

Dokumentácia vlastného protokolu nad UDP

Vladimír Jančár

21. októbra 2024

Abstrakt

Táto dokumentácia má za úlohu podrobne opísať návrh a vysvetliť implementáciu komunikačnej aplikácie s využitím vlastného UDP protokolu. Najprv opisuje konkrétne časti hlavičky protokolu a ich úlohy. Ďalej dokument približuje konkrétne metódy, využívané na spoľahlivý prenos dát pomocou jednotlivých častí navrhovanej hlavičky. Na záver rozpráva o implementácii tohto protokolu pomocou vlastnej komunikačnej aplikácie.

Obsah

1	Úvod	2
2	Návrh protokolu	2
2.1	Hlavička protokolu	2
2.2	Popis polí	3
2.3	Kontroly integrity	3
2.4	Spoľahlivý prenos údajov	4
2.5	Nadviazanie spojenia	5
2.6	Udržanie spojenia	5
2.7	Ukončenie spojenia	6
3	Implementácia	7
3.1	Fragmentácia	7
3.2	Vytváranie a riešenie chýb	8
4	Záver	9
5	Zdroje	9

1 Úvod

Tento protokol je určený na peer-to-peer komunikáciu v lokálnej Ethernet sieti a umožňuje prenos textu alebo súborov systémom Stop-and-Wait Automatic Repeat Request. Na nadviazanie spojenia využíva 3-Way Handshake, pričom stabilitu spojenia zabezpečuje keep-alive systém. Vďaka kontrolnému súčtu CRC16 a poradovým číslam packetov protokol chráni integritu prenášaných údajov a s fragmentáciou umožňuje aj posielanie väčších súborov. Hlavnou výhodou tohto protokolu je jednoduchosť, pričom nezanedbáva kľúčové vlastnosti ako detekciu chýb, spoľahlivé doručovanie správ alebo udržiavanie spojenia.

2 Návrh protokolu

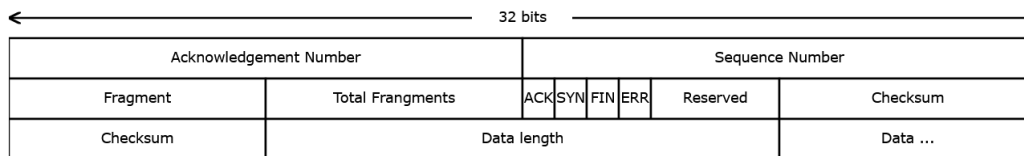
Protokol je navrhutý nad UDP, no jeho cieľom je zaručovať spoľahlivý prenos dát, a preto napodobňuje funkčnosť TCP. Zabezpečuje nadviazanie spojenia medzi dvoma stranami podobne ako TCP 3-way handshake. Zvláda prenášať vaše súbory vďaka fragmentácii dát. V prípade, že overenie integrity zlyhá, poškodené dáta sa pošlú znova. Protokol umožňuje aj udržanie aktívneho spojenia medzi uzlami vďaka pravidelnej kontroly druhej strany spojenia.

2.1 Hlavička protokolu

Hlavička vlastného protokolu je veľkosti 88 bitov a je štruktúrovaná nasledovne:

Pole	Veľkosť	Popis
Acknowledgement number	16b	Poradové číslo prijatého paketu
Sequence number	16b	Poradie paketu
Fragment	8b	Poradie fragmentu
Total fragments	8b	Celkový počet fragmentov
ACK	1b	Acknowledgement flag
SYN	1b	Synchronization flag
FIN	1b	Finish flag
ERR	1b	Error flag
Reserved	4b	Nevyužité bity
Checksum	16b	Kontrolná hodnota CRC16
Data length	16b	Dĺžka prenášaných údajov

Diagramová reprezentácia štruktúry hlavičky je vyjadrená v obrázku 1.



Obr. 1: Štruktúra hlavičky protokolu

2.2 Popis polí

- **Acknowledgement number:** Pri potvrdení správnosti packetu toto pole obsahuje poradové číslo prijatého packetu.
- **Číslo sekvencie:** Pomáha kontrolovať správne poradie poslaných správ alebo súborov, čo je užitočné najmä pri fragmentácii.
- **Číslo fragmentu a celkový počet fragmentov:** Prijímateľ tieto údaje potrebuje na správne poskladanie prijatých fragmentov, prípadne na zistenie, či niektoré fragmenty nechýbajú.
- **ACK, SYN, FIN, ERR:** Riadiace flagy slúžiace na nadviazanie spojenia pomocou 3-way handshake, ukončenie spojenia a indikáciu chybných packetov.
- **Checksum:** Kontrolná hodnota pre zistenie poškodenia prenášaných údajov.
- **Dĺžka údajov:** Očakávaná dĺžka prenášaných údajov v bytoch.

2.3 Kontroly integrity

K zabezpečeniu integrity prenášaných údajov využíva protokol 16-bitovú cyklickú kontrolu (CRC16) na výpočet kontrolného súčtu - **checksum**. Odosielateľ pred poslaním správy vypočíta jej checksum a vloží ho do hlavičky protokolu. Prijímateľ po prijatí správy vypočíta jej checksum znova a porovná ho s číslom v hlavičke protokolu. Ak sa zhodujú, správa nebola počas prenosu poškodená a prenos dát pokračuje. V prípade nezahody je odosielaťovi poslaná odpoveď s chybovým flagom ERR a poškodené dáta sa pošlú znova. Postup pri zaznamenaní poškodenia je podrobnejšie opísaný v časti 2.4.

Kontrolný súčet je 16-bitová hodnota vypočítaná nasledovne:

1. Najprv si vyberieme mnohočlen, ktorý budeme používať pri výpočte hodnoty CRC. Pre CRC16 sa bežne používa:

$$P(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$

(V hexadecimálnom tvare **0x8005**)

2. Nastavíme počiatočnú CRC hodnotu. Zvyčajne sa používa **0xFFFF**.
3. Postupne prechádzame vstupnými dátami. Každý byte údajov ktoré kódujeme, prejde nasledujúcimi krokmi:
 - (a) XOR-ujeme byte s najvyššími ôsmimi bitmi hodnoty CRC.
 - (b) Pozrieme sa, či má najvyšší bit hodnotu 1. Ak áno, spravíme bitový posun hodnoty CRC doľava a XOR-ujeme ju s vybraným mnohočlenom. Ak nie, spravíme iba bitový posun CRC doľava.
 - (c) Ak sme ešte neprešli všetky bity v byte, vrátime sa do kroku (a).
4. Nazáver XOR-ujeme CRC hodnotu s 0xFFFF, ako je štandardom pri CRC-16-IBM, ktorý sme sa snažili napodobniť.

2.4 Spoľahlivý prenos údajov

Protokol zabezpečuje spoľahlivý prenos údajov spôsobom **Stop & wait Automatic Repeat Request (S&W ARQ)**. To znamená, že po každom poslanom packete musí odosielateľ čakať na odpoveď od prijímateľa. Na základe tejto odpovede sa buď pošle packet znova, alebo sa pošle ďalší. Celý proces vyzerá nasledovne:

1. Odosielateľ pošle packet so špecifickým poradovým číslom (sequence number)¹ a čaká na odpoveď od prijímateľa.
2. Na základe odpovede môžu nastať tieto prípady:
 - Ak nedostane odosielateľ odpoveď do 250ms, vyšle rovnaký packet znova a čaká. To sa opakuje až kým nedostane odpoveď alebo kým nie je komunikácia prerušená.

¹ide o globálne poradie, takže každá správa má vlastné číslo. V prípade, že sa dovíši maximum, poradie začína opäť od nuly. Pri fragmentácii (3.1) majú všetky fragmenty rovnaké poradové číslo.

- Keď je v prijatom packete nájdená chyba (checksum od odosielateľa sa nezhoduje s checksumom vypočítaným prijímateľom), odošle sa ako odpoveď packet s rovnakým poradovým číslom v Acknowledgement field a ERR flagom s hodnotou 1. Odosielateľ po tejto odpovedi pošle rovnaký packet znova.
- Ak je prijatý packet v poriadku, odošle sa odpoveď vo forme packetu s rovnakým poradovým číslom v acknowledgement field a ACK flagom s hodnotou 1.

2.5 Nadviazanie spojenia

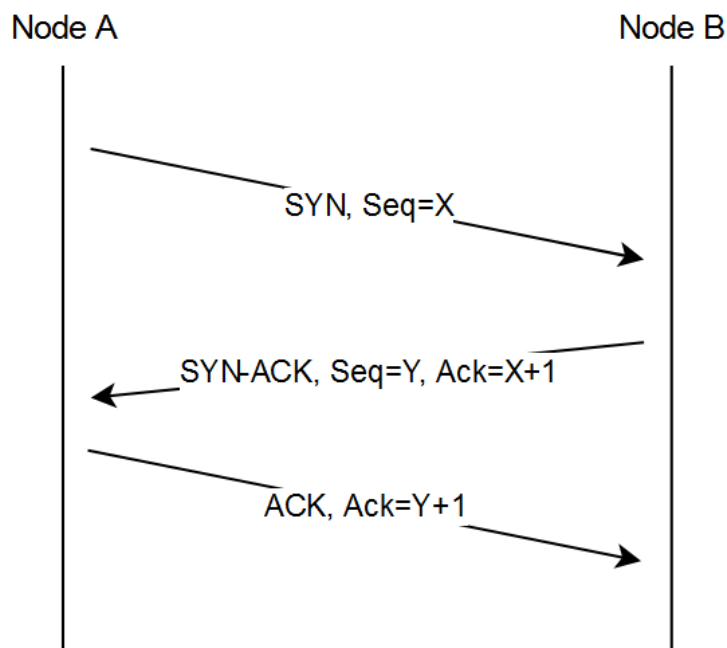
Predtým, než bude možné si vymieňať údaje, musia sa oba uzly presvedčiť, že druhá strana je pripravená komunikovať. K tomuto účelu slúži tzv. **3-Way Handshake** (Obr. 2), ktorý pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. Odosielateľ žiadosti o nadviazanie spojenia pošle packet s vlajkou **SYN=1** a poradovým číslom **X (Seq=X)**.
2. Keď prijímateľ dostane SYN packet, odošle odpoveď: tzv. SYN-ACK packet s vlajkami **SYN=1** a **ACK=1**. Packet bude obsahovať polia (**Seq=Y**) a (**Ack=X+1**).
3. Nakoniec iniciátor spojenia na SYN-ACK packet odpovie odoslaním ACK packetu, kde (**Ack=Y+1**). Potom je spojenie úspešne naviazané.

2.6 Udržanie spojenia

Pre udržanie spojenia medzi dvoma uzlami využíva protokol metódu **Keep-Alive**. Aby sa predišlo strate spojenia v prípade, že ani jedna strana neposiela údaje, vymieňajú si uzly tzv. **heartbeat packety** každých 5 sekúnd nečinnosti. Takýmto spôsobom protokol zisťuje, či sú obe strany stále pripojené. Heartbeat packety vyzerajú tak, že ich ACK flag má hodnotu 1 a ich poradové číslo je 0. Ak jedna zo strán nedostane odpoveď na 3 po sebe odoslané heartbeat packety, spojenie sa považuje za ukončené. Vtedy nastane jedna z nasledujúcich situácií:

- Ak nedostane komunikátor odpoveď na žiaden z heartbeat packetov, vypíše informačnú správu pre používateľa o ukončení spojenia. V prípade, že sa spojenie prerušilo počas prenosu textu alebo súboru, vypíše aj to, že prenos zlyhal.



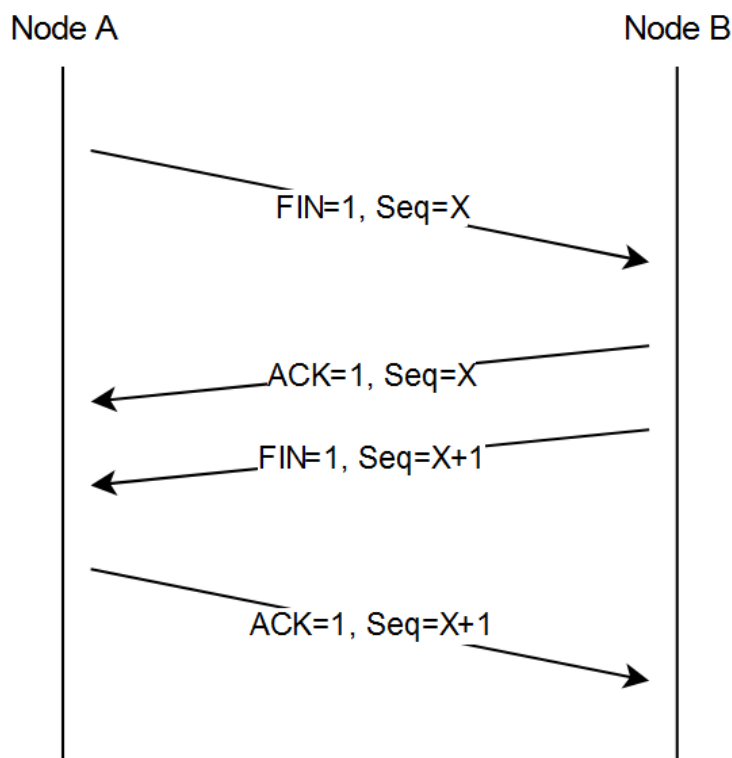
Obr. 2: Diagram procesu nadviazania spojenia

- Ak sa podarí obnoviť spojenie (komunikátor dostane odpoveď aspoň na posledný odoslaný heartbeat packet) a prerušenie nastalo počas prenosu textu alebo súboru, pokúsi sa pokračovať v prenose tam, kde sa spojenie prerušilo.

2.7 Ukončenie spojenia

V protokole prebieha ukončenie spojenia podobne ako pri TCP (4-way termination) (Obr 3). Proces vyzerá nasledovne:

1. Odosielateľ pošle packet s flagom **FIN=1** a poradovým číslom (Seq=X).
2. Po prijatí FIN packetu druhý uzol odpovie odoslaním packetu s flagom **ACK=1** a rovnakým poradovým číslom. Následne odošle aj FIN packet s novým poradovým číslom (Seq=X+1).
3. Prvý odosielateľ po prijatí FIN packetu odošle posledný ACK packet, čím definitívne potvrdzuje ukončenie spojenia.



Obr. 3: Diagram procesu ukončenia spojenia

3 Implementácia

Na implementáciu protokolu bola v jazyku Python² vytvorená komunikačná aplikácia. Tá umožňuje nadviazanie spojenia dvoch uzlov pomocou nášho vlastného protokolu. Pri spustení používateľ zadá IP adresu druhého uzla, port na prijímanie správ a port na odosielanie. Keďže ide o peer-to-peer komunikáciu, po úspešnom spojení si obe strany môžu vymieňať správy až do ukončenia spojenia.³ To môže nastať keď jeden z používateľov napíše `"/disconnect"`, alebo jednoducho vypne aplikáciu. Správanie uzla je zobrazené diagramom v Obr. 4

3.1 Fragmentácia

Implementácia podporuje fragmentovaný prenos údajov s maximálnou veľkosťou fragmentu definovanou používateľom. Každý fragment správy nesie informácie

²Python v3.10.12 s použitím knižníc `socket` a `threading`.

³Vďaka vláknam môžu oba uzly správy aj prijímať, aj posilať

o svojej pozícii v kompletnej správe a je očíslovaný rovnakým sekvenčným číslom. Postup prenosu dát pri fragmentácii:

1. Veľká správa sa rozdelí na niekoľko menších fragmentov, pričom každá z nich obsahuje časť pôvodnej správy má rovnaké poradové číslo (sequence number v hlavičke protokolu). Každý fragment má osobitné fragmentové číslo, ktoré označuje jeho poradie medzi zvyšnými fragmentami.⁴
2. Prijímateľ postupne dostane všetky fragmenty, pričom podľa poradového čísla a fragmentového čísla rozpozná, že patria k tej istej správe a v akom poradí ich následne treba poskladať. Pred poskladaním sa každý fragment skontroluje (vypočíta sa checksum pomocou CRC16). Ak je fragment poškodený, odošle sa naspäť hlásenie o chybe (ERR packet) a fragment sa získa od odosielateľa znova.
3. Nakoniec sa všetky fragmenty zoradia podľa fragmentových čísel a spoja sa do výslednej správy.

3.2 Vytváranie a riešenie chýb

Protokol zahŕňa mechanizmy na detekciu a požiadanie o opätovné odoslanie stratených alebo poškodených packetov. Pre ich otestovanie sa v implementácii nachádzajú spôsoby, ako zámerne vytvárať chyby:

1. Náhodná zmena bitov v packete (simulácia poškodenia dát počas prenosu) aby nesedel checksum odosielateľa a checksum prijímateľa.
2. Zahodenie niektorých packetov.
3. Duplikovanie niektorých packetov.

Tieto mechanizmy občas naschvál narušia bezchybnú výmenu údajov, s účelom otestovať riešenie chýb pomocou navrhovaného protokolu. Metódy riešenia takýchto problémov sú rozoberané v častiach 2.3, 2.4 a 2.6. Hlavná myšlienka je, že akékoľvek poškodené alebo stratené packety sa opäť vyžadujú od odosielateľa, a duplikované packety sú ignorované.

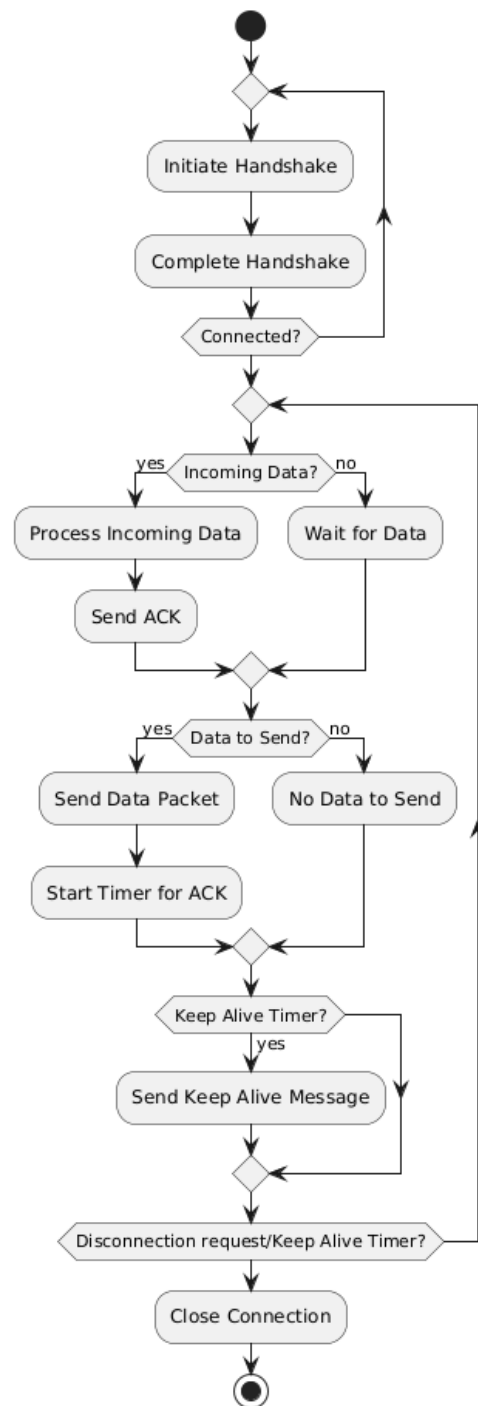
⁴Maximálna veľkosť fragmentu je okrem používateľského vstupu ohraničená aj maximálnou veľkosťou UDP packetov (2^{16} bitov).

4 Záver

Úspešne sme navrhli a implementovali vlastný protokol na jednoduchý, no spoľahlivý prenos údajov spôsobom *Stop-and-Wait ARQ*. Protokol umožňuje fragmentáciu správ, kontrolu integrity pomocou CRC-16 a zabezpečuje spoľahlivé spojenie vďaka Keep-Alive systému a nadviazaním spojenia cez 3-way handshake. Prenášané packety sú viditeľné prostredníctvom programu Wireshark a sú v nej rozoznateľné polia nášho vlastného protokolu.

5 Zdroje

- <https://www.planttext.com/>
- <https://app.diagrams.net/>
- <https://protocol-designer.app/protocols/9d5267ac-fe04-441b-849c-d9c5c5564e9>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol
- https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check
- STEINMETZ, Ralf – WEHRLE, Klaus. 2005. Peer-to-Peer Systems and Applications. Berlin, 2005. 476 s. ISBN 978-3-540-29192-0



Obr. 4: Diagram opisujúci správanie uzla.