

SYMULACJA CYFROWA MODULACJI 16-QAM

KOWALIK Stanisław

Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej, ul. Cieplaka 1c, 41-300 Dąbrowa Górnicza, Polska
E-mail: skowalik@wsb.edu.pl

Streszczenie: W tej pracy przedstawiono zasady modulacji QAM - Quadrature Amplitude Modulation. Dla modulacji 16-QAM przedstawiono różne diagramy konstelacji. Pokazano przykład modulacji 16-QAM. Następnie przedstawiono symulację demodulacji. Obliczenia wykonano w Matlabie.

Słowa kluczowe: modulacja, symulacja, diagram konstelacji, kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa.

1 Wprowadzenie do modulacji QAM

Modulacja QAM (ang. *Quadrature Amplitude Modulation*) jest to kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa. Służy do przesyłania danych cyfrowych przez kanał radiowy, stosowana m.in. w transmisjach DVB. Dane wejściowe do modulacji stanowią ciąg bitów. Modulacja QAM jest połączeniem modulacji amplitudy i modulacji fazy. Dane formowane są w dwójki, trójki, czwórki itd., które odpowiadają zarówno amplitudzie jak i fazie. Tworzone są według diagramu konstelacji (ang. *Constellation diagram*). Sygnał QAM jest kombinacją liniową dwóch ortogonalnych przebiegów (przesuniętych w fazie o $\pi/2$): kosinusoidalnego i sinusoidalnego [8, 12, 14].

Istnieje 2^n kombinacji utworzonych z n bitów. Grupowanie danych wejściowych po n bitów na jeden symbol daje więc 2^n punktów konstelacji, które są często określane jako fazory, lub zespolone wektory. Fazory związane z tymi punktami mogą mieć różne amplitudy i/lub wartości fazy i dlatego tego typu modulacja jest nazywana wielopoziomową modulacją, gdzie liczba poziomów jest równa liczbie punktów konstelacji [2]. Dla $n=4$ bity grupowane są po 4 i mamy do czynienia z modulacją 16-QAM.

Dane w postaci cyfrowej dzielone są na dwa strumienie. Następnie każdy strumień zamieniany jest na sygnał analogowy w przetworniku cyfrowo-analogowym. Analogowy sygnał może przechodzić przez filtr dolnoprzepustowy (ang. *Low Pass Filter*). W kolejnym etapie jeden sygnał mnożony jest przez nośną (ang. *Carrier*), a drugi przez nośną przesuniętą w fazie o $\pi/2$. Na koniec modulacji obydwa sygnały są sumowane i wysyłane jako sygnał QAM. Kanały, przez które przechodzą sygnały mają oznaczenia I (sygnał w fazie) i Q (sygnał w kwadraturze). Sygnał analogowy w kanale I mnożony jest przez funkcję kosinusoidalną, a sygnał analogowy w kanale Q mnożony jest przez funkcję sinusoidalną [8, 12, 14].

Proces tworzenia sygnału opisują wzory [8, 12, 14]:

$$S_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \phi_i) \quad (1)$$

$$S_i(t) = A_i (\cos \phi_i \cos \omega_0 t - \sin \phi_i \sin \omega_0 t) \quad (2)$$

$$S_i(t) = a_i \cos \omega_0 t - b_i \sin \omega_0 t \quad (3)$$

gdzie:

$$a_i(t) = A_i \cos \phi_i \quad (4)$$

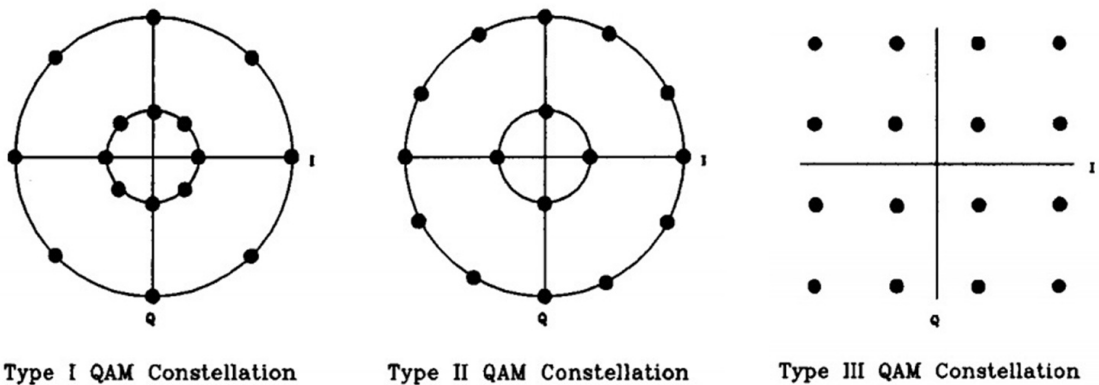
$$b_i(t) = A_i \sin \phi_i \quad (5)$$

Wzory te opisują równoważność modulacji amplitudy i fazy z sumą przebiegów przesuniętych w fazie o $\pi/2$ [8, 12]. Ze wzoru (3) wynika, że dla i -tej grupy n kolejnych bitów, sygnał w kanale I ma postać $a_i \cos(\omega_0 t)$, a w kanale Q $-b_i \sin(\omega_0 t)$.

2 Konstelacja i modulacja 16-QAM

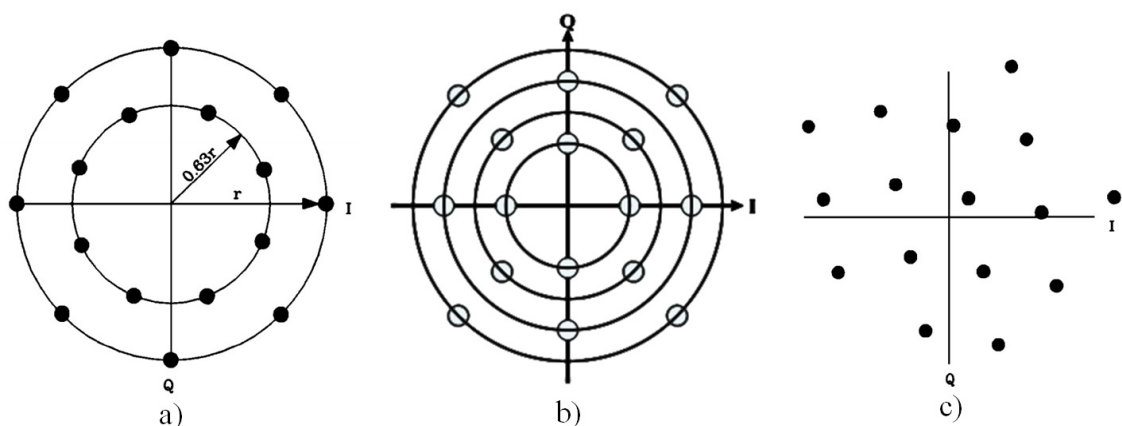
Jak wcześniej powiedziano grupie n bitów przypisuje się punkt na konstelacji.

Diagram konstelacji jest reprezentacją graficzną sygnału zmodulowanego cyfrowo, np. za pomocą modulacji QAM lub PSK. Przedstawia on sygnał, jako dwuwymiarowy wykres na płaszczyźnie zespolonej. Jeśli sygnał jest reprezentowany przez liczbę zespoloną, może być zaznaczony na płaszczyźnie zespolonej. Oś rzeczywista jest często nazywana osią in-phase (w fazie, I), zaś oś urojona osią kwadraturową (Q). Punkty odpowiadające wszystkim sygnałom danej modulacji tworzą diagram konstelacji i są nazywane punktami konstelacyjnymi [9]. Każdemu punktowi konstelacji przypisana jest amplituda i faza. Amplituda, to odległość punktu konstelacji od początku układu współrzędnych. Faza, to kąt pomiędzy osią rzeczywistą I (poziomą), a wektorem łączącym początek układu współrzędnych i dany punkt konstelacji. W modulacji 16-QAM także mogą występować różne układy konstelacji. Wyróżnia się trzy typy konstelacji. Pokazane są one na rysunku 1.



Rys. 1. Przykłady konstelacji QAM typów I, II i III [2, 7]

Są też różne odmiany tych typów konstelacji.

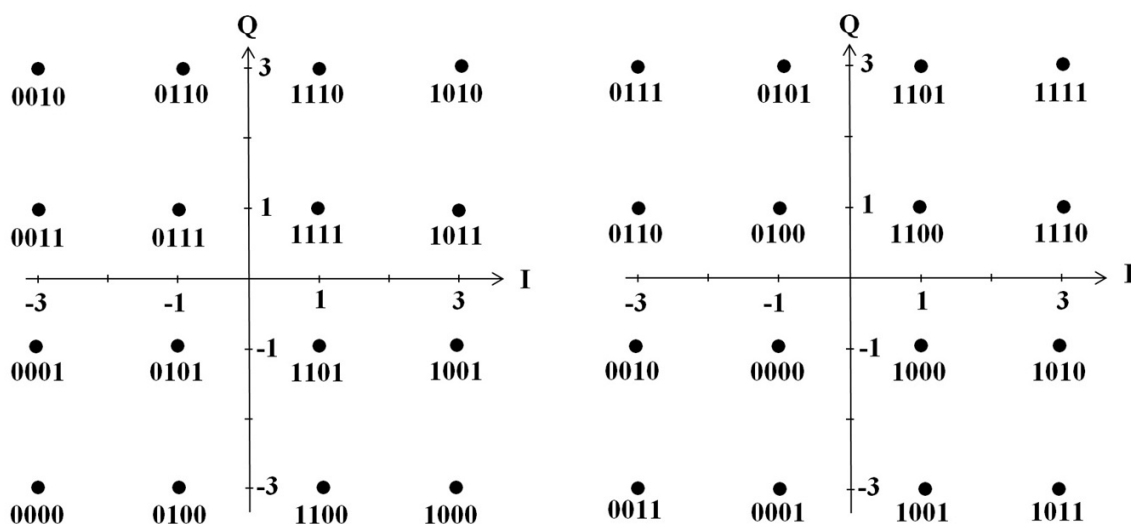


**Rys. 2. a) optymalna 16-poziomowa konstelacja według Lucky [6]
b) nieortogonalna modulacja 16-QAM [10]
c) optymalna 16-poziomowa konstelacja według Foschini [1]**

W praktyce największe uznanie zyskały sobie konstelacje prostokątne typu III przedstawione na rysunku 1. Pozostałych typów konstelacji nie stosuje się ze względów na zawłóci zwiázane z obliczeniami.

Punktom konstelacji należy przypisać 16 kombinacji czwórek bitów. Można to też uczynić na różne sposoby. Istotne w kodowaniu punktów konstelacji jest to, aby to kodowanie było z użyciem kodu Graya. Kod Graya jest to kod dwójkowy bezwagowy, niepozycyjny, charakteryzujący się tym, że dwa kolejne słowa kodowe różnią się tylko stanem jednego bitu (w tym przypadku dwie sąsiednie czwórki bitów na konstelacji różnią się tylko jednym bitem). Innymi słowy odległość Hamminga pomiędzy sąsiednimi czwórkami bitów ma wynosić 1.

Każdemu punktowi konstelacji (tj. każdej czwórce bitów przypisane są współrzędne na płaszczyźnie. Typowo przyjmuje się, że na osi poziomej „I”, jak i na osi pionowej „Q” współrzędne punktów mają wartości: -3, -1, 1, 3. Pokazuje to rysunek 3. Ważne jest, by odległości w poziomie jak i w pionie między punktami były jednakowe.



Rys. 3. Diagramy konstelacji dla 16-QAM [13]

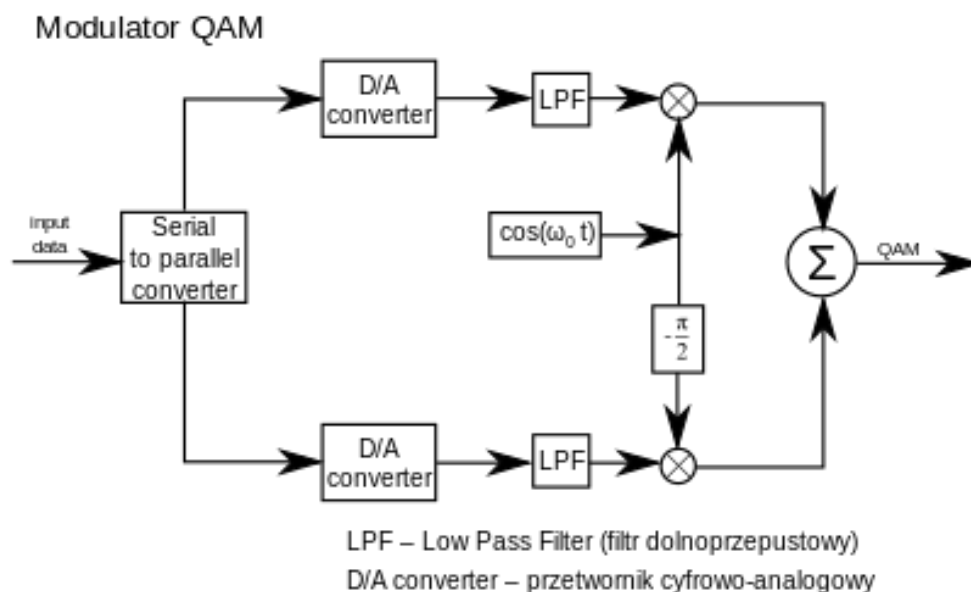
Inne rozmieszczenie czwórek bitów w konstelacji można zobaczyć w pracach [8, 9, 10, 11, 12, 15].

Diagram konstelacji może być reprezentowany w postaci macierzy (6), wówczas dwubitowe części kodowanych liczb a_i (4), b_i (5), wskazują na elementy macierzy zawierające amplitudy I i Q fal składowych. Diagram przyporządkowuje do kodowanych liczb amplitudy I i Q fal składowych. Dokładnie, to $|a_i|$ jest amplitudą dla sygnału $\cos(\omega_0 t)$ w kanale I (3), a $|b_i|$ jest amplitudą dla sygnału $-\sin(\omega_0 t)$ w kanale Q (3).

$$[a_i, b_i] = \begin{bmatrix} (-3, 3) & (-1, 3) & (1, 3) & (3, 3) \\ (-3, 1) & (-1, 1) & (1, 1) & (3, 1) \\ (-3, -1) & (-1, -1) & (1, -1) & (3, -1) \\ (-3, -3) & (-1, -3) & (1, -3) & (3, -3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Źródło: [8, 12].

Tak więc w modulacji 16-QAM napływający ciąg bitów danych wejściowych grupuje się po cztery bity. Dla każdej czwórki bitów, na podstawie wybranej konstelacji, określa się liczby a_i i b_i . Te liczby w przetworniku cyfrowo-analogowym zamieniane są na sygnały ciągłe $a_i(t)$ (4) i $b_i(t)$ (5). Następnie w kanale I sygnał $a_i(t)$ mnożony jest przez $\cos(\omega_0 t)$, a w kanale Q sygnał $b_i(t)$ mnożony jest przez $-\sin(\omega_0 t)$. Wynikowy sygnał QAM otrzymuje się dodając obydwa sygnały z kanałów I i Q (3). Pokazane to jest na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy modulacji QAM [8]

Powyższe rozważania zilustrujemy na przykładzie.

3 Przykład modulacji 16-QAM

Przykład 1

Mamy następujący ciąg danych wejściowych: $\{q\}=10100100111100011000$. Te dane grupujemy po cztery bity: 1010 0100 1111 0001 1000. Wybieramy konstelację, np. pierwszą z rysunku 3. Mamy wtedy $(a_i, b_i) = (3, 3), (-1, -3), (1, 1), (-3, -1), (3, -3)$.

Sygnały w kanale I będą miały postać (3):

$$a_i \cos(\omega_0 t) = 3 \cos(\omega_0 t), -\cos(\omega_0 t), \cos(\omega_0 t), -3 \cos(\omega_0 t), 3 \cos(\omega_0 t).$$

Sygnaly w kanale Q będą miały postać (3):

$$-b_i \sin(\omega_0 t) = -3 \sin(\omega_0 t), 3 \sin(\omega_0 t), -\sin(\omega_0 t), \sin(\omega_0 t), 3 \sin(\omega_0 t).$$

Dla obliczeń przyjęto również:

$dT_S=10$ – jest to czas trwania (długość) sygnału schodkowego $a_i(t)$ lub $b_i(t)$. Jest to zarazem czas trwania cosinusoidy lub sinusoidy przypisanej temu sygnałowi schodkowemu;

$ilp=100$ – jest to liczba punktów w okresie T_S potrzebnych do wykreślenia cosinusoidy lub sinusoidy (liczba wartości tych funkcji w przedziale T_S);

n – liczba bitów w ciągu $\{q\}$, $n=20$;

$n1$ – liczba czwórek bitów w ciągu $\{q\}$, $n1=n/4=5$;

$tmax$ – jest to czas symulacji, $tmax=dT_S \cdot n1=10 \cdot 5=50$;

$nmax$ – jest to liczba punktów wykresu sygnału $S(t)$;

$nmax = ilp \cdot n1=100 \cdot 5=500$;

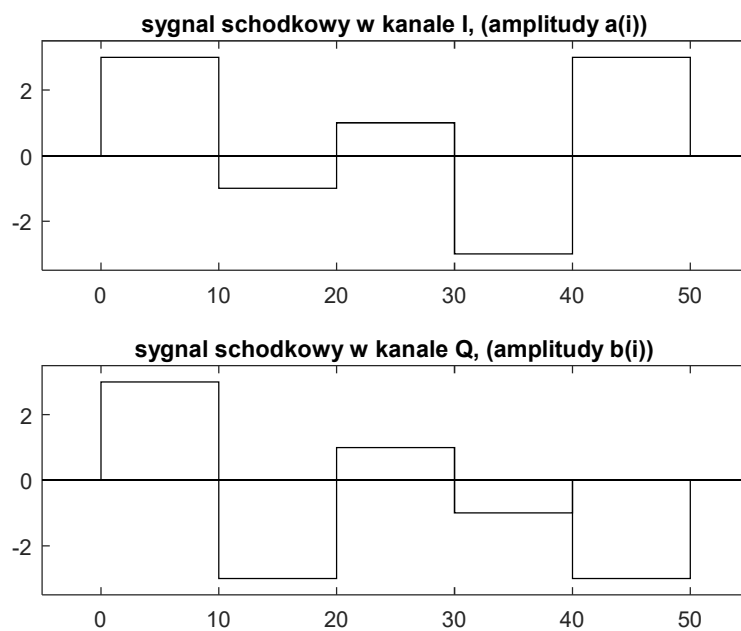
$delta$ – jest to odległość między dwoma sąsiednimi punktami na wykresie, $delta=dT_S/ilp=10/100=0.1$;

ω_0 – jest częstotliwość cosinusoidy i sinusoidy. ω_0 dobrano tak, aby całkowitą ilość razy cosinusoida lub sinusoida wystąpiła w okresie T_S . Powoduje to, że w kolejnych okresach czasu T_S , wartości cosinusoidy i sinusoidy powtarzają się, są te same. W omawianym przykładzie przyjęto, że okresie T_S cosinusoida lub sinusoida wystąpi dokładnie 3 razy, $\omega_0=(2 \cdot \pi/dT_S) \cdot 3=1.88495559$. Dla potrzeb obliczeniowych utworzono tabelę, w której bitom konstelacji przyporządkowano amplitudy w kanałach I i Q.

Tabela 1. Tabelaryczny zapis konstelacji

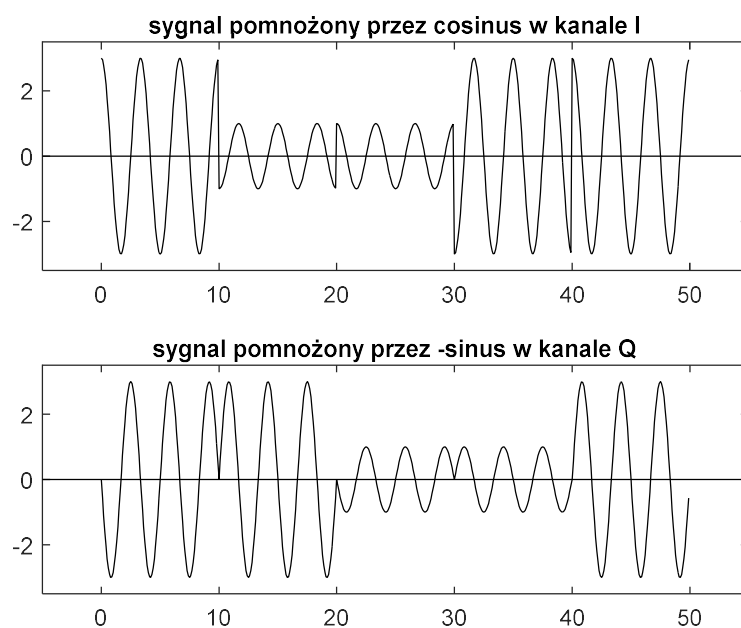
Liczba dziesiętna	Bity konstelacji	Amplitudy (a_i, b_i)
0	0 0 0 0	(-3, -3)
1	0 0 0 1	(-3, -1)
2	0 0 1 0	(-3, 3)
3	0 0 1 1	(-3, 1)
4	0 1 0 0	(-1, -3)
5	0 1 0 1	(-1, -1)
6	0 1 1 0	(-1, 3)
7	0 1 1 1	(-1, 1)
8	1 0 0 0	(3, -3)
9	1 0 0 1	(3, -1)
10	1 0 1 0	(3, 3)
11	1 0 1 1	(3, 1)
12	1 1 0 0	(1, -3)
13	1 1 0 1	(1, -1)
14	1 1 1 0	(1, 3)
15	1 1 1 1	(1, 1)

Na podstawie czterech bitów wyznaczamy amplitudy a_i i b_i w następujący sposób: cztery bity zamieniamy na liczbę dziesiętną. Wskaźnik $i=\text{liczba dziesiętna}+1$ (uwaga: numeracja wektorów w Matlabie zaczyna się od 1). Następnie odczytujemy (z tabeli 2) amplitudy a_i oraz b_i . Na podstawie obliczonych amplitud a_i i b_i tworzymy funkcję schodkową dla kolejnych czwórek bitów. Pokazana jest ona na rysunku 5.



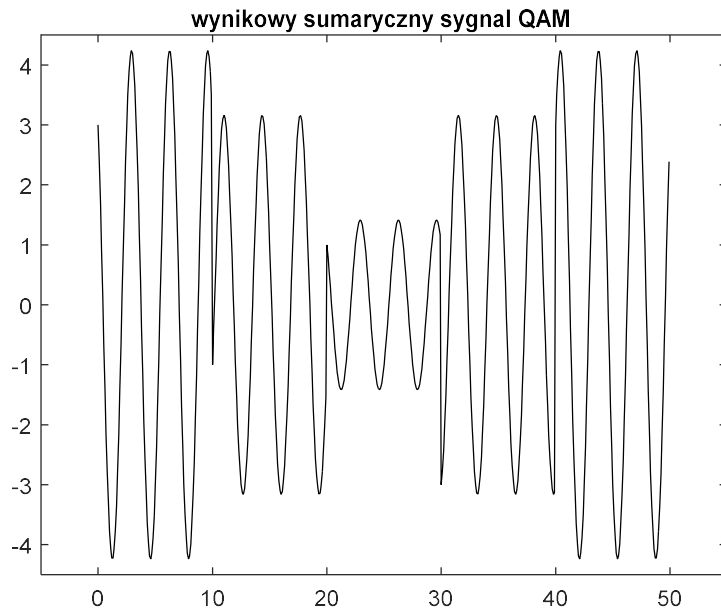
Rys. 5. Sygnały na wyjściu z konwertera cyfrowo-analogowego

Następnie pierwszy z tych sygnałów mnożony jest przez $\cos(\omega_0 t)$, a drugi sygnał mnożony jest przez $-\sin(\omega_0 t)$. Pokazane to jest na rysunku 6.



Rys. 6. Sygnały nośne w kanałach I i Q

Te dwa sygnały na końcu są sumowane tworząc wynikowy sygnał QAM. Jest on pokazany na rysunku 7.



Rys. 7. Sygnał wynikowy QAM

Należy zwrócić uwagę, że w symulacji cyfrowej sygnał QAM dla rozważanego przykładu jest wektorem składającym się z 500 wartości $\{w_j\}$.

4 Symulacja demodulacji

Symulację demodulacji przeprowadzimy dla sygnału QAM pokazanego na rysunku 7 i dla konstelacji przedstawionej na pierwszym rysunku 3. Sygnał QAM w wersji cyfrowej jest wektorem $w = \{w_j\}$, ($j=1, \dots, nmax=500$).

Dla sygnału $S_i(t)$ określonego wzorem (3) obliczamy wartości $S_i(0)$

$$S_i(0) = a_i \cos(\omega_0 \cdot 0) - b_i \sin(\omega_0 \cdot 0) = a_i$$

Dla każdego przedziału czasowego T_S mamy więc

$$a_i = w_{(i-1)ilp+1}$$

Do obliczenia b_i wykorzystamy równanie (3) oraz drugi element ciągu $\{w_j\}$ w każdym przedziale czasowym T_S . Znając wcześniej obliczone a_i otrzymujemy

$$w_{(i-1)ilp+2} = a_i \cos(\omega_0 \cdot \text{delta}) - b_i \sin(\omega_0 \cdot \text{delta})$$

$$b_i = \frac{a_i \cos(\omega_0 \cdot \text{delta}) - w_{(i-1)ilp+2}}{\sin(\omega_0 \cdot \text{delta})}$$

Dla danych z przykładu 1 wzór przybiera postać

$$b_i = \frac{a_i \cdot 0.98228725 - w_{(i-1)ilp+2}}{0.18738131}$$

Tak więc na podstawie dwóch pierwszych liczb z przedziału T_S otrzymujemy dwie liczby a_i oraz b_i . Następnie na podstawie konstelacji i pary liczb (a_i, b_i) należy utworzyć ciąg czterech bitów r_1, r_2, r_3, r_4 . Bity z konstelacji zapisujemy jako liczby dziesiętne. Na podstawie pierwszej konstelacji (rys. 3) tworzymy macierz d wartości dziesiętnych czwórek bitów

$$d = \begin{bmatrix} 2 & 6 & 14 & 10 \\ 3 & 7 & 15 & 11 \\ 1 & 5 & 13 & 9 \\ 0 & 4 & 12 & 8 \end{bmatrix}$$

Na podstawie pary liczb (a_i, b_i) obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5$$

$$l = 0.5a_i + 2.5$$

Liczba $d(k, l)$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji

$$r = \text{dec2bin}(d(k, l))$$

Otrzymujemy wtedy ciąg czterech bitów $r = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Powtarzamy to kolejno dla każdego przedziału czasowego T_S .

Przykład 2

Prześledzimy tą demodulację dla ciągu QAM otrzymanego w przykładzie 1.

Dla pierwszego przedziału czasowego T_S ($0 \leq t < 10$) mamy $w_1 = 3$, $w_2 = 2.38471781$. Obliczamy

$$a_1 = w_1 = 3$$

$$b_1 = \frac{3 \cdot 0.98228725 - 2.38471781}{0.18738131} = \frac{0.56214394}{0.18738131} = 3$$

Dla pary liczb (3, 3) obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5 = -0.5 \cdot 3 + 2.5 = -1.5 + 2.5 = 1$$

$$l = 0.5a_i + 2.5 = 0.5 \cdot 3 + 2.5 = 1.5 + 2.5 = 4$$

Liczba $d(1, 4) = 10$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji $r = \text{dec2bin}(10)$. Otrzymujemy $r = \{1 \ 0 \ 1 \ 0\}$.

Dla drugiego przedziału czasowego T_S ($10 \leq t < 20$) mamy $w_{101} = -1$, $w_{102} = -0.42014331$. Obliczamy

$$a_2 = w_{101} = -1$$

$$b_2 = \frac{-0.98228725 + 0.42014331}{0.18738131} = \frac{-0.56214394}{0.18738131} = -3$$

Dla pary liczb (-1, -3) obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5 = -0.5 \cdot (-3) + 2.5 = 1.5 + 2.5 = 4$$

$$l = 0.5a_i + 2.5 = 0.5 \cdot (-1) + 2.5 = -0.5 + 2.5 = 2$$

Liczba $d(4, 2) = 4$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji $r = \text{dec2bin}(4)$. Otrzymujemy $r = \{0 \ 1 \ 0 \ 0\}$.

Dla trzeciego przedziału czasowego T_S ($20 \leq t < 30$) mamy $w_{201} = 1$, $w_{202} = 0.79490594$. Obliczamy

$$a_3 = w_{201} = 1$$

$$b_3 = \frac{0.98228725 - 0.79490594}{0.18738131} = \frac{0.18738131}{0.18738131} = 1$$

Dla pary liczb (1, 1) obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5 = -0.5 \cdot 1 + 2.5 = -0.5 + 2.5 = 2$$

$$l = 0.5a_i + 2.5 = 0.5 \cdot 1 + 2.5 = 0.5 + 2.5 = 3$$

Liczba $d(2, 3)=15$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji $r=\text{dec2bin}(15)$. Otrzymujemy $r=\{1\ 1\ 1\ 1\}$.

Dla czwartego przedziału czasowego T_S ($30 \leq t < 40$) mamy $w_{301}=-3$, $w_{302}=-2.75948044$. Obliczamy

$$b_3 = \frac{-3 \cdot 0.98228725 + 2.75948044}{0.18738131} = \frac{a_4=w_{301}=-3}{0.18738131} + \frac{-0.18738131}{0.18738131} = -1$$

Dla pary liczb $(-3, -1)$ obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5 = -0.5 \cdot (-1) + 2.5 = 0.5 + 2.5 = 3$$

$$l = 0.5a_i + 2.5 = 0.5 \cdot (-3) + 2.5 = -1.5 + 2.5 = 1$$

Liczba $d(3, 1)=1$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji $r=\text{dec2bin}(1)$. Otrzymujemy $r=\{0\ 0\ 0\ 1\}$.

Dla piątego przedziału czasowego T_S ($40 \leq t < 50$) mamy $w_{401}=3$, $w_{402}=3.50900570$. Obliczamy

$$b_3 = \frac{3 \cdot 0.98228725 - 3.50900570}{0.18738131} = \frac{a_5=w_{401}=3}{0.18738131} + \frac{-0.56214395}{0.18738131} = -3$$

Dla pary liczb $(3, -3)$ obliczamy wskaźniki: k – numer wiersza i l – numer kolumny, liczb dziesiętnych macierzy d .

$$k = -0.5b_i + 2.5 = -0.5 \cdot (-3) + 2.5 = 1.5 + 2.5 = 4$$

$$l = 0.5a_i + 2.5 = 0.5 \cdot 3 + 2.5 = 1.5 + 2.5 = 4$$

Liczba $d(4, 4)=8$ jest liczbą dziesiętną dla ciągu binarnego $\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$. Aby otrzymać ten ciąg używamy instrukcji $r=\text{dec2bin}(8)$. Otrzymujemy $r=\{1\ 0\ 0\ 0\}$.

Łącząc razem pięć ciągów czterobitowych otrzymujemy wynikowy ciąg zdekodowany $\{1010\ 0100\ 1111\ 0001\ 1000\}$, który jest identyczny z ciągiem wejściowym $q=\{q_j\}$.

Wnioski

Modulacja QAM polega na wykorzystaniu tego samego pasma częstotliwości do transmisji dwóch różnych sygnałów informacyjnych. Dla jednoznacznego rozdzielenia w odbiorniku obu sygnałów informacyjnych, sygnały nośne muszą być przesunięte względem siebie w fazie o 90° [3, 4]. W pracy przedstawiono ogólne zasady modulacji QAM. Pokazano różne diagramy konstelacji dla modulacji 16-QAM. Zrobiono przykład symulacji cyfrowej modulacji 16-QAM dla ciągu 20-bitowego. Przedstawiono też metodę demodulacji w oparciu o dwie pierwsze wartości sygnału QAM w każdym przedziale czasowym T_S . Muszą tu jednak być spełnione założenia odnośnie częstotliwości ω_0 , które wcześniej były przedstawione. W tym przypadku symulacji demodulacji, sygnał QAM musi być przestawiony w postaci ciągu liczbowego.

Literatura

- [1] G.J. Foschini, R.D. Gitlin, and S.B. Weinstein. "Optimization of two-dimensional signal constellations in presence of Gaussian noise". *IEEE Trans Comms*, vol. COM-22, 1974.

- [2] L. Hanzo, S.X. Ng, T. Keller and W. Webb. *Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, Second edition, 2004.
- [3] J. Izydorczyk, G. Plonka and G. Tyma. *Teoria sygnałów*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 2006.
- [4] J. Izydorczyk and others: *MATLAB i podstawy telekomunikacji*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 2017.
- [5] L. Knoch and T. Ekiert. *Modulacja i detekcja*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1979.
- [6] R.W. Lucky and J.C. Hancock: "On the optimum performance of N-ary systems having two degrees of freedom". *IRE Trans Comms*, vol. CS-10, 1962.
- [7] W.T. Webb and L. Hanzo. *Modern Quadrature Amplitude Modulation. Principles and Applications for Fixed and Wireless Channels*. PENTECH PRESS Publishers London, IEEE PRESS The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York, 1995.
- [8] https://pl.wikipedia.org/wiki/Modulacja_QAM
- [9] https://pl.wikipedia.org/wiki/Diagram_konstelacji
- [10] <https://de.wikipedia.org/wiki/Quadraturamplitudenmodulation>
- [11] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation
- [12] http://www.wikiwand.com/pl/Modulacja_QAM
- [13] http://erendemir.weebly.com/uploads/4/8/5/0/4850484/qpsk_and_16-qam_digital_modulation.pdf
- [14] http://www.telekomunikacja.c0.pl/modulacja_qam.php
- [15] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/what-is-qam-tutorial.php>

DIGITAL SIMULATION OF 16-QAM MODULATION

Abstract: In this work shows the rules for modulation QAM - Quadrature Amplitude Modulation. For 16-QAM modulation are given different constellation diagrams. Shows an example of a 16-QAM modulation. Then shows a simulation of the demodulation. Calculations in Matlab.

Keywords: modulation, simulation, constellation diagram, quadrature amplitude modulation.