

Techniki demodulacji sygnałów FM - analiza porównawcza

Aleksander Gidziński 331473

Mateusz Bielawny 331461

Jakub Prusiński 331520

21.12.2024

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Techniki demodulacji sygnałów FM	2
2.1	Dyskryminatory częstotliwości	2
2.2	Demodulacja kwadraturowa	3
2.2.1	Wstęp	3
2.2.2	Zasada działania	3
2.3	Układy z pętlą PLL	4
2.3.1	Wstęp	4
2.3.2	Uproszczona budowa	5
2.3.3	Działanie	5
2.3.4	Podsumowanie	6
3	Porównanie	6
4	Źródła	6

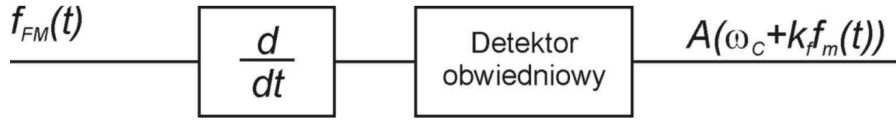
1 Wstęp

Demodulacja sygnałów FM (Frequency Modulation) stanowi kluczowy proces w systemach komunikacji radiowej, umożliwiając odtworzenie sygnału modulującego. W pracy omówiono i porównano trzy popularne techniki demodulacji: dyskryminatory częstotliwości, demodulację kwadraturową oraz układy z pętlą PLL (Phase-Locked Loop). Zaprezentowano ich zasadę działania, zalety i ograniczenia.

2 Techniki demodulacji sygnałów FM

2.1 Dyskryminatory częstotliwości

Dyskryminatory częstotliwości są powszechnie stosowane w odbiornikach FM do odzyskiwania sygnału audio, jak również w radarach i systemach komunikacji bezprzewodowej. Dyskryminator częstotliwości służy do konwersji zmian częstotliwości sygnału nośnego na proporcjonalne zmiany napięcia. Najprostszy układ dyskryminatora składa się z dwóch bloków: układu różniczkującego oraz detektora obwiedniowego.



Rysunek 1: Schemat blokowy dyskryminatora częstotliwości

Matematyczne wyjaśnienie działania schematu wygląda następująco:

$$f_{FM}(t) = A \cos \left[\omega_c t + k_f \int_0^t f_m(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

Na wejście systemu podawany jest zmodulowany sygnał FM przedstawiony powyższym wzorem. My chcemy jednak odtworzyć z niego sygnał $f_m(t)$. Różniczkując sygnał na wejściu, otrzymamy poniższy sygnał, będący modulacją amplitudy (AM) sygnału $f(t)$:

$$\frac{df_{FM}(t)}{dt} = -A(\omega_c + k_f f_m(t)) \sin \left[\omega_c t + k_f \int_0^t f_m(\tau) d\tau \right] \quad (2)$$

Po takiej operacji, amplituda otrzymanego sygnału jest proporcjonalna do chwilowej częstotliwości sygnału wejściowego. W tym momencie należy użyć detektora obwiedniowego, który wyodrębni obwiednię amplitudy:

$$Obwiednia = A|\omega_c + k_f f_m(t)| \quad (3)$$

2.2 Demodulacja kwadraturowa

2.2.1 Wstęp

Demodulacja kwadraturowa jest powszechnie stosowaną techniką w odbiorze sygnałów modulowanych częstotliwościowo (FM). Pozwala ona na efektywne odzyskanie informacji zawartej w sygnale poprzez przekształcenie zmian częstotliwości na zmiany napięcia.

2.2.2 Zasada działania

Demodulator kwadraturowy składa się z: układu o określonej transmitancji $H(j\omega)$, układu mnożącego, filtra dolnoprzepustowego (najczęściej Butterwortha).

Transmitancja $H(j\omega)$ musi spełniać kilka warunków:

1. Charakterystyka fazowa dla częstotliwości środkowej ω_0 :

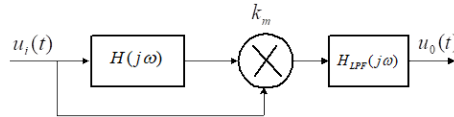
$$\angle H(j\omega_0) = -\frac{\pi}{2}.$$

2. Liniowość nachylenia charakterystyki fazowej w otoczeniu ω_0 :

$$\frac{d}{d\omega} \angle H(j\omega) \Big|_{\omega=\omega_0} = \tau.$$

3. Charakterystyka amplitudowa w otoczeniu ω_0 powinna być stała:

$$|H(j\omega)| \approx |H(j\omega_0)|.$$



Rysunek 2: Schemat blokowy demodulatora kwadraturowego

Działanie układu:

- Sygnał wejściowy $u_i(t)$ jest przetwarzany przez układ $H(j\omega)$, co powoduje przesunięcie fazy o -90° .
- Wynikowy sygnał jest mnożony przez sygnał wejściowy $u_i(t)$.
- Następnie sygnał przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy, co pozwala uzyskać sygnał modulujący $u_m(t)$.

Napięcie wyjściowe: Przybliżone wyrażenie na napięcie wyjściowe:

$$u_o(t) \approx -\frac{1}{2}k_m H(0)u_m(t),$$

gdzie k_m to współczynnik przetwarzania układu mnożącego.

Dobór układu $H(j\omega)$: Transmitancję $H(j\omega)$ można zrealizować za pomocą czwórnika LC, którego transmitancja napięciowa jest opisana wzorem:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - jQ \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}},$$

gdzie Q to dobroć układu.

Charakterystyka statyczna

Charakterystyka statyczna demodulatora kwadraturowego opisuje zależność napięcia wyjściowego od częstotliwości wejściowej w otoczeniu ω_0 . Wyrażenie unormowane ma postać:

$$\frac{U_o}{U_{o,\max}} = \frac{\sin(2 \arctan(x))}{1 + x^2},$$

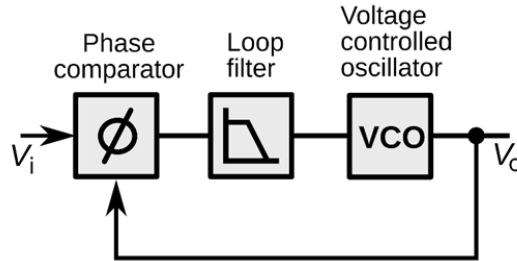
gdzie $x = Q \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$.

2.3 Układy z pętlą PLL

2.3.1 Wstęp

Kolejną z metod odzyskiwania sygnału informacyjnego z modulacji częstotliwości (FM) jak i fazy (PM) jest użycie pętli synchronizacji fazy (phase-locked loop - PLL). Detektor z PLL nie wymaga selektywnego częstotliwościowo obwodu LC do przeprowadzenia demodulacji. Zamiast tego system sterowania PLL generuje sygnał wyjściowy, którego faza jest zsynchronizowana z fazą sygnału wejściowego. Utrzymywanie fazy sygnałów wejściowego i wyjściowego w synchronizacji oznacza również utrzymanie ich częstotliwości na tym samym poziomie. W ten sposób pętla synchronizacji fazowej może również śledzić zmiany częstotliwości sygnału nośnego.

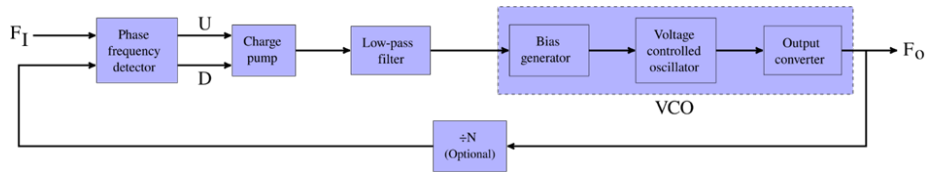
2.3.2 Uproszczona budowa



Rysunek 3: Prosta analogowa pętla synchronizacji fazowej

Prosta analogowa pętla synchronizacji fazowej (PLL) to układ elektroniczny składający się z detektora (komparatora) fazy, filtra dolnoprzepustowego i synchronizowanego fazowo oscylatora VCO o zmiennej częstotliwości umieszczonego w konfiguracji ujemnego sprzężenia zwrotnego. Oscylator generuje sygnał okresowy V_o o częstotliwości proporcjonalnej do przyłożonego napięcia, stąd nazwa "oscylator sterowany napięciem" (VCO). Detektor fazy porównuje fazę sygnału wyjściowego VCO z fazą okresowego sygnału wejściowego referencyjnego V_i , a następnie generuje napięcie (stabilizowane przez filtr), które dostarcza częstotliwość oscylatora, aby dopasować fazę V_o do fazy V_i .

2.3.3 Działanie



Rysunek 4: Schemat blokowy pętli synchronizacji fazowej

Na wejściu detektor fazy (przedstawiony na powyższym rysunku jako bloki detektora częstotliwości fazy i pompy ładunkowej) porównuje dwa sygnały wejściowe, wytwarzając sygnał błędny, który jest proporcjonalny do ich różnicy faz. Sygnał błędny jest następnie filtrowany dolnoprzepustowo, dzięki czemu otrzymujemy niskoczęstotliwościowe napięcie błędny używane do sterowania VCO. Wymusza ono dopasowanie lokalnie generowanej częstotliwości VCO do częstotliwości modulowanego sygnału FM – utrzymanie synchronizacji z sygnałem wejściowym. Na wyjściu otrzymujemy zdemodulowany sygnał FM (z utworzoną fazą wyjściową), który jest opcjonalnie przepuszczany przez dzielnik częstotliwości (umożliwiający generowanie stabilnej częstotliwości, która jest wielokrotnością częstotliwości wejściowej) lub bezpośrednio kierowany z powrotem na

wejście systemu, tworząc pętlę sprzężenia zwrotnego o ujemnym sprzężeniu, co wymusza, aby VCO śledził chwilową częstotliwość przychodzącego sygnału FM oraz podążał za jej zmianami.

Jeśli faza (lub częstotliwość w przypadku sygnałów FM) sygnału wyjściowego ulegnie przesunięciu, sygnał błęd wzrośnie, co spowoduje zmianę fazy VCO w przeciwnym kierunku, aby zmniejszyć błąd. W ten sposób faza sygnału wyjściowego jest blokowana względem fazy sygnału wejściowego.

2.3.4 Podsumowanie

Charakterystyka przenoszenia VCO determinuje liniowość zdemodulowanego sygnału. Ponieważ VCO używane w układach scalonych PLL jest wysoce liniowe, możliwe jest uzyskanie wysoce liniowych demodulatorów FM, co zapewnia demodulacji opartej na PLL lepszą wydajność pod względem odporności na zakłócenia w porównaniu z innymi technikami demodulacji FM.

3 Porównanie

Cecha / Metoda	Dyskryminatory częstotliwości (Foster-Seeley, Ratio)	Demodulacja kwadrurowa (I/Q)	PLL (Phase-Locked Loop)
Implementacja	<ul style="list-style-type: none"> Głównie analogowa Zestrojenie obwodów LC 	<ul style="list-style-type: none"> Analogowo: filtr 90° + mieszacz Często cyfrowo (SDR) 	<ul style="list-style-type: none"> Analogowo (układ scalony PLL) Cyfrowo – warianty mieszane
Czułość / Liniowość	Dobra, zależna od filtrów LC	Bardzo dobra (szcz. w wersji cyfrowej)	Bardzo dobra po dobrze zestrojonej pętli
Odporność na wahania amplitudy	Mniejsza (Ratio Detector jest lepszy)	Zależy od AGC i kalibracji	Naturalnie wysoka (PLL śledzi fazę)
Złożoność	Niska / umiarkowana	Analogowo – średnia, cyfrowo (SDR) – wysoka	Umiarkowana: VCO, detektor fazy, filtr pętli
Elastyczność	Ograniczona (obwody LC)	Bardzo wysoka w SDR (zmiana softu)	Wymaga przeprojektowania pętli
Koszt / Dostępność	Bardzo niski (proste układy)	Wyższy w wersji cyfrowej (DSP, przetworniki)	Scalone PLL dostępne w rozsądnej cenie

Tabela 1: Porównanie metod demodulacji FM

4 Źródła

<https://www.youtube.com/watch?v=NLg4u3aIKQ8>

<https://unacademy.com/content/jee/study-material/physics/frequency-demodulation/>

<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/fm-frequency-demodulation-detection-discrimination.php>

<https://www.youtube.com/watch?v=7Cdh1lRus34>

https://home.agh.edu.pl/mgi/instrukcje/LAB_5_Modulacja_i_Demodulacja_Czestotliwosci-student.pdf
https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_modulation#Demodulation
[https://en.wikipedia.org/wiki/Detector_\(radio\)Phase-locked_loop_detector](https://en.wikipedia.org/wiki/Detector_(radio)Phase-locked_loop_detector)
https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop
https://wiki.gnuradio.org/index.php/Quadrature_Demod
<https://eti.pg.edu.pl/documents/176634/92c3beb1-bbae-4f16-bebc-c0d02095901f>