

Spis treści:

1. Wprowadzenie do laboratorium 1.
2. Instrukcja do laboratorium 1.
3. Laboratorium 2 czyli krótkie opracowanie wybranego tematu.

Oba laboratoria (1 i 2) można wykonać pojedynczo albo w dwu-osobowych grupach.

Na serwerze studia mamy Sprawozdania, gdzie znajdują Państwo: lab_tel1 oraz lab_tel2.

Ostateczny termin przesłania sprawozdania i opracowania to 13 czerwca.

Jeżeli będą mieli Państwo problemy z umieszczeniem sprawozdań to proszę przesłać je na mój adres e-mail: ewa.obarska@pw.edu.pl

1. Wprowadzenie do laboratorium 1.

WAET - TELEKOMUNIKACJA

Podstawowe informacje na temat ochrony przesyłanych danych przed błędami, które mogą się pojawić podczas transmisji można znaleźć w materiałach do wykładu tele_podstawy.pdf (od slajdu o numerze 50).

Jest to ważny problem współczesnych systemów transmisyjnych, ponieważ coraz większe szybkości transmisji powodują występowanie coraz większej liczby błędów. Dlaczego? Jeżeli mamy małą szybkość transmisji to czas trwania pojedynczego bitu jest stosunkowo długi i zakłócenie w kanale nakłada się na zaledwie kilka bitów. Jeżeli jednak szybkość transmisji wzrasta i to setki albo tysiące razy (w GSM mieliśmy max. dziesiątki kbit/s a w LTE mamy setki Mbit/s) to to samo zakłócenie nałoży się teraz na setki i tysiące bitów.

W systemie 5G, w którym szybkość transmisji jeszcze wzrośnie, problem błędów podczas transmisji (a właściwie problem znalezienia kodów umożliwiających korekcję tak dużej liczby błędów) stał się jednym z podstawowych problemów podczas projektowania tego systemu (patrz wykład tele_komórkowa.pdf).

We wszystkich systemach, w których przesyłamy dane, zależy nam na bezbłędnym ich odbiorze. Jedyną metodą z retransmisją czyli system ARQ (Automatic Repeat Request) jest w stanie nam to zapewnić. Oznacza to, że jeżeli system ma służyć do przesyłania danych czyli żądamy od niego bezbłędnej transmisji (żaden użytkownik nie chciałby korzystać z systemu, w którym nie ma pewności, że odebrane dane są prawidłowe) musimy zastosować jakiś protokół ARQ.

Jak to działa?

Przesyłane dane dzielone są na bloki (ramki), a następnie po dodaniu tzw. reszty kontrolnej przesyłane do odbiorcy. Bity nadmiarowe albo tak zwane kontrolne dopisywane są zgodnie z regułą kodowania cyklicznego CRC. Kody cykliczne stosowane są we wszystkich współczesnych protokołach ARQ (łącznie z protokołem TCP z sieci Internet) ze względu na prostotę i szybkość operacji kodowania i dekodowania.

Nagłówek	Pole danych	CRC-n
----------	-------------	-------

W odbiorniku po sprawdzeniu poprawności odebranego bloku (sprawdzenie poprawności to po

prostu sprawdzenie, czy spełniona jest reguła kodowa czyli czy część z danymi pasuje do części z bitami nadmiarowymi) albo przekazujemy dane odbiorcy (jeżeli odebraliśmy bezbłędną ramkę) albo żądamy powtórzenia ramki. W zależności od organizacji całej transmisji mamy trzy wersje systemu ARQ: Stop-and-Wait (SAW), Go-back-N (GBN) oraz Selective Repeat (SR). Wszystkie te trzy wersje występują we współczesnych protokołach, każda z nich daje bezbłędne dane, ale każda ma swoje wady i zalety.

W metodzie SAW nadajnik wysyła jeden blok (ramkę), zatrzymuje się i czeka na odpowiedź od odbiornika. Odbiornik sprawdza poprawność otrzymanego bloku i przesyła potwierdzenie ACK (blok jest bezbłędny) albo NACK (blok ma błędy). Jeżeli odebrano odpowiedź, że blok był prawidłowy, wysyłamy kolejną ramkę, a jeżeli był błąd powtarzamy tą samą ramkę ponownie.

W GBN wysyłamy ramki jedna po drugiej bez czekania na odpowiedź. Jeżeli otrzymamy informację od odbiornika, że na przykład ramka numer 10 została odebrana błędnie, wracamy do ramki numer 10 (stąd nazwa metody) i ponownie nadajemy wszystkie ramki od numeru 10. W tej metodzie odbiornik nie posiada bufora i jeżeli stwierdzi błąd w ramce numer 10, musi czekać na ponowny jej odbiór ignorując ramki o innych numerach (nie są one nawet sprawdzane bo i tak nie ma co z nimi zrobić – nie mamy gdzie ich zapisać).

Metoda SR różni się od GBN tym, że powtarzamy wyłącznie ramki błędne. Odbiornik ma pamięć i zapisuje wszystkie poprawnie odebrane ramki, a następnie ustawia je w odpowiedniej kolejności.

Przy porównywaniu metod ARQ czy też podczas podejmowania decyzji co wybrać do nowo tworzonego systemu należy wziąć pod uwagę kilka najważniejszych parametrów, takich jak: jakość kanału (czyli jakie jest prawdopodobieństwo przekłamania bitów), szybkość transmisji czy czas po jakim odbierzemy informację (było dobrze czy źle) na temat wysłanego bloku.

Z czego dziś korzystamy?

Metoda SR stosowana jest obecnie w protokole Transmission Control Protocol TCP ze stosu TCP/IP w sieci Internet (obecnie mamy SR, ale przez lata wykorzystywano w protokole TCP wersję GBN – zaczynano od łatwiejszego protokołu).

Wszystkie systemy radiowe nazywane często jako bezprzewodowe metody dostępu do Internetu wykorzystują najprostszą wersję SAW co oznacza, że po nadaniu jednego bloku, nadajnik zatrzymuje się i czeka na odpowiedź. Taka wersja protokołu ARQ występuje w standardzie Bluetooth, sieciach WiFi (wszystkie standardy 802.11) oraz wszystkich systemach komórkowych od GPRS przez HSPA po LTE i 5G.

Od czego zależy wybór wersji protokołu ARQ?

Należy postawić pytanie: dlaczego w systemach bezprzewodowych nie możemy wykorzystać protokołu TCP (przecież przesyłamy pakiety IP)?

Protokół TCP stworzono z myślą o sieci, w której mamy stosunkowo mało błędów podczas transmisji, a więc rozsądnie było dzielić przesyłane zbiory na długie bloki (ok. 1500 bajtów). Zyskujemy dzięki temu na szybkości bo przesyłamy stosunkowo mało dodatkowych bitów (nagłówka i reszty kontrolnej) w porównaniu z polem informacyjnym. Jednakże w kanale radiowym, który jest kanałem o dużej liczbie błędów prawie każdy długi blok był odbierany z błędami i wymagał retransmisji (w ARQ nie ma znaczenia czy ramka ma tylko jeden błędny bit czy połowa przesłanego bloku została przekłamana i tak musimy go powtórzyć). Należy więc wysłać krótkie bloki czyli dzielić ramkę TCP na fragmenty czyli stworzyć nową numerację bloków i policzyć nowe reszty kontrolne czyli stworzyć nowy protokół. Oznacza to, że w zależności od jakości kanału musimy wybrać odpowiednią długość przesyłanego bloku.

Kolejnym istotnym parametrem systemu jest czas nazwany Round-Trip Time (RTT) – czas potrzebny na wysłanie ramki, przetworzenie jej w odbiorniku i przesłanie odpowiedzi. Od czego ten czas zależy? Przede wszystkim od odległości nadajnik – odbiornik.

Ma on decydujące znaczenie w protokole SAW – od niego zależy ile czasu czekamy na nadanie

kolejnego bloku czyli ma istotny wpływ na szybkość transmisji. Jeżeli w tym protokole czas RTT jest duży to nawet przy bezbłędnym kanale szybkość przesyłania danych będzie niska – czas czekania na odpowiedź w stosunku do czasu transmisji będzie bardzo duży.

Ma on również wpływ na protokół GBN – jeżeli jest on długi powtarzamy dużą liczbę ramek (zasada GBN oznacza, że jeżeli nadajnik otrzymał informację o odbiorze błędnej ramki numer 15, to powtarza wszystkie ramki od numeru 15 nawet jak ze względu na duże opóźnienie jest w trakcie nadawania ramki numer 115).

Ale co to znaczy długi czas RTT? Czy 100 ms to dużo, a może 20 ms to też dużo? To czy czas ten jest z naszego punktu widzenia długi czy nie, zależy od stosowanej w systemie szybkości transmisji. Jeżeli mamy system, w którym dane są przesyłane z szybkością ok. 10 kbit/s (jak na początku w GSM) to i 100 ms nie stanowi problemu (należy policzyć ile bitów możemy w tym czasie przesłać). Jeżeli mamy system, w którym szybkość transmisji jest liczona w setkach Mbit/s to chcemy aby czas RTT był rzędu pojedynczych milisekund. Stąd w kolejnych systemach komórkowych zmniejsza się promień komórki, a w wytycznych dla 5G pojawia się zalecenie aby czas RTT wynosił ok. 1-2 ms (a nawet i mniej).

Badając protokoły ARQ dla kanału radiowego stwierdzą Państwo, że sprawność protokołu SAW jest bardzo niska (definicja sprawności czy efektywności protokołu jest podana w instrukcji). Narzuca się wobec tego pytanie – korzystamy z systemów komórkowych i przesyłamy dane i nie jest przecież tak źle jak podczas naszych pomiarów czyli gdzie jest błąd?

We wszystkich systemach komórkowych wykorzystujemy wersję Hybrydowego ARQ (HARQ). HARQ oznacza stosowanie dodatkowego kodu korekcyjnego (na przykład splotowego), którego zadaniem jest korekcja błędów w ramce co ma spowodować, że nie będzie wymagana retransmisja. Nie możemy zrezygnować z kodu cyklicznego CRC, ponieważ żadna metoda korekcji błędów nie gwarantuje nam poprawienia wszystkich błędów.

I na koniec wyjaśnienie do poprzedniego zdania czyli dlaczego nigdy nie mamy pewności, że skorygowaliśmy wszystkie błędy? Każdy kod kanałowy (nadmiarowy) czyli służący do wykrywania (detekcji) i korekcji błędów ma swoje możliwości (może skorygować ściśle określoną liczbę błędów). Jeżeli podczas transmisji przez kanał, w naszych danych pojawi się więcej błędów niż może je skorygować zastosowany kod, decyzja dekodera będzie błędna i prześlemy użytkownikowi błędne dane.

Program: blok_arq.exe

2. Instrukcja do laboratorium 1.

WAET - TELEKOMUNIKACJA SYSTEMY ARQ

Stosując dowolny protokół ARQ (np.: TCP czy HDLC) mamy pewność, że odebrane dane pozbawione są błędów, jednakże za bezbłędny odbiór płacimy spadkiem szybkości transmisji danych użytkowych (spowodowany retransmisjami tych samych danych).

Jakość każdego protokołu ARQ, z punktu widzenia użytkownika końcowego, można zmierzyć podając parametr, zwany **efektywnością (sprawnością) protokołu**. Liczony jest on, jako stosunek liczby odebranych przez użytkownika końcowego bitów informacyjnych do liczby wszystkich możliwych do przesłania w tym czasie bitów. Przykładowo, efektywność wynosząca 0.6 oznacza, że tylko 0.6 czasu transmisji przeznaczono na przesyłanie bitów informacyjnych, czyli że z punktu widzenia użytkownika efektywna szybkość transmisji stanowi tylko 0.6 rzeczywistej szybkości transmisji w kanale.

Efektywność systemu ARQ zależy od parametrów systemu transmisyjnego:

- jakości kanału czyli stopy błędów BER (więcej błędów to konieczność powtarzania większej liczby bloków),
- opóźnienia na drodze nadajnik-odbiornik-nadajnik RTT (*round-trip time*),
- szybkości transmisji

oraz od odpowiedniego doboru parametrów protokołu:

- wyboru metody retransmisji (SAW, GBN czy SR),
- długości pojedynczego bloku.

Dla danego systemu transmisyjnego (jakość kanału, opóźnienie oraz szybkość transmisji) możliwe jest takie dobranie parametrów protokołu ARQ (metoda retransmisji i maksymalna długość bloku), aby uzyskać maksymalną efektywność systemu.

Celem laboratorium jest określenie jak poszczególne parametry systemu transmisyjnego mają wpływ na efektywność protokołów ARQ oraz jak należy dobierać długość bloku, aby uzyskać największą szybkość efektywną. Wynikiem końcowym ćwiczenia powinno być więc określenie w jakich warunkach możliwe jest stosowanie poszczególnych metod retransmisji oraz jak powinniśmy dobierać maksymalną długość bloku danych.

W ćwiczeniu wykorzystano strukturę protokołu HDLC - co oznacza długość pola nagłówka 16 bitów oraz zastosowanie kodu CRC-16 ITU a także przedzielanie kolejnych bloków flagami 8-bitowymi o strukturze: 01111110 (przy ciągłej transmisji flaga końcowa jednego bloku jest flagą początkową bloku następnego). W symulacji założono, że transmisja danych odbywa się tylko w jednym kierunku, a kanał zwrotny jest kanałem bezbłędny.

Krótki opis protokołu HDLC

Większość protokołów stosowanych w telekomunikacji to wersje protokołu HDLC (High-Level Data-Link Control). Ramka w protokole HDLC składa się z pól: flaga początkowa (F), adres (A), kontrola (C), pole z bitami informacyjnymi (I), bity nadmiarowe (FCS) oraz flaga końcowa (F). Flagi początkowa i końcowa to 8-bitowe ciągi 01111110 ograniczające całą ramkę. Pola adresowe i kontrolne mają z reguły po 8 bitów, chociaż istnieje możliwość rozszerzenia każdego z nich o kolejny bajt. Pole kontrolne służy do numeracji kolejnych ramek, a także zawiera informacje dotyczące potwierdzania odebranych bloków. Pole informacyjne może zawierać dowolną liczbę bitów (niekoniecznie podzielną przez 8). Pole FCS tworzy resztę z dzielenia bloku: pole adresowe, kontrolne i informacyjne przez wielomian CRC-16 (ITU-T) i ma długość 16 bitów.

Przebieg laboratorium:

Badanie wszystkich protokołów należy przeprowadzić dla tych samych parametrów systemu transmisyjnego (należy wybrać kilka, minimum 3, znacznie się od siebie różniących wartości), np.:

- szybkość transmisji R - 100 kbit/s, 1 Mbit/s i 10 Mbit/s,
- opóźnienie RTT - 1 ms, 10 ms i 100 ms (maksymalne opóźnienie może wynosić 700 ms - systemy satelitarne).

Podane wartości są wyłącznie orientacyjne i podczas laboratorium można użyć zupełnie innych parametrów.

UWAGI:

- Za kanał dobrej jakości (reprezentant kanału kablowego) można przyjąć kanał transmisyjny o stopie błędów $BER = 10^{-6}$, a za kanał złej jakości (kanał radiowy) o $BER = 10^{-3}$.
- Jeżeli badamy np. kanał radiowy interesują nas tylko wyniki dla $BER = 10^{-3}$ i przepisujemy tylko ten jeden wynik, pomijając pozostałe (analogicznie dla kanału przewodowego przepisujemy wartości dla $BER = 10^{-6}$).
- Pomiary można przeprowadzić w dowolnej kolejności, albo dla danego protokołu badamy kanał radiowy a potem przewodowy, albo dla danego kanału badamy wszystkie protokoły.
- Należy odpowiednio dobrać długość bloku do jakości kanału, jeżeli $BER = 10^{-3}$ to oznacza to, że mamy średnio 1 błędny bit na 1000 przesłanych czyli szansa, że ramka dłuższa od 1000 bitów zostanie przesłana bez błędów jest bardzo mała. Natomiast, kiedy mamy kanał dobrej jakości i mało błędów, lepiej jest wysyłać dane podzielone na długie bloki – mamy mniej nagłówek i reszt kontrolnych oraz mniej potwierdzeń czyli mniej dodatkowych bitów w stosunku do bitów danych.

1. Dla każdego protokołu (SAW, GBN i SR) oraz każdego kanału (radiowy i przewodowy) pokaż wpływ szybkości transmisji i opóźnienia RTT na efektywność protokołu.

Badając kanał radiowy ($BER = 10^{-3}$) należy ustawić długość bloku na około 500 – 800 bitów, natomiast dla kanału przewodowego ($BER = 10^{-6}$) długość bloku powinna być około 8000 – 10000 bitów.

Wyniki można przedstawić w tabelce lub na wykresach.

2. Omów uzyskane wyniki, odpowiadając na następujące pytania:

- a. W jakich systemach (jakość kanału, wartość RTT i szybkość transmisji) metoda SAW daje zadowalającą sprawność?
- b. Dlaczego protokół SAW w niektórych przypadkach praktycznie przestaje działać – efektywność spada prawie do 0?
- c. Czy wpływ RTT i szybkości transmisji w metodzie GBN jest taki sam, jak w przypadku protokołu SAW? Jeżeli nie, to gdzie występują największe różnice?
- d. Dlaczego wpływ RTT na efektywność protokołu GBN jest zależny od jakości kanału i czym można wyjaśnić to zjawisko?
- e. Dlaczego efektywność protokołu SR nie zależy od szybkości transmisji i wartości RTT?

3. Podsumowanie pomiarów: w jakich warunkach można uzyskać porównywalne efektywności, czyli kiedy zamiast SR można wykorzystać GBN lub SAW?

3. Laboratorium 2 czyli krótkie opracowanie wybranego tematu.

Natomiast **Laboratorium drugie** zostanie zastąpione krótkim opracowaniem (ok. 2 strony, ale oczywiście może być dłuższe) na **jeden** z poniżej wybranych tematów.

Prawie wszystkie tematy dotyczą dnia dzisiejszego i tego z czym najbardziej kojarzy się współczesna telekomunikacja czyli systemy komórkowe 5G i dostęp do Internetu oraz systemy IoT (Internet Rzeczy). Większość zaproponowanych tematów dotyczy najbliższej przyszłości telekomunikacji i celem tej części jest zmuszenie Państwa (jeżeli do tej pory nikt się tym nie interesował) do zajrzenia na strony związane z systemami komórkowymi i producentami sprzętu telekomunikacyjnego. Polecam skorzystać z materiałów i stron w języku angielskim (ale oczywiście nie jest to obowiązkowe - po prostu w języku angielskim mamy więcej informacji).

1. Czy system 5G będzie miał szkodliwy wpływ na środowisko i ludzi?

Mamy olbrzymią ilość artykułów na temat szkodliwości systemu 5G – czy wszystkie wątpliwości są słuszne, a może to tylko tzw. „fake news”?

2. Czy systemy mobilne (komórkowe) są pod każdym względem najlepszym rozwiązaniem?

Odpowiedź proszę krótko uzasadnić. Należy wziąć pod uwagę cechy systemu ważne dla Państwa: może to szybkość transmisji, a może bezpieczeństwo danych (tzw. cyberbezpieczeństwo) a może jeszcze coś innego. A może wybór systemu (przewodowy czy bezprzewodowy) zależy od zastosowania i nie ma jednego najlepszego rozwiązania? W jakich sytuacjach Państwo wolicie korzystać z dostępu stałego, a kiedy lepszy jest dostęp mobilny?

3. Systemy Internetu Rzeczy IoT – co to jest i gdzie są (będą w przyszłości) wykorzystywane?

To temat dla zainteresowanych tą tematyką, związaną ściśle z systemami komórkowymi 5G (ale nie tylko – mamy w Polsce na przykład systemy LoRaWAN zaprojektowane pod kątem IoT).

4. Wdrażanie systemu 5G w inteligentnym domu (*smart home*).

Jakie urządzenia możemy zainstalować w domu (monitoring, bezpieczeństwo, kontrola oświetlenia, ogrzewania i inne)? Jeżeli ktoś korzysta już z takich systemów to jakie ma wnioski – są pomocne, a może zbyteczne?

5. Wdrażanie systemu 5G w inteligentnym mieście (*smart city*).

Jakie systemy IoT wykorzystywane są lub będą w miastach i jak wprowadzenie systemu 5G wpłynie na rozwój miast inteligentnych.

6. System 5G a VR/AR (*virtual reality/augmented reality*).

Uważa się, że aplikacje związane z VR i AR będą głównymi aplikacjami wpływającymi na zainteresowanie systemem 5G (tzw. „killer app”). Jak to zagadnienie widziane jest obecnie przez specjalistów i producentów sprzętu telekomunikacyjnego?

7. Możliwości wykorzystania systemu 5G w ochronie zdrowia (*fitness, healthcare*).

Jakie urządzenia bezprzewodowe można dziś kupić, a jeśli ktoś korzysta z tego typu urządzeń to jakie ma wnioski i spostrzeżenia? Jak wprowadzenie systemu 5G wpłynie na rozwój zastosowań?

8. Możliwości wykorzystania systemu 5G w edukacji (w tym w szkolnictwie wyższym).

9. Bezprzewodowe technologie i systemy w motoryzacji.

W literaturze to zagadnienie określane jest jako *connected car* albo systemy V2V (*Vehicle to Vehicle*). Systemy te służą do nadzoru ruchu i umożliwią skonstruowanie pojazdów autonomicznych, wykorzystane są tu przede wszystkim systemy 5G (ale nie tylko). Można opisać ogólnie na czym to polega, można podać przykłady firm zajmujących się tą tematyką i ich pomysły (na przykład aplikacje do odczytywania znaków drogowych).