

МОДЕЛИРОВАНИЕ 16-QAM В СРЕДЕ MATLAB И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ALTERA DE2-115

Амджад Али Али

alia@bmstu.ru

SPIN-код: 9332-4505

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена изучению и реализации квадратурной амплитудной модуляции (QAM) на отладочной плате Altera DE2-115. Дано определение модуляции QAM и упомянуты различные типы созвездий QAM. Рассмотрен принцип работы и модель приемопередатчика. Разработанная модель описывает процессы обработки, которые происходят в приемнике и передатчике. Рассмотрена реализация 16-QAM в среде MATLAB, показано влияние выбора FIR-фильтра на подавление принимаемого сигнала. Разработанная в среде моделирования MATLAB модель реализована на отладочной и образовательной плате Altera. Построенная модель протестирована, показаны ее выходные сигналы. Реализованный SDR позволяет обмениваться модулированными данными со скоростью 35 МГц.

Ключевые слова

Квадратурно-амплитудная модуляция (QAM), отношение сигнал/шум SNR, высокая частота, управляемый гармонический генератор, FIR-фильтр, отладочная и образовательная плата Altera DE2-115, MATLAB, Qsys

Поступила в редакцию 08.06.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Одной из основных форм модуляции является квадратурно-амплитудная модуляция (Quadrature amplitude modulation — QAM). Коды QAM используются в микроволновом цифровом радио для передачи с повышенной спектральной эффективностью по ограниченной полосе пропускания канала [1–2]. Различные протоколы связи реализуют QAM. В современных протоколах (например, как 802.11 b wireless Ethernet (Wi-Fi) и digital video broadcast (DVB)), используется 64-QAM-модуляция. Таким образом, понимание QAM важно из-за его широкого использования в современных и новых технологиях [3–4]. В этой статье моделируется 16-QAM в среде MATLAB и представлена его реализация на платформе Altera DE2-115.

Для реализации сложных амплитудных и фазовых состояний несущей для квадратурной модуляции требуются два управляющих сигнала, известные как синфазные (I) и квадратурные (Q) компоненты. Количество состояний QAM равно $2N$, как определено количеством двоичных битов на символ. Таким образом, 16-QAM система ($N = 4$) — это система, для которой несущая (СВЧ) модулируется в любое из 16 различных амплитудных и фазовых состояний [5–7], в то время как несущая 64-QAM системы ($N = 6$) имеет 64 различных амплитудных

и фазовых состояний. Сложность и ограничения схемы QAM резко возрастают с увеличением уровня кода QAM [8].

QAM может быть реализован в различных типах созвездий: например, тип I и тип II имеют круглые созвездия, как показано на рис. 1, а, в то время как тип III, наиболее популярный из трех, представляет собой квадратное созвездие [9–11]. Однако в нашей работе мы рассматриваем только QAM типа III или квадратный QAM, как показано на рис. 1, б.

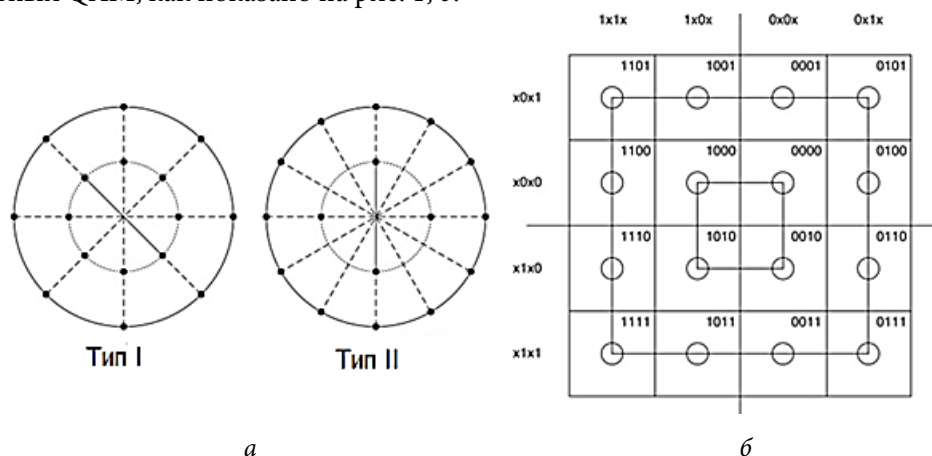


Рис. 1. Созвездие QAM:

а — типов I, II; б — 16-позиционного QAM типа III

Реализация QAM модуляции в среде MATLAB. Рассмотрим реализацию 16-QAM в среде MATLAB, где пользователь должен ввести свое сообщение в консоль MATLAB, а это сообщение будет модулироваться и передаваться по гауссовскому каналу. На стороне приемника полученный сигнал будет декодирован для получения сообщения. Для краткости представим только основные части кода.

Сначала инициализируем параметры: отношение сигнал-шум SNR, скорость символов R_{sym} , количество отсчетов на символ $nSamps$, количество отсчетов NUMSYMBOLS, количество отсчетов преамбулы PREAMBLE_LENGTH и параметры анализатора спектра.

```
close all;clc;clear all;

M = 4; % M^2-QAM
temp_M = -(M-1):2:(M-1); % generate QAM Alphabet, one possibility
SNR = 20;
Rsym = 155.52e06/M;% Symbol rate
nSamps = 4;% Number of samples per symbol
Max = max(temp_M);
NUMSYMBOLS = 100000;
PREAMBLE_LENGTH = 32000;
Fs = Rsym * nSamps;
Fc = Fs/4;% Carrier frequency
t = (0:1/Fs:(nSamps*NUMSYMBOLS-1)/Fs);
```

После инициализации параметров следует ввести сообщение, которое требуется модулировать, при этом символы передаются в соответствующие биты.

```
%Text message
message = input('Enter Message:`,`s`');
message_ascii = int8(message);
```

Символы сообщения сопоставляются с символом QAM.

```
% Map message to QAM Symbols
jj = 0;
for ik = 0:2*length(message_ascii)-1
    if mod(ik,2) == 0
        jj = jj+1;
    end
    modi = mod(ik,2)+1;
    message_bits(ik+1,1:M) = message_ascii_bit(jj,M*modi-3:M*modi);
end
tx_message = qammod(message_Symbol,16);
tx_message_I = real(tx_message);
tx_message_Q = imag(tx_message);
```

Затем увеличиваем скорость передачи сигнала со скоростью, равной nSamps.

```
% upsample tx signal
tempI = kron(tempI,ones(1,L_bit));
tempQ = kron(tempQ,ones(1,L_bit));
temp = tempI + j*tempQ;
m = sqrt(mean(abs(temp).^2));
```

Символы фильтруются с помощью сигнала rcosine.

```
%Pulse Shaping:
pulse = Gain*rcosine(Rsym,Fs);
tx_rrc = filter(pulse,1,temp);
```

Отфильтрованный сигнал передается на более высокую частоту путем умножения сигнала на косинусный сигнал с требуемой частотой. Оценка спектральной плотности мощности передаваемого сигнала в основной полосе и высокочастотной (ВЧ) полосе показана на рис. 2.

```
%UP Conversion:
carrier = sqrt(2)* exp(1i*2*pi*Fc*t);
tx_mod = real(tx_rrc.*carrier);
```

Переданный сигнал передается по гауссовскому каналу.

```

%Channel:g
% pass tx samples through channel model
chan = [1 zeros(1,nSamps-1) 0.2+0.1*i zeros(1,nSamps-1)
0.01+0.02*i zeros(1,nSamps-1) 0.03+0.04*i ]; % channel model
chan_out = filter(chan,1,tx_mod);
f_offset = .00001*Fs;
chan_out = chan_out.* exp(1i*2*pi*f_offset*t);
rx_signal = tx_mod;

```

Сигнал вниз преобразуется в базовую полосу и фильтруется с помощью фильтра нижних частот. Переданный сигнал, принятый отфильтрованный сигнал и погрешность синхронизации показаны на рис. 3.

```

%Timing Recovery:
[I_Sync,Q_Sync,TimingError, Timingdelta, Energy]=gardner_timing_bis(real(rx_lpf),imag(rx_lpf), PREAMBLE_LENGTH);
shifted_carrier=circshift(carrier_conj,[0 Timingdelta(PREAMBLE_LENGTH*4+2)]);
y1= rx_signal.*shifted_carrier;
%Matched filtering:
rx_lpf_a = filter(pulse,1, y1);

```

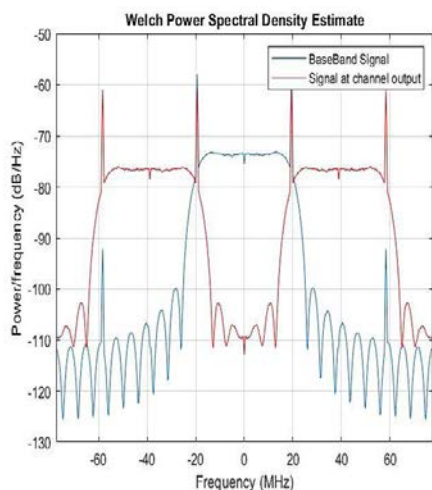


Рис. 2. Оценка спектральной плотности мощности передаваемого сигнала в основной полосе и ВЧ-диапазоне

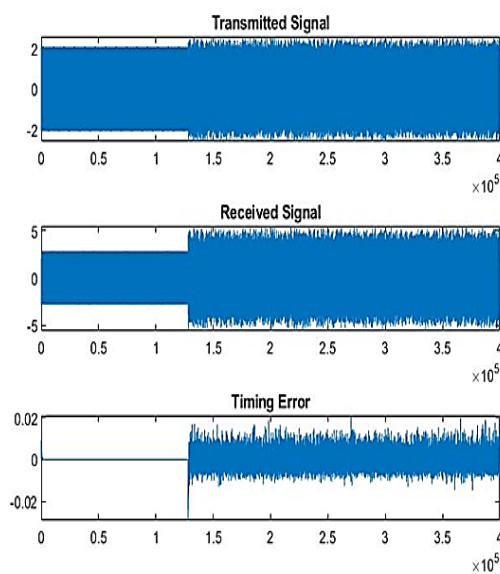


Рис. 3. Переданный сигнал, принятый отфильтрованный сигнал и погрешность синхронизации

Затем вычисляются перпендикулярные компоненты принятого сигнала. На рис. 4 показаны компоненты I/Q принятого сигнала и созвездие принятых символов.

```
meanE = mean(TimingError);
rxbuf = reshape(rx_lpf_aligned(1:2:end), 2, NUMSYMBOLS);
sym = 1; % initial desired symbol
for iter = 1:NUMSYMBOLS
[dhat(iter), demod_stream(iter), freq_off_est(iter), e(iter), dhat_pb
(iter), hp1_1(iter), hp0_0(iter))] = qam_design(rxbuf(:, iter));
```

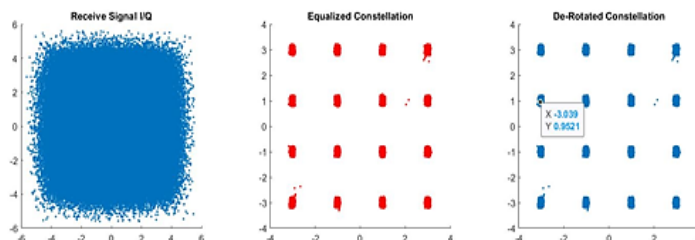


Рис. 4. Компоненты I/Q принятого сигнала и созвездие принятых символов

В конце работы символы демодулируются и сообщение извлекается. Результаты работы программы выводятся в консоли MATLAB (рис. 5).

Реализация модуляции QAM на Altera DE2-115. Для модуляции QAM на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) будем использовать результаты моделирования, которое мы провели в среде MATLAB. Другими словами, реализуем функции MATLAB на ПЛИС с помощью инструмента Qsys.

```
Enter Message:Welcome to BMSTU
demod_message =
'Welcome to BMSTU'
```

Рис. 5. Результаты в консоли MATLAB

```
de-
mod_message_sym=qamdemod(demod_stream(PREAMBLE_LENGTH+2:PREAMBLE_LENGTH+MESSAGE_LENGTH+1), 2^M);
demod_message_sym_1=demod_message_sym(1:2:end)*2^M;
de-
mod_message=char(demod_message_sym_1+demod_message_sym(2:2:end))
```

Данные поступают на передатчик с компьютера через порт ethernet. Сначала сформируем переданный кадр, который состоит из 512 символов. Размер каждого символа равен 4 бита, поскольку размер входных данных модулятора 16 QAM составляет 4 бита. Передаваемый кадр состоит из пакета символов преамбулы длиной 50 символов, а затем 462 символов данных. Переданный кадр выглядит следующим образом:

50 Символы преамбулы	462 Символы данных
----------------------	--------------------

Символы кадра передаются через QAM mapper для формирования QAM symbols (I, Q).

Символы дискретизируются в компоненте QAM_upsample, частота дискретизации на выходе усилителя составляет 200 МГц.

Сигналы I , Q фильтруются с помощью FIR-фильтров для формирования передаваемых импульсов [12]. Частотная характеристика FIR-фильтра показана на рис. 6. Частота среза фильтра составляет 25 МГц. Общая структура передатчика показана на рис. 7.

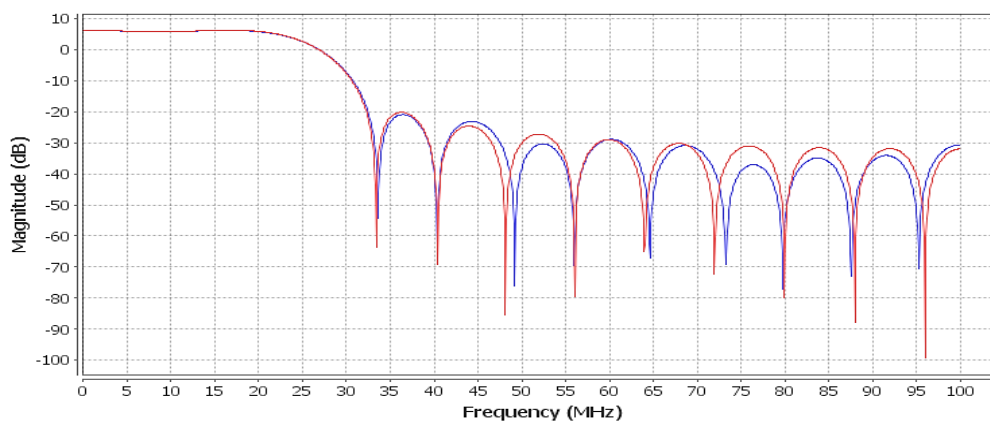


Рис. 6. Частотная характеристика FIR-фильтра

Отфильтрованный сигнал преобразуется в более высокую частоту для передачи по каналу. Передаваемая частота генерируется с помощью встроенного компонента NCO. Частота несущей составляет $F_c = F_s/4 = 50$ МГц.

После того как сигнал прошел канал, получаем сигнал со стороны приемника, структурная схема которого показана на рис. 8.

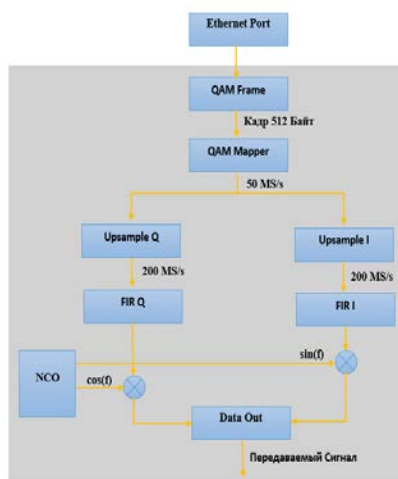


Рис. 7. Структура передатчика

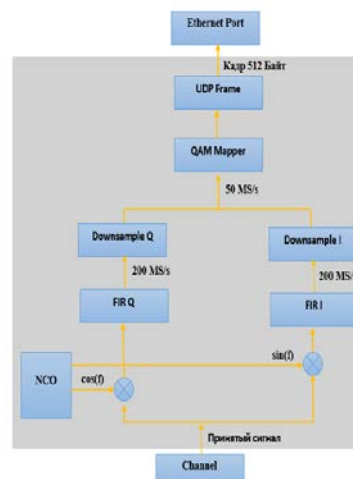


Рис. 8. Структурная схема приемника

Чтобы переместить сигнал в базовую полосу, умножаем принятый сигнал на несущую частоту. Затем фильтруем сигнал, используя сигнал FIR, чтобы удалить высокую составляющую сигнала и обнаружить огибающую сигнала. Огибающая принятого сигнала показана на рис. 9.

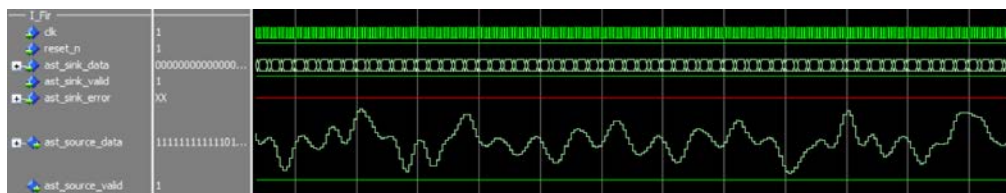


Рис. 9. Огибающая принятого сигнала

Сигналы I , Q декодируют с применением евклидова расстояния, чтобы получить сигналы I , Q . Поскольку мы используем 16 QAM, то полем сигналов I , Q будет множество $\{-3, -1, 1, 3\}$. Сигналы I , Q понижаются до скорости 50 МГц и демодулируются для получения четырехбитного сигнала IQ .

Тестируем модуляцию и демодуляцию QAM, посылая известный сигнал, который состоит из периодического счетчика между значениями $[0-80]$.

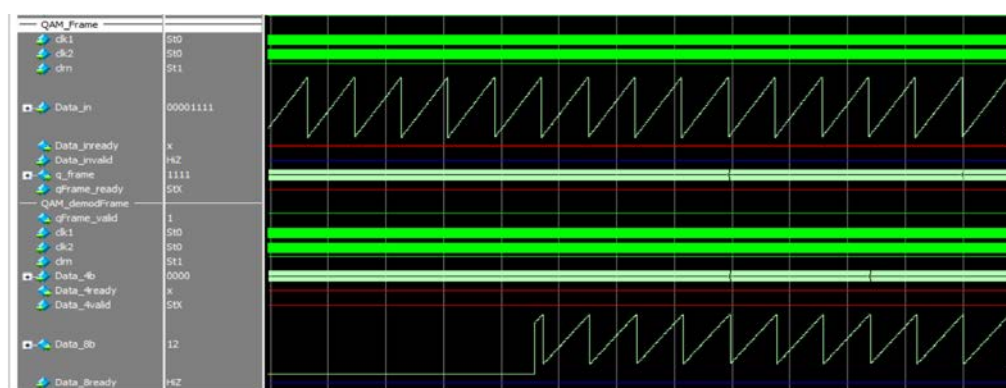


Рис. 10. Тестирование модуляции и демодуляции QAM

Периодический сигнал до модуляции на стороне передатчика и сигнал после операции демодуляции на стороне приемника показан на рис. 10. Мы также передали сообщение, хранящееся в файле памяти на рис. 11, а, через модулятор QAM и получили демодулированное сообщение на стороне компьютера на рис. 11, б.

Разработанное аппаратное обеспечение для модуляции QAM с помощью инструмента Sys показано на рис. 12.

Addr	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	ASCII
0	87	101	108	99	111	109	101	32	Welcome
8	116	111	32	66	77	83	84	85	to BMSTU

а

```
Received Message:
Welcome To BMSTU
```

б

Рис. 11. Отправленное сообщение (а) и полученное сообщение на стороне компьютера (б)

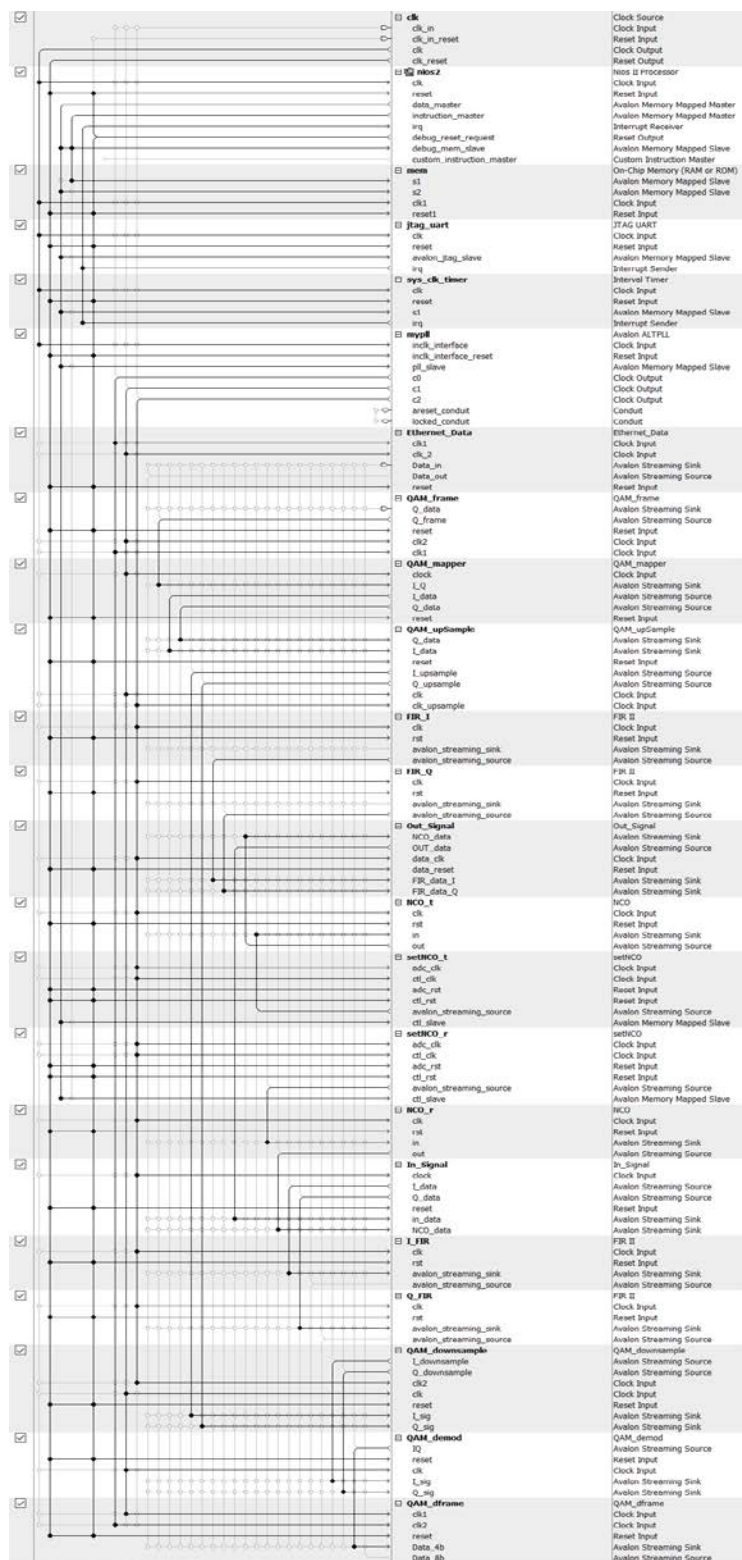


Рис. 12. Разработанное аппаратное обеспечение для модуляции QAM

Заключение. В статье приведено краткое описание модуляции QAM. После этого представлено моделирование 16-QAM в среде MATLAB, а затем продемонстрирована реализация имитационной модели на плате Altera DE2-115.

В будущем мы стремимся разработать такую систему, чтобы она могла модулировать различный порядок QAM и добавлять возможность классификации порядка принятого сигнала QAM.

Литература

- [1] Winzer P.J., Gnauck A.H., Chandrasekhar S. et al. Generation and 1,200-km transmission of 448-Gb/s ETDM 56-Gbaud PDM 16-QAM using a single I/Q modulator. *36th Europ. Conf. and Exhibition on Optical Communication*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECOC.2010.5621371>
- [2] Makovejs S., Millar D.S., Mikhailov V. et al. Experimental investigation of PDM-QAM16 transmission at 112 Gbit/s over 2400 km. *OFC/NFOEC*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2010.OMJ6>
- [3] Kobayashi T., Sano A., Matsuura A. et al. 120-Gb/s PDM 64-QAM transmission over 1280 km using multi-staged nonlinear compensation in digital coherent receiver. *OFC/NFOEC*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2011.OThF6>
- [4] Воробьев О.В., Фокин Г.А. Проект учебно-методического комплекса «Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе программно-конфигурируемого радио». *V Межд. науч.-тех. и науч.-метод. конф. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании*. Т. 2. СПб., СПбГУТ, 2016, с. 280–284.
- [5] Фокин Г.А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программноконфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов. *Труды учебных заведений связи*, 2019, т. 5, № 1, с. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-78-94>
- [6] Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 1948, vol. 27, no. 3, pp. 379–423. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [7] Yoshida M., Omiya T., Kasai K. et al. Real-time FPGA-based coherent optical receiver for 1 Gsymbol/s, 64 QAM transmission. *OFC/NFOEC*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2011.OTuN3>
- [8] Koizumi Y., Toyoda K., Yoshida M. et al. 1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km. *Opt Express*, 2012, vol. 20, no. 11, pp. 12508–12514. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.012508>
- [9] Kasai K., Hongo J., Goto H. et al. The use of a Nyquist filter for reducing an optical signal bandwidth in a coherent QAM optical transmission. *IEICE Electron. Expr.*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 6–10. DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.5.6>
- [10] Huang M.-F., Qian D., Ip E. 50.53-Gb/s PDM-1024QAM-OFDM transmission using pilot-based phase noise mitigation. *OECC*, 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6015357>
- [11] Mizuochi T. Recent progress in forward error correction for optical communication systems. *IEICE Trans. Comm.*, 2005, vol. E88-B, no. 5, pp. 1934–1946. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/ietcom/e88-b.5.1934>
- [12] FIR Compiler II user guide. Altera, 2014.

Амджад Али Али — студент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Федоров Сергей Владимирович, доцент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Амджад Али Али. Моделирование 16-QAM в среде MATLAB и его реализация на Altera DE2-115. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-727>

MODELING 16-QAM IN MATLAB AND ITS IMPLEMENTATION ON ALTERA DE2-115

Amjad Ali Ali

alia@bmstu.ru

SPIN-code: 9332-4505

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the study and implementation of Quadrature Amplitude Modulation (QAM) on the Altera DE2-115 debug board. A definition of QAM modulation is given and various types of QAM constellations are mentioned. The principle of operation and the model of the transceiver are considered. The developed model describes the processing processes that take place in the receiver and transmitter. The implementation of 16-QAM in the MATLAB environment is considered, the influence of the choice of the FIR filter on the suppression of the received signal is shown. The model developed in the MATLAB simulation environment is implemented on the Altera development and educational board. The constructed model is tested, its output signals are shown. The implemented SDR allows the exchange of modulated data at a rate of 35 MHz.

Keywords

Quadrature amplitude modulation (QAM), SNR, high frequency, controlled harmonic generator, FIR filter, Altera DE2-115 debug and education board, MATLAB, Qsys

Received 08.06.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Winzer P.J., Gnauck A.H., Chandrasekhar S. et al. Generation and 1,200-km transmission of 448-Gb/s ETDM 56-Gbaud PDM 16-QAM using a single I/Q modulator. *36th Europ. Conf. and Exhibition on Optical Communication*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECOC.2010.5621371>
- [2] Makovejs S., Millar D.S., Mikhailov V. et al. Experimental investigation of PDM-QAM16 transmission at 112 Gbit/s over 2400 km. *OFC/NFOEC*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2010.OMJ6>
- [3] Kobayashi T., Sano A., Matsuura A. et al. 120-Gb/s PDM 64-QAM transmission over 1280 km using multi-staged nonlinear compensation in digital coherent receiver. *OFC/NFOEC*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2011.OThF6>
- [4] Vorob'yev O.V., Fokin G.A. [Radio communication systems model based design via software defined radio]. *V Mezhd. nauch.-tekh. i nauch.-metod. konf. Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii. T. 2* [V Int. Sci.-Tech. and Sci.-Method. Conf. Actual Issues of Infotelecommunications in Science and Technology. Vol. 2]. Sankt-Petersburg, SPbGUT Publ., 2016, pp. 280–284 (in Russ.).
- [5] Fokin G.A Principles and technologies of digital communication based on software defined radio: a review of modern trends in the field of creating a curriculum. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Telecommunication Universities], 2019, vol. 5, no. 1, pp. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-78-94> (in Russ.).

-
- [6] Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 1948, vol. 27, no. 3, pp. 379–423. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [7] Yoshida M., Omiya T., Kasai K. et al. Real-time FPGA-based coherent optical receiver for 1 Gsymbol/s, 64 QAM transmission. *OFC/NFOEC*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2011.OTuN3>
- [8] Koizumi Y., Toyoda K., Yoshida M. et al. 1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km. *Opt Express*, 2012, vol. 20, no. 11, pp. 12508–12514. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.012508>
- [9] Kasai K., Hongo J., Goto H. et al. The use of a Nyquist filter for reducing an optical signal bandwidth in a coherent QAM optical transmission. *IEICE Electron. Expr.*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 6–10. DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.5.6>
- [10] Huang M.-F., Qian D., Ip E. 50.53-Gb/s PDM-1024QAM-OFDM transmission using pilot-based phase noise mitigation. *OECC*, 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6015357>
- [11] Mizuochi T. Recent progress in forward error correction for optical communication systems. *IEICE Trans. Comm.*, 2005, vol. E88-B, no. 5, pp. 1934–1946. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/ietcom/e88-b.5.1934>
- [12] FIR Compiler II user guide. Altera, 2014.

Amjad Ali Ali — Student, Department of Information Systems and Telecommunications, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Fedorov S.V., Assoc. Professor, Department of Information Systems and Telecommunications, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Amjad Ali Ali. Modeling 16-QAM in MATLAB and its implementation on Altera DE2-115. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-727.html> (in Russ.).