Демодуляция. Часть 3.

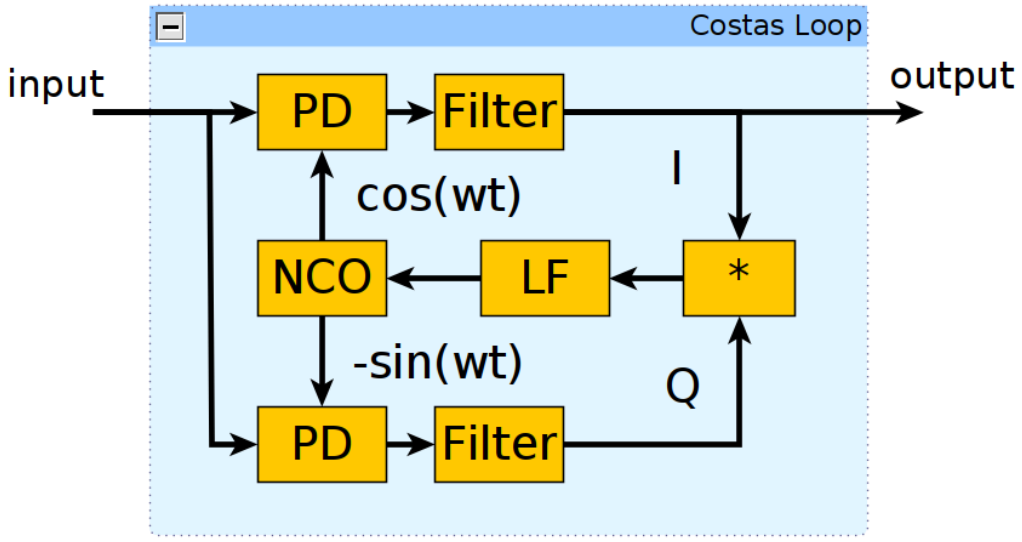
Double Sideband Suppressed Carrier

(AM-DSB-SC)

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

1. Когерентная демодуляция с помощью схемы Костаса

Наиболее популярный метод приема AM-сигнала с подавленной несущей заключается в использовании схемы Костаса (Costas Loop). Схема приемного устройства представлена ниже:



Принцип работы схемы Костаса совпадает с обычной PLL. Сигнал поступает на фазовый детектор PD, где вычисляется расстройка по фазе между несущей и управляемым генератором (NCO). Петлевой фильтр задает динамику системы и убирает лишние шумы.

В отличие от обычной PLL в схеме Костаса используется два фазовых детектора, после которых стоят фильтры нижних частот. Также NCO формирует сразу два гармонических сигнала: $\cos(\Phi_e)$ и $-\sin(\Phi_e)$. Разберемся как данная схема работает.

Пусть принятый AM-сигнал имеет вид:

$$s_{\text{am}}(t) = m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t),$$

где $m(t)$ - информационное сообщение, f_c - частота несущей. Как было сказано в DSB SC Receiver Part 2 изменение знака информационного сообщения $m(t)$ будет приводить к появлению качков фазы несущей на 180 градусов, что негативно скажется на качестве синхронизации. Чтобы избавится от скачков фазы, необходимо сделать так, чтобы амплитуда несущей не изменяла знак.

В схеме Костаса есть две ветви: синфазная (I) и квадратурная (Q). В синфазной ветви AM-сигнал смешивается с $\cos(\Phi_г)$, где $\Phi_г(t_0) = \Phi_c(t_0) - \Delta$, $\Phi_c(t_0)$ - фаза несущей, Δ - расстройка по фазе. В результате получаем:

$$s_I(t) = m(t) \cdot \cos(\Phi_c(t_0)) \cdot \cos(\Phi_г(t_0)) = m(t) \cdot 0.5 \cdot \cos(\Delta) + m(t) \cdot 0.5 \cdot \cos(2\Phi_c(t_0) - \Delta).$$

Квадратурная ветвь умножается на $-\sin(\Phi_г)$. Выход фазового детектора для этой ветви равен:

$$s_Q(t) = m(t) \cdot \cos(\Phi_c(t_0)) \cdot -\sin(\Phi_c(t_0) - \Delta) = m(t) \cdot 0.5 \cdot \sin(\Delta) - m(t) \cdot 0.5 \cdot \sin(2\Phi_c(t_0) - \Delta).$$

После фильтрации сигналы на удвоенной частоте исчезнут, и мы получим:

$$s_{\text{Filtered } I}(t) = m(t) \cdot 0.5 \cdot \cos(\Delta), \quad s_{\text{Filtered } Q}(t) = m(t) \cdot 0.5 \cdot \sin(\Delta).$$

Далее сигналы синфазной и квадратурной ветвей перемножаются, и результат подается на вход петлевого фильтра:

$$s_{\text{LF}}(t) = m^2(t) \cdot 0.25 \cdot \cos(\Delta) \cdot \sin(\Delta) = m^2(t) \cdot 0.125 \cdot \sin(2\Delta).$$

Таким образом, вход петлевого фильтра не изменяет знак при изменении знака информационного сообщения. В результате преобразований мы опять получаем возведение информационного сообщения в квадрат. Если приемник находится в режиме синхронизации, то есть, когда расстройка по фазе мала, то $\sin(2\Delta) \approx 2\Delta$. Таким образом, вход петлевого фильтра пропорционален расстройке по фазе. Также при синхронизации фильтрованный сигнал синфазной ветви будет иметь вид:

$$s_{\text{Filtered } I}(t) = m(t) \cdot 0.5 \cdot \cos(\Delta) \approx m(t) \cdot 0.5 \cdot 1,$$

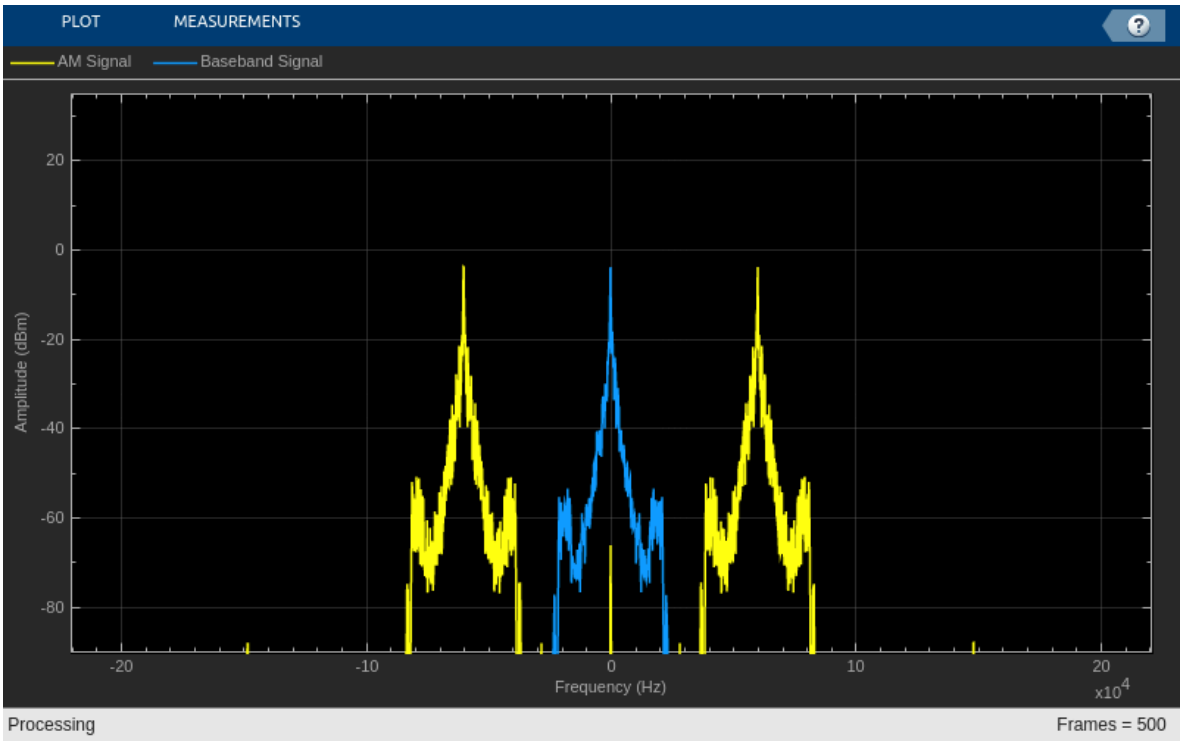
где учтено, что при малых значениях Δ, $\cos(\Delta) \approx 1$. Значит, при синхронизации синфазная ветвь будет содержать восстановленное информационное сообщение.

Для реализации всех рассмотренных выше преобразований был создан Matlab System Object, описание которого находится в файле CostasAmSignalPLL.m. Ниже представлен скрипт, выполняющий когерентный прием сигнала с амплитудной модуляцией с подавленной несущей. С помощью переменной FreqOffset можно изменять расстройку между частотой несущей и начальной частотой управляемого генератора.

```
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

% расстройка по частоте (Hz)
FreqOffset = 1000;

% объект для считываения отсчетов аудиофайла
AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    'wav/Audio_DSB_SC.wav', ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );
```

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

% фапч для восстановления несущей
% параметры фапч зависят от амплитуды входного сигнала
% его амплитуда меняется поэтому берем среднее значение, равное 0.27
CostasPLL = CostasAmSignalPLL( ...
    'SampleFrequency', SignalFs, ...
    'NoiseBandwidth', 100, ...
    'Dampingfactor', 0.7, ...
    'CentralFrequency', Fc + FreqOffset, ...
    'SignalAmp', 0.0012 ...
    );

% 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', 'Baseband Signal'}, ...
    'SampleIncrement', SignalFs/SignalFrameSize ...
    );

Message = [];

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

    % восстанавливаем несущую
    [BasebandSignal, Offset] = CostasPLL(AmSignal);

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

```
    % вычисление спектров
    SpectrumData = SpecEstimator([AmSignal BasebandSignal]);
kd = 1;
    % вывод результатов на график
    Plotter(SpectrumData)

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



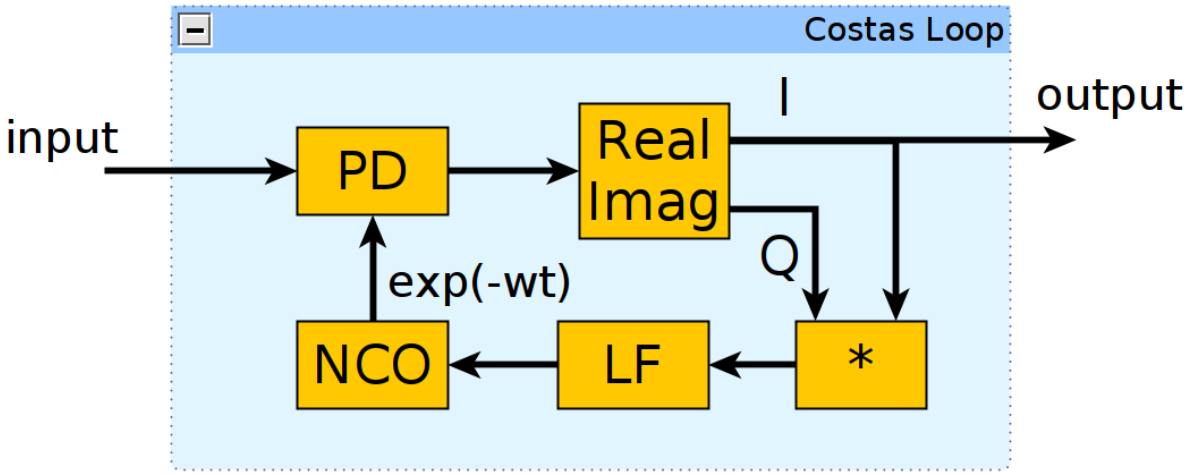
Выше представлены преобразования в частотной области. Желтым обозначен спектр принимаемого АМ-сигнала. После схемы Костаса имеем восстановленное информационное сообщение (синий).

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

На слух можно оценить искажения при восстановлении информационного сообщения. Как и для случая возвдения сигнала в квадрат, для не слишком больших расстроек по частоте сообщение восстанавливается без икажений.

2. Когерентная демодуляция с помощью схемы Костаса при квадратурном приеме

Рассмотрим особенности реализации схемы Костаса в случае квадратурного приема. Во много схема совпадает со случаем действительного сигнала. Однако есть и отличия. Теперь NCO также формирует комплексный сигнал. После фазового детектора отсутствует фильтр, и есть блок разделяющий комплексный сигнал на синфазную и квадратурную ветви. Схема приемного устройства представлена ниже:



Рассмотрим принцип работы схемы Костаса для квадратурного приема. Сигнал теперь комплексный с односторонним спектром и представлен в виде:

$$s_{\text{am}}(t) = m(t) \cdot e^{j \cdot 2\pi f_c t},$$

где $m(t)$ - информационное сообщение, f_c - частота несущей. После умножения на комплексную экспоненту с выхода NCO получим:

$$s_{\text{PD}}(t) = m(t) \cdot e^{j \cdot \Delta}.$$

где Δ - расстройка по фазе между несущей и управляемым генератором. Далее формируются сигналы синфазного и квадратурного каналов, которые совпадают с действительной и мнимой частью выхода фвзового детектора. После перемножения каналов получаем, что сигнал на входе петлевого фильтра равен:

$$s_{\text{LF}}(t) = m^2(t) \cdot \text{Re}\{e^{j \cdot \Delta}\} \cdot \text{Im}\{e^{j \cdot \Delta}\} = m^2(t) \cdot \cos(\Delta) \cdot \sin(\Delta) = m^2(t) \cdot 0.5 \cdot \sin(2\Delta).$$

То есть сигнал для петлевого фильтра с точностью до масштабирующего множителя совпадает с сигналом для ранее рассмотренного действительного случая. При синхронизации в синфазной ветви появится восстановленное информационное сообщение.

Для реализации всех рассмотренных выше преобразований был создан Matlab System Object, описание которого находится в файле CostasAmSignalComplexPLL.m. Ниже представлен скрипт, выполняющий когерентный прием сигнала с амплитудной модуляцией с подавленной несущей. С помощью переменной FreqOffset можно изменять расстройку между частотой несущей и начальной частотой управляемого генератора.

```
clc; clear; close all;

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;
```

```
% объект для считываения отсчетов аудиофайла
AudioReader = dsp.AudioFileReader(...
    'wav/Audio_DSB_SC.wav', ...
    'SamplesPerFrame',SignalFrameSize...
    );

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

% фапч для восстановления несущей
CostasPLL = CostasAmComplexPLL( ...
    'SampleFrequency', SignalFs, ...
    'NoiseBandwidth', 100, ...
    'Dampingfactor', 0.7, ...
    'CentralFrequency', Fc + FreqOffset, ...
    'SignalAmp', 0.0012 ...
    );

% 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', 'Baseband 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
    [BasebandSignal, Offset] = CostasPLL(AmSignal);
```

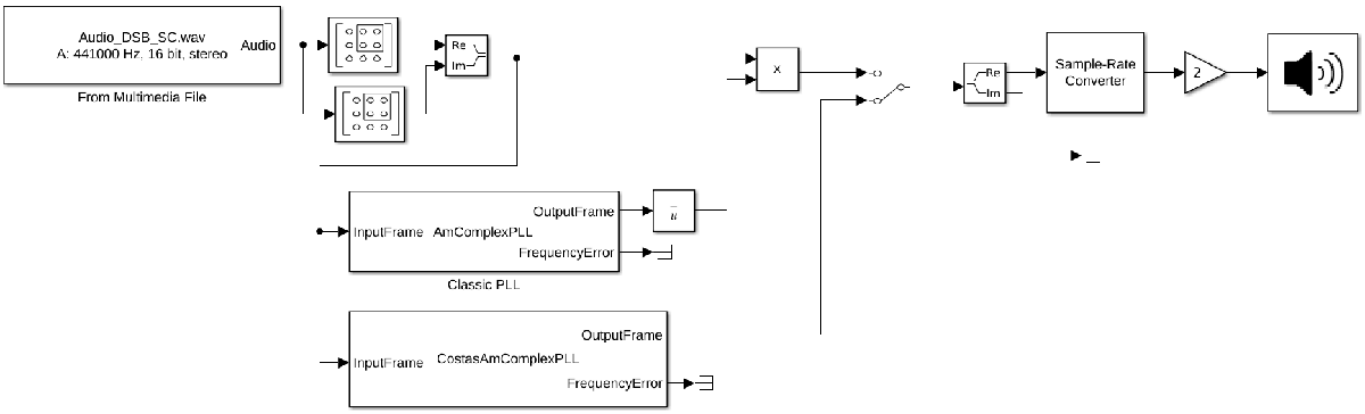
```
    % понижение частоты дискретизации
    Message = [Message; AudioAmp * DownSampler(BasebandSignal)];

    % вычисление спектров
    SpectrumData = SpecEstimator([AmSignal 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 обозначен спектр принимаемого АМ-сигнала. После схемы Костаса получется восстановленное информационное сообщение (синий).

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

На слух можно оценить искажения при восстановлении сигнала. Как и для случая возвдения сигнала в квадрат, для не слишком больших расстроек по частоте информационное сообщение восстанавливается без икажений.

В файле *DSB_SC_Receiver_Part_3.slx* представлена Simulink модель когерентного демодулятора, который ранее был реализован ввиде скрипта. В модели присутствует обычная PLL и PLL, выполненная по схеме Костаса.
С помощью переключателя можно выбрать, какую из них использовать и сравнить качество восстановления аудиосообщения.



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
3. M. Rice Digital Communications. A Discrete Time Approach
4. B. Sclar Digital Communications. Fundamentals and Applications