

Projektowanie cyfrowych urządzeń radiokomunikacyjnych

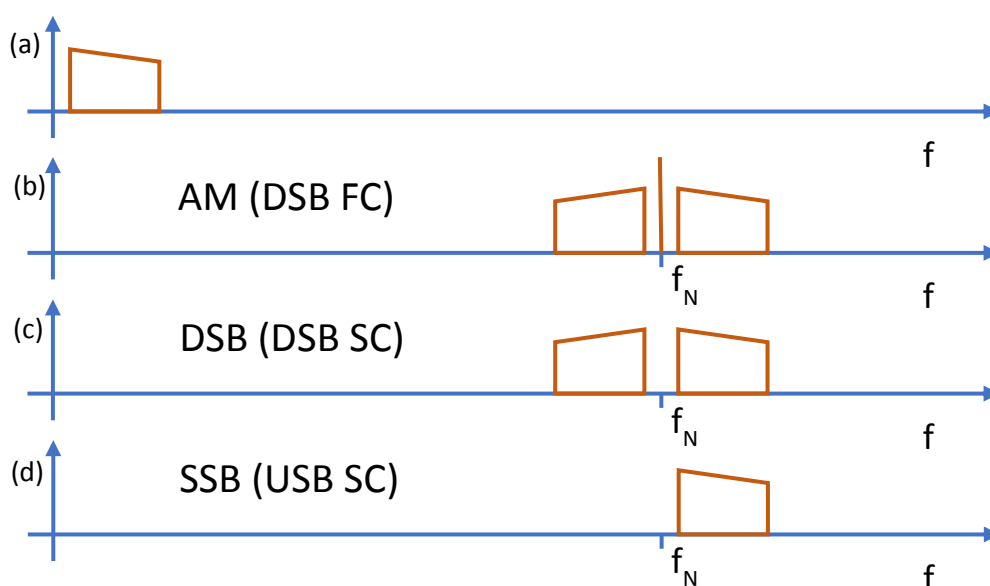
Ćwiczenie 2 Modulacja AM

Analogowa modulacja amplitudy

Modulacja amplitudy AM (*amplitude modulation*) jest najstarszą znaną modulacją, wynalazł ją Reginald Fessenden w 1906 r. Istnieje kilka odmian modulacji amplitudy:

- (1) dwuwstęgowa z nośną, nazywana po prostu AM, formalnie DSB FC (*double side-band full carrier*),
- (2) dwuwstęgowa bez nośnej, nazywana w skrócie DSB, formalnie DSB SC (*double side-band supressed carrier*) oraz
- (3) jednowstęgowa, nazywana w skrócie SSB (*single side-band*); teoretycznie może występować w różnych wariantach – można wykorzystywać dolną wstęgę boczną (LSB, *lower side-band*) albo górną (USB, *upper side-band*), nośna może być pełna (FC, *full carrier*), zredukowana (RC, *reduced carrier*) albo wytłumiona (SC, *supressed carrier*), jednak w praktyce stosowana jest niemal wyłącznie wersja USB SC, rzadziej USB FC, chociaż nagrana próbka jest akurat w wariacie LSB SC

Różnice pomiędzy poszczególnymi odmianami AM najlepiej jest przedstawić na widmie sygnałów (Rys. 2.1).



Rysunek 2.1. Schematyczne przedstawienie widm różnych wariantów modulacji amplitudy;
(a) sygnał modulujący, (b) sygnał AM, (c) sygnał DSB, (d) sygnał SSB

Wariant DSB powstaje przez wymnożenie sygnału modulującego oraz harmonicznego sygnału generatora lokalnego (heterodyny), o częstotliwości nośnej f_N . Sygnał DSB można więc traktować jak specyficzny wariant modulacji kwadraturowej, gdzie tor synfazowy zawiera sygnał modulujący, natomiast tor kwadraturowy jest niewykorzystywany. Odbiór DSB musi być koherentny: generator lokalny w odbiorniku musi być zgodny w częstotliwości i fazie z generatorem lokalnym nadajnika, inaczej jakość odbioru bardzo się pogorszy. Niezgodność częstotliwości powoduje okresowe wahania amplitudy sygnału odebranego (zdemodulowanego), natomiast niezgodność fazy – stałe zmniejszenie amplitudy tego sygnału. Amplituda sygnału odebranego jest proporcjonalna do cosinusa kąta przesunięcia fazowego pomiędzy generatorami nadajnika i odbiornika. W skrajnym przypadku, kiedy błąd fazy wynosi $\pi/2$, co oznacza odbiór sygnału z toru kwadraturowego, na wyjściu demodulatora nie pojawi się nic. W praktyce w odbiornikach DSB trzeba odtwarzać nośną, do czego najczęściej wykorzystywany jest układ Costasa z pętlą fazową PLL.

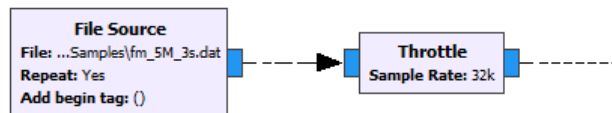
Wariant AM (czyli DSB FC) można potraktować jak DSB – ze wszelkimi tego konsekwencjami (obecność nośnej nie zmienia faktu, że składowa kwadraturowa niczego nie zawiera) – jednak można zastosować również detektory wartości szczytowej lub wartości średniej, a w odbiornikach cyfrowych również detektory obwiedni. Detektory te są całkowicie nieczułe na błąd fazy generatora lokalnego odbiornika, a w dość szerokim zakresie również na błąd częstotliwości, nawet rzędu połowy pasma sygnału modulującego. Błąd częstotliwości powoduje, że do detektora przedostaje się część widma z kanałów bezpośrednio sąsiadujących z kanałem odbieranym, co oczywiście pogarsza jakość odbioru, jednak nie powoduje zniekształcenia sygnału odbieranego, jak to ma miejsce w przypadku SSB

Zupełnie inaczej wygląda kwestia odbioru SSB. Sygnał SSB, z punktu widzenia modulacji kwadraturowej, zawiera w torze synfazowym sygnał modulujący, natomiast w torze kwadraturowym – transformatę Hilberta sygnału modulującego (jest to więc sygnał analityczny). Oznacza to, że odbiornik będzie całkowicie nieczuły na błąd fazy generatora lokalnego – nieważne, czy odbiornik odtworzy sygnał modulujący (z toru synfazowego), czy jego transformatę Hilberta (z toru kwadraturowego), te sygnały mają co prawda inny przebieg czasowy, ale identyczny układ prążków w widmie - różni je tylko przesunięcie fazowe i dla ludzkiego ucha są identyczne. Odbiornik SSB jest natomiast wrażliwy na błąd częstotliwości generatora lokalnego, ponieważ w rezultacie takiego błędu sygnał zdemodulowany zostaje przesunięty w widmie w kierunku częstotliwości wyższych lub niższych (zależnie od znaku błędu), zmienia się więc ton głosu, a dodatkowo zostają zaburzone proporcje między częstotliwościami harmonicznymi.

Korzystając z GNU Radio Companion można zrealizować odbiór AM i SSB na kilka różnych sposobów. Odbiór DSB wymaga pętli sprzężenia zwrotnego, czego nie da się zrobić w GRC, dlatego nie będzie przedmiotem ćwiczeń.

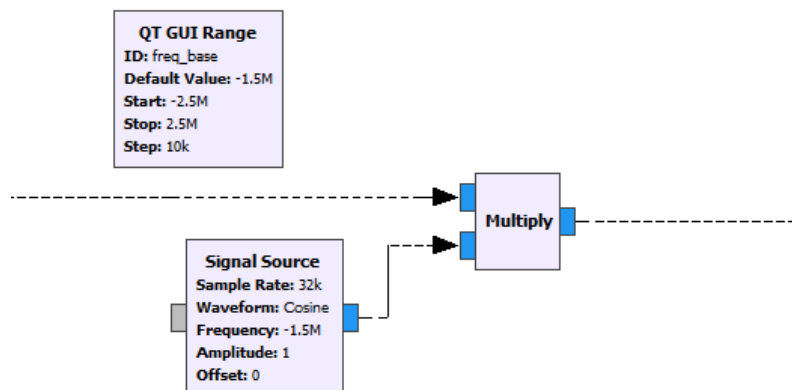
Często używane elementy odbiorników

Sygnal odbierany (zmodulowany) – źródłem sygnału jest plik z próbkami, zapisany wcześniej przy użyciu GRC (blok *File Source*); Jest to sygnał kwadraturowy, o wartościach zespolonych. Każdy diagram przetwarzania sygnałów w GRC powinien zawierać blok przepustnicy (*Throttle*), dobrym miejscem na to jest wyjście bloku źródła (Rys. 2.2).



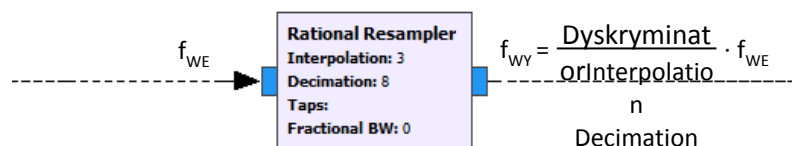
Rysunek 2.2. Źródło sygnału (nagrana próbka sygnału odebranego) z przepustnicą

Blok przemiany częstotliwości (mieszacz) – składa się z generatora lokalnego, który wytwarza sygnał harmoniczny (kosinusoidalny) i bloku mnożenia; Częstotliwość generatora może być stała – wówczas we właściwościach generatora, w polu *Frequency*, należy wpisać odpowiednią wartość – albo regulowana, do czego w GRC służy suwak QT GUI Range – wówczas w polu *Frequency* generatora należy wpisać ID suwaka (Rys. 2.3).



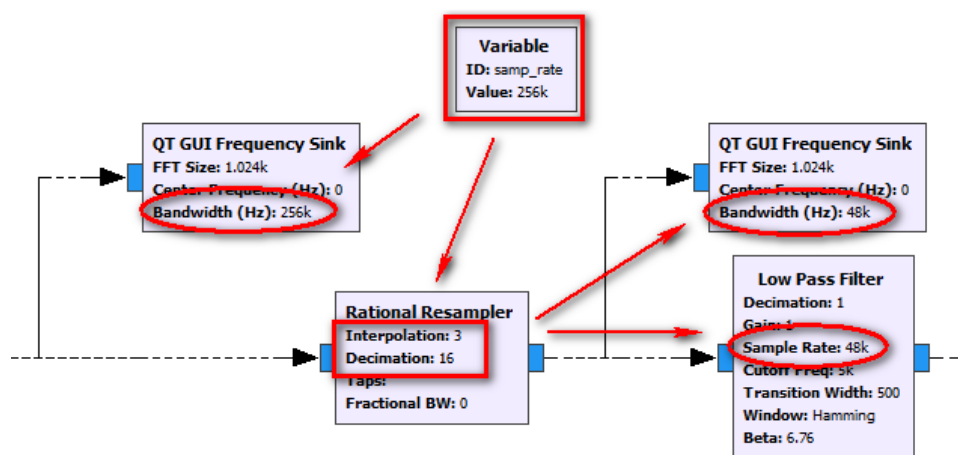
Rysunek 2.3. Blok przemiany częstotliwości (mieszacz) z suwakiem QT Range

Zmiana częstotliwości próbkowania – jest konieczna choćby po to, aby dopasować częstotliwość próbkowania nagranej próbki sygnału do możliwości karty dźwiękowej; służy do tego blok *Rational Resampler* (Rys. 2.4).



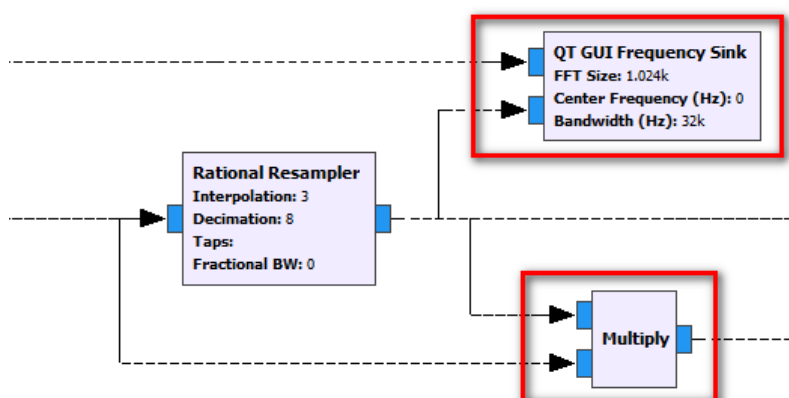
Rysunek 2.4. Blok zmiany częstotliwości próbkowania

Ważne! Stosując *Resampler* należy pamiętać o dwóch kwestiach. Po pierwsze, w blokach, w których trzeba podać częstotliwość próbkowania (parametr *Sample Rate* lub *Bandwidth*), znajdujących się za *Resamplerem*, trzeba samemu wpisać jej zmienioną wartość (Rys. 2.5). Można przy tym użyć wyrażenia, np. $\text{samp_rate} * 3/8$



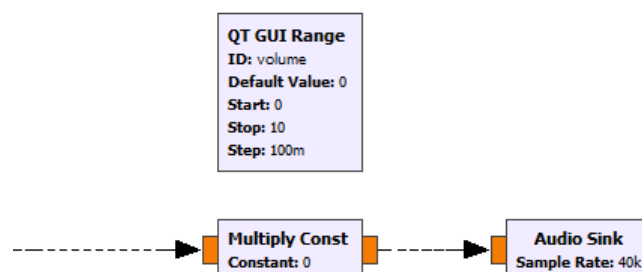
Rysunek 2.5. Konsekwencje zmiany częstotliwości próbkowania

Po drugie, wszystkie sygnały wejściowe określonego bloku powinny mieć tę samą częstotliwość próbkowania – bloki oznaczone na Rys. 2.6 czerwonymi ramkami, mające na wejściach różne częstotliwości próbkowania, nie będą działały prawidłowo



Rysunek 2.6. Konsekwencje zmiany częstotliwości próbkowania

Regulacja poziomu sygnału – potrzebna głównie do regulacji poziomu głośności wyjścia audio, może być realizowana z użyciem bloku mnożenia przez stałą i suwaka – we właściwościach bloku *Multiply Const*, w polu *Constant*, należy wówczas wpisać ID suwaka; Można również użyć wyrażenia, np. $0.001 * volume$, gdzie jest *volume* jest identyfikatorem suwaka (Rys. 2.7).



Rysunek 2.7. Blok regulacji poziomu sygnału z suwakiem QT Range

Ważne! Wartości chwilowe sygnału na wejściu *Audio Sink* powinny mieścić się w przedziale $[-1, 1]$, inaczej zostaną „obcięte”, co skutkuje silnymi trzaskami.

Zdarzało się na ćwiczeniach, że prawidłowo zbudowany odbiornik dawał na wyjściu audio same trzaski, tylko z powodu wielokrotnie za dużego poziomu sygnału; Wynika stąd, że początkowo należy na wyjściu odbiornika wstawić blok *QT GUI Time Sink* i sprawdzić poziom sygnału, a dopiero po upewnieniu się, że jest odpowiedni, wstawić tam również *Audio Sink*

Typy danych i kolory

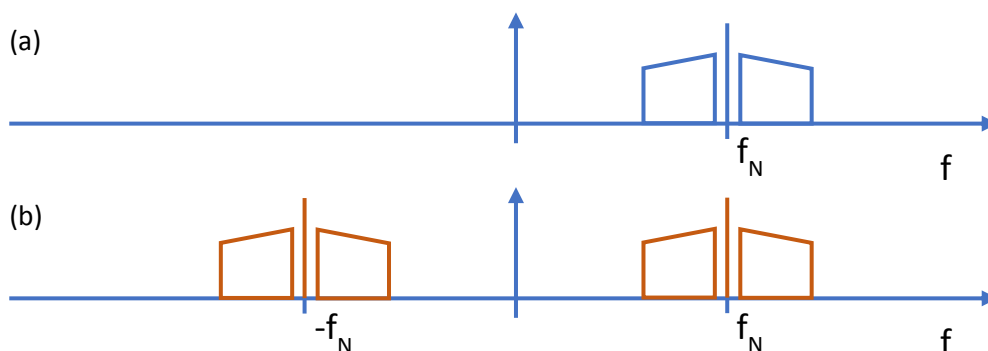
W GNU Radio Companion kolory wejść i wyjść poszczególnych bloków oznaczają typ danych – proszę porównać np. Rys. 2.6 oraz 2.7 – przy czym zawsze, kiedy łączy się dwa bloki, typ wyjścia pierwszego musi być zgodny z typem wejścia drugiego. Niektóre bloki, a w tym większość prostych bloków ogólnego przeznaczenia, jak generator sygnałowy, resampler, bloki operacji matematycznych oraz bloki zobrazowania sygnału, dają możliwość wyboru typu przetwarzanych danych. Służy do tego parametr o nazwie, zależnie od bloku, *Input Type*, *IO Type*, *Type* itp. Można też zmienić typ danych przez zaznaczenie bloku lub bloków i naciśnięcie klawisza strzałki w górę lub w dół.

Zgodnie z konwencją przyjętą w GRC, części toru sygnałowego, w których przetwarzane są sygnały zespolone (kwadraturowe), będą na schematach oznaczone kolorem niebieskim, natomiast dla sygnałów rzeczywistych – kolorem jasnobrązowym. (Rys. 2.8). Bloki, w których ramka ma inny kolor niż opis bloku, zmieniają postać sygnału – najczęściej z zespolonej na rzeczywistą.



Rysunek 2.8. Znaczenie kolorów na schematach blokowych;
niebieski – sygnał zespolony (kwadraturowy), brązowy – sygnał rzeczywisty

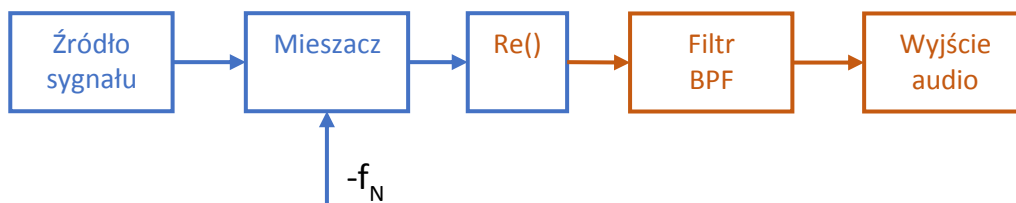
Podobna zasada dotyczy rysunków widm sygnałów: kolor niebieski – sygnał zespolony (kwadraturowy), kolor brązowy – sygnał rzeczywisty. Proszę zwrócić uwagę, że widmo sygnału kwadraturowego – np. w przypadku sygnałów analitycznych – może być niesymetryczne, natomiast widmo sygnałów rzeczywistych zawsze jest symetryczne względem zera pulsacji (Rys. 2.9).



Rysunek 2.9. Znaczenie kolorów na wzorach widm sygnałów
niebieski – sygnał zespolony (kwadraturowy), brązowy – sygnał rzeczywisty;
(a) sygnał ze źródła z Rys. 2.8, (b) sygnał na wejściu filtru z Rys. 2.8

Najprostszy odbiornik AM

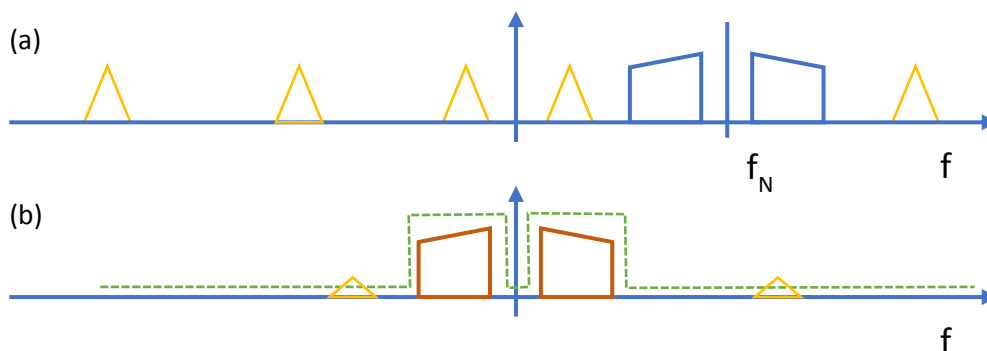
Najprostszy, ale też najgorszy odbiornik AM składa się z mieszacza, filtru oraz regulacji głośności (Rys. 2.10). Taki odbiornik nie wykorzystuje nośnej (nie ma np. detektora wartości średniej), a jedynie przesuwa widmo sygnału odebranego do pasma podstawowego. Otrzymujemy niekoherentny odbiór DSB, ze wszelkimi konsekwencjami wynikającymi z różnicy częstotliwości lub fazy pomiędzy generatorami lokalnymi nadajnika i odbiornika.



Rysunek 2.10. Schemat blokowy prostego odbiornika AM

Na początek należy przesunąć sygnał do pasma podstawowego (na częstotliwość równą 0) przy pomocy mieszacza. Dalej wykorzystywany jest sygnał rzeczywisty, który należy wyodrębnić za pomocą bloku *Complex to Real*. Kolejnym etapem przetwarzania jest filtracja. Należy użyć filtra pasmowo-przepustowego BPF (blok *Band Pass Filter*), dzięki czemu można pozbyć się składowej stałej. Dolna częstotliwość graniczna powinna wynosić nie więcej niż 300 Hz, natomiast górna częstotliwość graniczna 5 kHz. Pomiedzy filtrem a wyjściem audio należy wstawić jeszcze blok regulacji głośności oraz dopasować częstotliwość próbkowania do karty dźwiękowej, np. na 40 kHz lub 48 kHz.

Widma sygnałów odbiornika AM przedstawia Rys. 2.11.

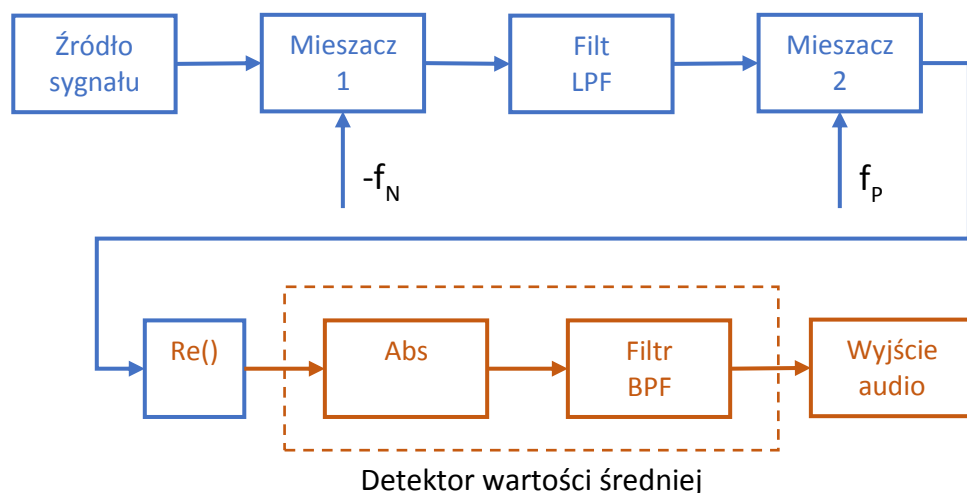


Rysunek 2.11. Widma sygnałów prostego odbiornika AM;
(a) źródło sygnału, (b) wyjście filtra BPF; linia przerywana to charakterystyka filtra

Odbiornik AM z detektorem wartości średniej

Odbiornik AM z detektorem wartości średniej (Rys. 2.12) jest bardziej złożony, ale zapewnia znacznie wyższej jakości odbiór. Jest też całkowicie odporny na błędy fazy generatora lokalnego oraz niewielkie błędy jego częstotliwości.

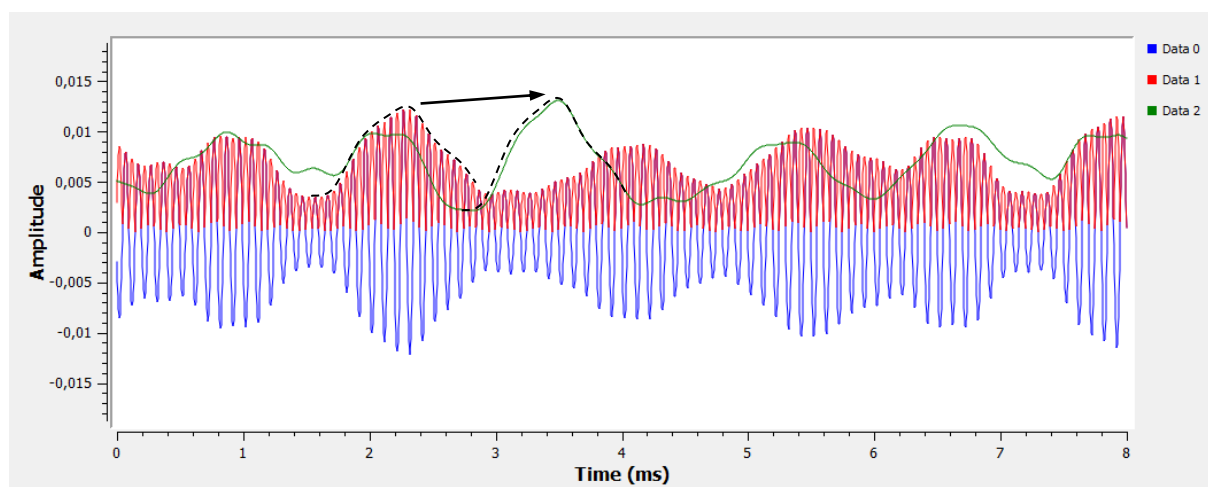
Sygnał odebrany należy najpierw przesunąć do pasma podstawowego (tj. na częstotliwość środkową równą 0) i przy pomocy filtru dolnoprzepustowego usunąć zakłócenia z sąsiednich kanałów. Następnie trzeba przesunąć sygnał na częstotliwość pośrednią (np. 50 kHz) i tam zbudować detektor.



Rysunek 2.12. Schemat blokowy odbiornika AM z detektorem wartości średniej

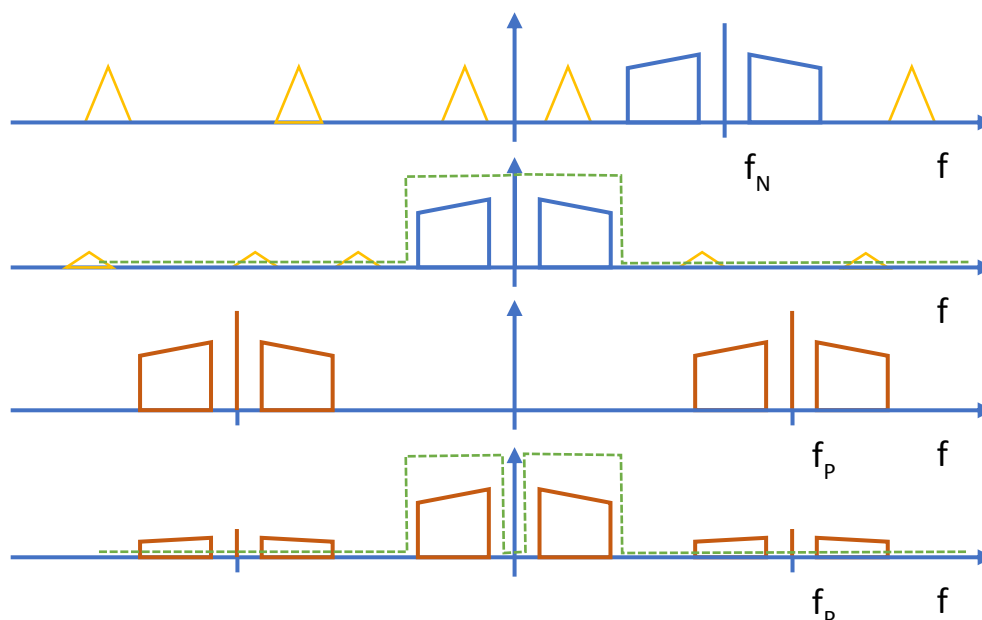
Detektor wartości średniej wykorzystuje sygnał rzeczywisty, który należy wyodrębnić za pomocą bloku *Complex to Real*. składa się z prostownika (w GRC najlepiej do tego użyć bloku wartości bezwzględnej *Abs*) oraz filtru pasmowoprzepustowego BPF (blok *Band Pass Filter*). W widmie sygnału na wyjściu prostownika znajduje się zarówno sygnał zdemodulowany, oryginalny sygnał na częstotliwości pośredniej, jak i sporo produktów ubocznych, które pogarszają nieco odbiór, ale w większości są skutecznie usuwane przez filtr.

Działanie detektora ilustruje Rys. 2.13. Sygnał zmodulowany na częstotliwości pośredniej (kolor niebieski) jest prostowany (czerwony) i uśredniany. Sygnał zdemodulowany (zielony) ma kształt obwiedni sygnału AM (czarna przerywana linia) i jest opóźniony na skutek działania filtru (strzałka)



Rysunek 2.13. Przebiegi sygnałów w detektorze wartości średniej

Kolejne etapy przetwarzania sygnału pokazano również na Rys. 2.14. Sygnał odebrany (a) jest sygnałem kwadraturowym (ma niesymetryczne widmo). Po pierwszej przemianie i filtracji (b) usunięte zostają sygnały z sąsiednich kanałów, po drugiej przemianie i konwersji do sygnału rzeczywistego (c) można zastosować detektor, który odtwarza sygnał modulujący (d) oraz filtr (zielona przerywana linia), który oczyszcza sygnał ze zbędnych produktów powstających w detektorze

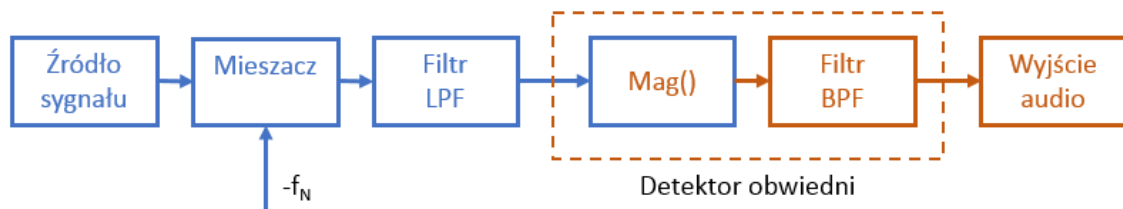


Rysunek 2.14. Widma sygnałów odbiornika AM z detektorem wartości średniej;
(a) źródło sygnału, (b) wyjście filtru BPF; linia przerywana to charakterystyka filtru,
(c) wejście detektora (d) wyjście filtru detektora

Odbiornik AM z detektorem obwiedni

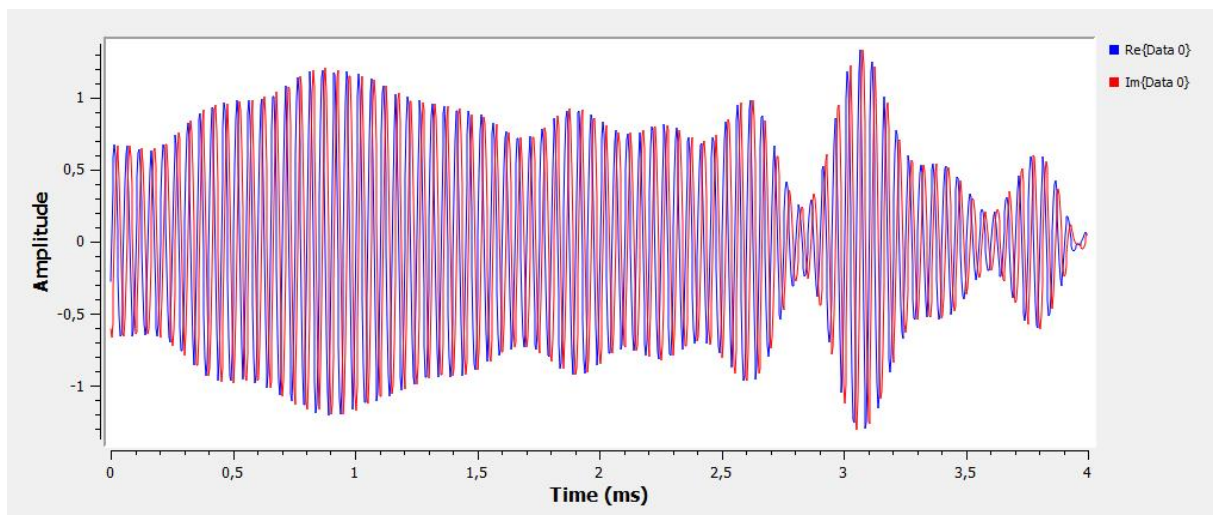
Detektor obwiedni można pracować zarówno na częstotliwości podnośnej, jak i w paśmie podstawowym. Jest niemal równie prosty, jak pierwszy przedstawiony odbiornik AM (choć tylko w przypadku realizacji odbiornika metodami DSP), a jednocześnie osiąga najwyższą jakość odbioru.

Schemat odbiornika z detektorem obwiedni przedstawiono na Rys. 2.15. Sygnał odebrany należy najpierw przesunąć do pasma podstawowego. Następnie należy użyć filtra dolnoprzepustowego LPF, aby usunąć zakłócenia z sąsiednich kanałów. Kolejnym elementem jest detektor obwiedni – w GRC do tego celu najlepiej użyć bloku *Complex to Mag*, który oblicza moduł liczby zespolonej, czyli wielkość obwiedni sygnału AM. Następny jest filtr pasmowo-przepustowy, który usunie zakłócenia i składową stałą, wprowadzaną przez detektor. Na koniec potrzebna jest zmiana częstotliwości próbkowania i regulacja głośności.

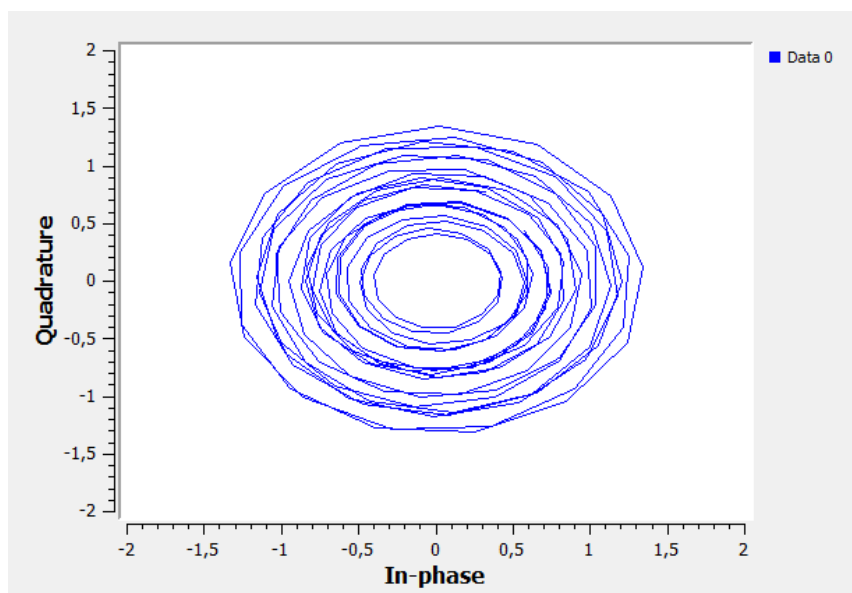


Rysunek 2.15. Schemat blokowy odbiornika AM z detektorem obwiedni

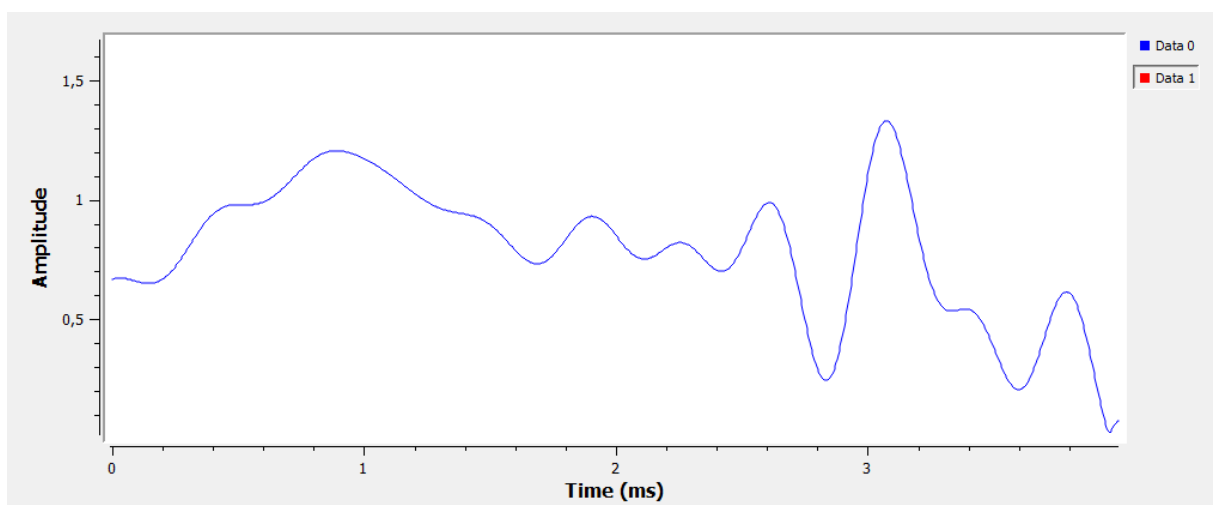
Działanie detektora obwiedni ilustrują trzy kolejne rysunki, z przebiegami sygnałów zarejestrowanymi w GRC. Rys. 2.16 przedstawia przebieg sygnału zmodulowanego. Składowe synfazowa i kwadraturowa są przesunięte w fazie o $\pi/2$, zatem wartość zespoloną sygnału można interpretować jako wirujący wektor – widać to bardzo dobrze na Rys. 1.17, na którym pokazano ten sam sygnał, ale na wykresie fazowym. Szybkość wirowania wektora odpowiada częstotliwości nośnej, natomiast długość wektora – wartości chwilowej sygnału modulującego. Aby odtworzyć sygnał modulujący, wystarczy obliczyć długość tego wektora. Efekt tych obliczeń przedstawia Rys. 2.18, na którym pokazano sygnał na wyjściu detektora. Jego przebieg dokładnie odpowiada obwiedni sygnału zmodulowanego z Rys. 2.16. Można też zauważyć, że sygnał ma składową stałą, dlatego po detektorze należy użyć filtra pasmowo-przepustowego, aby ją usunąć.



Rysunek 2.16. Sygnał kwadraturowy AM

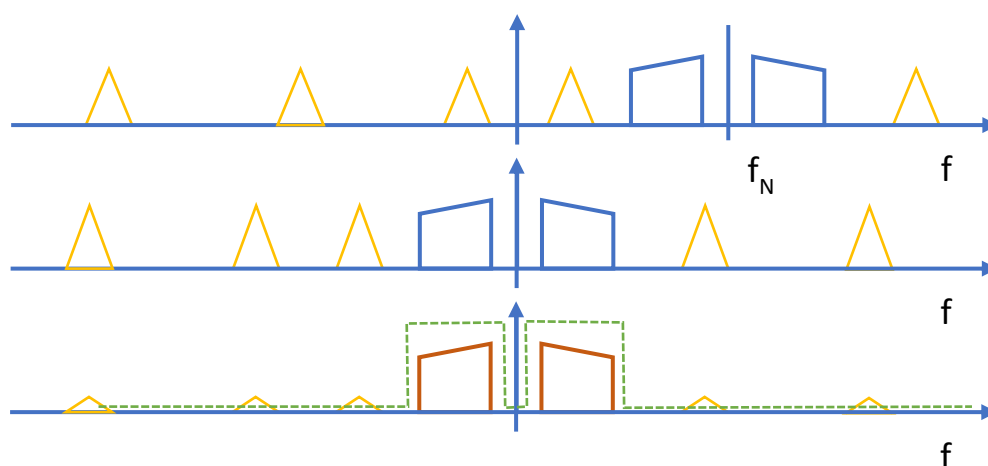


Rysunek 2.17. Sygnał kwadraturowy AM z Rys. 2.16 na wykresie fazowym



Rysunek 2.18. Sygnał zdemodulowany na wyjściu detektora obwiedni

Widma sygnałów na kolejnych etapach ich przetwarzania w odbiorniku AM z detektorem obwiedni przedstawia Rys. 2.19.



Rysunek 2.19. Widma sygnałów odbiornika AM z detektorem obwiedni;
(a) źródło sygnału, (b) wejście detektora obwiedni, (c) wyjście filtra detektora