

FM受信時のマルチパス雑音除去方式

FM Multipath Noise Reduction System

高山 一男⁽¹⁾ 菅原 秀二⁽²⁾ 田中 修⁽³⁾
Kazuo Takayama Shuji Sugahara Osamu Tanaka

要 旨

車でFM放送を受信しながら走行すると、マルチパス雑音と呼ばれる不快雑音を感じる。これは、ビル、山等で反射した電波と直接到達した電波が干渉することにより生ずるもので、「バサバサ」、「ザッザッ」といった雑音となる。当社は従来より安定で高品質な音を提供するため、この雑音除去に多大な努力を払ってきた。今度、従来技術より一歩進めたマルチパス雑音除去方式を確立し、IC化する事で実用化した。この方式は、放送波の音声成分に応じて、雑音除去フィルタの特性を可変する、適応形の処理を行っており、音質の劣下が少なく雑音除去効果が大きい。本稿ではマルチパス妨害に対する解析、従来技術による除去方式及び新方式の基本原理、効果について報告する。

Driving a car with FM broadcasting being received, a discomfort noise called multipath noise is often experienced. This multipath noise caused by the interference between the direct wave from the transmitting antenna and indirect wave reflected by buildings and/or mountains sounds like "Basa Basa" or "Zah Zah". After long efforts to reduce the multipath noise, a new noise reduction IC has been developed which reduces the multipath noise adaptively by an adaptive filter and does not give any deterioration to the sound quality.

This report gives the result of the multipath noise analysis, comparison between the conventional and the new noise reduction theory and the advantages of the new method.

1. ま え が き

車載用オーディオ機器はホーム用とは異なり、移動しながら使用するため、車載用特有の性能が要求される。その中で、走行中FM放送を受信する場合発生するマルチパス雑音に対して安定で高品質に受信することは、最も難しい問題のひとつと言える。マルチパス雑音は直接波とビル、山、車両等で反射した反射波の干渉により生ずる位相歪や振幅歪によるもので、走行中に間欠的にザッザッ、パサパサといった不快な音となる。

不快音を少なくすることが車載用FMチューナでは重要で、過去さまざまな工夫がなされてきた。しかし現在の技術では完全に除去することは非常にむずかしい。このような背景のもと、当社もこの雑音を軽減する独自方式の検討を進めてきたところ、このたび従来よりさらに効果的なマルチパス雑音除去回路の開発を完了し、その有効性を確認した。ここでは、マルチパス雑音の解析、従来技術を含め、新方式の説明を行う。

2. マルチパス雑音と従来技術の除去方式

2.1 マルチパス妨害とは

モデル化した電波受信状況を図-1に示す。放送局からの電波は、直接波 V_d とビルによる反射波 V_u が車両アンテナに入力される。車が距離 ℓ 移

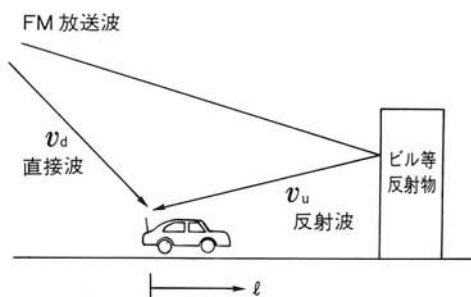


図-1 マルチパス発生状況

Fig. 1 Multipath signal condition.

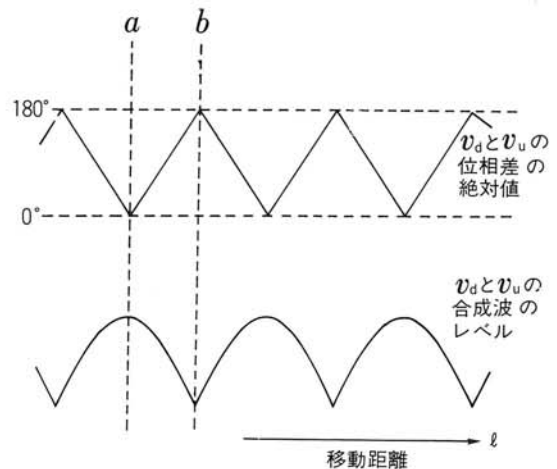


図-2 移動距離に対する位相、レベル

Fig. 2 Transition of magnitude & phase against transfer.

動したときの V_d に対する V_u の位相と合成波のレベルを図-2に示す。合成波のレベルは、 V_d と V_u が同相の場合（a線に示す）にピーク、逆相の場合（b線に示す）にディップとなる。このディップ点においてアンテナ入力レベルがチューナの受信感度以下となり受信不能となる場合がある。これをフェードアウトと称している。しかしこのディップ点においてチューナの受信感度以上の入力がある場合でも、ザッザッといった雑音を生ずる場合がある。これは V_d と V_u が逆相付近で合成されると、FM変調波であること及び V_d と V_u の間に遅延時間が存在することにより、大きな位相歪を生ずるためである。

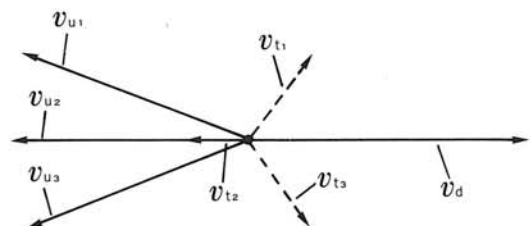


図-3 FM 2波が合成された場合の特性

Fig. 3 Characteristics of 2 FM signal mixed.

図-3に V_u と V_d のレベルが接近した場合のベクトル図を示す。ここで V_u の位相がある瞬間 (t_1) に V_{u1} 、 Δt 後 (t_2) に V_{u2} 、 $2\Delta t$ 後 (t_3) に V_{u3} とすると、合成波は $t_1 \sim t_3$ に対して $V_{t1} \sim V_{t3}$ と変化する。ここでベクトルの長さは振幅、 V_d との角度差は位相差を示すが合成することにより急峻に位相、振幅が変化する。

そのため合成波は振幅歪と位相歪を生ずる。振幅歪は、チューナのリミッタ作用により除去されるが位相歪は除去されず、雑音、歪となる。(本稿では雑音、歪を単に雑音と称する。)

この雑音はFM復調後のコンポジット信号に対して、高域周波数ほど高レベルで分布しており、モノラル受信よりステレオ受信の方が広帯域を使用する点でマルチパス雑音の影響を受けやすい。

2.2 従来の技術のマルチパス改善方式

カーオーディオメーカー各社のマルチパス雑音除去方式は、基本的には次の2つになる。一つはダイバーシティ受信方式でもう一つがマルチパスを検出してステレオセパレーション(トーンを含む場合もある)をコントロールする方式である。当社もこの技術を使用しており、後者の方はM-ASC (Multipath detect Automatic Separation Control) と称している(当社名)。以下その概要を述べる。

2.2.1 M-ASC

FMチューナでは十分電界強度がある場合はステレオ受信を行っている。マルチパス雑音の影響はステレオ受信時の方が受けやすいため、マルチパスを検出して自動的にステレオセパレーションを低下させる(モノラルにする)のがM-ASCである。

セパレーションの変化が頻繁に繰返されると聴感上、音が“ゆれる”ように感じる。これを防止するためセパレーションを低下させる時定数は短かくし、セパレーションが元に復帰する時定数は

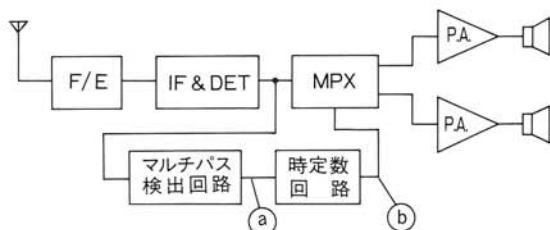


図-4 M-ASCのブロック図

Fig. 4 Block diagram of M-ASC.

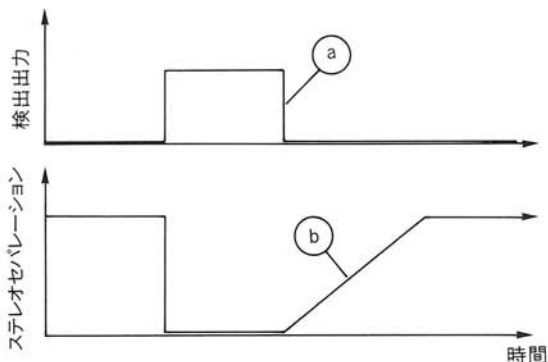


図-5 M-ASCの動作特性

Fig. 5 Characteristics of M-ASC

長くしている。図-4にM-ASCの構成、図-5に動作のタイミングチャートを示す。

次にM-ASCの改善限界について述べる。

FM放送波の変調スペクトラムは、 $L+R$ 、パイロット信号、 $L-R$ 信号より成りモノラル受信の場合は $L+R$ 信号のみを復調する。マルチパス発生時の雑音は高域ほど多く分布しておりM-ASCで $L-R$ 領域(ステレオ信号)の雑音はカットできるが、 $L+R$ 領域(モノラル領域)の雑音には効果がない。

2.2.2 ダイバーシティ受信方法

走行等によって断続して発生するマルチパス雑音に対し複数のアンテナを用意して、マルチパス雑音を受けていないアンテナに切換えて受信することにより受信状態を改善するのがダイバーシティ受信システムである。

アンテナは通常のAM-FMアンテナに加えてFM専用のアンテナを設けた2アンテナシステムが多く用いられる。図-6にアンテナシステムの例

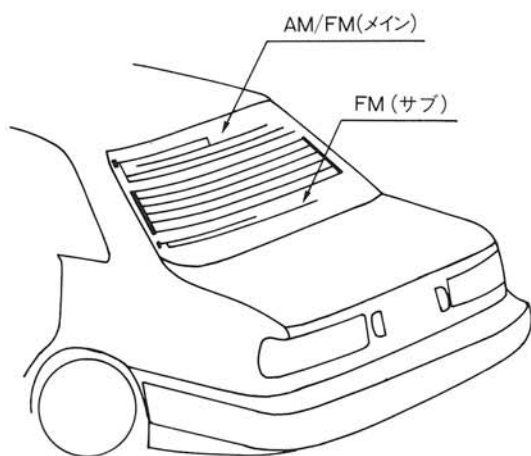


図-6 ダイバーシティのアンテナシステム例
Fig. 6 Antenna system of diversity.

を示す。

ダイバーシティ受信機の方式には、復調までの受信系をアンテナの数だけ用意しておいて常時受信状態を比較し、良い方を選ぶ選択式と受信系は一系統で入力に切換回路を置き、マルチパスの検出信号が予め定められたスレシホールドレベルを超した時に切換えを行う走査式がある。

当社のダイバーシティ受信機は後者の走査式で、切換スレシホールドレベルを切換頻度に対応して変化させる可変スレシホールドにすること

で、選択式と同等の改善効果を得ている。図-7にブロック図を示す。

マルチパスの検出は、復調出力に含まれるステレオパイロット信号 (19 kHz 10%) のマルチパス発生時の歪成分を検出する。

ダイバーシティ受信システムの動作を図式化すると図-8のようになる。

ダイバーシティ受信の場合も改善効果に限界がある。

一般にダイバーシティ受信によりマルチパス雑音の発生時間、頻度は $1/3 \sim 1/10$ 程度に低減される。改善されない部分は両方のアンテナにマルチパス雑音が生じていた場合であるが、マルチパス雑音発生時間が短かくても聴感上雑音は耳ざわりである。

2.3 将来の技術 (研究開発段階)

マルチパス雑音はFMチューナに限らずテレビ (ゴースト) や移動体通信で研究テーマに取り上げられ、各種改善方式が提案されている。

図-9に方式の一例を示す。直接波と反射波の合成である入力波より反射波相当の成分を作り出して反射波をキャンセルするものである。しかし制御条件を検出することが難しく、固定用受信機と

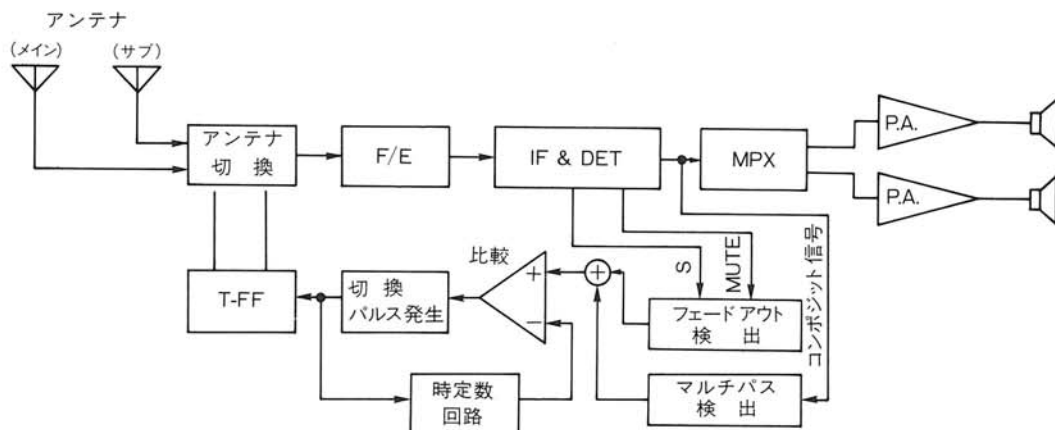


図-7 ダイバーシティ受信機ブロック図
Fig. 7 Block diagram of diversity receiver.

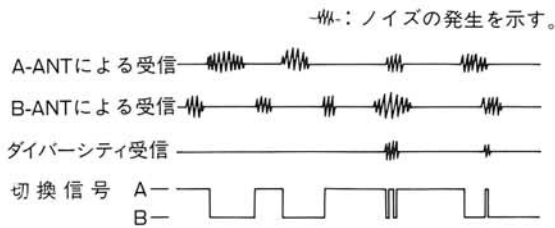


図-8 ダイバーシティ受信システム動作図

Fig. 8 Operation diagram for diversity reception.

してもまだ実用化されていない。車載用受信機に対しては、制御条件を高速でもとめる必要がありさらに困難である。実用化されるとしても将来になると思われる。

3. 新マルチパス雑音除去方式の開発

3.1 改善のポイント

チューナ内で改善の処理を行なう回路ブロックとしては、高周波段とオーディオ段が考えられる。ダイバーシティは高周波段での処理であるが、現段階ではこれ以上効果的な高周波段での処理は考えられていない。そこでもオーディオ段での処理を付加することによる改善が有効と考えた。

その理由を以下に示す。

- 1) M-ASCでは激しいマルチパス雑音に対してL+R領域の雑音が残っており、これが耳ざわりである。
- 2) ダイバーシティで両方のアンテナにマルチパ

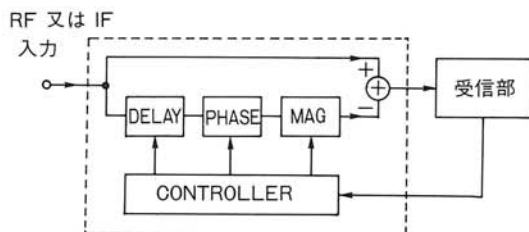


図-9 RF/IFでのマルチパスキャンセル方式

Fig. 9 Multipath canceler on RF & IF stage.

スが生じた場合も、オーディオ段の処理を行えばさらに改善される。

3.2 マルチパス雑音の解析

オーディオ段でのマルチパス雑音除去を考えるにはマルチパス雑音発生時のオーディオ信号を解析する必要がある。2.1で定性的に説明したが、ここで定量的に考えてみる。

3.2.1 マルチパス雑音の理論式

マルチパスを決定する要素としては次の6つを考慮する。

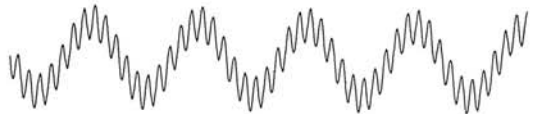
- ① 反射波の遅延時間： τ
- ② DU比： $r = V_u/V_d$
(直接レベル： V_d 、反射レベル： V_u)
- ③ 位相差： θ
- ④ 変調信号角周波数： p
- ⑤ 変調による周波数偏移： Jf
- ⑥ キャリア周波数： f_c

ここで、

$$\theta = 2\pi\tau(f_c + Jf \cos p t) \quad (1)$$

となり、合成波の振幅 V_t は、

マルチパス妨害を受ける前の波形



マルチパス妨害を受けた波形

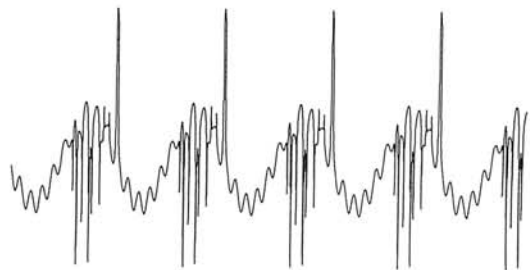


図-10 マルチパス発生時の波形—計算値

Fig. 10 Wave form at multipath-calculated value.

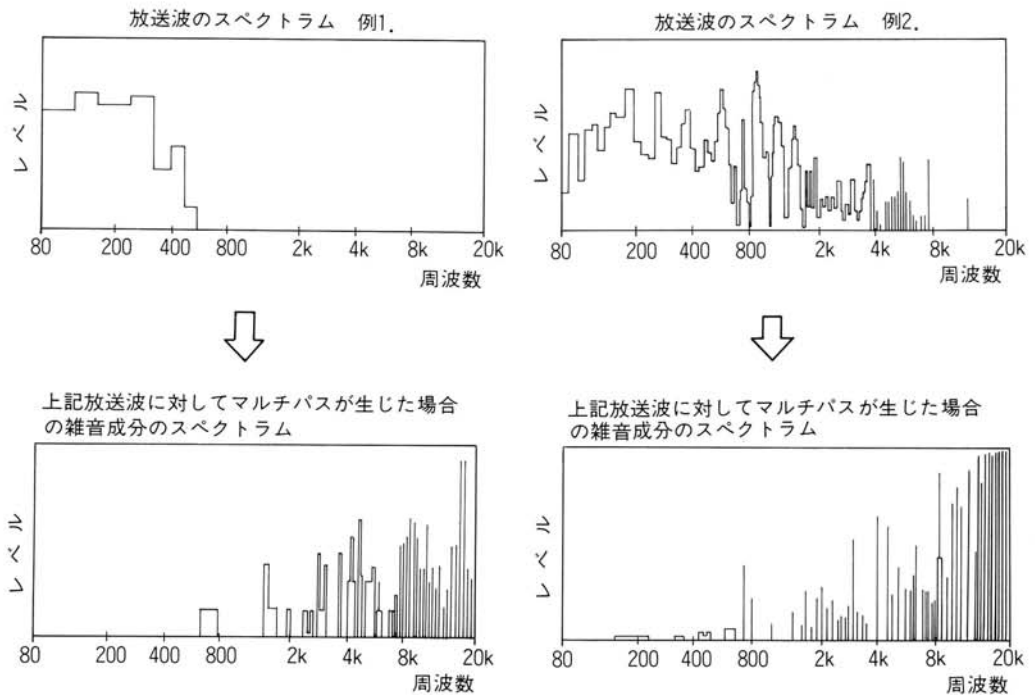


図-11 マルチパスを生じた場合のスペクトラム—実際の放送波

Fig. 11 Spectrum at multipath-practical.

$$V_t = V_d \sqrt{1 + r^2 + 2r \cos \theta} \quad (2)$$

また合成波のFM復調出力 V_{det} は、

$$V_{det} = 2\pi f \cos pt + \frac{r^2 + r \cos \theta}{1 + r^2 + 2r \cos \theta} \cdot 2\pi f p r \cos p(t - \tau/2) \quad (3)$$

となる。

変調信号が2つの異なる周波数の正弦波であった場合について、式(1)、(3)に基づいてマルチパス発生時の復調波形を計算した結果を図-10に示す。この図は、マルチパス発生位置に停止した状態に相当するが、このように雑音は断続的に生じている。

3.2.2 マルチパス雑音の実際

次に実際の放送波でマルチパス雑音が発生した場合の状態を図-11に示す。左、右に放送波の音声内容が異なる2つの例を示す。上段に放送波のスペクトラム（マルチパスを生じていない）、下段にマルチパスが生じた場合の雑音のスペクトラ

ムを示す。このようにマルチパスによる雑音は高域ほど多く分布することがわかる。前述の事項と過去の経験的事実より次のことが言える。

- ① 聴感上マルチパス雑音が持続している場合でも特に雑音が多い部分と影響が少ない部分がある。（断続的に雑音が生じている）
- ② マルチパス雑音は高域ほど多く分布する。
- ③ 音声及び音楽信号のスペクトラムは、低域側に集中する場合と高域まで分布する場合等さまざまである。
- ④ 人間の耳の特性として高域成分の少ない放送波の場合高域雑音が耳につきやすいが、高域成分の多い放送波の場合は、高域雑音がマスキング効果により目立ちにくくなる。
- ⑤ 時間経過に対する放送波のスペクトラム分布の変化は比較的ゆるやかであり、短時間の間はほぼ一定とみなせる。

3.3 新マルチパス雑音除去方式

3.3.1 新方式の概要

前述の性質より次に示す新マルチパス雑音除去方式の開発を立案した。3.2.2に示した①の性質よりマルチパス雑音除去処理は、雑音の多い部分を検出しその部分に対して処理を行えば良い。

②の性質より、処理としてはL. P. F. (Low Pass Filter) を通過させることで効果が得られる。

L. P. F. を通過させると音質が劣下するが、③、④の性質よりL. P. F. のカットオフ周波数を入力信号の周波数成分により可変することで音質変化を回避する。L. P. F. のカットオフ周波数の制御は、マルチパス雑音でも動作するが、⑤の性質からL. P. F. のカットオフ周波数をマルチパス雑音発生前の値にする。

したがって、新方式はマルチパス雑音発生前の信号成分により雑音除去フィルタ (L. P. F.) のカットオフ周波数を決定し、雑音発生部分に対してフィルタ処理を行う方式とした。以下その詳細を説明する。

3.3.2 新方式の動作

L. P. F. を通過させることにより雑音を軽減できるが、同時にL. P. F. のカットオフ周波数より高い信号成分も損なわれる。したがってL. P. F. を通過させる時間は、必要最小限度にすべきである。耳で聞いて連続的な雑音の場合でも前述したように雑音は断続的に出ており、この雑音部分についてのみフィルタ処理を行えば良い。しかし、L. P. F. 処理を断続的に行えば波形歪を生ずる。これはL. P. F. を通過させることにより、位相推移を生ずるため、波形歪を回避するためL. P. F. と同じ位相特性を有する位相器を設け位相器とL. P. F. の出力を切替える方式とした。なお、L. P. F. 位相器は入力信号の周波数成分に応じて可変しており、以後、可変L. P. F.、

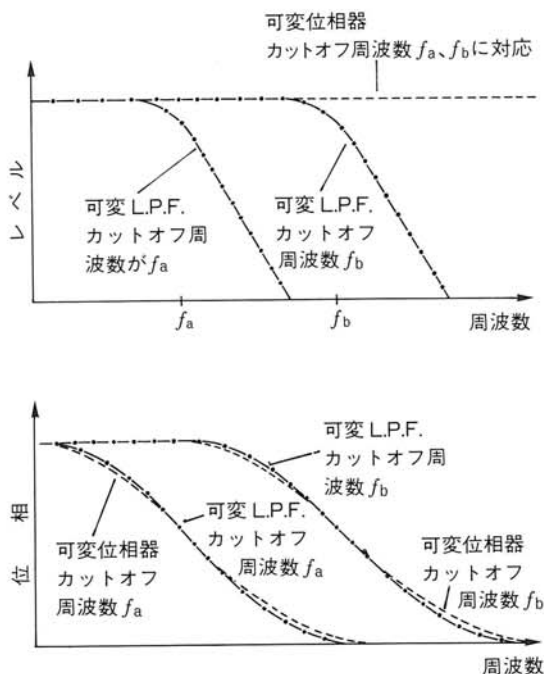


図-12 可変L.P.F.、可変位相器特性

Fig. 12 Characteristics of variable L.P.F. & variable phase shifter.

可変位相器と称す。図-12 に可変L. P. F. のカットオフ周波数が f_a 、 f_b のときの振幅位相特性を可変位相器の特性と同時に示す。

図-13に雑音除去フィルタのブロック図、図-14に動作のタイミングチャートを示す。ここで①～

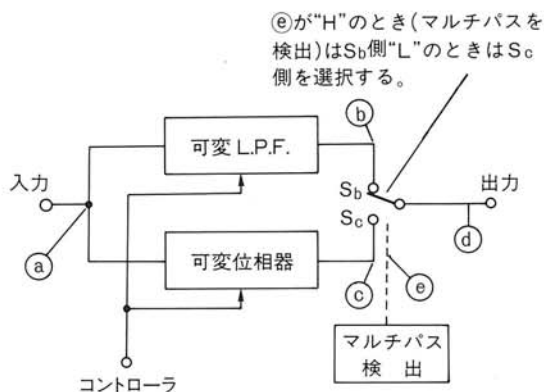


図-13 雑音除去フィルタブロック図

Fig. 13 Block diagram of noise reduction filter.

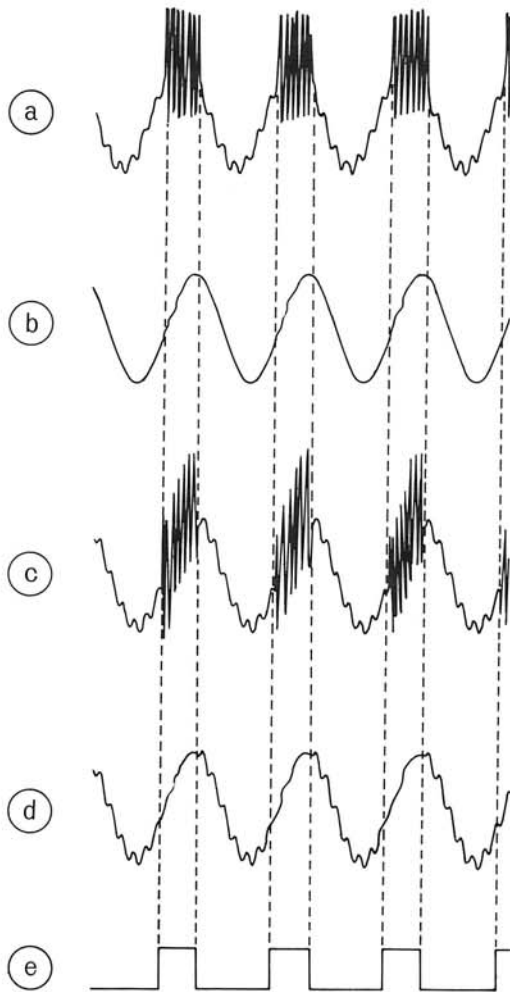


図-14 雑音除去動作タイミング

Fig. 14 Operation diagram for noise reduction.

⑤は、各部分の波形を示す。入力信号①は、低周波成分に若干の高域成分が重畳されており、これに断続的雑音を加わった場合を想定している。②点の可変 L. P. F. 出力は雑音が軽減されているが同時に高域成分が損なわれている。③点の可変位相器出力は、雑音レベルは入力レベルは入力と同じであるが信号の位相は②と一致している。出力④はマルチパスの雑音が生じないときは、スイッチにより③側を選択しマルチパスが生じたときは②側を選択する。このような処理により、高域成分はやや損なわれるが雑音がかなり除去される。

次に可変 L. P. F. のカットオフ周波数のコントロールについて述べる。可変 L. P. F. のコントロールとしては、入力信号周波数が f_{in} への単音であるとするればカットオフ周波数が f_{in} 程度となれば良い。実際の放送波は複数の周波数成分が含まれており、あるレベル以上の周波数成分を必要とみなし可変 L. P. F. のカットオフ周波数を決定する。図-15 にカットオフ周波数制御回路を含むブロック図を示す。

可変位相器は、全帯域の信号を減衰なく通過させ、位相可変に対して振幅一定であるのに対して可変 L. P. F. はカットオフ周波数変化に対し信号出力振幅が変化する。そこで可変 L. P. F. 出力と可変位相器出力がある誤差許容値 (I_s) を除いて振幅が一致するように可変 L. P. F. のカットオフ周波数を制御するフィードバックループを構成すれば良い。この誤差許容値 (I_s) は音楽や音声の性質、マルチパス雑音の性質、聴感特性等より総合的に決定すべき値である。図-16 に入力が f_{in} なる周波数の単音とした場合の動作チャートを示す。左に初期状態において入力周波数 (f_{in}) が L. P. F. のカットオフ周波数より低かった場合、右に初期状態において f_{in} がカットオフ周波数より高かった場合を示す。①～④は図-15に対応した各部のレベルである。ループフィルタは積分器であり、④の値が負であれば L. P. F. のカットオフ周波数を下げるよう方向に動作させ④が正であれば、カットオフ周波数を上げる方向に動作させる。マルチパスを検出すると、積分動作を停止させマルチパス発生前のカットオフ周波数を保持する。

次にマルチパス検出について少しふれておく、マルチパス検出は、マルチパス発生時に高域雑音が多く発生することを利用して、H. P. F. (High Pass Filter) 通過後のレベルを検出することによって行っている。L. P. F. のカットオフ周波数は

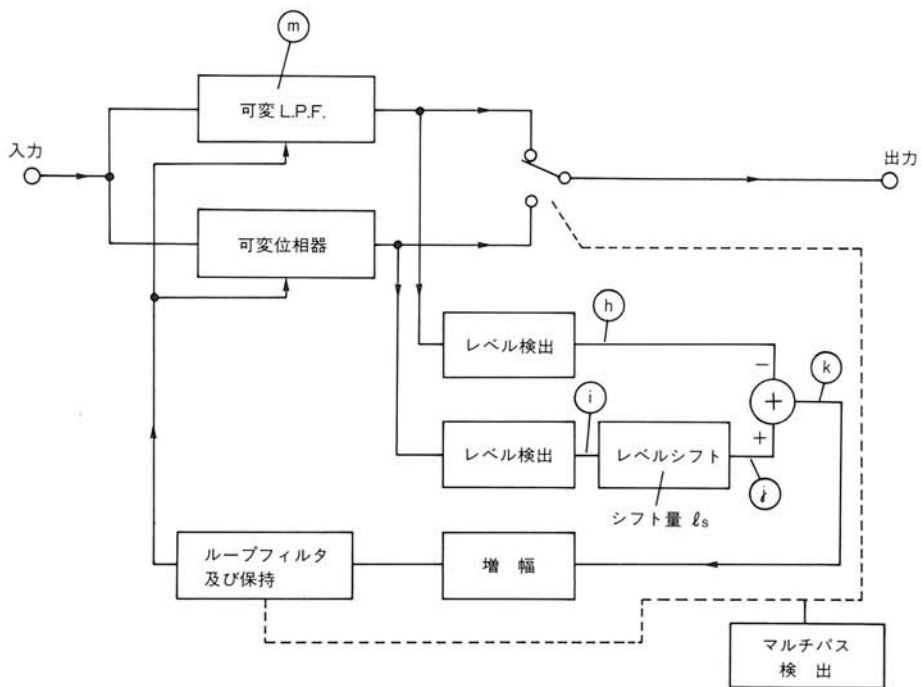


図-15 カットオフ周波数制御ブロック図

Fig. 15 Block diagram of cutoff control.

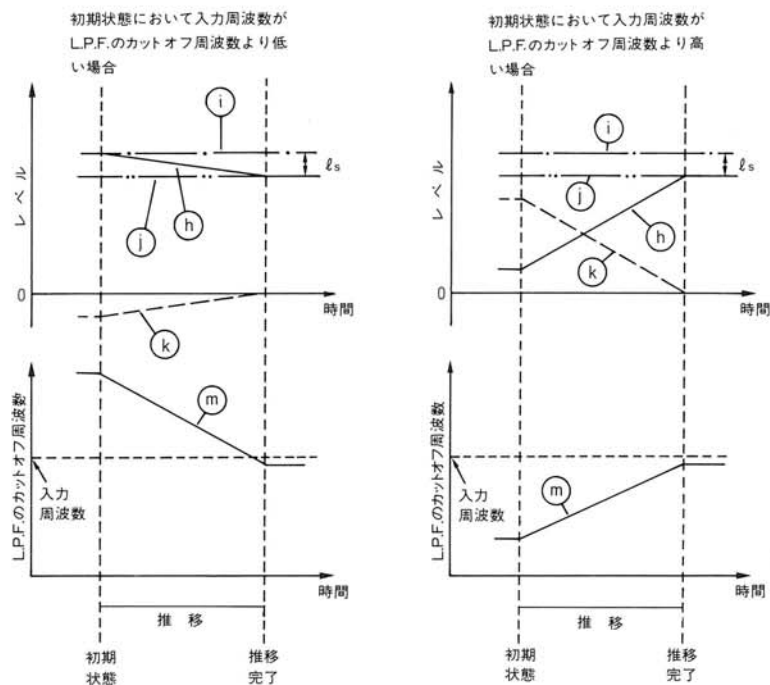


図-16 カットオフ周波数制御動作チャート

Fig. 16 Operation diagram for cutoff control.

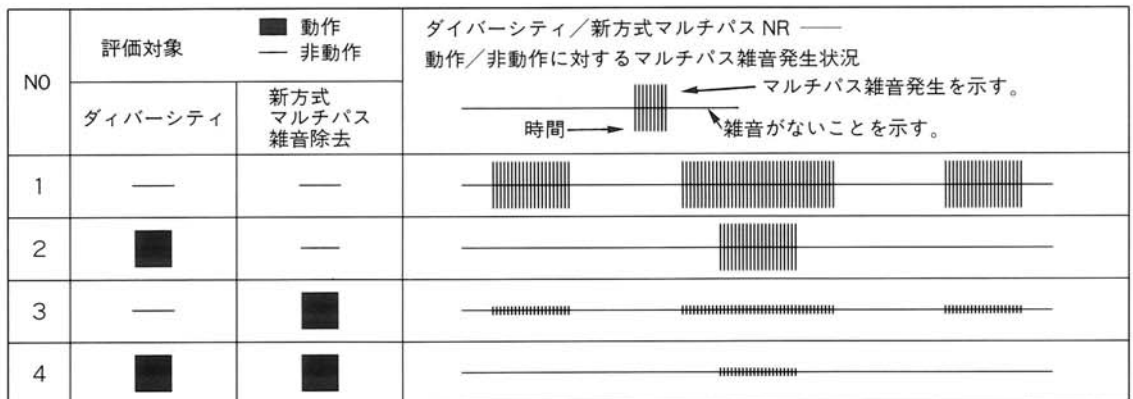


図-17 ダイバーシティと新マルチパス雑音除去方式のマルチパス雑音除去効果

Fig. 17 Multipath noise reduction effect of diversity receiver & new multipath noise reduction system.

通常のL+R、L-R信号によって動作しないようL-Rより高い周波数に選んでいる。

3.4 マルチパス雑音除去方式の具体化と効果

図-15に示した構成で本方式は実現できるが、コスト、大きさの面からディスクリート部品と汎用ICとの組み合わせでは実用性がなく、本方式用のカスタムICの開発も行った。本マルチパス雑音除去回路は、ダイバーシティと組み合わせるのが最も効果的で、両方式の組み合わせで実車走行すると、従来マルチパス雑音が耳ざわりであった場所においても注意深く聞かなければ雑音気にならない程度に改善される。図-17に本方式とダイバーシティ方式の効果を図式化して示す。ダイバーシティ方式ではマルチパス雑音発生頻度、時間は短くなるが発生時の雑音程度は変化しない。本方式では逆にマルチパス雑音頻度、時間は変化しないが、発生時の雑音の程度が改善される。両方式を組み合わせれば、程度、頻度共に改善される。

4. あとがき

以上述べたように効果的なマルチパス雑音除去

方式の開発及び回路のIC化を完了することができた。

しかし、この方式をもってしてもまだマルチパス雑音を除去する上で課題が残っており、今後、さらにマルチパス雑音の発生状況に適応した処理の検討が必要と考える。カーオーディオの音質に対するユーザーニーズは増々高度化しており、我々としては、これらの要求に応えるべく今後も技術開発にたゆまぬ努力をしたいと思う。

参考文献

- 1) 高橋 良、倉掛泰治：VHF-FM放送の多重伝搬経路による受信ひずみ、NHK技術研究、第12巻第6号（1960）
- 2) 大原光雄：「FM放送のマルチパスひずみの解析」、テレビジョン学会誌第32巻第3号（1978）
- 3) Willam R. Rambo: Switched Diversity for Mobile FM Broadcast Reception, SAE paper 840277（1984）