

Krzysztof PUCHER
Dariusz KANIA

CYFROWE METODY OPÓZNIANIA SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH

Streszczenie. Artykuł jest próbą przedstawienia teoretycznych podstaw cyfrowych metod opóźniania sygnałów akustycznych. Opisuje on dwie współcześnie najpopularniejsze metody: metodę z wykorzystaniem modulacji delta oraz metodę bazującą na przetwarzaniu A/C i C/A. Przedstawia wiele problemów związanych z odpowiednim doбором parametrów urządzeń, których konstrukcja bazuje na wykorzystaniu linii opóźniającej.

DIGITAL METHODS OF DELAY OF ACOUSTIC SIGNALS

Summary. This paper is an attempt at presenting theoretical analysis of digital delaying of acoustic signals. Here is a critical description of two of the now most popular methods: pulse code modulation and differential coding. Also, a description of a number of problems connected with the proper selection of device parameters is given.

ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ЗАДЕРЖКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Резюме. Статья является попыткой представить теоретические основы цифровых методов задержки акустических сигналов. Касается она двух современных, наиболее популярных методов: метода с использованием дельта-модуляции и метода основанного на обработке А/Ц и Ц/А. Представлен ряд проблем связанных с требованиями отбора параметров устройств, конструкция которых основана на использовании линии задержки.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój elektroniki pozwala dziś na realizację nowoczesnych metod przetwarzania, obróbki i wzbogacania dźwięku. Zadaniem tych metod jest wzbogacanie brzmienia elektronicznych instrumentów muzycznych oraz innych źródeł dźwięku, np. głosu [4]

Drugie, równie ważne zastosowanie wiąże się ściśle z trendami rozwoju sprzętu elektroakustycznego. W dobie dyskofonów, doskonałych wzmacniaczy o bardzo małych zniekształceniach, wąskim gardłem toru elektroakustycznego stały się zestawy głośnikowe oraz właściwości akustyczne pomieszczeń odsłuchu. Okazuje się, że właśnie akustyka pomieszczeń, często małych pokoi, powoduje, że subiektywna ocena słuchacza dotycząca jakości odsłuchu jest niezadowolająca. Tak więc za pomocą wytwarzania sygnałów o różnych czasach opóźnień możemy symulować akustykę pomieszczeń.

2. Dotychczasowe metody uzyskiwania opóźnień

Sztuczny pogłos od wielu lat był już stosowany w celu wytworzenia określonych iluzji przestrzennych. Najwcześniej stosowaną metodą uzyskiwania pogłosu była komora pogłosowa, czyli zamknięte pomieszczenie odpowiednio przystosowane akustycznie, wyposażone w głośnik i mikrofon.

Kolejną metodą wytwarzania opóźnienia było wykorzystanie zjawiska rozchodzenia się fal mechanicznych w ciałach sprężystych. W zależności od gatunku materiału sprężystego i jego wymiarów geometrycznych uzyskiwano różne wybrzmienia.

W celu uzyskania większych czasów opóźnień stosowano magnetyczne urządzenia rejestrująco-odczytujące [1].

Ostatnie osiągnięcia w dziedzinie techniki cyfrowej pozwoliły skonstruować urządzenia całkowicie elektroniczne, które umożliwiają wytworzenie całkowitej i doskonałej iluzji współbrzmienia sali koncertowej lub nawet osiąganie niespotykanych w naturze efektów brzmieniowych [3].

3. Parametry określające jakość opóźnionego sygnału

Najważniejszymi parametrami wpływającymi na subiektywną ocenę jakości dźwięku są:

1. pasmo częstotliwości przenoszonych sygnałów,
2. odstęp sygnału od szumu. (S/N).

ad 1. Pasma częstotliwości przykładowych źródeł dźwięku [2]:

sygnał mowy	- 100 Hz - 8 kHz.
fortepian	- 20 Hz - 4 kHz *
skrzypce	- 190 Hz - 4 kHz *
organy	- 16 Hz - 4 kHz *
zakres słuchu	- 16 Hz - 20 kHz

* - pasmo częstotliwości tonów podstawowych.

ad 2. Odstęp S/N jest ściśle związany z dynamiką źródeł dźwięku. Poniżej przytoczono dynamiki przykładowych źródeł dźwięku [2].

sygnał mowy	- 45 dB,
instrumenty blaszane	- 30 dB,
skrzypce	- 25 dB,
fortepian	- 35 dB,
orkiestra - 10 osób	- 76 dB,
orkiestra - 86 osób	- 86 dB

4. Model urządzenia opóźniającego pracującego na zasadzie przetwarzania z wykorzystaniem modulacji delta

Modulacja delta jest systemem przetwarzania, który pozwala na zakodowanie sygnału w postaci ciągu zer i jedynek. Postać taka jest bardzo wygodna z uwagi na łatwość zapamiętywania i opóźniania sygnałów [6].

Model kodera i dekodera pracującego w systemie delta przedstawiony jest na rys. 1.

$$d_i = \text{int} (X_{we}(t_i) - X_{ekstr}(t_i))$$

$$X_{ekstr}(t_i) = \sum_{l=1}^{\infty} q f(H_l) (-1)^{d_i + l}$$

gdzie:

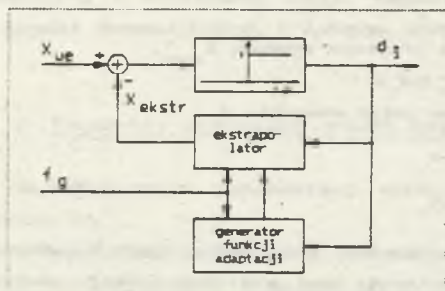
- q - skok kwantowania,
 - d_i - i-ty element ciągu na wyjściu kodera ("0" lub "1"),
 - X_{we} - sygnał wejściowy,
 - X_{ekstr} - sygnał ekstrapolujący X_{we} ,
 - $f(H_i)$ - funkcja adaptacji określająca przyrost sygnału X_{ekstr} ,
 $(X_{ekstr}(t_i) - X_{ekstr}(t_{i-1})) = \pm q f(H_i)$
 - H_i - parametr określający historię zmian elementu d_i
- $$H_i = \begin{cases} 0 & \text{dla } d_i \neq d_{i-1} \\ H_{i-1} + 1 & \text{dla } d_i = d_{i-1} \end{cases}$$
- f_g - częstotliwość zegarowa.

Zadaniem ekstrapolatora wraz z układem generatora funkcji adaptacji jest wytworzenie na podstawie elementu d_i oraz wartości funkcji adaptacji $f(H_i)$ sygnału X_{ekstr} nadążającego za sygnałem X_{we} . Na podstawie wartości różnicy $X_{we} - X_{ekstr}$ układ kształtujący wytwarza na wyjściu kodera sygnał d_i . Przy założonej wartości częstotliwości f_g , skoku kwantowania q , funkcji adaptacji $f(H_i)=1$ (modulacja delta bez adaptacji) można prawidłowo odtworzyć sygnał o predkości narastania mniejszej lub równej $q \cdot f_g$.

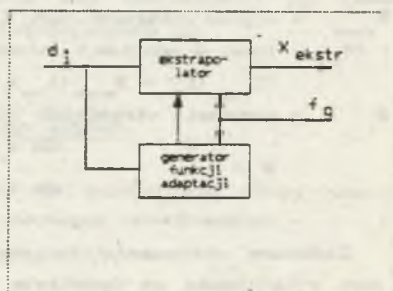
$$A \cdot 2\pi f_{\max} \leq q f_g,$$

gdzie:

KODER



DEKODER



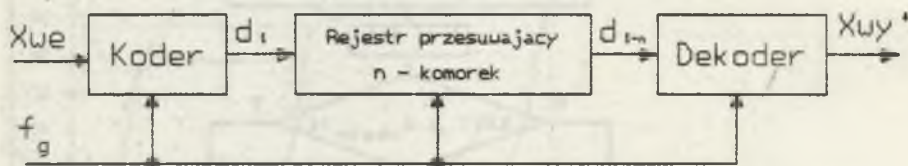
Rys.1. Model kodera i dekodera pracującego w systemie delta
 Fig.1. Coder and decoder model of delta modulation

- A - amplituda kodowanego sygnału,
 f_{\max} - maksymalna częstotliwość kodowanego sygnału,
 f_g - częstotliwość zegarowa,
 q - skok kwantowania.

Na przykład: Obliczamy minimalną częstotliwość zegarową f_g , jeżeli: $f_{\max} = 20$ kHz; $q = 8 \cdot 10^{-3}$ A (skok kwantowania odpowiadający osmiobitowemu przetwarzaniu) $f_g \geq 16$ MHz.

5. Idea opóźniania sygnałów

Schemat układu obrazującego sposób opóźniania przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Idea opóźniania sygnałów z wykorzystaniem modulacji delta
 Fig.2. Delaying idea bases on using of delta modulation

Czas opóźniania sygnału wynosi:

$$T_o = \frac{n}{f_g},$$

gdzie:

- T_o - czas opóźnienia sygnału,
 n - ilość komórek rejestru przesuwającego,
 f_g - częstotliwość zegarowa.

Na przykład: Aby uzyskać czas opóźnienia $T = 500$ ms przy częstotliwości $f_g = 16$ MHz, pojemność pamięci wynosi: $n = 8 \cdot 10^6$ komórek.

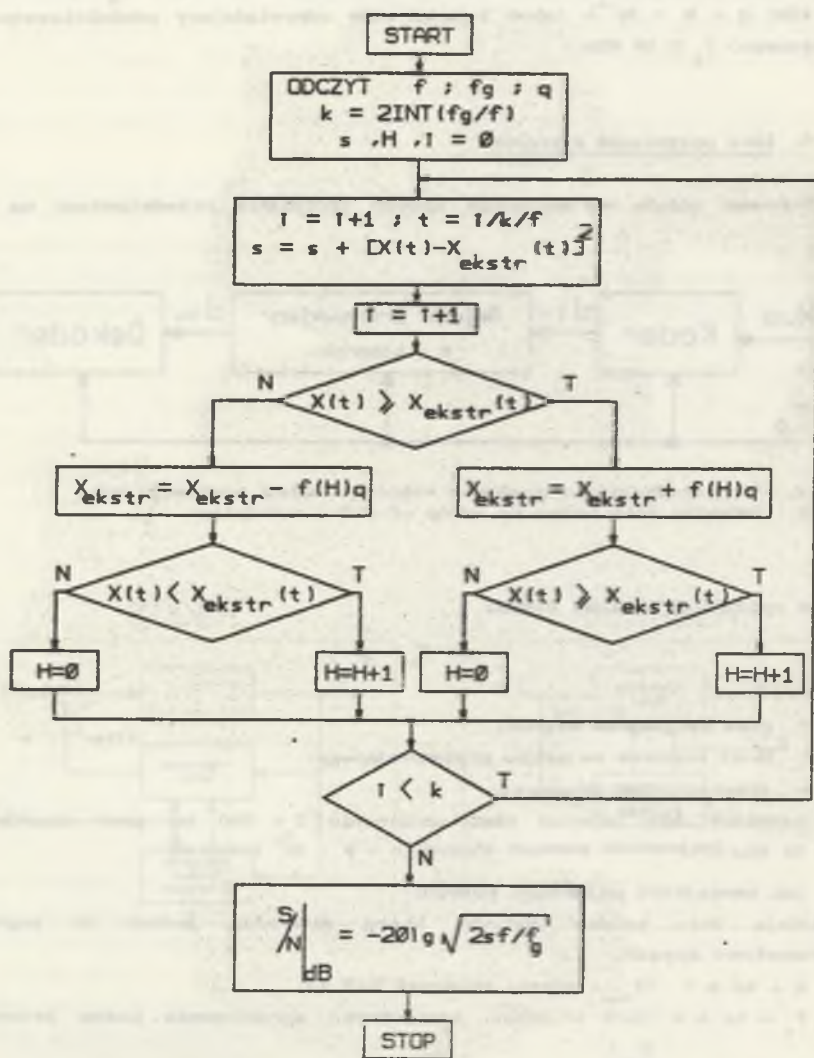
Jak zmniejszyć pojemność pamięci?

Istnieją dwie proste metody, które prowadzą jednak do pogorszenia parametrów sygnału.

- $q \propto \text{to } n \propto (f_{\max} = \text{const, stosunek } S/N \propto),$
- $f_o \propto \text{to } n \propto (S/N = \text{const, konieczność ograniczenia pasma przenoszenia } X_{\text{vo}}),$

f_{\max} - maksymalna częstotliwość kodowanego sygnału.

Innym, efektywnym sposobem zmniejszenia pojemności pamięci jest zastosowanie mechanizmów adaptacyjnych [6].

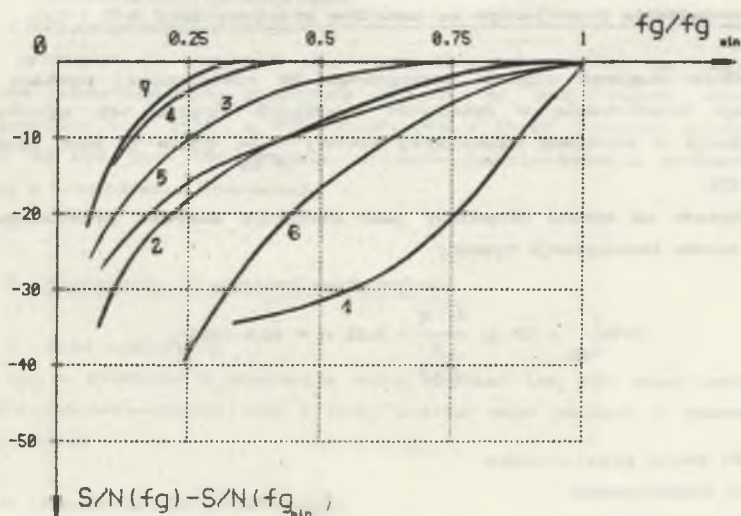
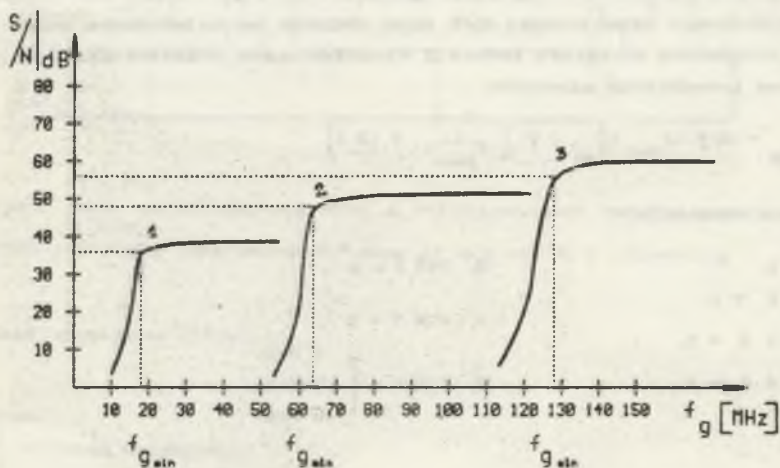


Rys.3. Schemat blokowy algorytmu służącego do wyznaczania stosunku S/N w modulacji delta z uwzględnieniem adaptacji

Fig.3. Block diagram of algorithm for calculating S/N ratio in adaptive delta modulation

Na rys. 3 przedstawiony jest algorytm programu służącego do obliczania stosunku S/N dla przebiegu $y(t) = \sin(2\pi ft)$. Poniżej przedstawiono opis występujących na schemacie blokowym wielkości:

- $X(t)$ - sygnał przetwarzany,
- $X_{ekstr}(t)$ - sygnał ekstrapolujący $X(t)$,
- f_g - sygnał o częstotliwości zegarowej,
- q - skok kwantowania,
- $f(h)$ - funkcja adaptacji określająca przyrost sygnału X_{ekstr} .



Rys 4. Charakterystyki szumowe modulacji delta
Fig 4. Noise characteristics of delta modulation

Wynikiem przeprowadzonych obliczeń, bazujących na przytoczonym algorytmie są charakterystyki przedstawione na rys. 4.

Pierwszy wykres przedstawia zależność:

$$S/N \Big|_{dB} = F(f_g, q) \Big|_{f(H)=1} \quad (\text{modulacja delta bez adaptacji})$$

$$1. q = 2^{-7}, \quad 2. q = 2^{-9}, \quad 3. q = 2^{-10}.$$

Wartości q zostały dobrane w taki sposób, aby odpowiadały one różnicy sygnału wyjściowego przetwornika C/A przy zmianie na najmłodszym bicie, co sugeruje przykładową strukturę koderów z wykorzystaniem przetwornika C/A.

Drugi wykres przedstawia zależność

$$S/N(f_g) \Big|_{dB} - S/N(f_{gmin}) \Big|_{dB} = F\left(\frac{f_g}{f_{gmin}}, f(H_i)\right)$$

(modulacja z adaptacją).

$$\begin{array}{ll} 1. f(H_i) = 1, & 5. f(H_i) = 2^{H_i}, \\ 2. f(H_i) = H_i + 1, & 6. f(H_i) = 2^{H_i^2}, \\ 3. f(H_i) = 2 H_i + 1, & 7. f(H_i) = \begin{cases} 1 & H=0, \\ 3 & H=1, \\ 10 & H \geq 2. \end{cases} \\ 4. f(H_i) = 4 H_i + 1, & \end{array}$$

6. Model urządzenia pracującego na zasadzie przetwarzania A/C i C/A

Przetwarzanie ciągłego sygnału analogowego do równoważnej postaci cyfrowej wymaga kwantowania w dziedzinie amplitudy. Proces ten wprowadza szum kwantyzacji o wartości skutecznej równej $\frac{q}{\sqrt{12}}$, gdzie q jest skokiem kwantowania [5].

Odstęp sygnału od szumu określony jako stosunek zakresu przetwarzania do wartości szumu kwantyzacji wynosi:

$$S/N \Big|_{dB} = 20 \lg \frac{2^n q}{\frac{q}{\sqrt{12}}} = 6,02 n + 10,8 \text{ [dB]},$$

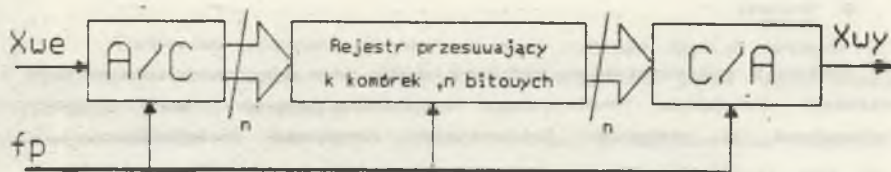
gdzie:

- n - ilość bitów przetwornika,
- q - skok kwantowania,
- $2^n q$ - zakres przetwarzania.

Na przykład jeżeli założymy przetwarzanie 8-bitowe, to:

$$q = \frac{1}{2^8}, \quad \text{stad } S/N = 59 \text{ dB.}$$

Idea opóźnienia sygnałów z wykorzystaniem metody przetwarzania A/C i C/A przedstawiona jest na rys. 5.



Rys.5. Idea opóźnienia sygnałów z wykorzystaniem metody przetwarzania A/C i C/A

Fig.5. Delaying idea bases on using of A/C and C/A converting

Czas opóźnienia wynosi:

$$T_o = \frac{k}{f_p},$$

gdzie:

- T_o - czas opóźnienia,
- f_p - częstotliwość próbkowania,
- k - ilość komórek n-bitowych.

Na przykład: Aby uzyskać czas opóźnienia $T_o = 500$ ms sygnału, którego górna częstotliwość graniczna wynosi 20 kHz, należy użyć pamięci o pojemności $k = T_o \cdot f_p = 500 \text{ ms} \cdot 40 \text{ kHz} = 20 \cdot 10^3$ komórek 8-bitowych.

($f_p = 40$ kHz jest teoretyczną minimalną częstotliwością próbkowania wynikającą z twierdzenia Shannona).

7. Porównanie przedstawionych metod

1. Czas opóźnienia

Aby w systemie z modulacją delta uzyskać ten sam czas opóźnienia co za pomocą przetwarzania A/C i C/A, trzeba użyć pamięci o znacznie większej pojemności.

2. Częstotliwość próbkowania

System z modulacją delta wymaga znacznie większej częstotliwości próbkowania.

3. Złożoność układu

System przetwarzania A/C i C/A wymaga zastosowania przetwornika C/A oraz znacznie droższego przetwornika A/C. Wymaga również układów pamiętająco-próbkujących oraz filtrów o dużej selektywności.

8. Wnioski

System z wykorzystaniem modulacji delta jest systemem lepszym przy konstrukcji urządzenia realizującego opóźnienia sygnału rzędu pojedynczych milisekund. W przypadku konieczności uzyskania większych czasów opóźnień korzystniejsze jest stosowanie metody przetwarzania A/C i C/A

LITERATURA

- [1] Geisler J.: Techniczne problemy nagrań muzycznych. WKŁ, Warszawa 1979.
- [2] Miszczak S.: Elektroakustyka. WKŁ, Warszawa 1969.
- [3] Longford A.H.: Delay lines-devices and applications. Electronic Engineering. August 1980.
- [4] Pellegrino R.: The Electronic Arts of Sound and Light. Van Nostrand Reinhold Company. New York 1983.
- [5] Zyszkowski Z.: Miernictwo akustyczne. WNT, Warszawa 1987.
- [6] Gregg W.D.: Podstawy telekomunikacji analogowej. WNT, Warszawa 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leszek Kiełtyka

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 grudnia 1991 r.

DIGITAL METHODS OF DELAY OF ACOUSTIC SIGNALS

A b s t r a c t

Theoretical analysis of two of most popular digital methods of acoustic signals delaying, called differential coding and pulse code modulation, is presented in this paper.

Analysis of the first method includes a mathematical model of adaptive delta modulation, coder, and decoder structures (fig.1) and an idea of delay based on delta modulation (fig.2). Block diagram of an algorithm for calculating S/N ratio in adaptive delta modulation is presented (fig.3). The results of the calculations are presented in the form of noise characteristics (fig.4).

Analysis of the second method comprises a model of a delaying system based on A/C and C/A conversion (fig.5). There is also an algebraic formula for calculating S/N ratio.

Results of this analysis may be useful for the designing and construction of acoustic delay circuits.