



Rozpoznawanie kodów splotowych

LESZEK NOWOSIELSKI, BARTOSZ ORLIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Na wstępie referatu przedstawiono krótki opis dekodowania kodów splotowych za pomocą algorytmu Viterbiego. Przedstawiono metodę automatycznego rozpoznawania rodzaju kodu splotowego, bazującą na monitorowaniu wartości metryk ścieżek podczas pracy dekodera Viterbiego. Przedstawiono wyniki pomiaru efektywności pracy zaproponowanego algorytmu rozpoznawania kodów splotowych uzyskane metodą symulacji komputerowych.

Słowa kluczowe: telekomunikacja, kanały radiowe, rozpoznawanie, kody splotowe, algorytm Viterbiego

Symbol UKD: 621.39

1. Wstęp

W określonych aplikacjach wymagane jest automatyczne rozpoznawanie, demodulowanie i dekodowanie wykorzystywanych w systemach radiowych protokołów transmisyjnych. Każdy radiowy system transmisyjny cechuje się określonymi, specyficznymi tylko dla niego parametrami transmisji.

Z punktu widzenia operatora urządzenia do automatycznego rozpoznawania i dekodowania protokołów radiowych ważne jest, aby urządzenie to w sposób automatyczny rozpoznało parametry cechujące dany protokół transmisyjny. Po właściwym rozpoznaniu zastosowanego systemu transmisji danych urządzenie powinno przejść do procesu dekodowania przekazywanej informacji zgodnie z regułami specyficznymi dla rozpoznanego systemu transmisyjnego.

Jednym z elementów składowych urządzenia do automatycznego rozpoznawania i dekodowania protokołów radiowych jest blok realizujący rozpoznawanie kodów splotowych wykorzystywanych do korekcyjnego zabezpieczenia transmisji danych.

W poniższym artykule przedstawiono propozycję metody automatycznego rozpoznawania rodzaju kodu spłotowego.

2. Kody spłotowe i ich dekodowanie

O dużej popularności kodów spłotowych świadczy fakt produkcji scalonych koderów i dekodek kodów spłotowych przez takie firmy, jak QALCOMM czy STANFORD TELECOM. Wyroby te chętnie wykorzystuje się w systemach korekcji błędów urządzeń radiokomunikacyjnych. Celowe jest więc zaimplementowanie w urządzeniach do automatycznego rozpoznawania i dekodowania radiowych protokołów transmisyjnych algorytmu, który pozwoli na automatyczne rozpoznawanie tego rodzaju kodów. O tym, że kody spłotowe stały się w ostatnich latach standardem świadczy ich zaistnienie w normie wojskowej dotyczącej modemów KF. Zbiór binarnych kodów spłotowych posiadających maksymalny odstęp swobodny d_{free} jest dostępny w literaturze fachowej.

Optymalną metodą dekodowania kodów spłotowych minimalizującą prawdopodobieństwo błędu decyzji dekodera jest dekodowanie zgodnie z regułą największego prawdopodobieństwa, przy założeniu, że wszystkie wiadomości są jednakowo prawdopodobne. Regułę tę w przypadku kodów spłotowych realizuje algorytm Viterbiego. Algorytm realizuje ten proces dekodowania przez wybór ścieżki w wykresie kratowym, opisującym działanie koder, dla której ciąg zakodowany różni się od ciągu odebranego na najmniejszej liczbie miejsc na ścieżce. Algorytm jest wykonywany przez obliczanie metryki dla każdej możliwej ścieżki w wykresie kratowym. Metryka dla konkretnej ścieżki jest zdefiniowana odległością Hamminga między ciągiem kodowym wyznaczonym przez daną ścieżkę a ciągiem odebranym. Tak więc dla każdego węzła kraty algorytm porównuje ścieżki wchodzące do węzła. Wybierana jest ścieżka o najmniejszej metryce. Obliczenia są powtarzane dla każdego poziomu w wykresie kratowym w zakresie pamięci dekodera. Ścieżki wybrane przez algorytm noszą nazwę ścieżek ocalałych. W trakcie pracy dekodek prowadzi przez wykres kratowy tyle ścieżek, ile stanów posiada koder.

3. Automatyczne rozpoznawanie kodów spłotowych

3.1. Algorytm automatycznego rozpoznawania kodów spłotowych

Warunkiem poprawnej pracy dekodera Viterbiego kodu spłotowego jest znajomość po stronie odbiorczej rodzaju kodu wykorzystywanego do zakodowania odbieranej sekwencji ciągów kodowych. Jeśli zna się rodzaj kodu, można w sposób prawidłowy określić postać wykresu kratowego koder, na podstawie którego dekodek Viterbiego będzie dekodował napływający strumień ciągów kodowych.

Do określenia postaci wykresu kratowego potrzebna jest znajomość następujących parametrów koderu kodu spłotowego:

- ilość komórek rejestru przesuwonego koderu m ;
- ilość bitów informacyjnych podawanych na wejście koderu na jednostkę czasu k ;
- ilość bitów kodowych otrzymywanych na wyjściu koderu na jednostkę czasu n ;
- postać wektora połączeń koderu \vec{g}_i .

Aby dekodery Viterbiego działał poprawnie, konieczne jest także uzyskanie synchronizacji z napływającym strumieniem ciągów kodowych.

Metoda automatycznego rozpoznawania rodzaju kodu polega na monitorowaniu wartości przyrostu metryk ścieżek, na odcinku o długości l gałęzi wykresu kratowego, które przeżyły podczas pracy dekodera Viterbiego. Jeżeli wartość metryki j -tej ścieżki w i -tym i $(i-l)$ -tym kroku dekodowania oznaczymy odpowiednio przez $\gamma_i^{(j)}$ i $\gamma_{i-l}^{(j)}$, to wówczas przyrost wartości metryki i -tej ścieżki przypadający na l gałęzi jest opisany wzorem

$$\Delta_{l,i}^{(j)} = \gamma_i^{(j)} - \gamma_{i-l}^{(j)}. \quad (1)$$

W przypadku gdy dekodery Viterbiego wylicza przyrosty metryk ścieżek bazując na wykresie kratowym odpowiadającym koderowi spłotowemu, który został użyty do wygenerowania odbieranej sekwencji ciągów kodowych, przyrosty metryk odpowiadające jednej ze ścieżek będą miały wartość dużo większą od przyrostów odpowiadających pozostałym ścieżkom, które przeżyły podczas pracy dekodera. Wartość przyrostu metryki dominującej ścieżki powinna wynosić

$$\Delta_{l,i}^{(j)} = l \cdot n, \quad (2)$$

gdzie: l — monitorowana liczba gałęzi wykresu kratowego koderu;
 n — liczba bitów kodowych odpowiadająca jednej gałęzi wykresu kratowego koderu.

W przypadku gdy dekodery Viterbiego wylicza przyrosty metryk ścieżek bazując na wykresie kratowym nieodpowiadającym koderowi spłotowemu, który został użyty do wygenerowania odbieranej sekwencji ciągów kodowych, przyrosty metryk wszystkich ścieżek, które przeżyły podczas pracy dekodera Viterbiego będą miały małą wartość $\Delta_{l,i}^{(j)}$.

Dla przypadku gdy dekodery Viterbiego wylicza przyrosty metryk ścieżek bazując na wykresie kratowym odpowiadającym koderowi spłotowemu, który został użyty do wygenerowania odbieranej sekwencji ciągów kodowych, oraz gdy sekwencja ciągów kodowych zostanie przesłana przez kanał ziarnisty, w którym występują błędy niezależne z prawdopodobieństwem p , sytuacja opisana powyżej powtórzy

się, z tą różnicą, że wartość przyrostu metryki ścieżki dominującej będzie mniejsza od wartości określonej zależnością (2). Różnica pomiędzy tymi wartościami będzie tym większa, im większe będzie prawdopodobieństwo występowania błędów w kanale ziarnistym.

Opisana powyżej zależność przyrostu metryk ścieżek, wyliczanych podczas pracy dekodera Viterbiego, od rodzaju wykresu kratowego (rodzaju kodu), na bazie którego są one wyliczane może zostać wykorzystana do automatycznego rozpoznawania kodu splotowego, który został wykorzystany do zakodowania odbieranych sekwencji ciągów kodowych.

Procedura wykrywania kodu splotowego wskaże dopasowanie określonego wykresu kratowego (kodu splotowego) do odbieranej sekwencji ciągów kodowych gdy $\Delta_{l,i} \geq t$ dla jednej ze ścieżek, które przeżyły, gdzie t jest wartością progową, której wartość została dobrana dla określonego kanału.

Wartość parametru t powinna być mniejsza od $l \cdot n$. Dolna granica wartości parametru t zależy od wartości prawdopodobieństwa występowania błędów w kanale ziarnistym. Im większa jest wartość prawdopodobieństwa występowania błędów w kanale ziarnistym, tym mniejsza powinna być wartość t .

Zbiór rodzaju kodów splotowych testowanych podczas pracy procedury rozpoznawania kodu splotowego może być ograniczony do kodów, których kodery i dekodery są produkowane w postaci układów scalonych, ponieważ te kody występują najczęściej w praktyce.

Dekoder kodu splotowego może działać prawidłowo tylko przy założeniu prawidłowo działającej synchronizacji. Niepoprawne skojarzenie odbieranych bitów z bitami przyporządkowanymi odpowiednim gałęziom w wykresie kratowym kodera spowodowałoby bardzo dużą liczbę błędów. Aby tego uniknąć, stosowane są w praktyce złożone układy nadzorujące i utrzymujące stan synchronizmu dekodera z napływającym strumieniem symboli odebranych. Prosty sposób uzyskiwania synchronizacji jest monitorowanie wartości przyrostu metryk ścieżek, które przeżyły podczas pracy dekodera Viterbiego. Realizuje się to w sposób podobny jak opisane powyżej rozpoznawanie kodów splotowych, z tą różnicą, że nie zmienia się tutaj postaci wykresu kratowego, natomiast przesuwana jest cyklicznie sekwencja odebranych symboli kodowych o jeden bit w stosunku do bitów odpowiadających poszczególnym gałęziom wykresu kratowego kodera. Po każdym takim przesunięciu dokonuje się sprawdzenia wartości przyrostu metryk ścieżek, na odcinku o długości l gałęzi wykresu kratowego, które przeżyły podczas pracy dekodera Viterbiego. W przypadku synchronizacji odebranej sekwencji ciągów kodowych z ciągami kodowymi odpowiadającymi poszczególnym gałęziom wykresu kratowego kodera, przyrosty metryk odpowiadające jednej ze ścieżek będą posiadały wartość dużo większą od przyrostów odpowiadających pozostałym ścieżkom, które miały podczas pracy dekodera. Wartość przyrostu metryki dominującej ścieżki, w przypadku odebrania niezakłóconej sekwencji kodowej oraz w przypadku uzyskania synchronizacji jest określona zależnością (2).

Algorytm wyżej opisanej procedury automatycznego rozpoznawania kodów spłotowych przedstawiono na rysunku 1.

3.2. Opis eksperymentu symulacyjnego automatycznego rozpoznawania kodów spłotowych

W celu przebadania możliwości automatycznego rozpoznawania kodów spłotowych metodą monitorowania wartości przyrostu metryk ścieżek, które przeżyły podczas pracy dekodera Viterbiego, przeprowadzona została symulacja komputerowa pracy odpowiedniego kanału kodowego. W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej otrzymano dane statystyczne, które potwierdziły możliwość automatycznej detekcji rodzaju kodu spłotowego tą metodą.

We wszystkich symulacjach do generacji błędów powstałych w kanale ziarnistym posłużono się modelem kanału z błędami niezależnymi BSC. Program symulacyjny został napisany w języku C++.

W celu przebadania możliwości wykrywania rodzaju kodu metodą monitorowania wartości przyrostu metryk ścieżek, podczas pracy dekodera Viterbiego przeprowadzono szereg symulacji komputerowych, w wyniku których otrzymano dane statystyczne, które wykorzystano do oceny możliwości wykrywania rodzaju kodu spłotowego.

W trakcie eksperymentu symulacyjnego przebadano możliwość wykrywania kodów spłotowych o stopie kodu $R_c = 1/2$ i $R_c = 1/3$. Jako kod wykrywany o stopie kodu $R_c = 1/2$ został wykorzystany kod zalecany przez normę wojskową MIL-STD-188-110A o parametrach:

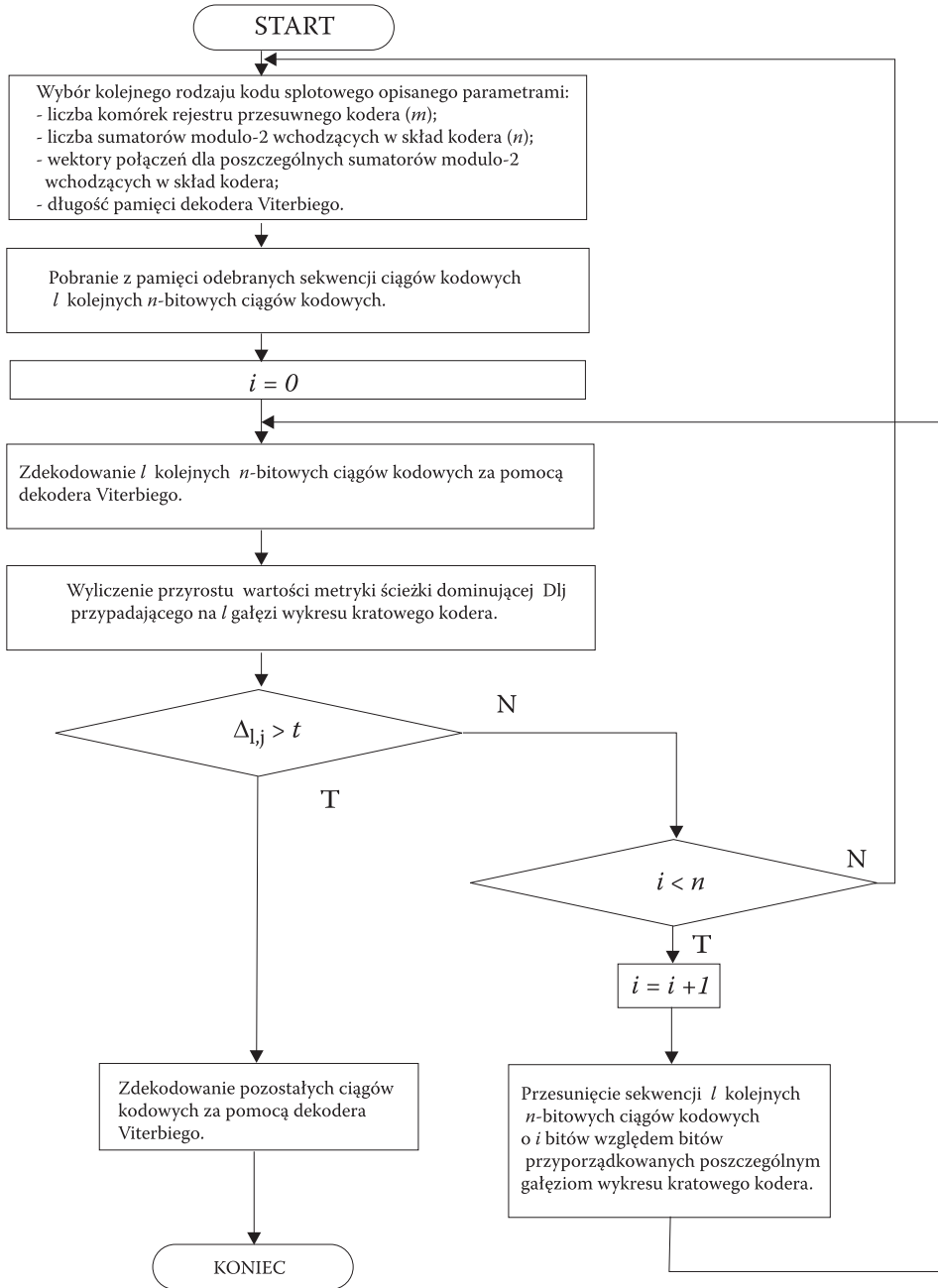
- liczba komórek rejestru przesuwne kodera $m = 7$;
- liczba sumatorów modulo-2 wchodzących w skład kodera $n = 2$;
- wektory połączeń kodera zapisane w kodzie binarnym [1101101], [1001111].

Jako kod wykrywany o stopie kodu $R_c = 1/3$ został wykorzystany kod, który jest standardem przemysłowym o parametrach:

- liczba komórek rejestru przesuwne kodera $m = 7$;
- liczba sumatorów modulo-2 wchodzących w skład kodera $n = 3$;
- wektory połączeń kodera zapisane w kodzie binarnym [1101101], [1001111], [1010011].

Zgodnie z algorytmem pracy programu symulacyjnego, na początku każdej symulacji kodowano ciąg binarny danych wejściowych za pomocą jednego z kodów wymienionych powyżej. Następnie do sekwencji ciągów kodowych otrzymanych z wyjścia kodera wprowadzano błędy wygenerowane przez procedurę symulującą pracę kanału ziarnistego. Zakłóconą sekwencję ciągów kodowych poddawano następnie obróbce przez procedurę automatycznego rozpoznawania kodu spłotowego (rys. 1).

Symulację przeprowadzono metodą Monte Carlo, w wyniku której otrzymano średnią wartość przyrostu metryki ścieżki Δ przypadającą na 1 gałęzi wykresu

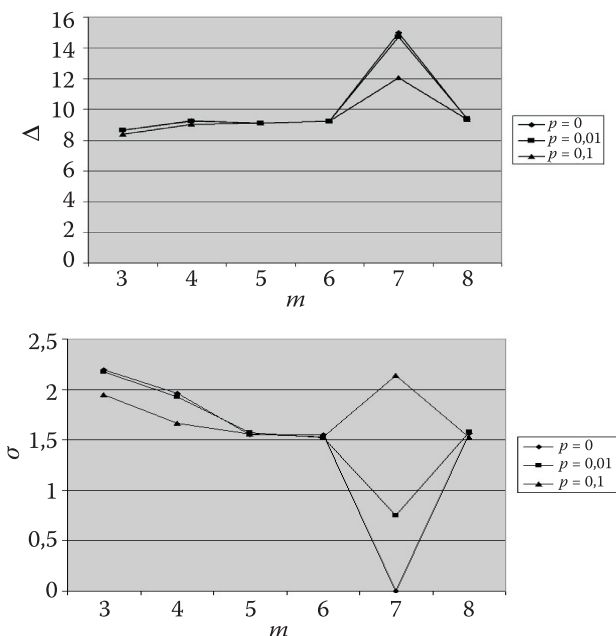


Rys. 1. Algorytm automatycznego rozpoznawania kodów splotowych

kratowego kodera oraz odchylenie standardowe wartości przyrostu metryki ścieżki δ . W wyniku symulacji otrzymano wartości tych parametrów w funkcji:

- rodzaju testowanego kodu (rodzaj kodu dla uproszczenia zapisu zaznaczano liczbą komórek rejestru przesuwonego kodera m);
- liczby l gałęzi wykresu kratowego służących do oceny przyrostu metryki ścieżki;
- prawdopodobieństwa wystąpienia błędu w kanale ziarnistym p ;
- zawartości informacyjnej kodu.

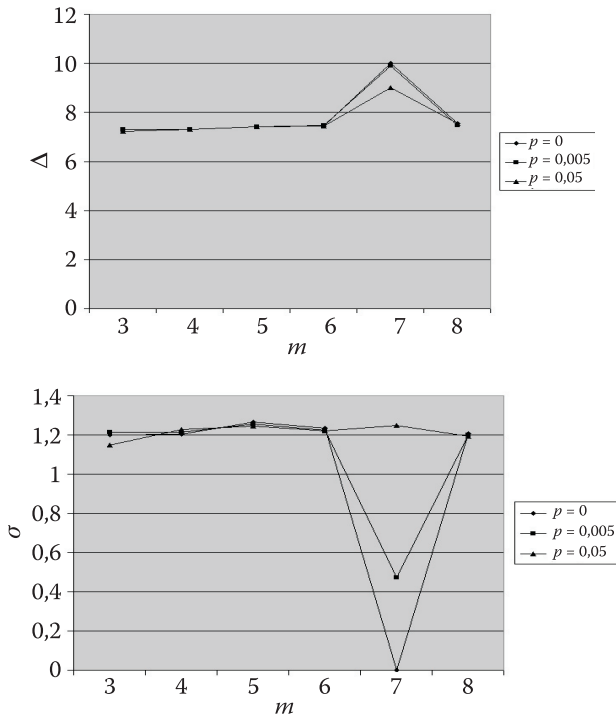
Na rysunku 2 przedstawiono wartość przyrostu metryki ścieżki Δ przypadającą na $l = 5$ gałęzi wykresu kratowego kodera w funkcji rodzaju testowanego kodu, oznaczanego liczbą komórek rejestru przesuwonego kodera m , dla kodów o zawartości informacyjnej $R = 1/3$. Z tego wykresu widać, że w przypadku gdy testowany przez procedurę rozpoznawania kod jest zgodny z kodem zastosowanym do zakodowania odbieranej sekwencji kodowej wartość parametru Δ przyjmuje wartość dużo większą od wartości przypadających dla pozostałych testowanych kodów spłotowych. Różnica ta jest tym większa, im mniejsze jest prawdopodobieństwo wystąpienia błędu w kanale ziarnistym p . W przypadku niezakłóconej sekwencji kodowej ($p = 0$) wartość przyrostu metryki ścieżki wynosi $\Delta_{l,i}^{(j)} = l \cdot n = 5 \cdot 3 = 15$.



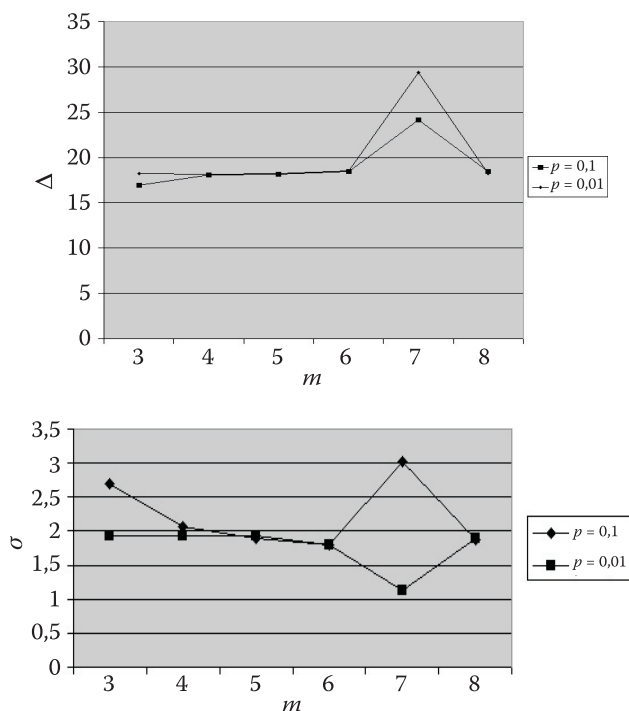
Rys. 2. Wartość przyrostu metryki ścieżki Δ i jej odchylenie standardowe przypadające na $l = 5$ gałęzi wykresu kratowego kodera w funkcji liczby komórek rejestru przesuwonego kodera m dla kodów o stopie kodu $R = 1/3$

Na rysunku 2 przedstawiono także odchylenie standardowe wartości przyrostu metryki ścieżki $\delta_{\bar{}}^{\bar{}}$. Wartość odchylenia standardowego w przypadku kodów niezgodnych z kodem zastosowanym do zakodowania odbieranej sekwencji kodowej jest w przybliżeniu stała. W przypadku zgodności testowanego kodu z kodem odbieranym wartość odchylenia standardowego maleje w funkcji zmniejszających się wartości prawdopodobieństwa wystąpienia błędu w kanale ziarnistym p .

Na rysunku 3 przedstawiono wartość przyrostu metryki ścieżki Δ przypadającą na $l = 5$ gałęzi wykresu kratowego kodera oraz jej odchylenie standardowe w funkcji liczby komórek rejestru przesuwne kodera m dla kodów o zawartości informacyjnej $R = 1/2$. Z tego wykresu wynika, że w przypadku gdy testowany przez procedurę rozpoznawania kod jest zgodny z kodem zastosowanym do zakodowania odbieranej sekwencji kodowej, wartość parametru Δ przyjmuje wartość dużo większą od wartości przypadających dla pozostałych testowanych kodów splotowych. Wartość maksymalna parametru Δ dla kodu o zawartości informacyjnej $R = 1/2$ i $l = 5$ wynosi $\Delta_{l,i}^{(j)} = l \cdot n = 5 \cdot 2 = 10$. W przypadku zwiększenia wartości parametru l wartość przyrostu metryki ścieżki również ulegnie zwiększeniu. Można to zauważyć na rysunku 4.



Rys. 3. Wartość przyrostu metryki ścieżki Δ i jej odchylenie standardowe przypadające na $l = 5$ gałęzi wykresu kratowego kodera w funkcji liczby komórek rejestru przesuwne kodera m dla kodów o stopie kodu $R = 1/2$



Rys. 4. Wartość przyrostu metryki ścieżki Δ i jej odchylenie standardowe przypadające na $l = 10$ gałęzi wykresu kratowego kodera w funkcji liczby komórek rejestru przesuwającego kodera m dla kodów o stopie kodu $R = 1/3$

4. Wnioski

Zaproponowany w artykule algorytm automatycznego rozpoznawania kodów splotowych, polegający na monitorowaniu wartości przyrostu metryk ścieżek podczas pracy dekodera Viterbiego, posiada następujące cechy:

- wraz ze wzrostem liczby l gałęzi wykresu kratowego, służących do oceny przyrostu metryki ścieżki, rośnie różnica pomiędzy przyrostem wartości metryki ścieżki dla kodu dopasowanego a przyrostem wartości metryki ścieżki dla kodów niedopasowanych. Dla dużych wartości parametru l łatwiej jest więc odróżnić kod dopasowany od kodu niedopasowanego;
- wraz ze wzrostem wartości parametru l rośnie opóźnienie wprowadzane przez układ automatycznego rozpoznawania kodów splotowych;
- wartość progowa t przyrostu metryki ścieżki, przypadająca na l gałęzi wykresu kratowego kodera, służąca do detekcji rodzaju kodu powinna być mniejsza od $l \cdot n$. Dolna granica wartości parametru t zależy od wartości prawdopodobieństwa występowania błędów w kanale ziarnistym. Im

- większa jest wartość prawdopodobieństwa występowania błędów w kanale ziarnistym, tym mniejsza powinna być wartość t ;
- w celu zmniejszenia czasu potrzebnego na rozpoznanie kodu splotowego należy ograniczyć liczbę testowanych kodów splotowych do niezbędnego minimum (kodów najczęściej spotykanych w praktyce);
 - dla poprawnego funkcjonowania procedury rozpoznawania kodów splotowych konieczne jest uzyskanie poelementowej synchronizacji z odebraną sekwencją ciągów kodowych.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 18.09.2006 r.

LITERATURA

- [1] L. NOWOSIELSKI, *Efektywność kodów splotowych w kanałach zakresu krótkofalowego*, rozprawa doktorska, WAT, 1998.
- [2] Norma MIL-STD-188-110A.
- [3] L. H. CHARLES LEE, *Convolutional coding Fundamentals and applications*, 1997.
- [4] L. NOWOSIELSKI, *Komputerowa symulacja pracy kanału kodowego zawierającego koder i deko-der kodu splotowego*. Systemy łączności i informatyki na potrzeby obrony i bezpieczeństwa RP, KNSL-96, Zegrze 2-4 października 1996.

L. NOWOSIELSKI, B. ORLIŃSKI

Recognition of convolution codes

Abstract. At first, short description of Viterbi algorithm for convolution codes decoding is given. Next, a method of automatic convolution codes recognition, based on monitoring of the surviving paths metrics of Viterbi algorithm, and its performance are presented. Performance of the proposed algorithm for automatic convolution codes recognition was evaluated using computer simulation.

Keywords: telecommunication, radio channels, recognition, convolution codes, Viterbi algorithm

Universal Decimal Classification: 621.39