Демодуляция.

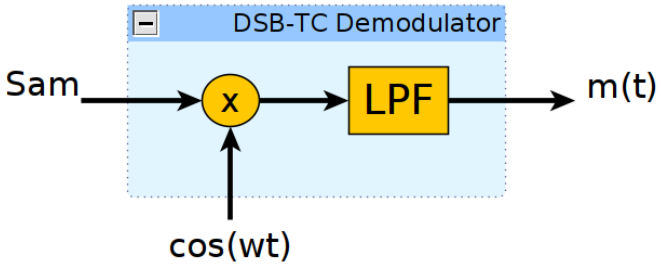
Single Sideband Transmitted Carrier

(AM-SSB-TC)

Для запуска скриптов необходимо корневую папку репозитория сделать рабочей папкой Matlab!

1. Когерентная демодуляция

Рассмотрим когерентный способ демодуляции однополосного АМ-сигнала с передаваемой несущей. Для этого принятый сигнал нужно смешать (перемножить) с колебанием, которое является копией несущей. Затем результат необходимо пропустить через фильтр нижних частот (ФНЧ). Схема когерентного демодулятора представлена ниже:



Для примера рассмотрим USB сигнал. Результаты для LSB получаются таким же образом и отличаются только знаком перед квадратурной частью принимаемого однополосного сигнала. В аналитическом виде описанные выше преобразования можно представить следующим образом. Пусть принятый АМ-сигнал имеет вид:

$$s_{\text{am}}(t) = (\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) - m_H(t) \cdot \sin(2\pi f_c t),$$

где $m(t)$ - информационное сообщение, $m_H(t)$ - преобразование Гильберта от сообщения, A_c - амплитуда несущей, f_c - частота несущей.

После перемножения с гармоничеким сигналом, частота и фаза которого совпадают с несущей, получим:

$$s_{\text{mix}}(t) = [(\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) - m_H(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)] \cdot \cos(2\pi f_c t) =$$

$$(\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - m_H(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \cos(2\pi f_c t).$$

Вспомнив правило произведения косинусов и синусов, можем записать результат умножения в виде:

$$s_{\text{mix}}(t) = \frac{1}{2}(\text{A}_c + m(t)) + \frac{1}{2}m(t) \cdot \cos(2\pi \cdot 2f_c \cdot t) - \frac{1}{2}m_H(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_c \cdot t).$$

Таким образом, сигнал на выходе смесителя явялется суммой инфомационного сообщения, постоянной составляющей, а также сообщения и его преобразования Гильберта на удвоенной частоте несущей $2f_c$. После пропускания данной суммы через ФНЧ, слагаемые на удвоенной частоте исчезнут, и мы получим:

$$s_{\text{LPF}}(t) = \frac{1}{2}m(t) + \frac{1}{2}\text{A}_c.$$

То есть, восстановленный сигнал является масштабированной копией исходного сообщения с дополнительной постоянной составлющей.

Сложность при таком методе демодуляции заключается в том, что колебание в смесителе должно точно совпадать по частоте и фазе с несущей. Очевидно, что на практике генераторы на передающей и приемной сторонах не могут быть абсолютно идентичными. Между ними всегда есть некоторая расстройка. Рассмотрим вляние такого рассогласования на качество демодуляции. Пусть рассогласование по частоте и фазе между колебаниями в смесителе и несущей равны Δf и $\Delta\phi$ соотвветственно. В этом случае на выходе смесителя получим:

$$s_{\text{mix}}(t) = [(\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) - m_H(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)] \cdot \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t + \Delta\phi) =$$

$$= \frac{1}{2}(\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi) - \frac{1}{2}m_H(t) \cdot \sin(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi) + \text{слагаемые } c \text{ удвоенной частотой.}$$

После ФНЧ слагаемое на удвоенной частоте исчезнет:

$$s_{\text{LPF}}(t) = \frac{1}{2}(\text{A}_c + m(t)) \cdot \cos(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi) - \frac{1}{2}m_H(t) \cdot \sin(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi).$$

Таким образом, как и для случая DSB сигнала, восстановленное сообщения будет масштабиравано на множитель $\cos(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi)$, амплитуда которого изменятся с частотой, равной расстройке по частоте. По мимо это после фильтрации останется еще одно слагаемое, равное $\frac{1}{2}m_H(t) \cdot \sin(2\pi\Delta\text{ft} + \Delta\phi)$, которое также будет вносить искажение в восстановленное сообщение.

Ниже представлен скрипт, который демонстрирует когерентный метод демодуляции для аудиосообщения на несущей частоте 60кГц. С помощью переменных FreqOffset и PhaseOffset можно задать расстройку по частоте и фазе и на слух оценить оскажения сигнала. Переменная ModulationMethod задает вид модуляции (USB или LSB).

```
clc; clear; close all;
addpath('matlab/DSB_SC');

SignalFrameSize = 10000;  % количество отсчетов Ам-сигнала, получаемых за один раз
FramesNumber = 500;       % число обрабатываемых пачек данных
AudioAmp = 3;             % коэффициент усиления аудиосигнала
RateRatio = 10;           % коэффициент увеличения частоты дискретизации
Fc = 60e3;                % частота несущей

FreqOffset = 0;             % расстройка по частоте (Hz)
PhaseOffset = 0 * pi/180;   % расстройка по фазе (градусы)

% выбор метода модуляции
ModulationMethod = "LSB";
```

```
% выбор амплитуды несущей
CarrierAmpValue = "Low";

% объект для считываения отсчетов аудиофайла
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_High_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_High_Amp.wav';
end

AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    WaveFileName, ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );

% дополнительные расчеты
SignalFs = AudioReader.SampleRate;              % получаем частоту дискретизации модулированного сигнала
AudioFs = SignalFs / RateRatio;                 % частота дискретизации аудиосообщения

% генератор несущей
Carrier = dsp.SineWave(...
    'SampleRate', SignalFs,...
    'SamplesPerFrame', SignalFrameSize,...
    'Frequency', Fc + FreqOffset,...
    'PhaseOffset', pi/2 + PhaseOffset...
    );

% расчет коэффициентов фильтра нижних частот
H = Audio_Lowpass_FIR_Coeff();

% создание объекта для фильтрации
LowpassFIR = dsp.FIRFilter(H.Numerator);

% дециматор
DownSampler = dsp.SampleRateConverter(...
    'Bandwidth', 40e3, ...
    'InputSampleRate', SignalFs, ...
    'OutputSampleRate', AudioFs ...
    );

% объект для вычисления спектра
SpecEstimator = dsp.SpectrumEstimator(...
    'PowerUnits','dBm',...
    'FrequencyRange','centered',...
    'SampleRate',SignalFs);

% объект для отрисовки графиков
```

```
Plotter = dsp.ArrayPlot(...
    'PlotType','Line', ...
    'XOffset', -SignalFs/2, ...
    'YLimits', [-90, 35], ...
    'XLabel', 'Frequency (Hz)', ...
    'YLabel', 'Amplitude (dBm)', ...
    'ChannelNames', {'AM Signal', 'Mixed Signal', 'Filtered Signal'}, ...
    'SampleIncrement', SignalFs/SignalFrameSize ...
    );

Message = [];

% запуск симуляции
for i = 1:FramesNumber
    % считывание отсчетов АМ-сигнала и выделение синфазного канала
    AmSignal = AudioReader();
    AmSignal = AmSignal(:,1);

    % смешивание АМ-сигнала и несущей
    MixedSignal = AmSignal .* Carrier();

    % фильтрация сигнала
    BasebandSignal = LowpassFIR(MixedSignal);

    % понижение частоты дискретизации
    Message = [Message; AudioAmp * DownSampler(BasebandSignal)];

    % вычисление спектров
    SpectrumData = SpecEstimator([AmSignal MixedSignal BasebandSignal]);

    % вывод результатов на график
    Plotter(SpectrumData)

    % задержка в 0.1 секунды для лучшей визуализации
    pause(0.01)
end
```

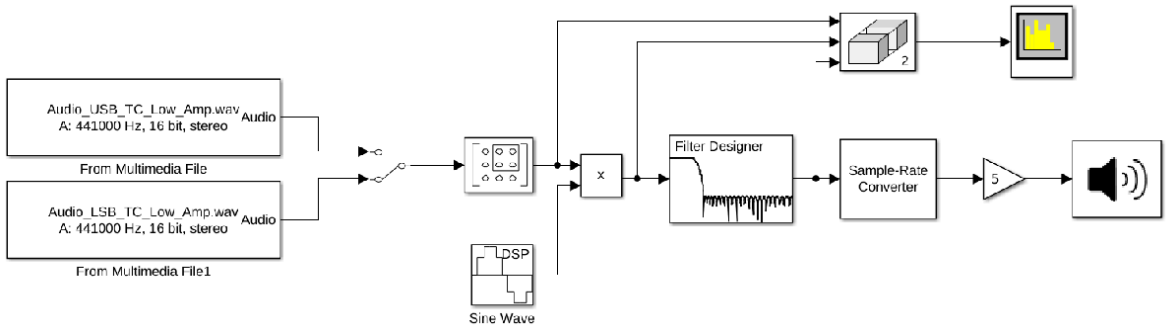
Выше представлены преобразования в частотной области. Желтым цветом обозначен спектр принимаемого однополосного сигнала. Синим - спектр на выходе смесителя. Можно увидеть, что он состоит из информационного сообщения и спектральных составляющих на удвоенной частоте несущей. После фильтрации остается только информационное сообщение (красный цвет).

```
% проигрывание полученного сообщения
sound(Message, AudioFs);
```

На слух можно оценить искажения аудиосигнала из-за рассогласования по фазе и частоте. В отличие от DSB сигнала при расстройке по фазе сигнал слышится также хорошо, и он не искажен. Это связано с тем, что теперь в сигнале после фильтрации присутствует слагаемое $\frac{1}{2} m_H(t) \cdot \sin(2\pi \Delta \mathrm{ft} + \Delta\phi)$. Пусть расстройка по частоте равна нулю. При нулевой расстройке по фазе оно равно нулю, и возвращается при увеличении расстройки. То есть, при уменьшении слагаемого с сообщением, слагаемое с его преобразованием Гильберта растет, и наоборот.

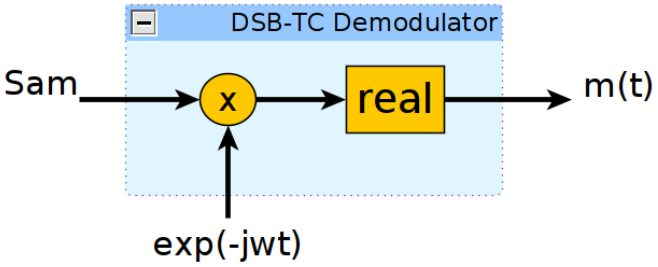
Сигналы $m(t)$ и $m_H(t)$ имеют одинакове амплитудные спектры и различаются лишь фазой. Так как человеческий слух реагирует как раз на амплитудный спектр, для нас эти сигналы кажутся одинаковыми. Расстройка по частоте приводит к ухудшению качества и появлению свистящих звуков.

В файле *SSB_TC_Receiver_1.slx* представлена Simulink модель когерентного демодулятора, который ранее был реализован ввиде скрипта. С помощью переключателя можно выбирать между USB и LSB сигналами.



2. Когерентная демодуляция при квадратурном приеме

В случае, когда прием однополостного сигнала осуществляется квадратурным способом (например почти во всех SDR-приемниках), структуру когерентного демодулятора можно упростить:



То есть, принятый однополосный сигнал, который является комплексным, нужно умножить на мнимую экспоненту, а потом просто выделить действительную часть.

Опять же для примера рассмотрим случай USB сигнала. В аналитическом виде описанные выше преобразования можно представить следующим образом. Пусть принятый однополосный сигнал имеет вид:

$$s_{\text{am}}(t) = [m_A(t) + \text{A}_c] \cdot e^{j2\pi f_c t},$$

где, как и ранее, $m_A(t) = m(t) + j \cdot m_H(t)$ - аналитический сигнал, $m(t)$ - информационное сообщение, $m_H(t)$ - преобразование Гильберта от сообщения, A_c - амплитуда несущей, f_c - частота несущей.

После умножения на мнимую экспоненту, частота и фаза которой совпадает с несущей, получим:

$$s_{\text{mix}}(t) = [m_A(t) + \text{A}_c] \cdot e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{-j2\pi f_c t} = m_A(t) + \text{A}_c = m(t) + \text{A}_c + j \cdot m_H(t).$$

Выделение действительной части приведет к восстановлению информационного сообщения с остаточной постоянной составляющей:

$$\text{Re}\{s_{\text{mix}}(t)\} = m(t) + \text{A}_c.$$

Теперь рассмотрим, что произойдет при наличие раастройки по фазе и частоте. Сигнал на выходе смесителя можно представить в виде:

$$s_{\text{mix}}(t) = [m_A(t) + \text{A}_c] \cdot e^{2\pi f_c t} \cdot e^{-2\pi (f_c + \Delta f)t - \Delta\phi} = [m_A(t) + \text{A}_c] \cdot e^{-2\pi \Delta \text{ft} - \Delta\phi}.$$

После вычисления действительной части получим:

$$\text{Re}\{s_{\text{mix}}(t)\} = (m(t) + \text{A}_c) \cdot \cos(2\pi \Delta \text{ft} + \Delta\phi) - m_H(t) \cdot \sin(2\pi \Delta \text{ft} + \Delta\phi).$$

Данный результат совпадает с формулой, полученной в предыдущем разделе. Соответственно наличие расстройки по частоте и фазе будет приводить к аналогиным искажениям.

Ниже представлен скрипт для реализации когерентной демодуляции в случае квадратурного приема. С помощью переменных FreqOffset и PhaseOffset можно задать расстройку по частоте и фазе и на слух оценить оскажения сигнала. Переменная ModulationMethod задает вид модуляции (USB или LSB).

```
clc; clear; close all;

SignalFrameSize = 10000;  % количество отсчетов Ам-сигнала, получаемых за один раз
FramesNumber = 500;       % число обрабатываемых пачек данных
AudioAmp = 2;             % коэффициент усиления аудиосигнала
RateRatio = 10;           % коэффициент увеличения частоты дискретизации
Fc = 60e3;                % частота несущей

FreqOffset = 0;             % расстройка по частоте (Hz)
PhaseOffset = 0 * pi/180;   % расстройка по фазе (градусы)

% выбор метода модуляции
ModulationMethod = "LSB";

% выбор амплитуды несущей
CarrierAmpValue = "Low";

% объект для считываения отсчетов аудиофайла
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_High_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_High_Amp.wav';
end

AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    WaveFileName, ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );

% дополнительные расчеты
SignalFs = AudioReader.SampleRate;              % получаем частоту дискретизации модулированного сигнала
AudioFs = SignalFs / RateRatio;                 % частота дискретизации аудиосообщения
```

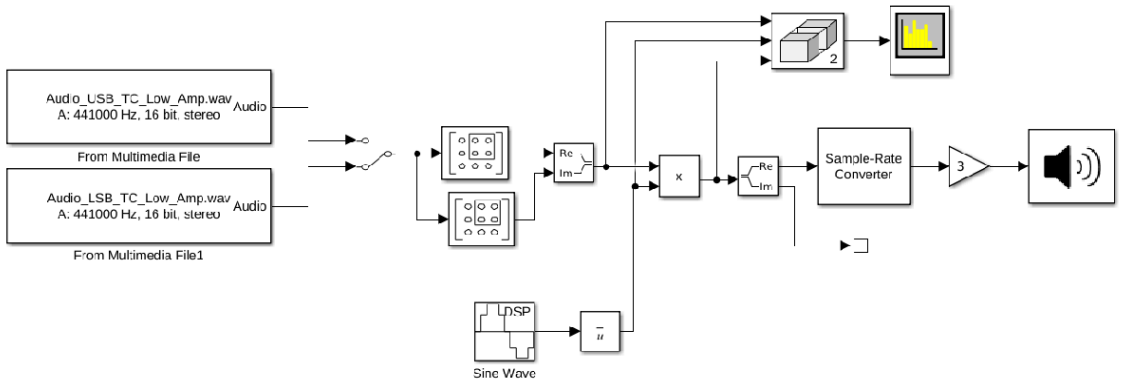
```
% генератор несущей
Carrier = dsp.SineWave(...
    'SampleRate', SignalFs,...
    'SamplesPerFrame', SignalFrameSize,...
    'Frequency', [Fc + FreqOffset, Fc + FreqOffset],...
    'PhaseOffset', [pi/2 + PhaseOffset, PhaseOffset]...
    );

% дециматор
DownSampler = dsp.SampleRateConverter(...
    'Bandwidth', 40e3, ...
    'InputSampleRate', SignalFs, ...
    'OutputSampleRate', AudioFs ...
    );

% объект для вычисления спектра
SpecEstimator = dsp.SpectrumEstimator(...
    'PowerUnits','dBm',...
    'FrequencyRange','centered',...
    'SampleRate',SignalFs);

% объект для отрисовки графиков
Plotter = dsp.ArrayPlot(...
    'PlotType','Line', ...
    'XOffset', -SignalFs/2, ...
    'YLimits', [-90, 35], ...
    'XLabel', 'Frequency (Hz)', ...
    'YLabel', 'Amplitude (dBm)', ...
    'ChannelNames', {'AM Signal', 'Carrier', 'Mixed Signal'}, ...
    'SampleIncrement', SignalFs/SignalFrameSize ...
    );

Message = [];

% запуск симуляции
for i = 1:FramesNumber
    % считывание отсчетов АМ-сигнала и формирование комплексного сигнала
    AmSignal = AudioReader();
    AmSignal = AmSignal(:,1) + 1j*AmSignal(:,2);

    % получение несущей
    CarrierWave = Carrier();
    CarrierWave = CarrierWave(:,1) - 1j*CarrierWave(:,2);

    % смешивание АМ-сигнала и несущей
    MixedSignal = AmSignal .* CarrierWave;
    MixedSignal = real(MixedSignal);

    % понижение частоты дискретизации
    Message = [Message; AudioAmp*DownSampler(MixedSignal)];

    % вычисление спектров
    SpectrumData = SpecEstimator([AmSignal CarrierWave MixedSignal]);
```

```
    % вывод результатов на график
    Plotter(SpectrumData)

    % задержка в 0.1 секунды для лучшей визуализации
    pause(0.01)
end
```

Выше представлены преобразования в частотной области. Желтым цветом обозначен спектр принимаемого однополосного сигнала. Так как прием квадратурный, спектр сигнала комплексный и расположен только в положительной области частот. Синим цветом представлена мнимая экспонента, а красным - сигнал на выходе смесителя.

```
% проигрывание полученного сообщения
sound(Message, AudioFs);
```

В файле *SSB_TC_Receiver_2.slx* представлена Simulink модель когерентного демодулятора в квадратурном случае. С помощью переключателя можно выбирать между USB и LSB сигналами.



3. Некогерентная демодуляция однополосного сигнала с передаваемой несущей

При определенных условиях для приема однополосного сигнала можно использовать некогерентный метод демодуляции. Рассмотрим, однополосный сигнал в случае квадрвтурного приема:

$$s_{\text{am}}(t) = [m_A(t) + \text{A}_c] \cdot e^{-j2\pi f_c t} = [m(t) + \text{A}_c + j \cdot m_H(t)] \cdot e^{j2\pi f_c t} = E(t) \cdot e^{j \cdot (2\pi f_c t + \theta(t))},$$

где $E(t)$ - модуль принимаемого комплексного сигнала, $\theta(t)$ - фаза сигнала.

Модуль принятого сигнала также можно представить в следующем виде:

$$E(t) = \sqrt{(\text{A}_c + m(t))^2 + m_H^2(t)} = \text{A}_c \cdot \sqrt{1 + \frac{2m(t)}{\text{A}_c} + \frac{m^2(t)}{A_c^2} + \frac{m_H^2(t)}{A_c^2}}.$$

Если увеличивать амплитуду несущей, то слагаемые, в которых A_c^2 стоит в знаменателе, будут уменьшаться быстрее, чем два других слагаемых. Таким образом, если A_c много больше $m^2(t)$ и $m_H^2(t)$, можем записать приближенное равенство:

$$E(t) \approx \text{A}_c \cdot \sqrt{1 + \frac{2m(t)}{\text{A}_c}}.$$

Далее, разложив корень из числа в ряд Тейлора и оставив только первые два слагаемых, получим:

$$E(t) \approx \text{A}_c \cdot \left(1 + \frac{m(t)}{\text{A}_c}\right) = \text{A}_c + m(t).$$

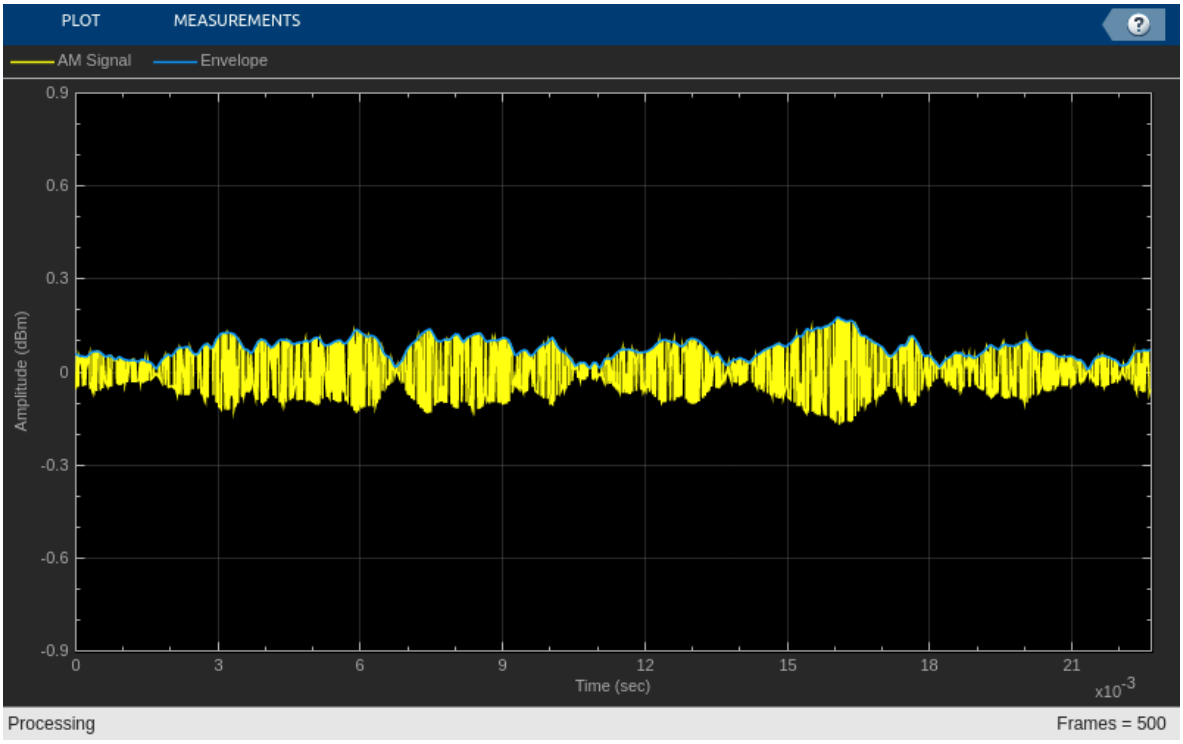
То есть, огибающая сигнала совпадает с информационным сообщением с добавленной постоянной составляющей. Отметим важную разницу. Для случая DSB TC, чтобы использовать некогерентный метод приема необходимо выполнение условия $\text{A}_c \geq \max\{m(t)\}$. В этом случае огибающая будет совпадать с информационным сообщением. Для SSB TC требования более жесткие: $\text{A}_c >> \max\{m(t)\}$. То есть, амплитуда огибающей должна существенно превышать максимальное значение информационного сообщения.

Ниже представлен скрипт, выполняющий некогерентный прием SSB TC сигнала. Изменяя переменную CarrierAmpValue, можно управлять амплитудой несущей.

```
clc; clear; close all;

SignalFrameSize = 10000;  % количество отсчетов Ам-сигнала, получаемых за один раз
FramesNumber = 500;       % число обрабатываемых пачек данных
RateRatio = 10;           % коэффициент увеличения частоты дискретизации

% выбор метода модуляции
ModulationMethod = "LSB";

% выбор амплитуды несущей
CarrierAmpValue = "Low";

% объект для считываения отсчетов аудиофайла
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "Low")
```

```
    AudioAmp = 3;
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "High")
    AudioAmp = 1;
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_High_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "Low")
    AudioAmp = 3;
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "High")
    AudioAmp = 1;
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_High_Amp.wav';
end

AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    WaveFileName, ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );

% дополнительные расчеты
SignalFs = AudioReader.SampleRate;              % получаем частоту дискретизации модулированного сигнала
AudioFs = SignalFs / RateRatio;                 % частота дискретизации аудиосообщения

% дециматор
DownSampler = dsp.SampleRateConverter(...
    'Bandwidth', 40e3, ...
    'InputSampleRate', SignalFs, ...
    'OutputSampleRate', AudioFs ...
    );

% объект для отрисовки графиков
Plotter = dsp.ArrayPlot(...
    'PlotType','Line', ...
    'YLimits', [-0.9, 0.9], ...
    'XLabel', 'Time (sec)', ...
    'YLabel', 'Amplitude (dBm)', ...
    'ChannelNames', {'AM Signal', 'Envelope'}, ...
    'SampleIncrement', 1/SignalFs ...
    );

Message = [];

% запуск симуляции
for i = 1:FramesNumber
    % считывание отсчетов АМ-сигнала и формирование комплексного сигнала
    AmSignal = AudioReader();
    AmSignal = AmSignal(:,1) + 1j*AmSignal(:,2);

    % вычисление амплитуды сигнала
    AbsAmSignal = abs(AmSignal);

    % понижение частоты дискретизации
```

```
    Message = [Message; AudioAmp*DownSampler(AbsAmSignal)];

    % вывод результатов на график
    Plotter([AudioAmp*real(AmSignal) AudioAmp*AbsAmSignal])

    % задержка в 0.1 секунды для лучшей визуализации
    pause(0.01)
end
```



Выше представлены временные диаграммы сигналов на входе (желтый цвет, действительная составляющая) и выходе (синий цвет) демодулятора.

```
% проигрывание полученного сообщения
sound(Message, AudioFs);
```

На слух можно обнаружить, что при меньшем значении амплитуды несущей в востановленном сигнале присутствуют искажения. При большем значении переменной CarrierAmpValue, сообщение восстанавливается без искажений.

4. Когерентная демодуляция с помощью фазовой автоподстройки частоты

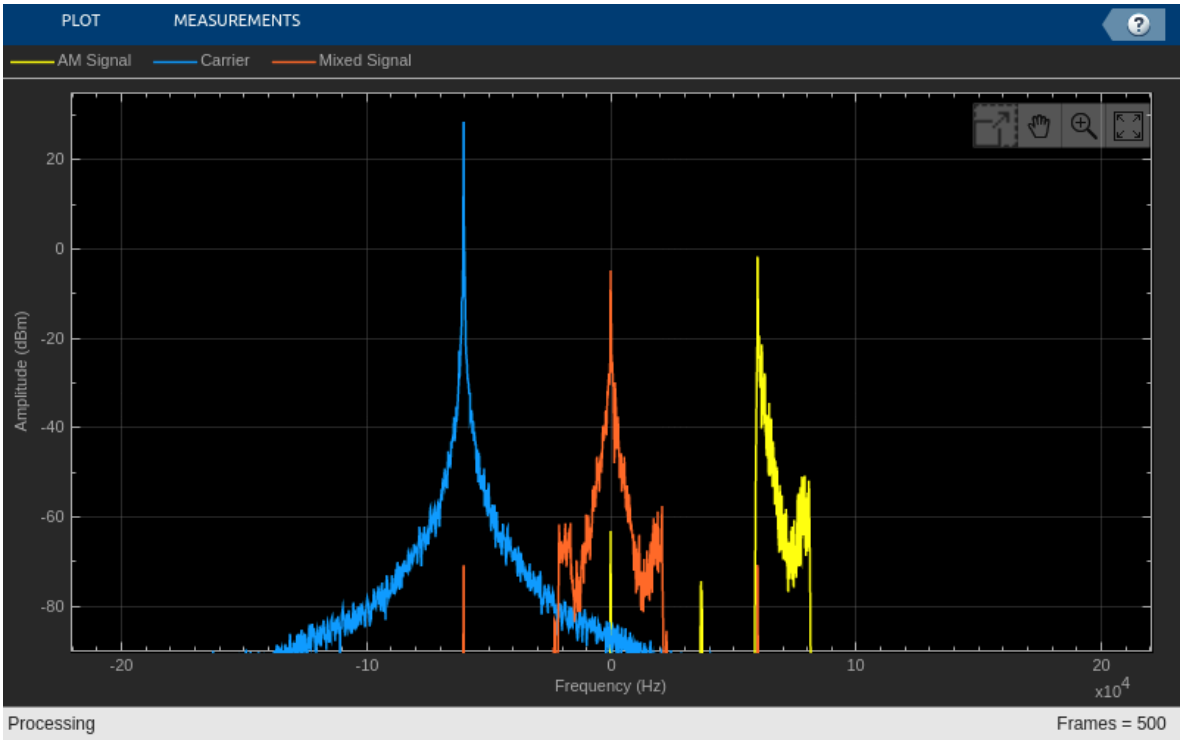
Рассмотренный в DSB TC Receiver Part 2 способ востановления несущей с помощью PLL также можно применить для SSB TC сигнала.

Убедимся в этом для случая квадратурного приема. Воспользуемся тем же скриптом, который рассматривается в DSB TC Receiver Part 2. Скрипт представлен ниже:

```
clc; clear; close all;
addpath('matlab/DSB_TC');
```

```
SignalFrameSize = 10000;  % количество отсчетов Ам-сигнала, получаемых за один раз
FramesNumber = 500;       % число обрабатываемых пачек данных
AudioAmp = 1;             % коэффициент усиления аудиосигнала
RateRatio = 10;           % коэффициент увеличения частоты дискретизации
Fc = 60e3;                % частота несущей

% расстройка по частоте (Hz)
FreqOffset = 1000;

% выбор метода модуляции
ModulationMethod = "USB";

% выбор амплитуды несущей
CarrierAmpValue = "Low";

% объект для считываения отсчетов аудиофайла
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "USB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_USB_TC_High_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "Low")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_Low_Amp.wav';
end
if (ModulationMethod == "LSB" && CarrierAmpValue == "High")
    WaveFileName = 'wav/Audio_LSB_TC_High_Amp.wav';
end

AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    WaveFileName, ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );

% дополнительные расчеты
SignalFs = AudioReader.SampleRate;              % получаем частоту дискретизации модулированного сигнала
AudioFs = SignalFs / RateRatio;                 % частота дискретизации аудиосообщения

% фапч для восстановления несущей
AmPLL = AmComplexPLL( ...
    'SampleFrequency', SignalFs, ...
    'NoiseBandwidth', 100, ...
    'Dampingfactor', 0.7, ...
    'CentralFrequency', Fc + FreqOffset ...
    );

% дециматор
DownSampler = dsp.SampleRateConverter(...
    'Bandwidth', 40e3, ...
    'InputSampleRate', SignalFs, ...
    'OutputSampleRate', AudioFs ...
    );

% объект для вычисления спектра
```

```
SpecEstimator = dsp.SpectrumEstimator(...
    'PowerUnits','dBm',...
    'FrequencyRange','centered',...
    'SampleRate',SignalFs);

% объект для отрисовки графиков
Plotter = dsp.ArrayPlot(...
    'PlotType','Line', ...
    'XOffset', -SignalFs/2, ...
    'YLimits', [-90, 35], ...
    'XLabel', 'Frequency (Hz)', ...
    'YLabel', 'Amplitude (dBm)', ...
    'ChannelNames', {'AM Signal', 'Carrier', 'Mixed Signal'}, ...
    'SampleIncrement', SignalFs/SignalFrameSize ...
    );

Message = [];

% запуск симуляции
for i = 1:FramesNumber
    % считывание отсчетов АМ-сигнала и формирование комплексного сигнала
    AmSignal = AudioReader();
    AmSignal = AmSignal(:,1) + 1j*AmSignal(:,2);

    % восстанавливаем несущую
    [Carrier, Offset] = AmPLL(AmSignal);

    % смешивание АМ-сигнала и несущей
    MixedSignal = AmSignal .* conj(Carrier);
    MixedSignal = real(MixedSignal);

    % понижение частоты дискретизации
    Message = [Message; AudioAmp*DownSampler(MixedSignal)];

    % вычисление спектров
    SpectrumData = SpecEstimator([AmSignal conj(Carrier) MixedSignal]);

    % вывод результатов на график
    Plotter(SpectrumData)

    % задержка в 0.1 секунды для лучшей визуализации
    pause(0.01)
end
```



Выше представлены сигналы в частотной области. Желтым цветом обозначен спектр принимаемого однополосного сигнала. Синим цветом обозначен сигнал на выходе NCO PLL, а красным - сигнал на выходе смесителя. В зависимости от амплитуды несущей спектр на выходе NCO будет уже или шире. Очевидно, что чем больше амплитуда несущей, тем проще PLL за нее зацепиться и тем лучше выполняется синхронизация.

```
% проигрывание полученного сообщения
sound(Message, AudioFs);
```

На слух также можно обнаружить, что информационное сообщение восстанавливается без искажений.

Литература:

1. B. P. Lathi Modern Digital and Analog Communication Systems
2. R. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson, L. Crockett Software Defined Radio using MATLAB® & Simulink and the RTL-SDR