

Mieczysław Rydel, Mirosław Stomiński
Politechnika Warszawska Instytut Telekomunikacji
Tadeusz Wysocki jr
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
Wydział Telekomunikacji i Elektroniki

Kod transmisyjny 5B-6B i jego własności

W światłowodowych systemach PCM, ze względu na nieliniowość nadajników i odbiorników optycznych, stosuje się binarne kody transmisyjne, najczęściej alfabetyczne typu MB-NB. W kodach tych M-elementowym wejściowym słowem binarnym przyporządkowuje się w koderze N-elementowe słowa kodowe. Przyporządkowania tego dokonuje się w taki sposób, aby uzyskać pożądane właściwości sygnału kodowego. W szczególności:

- składowa stała powinna być niezależna od statystyk ciągu danych, przy czym najkorzystniej jest, aby średni poziom ciągu kodowego był równy $1/2$;
 - składowa ciągła widma mocy przy częstotliwości zerowej powinna być równa zeru;
 - ze względu na synchronizację elementową, sygnał nie powinien zawierać zbyt długich ciągów kolejnych zer, a przy zastosowaniu impulsów bez powrotu do zera (NRZ) lub przy wykorzystywaniu do synchronizacji impulsów wyjściowych filtru odbiorczego również zbyt długich ciągów kolejnych jedynek;
 - sygnał kodowy powinien umożliwiać skuteczne wykrywanie błędów transmisji i zapewniać szybką synchronizację słów.
- Przy wstępnym wyborze kodu można się kierować wielkością

$$r = (N - M)/M$$

zwaną nadmiarowością kodu. Aby można było kształtować pożądane własności kodu, wielkość ta musi być dodatnia. Im r jest większe, tym łatwiej jest uzyskiwać odpowiednio dobre własności kodu i tym prostsze są układy koderów, dekoderów i układów odtwarzania podstaw czasu. Z drugiej strony, wielkość r jest jednocześnie równa względnemu przyrostowi pasma (np. pasma Nyquista) zajmowanego przez sygnał kodowy w stosunku do pasma zajmowanego przez sygnał danych.

Dla systemu 34 Mbit/s najczęściej przyjmuje się kody typu 5B-6B, których nadmiarowość jest jeszcze dostatecznie duża, tak iż względnie łatwo uzyskuje się dobre właściwości kodu, a przyrost (20%) pasma zajmowanego przez sygnał nie jest zbyt wielki. Niniejszy artykuł poświęcony jest omówieniu zasadniczych własności kodu 5B-6B podanego w materiałach CCITT [1].

Reguła i podstawowe parametry kodu

Reguła kodowania rozpatrywanego kodu 5B-6B, przedstawiona w tab. 1, polega na przyporządkowaniu pięcioelementowym słowom wejściowym sześćelementowych słów kodowych. Słowa kodowe pogrupowane są w dwa alfabet, przy czym wybór alfabetu związany jest z bieżącą sumą cyfrową. Bieżąca suma cyfrowa BSC ciągu poziomów sygnału kodowego $a(n)$, $a(n) \in \{0,1\}$ zdefiniowana jest tutaj jako

$$BSC(n) = \pm \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \left(a(k) - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

Z reguły kodowania wynika, że alfabetowi pierwszemu jest przyporządkowana wartość BSC równa $-\frac{1}{2}$, a alfabetowi drugiemu wartość BSC równa $+\frac{1}{2}$. Stan kodera, w którym obowiązuje dany alfabet, identyfikowany jest z wartością BSC określoną po zakodowaniu poprzedniego słowa.

Definiuje się wahanie bieżącej sumy cyfrowej WSC jako różnicę pomiędzy kresem górnym a kresem dolnym BSC. Wymagane jest, aby wartość WSC dla kodu była skończona i pożądane jest, aby była ona jak najmniejsza. Dla tego kodu wartość najmniejsza BSC jest równa $-\frac{3}{2}$, a jej wartość największa równa $3/2$, zatem WSC = 3.

Tabela 1

F	G ₁	G ₂
00000	101011x	010100x
00001	011100	011100
00010	110001	110001
00011	101001	101001
00100	011010	011010
00101	010011	010011
00110	101100	101100
00111	111001x	000110x
01000	100110	100110
01001	010101	010101
01010	010111x	101000x
01011	100111x	011000x
01100	110011x	000111
01101	011110x	100001x
01110	101110x	010001x
01111	110100	110100
10000	001011	001011
10001	011101x	100010x
10010	011011x	100100x
10011	111000	001100x
10100	110110x	001001x
10101	111010x	000101x
10110	101010	101010
10111	011001	011001
11000	101101x	010010x
11001	001101	001101
11010	110010	110010
11011	010110	010110
11100	100101	100101
11101	100011	100011
11110	001110	001110
11111	110101x	001010x

Uwaga: Symbol x po słowie kodowym określa zmianę alfabetu w następnym kroku

Analiza tab. 1 wskazuje, że największa możliwa liczba kolejnych zer jest równa największej możliwej liczbie kolejnych jedynek i wynosi 5. Wartość ta jest na tyle mała, że możliwe jest odtwarzanie przebiegów podstaw czasu w urządzeniu odbiorczym.

Kod jest kodem o dekodowaniu „niezależnym od stanu”, co oznacza, że danej postaci słowa kodowego odpowiada jedna i tylko jedna postać słowa wejściowego (por. tab. 1). Właściwość ta ułatwia budowę dekodera.

Charakterystyki sygnału kodowego

Przyjmuje się, że ciąg danych na wejściu kodera jest stacjonarnym ciągiem niezależnych binarnych zmiennych losowych o prawdopodobieństwach wystąpienia zera i jedynek

$$P(0) = q, \quad P(1) = 1 - q = p \quad (2)$$

Sygnał kodowy, traktowany jako losowy ciąg impulsów, może być zapisany wzorem

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(n) \cdot g_0(t - nT - \theta) \quad (3)$$

gdzie: $(a(n))$ jest losowym ciągiem binarnych poziomów sygnału; T — okresem taktowania; Θ — losową fazą początkową o rozkładzie równomiernym w przedziale $\langle 0, T \rangle$; $g_0(t)$ jest standardowym impulsem. Stosuje się impulsy prostokątne NRZ (Non Return to Zero) o współczynniku wypełnienia $\kappa = 1$ lub impulsy prostokątne RZ (Return to Zero) o współczynniku wypełnienia $\kappa < 1$ (najczęściej $\kappa = \frac{1}{2}$). Dla takich impulsów transformata Fouriera funkcji $g_0(t)$ wyraża się wzorem

$$G_0(f) = \kappa T \frac{\sin(\pi \kappa f T)}{f T} \quad (4)$$

Poziom średni sygnału kodowego

$$\bar{a} = E(a(n)) = \frac{1}{2} \quad (5)$$

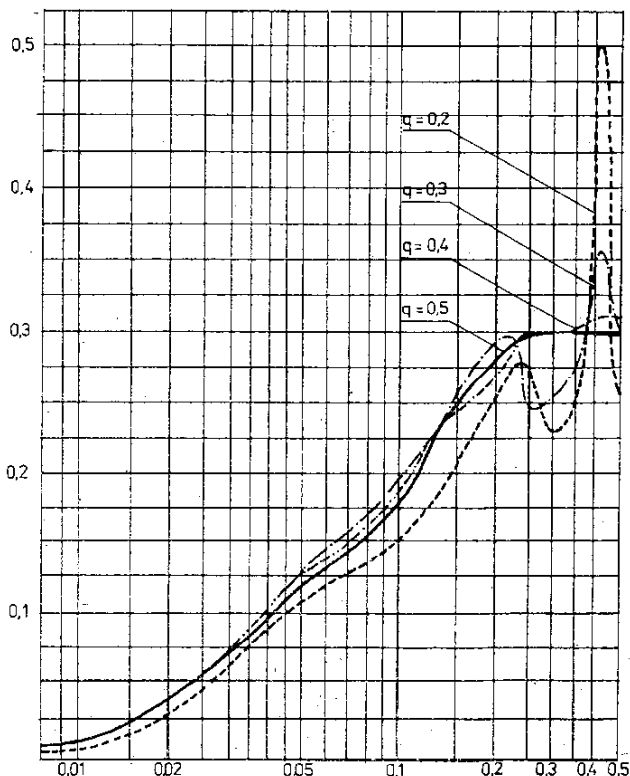
jest niezależny od statystyk ciągu przesyłanych wiadomości. Oznacza to, że średnia liczba impulsów przypadających na elementarny odstęp modulacji jest zawsze równa $\frac{1}{2}$. W związku z tym składowa stała

$$\bar{s} = \frac{G_0(0)}{T} \bar{a} = \frac{\bar{a}}{T} \int_0^T g_0(t) dt = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{dla } \kappa = 1 \\ \frac{1}{4} & \text{dla } \kappa = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

i moc średnia sygnału kodowego

$$\bar{p} = \frac{\bar{a}}{T} \int_0^T g^2(t) dt = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{dla } \kappa = 1 \\ \frac{1}{4} & \text{dla } \kappa = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

są stałe w funkcji parametru q . Ta własność kodu umożliwia ustawienie poziomu decyzyjnego w regeneratorach i odbiorniku na wartość zerową przy stosowaniu w urządzeniach traktu liniowego układów sprzęgających prądu zmiennego, a ponadto jest korzystna ze względu na pracę nadajników optoelektronicznych.



Rys. 1. Składowa ciągła znormalizowanego widma mocy

Gęstość widmowa mocy $S(f)$ sygnału kodowego, określonego zależnością (3), wyraża się wzorem

$$S(f) = \frac{|G_0(f)|^2}{T} W(f), \quad (8)$$

gdzie $W(f)$ jest tak zwanym znormalizowanym widmem mocy niezależnym od kształtu impulsu $g_0(t)$.

Znormalizowane widmo mocy $W(f)$ może być obliczane przy wykorzystaniu teorii łańcuchów Markowa [2; 3]. Widmo to jest sumą składowej ciągłej $W_c(f)$ i składowej prążkowej

$$W_d(f) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} W\left(\frac{k}{m}\right) \delta\left(f - \frac{k}{mT}\right), \quad (9)$$

gdzie m jest długością słowa kodowego równą 6 dla analizowanego kodu. Funkcja $W(f)$ jest funkcją okresową o okresie równym T i parzystą, wobec czego wartości jej wystarczy podawać dla $0 \leq fT \leq 0,5$. Wyniki obliczeń dla kilku różnych wartości parametru q , znormalizowanego widma mocy przedstawiono na rys. 1 (składowa ciągła) i w tab. 2 (intensywności prążków). Na rysunku zastosowano logarytmiczną skalę częstotliwości znormalizowanej fT w celu lepszej ilustracji przebiegu tych charakterystyk w zakresie małych częstotliwości. W takim samym celu obliczono wartości parametru

$$C\varphi = \int_0^{\varphi} W_c(fT) d(fT), \quad (10)$$

które podano w tab. 3.

Na podstawie znajomości przebiegów $W_c(fT)$ można dla konkretnych impulsów (4) wyznaczyć charakterystyki

$$\frac{S_c(fT)}{Tx^2} = \left| \frac{\sin(\pi \kappa f T)}{f T} \right|^2 W_c(fT), \quad (11)$$

które przedstawiono na rys. 2 dla $q = 0,5$.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że:

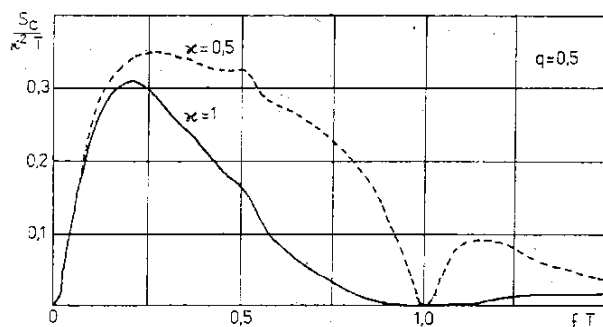
- widmo mocy dla parametru $q = 0,5 \pm \Delta q$ ma identyczny przebieg;
- składowa ciągła widma mocy dla $0,3 < q < 0,7$ praktycznie nie zależy od wartości parametru q ;

Tabela 2

fT	0,0	0,17	0,33	0,5	0,67	0,83
W_d	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 3

q	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$C_{0,05}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,87 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$
$C_{0,95}$	$0,17 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,30 \cdot 10^{-3}$



Rys. 2. Ciągłe widmo mocy dla impulsów prostokątnych ze 100% wypełnieniem ($\kappa = 1$) i z wypełnieniem 50% ($\kappa = \frac{1}{2}$), dla kodu

—składowa prążkowa znormalizowanego widma mocy nie zależy od parametru q i przyjmuje wartości niezerowe jedynie dla całkowitych wartości zmiennej fT ; wynika stąd, że dla impulsów prostokątnych NRZ ($\alpha = 1$) wystąpi jedynie składowa stała, natomiast dla impulsów prostokątnych RZ i $\alpha = \frac{1}{2}$ wystąpi prążek przy częstotliwości $\frac{1}{T}$, który może być wykorzystany do celu synchronizacji elementowej;

— zawartość mocy sygnału w paśmie małych częstotliwości jest niewielka, wobec czego wpływ wycięcia małych częstotliwości przesyłanego sygnału na wierność transmisji jest niewielki; pasmo to może być wykorzystane do innych celów (np. łączności służbowej).

Parametry odbioru ciągu kodowego

Przy odbiorze ciągu kodowego istnieje problem wykrywania takich jego fragmentów, które nie spełniają reguły kodowania użytego kodu. Badanie jakości transmisji cyfrowej między regeneratorami PCM polega na zliczaniu bieżącej sumy cyfrowej ciągu kodowego i rejestracji przekroczeń wartości tego parametru poza przedział określony dla kodu. Dla analizowanego kodu zbiór dopuszczalnych wartości BSC jest równy $\langle -\frac{3}{2}, +\frac{3}{2} \rangle$ (zob. tab. 1). Każda aktualna wartość BSC nie należąca do tego przedziału nazywana jest wiolacją bieżącej sumy cyfrowej. Prawdopodobieństwo wystąpienia tego typu wiolacji w obserwowanym ciągu charakteryzuje stopień błędów transmisji. Prawdopodobieństwo to na ogół w dużym stopniu zależy od statystyk przesyłanych danych.

Zadaniem transkodera odbiorczego jest podział odebranego ciągu kodowego na sześciociekowe słowa, które następnie są dekodowane oraz stała kontrola poprawności stosowanego podziału słów. Do tego celu nie mogą być wykorzystywane wiolacje bieżącej sumy cyfrowej. Kontrola transmisji polega tutaj na sprawdzeniu reguły kodu w ciągu kolejno obserwowanych słów. W zależności od przyjętego sposobu kontroli transmisji mogą być wykrywane:

— wiolacje kodowe (np. 000000, 000011, 111110, 011111 —

por. tab. 1), tj. sześciociekowe słowa binarne nie należące do kodu;

— wiolacje alfabetowe (np. 010100 dla alfabetu G_1 , 101011 dla alfabetu G_2 — por. tab. 1), tj. słowa nie należące do danego alfabetu;

— wiolacje sumy cyfrowej słów (np. wartość +2 dla alfabetu G_1 , wartość -2 dla alfabetu G_2 — por. tab. 1), tj. wartości sumy cyfrowej słów niedopuszczalne dla danego alfabetu.

Z reguły kodowania określonej w tab. 1 nie wynika, jak należy dekodować wiolacje kodowe. Sposób dekodowania wiolacji kodowych wpływa na powielanie błędów przy dekodowaniu. Definiuje się współczynnik powielania błędów jako średnią liczbę błędów po zdekodowaniu przypadającą na pojedyncze przekłamanie poziomu ciągu kodowego. Dla

parametru $q = \frac{1}{2}$ wyznaczono minimalną wartość tego współczynnika równą 2,49.

* * *

Omówione podstawowe cechy i charakterystyki kodu 5B-6B i odpowiedniego sygnału kodowego wykorzystano przy projektowaniu systemu 34 Mbit/s. Niektóre z przedstawionych parametrów, w szczególności dotyczące synchronizacji słów, zostaną szerzej omówione w innych artykułach dotyczących tego systemu [5; 6].

LITERATURA

- [1] CCITT: Binary line codes for digital transmission on optical fibres. COM. XVIII, 1979.
- [2] Rydel M.: Analiza sygnałów kodowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej „Elektronika”, z. 39, 1979.
- [3] Wysocki T. jr, Rydel M.: Metoda obliczania gęstości widmowej mocy sygnałów modulowanych ciągiem danych cyfrowych. Rozprawy Elektrotechniczne, z. 2, 1987.
- [4] Słomiński M., Wysocki T. jr: A Comparative Analysis of 5B-6B codes. Proceedings of International AMSE Conference „Modelling & Simulation”, Sorrento, 1986.
- [5] Słomiński M.: Odbiór, identyfikacja i synchronizacja słów kodu 5B-6B. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 4/1987.
- [6] Wroński L., Zbierzchowski B.: Transkodery binarnego kodu światłowodowego 5B-6B. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 4/1987.