

Tadeusz MAINKA, Elżbieta SZAR

Lesław TOPÓR-KAMIŃSKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

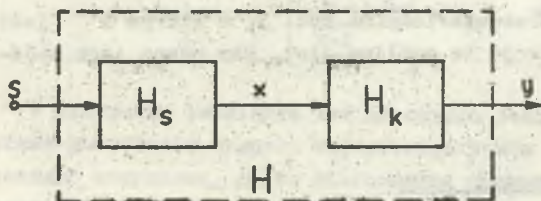
CYFROWY ADAPTACYJNY FILTR EGHA

Streszczenie: Pokazano zasadę działania cyfrowego filtra realizującego eliminację echa z sygnału pomiarowego ze szczególnym zastosowaniem w układach rejestracji i przetwarzania danych. Zrealizowano program w języku maszyny cyfrowej filtra o parametrach adaptowanych w zależności od własności echa poszukiwanych w oparciu o analizę cepstrum zespolonego badanego sygnału.

1. Wstęp

W układach przetwarzania i przesyłania sygnałów ciągłych i dyskretnych pojawiają się często zjawiska zwane echem, objawiające się nakładaniem na sygnał właściwy jego obrazu opóźnionego w czasie i o zmniejszonej amplitudzie. Powstają one z różnych przyczyn fizycznych typu odbić w liniach lub różnych dróg propagacji i mogą się nakładać wielokrotnie na sygnał właściwy, utrudniając istotnie czytelność przesyłanej przez niego informacji. Zakłócenia te zalicza się do grupy zniekształceń liniowych sygnału i można je teoretycznie eliminować poprzez zastosowanie odpowiednich korektorów. Zakłada się, że transmisja sygnałów dyskretnych bez zniekształceń wprowadza co najwyżej opóźnienie i zmianę amplitudy sygnału badanego, zatem transmitancja idealnego toru przesyłowego powinna wynosić:

$$H(z) = Cz^{-m} \quad (1)$$



Rys. 1

Jeżeli rzeczywisty tor wprowadza do sygnału zniekształcenia liniowe należy jego transmitancję $H_s(z)$ skorygować do postaci (1) korektorem $H_k(z)$ włączonymi tak jak na rys. 1.

Transmitancja korektora wyraża się zatem wzorem:

$$H_k(z) = \frac{H(z)}{H_s(z)} = \frac{Cz^{-m}}{H_s(z)} \quad (2)$$

2. Eliminacja echa o znanych parametrach

Nakładanie się echa na sygnał badany w torze przesyłowym można zamodelować w układzie bloków równoległych przedstawionym na rys. 2.

W układzie tym, gdzie:

s - jest sygnałem przesyłanym,

x - sygnałem z echem

$$H_e(z) = Bz^{-1}H(z) \quad (3)$$

jest transmitancją toru echa. Transmitancja całego układu z echem wynosi:

$$H_s(z) = H(z)(1 + Bz^{-1}), \quad (4)$$

gdzie B jest amplitudą echa, a 1 jego opóźnieniem, przy czym dla przetwarzania sygnału zarejestrowanego można przyjąć $H(z) = 1$.

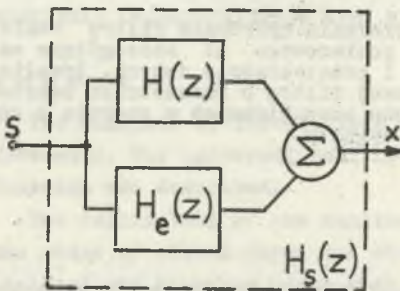
Zgodnie z rys. 1 oraz relacją (2) korektor układu z rys. 2, eliminujący pojedyncze echo, powinien mieć transmitancję

$$H_k(z) = \frac{1}{1 + Bz^{-1}} \quad (5)$$

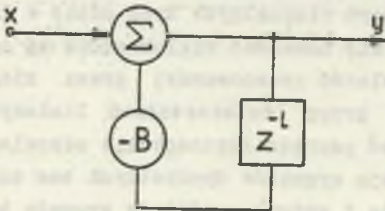
Odpowiada jej schemat blokowy przedstawiony na rys. 3, w którym z^{-1} jest blokiem opóźniającym o 1. Korekcja ta możliwa jest, gdy znane jest opóźnienie oraz amplituda echa.

3. Poszukiwanie nieznanymi parametrów echa

Echa wytwarzane w rzeczywistych układach transmisyjnych mają na ogół nieznanne parametry, gdyż przyczyny ich powstawania są trudne do analitycz-



Rys. 2

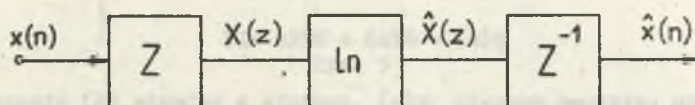


Rys. 3

nego określenia. Mając zatem do dyspozycji tylko sygnał z echem x , należy na jego podstawie określić opóźnienie l oraz amplitudę B . Najlepszą metodą do osiągnięcia tego celu wydaje się być badanie tak zwanego cepstrum zespolonego $\hat{x}(n)$ określonego relacją:

$$\hat{x}(n) = Z^{-1} \left\{ \ln \left\{ Z \left[x(n) \right] \right\} \right\} \quad (6)$$

Odpowiada jej schemat blokowy przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4

Można założyć, że w praktyce będą badane jedynie sygnały, których transformaty Z można przedstawić w postaci:

$$X(Z) = |A| \prod_{k=1}^i (1 - a_k Z^{-1}) \prod_{k=1}^j (1 - b_k Z), \quad (7)$$

gdzie $|a_k|$ oraz $|b_k|$ są mniejsze od jedności, a czynniki $(1 - a_k Z^{-1})$ odpowiadają miejscom zerowym wewnątrz okręgu jednostkowego, natomiast czynniki $(1 - b_k Z)$ miejscem zerowym na zewnątrz okręgu jednostkowego. Dla tak określonego sygnału wejściowego cepstrum zespolone wyraża się wzorem:

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} - \sum_{k=1}^i \frac{a_k^n}{n} & \text{dla } n > 0 \\ \ln |A| & \text{dla } n = 0 \\ \sum_{k=1}^j \frac{|b_k^{-n}|}{n} & \text{dla } n < 0 \end{cases} \quad (8)$$

W przypadku istnienia zer na okręgu jednostkowym można je usunąć poprzez pomnożenie sygnału wejściowego przez ciąg wykładniczy lub, co dalej zostało uczynione, przez nieformalne przypisanie ich do wnętrza okręgu jednostkowego.

Na podstawie relacji (4) sygnał z echem ma postać:

$$x(n) = S(n) = Bs(n - 1) \quad (9)$$

Inaczej można go także przedstawić jako splot dwóch sygnałów:

$$x(n) = s(n) * p(n), \quad (10)$$

gdzie:

$$p(n) = \delta(n) + B\delta(n-1) \quad (11)$$

Po obliczeniu cepstrum sygnału $x(n)$ zgodnie z relacją (6) otrzymuje się:

$$\hat{x}(n) = \hat{S}(n) + \hat{p}(n), \quad (12)$$

które jest sumą cepstrum przesyłanego sygnału $s(n)$ oraz cepstrum splecionego z nim sygnału $P(n)$. Przy czym:

$$p(n) = Z^{-1} \left\{ \ln [P(Z)] \right\} \quad (13)$$

Wyrażenie $\ln [P(Z)]$ można przedstawić w postaci szeregu:

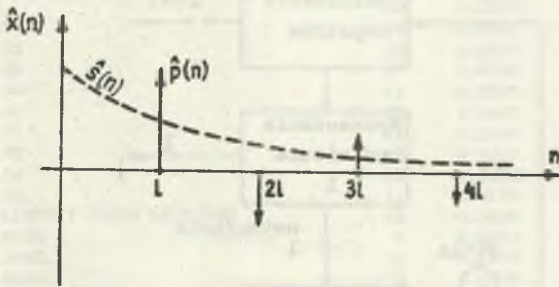
$$\ln(1 + BZ^{-1}) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{B^k}{k} z^{-1k} \quad (14)$$

Zatem cepstrum sygnału $p(n)$ wynosi:

$$\hat{p}(n) = \begin{cases} (-1)^{k-1} \frac{B^k}{k} & \text{dla } n = k1 \\ 0 & \text{dla } n \neq k1 \end{cases} \quad (15)$$

Jest ono ciągiem impulsów o malejących amplitudach i zmiennym znaku, oddległych od siebie o 1 jednostek czasowych.

Pierwszy z tych impulsów ma amplitudę równą B i położenie dla $n = 1$ (rys. 5).



Rys. 5

Zakładając monotoniczność przebiegu cepstrum $\hat{s}(n)$ dla $n \leq l+1$ można określić opóźnienie echa l , poszukując położenia pierwszego maximum w ciągu $\hat{x}(n)$. Określenie ekstremum $\hat{x}(n)$ jest jednoznaczne, gdyż jakkolwiek cepstrum nazwane jest zespolonym, to jednak ze względu na sprzężone wartości zer i relację (8) posiada ono zawsze jedynie wartości rzeczywiste. Znając opóźnienie echa można określić jego amplitudę z odpowiednią dokładnością, zakładając kolejne wartości B w korektorze z rys. 3 jako potęgę 2^{-1} , a otrzymany sygnał $y(n)$ porównując z sygnałem wejściowym $x(n)$.

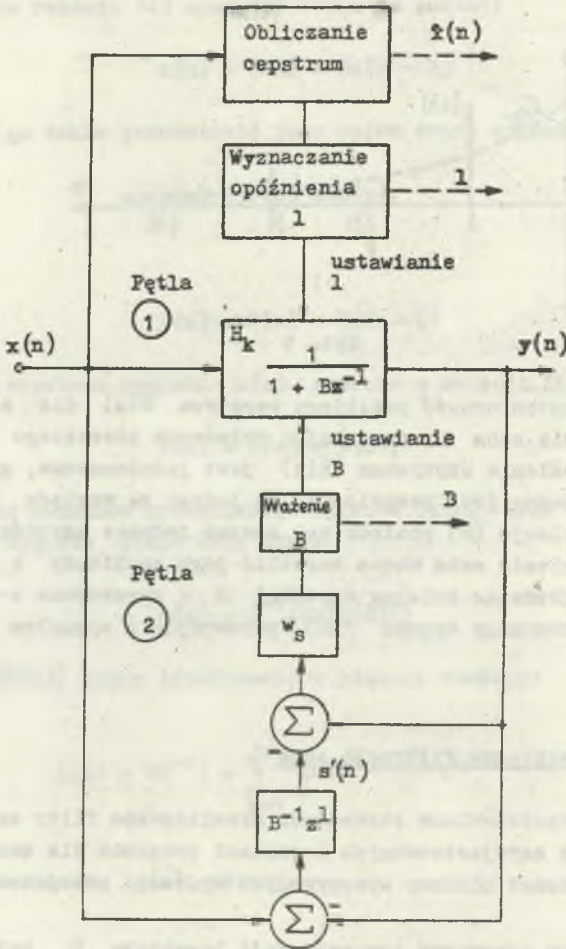
4. Realizacja praktyczna filtracji echa

W oparciu o przedstawione rozważania zrealizowano filtr echa dla sygnałów dyskretnych zarejestrowanych w postaci programu dla maszyny cyfrowej MERA-60. Schemat blokowy wykonywanych operacji przedstawiony jest na rys. 6.

W programie tym parametry transmitancji korektora H_k ustawiane są w zależności od wartości B i l echa w badanym sygnale $x(n)$. W pierwszej kolejności wykonywany jest program w pętli 1 i ustalana jest wartość opóźnienia l . Następnie zakłada się wartość amplitudy B' równą $0,5$, obliczając $y'(n)$ i wykonuje program w pętli 2. Polega on na kolejnym poszukiwaniu przybliżenia echa $e'(n)$, następnie przybliżenia sygnału badanego $s'(n)$ i obliczaniu wartości średniej w_B różnicy $y'(n) - s'(n)$, przy czym:

$$w_B = \frac{1}{N} \sum_n [y'(n) - s'(n)] \quad (9)$$

a następnie badaniu jej znaku.



Rys. 6

Jeżeli $w_s > 0$, to następną potęgą 0,5 dodawana jest do poprzednio ustalonej wartości B , a jeżeli $w_s < 0$, to odejmowana. "Ważenie" wartości B przerywane jest po z góry ustalonej ilości kroków (potęg 0,5) lub po osiągnięciu przez $|w_s|$ odpowiednio małej wartości (np. 10^{-4}). Ostateczna wartość sygnału wyjściowego $y(n)$ jest odpowiednio dokładnym przybliżeniem szukanego sygnału $s(n)$ bez echa. W celu ilustracji działania przedstawionego programu przeprowadzono obliczenia na trzech przykładach sygnałów dyskretnych. Są to pary sygnałów pierwotnego $s(n)$ i utworzonego z niego sygnału z echem $x(n)$. Dla sygnałów pierwotnych obliczono ich cepstrum w celu porównania ich z cepstrum sygnałów z echem. Sygnał $s_1(n) =$

SYGNAŁ PIERWOTNY $S(N)=1,1 \text{ EXP } N$		KOLEJNE ELEMENTY CIĄGU CEPSTRUM	
1	1.	20	0.2000
2	1.1	19	0.0000
3	1.25	18	0.0000
4	1.33	17	0.0000
5	1.46	16	-0.2500
6	1.61	15	0.0000
7	1.77	14	0.0000
8	1.95	13	0.0000
9	2.14	12	0.3333
10	2.36	11	0.0000
KOLEJNE ELEMENTY CIĄGU CEPSTRUM		10	0.0000
18	0.0000	9	0.0000
17	0.0000	8	-0.5002
16	0.0000	7	0.0000
15	0.0000	6	0.0000
14	0.0000	5	0.0000
13	0.0000	4	1.0000
12	0.0000	3	0.0000
11	0.0000	2	0.0000
10	0.0000	1	0.0000
9	0.0000	0	0.0000
8	0.0000	-1	-0.9067
7	0.0000	-2	-0.4151
6	0.0000	-3	-0.2492
5	0.0000	-4	-0.1711
4	0.0000	-5	-0.1226
3	0.0000	-6	-0.0952
2	0.0000	-7	-0.0737
1	0.0000	-8	-0.0583
0	0.0000	-9	-0.0471
-1	-0.9067	-10	0.3466
-2	-0.4151	-11	-0.0309
-3	-0.2492	-12	-0.0272
-4	-0.1711	-13	-0.0218
-5	-0.1226	-14	-0.0189
-6	-0.0952	-15	-0.0153
-7	-0.0737	-16	-0.0140
-8	-0.0583	-17	-0.0117
-9	-0.0471	-18	-0.0099
-10	0.3466	-19	-0.0086
-11	-0.0309	OPÓZNIENIE ECHA $L=4$	
-12	-0.0272	AMPLITUDA ECHA $B=0.99975586$	
-13	-0.0218	SZUKANY SYGNAŁ $S(N)$	
-14	-0.0189	1	1.0000
-15	-0.0153	2	1.1000
-16	-0.0140	3	1.2100
-17	-0.0117	4	1.3300
		5	1.4602
		6	1.6102
		7	1.7702
		8	1.9503
		9	2.1401
		10	2.3601
		11	0.0001
		12	0.0001
		13	0.0004
		14	0.0004
SYGNAŁ $X(N)=1,1 \text{ EXP } N + \text{ECHO}$			
1	1.		
2	1.1		
3	1.21		
4	1.33		
5	2.46		
6	2.71		
7	2.98		
8	3.28		
9	3.6		
10	3.97		
11	1.77		
12	1.95		
13	2.14		
14	2.36		

SYGNAL PIERWOTNY $S(N)=\sin N 18$		KOLEJNE ELEMENTY CIAGU CEPSTRUM	
1	0.31	22	0.0662
2	0.59	21	0.2343
3	0.81	20	-0.3996
4	1.	19	0.0988
5	0.95	18	-0.0695
6	0.81	17	0.0715
7	0.59	16	0.0288
8	0.31	15	0.2068
KOLEJNE ELEMENTY CIAGU CEPSTRUM		14	-0.0536
16	0.0288	13	-0.0881
15	0.0068	12	-0.3775
14	-0.0536	11	-0.1739
13	-0.0881	10	0.7998
12	-0.1275	9	0.1231
11	-0.1739	8	-0.2094
10	0.7998	7	-0.1702
9	-0.2101	6	-0.5932
8	-0.2094	5	-0.0068
7	-0.1702	4	0.1641
6	-0.0932	3	1.3895
5	-0.0068	2	0.8017
4	0.1641	1	1.9032
3	0.3895	0	0.0000
2	0.8017	-1	0.0000
1	1.9032	-2	0.0000
0	0.0000	-3	0.0000
-1	0.0000	-4	0.0000
-2	0.0000	-5	0.0000
-3	0.0000	-6	0.0000
-4	0.0000	-7	0.0000
-5	0.0000	-8	0.0000
-6	0.0000	-9	0.0000
-7	0.0000	-10	0.0000
-8	0.0000	-11	0.0000
-9	0.0000	-12	0.0000
-10	0.0000	-13	0.0000
-11	0.0000	-14	0.0000
-12	0.0000	-15	0.0000
-13	0.0000	-16	0.0000
-14	0.0000	-17	0.0000
-15	0.0000	-18	0.0000
		-19	0.0000
		-20	0.0000
		-21	0.0000
SYGNAL $X(N)=\sin N 18 + \text{ECHO}$		OPÓZNIENIE ECHA $L=5$	
1	0.31	AMPLITUDA ECHA $B=0.99804687$	
2	0.59	SZUKANY SYGNAL $S(N)$	
3	0.81	1	0.3100
4	1.26	2	0.5900
5	1.59	3	0.8100
6	1.76	4	0.9506
7	1.76	5	1.0011
8	1.59	6	0.9515
9	1.26	7	0.8112
10	0.81	8	0.5908
11	0.59	9	0.3102
12	0.31	10	0.0003
		11	0.0003
		12	0.0003

		9	7.85
		10	4.5
		11	3.
		12	2.95
		13	3.2
		14	1.5
		15	0.5
SYGNAL PIERWOTNY NIEANALITYCZNY S(N)=NIA			
1	1.6		
2	2.8		
3	3.4		
4	3.2		
5	2.9		
6	3.		
7	4.		
8	5.9		
9	6.4		
10	3.		
11	1.		
KOLEJNE ELEMENTY CIAGU CEPSTRUM			
20	0.0000		
19	0.0000		
18	0.0000		
17	0.0000		
16	0.0000		
15	0.0000		
14	0.0000		
13	0.0000		
12	0.0000		
11	0.0000		
10	0.0001		
9	-0.0007		
8	0.0008		
7	0.0016		
6	-0.0075		
5	0.0088		
4	0.0194		
3	-0.1003		
2	0.1433		
1	0.5283		
0	1.2623		
-1	-1.1328		
-2	-0.1092		
-3	-0.1284		
-4	-0.1325		
-5	-0.1675		
-6	-0.1828		
-7	-0.1229		
-8	-0.0327		
-9	0.3252		
-10	-0.1243		
-11	0.1029		
-12	0.0007		
-13	0.0068		
-14	-0.0273		
-15	-0.0395		
-16	-0.0274		
-17	-0.0094		
-18	0.0476		
-19	-0.0406		
		21	0.0000
		20	0.0062
		19	0.0000
		18	0.0000
		17	0.0000
		16	-0.0156
		15	0.0000
		14	0.0000
		13	0.0000
		12	0.0415
		11	0.0000
		10	0.0001
		9	-0.0007
		8	-0.1241
		7	0.0016
		6	-0.0075
		5	0.0081
		4	0.5194
		3	-0.1003
		2	0.1433
		1	0.5283
		0	1.9555
		-1	-1.1328
		-2	-0.1092
		-3	-0.1284
		-4	-0.1325
		-5	-0.1673
		-6	-0.1828
		-7	-0.1229
		-8	-0.0327
		-9	0.3252
		-10	-0.1243
		-11	0.1029
		-12	0.0007
		-13	0.0068
		-14	-0.0273
		-15	-0.0395
		-16	-0.0274
		-17	-0.0094
		-18	0.0476
		-19	-0.0406
		-20	0.0461
			DPOZNIENIE ECHA L=4
			AMPLITUDA ECHA B=0.5000000
			SZUKANY SYGNAL S(N)
		1	1.6000
		2	2.8000
		3	3.4000
		4	3.2000
		5	2.9000
		6	3.0000
		7	4.0000
		8	5.9000
		9	6.4000
		10	3.0000
		11	1.0000
		12	0.0000
		13	0.0000
		14	0.0000
SYGNAL X(N)=NIA + ECHO			
1	1.6		
2	2.8		
3	3.4		
4	3.2		
5	3.7		
6	4.4		
7	5.7		
8	7.5		

Rys. 9

$= 1,1^n$ jest sygnałem maksymalnofazowym, posiadającym cepstrum tylko dla $n < 0$. Stąd $\hat{x}_1(n)$ dla $n > 0$ posiada tylko impulsy cepstrum $\hat{p}(n)$ zgodnie z relacją (15). Sygnał $s_2(n) = \sin n 18^\circ$ jest sygnałem minimalnofazowym ($\hat{s}_2(n)$, istnieje tylko dla $n > 0$), a jego odpowiednik $x_2(n)$, jakkolwiek nie posiada wyraźnie widocznego echa, to zostało ono w nim wykryte przez przedstawiony program obliczeniowy. Sygnał trzeci $s_3(n)$ jest sygnałem nieanalitycznym, posiadającym cepstrum nieregularne dla n dodatnich i ujemnych, lecz w którym dla $x_3(n)$ wyraźnie widoczne są impulsy $\hat{p}(n)$ wynikające z istnienia echa. Na końcu każdego cyklu obliczeń podane są opóźnienia l i amplituda echa B oraz sygnał pierwotny S , wykryte w sygnałach $x(n)$ przez zaprojektowany program obliczeniowy.

Wszystkie trzy przykłady przedstawione są jako wydruki na rysunkach 7, 8, 9.

LITERATURA

- [1] NOLL A.M.: Cepstrum Pitch Determination. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 41, Feb. 1967.
- [2] OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W., STOCKHAM T.G.: Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals. Proc. IEEE, Vol. 56, No 8, 1968.
- [3] FREDERICK D.K., CARLSON A.B.: Linear Systems in Communication and Control. Jon Wiley and Sons. 1971.
- [4] BEAUCHAMP K.G.: Signal Processing Using Analog and Digital Techniques. George Allen and Unwin. 1973.
- [5] OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W.: Digital Signal Processing. Prentice - Hall. 1975.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Nowomiejski

Wpłynęło do redakcji: 5.V.1983 r.

ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНЫЙ ФИЛЬТР ЭХА

Р е з ю м е

В статье представлены основы действия [цифрового фильтра, исполняющего элиминацию эха из измерительного сигнала с особенным применением в системах регистрации и обработки данных. Осуществлена программа для фильтра, на языке ЭЕМ, при параметрах адаптированных в зависимости от особенностей эха, найденных на базе анализа комплексного кетстра исследованного сигнала.

