

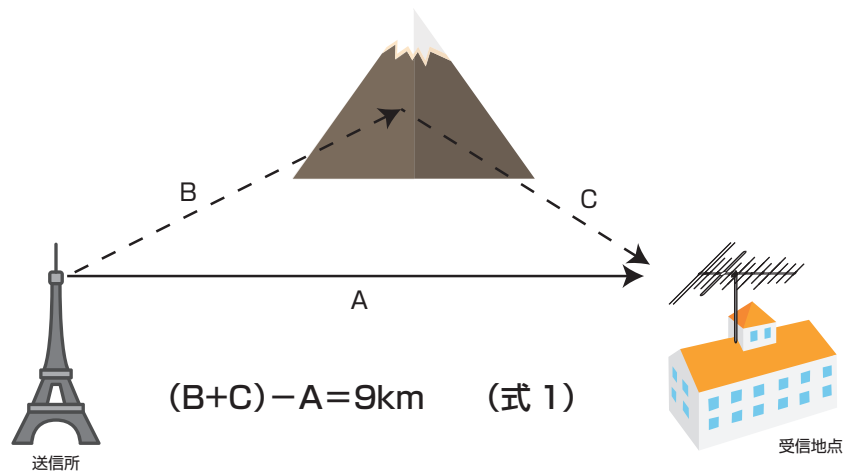
C-FT1000やC-FT500に使われている マルチパスキャンセルの仕組みと効果



①マルチパスのキャンセルと適応フィルターの動作

マルチパスキャンセラーの仕組みを理解するために、仮に送信所と受信地点、傍らに山が存在する環境を想定してみましょう。（右図参照）

このとき、受信地点に到達する電波をAの直接波のほか山に反射して届いたB+Cという反射波の2種類があると仮定します。このB+Cがマルチパス波となります。



■図1 山に反射して届いたマルチパスの例

ここでは分かりやすくするために、B+Cの距離の合計がAの距離より9km大きいと仮定します。（図1中の式1）

電波は光の速度（c）で伝播します。光の速度は毎秒30万メートルですから、上図の場合、B+Cの反射がAの直接波と比べてどのくらい遅延して到達するか、次式より求めることができます。

$$9\text{km} \div 300,000\text{m/sec} = 30\mu\text{sec} \quad (\text{式2})$$

反射波は反射によって減衰しながら届くので、直接波に比べて弱くなっているのが普通です。つまり直接波と比べて振幅が小さい電波になります。この直接波と反射波の振幅の比をdB（デシベル）の単位で表わした値をDU（Desirable to Undesirable）比と言います。

ここでは仮に反射波の振幅が直接波と比べて10分の1であったとします。このときのDU比は20dBとなります。（表1参照）

以上のような反射波（マルチパス波）が存在する場合、チューナー内部で30μsec遅延した信号を用意し、これを入力側に戻し、大きさを10分の1にして引き算すれば良いということが分かります。このような動作を適応フィルター（与えられた入力によってフィルターの係数が自動的に最適な値に調整されるフィルター）によって実現したものがIIR型のマルチパスキャンセラーです。

入力側に戻さず出力側で引き算する方法でも同様のことを実現できます。このタイプをFIR型のマルチパスキャンセラーと呼び、C-FT500やC-FT1000ではこちらのタイプを採用しています。

FIR型はIIR型と比べ、適応フィルターの設定数が多くなるという欠点がありますが、フィルターの動作が不安定になることが少なく、安定した動作をさせやすいという利点があります。

■表1 デシベルと振幅の比

デシベル値	振幅の比
0 dB	1.000 倍
1 dB	1.122 倍
2 dB	1.259 倍
3 dB	1.413 倍
4 dB	1.585 倍
5 dB	1.778 倍
6 dB	1.995 倍
7 dB	2.239 倍
8 dB	2.512 倍
9 dB	2.818 倍
10 dB	3.162 倍
11 dB	3.548 倍
12 dB	3.981 倍
13 dB	4.467 倍
14 dB	5.012 倍
15 dB	5.623 倍
16 dB	6.310 倍
17 dB	7.079 倍
18 dB	7.943 倍
19 dB	8.913 倍
20 dB	10.00 倍
30 dB	31.62 倍
40 dB	100.0 倍
50 dB	316.2 倍
60 dB	1,000 倍

②係数トレーニング

前項①で想定したマルチパス波は遅延30usec、DU比20dBという内容でしたが、このように適応フィルターの係数は反射波の遅延時間と大きさに合わせて調整する必要があります。マルチパスの状況に合わせて、適応フィルターの係数を自動で調整することを「係数トレーニング」と呼びます。

ちなみにC-FT500やC-FT1000では係数トレーニング中、DU比表示部の横に*（アスタリスク）が点滅します。トレーニング完了後は点滅から点灯表示に変わります。

個々の反射波の遅延時間はチューナー側で簡単に測定できるわけではありません。そのため、適応フィルターの係数を決める時は「FM電波の振幅はFM変調がかかっても一定」という原理

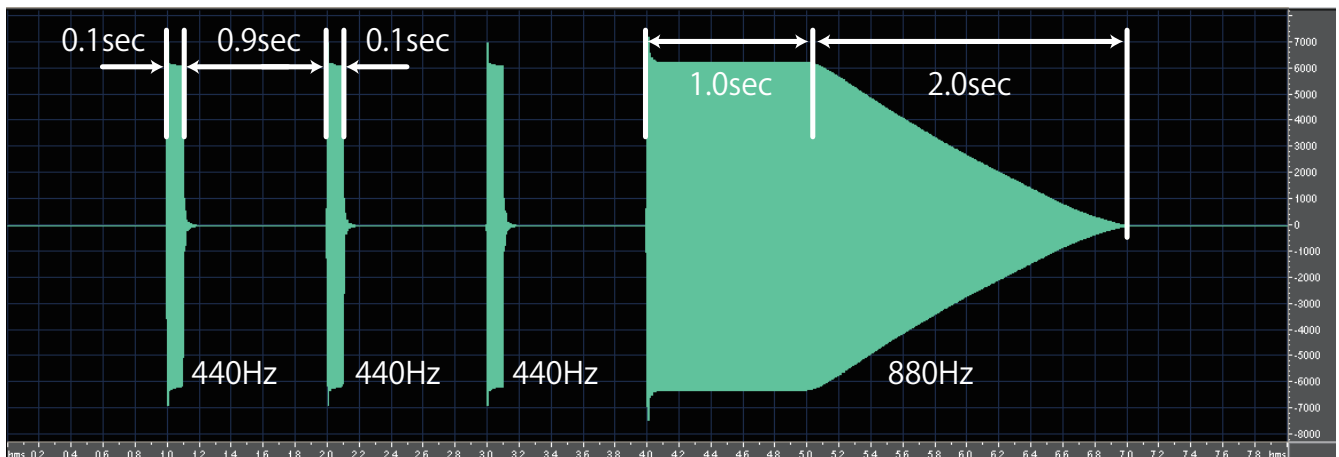
（CMA：Constant Modulus Algorithm）を利用します。本来は一定であるはずのFM電波の振幅は、少しでもマルチパスが存在すると、FM変調に従って変動するようになります。この変動が無くなるように適応フィルターの係数を試行しながら、最適な係数セットを見つける作業が係数トレーニングの動作です。

③マルチパスキャンセラーのひずみ低減効果の実際

マルチパスキャンセラーによって、どのくらいひずみを少なくすることができるのか、実際に調べてみます。

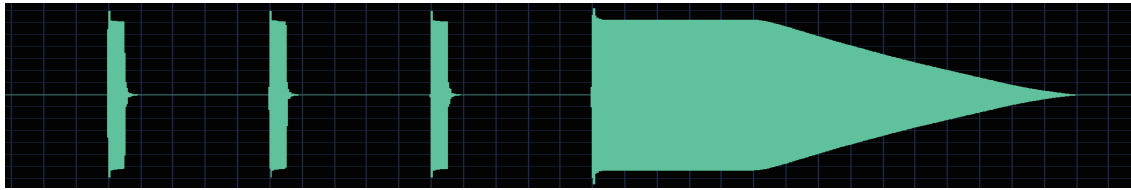
ひずみの大きさを計測するには、もともとひずみが十分に少ないとわかっている単一の周波数成分だけからなる「正弦波」を使用します。NHKで使用されている時報は、『440Hzの予鈴が0.1秒の長さで3回、その後、正時から880Hz（ラの音）が一定振幅で1秒流れた後、2秒をかけて減衰していく』というフォーマットです。ひずみ率の測定には好都合な信号です。

波形で示すと下図のような信号になります。

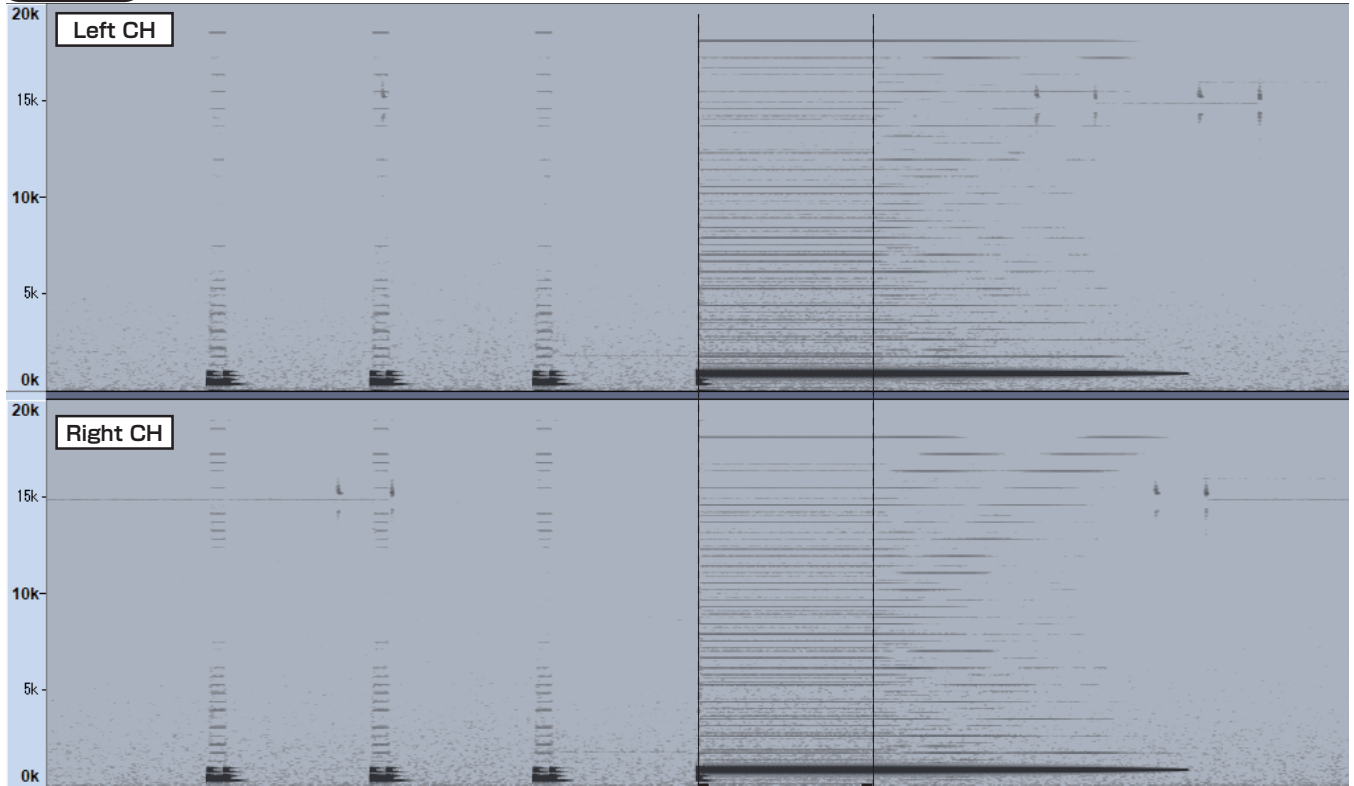


音声信号を分析する方法として、「スペクトログラム」という手法があります。横軸に時間をとり、縦軸に、その瞬間におけるスペクトラム＝周波数成分の分布を、その強さを色の濃淡等で表現したもので、犯罪捜査で犯人の声の「声紋分析」として使われるものです。時報の音をスペクトログラムで分析すれば、時報には本来440Hzと880Hzの信号しか含まれておらず、それ以外の周波数成分は含まれていないはずで

実際には、マルチパスによって生じたひずみ成分が発生するので、スペクトログラムには多くの「線」が現れます。



MPC OFF



▼ひずみ率 THD+N=0.18%

MPC ON



▼ひずみ率 THD+N=0.082%

■ 図3 時報のスペクトログラムの比較(上:MPC OFF 下:MPC ON)

NHKの時報を実際にチューナーで受信した様子の特クトログラムを図3に示します。

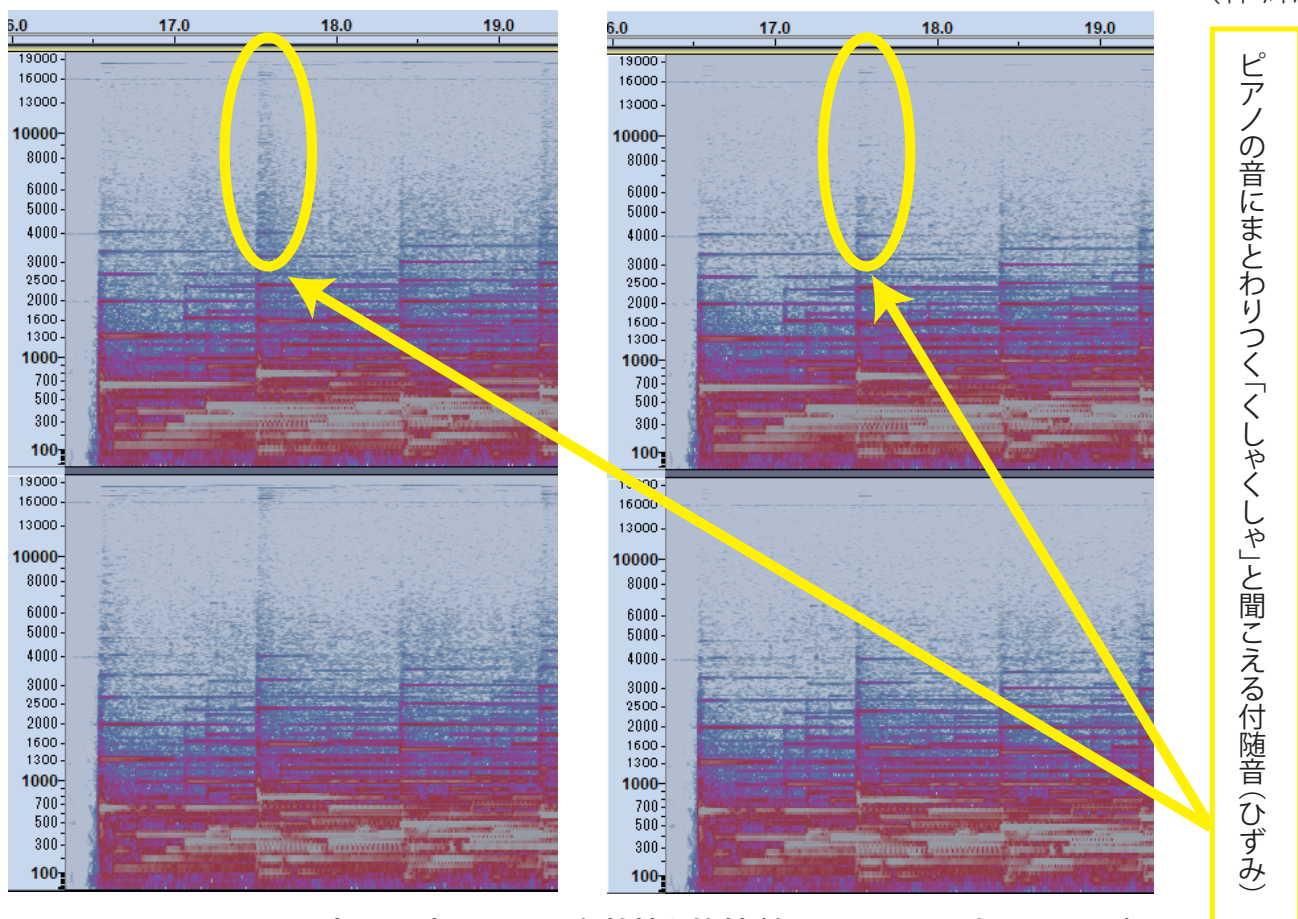
上側は時報の正時の880Hzシングルトーンで見た場合のひずみ率（THD+N：Total Harmonic Distortion+Noise）が0.18%ほど発生している際の特クトログラムです。（空中波を受信している状況としては、かなり良好な環境です。DU比で20dB前後）マルチパスによって発生したひずみが、無数の「引っ掻いたような横線」で記録されています。これらのひずみは、もともとの基本波と整数倍の関係（調波関係といいます）にない周波数で発生するものが大多数であり、耳で聴くと、大変耳障りな、変な音色を伴った「付随音」として聴こえます。

マルチパスキャンセラーによって受信状態、ひずみの低減を行った場合の時報音の特クトログラムが図3下側になります。ひずみ成分がきれいに消去できていることがわかります。この時の880Hzの正時のシングルトーンのひずみ率は0.082%程度まで改善できています。

マルチパスによって発生するひずみは、高調波成分が比較的整然と並んだ波形をもつ楽音で耳につきます。ピアノの音などはマルチパスのひずみを感じやすい音と言えます。図4に示すのは、ピアノ演奏の音を、スペクトログラムで解析し、MPCのOFF/ONで比較したものです。

楽器の音は、刻々とその成分の大きさが変化し、ひずみ成分は、時報の時のように、一定の横線で示されるのではなく、つぶつぶの点として記録される傾向があります。スペクトログラム上では、ざらざらとした「汚れ」のように表示されています。MPCをONにすることで、このようなざらざらとした汚れが軽減することがわかります。このようなひずみ音は、人によっていろいろな表現をされますが、「くしゃくしゃ」した付随音として不快に感じる、と表現される方が多いです。

(林 輝彦)



■図4 ピアノの音でMPCの有効性を比較(左:MPC OFF 右:MPC ON)
NHK FM「クラシックカフェ」テーマ曲:ビゼーの無言歌「ラインの歌」より第1曲「暁」最初の3小節