

Projektowanie cyfrowych urządzeń radiokomunikacyjnych

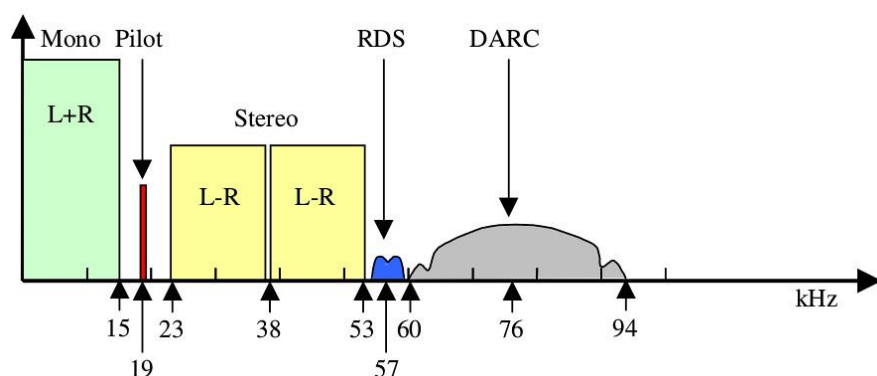
Ćwiczenie 4 Modulacja FM

Analogowa modulacja częstotliwości

Modulacja częstotliwości FM (*Frequency modulation*), wynaleziona w 1933 r. przez Edwina Armstronga, zapewnia większą odporność na zakłócenia i lepszą jakość sygnału audio niż modulacja amplitudy. Rozgłoszeniowe radio FM wykorzystuje pasmo 88 MHz – 108 MHz. Dewiacja częstotliwości wynosi 75 kHz, a w rezultacie szerokość pasma sygnału osiąga 200 kHz – dlatego jest czasami nazywane szerokopasmowym FM.

Sygnał modulujący jest sygnałem złożonym (kompozytowym) – zawiera kilka niezależnych od siebie komponentów (Rys. 4.1):

- (1) sygnał audio monofoniczny, L+P (suma kanałów lewego i prawego);
pasmo sygnału audio jest ograniczone do zakresu 50 Hz – 15 kHz
- (2) sygnał audio stereofoniczny, L-P (różnica kanałów lewego i prawego);
dysponując sumą L+P i różnicą L-P, można w odbiorniku odtworzyć sygnały kanałów lewego i prawego: $L = \frac{1}{2} \cdot \{(L+P) + (L-P)\}$, $P = \frac{1}{2} \cdot \{(L+P) - (L-P)\}$,
a jednocześnie prostsze radia mogą odbierać tylko sygnał mono;
sygnał stereo jest modulowany amplitudowo (DSB SC) i umieszczony na częstotliwości podnośnej 38 kHz
- (3) pilot sygnału stereo 19 kHz – niezbędny, gdyż demodulacja DSB SC musi być koherentna
- (4) sygnał RDS (*Radio Data System*) na częstotliwości podnośnej 57 kHz,
wykorzystujący cyfrową modulację BPSK. Służy do nadawania informacji takich jak nazwa stacji, kategoria audycji, częstotliwości alternatywne itp.
Jest synchroniczny z sygnałem pilota stereo, co ułatwia dekodowanie
- (5) Inne dane cyfrowe; rozwiązania różnią się zależnie od regionu lub kraju,
np. w Europie system DARC (*Data Radio Channel*), z transmisją 16 kb/s

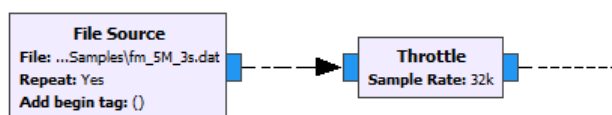


Rysunek 4.1. Widmo kompozytowego sygnału modulującego w radiofonii FM

Korzystając z podstawowych komponentów GNU Radio Companion można zbudować odbiornik FM na dwa sposoby: jako przeniesienie do DSP metod przetwarzania sygnałów z układów analogowych, z dyskryminatorem częstotliwości, albo korzystając z cyfrowego demodulatora FM. W pierwszym wypadku można jedynie odbierać sygnał monofoniczny (choć w widmie można dostrzec wszystkie elementy sygnału kompozytowego), w drugim można odbierać również sygnał stereo, a nawet dane z systemu RDS.

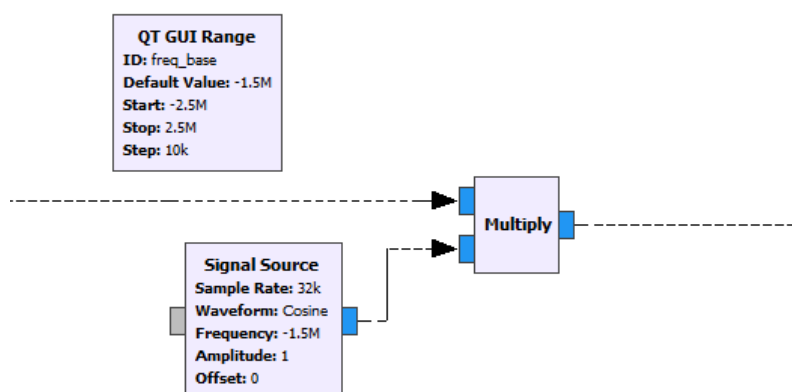
Często używane elementy odbiorników

Sygnał 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).



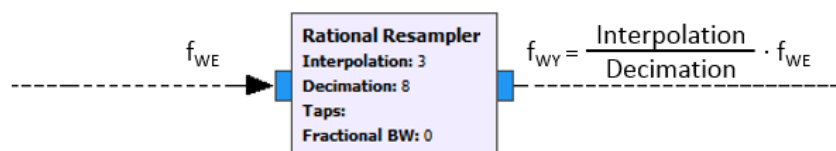
Rysunek 2.2. Źródło sygnału (nagrana próbka sygnału odebranego) z przepustnicą

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).



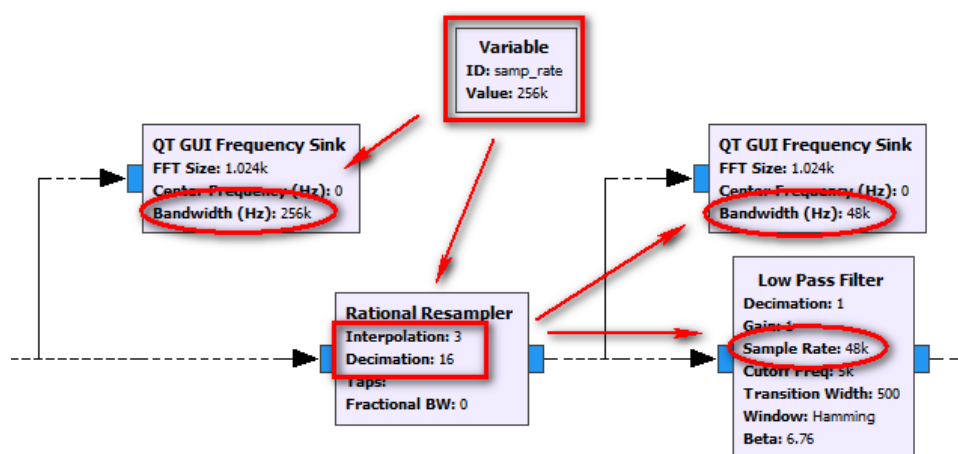
Rysunek 2.3. Blok przemiany częstotliwości (mieszacz) z suwakiem QT Range

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).



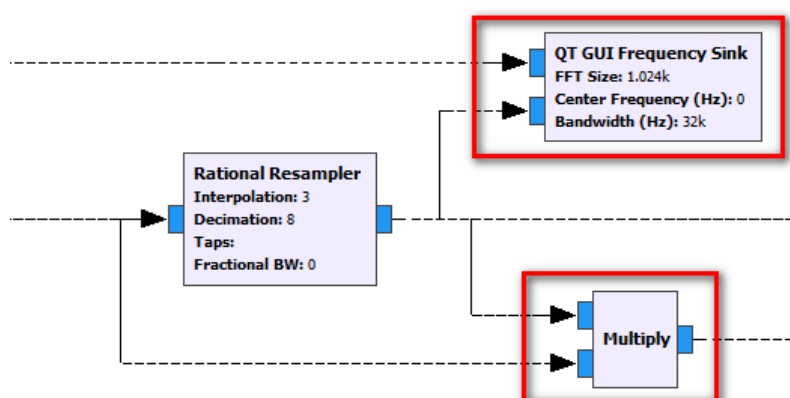
Rysunek 2.4. Blok zmiany częstotliwości próbkowania

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. $\text{samp_rate} * 3/8$



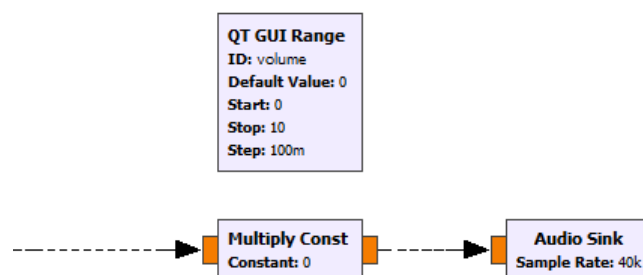
Rysunek 2.5. Konsekwencje zmiany częstotliwości próbkowania

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

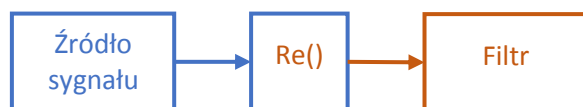
Ważne! Wartości chwilowe sygnału na wejściu *Audio Sink* powinny mieścić się w przedziale $[-1, 1]$, inaczej zostaną „obcięte”, co skutkuje silnymi trzaskami.

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

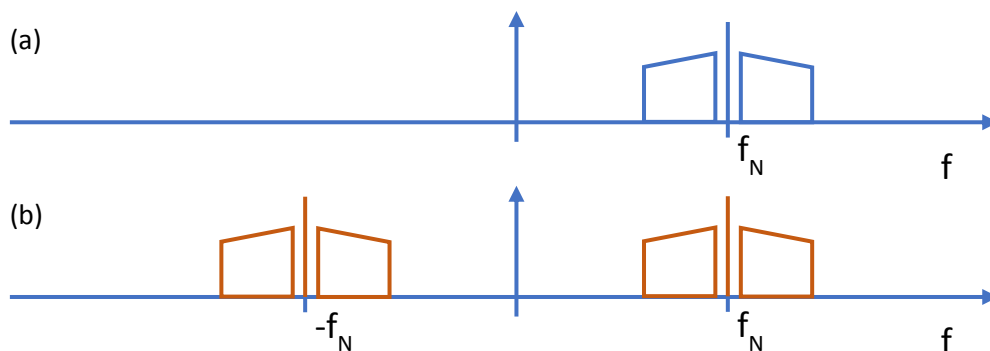
W GNU Radio Companion kolory wejść i wyjść poszczególnych bloków oznaczają typ danych – proszę porównać np. Rys. 2.6 oraz 2.7 – przy czym zawsze, kiedy łączy się dwa bloki, typ wyjścia pierwszego musi być zgodny z typem wejścia drugiego. Niektóre bloki, a w tym większość prostych bloków ogólnego przeznaczenia, 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 jasnobrażowym. (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).

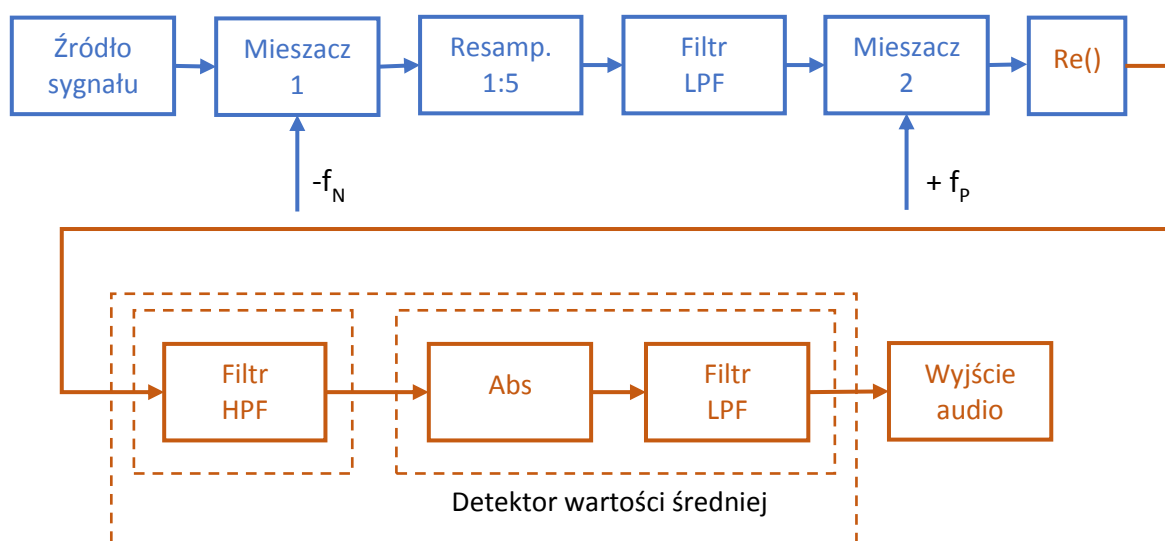


Rysunek 2.9. Znaczenie kolorów na wzorach widm sygnałów
niebieski – sygnał zespolony (kwadraturowy), brązowy – sygnał rzeczywisty;
(a) sygnał ze źródła z Rys. 2.8, (b) sygnał na wejściu filtru z Rys. 2.8

Odbiornik FM z dyskryminatorem częstotliwości

Dyskryminator częstotliwości to układ, którego wzmocnienie jest liniowo zależne od częstotliwości – oczywiście w ograniczonym zakresie zmian częstotliwości. Jeżeli na wejście takiego układu podać sygnał FM, to na wyjściu uzyska się sygnał, który dodatkowo będzie zmodulowany również amplitudowo (DSB FC). Najprostszy dyskryminator częstotliwości to pasmo przejściowe filtru górnoprzepustowego. Filtry w GRC zostały zaprojektowane do innych celów i nie mają w paśmie przejściowym liniowej zależności wzmocnienia od częstotliwości, dlatego jakość odbieranego sygnału nie jest zbyt wysoka.

Sposób realizacji odbiornika z dyskryminatorem częstotliwości jest pokazany na Rys. 4.2. Jako że sygnał ze źródła jest kwadraturowy, należy zacząć od przesunięcia go do pasma podstawowego. W tym miejscu należy koniecznie zmniejszyć częstotliwość próbkowania, w proporcji minimum 1:5. Próbką sygnału jest nagrana przy częstotliwości próbkowania, 5 MHz, więc bez jej zmniejszenia mogą wystąpić problemy z wykonaniem dalszych operacji w czasie rzeczywistym. Następnie przy pomocy filtru dolnoprzepustowego należy usunąć zakłócenia z sąsiednich kanałów, po czym przesunąć sygnał na częstotliwość pośrednią, gdzie zostanie zrealizowana demodulacja. Szerokość pasma sygnału FM wynosi 200 kHz, częstotliwość graniczną filtru należy ustawić 100 kHz, a częstotliwość podnośną f_p na 300 kHz do 400 kHz.

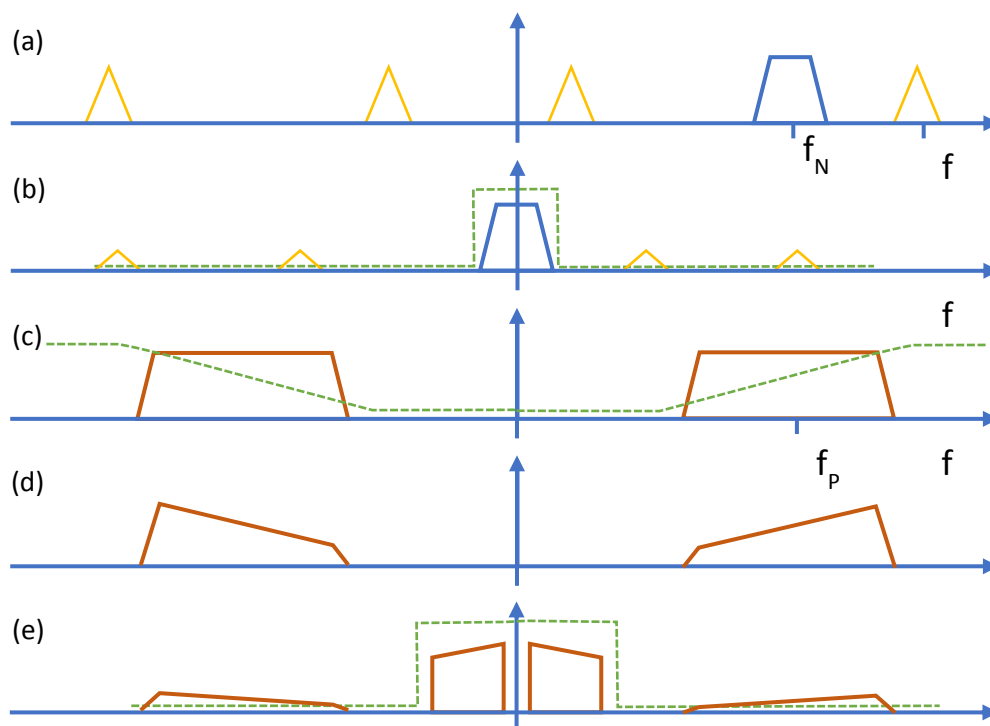


Rysunek 4.2. Schemat odbiornika FM z dyskryminatorem częstotliwości

Demodulator odtwarza działanie układu analogowego, zatem do dalszych operacji wykorzystana zostanie tylko składowa rzeczywista sygnału (blok *Complex to Real*). Demodulator składa się z dyskryminatora częstotliwości i detektora DSB FC. Funkcję dyskryminatora częstotliwości pełni pasmo przejściowe filtru górnoprzepustowego HPF (blok *High Pass Filter*), którego częstotliwość odcięcia powinna być równa sumie częstotliwości podnośnej i połowy szerokości pasma sygnału FM, czyli $f_p + 100$ kHz, natomiast szerokość pasma przejściowego – szerokości pasma sygnału FM, czyli 200 kHz.

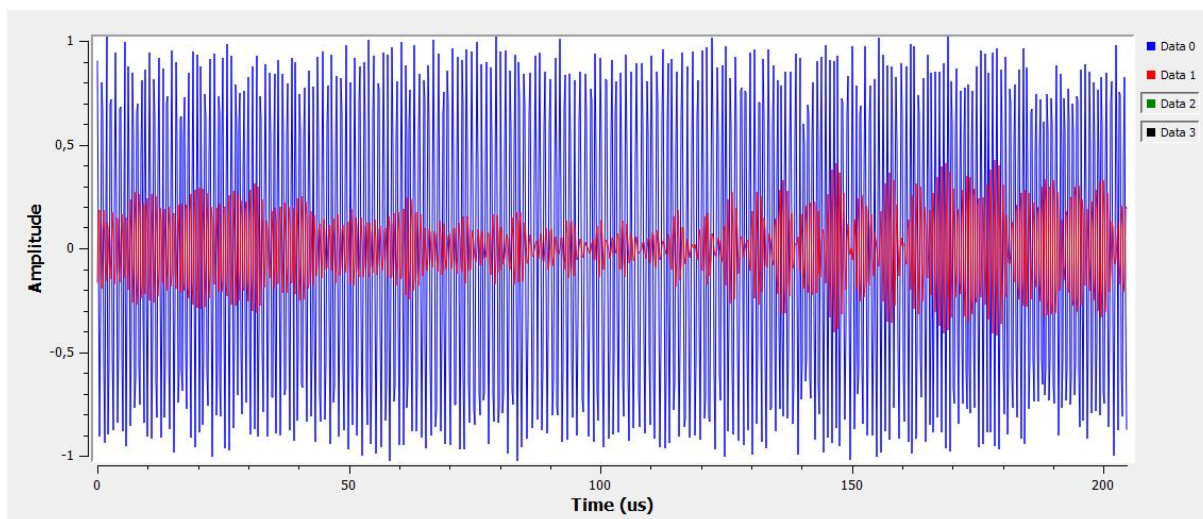
Do demodulacji DSB FC najlepiej wykorzystać detektor wartości średniej, tj. prostownik w postaci bloku Abs oraz filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 15 kHz. Lepsze byłoby użycie filtra pasmowo-przepustowego, który dodatkowo usuwa składową stałą, jednak ze względu na dużą częstotliwość próbkowania i wymaganą dużą stromość zbocza przy dolnej częstotliwości granicznej może być problem z działaniem układu w czasie rzeczywistym. Na koniec należy zadbać o dopasowanie częstotliwości próbkowania do karty dźwiękowej i regulację głośności. Tuż przed blokiem *Audio Sink* można ewentualnie dodać filtr pasmowo-przepustowy, aby usunąć składową stałą (dolna częstotliwość graniczna 50 Hz, górna 15 kHz, pasmo przejściowe 50Hz).

Widma sygnałów na kolejnych etapach działania odbiornika przedstawia Rys. 4.3. Szerokość widma sygnału FM w punkcie (c) jest tylko pozornie większa niż w punktach (a) i (b), a to ze względu na zmianę częstotliwości próbkowania. Widmo sygnału na wyjściu dyskryminatora (d) nie przypomina typowego widma AM, ponieważ ten sygnał jest jednocześnie zmodulowany częstotliwościowo i amplitudowo, co ujawnia się w pełni dopiero na wyjściu detektora wartości średniej.



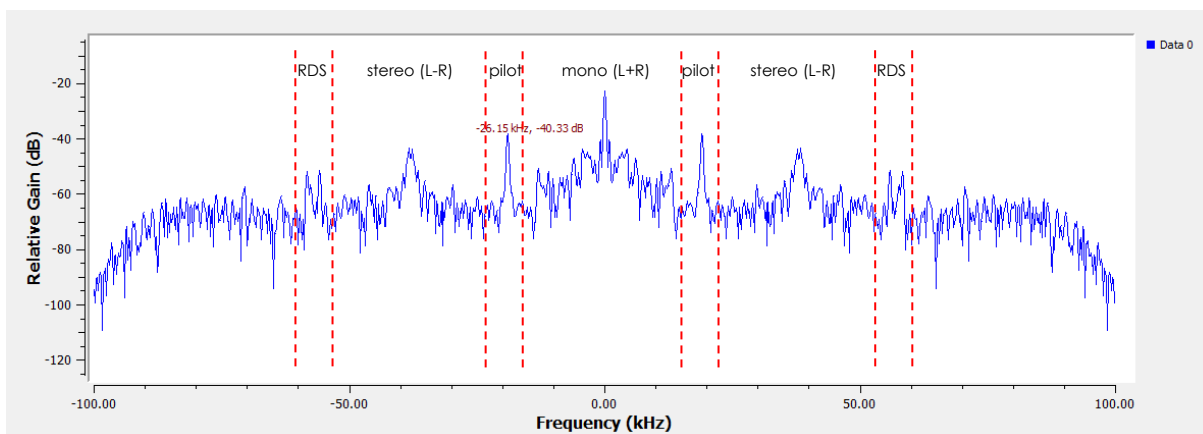
Rysunek 4.3. Widma sygnałów odbiornika FM z dyskryminatorem częstotliwości; (a) nagrana próbka, (b) wyjście LPF (c) wejście dyskryminatora i jego charakterystyka amplitudowa (d) wyjście dyskryminatora (e) wyjście detektora wartości średniej

Skutek działania dyskryminatora częstotliwości ilustruje Rys. 4.4. Sygnał wejściowy dyskryminatora (niebieski) jest zmodulowany częstotliwościowo, natomiast amplitudę ma stałą (małe wahania poziomu obwiedni są pozorne, wynikają z tego, że częstotliwość sygnału jest bliska połowy częstotliwości próbkowania). Z kolei sygnał wyjściowy dyskryminatora (czerwony) jest w dalszym ciągu zmodulowany częstotliwościowo – dyskryminator nie zmienia częstotliwości sygnału – ale jednocześnie jest też zmodulowany amplitudowo, co jest dobrze widoczne na wykresie.



Rysunek 4.4. Sygnał na wejściu dyskryminatora częstotliwości (niebieski) oraz sygnał na jego wyjściu (czerwony), zmodulowany jednocześnie częstotliwościowo i amplitudowo

Widmo sygnału na wyjściu detektora wartości średniej powinno zawierać wszystkie składniki kompozytowego sygnału modulującego – sygnał mono, pilot stereo, sygnał stereo i RDS. Wszystkie są dobrze widoczne (Rys. 4.5), jednak zniekształcenia sygnału są na tyle duże, że nie da się np. zdekodować sygnału RDS czy zbudować odbiornika stereo.



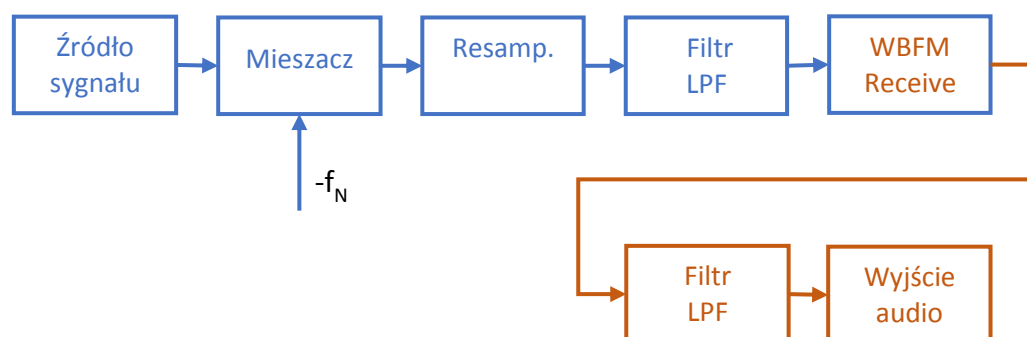
Rysunek 4.5. Widmo sygnału kompozytowego na wyjściu detektora wartości średniej; Do jego przechwycenia użyto dodatkowe elementy, nieuwzględnione w opisie odbiornika

Odbiornik FM z demodulatorem cyfrowym

Cyfrowa demodulacja FM wykorzystuje sygnał kwadraturowy i polega na obliczaniu chwilowej częstotliwości sygnału na podstawie zmian kąta fazowego pomiędzy kolejnymi próbkami sygnału (częstotliwość jest przecież pochodną fazy sygnału). W GRC służy do tego blok *WBFM Receive*.

Sposób realizacji odbiornika FM z demodulatorem cyfrowym jest pokazany na Rys. 4.6 poniżej. Należy zacząć od przesunięcia sygnału ze źródła do pasma podstawowego. W tym miejscu warto zmniejszyć częstotliwość próbkowania, w proporcji przynajmniej 1:5, inaczej mogą wystąpić problemy z wykonaniem dalszych operacji w czasie rzeczywistym. Następnie przy pomocy filtra dolnoprzepustowego należy usunąć zakłócenia z sąsiednich kanałów. Częstotliwość graniczną filtra należy ustawić na 100 kHz.

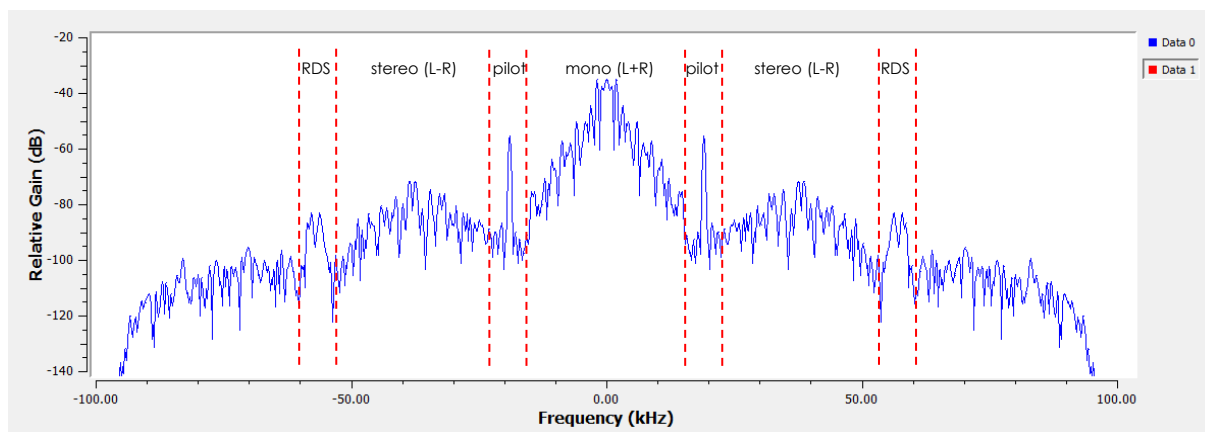
Kolejnym etapem jest demodulacja przy pomocy *WBFM Receive*. Blok ten ma dwa parametry. Pierwszym jest *Quadrature Rate* – należy wpisać częstotliwość próbkowania sygnału podawanego na jego wejście. Drugim jest *Audio decimation*, co oznacza krotność opcjonalnego zmniejszenia częstotliwości próbkowania. Można wpisać wartość 1, ponieważ zmianę częstotliwości próbkowania i tak trzeba zrobić w dalszej części układu, ale można też skorzystać z tej funkcji – w takim przypadku trzeba pamiętać o dwóch kwestiach: wynikowa częstotliwość próbkowania powinna wynosić minimum 200 kHz, a ponadto zmianę jej wartości należy uwzględnić w dalszej części układu, w parametrach bloków znajdujących się za *WBFM Receive*, jak zawsze przy zmianie częstotliwości próbkowania (zob. Rys. 2.5).



Rysunek 4.6. Schemat odbiornika FM z demodulatorem cyfrowym

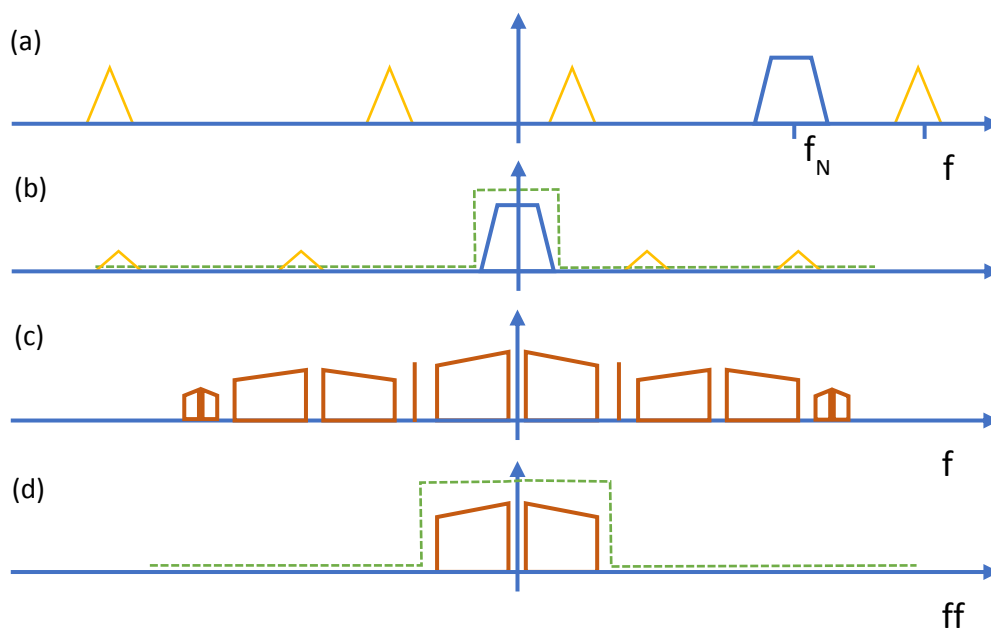
Widmo sygnału na wyjściu *WBFM Receive* powinno zawierać wszystkie składniki kompozytowego sygnału modulującego – sygnał mono, pilot stereo, sygnał stereo i RDS, co zostało pokazane na Rys. 4.7.

Następnie przy pomocy filtra dolnoprzepustowego należy usunąć zbędne elementy sygnału kompozytowego. W dalszej części układu potrzebny będzie tylko sygnał mono, zatem częstotliwość odcięcia filtra należy ustawić 15 kHz. Na koniec należy zadbać o dopasowanie częstotliwości próbkowania do karty dźwiękowej i regulację głośności.



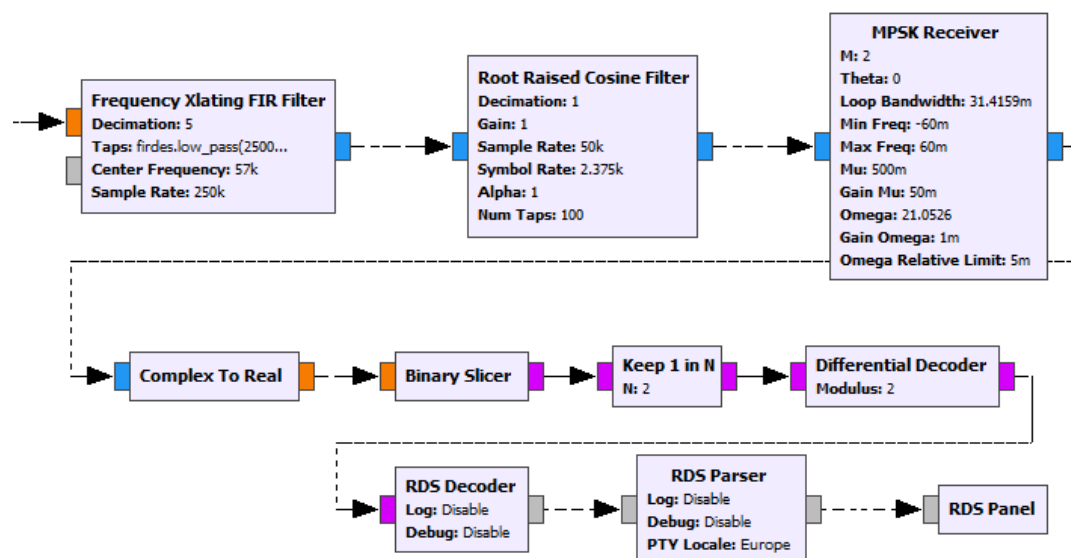
Rysunek 4.7. Widmo sygnału kompozytowego na wyjściu odbiornika FM;
Do jego przechwycenia użyto dodatkowe elementy, nieuwzględnione w opisie odbiornika

Widma sygnałów na kolejnych etapach działania odbiornika przedstawia Rys. 4.8.



Rysunek 4.8. Widma sygnałów odbiornika FM z demodulatorem cyfrowym;
(a) nagrana próbka, (b) wyjście LPF (c) wyjście demodulatora (d) wyjście drugiego LPF

Odbiornik FM z demodulatorem cyfrowym umożliwia odbiór sygnału stereo lub danych systemu RDS. Fragment diagramu GRC z dekodery RDS przedstawiono na Rys. 4.9.



Rysunek 4.9. przykładowa implementacja dekodera RDS