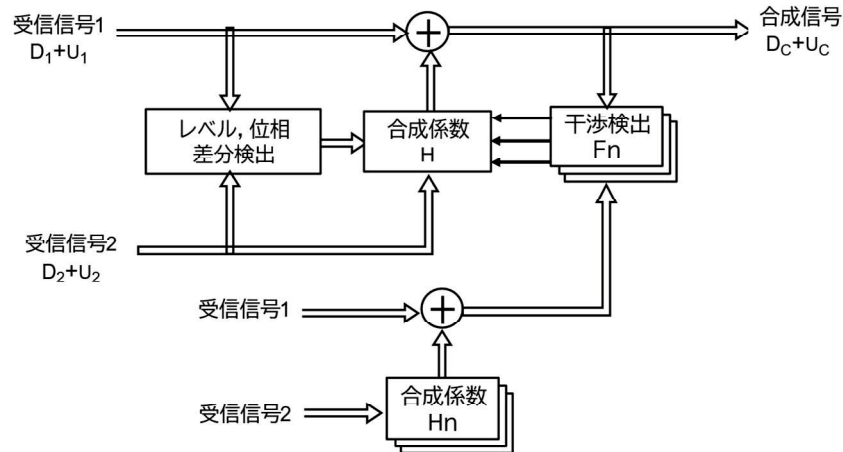


図4.5 適応型アンテナ合成部

(4) 2 アンテナ型 FM 回り込みキャンセラ

2基以上の受信アンテナを用いて、アンテナに誘起される上位局希望波と干渉波の到来角の差を利用して回り込み干渉波を除去する方法がある。2アンテナ型のFMラジオ放送用回り込みキャンセラとPAで構成したSFN放送波中継局の構成例を図4.4に示す。

アナログTV放送の時代にも外国波混信や他局のオフセットされた混信波をキャンセルするために種々試みられてきたが、それぞれに誘起される干渉波の群遅延特性による帯域内信号の消し残りの課題や、多重の干渉波に対して効果が制限されることから実用化は進まなかった。（地上デジタル放送ではデジタル変調であることを利用して同一チャンネル干渉除去装置¹⁶⁾として実用化されている）

2アンテナ型の回り込みキャンセラでは、最大レベルとなる回り込み直達波の干渉をアンテナ合成によって除去し、位相が異なる残りの回り込み反射波を遅延プロファイル解析によって除去する構成としている。

(5) 適応型アンテナ合成部

図4.5に適応型アンテナ合成部の構成を示す。

アンテナ合成は、アンテナ1の受信信号1とアンテナ2の受信信号2に対して位相とレベルを調整した信号を加算合成することで行われる。アンテナ1で受信される上位局波を D_1 、回り込み波を U_1 、アンテナ2で受信される上位局波を D_2 、回り込み波を U_2 、合成係数を H とすると、合成信号 $D_c + U_c$ は以下の式で表される。

$$D_c + U_c = (D_1 + U_1) + H(D_2 + U_2) \quad (4.6)$$

それぞれの信号と係数は複素数で表すベクトル値である．合成係数 H は U_2 が U_1 に対して逆位相，同レベルとなるように制御される．

$$U_1 \cong -H \cdot U_2 \quad (4.7)$$

とすれば，合成信号 $D_c + U_c$ は

$$D_c + U_c \cong D_1 + H \cdot D_2 \quad (4.8)$$

となり，回り込み波が除去された信号となるのだが，実際には複数の遅延と位相の異なる回り込み反射波があるため， U_c はゼロにはならず遅延プロファイル解析によっても除去する必要がある．また，回り込み波 U_2 を U_1 に対して逆位相とするとき，上位局波 D_1 と D_2 が逆位相になってしまうと上位局波の合成レベルも低下してしまうため，上位局波と回り込み波で位相差が 180° 近くなるように受信アンテナを配置することが望ましい．

複数の回り込み波を除去できるわけではないが，アンテナ合成による干渉波の除去は変調方式によらず安定して除去することができるので，最大レベルとなる回り込み直達波をアンテナ合成で除去できるメリットは大きい．

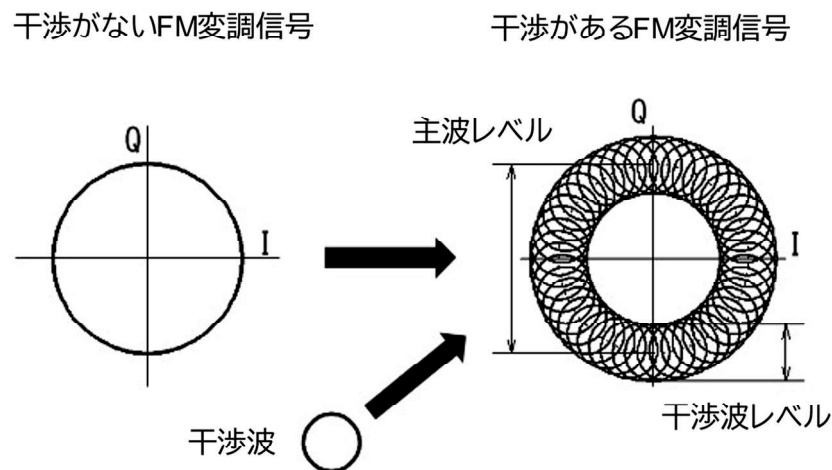


図4.6 複素平面上のFM変調信号

1. 干渉検出部

FM変調信号が干渉を受けた場合のイメージをIQ複素平面上の信号として図4.6に示す．FM変調信号は干渉が無い場合，レベルが一定で周波数（角速度）が変化する信号であるので，複素平面上では信号レベルに応じた半径で円を描く．同じく干渉波もFM変調信号であれば信号レベルに応じた半径で円を描く．この時2つの信号は瞬時周波数が異

なるので、それらが合成された信号は図に示すように2重の円を描く．すなわちこの2重円の太さが干渉度となる．

干渉度は、ベクトル値ではなく干渉の大きさを示すスカラー値であるのでそのままでは合成係数の補正方向を得ることができない．そのため、受信信号1と受信信号2に対して合成係数 H の位相とレベルを変えた複数の合成係数 Hn を使って複数の干渉度 Fn を計測している．

それぞれの合成係数 Hn によって合成された信号の瞬時レベル Zn はベクトルの絶対値として次式で表される．

$$Zn = |(D_1 + U_1) + Hn \cdot (D_2 + U_2)| \quad (4.9)$$

上位局波の合成レベル Ln は瞬時レベルの平均で求める．

$$Ln = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zn(i) \quad (4.10)$$

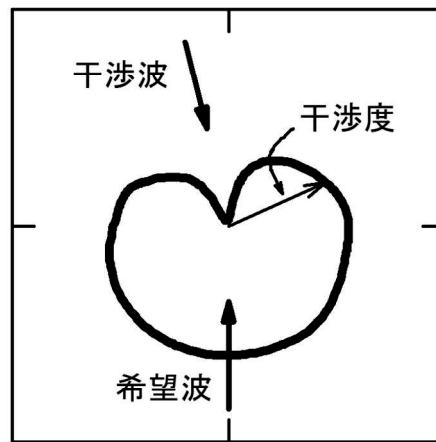


図4.7 干渉度の位相スキャンプロット

それぞれの干渉度 Fn は上位局波合成レベルに対する差分の比率を積分して算出する．

$$Fn = \sum_{i=1}^N \frac{|Zn(i) - Ln|}{Ln} \quad (4.11)$$

積分するデータ数 N は、先の時間軸相関と同様に過去10ms分のデータ数で算出している．干渉度 Fn は U_1 と $Hn \cdot U_2$ が逆位相、同レベルとなる場合に最小となり、算出された

複数の干渉度を比較することで合成後の干渉度が最小となるように合成係数 H の位相とレベルを自動的に調整する。

具体的には、合成係数 H で算出した干渉度 F_0 と、 H に対して $+\Phi$ だけ位相を変えた H_1 で算出した F_1 、 $-\Phi$ だけ位相を変えた H_2 で算出した F_2 を比較する。干渉度 F_1 と F_2 が同程度で F_0 が最小となるように、 F_1 が小さければ合成係数 H の位相を $+$ 方向に制御し、 F_2 が小さければ位相を $-$ 方向に制御する。同様に干渉度 F_0 と、合成係数 H に対して $+A$ だけレベルを変えた H_3 で算出した F_3 、 $-A$ だけレベルを変えた H_4 で算出した F_4 を比較し、 F_0 が最小となるように合成係数 H のレベルを制御する。このように合成後の干渉度が最小となるように継続的に合成係数を自動で制御している。回り込み直達波の位相差はアンテナ設置の位置関係で固定されると考えがちであるが、実際の環境では極めて短い時間で反射する回り込み波も合成された信号となるため、周囲の反射状況に応じて位相やレベルの自動追従が必要となる。なお、 Φ は 10° 程度、 A は $Ln/4$ 程度の値を採用しているが、算出される干渉度の差に応じて可変する方法も考えられる。

また、位相をレーダーサーチのように 360° をスキャンする合成係数 Hs で得られる干渉度 F_s を、中心からの距離としてプロットすると図4.7のようにアンテナ1とアンテナ2の干渉波の位相差が逆位相となる位相で干渉度が小さくなる図を得ることができる。このプロット図は干渉波の位相差を示すので、アンテナ設置の調整に役立つとともに、合成係数 H の初期値として利用することができる。この干渉度比較による合成係数の調整方法は、干渉波が回り込み波である必要がないため同一周波数の異種プログラムの混信波であっても動作することができる。

2. レベル、位相差分検出部

受信信号1、受信信号2とも回り込み波が上位局希望波より大きくなるマイナスD/Uの状態になると、回り込み波が支配的となるため受信信号1と受信信号2のレベル差と位相差の平均値は、回り込み波のレベル差と位相差を示すようになる。この時の受信信号1,2のIQ複素成分をそれぞれ (I_1, Q_1) 、 (I_2, Q_2) とすると、回り込み波のレベル差 ΔA と位相差 $\Delta\theta$ は次の式で算出できる。

$$\Delta A = \sqrt{I_1^2 + Q_1^2} - \sqrt{I_2^2 + Q_2^2} \quad (4.12)$$

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q_1}{I_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{Q_2}{I_2}\right) \quad (4.13)$$

上位局波に対して回り込み波のレベルが大きいほど，この計算値は精度が良くなり，干渉度を比較するより直接的に検出できるので，マイナスD/Uにおける回り込み波のレベル差，位相差の検出には有効である．マイナスD/Uとなった場合は，この計測値を使って合成係数 H を調整することができる．

4.1.4 屋内実験と評価法

(1) 試作装置の外観

図4.8に試作したFMラジオ放送用回り込みキャンセラ装置の外観を示す．RF入力はアンテナ合成モード用として2入力を装備している．前面のレベルメータはFM変調度や復調音声信号のレベル等をモニターし，中央のディスプレイは，送受信周波数の設定，RF入力レベル表示，遅延プロファイルや回り込みD/Uの表示など，多目的に選択表示できる．



図4.8 FM回り込みキャンセラ装置（プロトタイプ）外観

(2) 屋内実験系統

図4.9に屋内実験の系統図を示す．

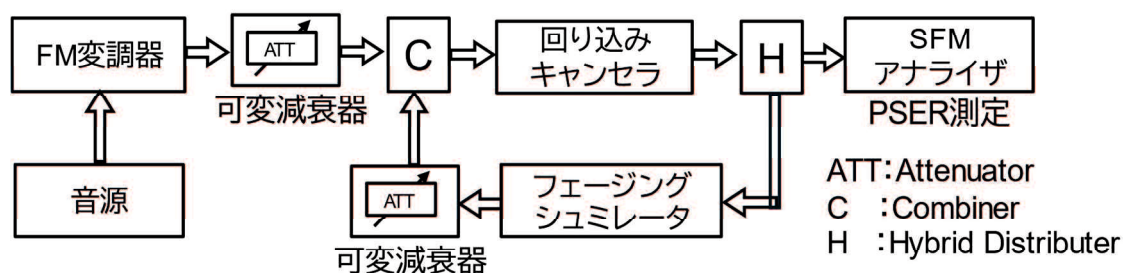


図4.9 屋内実験系統

FM変調器の出力周波数は86.4MHzとし、可変ATT（可変型減衰器）を通してFM回り込みキャンセラへの希望波入力レベルを調整できるようにしている。回り込み波はキャンセラ出力を分岐してフェージングシミュレータに接続し、可変ATTを通してFM変調器の信号と合成することで回り込みD/Uの調整を行った。FM変調器の音声入力信号は1kHzのトーン信号で品質を評価するのが通常であるが、回り込みキャンセラは時間軸の相関を利用していることから適切ではない。そこで音声入力信号は通常のプログラム放送と同じように音楽やナレーションとした。

そのため回り込みキャンセラの信号品質の評価には別の測定方法が必要であり、先に開発したSFNフィールドアナライザで実用化したパイロット信号エラー比 PSER（Pilot Signal Error Ratio）を測定することで評価を行った。前述として報告済であるがここではその概要を説明する。

(3) 屋内実験結果

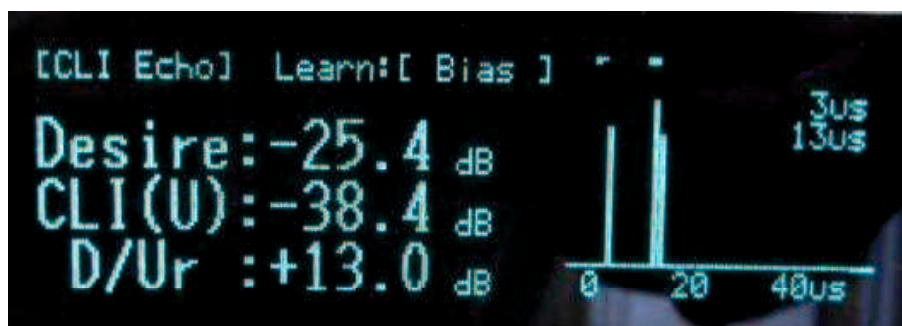


図4.10 遅延プロファイル表示例

1. 遅延プロファイルの生成例

試験時に発生させた回り込み波を検出した遅延プロファイルの例を図4.10に示す。表示では3 μ sと13 μ sの遅延時間で回り込む信号を検出していることを示している。またこの時の回り込みD/Uが13dBであることを示している。

2. 実験により得られた抑圧性能

図4.11に回り込みD/Uを変化させたときの回り込みキャンセラ出力でPSERを測定した結果を示す。グラフにおいて、[キャンセル無し]は回り込みキャンセル機能を使わずに、復調、再変調のみを行って再送信した場合である。[1アンテナ回り込みキャンセル]は時間軸相関解析による回り込みキャンセルのみを行った場合、[2アンテナ回り込みキャンセル]は適応型アンテナ合成と時間軸相関解析を併用した回り込みキャンセルの測定データである。

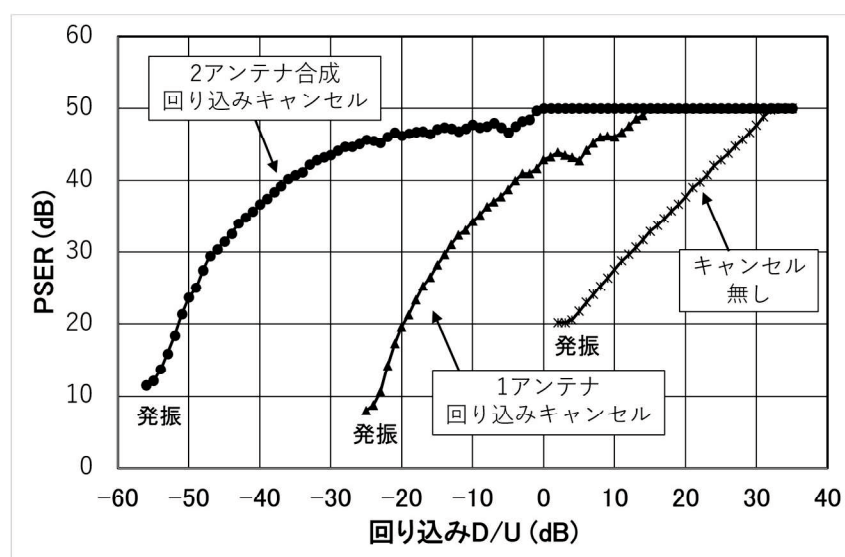


図4.11 回り込みキャンセル後のPSER

音声の品質限界としているPSER $\leq$ 25dBとなるD/Uは、キャンセル無しの時は回り込みD/U $\leq$ 10dBであるが、時間軸相関解析による回り込みキャンセルをONにすると回り込みD/U $\leq$ -15dBとなることを示している。また音声品質は保持できなくなるがD/U-20dB以下まで回り込み発振することなくキャンセル動作を行っている。受信品質を考慮すると、先のPSERと主観評価の相関から回り込みキャンセラの抑圧限界+10dB以上が実用範囲であることがわかる。

2アンテナ型の回り込み回り込みキャンセラでは、 D/U -50dB以下まで回り込み発振することなくキャンセル動作を行っている。上位局波と回り込み波の位相差は 180° が理想であるが、実験では 90° の位相差で行っている。測定データは回り込み波が1波に対してのものであるが、 $PSER \approx 25\text{dB}$ となる回り込み D/U は3.4節でA/Dコンバータのダイナミックレンジで計算した回り込みキャンセル限界 D/U -48dBとほぼ合致する結果が得られた。

4.2 FM 干渉抑圧装置 ¹¹⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

4.2.1 FM 干渉抑圧装置開発の背景

山口放送のFM補完放送エリアと豊田局のマルチパス干渉及び外来波混信の状況を図4.12に示す。豊田局は放送波中継の上位局である下関局92.3MHzと同一周波数の山口局及び宇部局がマルチパス波干渉となり、隣国の韓国からも下関局と同一周波数波が外来波混信とし観測され受信品質を劣化する要因となった。そこで今回マルチパス波と外来波混信の抑圧を目的とする、FM干渉抑圧装置の開発を進めることにした。

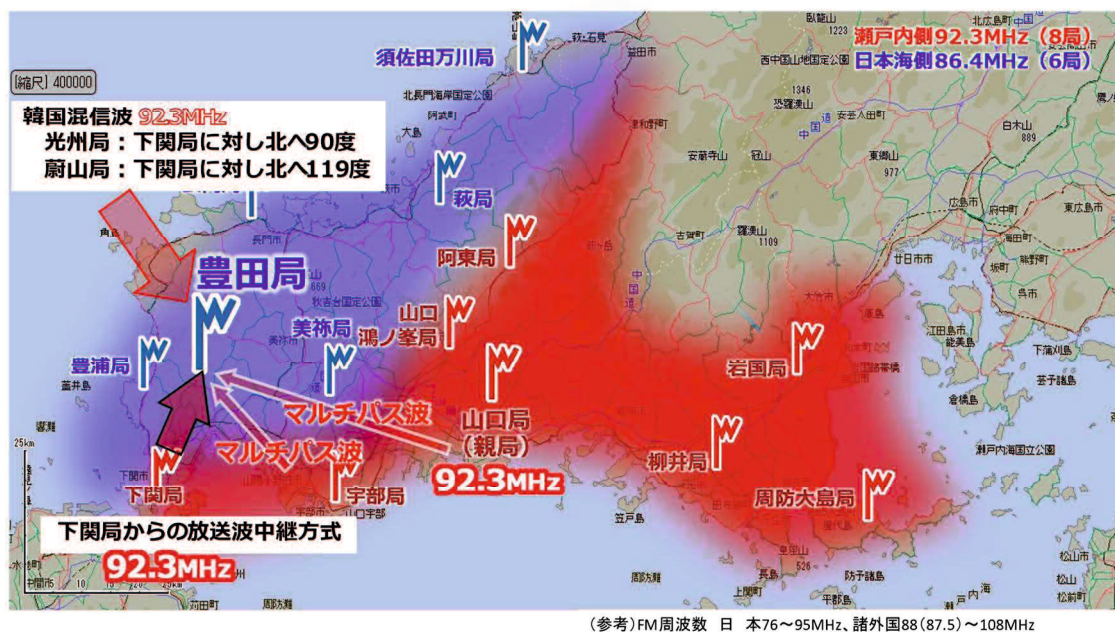


図 4.12 山口放送 豊田局へのマルチパス干渉及び韓国波からの外来波混信の状況

開発には「FM回り込みキャンセラ」を活用し、回り込み波ではなく2波の外来信号の混信波と、同一周波数の山口局及び宇部局のマルチパス波を同時に抑圧する装置として開発した。以下に混信波とマルチパス波の抑制についてそれぞれを説明する。

4.2.2 アンテナ合成による混信波の抑圧

2基以上の受信アンテナを用いて、アンテナに誘起される上位局希望波と混信波の到来角の差を利用して混信波を抑圧する方法がある。

アナログTV放送の時代にも外国波混信や他局の混信波を除去するために種々試みられてきたが、それぞれに誘起される混信波の群遅延特性による帯域内信号の消し残りの課題や、複数の混信波に対して効果が制限されることから実用化は進まなかった。一方で地上デジタル放送ではデジタル変調であることを利用して同一チャンネル干渉抑圧装置⁵⁾として実用化されている。

(1) 混信抑圧装置の構成

図4.13に混信抑圧装置の概略構成を示す。

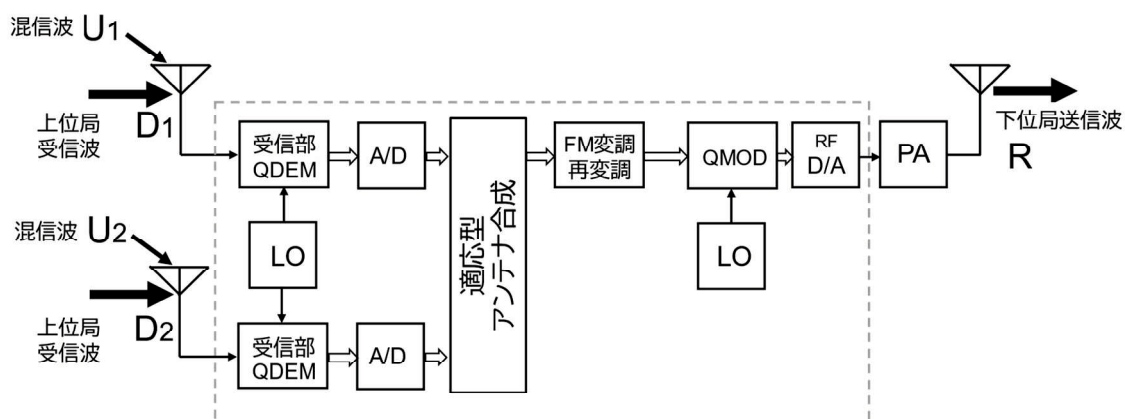


図4.13 混信抑圧装置の構成

受信したFM波に対して受信周波数に対応するローカル周波数信号（LO）で直交復調（QDEM）に変換した後、振幅と位相情報を持つ複素信号として信号処理を行っている。

2基のアンテナからの受信信号は適応型アンテナ合成部にて混信波を抑圧したのちFM復調，再変調を行い直交変調器（QMOD）で送信周波数に変換して再送信する．復調と再変調を行う理由は復調することにより復調後の信号にS/Nの帯域利得特性（FM改善係数と呼ばれる）を与え，合成後の信号に残留成分があった場合そのS/Nを帯域利得分だけ改善できるからである．

(2) 適応型アンテナ合成部

図4.14に適応型アンテナ合成部の構成を示す．

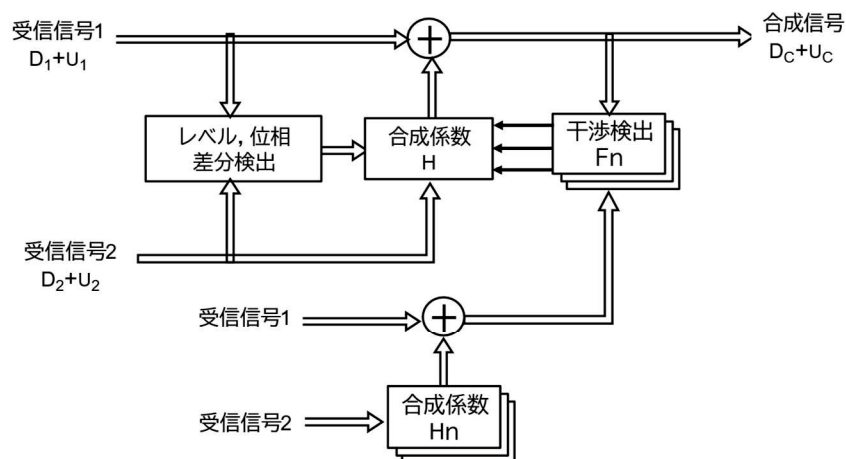


図4.14 適応型アンテナ合成部

アンテナ合成は，アンテナ1の受信信号1とアンテナ2の受信信号2に対して位相とレベルを調整した信号を加算合成することで行われる．アンテナ1で受信される上位局波を D_1 ，混信波を U_1 ，アンテナ2で受信される上位局波を D_2 ，混信波を U_2 ，合成係数を H とすると，合成信号 $D_c + U_c$ は以下の式で表される．

$$D_c + U_c = (D_1 + U_1) + H \cdot (D_2 + U_2) \quad (4.14)$$

それぞれの信号と係数は複素数である．合成係数 H は U_2 が U_1 に対して逆位相，同レベルとなるように制御される．ここで

$$U_1 \cong -H \cdot U_2 \quad (4.15)$$

とすれば，合成信号 $D_c + U_c$ は

$$D_c + U_c \cong D_1 + H \cdot D_2 \quad (4.16)$$

となり，混信波が抑圧された上位局波のみの合成信号となる．

図4.20にアンテナ合成の概念をベクトル加算の図で示す.

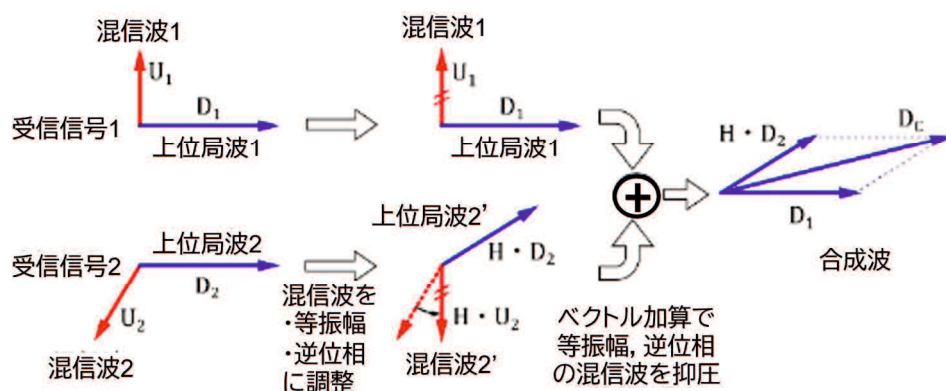


図4.15 アンテナ合成の概念

図4.15に示すようにアンテナ合成による混信波の抑圧では2基のアンテナで受信される上位局波と混信波の位相差が大きくなるようにアンテナを配置し、混信の状況によって振幅と位相を制御し混信波が小さくなるようにベクトル加算することが必要となる.

(3) 干渉検出部

干渉を受けた場合のIQ複素平面上の信号を図4.16に示す.

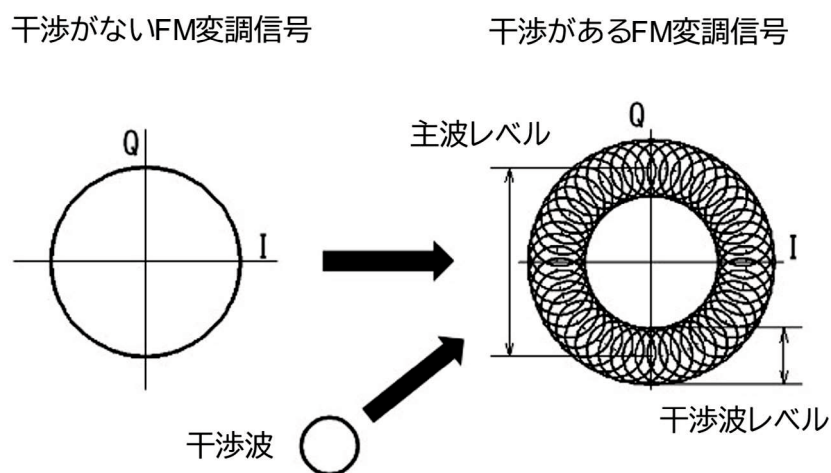


図4.16 複素平面上のFM変調信号

FM変調信号は干渉が無い場合、信号レベルが一定で周波数（角速度）が変化する信号であるので、複素平面上では信号レベルに応じた主波レベルの半径で円を描く．同じく干渉する波もFM変調信号であれば信号レベルに応じた干渉波レベルの半径で円を描く．この時2つの信号は瞬時周波数が異なるので、それらが合成された信号は図に示すように2重の円を描く．すなわちこの2重円の太さが干渉度となる．

(4) 合成係数 H の探索

干渉度はベクトル値ではなく干渉の大きさを示すスカラー値であるのでそのままでは合成係数の補正方向を得ることができない．そのため、受信信号1と受信信号2に対して合成係数 H の位相とレベルを変えた複数の合成係数 Hn を使って複数の干渉度 F_n を計測する．

それぞれの合成係数 Hn によって合成された信号の瞬時レベル Zn はベクトルの絶対値として次式で表される．

$$Zn = |(D_1 + U_1) + Hn \cdot (D_2 + U_2)| \quad (4.17)$$

上位局波の合成レベル Ln は瞬時レベルの平均で求める．

$$Ln = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zn(i) \quad (4.18)$$

それぞれの干渉度 F_n は上位局波合成レベルに対する差分の比率を積分して算出する．

$$F_n = \sum_{i=1}^N \frac{|Zn(i) - Ln|}{Ln} \quad (4.19)$$

積分するデータ数 N は過去10ms分のデータ数で算出している．干渉度 F_n は U_1 と $Hn \cdot U_2$ が Hn 逆位相、同レベルとなる場合に最小となり、算出された複数の干渉度を比較することで合成後の干渉度が最小となるように合成係数 H の位相とレベルを自動的に調整する．

具体的には、合成係数 H で算出した干渉度 F_0 と、 H に対して $+\Phi$ だけ位相を変えた H_1 で算出した F_1 、 $-\Phi$ だけ位相を変えた H_2 で算出した F_2 を比較する．干渉度 F_1 と F_2 が同程度で F_0 が最小となるように、 F_1 が小さければ合成係数 H の位相を $+$ 方向に制御し、 F_0 が小さければ位相を $-$ 方向に制御する．同様に干渉度 F_0 と、合成係数 H に対して $+A$ だけレベルを変えた H_3 で算出した F_3 、 $-A$ だけレベルを変えた H_4 で算出した F_4 を比較し、 F_0 が最

小となるように合成係数 H のレベルを制御する．このように合成後の干渉度が最小となるように継続的に合成係数 H を自動で制御している．

干渉度の比較によって合成係数を制御していることから，干渉として検出される受信周波数 $\pm 200\text{kHz}$ 以内（占有周波数帯幅の許容値）の混信波を抑圧することが可能となる．

(5) レーダー探索法

合成係数 H_s の位相をレーダーサーチのように 360° に渡ってスキャンして得られる干渉度 F_s を中心からの距離としてプロットする．図4.17のようにアンテナ1とアンテナ2の混信波の位相差が逆位相となる位相で干渉度が小さくなる図を得ることができる．

このプロット図は混信波の位相差に凹みを示すので，アンテナ設置の調整に役立つとともに，合成係数 H の初期値として利用することができる．

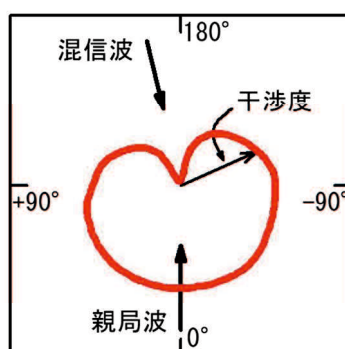


図4.17 干渉度の位相スキャンプロット

(6) 混信抑圧の屋内実験

屋内実験系統図

混信抑圧の実験系統を図4.18に示す．2基のアンテナに相当する入力として上位局波は同相分配，混信波は分配後に所定の位相差を与えて上位局波と合成して混信抑圧装置に入力し，混信波との D/U に対して抑圧後の品質をSFNフィールドアナライザを用いてPSER（Pilot Signal Error Ratio）で測定した．

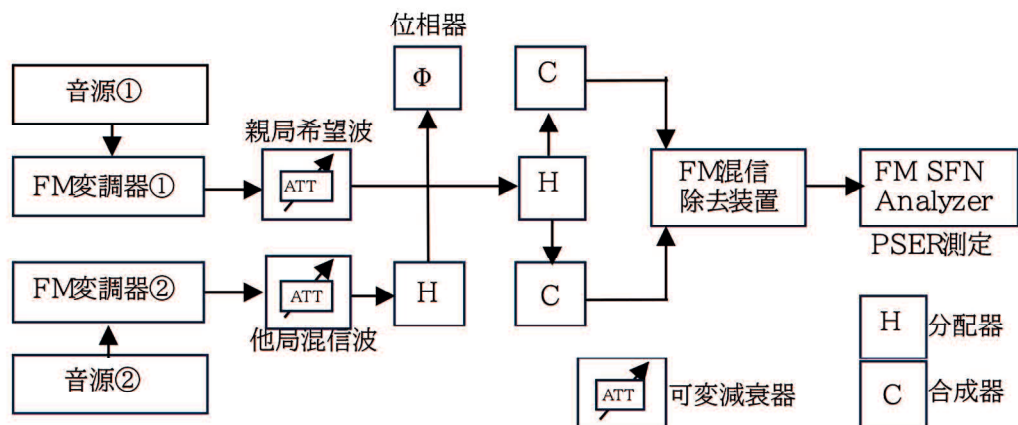


図4.18 混信抑圧の屋内実験系統

(7) 実験結果

混信波抑圧の実験結果を図4.19に示す。

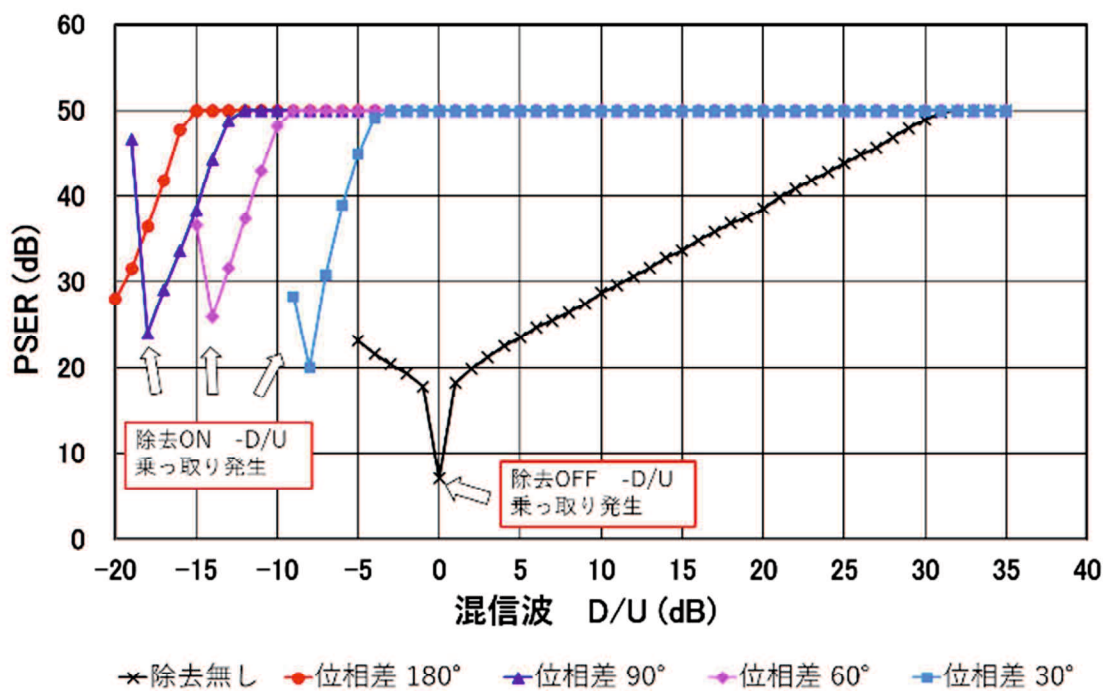


図 4.19 混信抑圧後の品質 (PSER 値)

混信抑圧機能をOFFにした場合は、D/Uに応じて品質が劣化しD/U<0dBで混信波が送信される。混信抑圧機能をONにした場合は、2基のアンテナ位相差が30°以上あれば、D/U < 0dBでもD/Uが劣化するほどPSERが改善される。これは卓越した側の信号が混信抑圧機能により品質を向上させているからである。

4.2.3 マルチパス抑圧

(1) マルチパス抑圧装置の構成

図4.20にマルチパス抑圧装置の概略構成を示す。

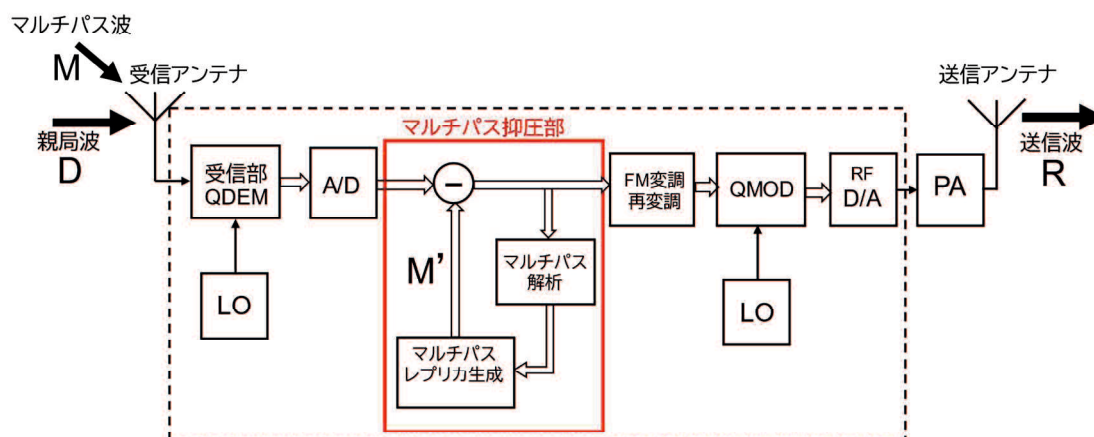


図4.20 マルチパス抑圧装置の構成

受信したFM波は受信周波数に対応するローカル周波数信号で直交復調を行い、振幅と位相情報を持つ複素信号として信号処理を行っている。受信信号は装置内部で複製したマルチパス波を減算したのちFM復調、再変調を行い直交変調器で送信周波数に変換して再送信する。復調と変調を行う理由は前述の通りである。

(2) マルチパス抑圧部

図4.21に図4.20のマルチパス抑圧部構成を示す。

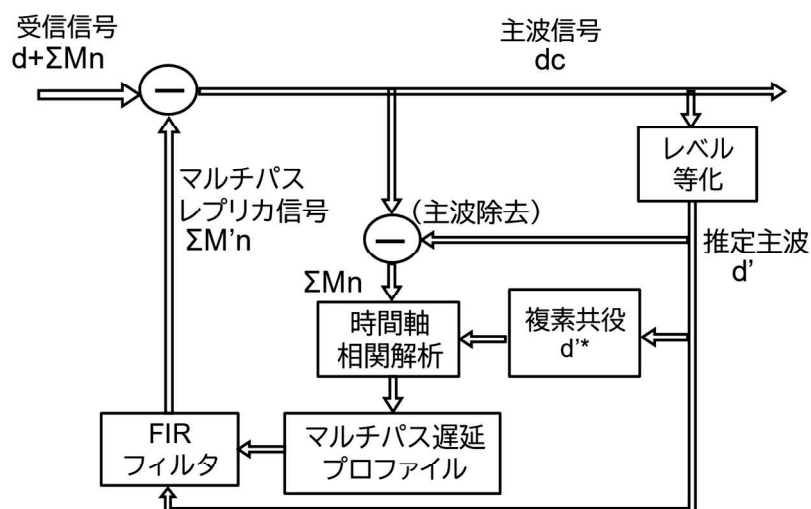


図 4.21 マルチパス抑圧部

マルチパスの抑圧は主波の推定とマルチパス波の遅延プロファイル（遅延時間と信号レベル、位相）解析を行い、マルチパス波をFIRフィルタで複製して受信信号から減算することで抑圧している。

マルチパスによる干渉を受けたFM変調信号も遅延時間により瞬時周波数が異なるので複素平面上では図4.16と同様に見える。上位局波に相当する主波は主波と同じ変化をする信号を検出するために、まず、瞬時信号のレベル等化を行い、推定主波を取り出す。複素平面上で輪の半径を一定にすることで主波を推定する。マルチパス波はこの推定主波と時間軸相関解析を行うことで各遅延時間のレベルと位相を検出し遅延プロファイルを得ている。ただし、無音の場合は時間による周波数の変化が無くなるため時間軸相関解析でもマルチパスを検出することができなくなる。この点はアナログ変調方式であることの難点であるが、無音のときはマルチパスを抑圧しなくても歪を発生しないのでマルチパスの複製を生成する必要が無い。

(3) マルチパス抑圧の屋内実験

屋内実験系統図

マルチパス抑圧の実験系統を図4.22に示す。FM変調器の出力にフェージングシミュレータをFM変調器の後段に入力してマルチパス波を生成し、上位局波とマルチパス波とのD/Uに対して抑圧後の品質をSFNフィールドアナライザを用いてPSERで測定した。

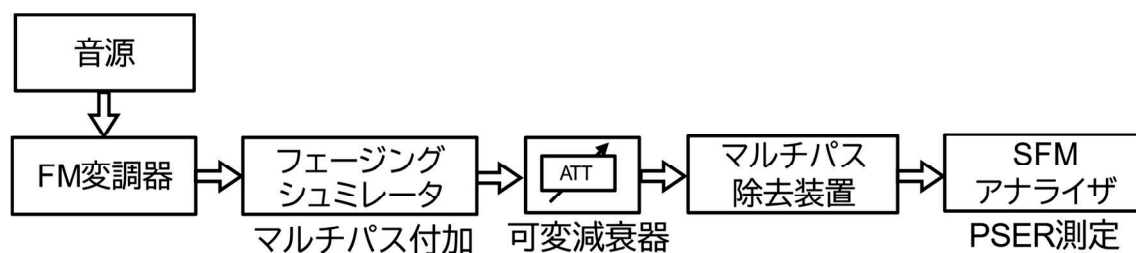


図 4.22 マルチパス抑圧の屋内実験系統

(4) 実験結果

マルチパス抑圧の実験結果を図4.23に示す。マルチパス波は1波で遅延時間は30 μ sとし静特性と1Hzの動特性についてマルチパスのD/Uを変化させて抑圧前と抑圧後の品質をPSERで測定している。マルチパス波を抑圧しないとD/Uに応じて品質が劣化し、マ

マルチパス抑圧を動作させると品質が改善されることが分かる．（PSERの測定値は品質が十分良いと判断される50dBを最大値としている）

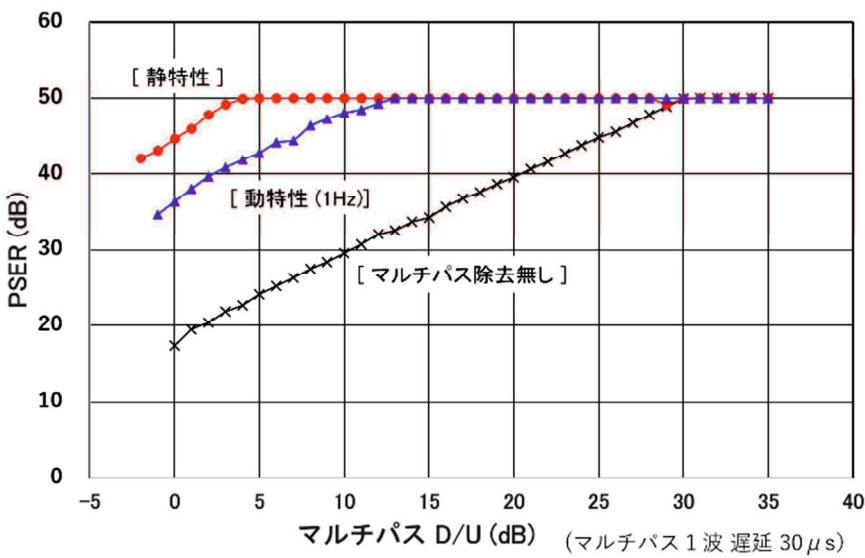


図 4.23 マルチパス抑圧後の品質（PSER 値）

動特性はマルチパス波の変動に対する応答を示すが，上位局波に干渉する他の同期放送中継局がマルチパスとなる場合は中継局同士を中心周波数の差分がマルチパス波の位相変動となる．そのため動特性についてもKRY豊田FM局においてデータを取得した．

4.2.4 KRY 豊田 FM 局

(1) 豊田局の諸元

豊田局の諸元を次 表4.1に示す．

表 4.1 豊田局諸元

場所	下関市豊田町
中継方式	下関局92.3MHzからの放送波中継方式
受信標準入力	60dBμV
送信周波数	86.4MHz
送信出力	20W
受信アンテナ高	GLより7.8m, 9.3m
受信アンテナ	2基
アンテナ間隔	下関局に正対する2基のアンテナ間隔1.632m
韓国混信波到来角	光州局 下関局に対し北へ90度

	蔚山局 下関局に対し北へ119度
韓国混信波位相差	光州局 180度 蔚山局 157度
主なマルチパス波	KRY山口局 +34 μ s (約-20dB) KRY宇部局 +60 μ s (約-30dB)

(2) 豊田局の外観

豊田局の鉄塔とアンテナ設置の様子を図4.24に示す。

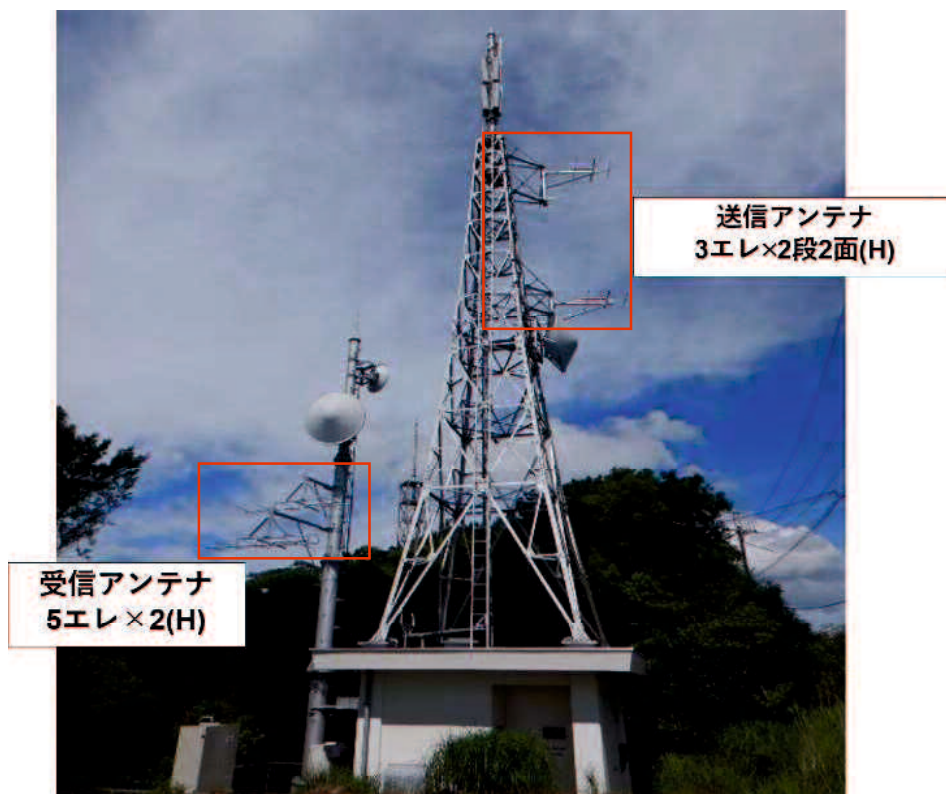


図4.24 KRY豊田FM局

(3) FM干渉抑圧装置

図4.25に装置の外観を示す。FM干渉抑圧装置は他局の混信波による干渉とマルチパス波による干渉の両方を抑圧することができる。



図4.25 FM干渉抑圧装置

(4) FM干渉抑圧装置の構成

図4.26にFM干渉抑圧装置の概略構成を示す。

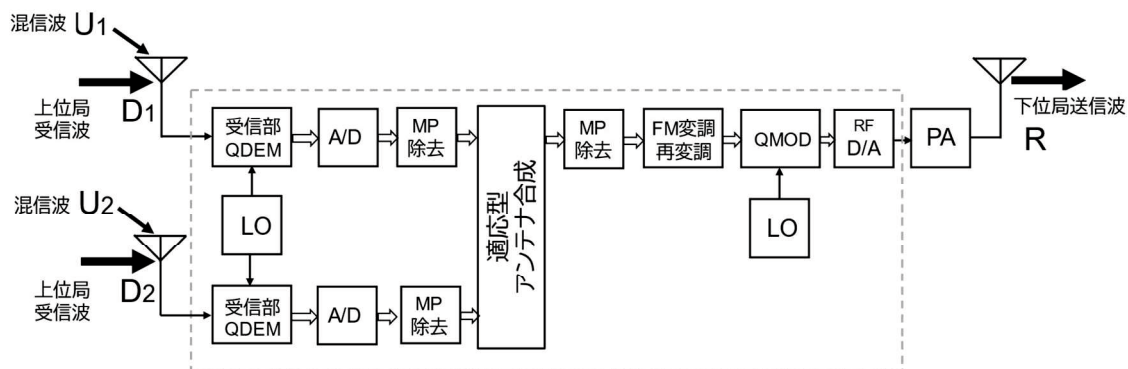


図4.26 干渉抑圧装置の構成

干渉抑圧装置は混信波の抑圧とマルチパス波の抑圧を組み合わせて構成している。混信波を適応合成で抑圧する前にそれぞれのアンテナ入力に含まれるマルチパス波を抑圧してから合成する。これはマルチパス成分を含んだまま合成するとマルチパス波と混信波の合成成分が干渉波として検知され混信波の抑圧性能が劣化するためである。また合成後に残留するマルチパス成分を抑圧するため合成後にもマルチパス抑圧を行っている。

また、構成図では省略しているが干渉抑圧装置は混信波の抽出機能も装備している。上位局波とマルチパス波を抑圧すると混信波が残ることになり復調できる程度のレベルがあるなら復調して音声を再生することができる。この機能は上位局波に埋もれて混信波を特定できない場合に混信元を推定するために役立つ。

(5) マルチパス波の検出

図4.27に豊田局で実際に受信されているマルチパス波を示す。

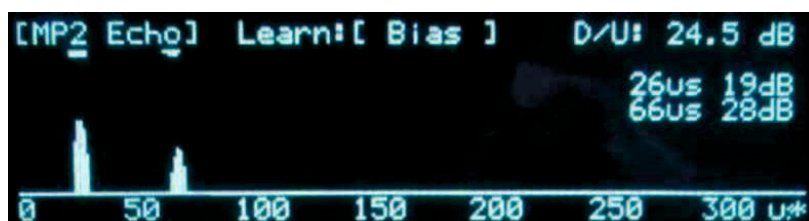


図4.27 マルチパスの遅延プロファイル

1つ目の山が山口局，2つ目の山が宇部局の波でマルチパス波として検出されている．
図のようにアナログ変調のFMで遅延プロファイル解析が可能となったことは受信環境の調査にも役立っている．

(6) 混信2波への対応

アンテナ合成による混信抑圧は適応型で動作するので，到来する混信波が1波であるなら位相とレベルを自動調整して抑圧することができる．しかし，豊田局では韓国からの混信が2波想定されており2基のアンテナでは2波同時に到来した場合は両方を完全に抑圧することはできない．この場合でも装置は混信する2波の抑圧が最大となるように合成位相を最適に調整して動作することで混信2波の両方に抑圧効果が得られるようにしている．

図4.28に韓国からの混信が2波同時に到来した場合における抑圧のシミュレーション結果を示す．シミュレーションでは上位局波と2波の混信波のレベルは同一としている．上位局波との到来角度差90度の韓国波①光州局と，到来角度差119度の韓国波②蔚山局が同時に到来した場合，約20dBの抑圧効果を確認した．

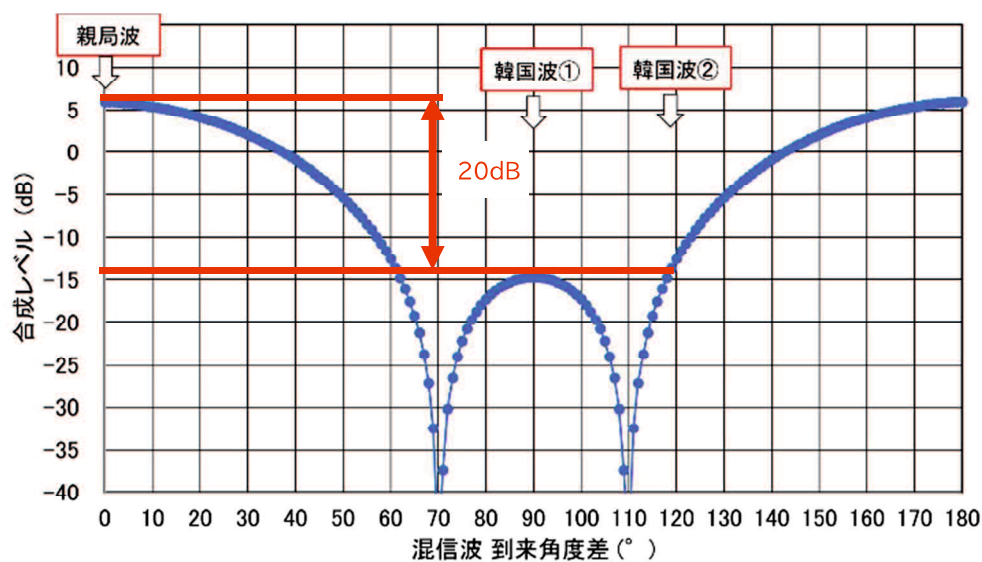


図4.28 混信波2波同時の抑圧特性

(7) FM干渉抑圧装置の効果

豊田局における2022年8月21日から11月6日の受信データでは図4.29に示すように、2波の外来信号の混信波と、同一周波数の山口局及び宇部局のマルチパス波を同時に抑圧することで、FM干渉抑圧前は $D/U \approx 20\text{dB}$ であるが抑圧後では $D/U \approx 35\text{dB}$ となり、 $D/U \approx 15\text{dB}$ の改善が確認されたことで、「FM干渉抑圧装置」の実フィールド性能が実証された。

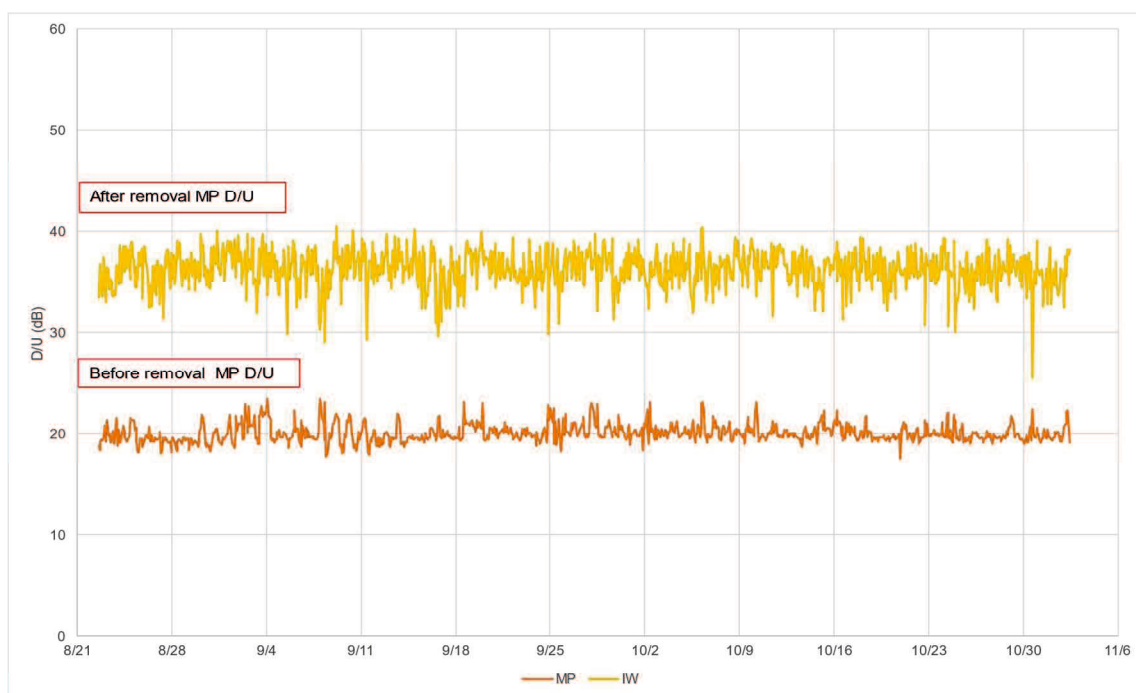


図 4.29 豊田 FM の抑圧前と抑圧後の D/U レベル (2022.8/21 から 11/6)

第5章 新FM伝送方式による同期放送技術¹⁹⁾

5.1 まえがき

FM同期放送の重複するエリアで遅延時間を合わせるためには、従来技術では音声信号を伝送するための回線が別途必要となり装置構成が複雑化しコストが高くなるという問題があった。本研究の新FM伝送方式は、中継回線を必要としない放送波中継方式でもFMステレオ放送の仕組みを使って別タイミングの伝送用音声信号を重畳することで、中継局間の重複するエリアで遅延調整を可能としたものである。

5.2 新FM伝送方式システム

一般的なFMラジオ放送システムでは、受信エリアを拡大するために中継所が設けられる。既存のFMラジオ放送で用いられる中継所は、複数周波数ネットワーク（MFN）を構築する。各中継所は、上位局となる送信所から受信した放送波（以下、上位局波）とは異なる周波数の放送波（以下、下位局波）を再送信する。

これに対して、FM同期放送で用いられる中継所は、上位局波と同一周波数の中継波を用いる単一周波数ネットワーク（以下、SFN）を構築する。そのため、FM同期放送では音声信号をあらかじめ別の無線中継回線やIP回線を用いて伝送し、中継局において送信タイミングを調整して送信することで重複するエリアで遅延時間を合わせている。

しかしながら図5.1に示すように放送波中継でSFNを構築するとすれば、上位局波を受信して中継波を再送信することになる。同一周波数で上位局波より強い中継波を受信すると回り込み発振が発生して送信できなくなるが、FM回り込みキャンセラによってこの問題は解決できる。しかし、図5.2に示すように、下位局波は上位局波より約200 μ s遅れることになり、上位局波と下位局波が重複するエリアで遅延時間を合わせることはできない。

本研究では、FM同期放送において放送波中継を行いながら重複エリアの遅延調整を実現するモノラル同期放送装置の研究を行った。この新しいFM伝送方式システムについて、伝送特性を伝送実験によって確認した。

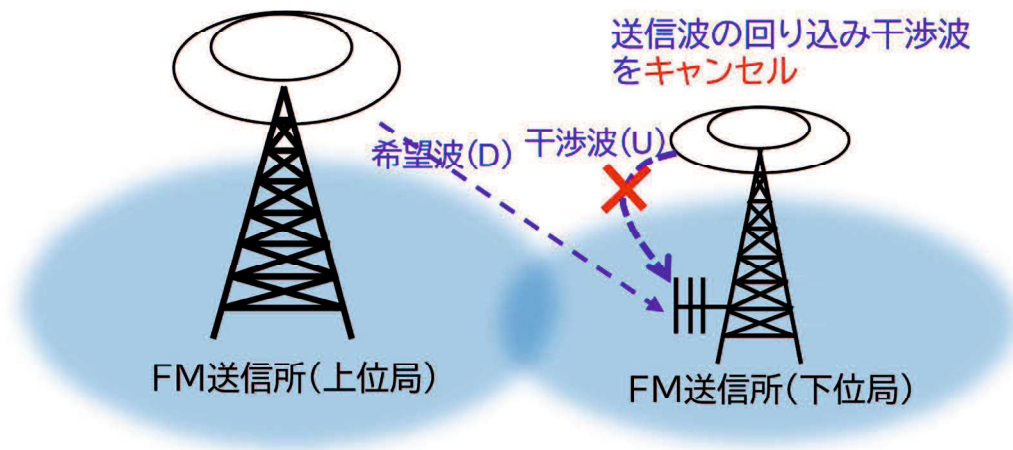


図 5.1 FM 同期放送による単一周波数ネットワーク SFN 概要図

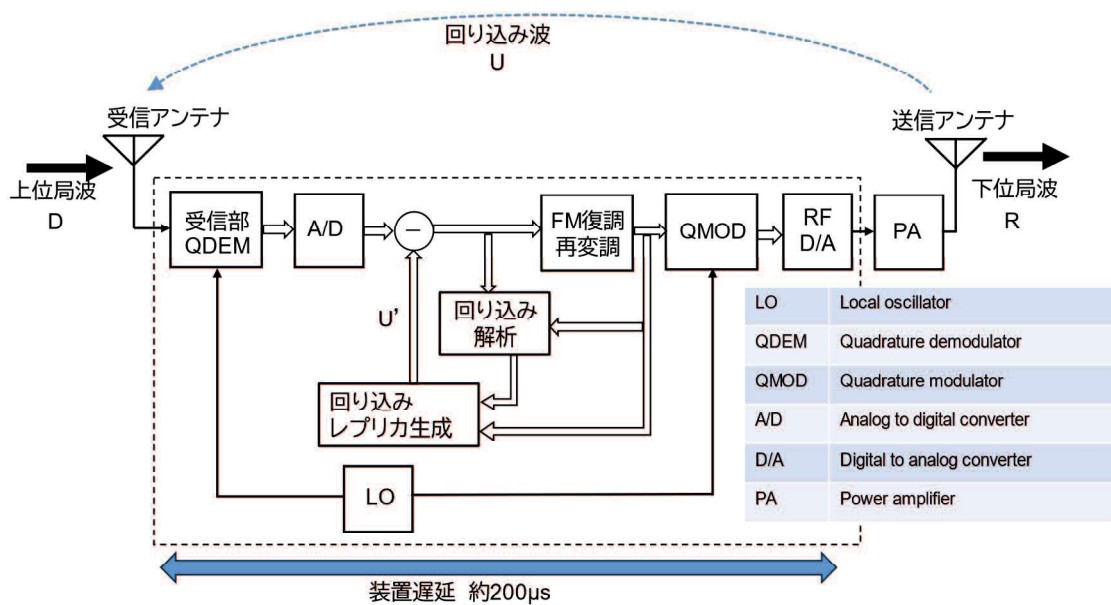


図 5.2 FM 回り込みキャンセラによる同一周波数放送系統図

本研究の同期放送技術は，FMステレオ放送のしくみを使って別タイミングの伝送用音声信号を重畳することで，中継局の遅延を調整できるようにしたものである．

図5.3に別タイミングの伝送用音声信号を重畳するしくみを備えたFM変調装置の構成を示す．FM変調部は入力されたモノラル音声信号をFM変調するが，音声信号の遅延を調整する回路と遅延させない伝送用音声信号を重畳する回路を備える．伝送用音声

信号は38kHz信号を使って、FMステレオ放送のL-R信号の帯域（23kHzから53kHz）に重畳してコンポジット信号を生成するが、FMステレオ変調方式のパイロット信号（19kHz）は重畳しない。パイロット信号を重畳しないことで、既存のFMラジオ受信機はFMモノラル放送として放送波を受信するため、伝送用音声信号は復調されない。このようにしてタイミングの異なる2つの音声信号を変調して送信する。L-R信号の帯域に重畳する伝送用音声信号は、FMステレオ変調方式で用いられる搬送波抑圧変調（振幅変調）とした。

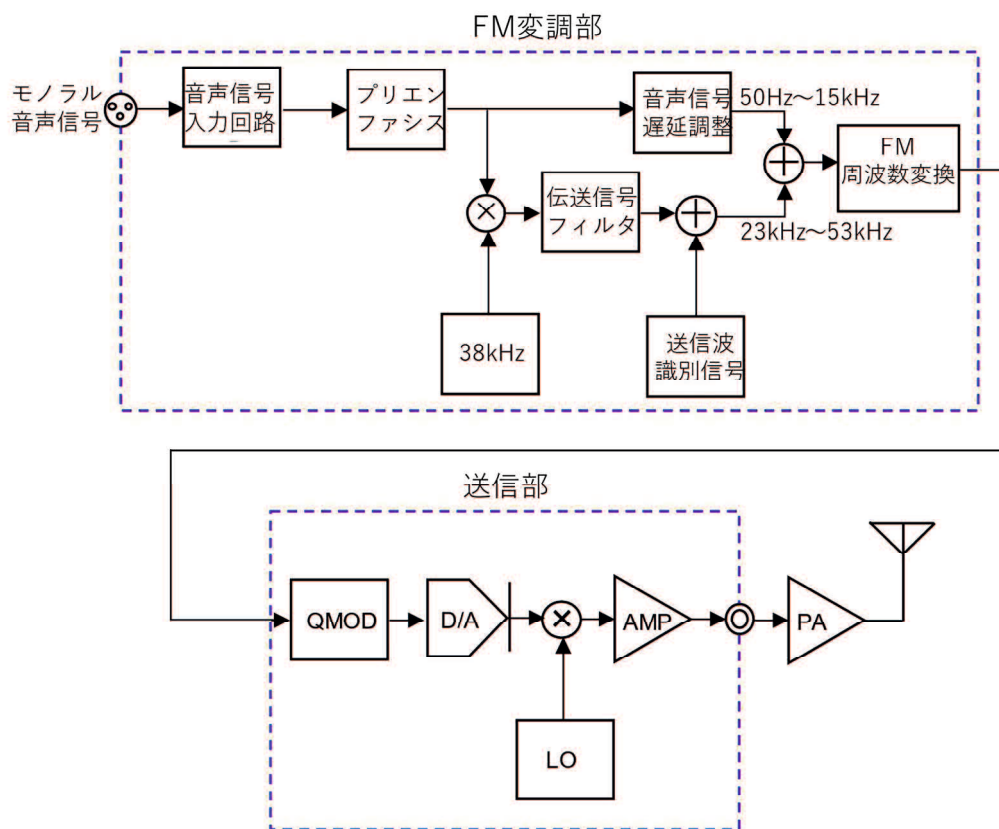


図5.3 上位局 FM変調装置

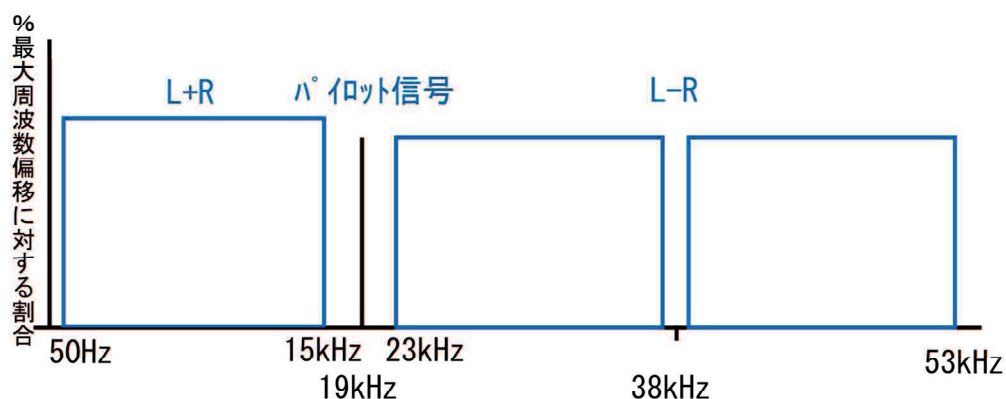


図5.4 FMステレオ放送のコンポジット信号

図5.4に示すようにパイロット信号が有るとFMラジオ受信機は19kHzを2乗倍した38kHz信号を使ってL+RとL-Rの信号を復調し、左音声= $(L+R) + (L-R)$ と右音声= $(L+R) - (L-R)$ の音声信号をステレオ再生する。

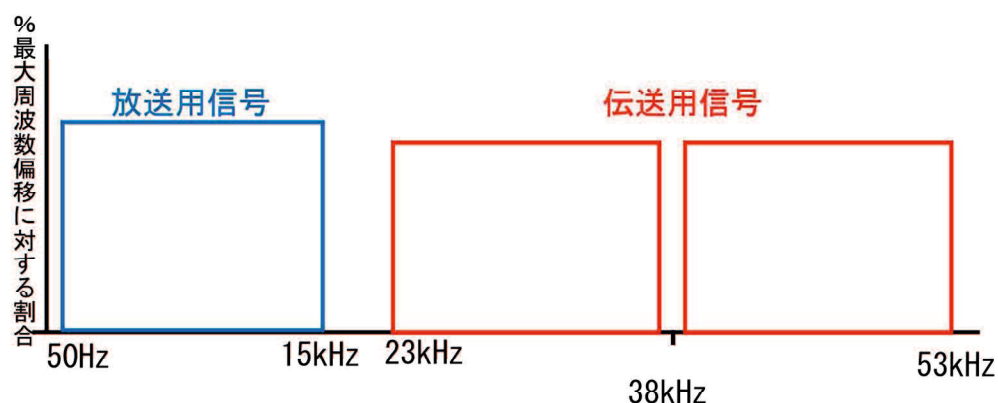


図5.5 伝送用音声信号を重畳したFMモノラル放送のコンポジット信号

また図5.5に示すようにパイロット信号が無いとFMラジオ受信機は15kHz程度までの信号を復調し、音声信号をモノラル再生するので、伝送用音声信号は再生されない。更に通常のFMラジオ受信機のモノラル再生では19kHz以上の信号を復調しないので、図5.6に示すように高域に送信波を識別するための信号を重畳することも可能となる。

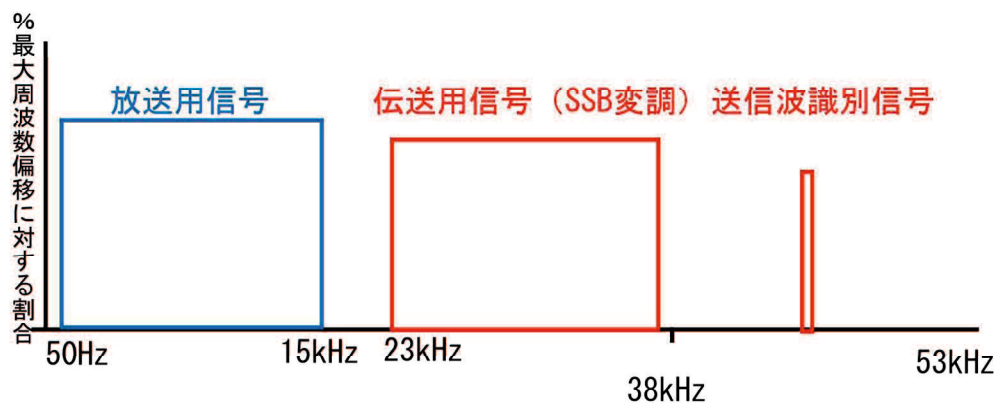


図5.6 伝送用音声信号（SSB変調）と送信波識別信号を重畳したFMモノラル放送のコンポジット信号の例

FM同期放送によってSFNを構築すると同一周波数であるが故に受信点において何処の中継局の電波を受信しているのかがわからないことがある。これはFM同期放送の利便性であるが、電波の受信状況を管理する点においては不便なことがある。識別信号は通常の受信ではわからないが、識別信号を検出できる装置があれば何処の中継局の電波を受信しているかを識別することができる。図5.7に放送波中継用のFM中継装置の構成を示す。FM中継装置は、受信部とコンポジット信号処理部と送信部と回り込みキャンセル部を備える。

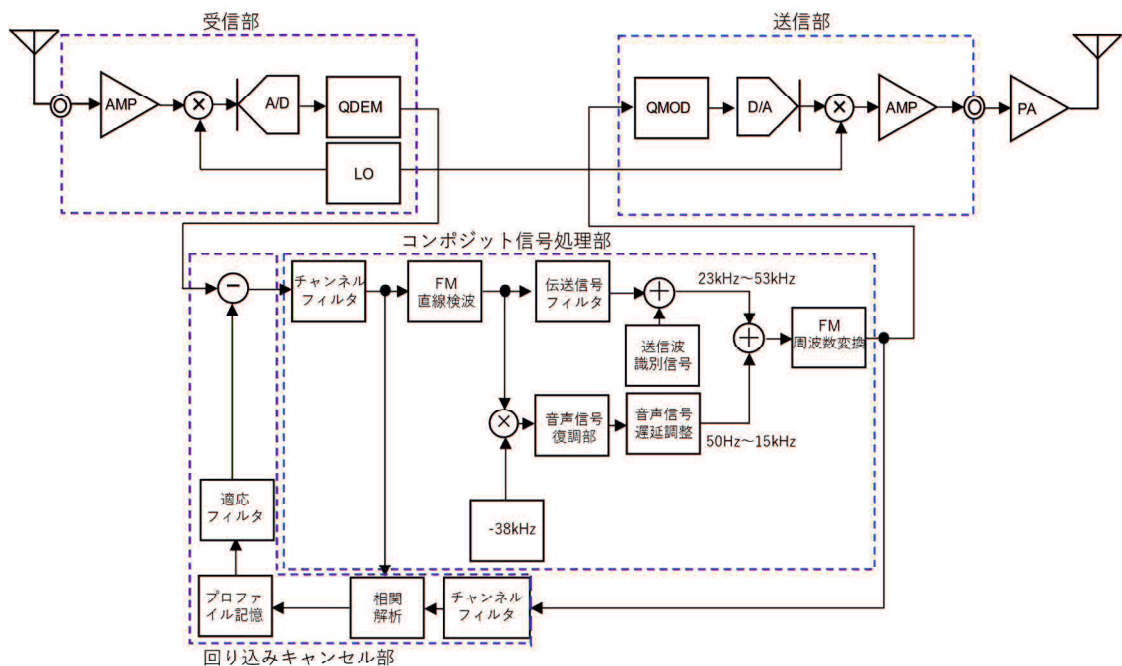


図5.7 SFN中継局 FM中継装置

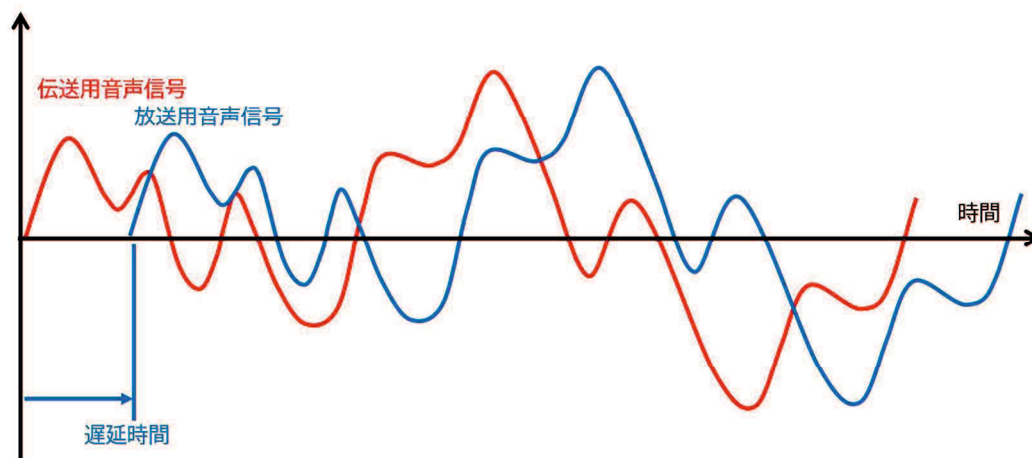
受信部は、受信アンテナで受信した放送波を増幅しFM復調信号を得る。コンポジット信号処理部は、伝送用音声信号をそのまま通過させる信号と、伝送用音声信号を復調する信号に分離する。復調した伝送用音声信号は遅延調整回路で遅延時間を調整し、放送用の音声信号とする。通過させた伝送用音声信号は、上位局波に含まれる送信波識別信号をフィルタによって除去し、新たに中継局の送信波識別信号を重畳する。伝送用音声信号と送信波識別信号と遅延調整した放送用音声信号を重畳したコンポジット信号を再生成し、FM変調信号に戻し送信信号を出力する。回り込みキャンセル部は、相関解析を行って遅延プロファイルを生成し、適応フィルタで回り込み波の複製を作成し、受信信号から減算することで回り込み波を除去している。

5.3 同期エリアにおける遅延調整

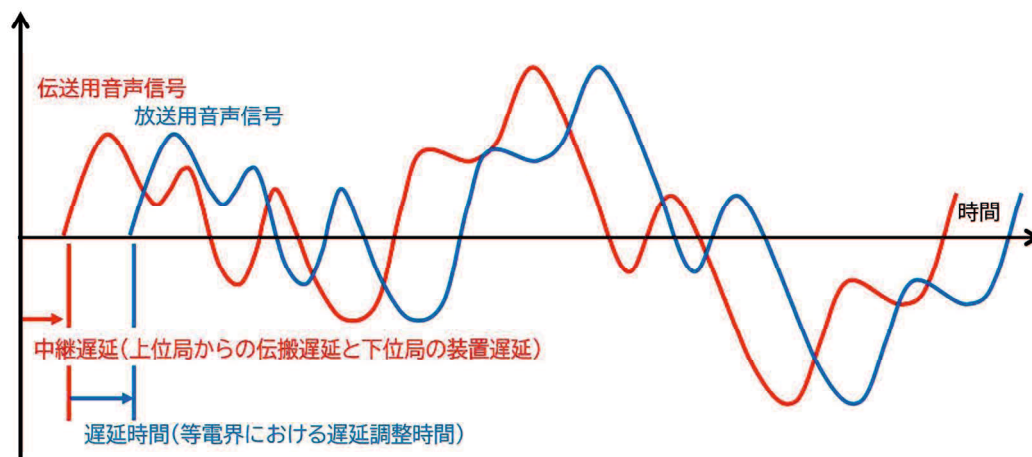
上位局と下位局放送エリアが等電界で重なる受信点において、遅延時間を合わせるしくみを説明する。

上位局のFM変調装置は入力された音声信号を伝送用音声信号と放送用音声信号に分けて、伝送用音声信号は遅延させずに23kHzから53kHzの帯域の信号に変換する。一方、放送用の音声信号は遅延調整回路で、例えば10ms遅らせて50Hzから15kHzの帯域の信号とする、2つのタイミングの異なる音声信号を重畳してコンポジット信号を生成する。2つの音声信号のタイミングは図5.8 (a) に示すようになる。

下位局のFM中継装置は、伝送用音声信号を復調して放送用音声信号を生成する。伝送用音声信号は上位局の放送用音声信号より前に下位局に到達するので、下位局の放送用音声信号を上位局の放送用音声信号のタイミングに合わせることができる。図5.8 (b) に示すように上位局からの伝搬距離と下位局の装置遅延によって中継遅延が発生するので、中継装置は上位局の変調装置であらかじめ遅延させている放送用信号の遅延、例えば10msから中継遅延分（伝搬距離による遅延と中継局の装置遅延）を差し引いて遅延させた放送用音声信号を生成する。放送用音声信号は下位局で遅延時間を調整することができるため、任意の等電界受信点において上位局の放送用音声信号の遅延と下位局の放送用音声信号のタイミングを合わせることが可能になる。FMラジオ受信機は、パイロット信号が無い放送波を復調するので、モノラル音声の復調となり、放送用音声信号のタイミングが合っていれば遅延の合った同期放送が成立する。



(a) 変調装置の音声信号



(b) 中継装置の音声信号

図 5.8 上位局(a)と下位局(b)における遅延調整説明図

5.4 室内実験

室内実験では上位局として図5.8 (a) FM変調装置，下位局として図5.8 (b) のFM中継装置を使用し，1pps トーンバースト信号を基準信号として，等電界を想定した遅延時間の調整実験を行い，図5.9，図5.10に示すように遅延調整が可能であることを確認した．

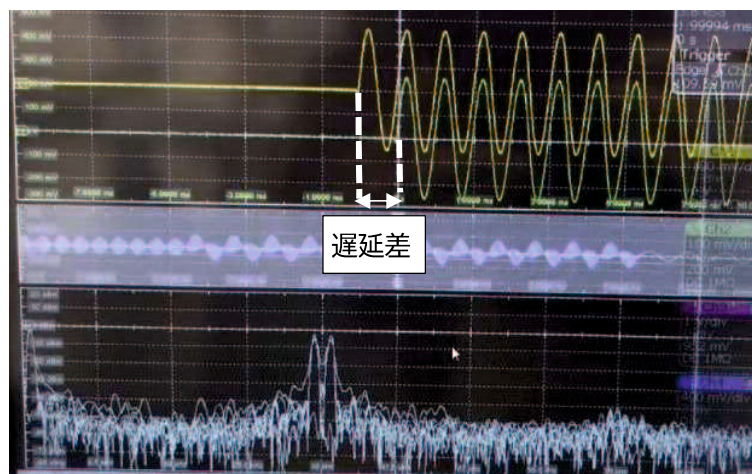


図 5.9 遅延調整前オシロスコープ画面

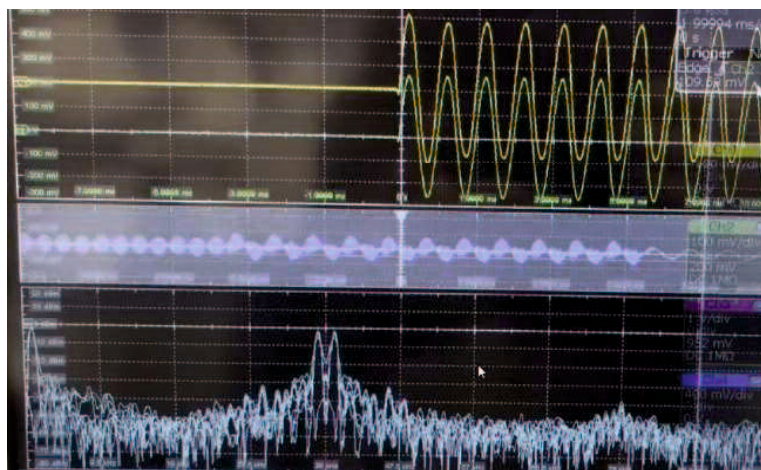


図 5.10 遅延調整後オシロスコープ画面

5.5 MFN における同期遅延

上記の放送波中継における遅延調整のしくみは、同一周波数での放送波中継に限定されるものではない。複数周波数で放送ネットワークを構築するMFNにおいても伝送用音声信号を重畳することで、放送波の遅延調整が可能となる。例えば図5.11に示すように、上位局の放送波を中継局1が受信し、周波数変換された中継局1の放送波を中継局2が受信、周波数変換された中継局2の放送波が上位局と同一周波数となるとき、上位局の放送エリアと中継局2の放送エリアが重複するのであれば、放送波のタイミングを合わせる必要がある。この場合、別の音声伝送設備を使用することなく、放送波だけで遅延調整が可能になる。

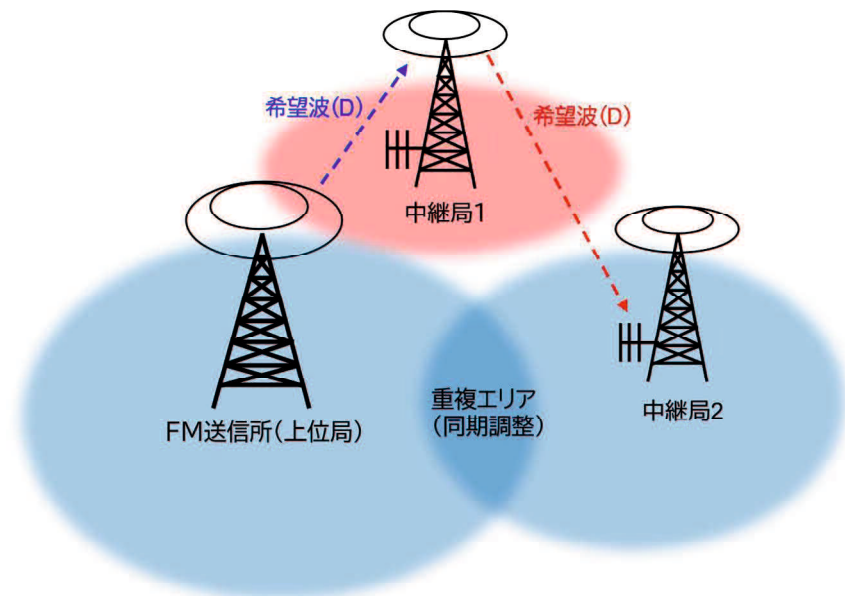


図5.11 MFNにおける同期調整

このようなときは、中継局で受信と送信の周波数が異なるため、受信部と送信部で別のローカル信号を使うことになるが、同一周波数で送信波が回り込まないため中継装置から回り込みキャンセル部を省略することができる。図5.12にMFN中継局のFM中継装置の構成を示す。

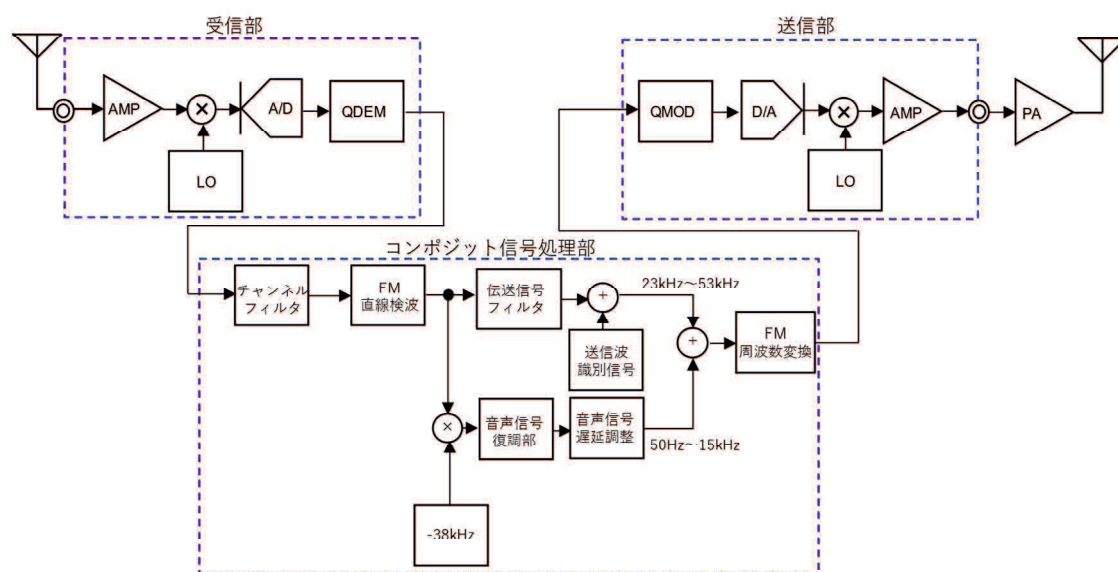


図5.12 MFN中継局 FM中継装置

今回の実験を踏まえ本方式のL-R信号の帯域に重畳する伝送用音声信号は、FMステレオ変調方式で用いられる搬送波抑圧変調（振幅変調）でなく、デジタル変調を用いることも可能である。

5.6 新たな FM 伝送方式の効果

図5.13に示すように今までの放送波中継方式では上位局からの送信遅延時間 $A(t)$ と下位局からの送信遅延時間 $B(t)$ は式(5.1)に示すように $B(t)$ は中継遅延と装置遅延分遅れる。

送信所間の重複する干渉エリアでは干渉雑音により音質が低下するため、予め重複するエリアを最小限に設計する必要があった。新たに研究した、新FM伝送方式による同期放送技術では、式(5.2)に示すように重複するエリアの等電界において遅延調整が可能となり、音質改善を実証した。（図5.14参照）

$$A(t) < B(t) \quad (5.1)$$

$$A(t) = B(t) + T \quad (5.2)$$

図5.15に中継遅延（上位局からの伝搬遅延と下位局の装置遅延）と遅延時間（等電界における遅延調整時間）を含めた，総合遅延時間 T の概要を示す．

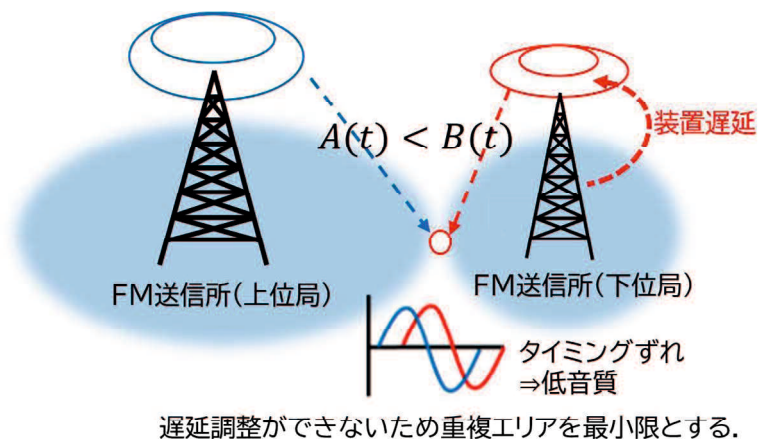


図5.13 今までの放送波中継方式による遅延

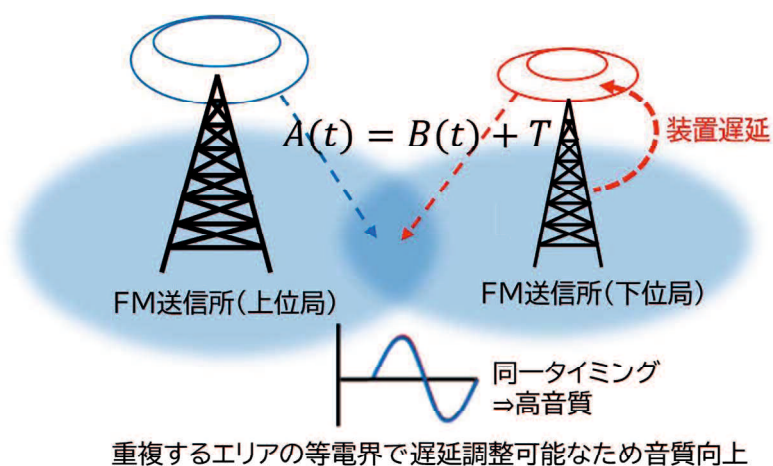


図5.14 新FM伝送方式による遅延調整事例

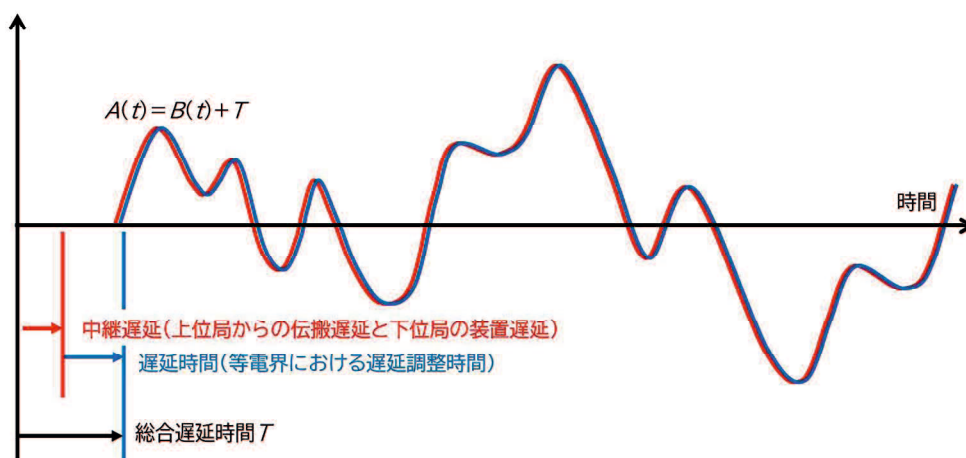


図 5.15 総合遅延時間 T 概要図

第6章 社会実装への取組み

6.1 「みちびき」災害・危機管理通報を活用した被災対応²⁰⁾

災害時等においてラジオ放送ネットワークの一部が途絶した場合でも、準天頂衛星システム「みちびき」の災害・危機管理通報（以下、災危通報と略す）サービスを活用して自動放送により災危情報を途切れなく放送できるFMラジオ放送システムの構築を目指し、内閣府の実証事業として実験を行った。

6.1.1 実証内容

- (1) 実証では図6.1に示す想定されるラジオ放送ネットワークの被災時に「みちびき」災危通報を活用して放送を継続するネットワークの構築を目指し、実証を行った。

＜被災想定①＞気象庁等から演奏所までの地上回線が被災

→演奏所で「みちびき」から受信した「災危通報（LIS信号）」をFM親局に送信。

＜被災想定②＞演奏所又はFM親局送信所の専用回線が被災

→FM送信所（親局）で「災危通報」を直接受信し、災危情報を各送信所に送信

＜被災想定③④＞FM親局送信所が被災

→中継局で「災危通報」を直接受信し、災危情報を送信。

なお、FM親局からの中継回線は専用回線（TTL回線）の③と放送波の④を想定。

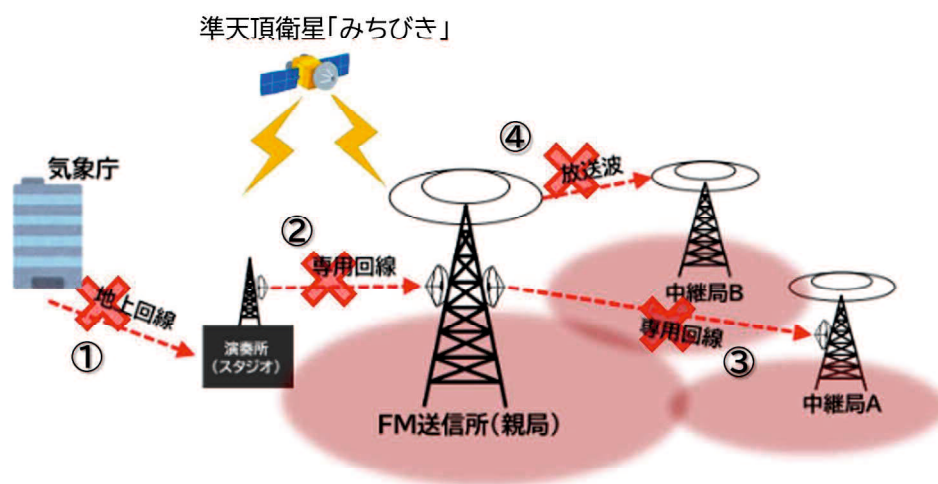


図 6.1 実証事業での被災想定

- (2) 効果検証の手法

被災想定による「FM災危通報装置」は、被災想定①②③に対応する「音声入出力型」と被災想定④に対応する「放送波入出力型」に分けられる。まずは事前に開発機器の検討を行うために室内実験を行い、その後、公開実験を行った。なお、公開実験については、山口放送の錦FM実験局を活用するため、総務省中国総合通信局や公開実験を実施する岩国市との連携を進めながら実施した。

6.1.2 室内実験結果

想定被害における室内実験は「みちびき」対応のGNSS（Global Navigation Satellite System）アンテナで配信信号を受信し、その警報信号を認識した上で、その信号に該当するあらかじめ録音した音声データを、FM中継装置を通して放送することを検証した。また、発報及び解除に対応した自動放送が可能であることも確認した。

「音声入出力型」について、図6.2に被災想定に対応したシステム構成、図6.3に音声入出力型のシステム系統図、図6.4に室内実験の様子を示す。

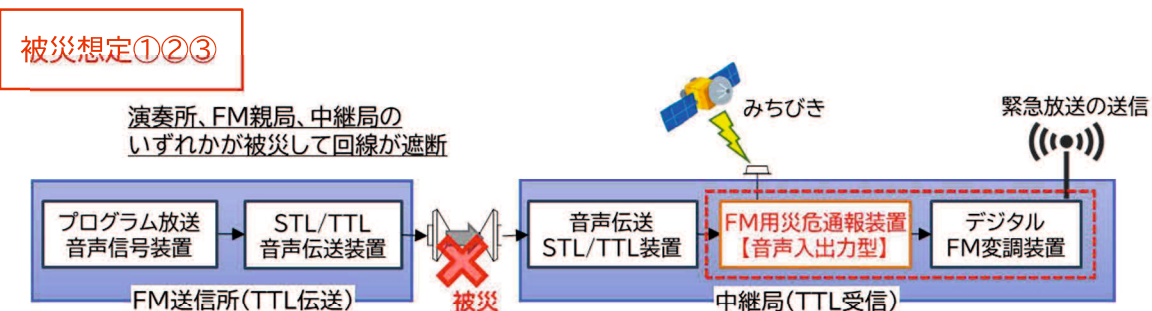


図 6.2 被災想定に対応したシステム構成

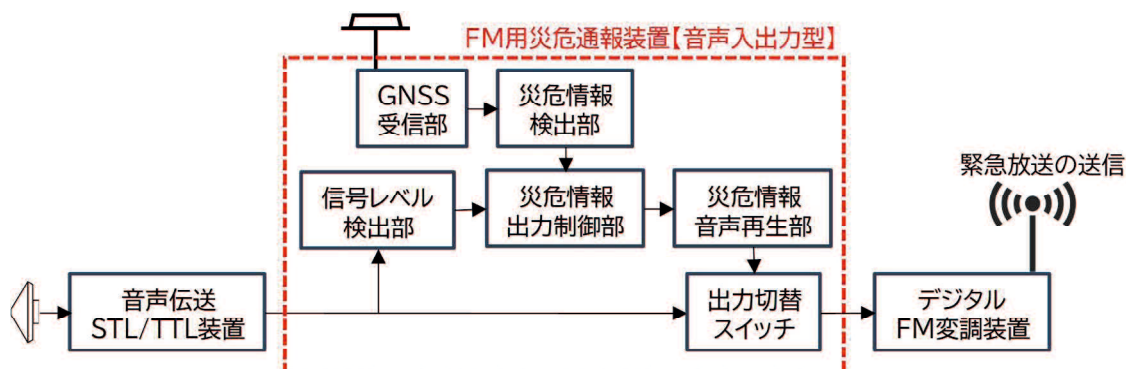


図 6.3 災危通報装置（音声入出力型）の系統図

図6.3のようにFM変調器の音声入力に災害通報装置を追加。通常はSTL/TTL出力の音声信号を直通で放送し、信号レベル検出部で閾値以下のレベルを検出後、災害通報に音声进行切り替えて放送する。



図 6.4 室内実験（24.2.9）でのシステム構成

次に「放送波入出力型」について図6.5に被災想定に対応したシステム構成、図6.6にシステム系統図及び図6.7に室内実験の様子を示す。

被災想定④

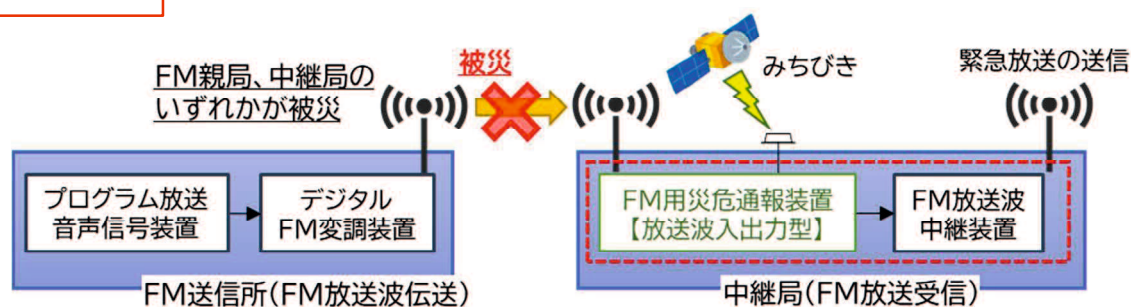


図 6.5 被災想定に対応したシステム構成

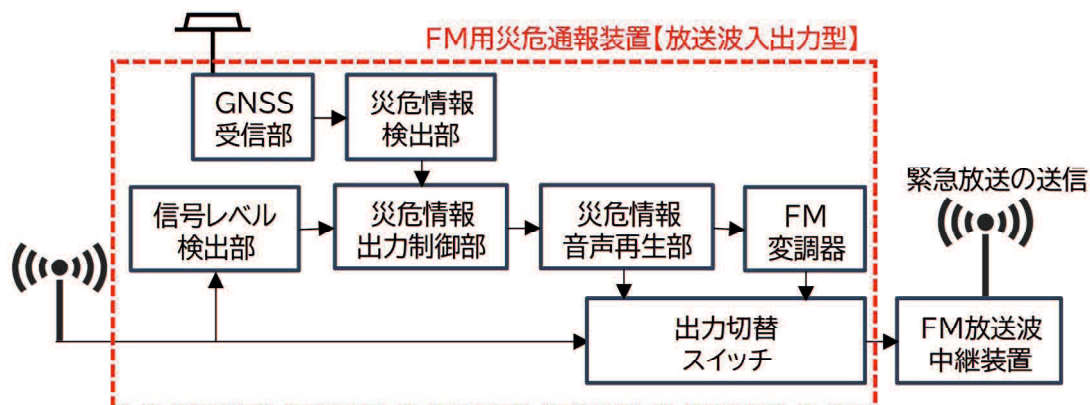


図 6.6 災害通報装置（放送波入出力型）の系統図

図6.6のようにFM中継装置のRF入力に災害通報装置を追加し、通常は受信している放送波を直通で放送、信号レベル検出部で閾値以下のレベルを検出後、災害通報はRF信号を切り替えて放送する。

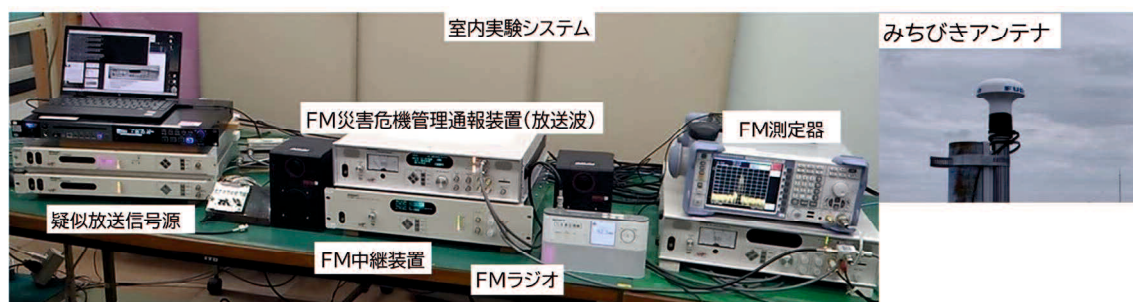


図 6.7 室内実験（23.10.31）でのシステム構成

6.1.3 公開実験結果

公開実験は山口放送の錦FM実験局エリアで大雨特別警報が発報、さらに近郊の錦川に氾濫警戒警報が発報されたことで複数の警報/解除を想定して、実際のみちびきから配信した。

(1) 公開実験概要

- 1) 山口県に大規模災害が発生した場合を想定
- 2) 災害で錦 FM 実験局の中継回線（放送波）が被災.
- 3) 錦 FM 実験局が「みちびき」の災害情報を利用して緊急放送を実施.
- 4) 避難所である「錦ふるさとセンター」で地域住民が試聴.

・参加者:地域住民及び関係者 約 90 名

(2) 公開実験結果

実際の錦FM実験局において、親局であるFM送信所（山口県防府市）が被災し、放送電波が断絶した状況を想定し、錦FM実験局でみちびきの配信信号を受信した後、その警報信号と連動しあらかじめ録音した音声データをFM中継装置を通して放送することができた。緊急放送は指定避難所である錦ふるさとセンターで地域住民、岩国市防災担当者等、約90名が参加して、実際の放送を試聴した。また、実証の様子は山口放送のラジオ番組内でLIVE中継され、テレビ番組でも夕方のニュース番組や翌日の情報番組でも紹介した。

公開実験後の参加者アンケートでは、約半数の方が日頃からラジオを聞かれていることが分かった。アンケートでは「みちびきから受信した情報が地元のアナウンサーの声で聞こえることに感動した」、「自然な形で最新技術が使われることがよい」「情報の途絶が解消できれば、相当に公・民の災害対応が向上できる」との意見をいただきましたが、「伝え方については、音声情報でいかに簡潔に伝えるかが課題」とのご意見もいただいた。

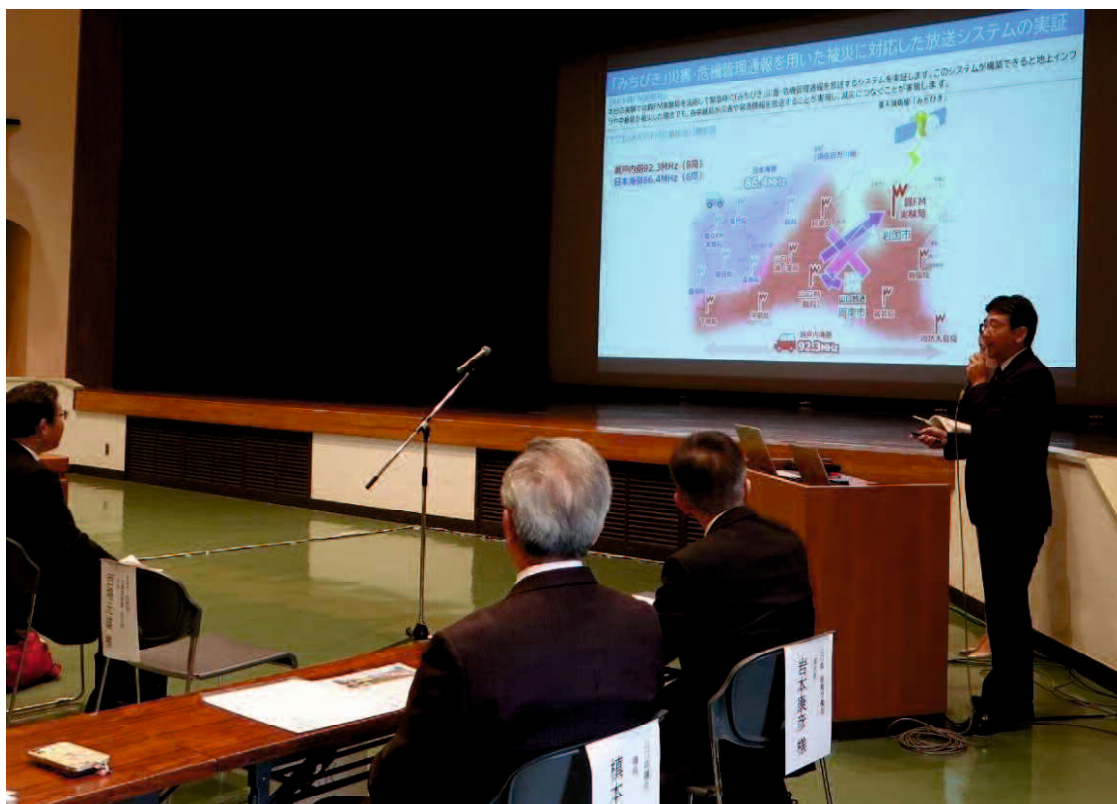


図 6.8 公開実験（2023 年 11 月 23 日）の様子（説明者が筆者）



図 6.9 山口放送夕方ニュース番組「KRY ニュース LIVE」

6.1.4 実証で得られた成果がもたらす社会的効果

FMラジオは、音声のみによる情報伝達が可能であり、また、受信機は安価で車にも搭載されているため、災害時の情報伝達手段として非常に有効なメディアである。今回の実証で構築できる放送システムを活用することで、今後予想されている南海トラフ等の大規模災害（避難者:約950万人）で地上インフラが被災した状況においても、FMラジオ放送で「みちびき」からの災危情報を得ることができ、市民に安心安全情報を届けることが実現する。

さらに、FMラジオは世界共通の方式であるため、みちびきが受信できる東南アジアやオセアニア地域で日本と同様の災危通報サービスが実施できれば、同様のFMラジオ放送システムの利用が可能となる。

6.2 同期放送技術を活用した「南海トラフ地震臨時情報」の発信

(1) 概要

「臨時災害放送局」とは、暴風、豪雨、洪水、地震、大規模な火事その他による災害が発生した場合に、その被害を軽減するために、地方公共団体等が開設する臨時かつ一時の目的のためのFMラジオ放送局であり、臨時災害放送局は災害に対応するため迅速にかつ円滑に開設、運用されることが重要である。よって、本論文では南海トラフ地震南海トラフ地震臨時情報が発表された場合、同じ周波数でエリアを拡げる同期放送を活用した臨時災害放送局の開設について考察した。

臨時災害放送局は東日本大震災地震発生当初、被災地の避難所で得た安否情報の提供や、電気、ガス、水道などのライフライン、そして支援物資の配布情報などの情報を発信した。その後は炊き出しや給水、入浴施設などの救援情報、そして道路、店舗等の再開情報、仮設住宅や義援金の手続きなどの行政手続き情報も細部にわたり情報発信しており、その役割は被災者の生命線である。

(2) 南海トラフ地震臨時情報²¹⁾

過去の事例から、南海トラフ地震は、おおむね90年から150年ごとに発生するという周期性と、南海トラフの東側で地震が発生した後、32時間後や2年後に西側で地震が発生したという連続性があることが知られている。

南海トラフ地震臨時情報は、このような南海トラフ地震の周期性や連続性を利用して、南海トラフ地震の想定震源域等で異常な現象が観測され、地震発生の可能性が相対的に高まっていると評価された場合などに、気象庁から発表される情報である。

南海トラフ地震臨時情報発表の流れについて、図6.10に示す。

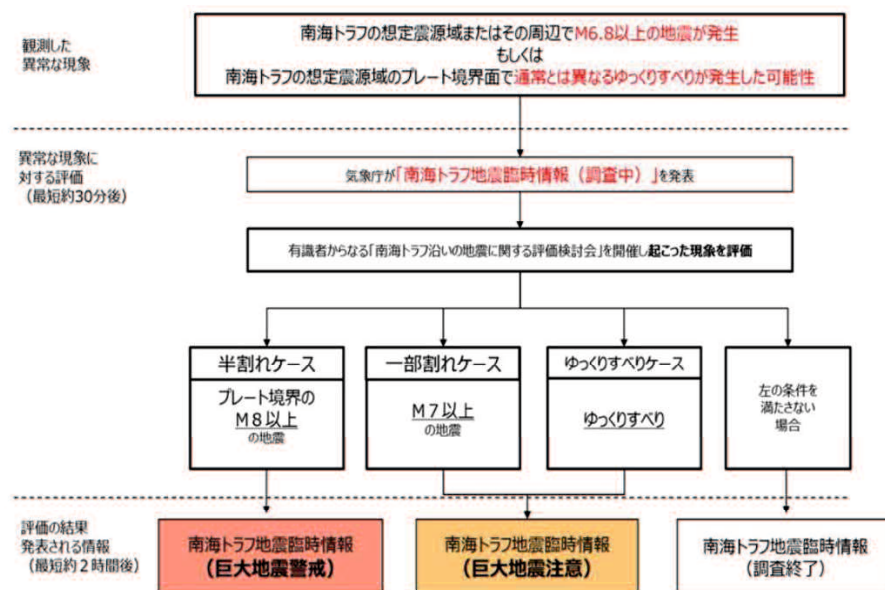


図 6.10 南海トラフ地震臨時情報発表までのフロー²¹⁾

南海トラフ地震臨時情報が発表された場合に「30cm以上の津波浸水が地震発生から30分以内に生じる地域」を対象に、避難指示を発令される。

南海トラフ地震臨時情報が発表されたときに必要な行動について図6.11に示す。南海トラフ地震臨時情報（調査中）が発表された場合は、個々の状況に応じて避難等の防災対応を準備・開始し、今後の情報に注意する。また、地震発生から最短2時間後に観測された異常な現象の調査結果が発表される。政府や自治体からキーワード（巨大地震警戒，巨大地震注意または調査終了）に応じた防災対応が呼びかけられるので，それぞれの内容に応じた防災対応をとる。

南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）が発表された場合は，日頃からの地震への備えの再確認に加え，地震が発生したらすぐに避難できる準備をする必要がある。地震発生後の避難では間に合わない可能性のある住民は1週間の事前避難を行う必要がある。南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）が発表された場合は，事前の避難は伴わないが，日頃からの地震への備えの再確認に加え，地震が発生したらすぐに避難できる準備をする。南海トラフ地震臨時情報（調査終了）が発表された場合は，地震の発生に注意しながら通常の生活を行う。ただし，大規模地震発生の可能性がなくなったわけではないことに留意しておく。

		地域別	情報発表から1週間まで	1～2週間	2週間以降
			取るべき対応と行動		
南海トラフ地震臨時情報	【巨大地震警戒】発表 半割れケース	事前避難対象地域	巨大地震警戒対応 警戒レベル4 避難指示発令 避難が必要！	巨大地震注意対応	通常の生活に戻る 大規模地震が発生する可能性がなくなったわけではないこと、地震の発生に注意しながら通常の生活をおくる
	【巨大地震注意】発表 一部割れ・ゆっくりすべりケース	内陸の地域	巨大地震警戒対応 地震への備えを再確認する等、災害への意識を上げて生活		
		全市域	巨大地震注意対応 ※ゆっくりすべりケースは、すべりが収まったと評価されるまで		

図 6.11 南海トラフ地震臨時情報が発表されたときに必要な行動 ²²⁾

次に事例として高知市における開設避難所の選定に当たっては、まずは、市民の生命及び財産等の安全を最大限図るため、開設避難所選定の一般基準を定める。加えて、市民の日常生活や企業活動を可能な限り阻害しないための特別基準を設ける。

気象庁から南海トラフ地震臨時情報が発表された場合の避難イメージを図6.12に示す。

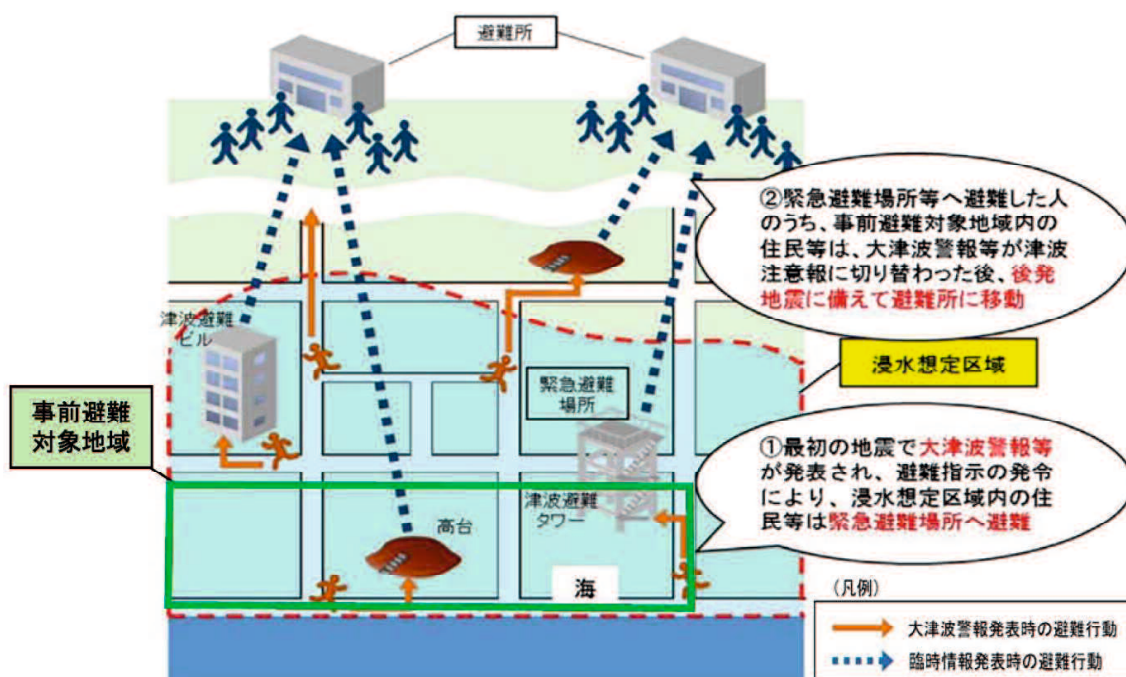


図 6.12 情報発表時の避難イメージ ²¹⁾

1. 情報発表時，大津波警報等が発表された場合は，浸水想定区域内の住民等は緊急避難所へ避難する
2. 緊急避難場所等へ避難し大津波警報が津波注意報に切り替わった後，後発地震に備えて避難所に移動する

(3) 自治体による臨時災害放送局の開設

図6.13に臨時災害放送局の免許手続について示す。被災した自治体等は，総合通信局に口頭申請することで「臨機の措置」により臨時災害放送局を開設することができる。自治体で災害対策本部設置し臨時災害放送局の開設を決定した場合は，総合通信局と相談し，設置場所・放送エリア・周波数及び出力，運用期間，設備貸与希望そして無線従事者配置などを申請する。

以下に臨時災害放送局の開設手順を記載する。

- ① 災害対策本部設置
- ② 開設検討
- ③ 総合通信局と相談
- ④ 開設手配
- ⑤ 開局



《臨時災害放送局の免許手続（臨機の措置の場合）》

図 6.13 臨時災害放送局の免許手続（臨機の措置の場合）²³⁾

(4) 臨時災害放送局の開設課題

臨時災害放送局の開設課題を以下に説明する。

1. 周波数の選定

FMラジオ放送の周波数は逼迫しており，既設局への混信妨害を避けることが必重要であり，使用可能な周波数の選定が難しい．よって非常時に臨時災害放送局を開設することを想定し，各自治体単位で事前に使用可能な周波数の選定作業が必要となる．

2. 人材確保

無線設備の操作は資格を有する無線従事者が行う．臨時災害放送局の場合は「第2級陸上無線技術士」以上の資格を有する無線従事者を確保することが必要となる．その他，アナウンサーや技術的な操作をするスタッフも必要となる．

3. 機材の確保

地方総合通信局に配備の可搬型FM送信設備の活用など，臨時災害放送局の開設に必要な機材を確保する．また，放送を行うスタジオ（演奏所）や電波を発射する送信所の確保も必要となる．

4. 実運用面

臨時災害放送局は災害時に地域情報を提供するために運営される放送局であり，地域コミュニティ放送も主体となることも考えられることから地域コミュニティ放送との連携も検討する．

5. 同期放送技術の活用

臨時災害放送局を複数置局し広範囲にエリアカバーを行う場合，同期放送技術を活用することで一つの周波数で運用することが可能となる．

(5) 考察

南海トラフ地震のように被災が広範囲に及ぶ場合は避難所も複数開設されることが想定される．その場合，図6.14に示すように，同期放送技術を活用することにより，複数の臨時災害放送局が個々の周波数を選定することなく同じ周波数で順次開設することで受信エリアが広がり，複数開設された避難所の被災者が同時に情報を得ることが可能となる．

しかしながら同期放送を行うには事前にエリア設計が必要となるため、平時から臨時災害放送局の開設場所や放送エリアを検討しておくことが必要であり、そのためには運営体制や地域の協力体制の確保、そして総合通信局や地域の放送局と連携し、無線従事者や放送機材の確保等を検討しておくことが重要となる。

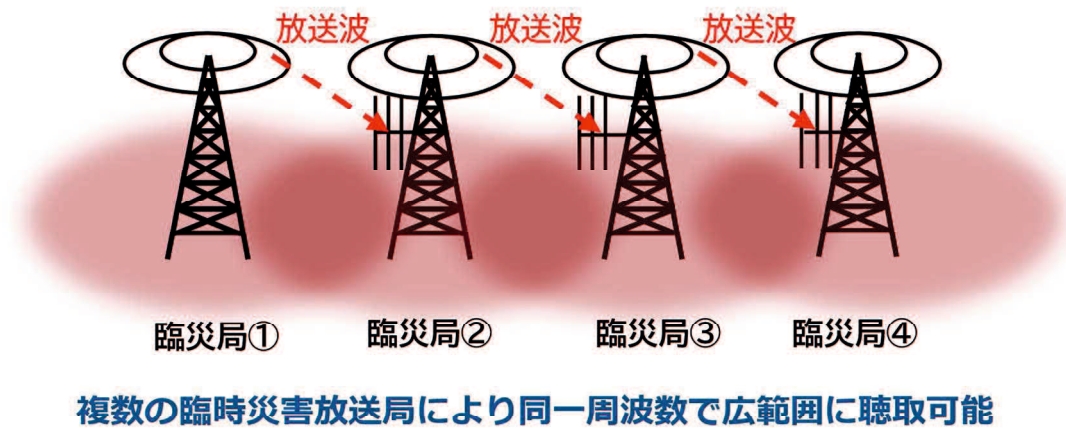
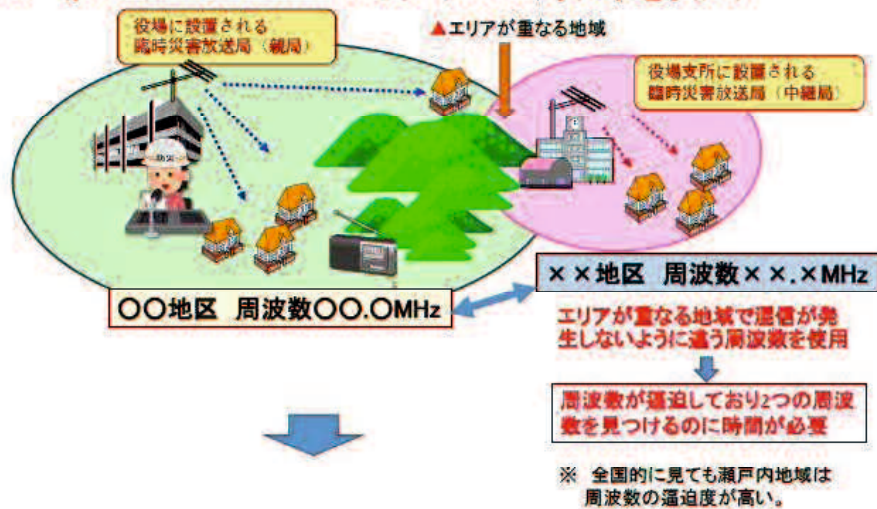


図 6.14 同期放送技術による、臨時災害放送のエリア拡張事例

6.3 臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討²⁴⁾²⁵⁾

2019年6月総務省中国総合通信局が中心となり「臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討会」が発足され、全国で初めて臨時災害放送局を複数開設する場合の技術的条件等を2か年度の計画で検討した。調査検討の概要を図6.15に示す。

現在の一般的なエリアカバーの例（2つの周波数を使用）



本検討会で検討するエリアカバーの例（1つの周波数を使用）



図6.15 臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討の概要²⁵⁾

6.3.1 調査検討の目的

臨時災害放送局は、災害の被害軽減のために開設するものであるが、被災地域が広範囲にわたる場合には複数の臨時災害放送局を開設することが必要となり、番組伝送用の通信回線の構築や、局間の影響の考慮が必要となる。臨時災害放送局は、短期間に設置運用が開始できることが求められるため、複数局を設置する場合のモデル的な構成方法を事前に検討しておくことが必要である。

特に瀬戸内地域は、FMの周波数が逼迫しており、地域的な特性を考慮した検討が求められている。調査検討会の目的は臨時災害放送局の特性を踏まえ、複数設置する場合に必要な技術的条件や運用条件等を明らかにすることである。

6.3.2 調査検討項目

(1) 想定置局構成

上記の目的を踏まえ、複数の臨時災害放送局の設置について、モノラル標準方式を考慮した、音声の伝送品質の確保を前提とした周波数同期の方法を放送波中継及び番組伝送用の無線方式を活用し、以下の4つの構成の検討を行った。

1. モノラル標準方式で音声の伝送品質の確保を前提とした簡易な周波数同期の方法を放送波中継及び既存の番組伝送用の無線方式を活用して構築
2. 放送波中継による周波数同期（子局間同期）
3. STL 中継による周波数同期（上位局同期）
4. 避難所等をスポット的にエリアとする小規模な放送波中継方式（回り込みキャンセル装置を活用した同一波方式）「避難所ギャップフィラー（GF）方式」

(2) 検討事項

1. 複数の置局の検討

臨時災害放送局の複数置局について、自治体の規模や地理的な条件（都市部、郊外部、島嶼部、山間部等）を想定し、モデル的な構成方法についての基礎検討を行った。簡易同期方式の置局構成を想定し、同期放送により干渉を与える要因、同期放送に要求されるパラメータの検討、DU比、遅延時間差、遅延調整等の必要な条件の検討を行った。

避難所GF方式の置局構成を想定し、スポット的なエリア確保のための小規模な放送波中継方式に要求されるパラメータの検討を行った。回り込みによる干渉の要因、要求されるパラメータ等の検討を行った。避難所 GF 方式の同一波方式及び二周波方式の2方式について DU 比、遅延時間差、遅延調整等の必要な条件の検討を行った。

2. 中継方式の検討

臨時災害放送局を複数置局するための中継方式について、自治体の規模や島嶼部や山間部等の地理的な条件を複数想定し、簡易同期方式の置局構成における中継方式の構成方法の比較検討を行った。臨時災害放送局を複数置局するための中継方式について、避難所として想定される施設や島嶼部や山間部等の地理的な条件を複数想定し、避難所GF方式の置局構成における中継方式の構成方法の比較検討を行った。臨時災害放送局を段階的に置局することを想定し、短期間に構築するために必要な手法の検討を行った。

3. 電波伝搬環境の検証

臨時災害放送局の置局について、以下の制約条件等を考慮し電波伝搬環境の検証を行った。

- ① エリアカバーの範囲は、自治体の一部又は全部を想定した。
- ② 臨時災害放送局は、短期間に設置運用が開始できることが求められるため、複数局のうちの 1 局は、自治体庁舎等の既存の建物に設置されることを想定した。
- ③ 避難所 GF 方式の置局構成の場合は、避難所内に空中線を設置することが必要となるなど、近傍の影響を受けやすいことを想定した。
- ④ 瀬戸内地域は地形的な関係から周波数が逼迫していることから、混信検討の対象が多く存在するとともに、混信回避のためのアンテナパターン調整等の工夫が求められることを想定した。

4. 屋内試験の実施

簡易同期方式については、実際の同期放送試験環境を構築し、中継局の間隔や電波伝搬環境を都市部や郊外部など複数想定して、パラメータを変化させた時の干渉領域における受信形態毎の（固定受信、車両移動受信、携帯受信等）信号劣化の検証を室内試験で行った。避難所GF方式については、実際の放送試験環境を構築し、パラメータ

を変化させた時の干渉領域における受信形態毎の（避難所駐車場での車両での受信，避難所内での携帯受信等）信号劣化の検証を室内試験で行った。

5. モノラル方式とステレオ方式の特性比較を行った

受信機におけるモノラル方式とステレオ方式の特性比較，受信劣化の改善策の検討を行った。

6. 検討結果の取りまとめ

1から5までのデータを整理して，取りまとめを行った。

(3) 公開試験による検証

2021年3月26日，検討会の取り纏めとして公開試験が広島市立大学で実施され，FM回り込みキャンセラ装置を使用した同一周波数送信の検証も行った。（図616参照）

FM回り込みキャンセラの活用による検証は，図6.17に示すように上位局波と同じ周波数で避難所と見立てた体育館に微小電力(0.1W)で再送信するFM回り込みキャンセラ付ギャップフィラー装置を受信D/U=-5dBとして体育館内に再送信し，来場者約70名がそれぞれ持参されたラジオで体験した。結果，公開試験においてFM回り込みキャンセラの開発により小規模エリアでの放送波中継の1周波数化が実証できた。

「臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討」 公開試験

中国総合通信局では、令和元年度から、災害の被害軽減のために開設する臨時災害放送局について調査検討を行うため、「臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討会」を開催しています。

この調査検討会は、被災地が広範囲にわたる場合、追加的に臨時災害放送局の中継局を設置する必要がありますが、全国で初めて、FM同期技術等を活用して、同じ周波数で放送する臨時災害放送局を複数開設する場合の技術的条件等を令和元年度から2か年度の計画で検討しています。

本公開試験では、**広島市立大学の構内を地方公共団体と見立て、情報科学部棟（親局）と体育館（子局）で周波数同期をおこなう公開試験を実施します。**

とき 令和3年 3月26日（金）
13:30～15:00

ところ 広島市立大学 体育館
（広島市安佐南区大塚東三丁目4番1号）

入場無料
定員50名
（先着順）

■公開試験の概要

広島市立大学

情報科学部棟

体育館

87.1MHz

ポータブルラジオを御持参いただくと、御理解がより深まります。

主催：総務省中国総合通信局、中国情報通信懇談会
共催：公立学校法人広島市立大学

総務省

図 6.16 「臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討」公開試験パンフレット 24)

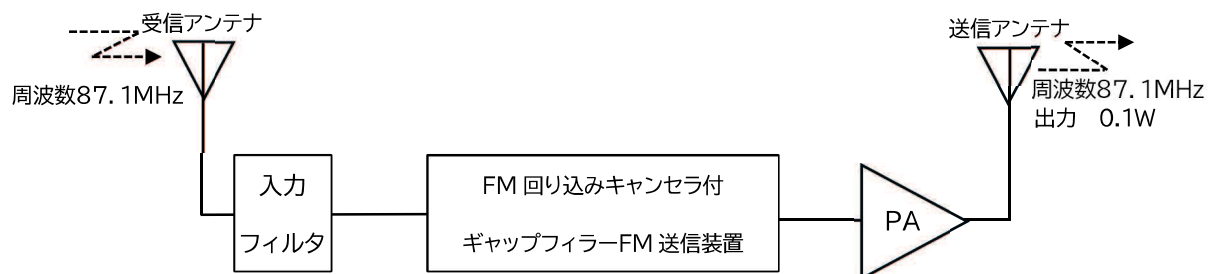


図 6.17 「臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討」公開試験系統図 24)

6.3.3 調査検討のまとめ²⁴⁾

(1) 臨時災害放送局の電波伝搬環境のまとめ

1. 机上検討からの考察

臨時災害放送局の電波伝搬環境のまとめとして下記の通り考察された。

(シミュレーション)

放送エリアを推定するためには、第一フレネルゾーン内の障害物による遮蔽や大地反射への影響を配慮したシミュレーションが重要である。また、大地平面反射波の影響や都市減衰を考慮したエリアシミュレーションが必要である。

伝搬経路に海上を含む場合は潮汐による受信電界強度の変動に注意する必要がある。安定な受信のためには、海上からの反射波が受信されないよう、建物で遮蔽するなど、アンテナの設置場所を配慮することが重要である。

(エリアカバー範囲と空中線高)

臨時災害放送局で使用される FM 放送の周波数帯の伝搬特性、受信形態からエリア半径は数km程度の見通し範囲であり、送信場所は、自治体庁舎や避難所（公民館、学校等）を中心とした比較的低い場所（10m～30m程度）となることが想定される。

2. 屋外電波伝搬試験からの考察

屋外フィールド試験に先立ち、広島市立大学の構内で臨時災害放送局を想定して比較的低い送信高にて電波伝搬試験を行った。従来の電波伝搬理論と大きくかけ離れる結果は得られなかったものの、水平偏波のほうが計算値に近い結果が得やすいことが判明した。垂直偏波については計算値に近い結果が得にくいため、設計において5dB程度のマージンを見込んだ方が良いと考えられる。また、建物の遮蔽においては、半分遮蔽では想定通り約6dB以上の遮蔽損失が、全部遮蔽では約16dB程度の遮蔽損失が生じることが判明した。

臨時災害放送局のアンテナ設置は屋上に設置されるケースが多いと思われるが、構造物の遮蔽の影響を受けない場所にアンテナを設置することが望ましいことがあらためて立証された。

(2) 屋外フィールド試験のまとめ

1. 放送波中継における複数置局の考察

坂町においては縦に長いエリアを放送波中継することにより、課題となっていた小屋浦地区を救済することができた。2周波を使用した放送波中継が問題なく実現でき、その上で更に回り込みキャンセラ装置を使用した1周波における放送波中継も試みた。回り込み量をアンテナで抑制するには課題もあるが、回り込みキャンセラ装置の開発により放送波中継の1周波数化が不可能ではないことが実証できた。

2. 同期放送における複数置局の考察

160MHzSTL 中継方式および有線方式での同期放送による複数置局において、同期放送システムの設計手法に従い、電界シミュレーション、D/U 分布確認、遅延時間の調整を行い、坂町および熊野町にて平成 30 年豪雨災害時の課題を克服し臨時災害放送局の複数置局を実現することが実証できた。

3. モノラル方式の優位性

放送波中継方式および同期方式のフィールド試験にてステレオ方式とモノラル方式を SINAD および実聴にて比較したが、屋内試験と同様にモノラル方式のほうが干渉領域において歪みが少なく音質が良いことが確認できた。

4. 総通局設備を使用した場合の同期放送

総通局設備の変調部をスルーさせ、電力増幅部（出力フィルター部含む）を放送機の後段として使用し、同期放送を実現することができた。これにより、高出力対応の総通設備を使用し、同期放送対応の変調部を組み合わせることで必要最小限の改修で 100W 級の臨時災害放送局を実現できることが実証できた。

(3) 避難所およびギャップフィラー方式のフィールド試験のまとめ

1. 避難所の考察

避難所においては建物の構造にもよるが、屋内の電界は屋外に比較して概ね 5dB～15dB 低下することがわかった。このことにより、避難所の設置が想定されるエリアでは室内の受信環境を考慮し、避難所を電界強度 60dB μ V/m の強電エリアに含むように設計することが望ましいと考えられる。また周囲が住宅に囲まれた避難所においては、低層階より高層階の方が受信電界が高いことが確認できた。市街地の避難所は周囲の建物の影響を受けることが立証された。

2. ギャップフィラー方式の考察

弱電界となった避難所等において、ギャップフィラーは有効な手段であることが確認できた。2周波のギャップフィラーは勿論のこと、回り込みキャンセラー技術の開発により送信電力0.1W程度の小電力ギャップフィラーであれば1周波での置局も比較的容易に行えることが確認できた。回り込みキャンセラ装置の遅延時間の影響により、避難所の周囲の等電界ポイントに品質劣化を生じると想定されたが、小規模局の場合は等電界ポイントも小さいエリアでしか発生しないことが確認できた。

6.3.4 考察と課題

本調査検討会は被災地域が広範囲にわたる場合、複数の臨時災害放送局を短期間に設置し運用できるモデル的な構成方法を確立するため、2019年度から2カ年にかけて調査検討等を行った。

臨時災害放送局が考案された平成初期においては技術的に同期放送を取り入れることは困難であったが、近年のデジタル化や同期放送技術を活用することで同じ周波数で広範囲にエリアをカバー出来ることが実証できた。特に公開実証で臨時災害放送局をFM回り込みキャンセラ付ギャップフィラー装置を活用することで被災者へ情報を届けことが実証できたことは、臨時災害放送局を開設する際の大きな成果となった。しかしながらFM回り込みキャンセラ装置を活用した場合、下位局波は上位局波より遅延が発生するため、上位局波と下位局波が重複する等電界エリアで遅延調整ができないことから干渉歪が発生するほか、FM同期放送の技術的条件（3.1.1に記載）に適合しないといった大きな課題も残った。

なお課題解決については、本研究の成果として筆者がその解決策を考案し、新FM伝送方式による同期放送技術として第5章に記載している。

6.4 臨時災害放送局関係法令（抜粋）²⁶⁾

6.4.1 放送法（昭和 25 年法律第 132 号）

（番組基準等の規定の適用除外）

第8条 前3条の規定は，経済市況，自然事象及びスポーツに関する時事に関する事項その他総務省令で定める事項のみを放送事項とする放送又は臨時かつ一時の目的（総務省令で定めるものに限る．）のための放送を専ら行う放送事業者には，適用しない．

（災害の場合の放送）

第 108 条 基幹放送事業者は，国内基幹放送等を行うに当たり，暴風，豪雨，洪水，地震，大規模な火事その他による災害が発生し，又は発生するおそれがある場合には，その発生を予防し，又はその被害を軽減するために役立つ放送をするようにしなければならない．

6.4.2 電波法（昭和 25 年法律第 131 号）

（手数料の徴収）

第103条

2 地震，台風，洪水，津波，雪害，火災，暴動その他非常の事態（以下この項において「地震等」という．）が発生し，又は発生するおそれがある場合において専ら人命の救助，災害の救援，交通通信の確保若しくは秩序の維持のために必要な通信又は第 102 条の2第1項各号に掲げる無線通信（当該必要な通信に該当するものを除く．）を行う無線局のうち，当該地震等による被害の発生を防止し，又は軽減するために必要な通信を行う無線局として総務大臣が認めるものであつて，臨時に開設するものについては，前項第1号，第2号，第6号，第8号又は第9号に掲げる者は，同項の規定にかかわらず，手数料を納めることを要しない．

（電波利用料の徴収等）

第 103条の2

14 第1項，第2項及び第5項から第 12項までの規定は，第 27条第1項の規定により免許を受けた無線局の免許人又は前条第2項に規定する無線局（次の各号に掲げる者が専ら当該各号に定める事務の用に供することを目的として開設する無線局（以下この項において「国の機関等が開設する無線局」という．）を除く．）若しくは国の機関等が開設

する無線局その他これらに類するものとして政令で定める無線局の免許人等（当該無線局が特定免許等不要局であるときは、当該特定免許等不要局を開設した者）には、当該無線局に関しては適用しない。

6.4.3 放送法施行規則（昭和 25 年電波監理委員会規則第 10 号）

（番組基準等の規定の適用除外）

第7条

2 法第8条に規定する臨時かつ一時の目的のための放送（以下「臨時目的放送」という。）は、次の各号に掲げる事項のいずれかを目的とするものでなければならない。

一 国又は地方公共団体が主催し、後援し、又は協賛する博覧会その他これに類する催し物の用に供すること。（補足:イベント放送局）

二 暴風、豪雨、洪水、地震、大規模な火事その他による災害が発生した場合に、その被害を軽減するために役立つこと。（補足:臨時災害放送局）

6.4.4 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5条関係） 無線局の目的別審査基準 第5 放送関係

4 超短波放送局

（3）臨時災害放送局

臨時災害放送局の審査は、次の基準によるほか、別紙 1 第 2 の 2 の基準により行う。

（ア）免許主体としては、被災地の地方公共団体等、災害対策放送を行うのに適した団体であること。

（イ）放送対象地域は、災害対策に必要な地域の範囲内であること。

6.4.5 放送法関係審査基準（平成 23 年総務省訓令第 30 号） 別紙 1（第 3 条関係）

第3条（11）による審査は、関係法令、基幹放送普及計画及び基幹放送用周波数使用計画によるほか、次の基準によることとする。《21項のみ記載》

21 臨時災害放送を行う地上基幹放送の業務の認定等は、次の基準によるものとする。

- (1) 認定等主体としては、被災地の地方公共団体等、災害対策放送を行うのに適した団体であること。
- (2) 放送対象地域は、災害対策に必要な地域の範囲内であること。
- (3) 放送番組は、被災地における被災者への支援及び救援活動等の円滑な実施を確保するために必要な範囲内のものであること。

6.4.6 総務省東海総合通信局と一般社団法人日本コミュニティ放送協会東海地区協議会との災害時等における協力体制に関する協定書

総務省東海総合通信局（以下「甲」という．）と一般社団法人日本コミュニティ放送協会東海地区協議会（以下「乙」という．）は、災害時等における臨時災害放送局の開設、運用支援に関し、次のとおり協定を締結する。

（目的）

第1条 この協定は、災害が発生し又は発生するおそれがある場合に、甲の依頼に対して乙が協力することにより、地方公共団体等が被災者等への情報伝達を目的として開設する臨時災害放送局の開設、運用の支援に資することを目的とする。

（定義）

第2条 この協定における「災害」とは、災害対策基本法（昭和36年法律第223号）第2条第1号で規定する災害をいう。

（協力体制の対象）

第3条 乙が協力する協力体制の対象は、次の各号について自ら行う業務に支障のない範囲において実施するものとする。

- (1) 臨時災害放送局による放送を遂行するために必要となる人員の派遣
- (2) 臨時災害放送局を開設するために必要となる機材の貸与や技術者等の人員の派遣
- (3) その他、甲乙協議して定めた事項

（協力体制の対象地域）

第4条 乙が協力する対象地域は、岐阜県、静岡県、愛知県、三重県とする。

（協力体制の実施期間）

第5条 甲及び乙は、災害が発生し又は発生するおそれがある場合、必要に応じて情報交換を開始し、協力体制の実施期間について甲乙協議して定めるものとする。

(協力に係る連絡体制)

第6条 甲及び乙の協力に係る連絡体制（平素の体制を含む。）は、次のとおりとする。

- (1) 甲の連絡窓口は、総務省東海総合通信局放送部放送課とする。
- (2) 乙の連絡窓口は、一般社団法人日本コミュニティ放送協会東海地区協議会事務局とする。
- (3) 甲及び乙は、連絡責任者等に変更があったときは、速やかに連絡するものとする。

(情報の利用等)

第7条 甲及び乙は、協力体制の実施過程で知り得た情報について、公知の情報を除き、自らの機関内部のみで利用するものとし、情報提供側の承認を得ないで外部に提供してはならないものとする。

(平素の協力)

第8条 甲及び乙は、平素から災害発生時における協力体制が円滑に機能するよう、自ら行う業務に支障のない範囲において、協力内容に資する情報の交換や訓練等を実施するなど相互に協力するものとする。

(有効期間)

第9条 この協定は、協定締結の日からその効力を有するものとし、甲乙いずれからも文書による終了の意思表示がない限り、その効力を継続する。

(疑義の決定)

第10条 この協定に定めのない事項又はこの協定について疑義を生じたときは、場合は、甲及び乙が協議の上、決定するものとする。

[附則]

この協定の成立を証するため、本書を2通作成し、甲及び乙が署名の上、各1通を保有する。

令和3年3月10日（署名）

甲 総務省東海総合通信局 局長

乙 一般社団法人日本コミュニティ放送協会東海地区協議会 会長

第7章 結論

2011年に発生した東日本大震災後、総務省では、2014年4月にAMラジオ放送の難聴対策や災害対策を目的として、FM補完中継局の制度整備を行った。山口放送は2014年にFM補完放送を実施するにあたりAMラジオ放送の災害対策や難聴対策として取り組んだが、AMラジオ放送のエリアはFMエリアよりも非常に広いといった特徴があるため、FMでも同一の周波数での放送エリアを広くすることがリスナーのメリットと確信し、電波の有効利用にもつながるFM同期放送を実現したいとの方針を決めた。

研究を振り返り、困難と言われた放送波中継方式によるFM同期放送が実現できたことは大きな成果となった。第5章で説明した、「新たなFM伝送方式による同期放送技術」を活用することで災害時に情報を伝える臨時災害放送局において、高精度な同期放送網により広範囲に災害情報を伝えることが可能となった。

また本技術はメーカー及び山口大学と共同で2024年5月に特許協力条約（PCT:Patent Cooperation Treaty）に基づく国際出願をしたのち、8月に国際調査機関からの国際調査報告で新規性、進歩性、産業上の利用可能性全てを有する結果となり、2024年11月29日、国内特許を取得した。（特許第7595863号、特願2024-560556）

更に2024年6月に発足した、総務省中国総合通信局「超短波放送（FMラジオ放送）における同一周波数放送波中継による同期放送に関する調査検討会（座長:山口大学大学院 村田英一教授）では、第4章で説明したFM回り込みキャンセラ装置を活用することで国内初となる放送波中継による同一周波数放送の実用化を目指すこととしている。

山口放送が取り組んだFM補完放送は2014年から今年で11年目を迎え、県内のほぼ全域でFMラジオが聴取できるようになった。このFM同期放送技術は各方面からも高い評価を頂いており、2024年11月現在で全国57社、224式導入されている。ラジオは乾電池で情報を長時間聴取可能で、特に災害時の情報を入手する手段としては有効なメディアである。大学では「災害時における地域貢献」をテーマとし、今までの業績を踏まえ山口放送と連携して研究を進めてきた。

2025年3月22日、日本でラジオ放送を開始し100年を迎える。日本の放送史において重要な節目となるこの年に、本研究が災害時に多くの人々の生命及び財産を守るため情報をいち早く伝える、災害放送の一助となることを期待する。

謝辞

本論文の作成及び研究成果については、筆者が山口大学大学院創成科学研究科 システム・デザイン工学系専攻 電子情報システム工学コース後期博士課程在学中に同大学院工学系学域電気電子工学分野 村田 英一教授のご指導のもとに行ったものです。本研究を進めるにあたり、熱心かつ丁寧なご指導を頂きました。ここに謹んで感謝申し上げます。

次に、副査の田村 慶信先生、福士 将先生、井田 悠太先生、ト キン先生に心よりお礼申し上げます。皆様の貴重なご意見は、私の研究の向上に大きく寄与することとなりました。また、総務省 情報流通行政局 地上放送課及び放送技術課、並びに中国総合通信局 放送課の皆様にも感謝申し上げます。放送関連に係る皆様のご指導がなければ技術開発の実現はできませんでした。

更には研究開発に協力していただいた㈱NHKテクノロジーズ様並びに日本通信機㈱様の関係各位にも感謝申し上げます。皆様のご協力がなければ新たな技術への挑戦はできませんでした。そして、日常業務と並行して研究することに賛同していただいた、山口放送㈱の理解が得られなければ山口大学で研究することができませんでした。心より感謝いたします。

最後になりますが、家族に感謝の意を表したいと思います。家族の支えと理解がなければ、困難な時期を乗り越えることはできませんでした。今後もこの研究を基に、さらなる放送事業の発展と貢献を目指して努力してまいります。

2025 年 3 月

山口大学大学院創成科学研究科システム・デザイン工学系専攻

山口放送株式会社 取締役ラジオ局長兼技術局長

恵良 勝治

参考文献

- 1) 総務省 放送ネットワークの強靱化に関する検討会 中間取りまとめ—災害時のファーストインフォーマーとしてのラジオの強靱化—平成 25 年 7 月
- 2) 総務省平成 4 年版通信白書・令和 6 年版情報通信白書
- 3) 総務省「東日本大震災」に伴う臨時災害放送局の開設状況（資料 3-3）
- 4) NHK ラジオ技術教科書（AM/FM/PCM）日本放送協会編（平成 5 年 10 月 25 日第 1 刷発行）
- 5) 近藤，梶田：“IP 回線音声伝送における遅延時間揺らぎ抑制装置（AES/EBU 音声同期化装置）の開発”，放送技術，70,3，pp. 93-100（2017）
- 6) 令和 2 年情報通信審議会答申「諮問第 2023 号 FM 同期放送の技術的条件」
- 7) 『平成 10 年度電気通信審議会答申「諮問第 92 号 FM ラジオ放送局の置局に関する技術的条件」
- 8) RF ワールド特設記事「単一周波数を再利用して広いエリアを高品質な放送を可能にする FM 同期放送の技術とその実現」恵良，山崎，貝嶋，河野
- 9) 恵良，山崎，貝嶋，河野，樫尾，岩木：“高精度デジタル型 FM 変調器の開発と FM 同期放送の実現”，映情学誌，71,12，pp. J295-J302（2017）
- 10) 岩田，恵良，山崎，貝嶋，河野，岩下，樫尾，岩木，上田：“FM 同期放送による FM 補完放送ネットワークの完成とサービス品質の検証”，映情学誌，74,4，pp. 736-742（2018）
- 11) 電波技術協会報 FORN - 2024. 5 No. 358
- 12) 恵良，山崎，貝嶋，河野，上田：“FM 同期放送用 SFN フィールドアナライザの開発と実用化”，映情学誌，73,4，pp. 790-798（2019）
- 13) 恵良 勝治，山崎 浩介，河野 憲治，峰吉 俊幸，岩木 昌三，上田 大一郎，山根 実，“同一周波数での FM ラジオ放送波中継を可能にする“FM 回り込みキャンセラの開発”，映像情報メディア学会誌，2022，76 巻，1 号，pp. 156-164（2022）
- 14) 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）
- 15) 望月，羽鳥：“適応ディジタルフィルタによる FM マルチパスひずみ自動除去の一方式”，テレビ誌，39,3，pp. 228-234（1985）

- 16) 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)
- 17) 恵良勝治, 河野憲治, 山根実, 村田英一“マルチパスおよび外来信号に対する FM 干渉抑圧装置の開発” 映像情報メディア学会誌, 2024, 78 巻, 6 号, pp. 683-688 (2024)
- 18) Masaharu Era, Hidekazu Murata, "Actual Field Performance of FM Interference Cancellation Technique Against Multipath and Foreign Signals," Proc. 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2023), Nara, Japan, Oct. 2023.
- 19) 恵良勝治, 河野憲治, 山根実, 村田英一“新 FM 伝送方式による同期放送システム” 映像情報メディア学会誌, 2025, 2025, 79 巻, 1 号, 135-138 (2025)
- 20) 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局 ホームページ「災危通報を活用した被災対応 FM ラジオ放送システムの実証」
- 21) 「南海トラフ地震臨時情報」に係る防災対応方針 令和 2 年 3 月 (令和 6 年 3 月一部改訂)
- 22) 南海トラフ地震への直前準備～知ってますか？臨時情報
- 23) 総務省「臨時災害放送局 開設・運用の手引き (市区町村の防災担当者等向け)」
- 24) 臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討 報告書 (概要版) 令和 2 年 3 月臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討会
- 25) 臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討報告書 令和 3 年 3 月臨時災害放送局の高度利用に関する調査検討会
- 26) 臨時災害放送局関係法令 (放送法・電波法)