

帯域分割形遅延等化器の等化特性の検討

金 野 靖 英*・小 川 吉 彦**

Considerations on the Equalization-characteristics of a Split-Band Delay Equalizer

Yasuhide KONNO and Yoshihiko OGAWA

要 旨

帯域分割形遅延等化器は、低域に大きな位相ひずみを有するような場合の遅延等化器として有効である。本稿では、この等化器の一般化にあたって、その振幅特性と位相特性について検討を加えた。さらに分割用フィルタの最適交差比を求めたので報告する。

Abstract

The split-band delay equalizer is available when the line has a considerable phase distortion on the low frequency band. In this paper, to generalize the equalizer its gain characteristics and its phase characteristics are investigated. And the cross-over frequency ratios of filters which split the band several sections are calculated.

1. ま え が き

中波ラジオ放送中継用の搬放線（NTT回線・F規格）は低域で大きな群遅延時間ひずみを有する。⁽¹⁾ このため搬放線を経由した音は低域で、こもったような感じがし明瞭度が不足する。この補償のために筆者らは補償特性を階段近似した帯域分割形遅延等化器を提案し、この等化器が、この種の低域でのひずみの補償に有効であることを報告した。⁽²⁾ 階段数を増せばよい結果が得られる。しかしながら等化器構成上、階段数の増加は好ましいことではない。分割用フィルタの次数を増し、フィルタの交差比を調整することによって、階段数の少ない遅延等化器を構成することが可能である。⁽³⁾⁽⁴⁾

本稿では、この遅延等化器の他への応用も考慮して、等化器の構成単位である基本遅延区間の振幅特性、位相特性について検討している。振幅特

性を平坦化するには、周波数分割用フィルタの交差比を調整する必要があるが、この最適交差比を求めている。

2. 帯域分割形遅延等化器

図1に帯域分割形遅延等化器を示す。これは信号の帯域を分割し、一定遅延させた後、波形を加算する並列型である。図2のような、信号を一定遅延させた後で帯域分割して波形を加算する直列型も構成できる。これはフィルタを理想化すると遅延特性が階段状に変化している等化器と考える

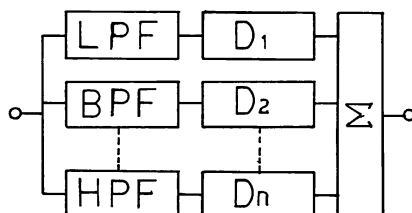


図1 帯域分割形遅延等化器（並列型）

* 電気工学科 助教授
** 北海道大学工学部 教授

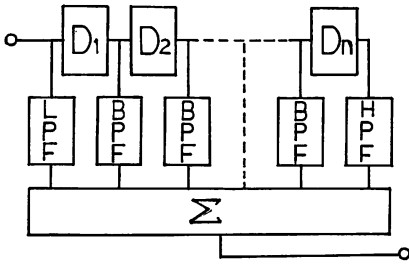


図2 帯域分割型遅延器(直列型)

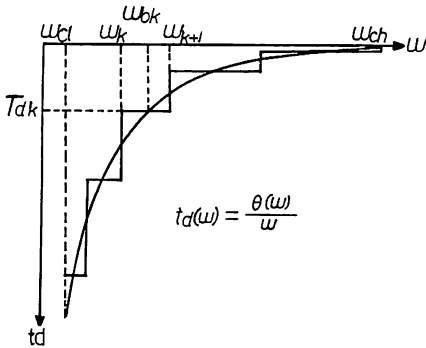


図3 遅延逆特性の階段近似

ことができるので、等化したい遅延逆特性を階段特性で近似すればよい。図2にそれを示す。遅延逆特性 $t_d(\omega)$ は逆位相特性 $\theta(\omega)$ を角周波数 ω で除したものであり、 ω 軸は対数化された値とする。 ω_{cl} は低域しゃ断周波数、 ω_{ch} は高域しゃ断周波数、 $\omega_k, \omega_{ok}, \omega_{k+1}$ は階段周波数とする。 T_{dk} は階段遅延時間とする。階段近似にあたっては遅延逆特性と階段特性とに囲まれる面積が最小になるように $\omega_k, \omega_{ok}, \omega_{k+1}$ 等の階段周波数を決定する。逆特性を最小2乗法(m次)によって近似した関数を $t_d(\omega) = \sum a_i \omega^i$ としてn段の階段近似とすれば

$$E = \sum_{k=1}^n \int_{\omega_k}^{\omega_{k+1}} |T(\omega)| d\omega \quad (\because T(\omega) = t_d(\omega) - T_{dk})$$

を最小とすればよい。これはニュートン法によってm次連立方程式を解くことで階段周波数を求めることができる。⁽²⁾

3. 基本遅延区間

階段近似のためにフィルタを理想化して考えたが、実際にはしゃ断特性があり、それはフィルタの種類や次数によって異なる。このため信号が帯域分割後に加算される時に、フィルタの交差周波数附近で利得が平坦な特性とならず、位相特性も

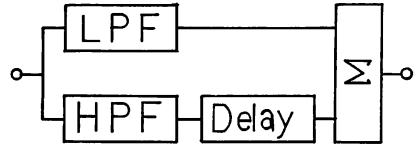


図4 基本遅延区間

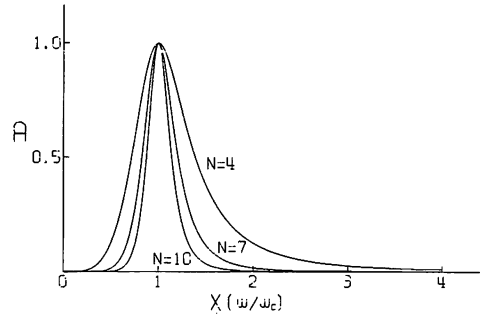


図5 Aの特性

非直線的に変化する。これを解析するために、図4のような遅延回路、低域通過フィルタ、高域通過フィルタよりなる基本遅延区間について考えるものとする。

フィルタとして直線位相を考慮してバタワース・フィルタを用いるものとする。 x を規格化周波数とすると $x=1$ がしゃ断周波数である。遅延回路の遅延時間を τ 、しゃ断周波数を f_c 、規格化遅延時間を T とすると、 $T = 2\pi f_c \tau$ の関係がある。フィルタの次数を n とすると、この区間の利得、 $|F(x)|$ は次のようになる。

1) n が奇数の場合

$$|F(x)|^2 = 1 + (-1)^{(n-1)/2} \cdot A \cdot \sin xT \quad (1)$$

2) n が偶数の場合

$$|F(x)|^2 = 1 - (-1)^{n/2} \cdot A \cdot \cos xT \quad (2)$$

$$\therefore A = \frac{2x^n}{1+x^{2n}} \quad (3)$$

(1), (2)の第2項は正弦的な変化をし、フィルタの奇数次、偶数次によってそれぞれ $\sin$ 関数、 $\cos$ 関数となる。振幅項 A は図5のように、 $x=1$ の近傍以外では0に近くなり、次数を増すとこの傾向は強くなる。第2項の影響を小にするには、 $x=1$ の附近で $\cos xT$, $\sin xT$ が0となるような

Tであること、又フィルタの次数を増すことである。したがって第2項の影響を小にするためのTの値は限られた範囲にあるので、 τ の選定に制限が生じている。

又この区間の位相 $\theta(x)$ は次のようになる。

1) n が奇数の時

$$\theta(x) = \tan^{-1} \frac{|F_l(x)| \sin(\theta_l(x) - xT) + (-1)^{(n-1)/2} \cdot |F_h(x)| \cos \theta_l(x)}{|F_l(x)| \cos(\theta_l(x) - xT) - (-1)^{(n-1)/2} \cdot |F_h(x)| \sin \theta_l(x)} \quad (4)$$

2) n が偶数の時

$$\theta(x) = \tan^{-1} \frac{|F_l(x)| \sin(\theta_l(x) - xT) + (-1)^{n/2} \cdot |F_h(x)| \sin \theta_l(x)}{|F_l(x)| \cos(\theta_l(x) - xT) + (-1)^{n/2} \cdot |F_h(x)| \cos \theta_l(x)} \quad (5)$$

ここで低域通過フィルタ、高域通過フィルタは、

$$F_l(x) = |F_l(x)| e^{j\theta_l(x)}, \quad F_h(x) = |F_h(x)| e^{j\theta_h(x)}$$

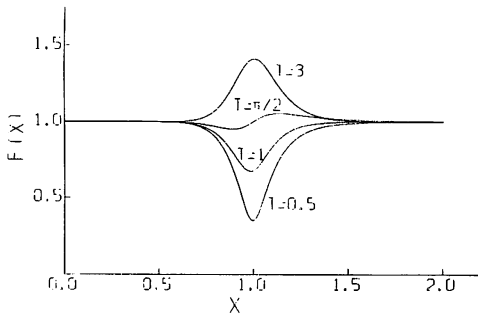
としている。

式(2), (5)よりバタワース10次フィルタを用いた時の基本遅延区間の振幅特性と位相特性を図6に示す。Tの値によって、振幅特性が交差周波数附

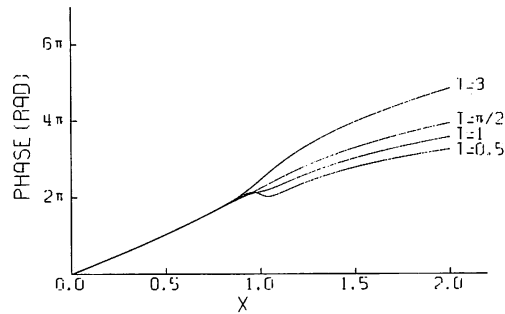
近で変動し、Tの増加によってピーク、ボトムを生じている。T = $\pi/2$ で平坦な特性となることが確認できる。位相特性も、位相0より徐々に遅れて、遅延時間Tが一定となる直線に漸近する。xが0より1まではフィルタの直線位相変化によるが、1を越えるとTの大きさによって漸近のしかたが異なる。振幅特性が大きくボトムを生じる場合は、位相も負の特性となり、遅延等化には不適当である。

4. 交差周波数調整による振幅特性の平坦化

基本遅延区間において、フィルタは $x = 1$ で交差している。この附近で利得の変動が小さいのは限られたTの範囲である。フィルタの交差を粗又は密にすることにより、Tの範囲を拡大できる。つまり交差周波数を3 dB しゃ断周波数よりずらすことにより、利得の変動をおさえることができる。これを図7に示す。10次バタワース・フィルタを用い、T = 3の時に交差比を変えた特性である。交差比は3 dB 周波数を1として、高域通過

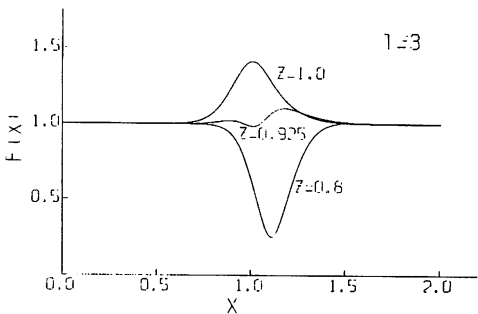


(a) 振幅特性

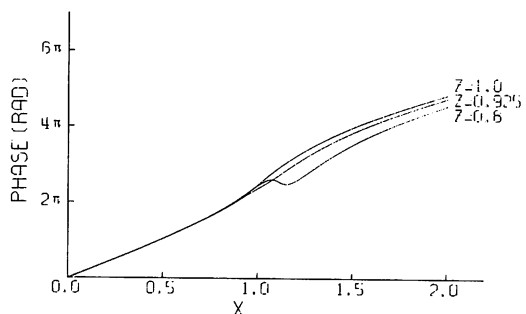


(b) 位相特性

図6 基本遅延区間の特性



(a) 振幅特性



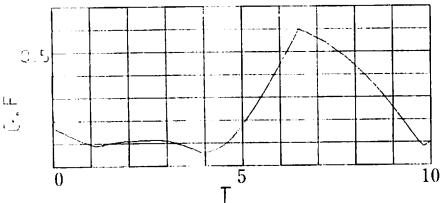
(b) 位相特性

図7 交差比を変えた特性

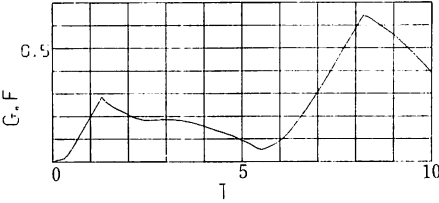
表1 基本遅延区間のフィルタ最適交差比

T	10次バタワース・フィルタ		11次バタワース・フィルタ	
	交 差 比	利得変動	交 差 比	利得変動
0.1	1.102	0.162	0.988	0.006
0.2	1.094	0.153	0.973	0.010
0.3	1.086	0.147	0.952	0.015
0.4	1.079	0.137	0.939	0.032
0.5	1.071	0.130	0.931	0.056
0.6	1.064	0.121	0.924	0.082
0.7	1.057	0.113	0.916	0.111
0.8	1.050	0.107	0.910	0.140
0.9	1.043	0.101	0.904	0.170
1.0	1.036	0.095	0.897	0.198
1.1	1.029	0.090	0.891	0.227
1.2	1.022	0.091	0.889	0.255
1.3	1.016	0.094	0.882	0.285
1.4	1.010	0.098	1.114	0.265
1.5	1.004	0.101	1.107	0.253
1.6	0.999	0.104	1.099	0.242
1.7	0.993	0.107	1.092	0.232
1.8	0.988	0.108	1.084	0.225
1.9	0.983	0.110	1.077	0.216
2.0	0.977	0.111	1.070	0.207
2.1	0.972	0.111	1.063	0.198
2.2	0.967	0.112	1.056	0.191
2.3	0.961	0.113	1.050	0.188
2.4	0.956	0.113	1.043	0.183
2.5	0.951	0.114	1.036	0.183
2.6	0.946	0.114	1.030	0.184
2.7	0.941	0.114	1.024	0.185
2.8	0.937	0.114	1.019	0.186
2.9	0.932	0.112	1.014	0.186
3.0	0.928	0.109	1.008	0.187

T	10次バタワース・フィルタ		11次バタワース・フィルタ	
	交 差 比	利得変動	交 差 比	利得変動
3.1	0.924	0.106	1.003	0.186
3.2	0.920	0.102	0.996	0.185
3.3	0.916	0.096	0.991	0.183
3.4	0.913	0.091	0.987	0.181
3.5	0.909	0.085	0.982	0.178
3.6	0.906	0.079	0.977	0.175
3.7	0.903	0.073	0.973	0.171
3.8	0.900	0.065	0.967	0.167
3.9	0.897	0.057	0.963	0.162
4.0	0.895	0.058	0.959	0.156
4.1	0.893	0.062	0.955	0.150
4.2	0.892	0.068	0.951	0.145
4.3	0.890	0.074	0.946	0.139
4.4	0.889	0.081	0.942	0.134
4.5	0.889	0.091	0.938	0.129
4.6	0.888	0.103	0.934	0.122
4.7	0.888	0.120	0.930	0.116
4.8	0.887	0.139	0.926	0.110
4.9	0.886	0.159	0.922	0.102
5.0	0.886	0.180	0.918	0.094
5.1	0.883	0.203	0.915	0.086
5.2	0.881	0.226	0.912	0.078
5.3	0.880	0.250	0.909	0.068
5.4	0.877	0.276	0.906	0.059
5.5	0.873	0.303	0.904	0.053
5.6	0.869	0.331	0.902	0.059
5.7	0.864	0.359	0.899	0.065
5.8	0.858	0.388	0.897	0.073
5.9	0.851	0.417	0.896	0.081
6.0	0.843	0.446	0.894	0.093



(a) 10 バタワース・フィルタ



(b) 11 次バタワース・フィルタ

図8 最適交差時の変動特性

フィルタに対する低域通過フィルタのしゃ断周波数の比である。1より大きいと交差が密であることをあらわしている。図7より交差比を0.925にした場合に振幅特性を平坦に調整できることが確認される。位相特性は交差比を変えることにより若干変化するが、ほとんど交差比1の場合と同様であり、振幅特性にボトムを生じる時は負特性を示す傾向にある。

それぞれのTについて変動の少ない最適の交差比とその変動を計算により求めることができる。10次、11次のバタワース・フィルタを用いた場合のTに対する最適交差時の変動特性を図8に示す。T=6位までは変動が0.2以下におさえられる。特に10次フィルタでは、0.1以下の部分が多い。0~0.2(0~2 dB)位の変動はフィルタの許容変動の範囲内であるので、このような高次フィルタと交差比を調整する方法は、振幅平坦化に有効である。

遅延等化にあたって、急峻な位相変化でもT=5位までの位相変化に対応できれば充分であるのでTについては問題はない。

表1にTに対する最適交差比を示す。この表より、Tに対する最適な交差比を選定することができる。

5. む す び

帯域分割形遅延等化器の一般化にあたって、基本遅延区間の振幅特性と位相特性について検討した。交差周波数附近で利得が変動するが、帯域分

割フィルタの次数を増し、その交差比を調整することにより、平坦な振幅特性と任意の位相特性が得られる。フィルタとして、10次、11次バタワース・フィルタを用いた場合のTと最適交差比の表を求め、設計の一助とした。

参 考 文 献

- (1) 金野・小川：階段近似法による音放線の遅延等化, 昭和58年電気4学会北海道支部連合大会講演論文集, 184 (1983)
- (2) 金野・小川：中波ラジオ放送用中継線の遅延等化, 北海道大学工学部研究報告, 第117号(1984, 1)
- (3) 金野・小川・柏倉：中波ラジオ中継線用の帯域分割形遅延等化器, テレビジョン学会全国大会講演予稿集, 9-11 (1984)
- (4) 金野・小川：搬放線用帯域分割形等化器, 北海道大学工学部研究報告, 第122号 (1984, 7)
- (5) 金野・小川：帯域分割形遅延等化器の振幅特性平坦化について, 昭和59年度電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集 (1984)
(昭和60年11月30日受理)

