



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Peter Lakatoš

Analyzátor USB paketů

Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Pavel Ježek, Ph.D.

Studijní program: Informatika

Studijní obor: Programování a softwarové systémy

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Poděkování.

Název práce: Analyzátor USB paketů

Autor: Peter Lakatoš

Katedra: Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Pavel Ježek, Ph.D., Katedra distribuovaných a spolehlivých systémů

Abstrakt: USB zbernica je dnes jedným z najrozšírenejších spôsobov pripojenia periférií k počítaču. Cieľom práce bolo vytvoriť software, ktorý analyzuje zachytenú komunikáciu medzi zariadením pripojeným na danú zbernicu a počítačom.

Aplikácia prehľadným spôsobom vizuálne zobrazuje zanalyzované dáta – konkrétne sa zameriava na HID triedu zariadení a ponúka aj sémantický význam jej úzkej podmnožiny do ktorej patria myš, klávesnica a joystick. Pri vizuálnej reprezentácii dát sa práca inšpiruje rôznymi dostupnými softwarmi, pričom rozlične kombinuje resp. dopĺňa ich vlastnosti a implementuje z nich tie, ktoré vníma ako najlepšie riešenie v danej situácii.

Dôležitá vlastnosť aplikácie je parsovanie HID Report Descriptoru vďaka ktorému bude v budúcnosti jednoduchšie pridať sémantickú analýzu rôznym ďalším HID zariadeniam. Celkový návrh aplikácie by mal ponúknuť možnosť budúcej implementácie ďalších USB tried pre prípadné rozšírenie.

Klíčová slova: USB HID Analyzátor

Title: USB Packet Analyzer

Author: Peter Lakatoš

Department: Department of Distributed and Dependable Systems

Supervisor: Mgr. Pavel Ježek, Ph.D., Department of Distributed and Dependable Systems

Abstract: The USB bus is the most common way of connecting peripherals to personal computers. The goal of this thesis is to create an application which analyzes communication between a device connected to this bus and a computer.

The application is capable to readably display analyzed data, with specific focus on HID class devices. The application implements semantic analysis of a subset of HID devices consisting of mice, keyboards and joysticks. The methods that the application uses to visually represent data are inspired by already existing applications, where our application combines them and improves their capabilities to achieve better results.

Notable part of the application is its ability to parse HID Report Descriptor, to accomplish easier addition of new HID devices for semantic analysis. Overall design of the application is general enough to allow simple addition of analysis for other USB classes.

Keywords: USB HID Analyzer

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Základné pojmy	3
1.2	Existujúce aplikácie	8
1.3	Požadované funkcie	13
1.4	Ciele práce	15
2	USB	16
2.1	Komunikácia	16
2.2	Konfigurácia	17
2.3	USB Descriptory	17
2.4	Windows	18
3	Analýza	22
3.1	Získanie USB packetov	22
3.2	Sémantická analýza dát	24
3.3	Voľba frameworku	29
3.4	Spracovávanie pcap súborov	30
3.5	Uchovávanie informácií	31
3.6	Spracovávanie live capture	32
3.7	Zobrazenie základných informácií	33
3.8	Hexdump	36
3.9	Zobrazenie sémantického významu dát	38
4	Vývojová dokumentácia	40
4.1	Kompilácia	40
4.1.1	Inštalácia Qt	40
4.1.2	Visual Studio 2019 a Qt	41
4.2	Architektúra aplikácie	43
4.3	USB_Packet_Analyzer	44
4.3.1	Užívateľská interakcia	44
4.3.2	ItemManager	46
4.4	DataViewer	48
4.4.1	Model	48
4.4.2	Delegát	49
4.4.3	Hexdump	49
4.4.4	Hexdump delegát	50
4.4.5	TreeItem	51
4.4.6	TreeItemBaseModel	51
4.4.7	ColorMapModel	52
4.4.8	USBPCapHeaderModel	53
4.4.9	AdditionalDataModel	53
4.4.10	BaseInterpreter	53
4.4.11	InterpretFactory	55
4.5	HIDDevices	56
4.6	DataHolder	56

4.7	PacketExterStructs.hpp	57
4.7.1	ExternStructs	57
5	Možnosti rozšírenia	59
5.1	Ukladanie výstupu do súboru	59
5.2	Iná vizuálna reprezentácia dát	59
5.3	Pridávanie nových interpreterov pre descriptors	59
5.4	Pridanie interpreteru na interrupt transfer	59
5.4.1	Pridanie nových HID zariadení	59
5.5	Pridanie analýzy pre isochronous a bulk transfer	59
5.6	?Možnosť rozšírenia na iné platformy?	59
6	Užívateľská dokumentácia	60
6.1	Inštalácia	60
6.2	Orientácia v GUI aplikácie	60
6.3	Používanie aplikácie	60
7	Záver	61
7.1	Zhrnutie	61
7.2	Budúce plány	61
	Zoznam použitej literatúry	62
	Zoznam obrázkov	67
	Zoznam tabuliek	69
	Seznam použitých zkratok	70
	Prílohy	71
.1	První příloha	72

1. Úvod

USB je najrozšírenejšia zbernica na pripojenie rôznych periférií k počítaču. Vznikla v druhej polovici 90. rokov 20. storočia, kedy boli rôzne zariadenia a ich porty veľmi úzko mapované. Na pripojenie základných zariadení ako myš alebo klávesnica slúžil napríklad sériový port PS/2 [1]. K pripojeniu tlačiarne sa často používal paralelný port Centronics [2]. Ešte pred PS/2 portom sa myš pripájala cez veľmi známy sériový port RS-232 [3]. Všetky tieto porty boli typu *point-to-point* – na jeden port je možné pripojiť len jedno zariadenie. Toto sa paralelným portom dalo čiastočne obísť tým, že niektoré zariadenia podporovali tzv. *daisy chain* – do pripojeného zariadenia sa pripojí ďalšie zariadenie, do toho sa pripojí ďalšie, atď. (napríklad typická tlačiareň toto nepodporovala, takže musela byť pripojená na konci *daisy chainu*). Existovala takisto paralelná *SCSI* zbernica [4], ktorej návrh bol prispôbený aby podporoval *daisy chain*. Tá fungovala dobre na zariadeniach ako externé HDD a skenery, ale bola nepraktická pre zariadenia ako myš a klávesnica.

USB vzniklo za účelom nahradiť a zjednotiť tieto spôsoby pripojenia bežných periférií k počítaču. Návrh zbernice je založený na hviezdicovej topológii, ktorá umožňuje cez jeden port pripojiť až 127 zariadení súčasne. Z toho vyplýva, že USB interface v sebe zahŕňa obrovskú množinu protokolov, ktoré sú hierarchicky usporiadané. K analýze paketov ktoré sa pohybujú na danej zbernici nám slúžia tzv. USB paket analyzátory, ktoré môžu mať podobu hardwarového zariadenia alebo softwarovej aplikácie. Môžu slúžiť napríklad ako učebná pomôcka pre účel lepšieho pochopenia jednotlivých protokolov. Takisto sa často využívajú pri implementácii vlastného USB zariadenia na ladenie komunikácie medzi daným zariadením a driverom. Využitie ale majú aj v opačnom prípade, keď implementujeme vlastný driver a potrebujeme sledovať jeho komunikáciu s konkrétnym zariadením. Cieľom tejto práce bude naprogramovať funkčný softwarový USB analyzátor, ktorý by mal presnejšie slúžiť práve ako učebná pomôcka pre lepšie pochopenie určitej množiny protokolov. Cieľová platforma aplikácie bude Windows.

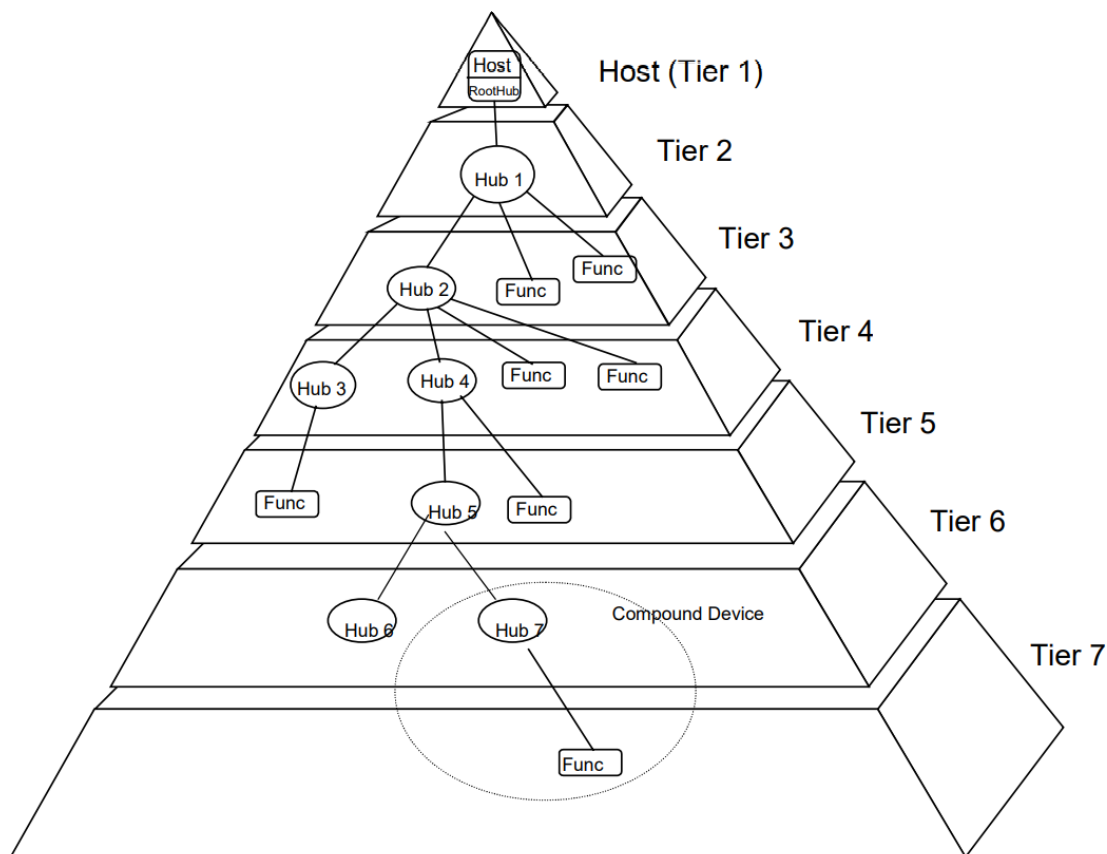
1.1 Základné pojmy

V tejto sekcii si vysvetlíme niektoré základné pojmy ktoré budeme neskôr v texte používať.

Ako sme už vyššie spomínali a ako ilustruje obrázok 1.1, USB zbernica je založená na vrstevnatej hviezdicovej topológii. Na vrchu všetkého sa nachádza **USB Host** [6], čo je systém do ktorého sa pripájajú ostatné USB zariadenia (v našom prípade je *USB Host* počítač). **USB zariadenie** [7] je buď:

- **Hub** [8] – poskytuje dodatočné pripojenia k USB zbernici.
- **Funkcia** [9] – poskytuje novú funkcionálnu systém (napríklad joystick, reproduktory, myš a pod.)

V každom USB systéme sa nachádza práve jeden *USB Host*. Ten má integrovaný tzv. **Root Hub** [6], ktorý poskytuje možné body pripojenia pre ďalšie zariadenia. Interface medzi hostom a USB sa nazýva **Host Controller** [6]. Vzhľadom



Obr. 1.1: USB topológia. Obrázok prevzatý z USB 2.0 špecifikácie [5].

na niektoré časové obmedzenia USB je maximálny počet vrstiev 7 (vrátane *USB Host* vrstvy). Každý káblový segment je *point-to-point* [10] spojenie medzi:

- $host \longleftrightarrow hub/funkcia$
- $hub \longleftrightarrow hub/funkcia$

USB zariadenia využívajú tzv. **descriptor** na predávanie informácií o sebe samých. **Descriptor** [11] je dátová štruktúra s predom definovaným formátom. Existuje viacero typov *USB descriptorov* (device, endpoint, interface atď.), ktorých význam si vysvetlíme neskôr.

Vzhľadom na hierarchickú štruktúru USB protokolov sa *USB zariadenia* delia na rôzne triedy [12]. *USB trieda* je zoskupenie zariadení (alebo interfacov) ktoré majú spoločné vlastnosti alebo funkcionality. Tieto triedy umožňujú *USB hostovi* identifikovať dané zariadenie a jeho funkcionality. Každá trieda má svoju vlastnú *Class Specification* – definuje správanie zariadení v jednotlivých triedach a opisuje ich komunikačný protokol, ktorý sa naprieč triedami líši. Takisto definuje rôzne descriptors, ktoré sú špecifické pre danú triedu. Príklady USB tried a jednotlivých zariadení ktoré do nich patria sú:

- Mass Storage (napr. SD karta a flash disk)
- Audio (napr. reproduktory a slúchadlá)
- HID – Human Interface Device (napr. myš, klávesnica alebo joystick)

Paket [13] je súbor dát zoskupený na prenos po zbernici. Typicky sa skladá z troch častí:

- základné informácie o danom pakete (napríklad zdroj, cieľ, dĺžka) – takisto nazývané hlavička paketu
- samotné dáta
- detekcia chýb, opravné bity

Komunikácia na zbernici medzi *USB hostom* a *zariadením* prebieha práve pomocou prenosu *USB paketov*. Existujú 4 typy takýchto prenosov [14]:

- **Control Transfer** – používa sa na konfiguráciu *USB zariadenia* v momente keď sa pripojí na zbernicu.
- **Bulk Data Transfer** – typicky pozostáva z väčšieho množstva dát ktoré sú posielané nárazovo (využívajú ho najmä tlačiarne alebo skener). Vďaka detekcii chýb na hardwarovej úrovni je zaistená správnosť prenesených dát.
- **Interrupt Data Transfer** – spoľahlivý prenos ktorý sa využíva hlavne na odovzdávanie aktuálnych informácií (ako napríklad pohyb myšou). Tieto informácie musia byť doručené USB zbernicou za čas kratší ako má špecifikované dané zariadenie.
- **Isochronous Data Transfer** – takisto nazývaný ako streaming v reálnom čase. Typický príklad je prenos zvuku.

Našu aplikáciu by sme chceli zamerať na Windows a tak si vysvetlíme ešte zopár špecifických pojmov, ktoré sa viažu na túto konkrétnu platformu.

Podľa MSDN dokumentácie [15] je **USB client driver** software nainštalovaný na počítači, ktorý komunikuje s USB zariadením aby spojzdnil jeho funkcionality. Žiaden *USB client driver* ale nemôže priamo komunikovať so svojím zariadením. Namiesto toho vytvorí požiadavku, súčasťou ktorej je dátová štruktúra nazývaná **URB** [16] (USB Request Block). Tá opisuje detaily požiadavky, takisto ako aj status o jeho vykonaní.

Na záver si ešte zdefinujeme rozdiel medzi *USB paket analyzátorom* a *USB paket snifferom*. Pod pojmom **USB paket sniffer** budeme rozumieť aplikáciu, ktorá monitoruje dianie na USB zbernici a je schopná ho rozumným spôsobom ukladať v predom definovanom formáte. Ako **USB paket analyzátor** budeme brať aplikáciu ktorá je schopná rozanalyzovať USB pakety (istým spôsobom ich vyobraziť alebo ukázať ich sémantický význam) uložené v predom definovanom formáte. Bežne sa tieto pojmy označujú za jednu a tú istú vec, aj keď ich funkcionality spolu nijako priamočiaro nesúvisí a existujú nástroje, ktoré vedia len jedno alebo druhé. Preto dáva zmysel ich od seba explicitne oddeliť.

Momentálne by sme mali chápať všetky základné pojmy týkajúce sa USB, a tak si poďme trochu bližšie objasniť zameranie našej aplikácie. Našu aplikáciu zameriavame výukovým smerom pre programátorov, ktorí chcú lepšie pochopiť komunikáciu na USB zbernici. Z toho dôvodu by sme v nej určite chceli zahrnúť analýzu základných USB descriptorov, ktoré sú bližšie definované v špecifikácii USB 2.0 [17] v kapitole 9.6. Keďže chceme bližšie priblížiť komunikáciu na danej zbernici, potrebujeme konkrétne zariadenia, s ktorými ju budeme analyzovať.

Dáva dobrý zmysel si zvoliť zariadenia, ktoré každý z nás dobre pozná, má ich k dispozícii a bežne ich využíva. Zároveň by ale mali mať dostatočne jednoduchý komunikačný protokol. Práve preto sa s našou aplikáciou zameriame na užšiu podmnožinu HID zariadení, konkrétne myš, klávesnica a joystick. Vzhľadom na zameranie našej aplikácie výukovým smerom prikladáme najväčšiu prioritu samotnej analýze dát. Z dôvodu celkovej univerzality USB je z didaktického hľadiska ťažké nasimulovať jednotný príklad u každého študenta zvlášť. Už len obyčajná myš, aj keď je to jedno zariadenie, má od rôznych výrobcov inak nadefinované správanie a posielá dáta v rozličných formátoch. Preto je pre nás dôležité vedieť analyzovať pakety, ktoré si učiteľ predpripraví, skontroluje ich didaktickú správnosť a uloží do súboru. Podpora živého zachytávania paketov a ich analýzy je tak v našom programe najmenej dôležitá.

Keďže sa v našej práci budeme venovať hlavne analýze HID zariadení, tak si túto USB triedu rozoberieme trochu detailnejšie.

HID

Podľa dodatku k USB špecifikácii [18] je **HID** (z anglického „Human Interface Device“) USB trieda pozostávajúca prevažne zo zariadení, ktoré sú využívané človekom na riadenie určitých systémových aplikácií. Medzi najpoužívanjšie príklady patrí myš, klávesnica alebo joystick.

Ako sme už spomínali vyššie, jednotlivé USB triedy majú definované vlastné descriptorý špecifické pre danú triedu. Jedným z takýchto descriptorov je aj *Report Descriptor*, ktorý popisuje dáta generované konkrétnym zariadením. Analýzou *Report Descriptoru* sme schopní určiť veľkosť a kompozíciu dát posielať zariadením. Z toho vyplýva, že komunikácia HID zariadenia s USB hostom sa môže líšiť nie len vo veľkosti posielať zariadením, ale takisto aj v ich význame.

Lepšie to uvidíme na konkrétnom príklade. K dispozícii máme 2 rozdielne myši (obrázok 1.2) – Genius DX-120 [19] a Logitech G502 Proteus Spectrum [20]



(a) Fotka genius myši prevzatá z oficiálnej (b) Fotka logitech myši prevzatá zo stránky
genius stránky [21] obchodu [22]

Obr. 1.2: Ukážka myší, ktorých input budeme porovnávať

Teraz si ukážeme ako sa líši ich input. Dáta budeme vyobrazovať pomocou obyčajného hexdumpu (zvýraznená časť v hexdumpe reprezentuje input zariadenia). Na oboch myšiach budeme mať stlačené ľavé tlačidlo a mierne ich posunieme smerom hore. Dáta, ktoré poslala Genius myš sú vyobrazené na obrázku 1.3 a

dáta poslané Logitech myšou môžeme vidieť na obrázku 1.4. Už na prvý pohľad môžeme vidieť, že dáta majú rozdielnú dĺžku a obecné o ich význame nevieme nič povedať – ten je definovaný v *Report Descriptore*.

```
0010 01 01 00 02 00 81 01 04 00 00 00 01 00 ff 00 ..... .....
```

Obr. 1.3: Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Genius myši.

```
0010 01 01 00 03 00 81 01 08 00 00 00 01 00 00 00 ff ..... .....
```

```
0020 ff 00 00 ..... .....
```

Obr. 1.4: Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Logitech myši.

Aj napriek tomu, že sa jedná o zariadenia z tej istej USB triedy a dokonca o rovnaké zariadenie – myš, má ich komunikácia rozličný tvar definovaný priamo výrobcom zariadenia. Analýzou *Report Descriptoru* (o ktorej si viac povieme v sekcii 3.2) sme zistili, že dáta, ktoré poslala Genius myš majú nasledujúci význam:

- Byte 0: bity 0–2 reprezentujú stlačenie jednotlivých tlačidiel, bity 3–7 tvoria len dodatočnú výplň bytu
- Byte 1: reprezentuje súradnicu X
- Byte 2: reprezentuje súradnicu Y
- Byte 3: reprezentuje koliesko myši

Pre porovnanie, význam dát poslaných Logitech myšou je nasledovný:

- Byte 0–1: reprezentujú stlačenie jednotlivých tlačidiel
- Byte 2–3: reprezentuje súradnicu X
- Byte 4–5: reprezentuje súradnicu Y
- Byte 6: reprezentuje koliesko myši
- Byte 7: je rezervovaný výrobcom myši

Vizuálne zobrazený význam dát Genius myši je ukázaný na obrázku 1.5 a Logitech myši na obrázku 1.6.

```
0010 01 01 00 02 00 81 01 04 00 00 00 01 00 ff 00 ..... .....
```

Tlačidlá X Y Koliesko

Obr. 1.5: Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Genius myši s významom.

```
0010 01 01 00 03 00 81 01 08 00 00 00 01 00 00 00 ff ..... .....
```

```
0020 ff 00 00 ..... .....
```

Tlačidlá X Y Koliesko Reserved

Obr. 1.6: Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Logitech myši s významom.

Z toho vyplýva, že aby sme boli schopní vykonať sémantickú analýzu HID zariadení, bude pre nás kľúčové vedieť rozparsovať *Report Descripor* a na základe toho interpretovať input zariadení.

1.2 Existujúce aplikácie

Momentálne existuje niekoľko známych aplikácií ktoré slúžia na analýzu USB paketov. Ich predbežným skúmaním a používaním sme ale zistili, že úplne nevyhovujú našim konkrétnym požiadavkám. Avšak mnohé ich funkcie nám prídu užitočné a môžu poslúžiť ako inšpirácia v implementovaní našej aplikácie. V tejto kapitole si ukážeme výhody a nevýhody zopár aplikácií, ktoré sme si zvolili ako príklady v oblasti paket analyzátorov. Ich výber spočíval v tom, že sú veľmi rozšírené medzi verejnosťou a sú najbližšie k tomu čo by sme chceli od našej aplikácie.

Je nutné upozorniť, že väčšina dnešných analyzátorov sú platené aplikácie, prípadne majú odomknuté len základné vlastnosti s možnosťou dokúpenia si plnej verzie. Práve preto sme nemali možnosť si pri všetkých vyskúšať ich celú funkcionality a na niektoré platené funkcie máme tak len ilustračný pohľad.

Wireshark

Aplikácia, ktorá na prvý pohľad nesúvisí s USB zbernicou. Wireshark je pravdepodobne najznámejší analyzátor a sniffer sieťových paketov. Jeho funkcionality je veľmi rozsiahla, a vzhľadom na to, že sa jedná o open-source projekt, neustále rastie. Vďaka jeho obecnému návrhu podporuje spoluprácu s rôznymi inými sniffermi (LANalyzer, NetXRay a pod.). Jeden z takýchto snifferov je *USBPCap*, ktorý zachytáva USB komunikáciu a tým pádom je Wireshark schopný analyzovať pakety aj nad touto zbernicou.

Pre priblíženie niektorých funkcií Wiresharku si ukážeme analýzu komunikácie s USB myšou (Genius DX-120 [19]). Medzi tie úplne základné funkcie určite patrí hexdump dát nad ktorými prebieha analýza, ktorý je vyobrazený na obrázku 1.7.

```
0000 1c 00 a0 49 1f 6a 8a dc ff ff 00 00 00 00 08 00 ...I·j·. . . . .
0010 01 01 00 06 00 80 02 34 00 00 00 03 09 02 34 00 .....4 . . . . 4·
0020 02 01 00 a0 32 09 04 00 00 01 03 01 02 00 09 21 ....2·. . . . .!
0030 11 01 00 01 22 38 00 07 05 81 03 04 00 0a 09 04 ...."8·. . . . .
0040 01 00 00 03 00 00 00 09 21 11 01 00 01 22 16 00 ..... !·. . . ."
```

Obr. 1.7: Ukážka hexdumpu vo Wiresharku.

Tento hexdump je tvorený dátami z jedného control prenosu, kde zariadenie posiela informácie o sebe samom v podobe rôznych descriptorov.

V hexdumpe si takisto vieme pomocou kliknutia a ťahania myšou označiť ľubovoľné dáta, ktoré chceme. Zvýraznené byty na obrázku 1.8 reprezentujú jeden *endpoint descriptor*.

```
0000 1c 00 a0 49 1f 6a 8a dc ff ff 00 00 00 00 08 00 ...I·j·. . . . .
0010 01 01 00 06 00 80 02 34 00 00 00 03 09 02 34 00 .....4 . . . . 4·
0020 02 01 00 a0 32 09 04 00 00 01 03 01 02 00 09 21 ....2·. . . . .!
0030 11 01 00 01 22 38 00 07 05 81 03 04 00 0a 09 04 ...."8·. . . . .
0040 01 00 00 03 00 00 00 09 21 11 01 00 01 22 16 00 ..... !·. . . ."
```

Obr. 1.8: Ukážka hexdumpu so zvýrazneným endpoint descriptorom.

Pri pohybe myšou nad daným hexdumpom ponúka Wireshark interaktívnu odozvu, pričom farebne oddeľuje jednotlivé byty podľa ich významu. Na obrázku 1.9 vidíme konkrétny príklad – ak podržíme myš nad hexa častou bytu

00, automaticky nám to označí aj byte 04 pred ním, pretože spoločne reprezentujú jednotnú informáciu – položku *wMaxPacketSize* v *endpoint descriptor*.

```

0000  1c 00 a0 49 1f 6a 8a dc ff ff 00 00 00 00 08 00  ...I-j...
0010  01 01 00 06 00 80 02 34 00 00 00 03 09 02 34 00  .....4....4
0020  02 01 00 a0 32 09 04 00 00 01 03 01 02 00 09 21  ...-2...!
0030  11 01 00 01 22 38 00 07 05 81 03 04 00 0a 09 04  ..."8...
0040  01 00 00 03 00 00 00 09 21 11 01 00 01 22 16 00  .....!"...

```

Obr. 1.9: Ukážka hexdumpe s farebným oddelením na základe významu.

Ďalšia užitočná vlastnosť je, že pri označení hexa znakov v hexdumpe, sa samé označia aj im odpovedajúce tlačiteľné znaky (obdobne to funguje aj opačným smerom). To, že vyššie označených 7 bytov na obrázku 1.8 reprezentujú *endpoint descriptor* sme zistili vďaka špecifikácii jednotlivých descriptorov a vlastnou analýzou bytov v hexdumpe. Wireshark ale ponúka rozličné zobrazenie tých istých dát, a to napríklad aj pomocou stromovej štruktúry, ktorá už jednotlivým bytom pridáva ich sémantický význam v slovnom tvare ako je ukázané na obrázku 1.10 nižšie.

```

> Frame 6: 80 bytes on wire (640 bits), 80 bytes captured (640 bits)
> USB URB
> CONFIGURATION DESCRIPTOR
> INTERFACE DESCRIPTOR (0.0): class HID
> HID DESCRIPTOR
> ENDPOINT DESCRIPTOR
> INTERFACE DESCRIPTOR (1.0): class HID
> HID DESCRIPTOR

```

Obr. 1.10: Ukážka reprezentácie dát pomocou stromovej štruktúry.

Jednotlivé položky si môžeme bližšie rozbaľiť. Napríklad vyššie zvýraznených 7 bytov reprezentujú konkrétny *endpoint descriptor*, ktorý je ukázaný na obrázku 1.11. Na tom istom obrázku si takisto môžeme všimnúť, že položka *wMaxPacketSize* má hodnotu 4, čo je presne hodnota bytov 04 00, ktoré sme spomínali vyššie na obrázku 1.9

```

▼ ENDPOINT DESCRIPTOR
  bLength: 7
  bDescriptorType: 0x05 (ENDPOINT)
  > bEndpointAddress: 0x81 IN Endpoint:1
  > bmAttributes: 0x03
  > wMaxPacketSize: 4
  bInterval: 10

```

Obr. 1.11: Endpoint descriptor reprezentovaný dátami zvýraznenými na obrázku 1.7 vyššie.

Medzi viac špecifické funkcie patrí detailnejšie vyobrazenie jednotlivých bytov a ich význam, ako je možné vidieť nižšie na obrázku 1.12. Na tomto obrázku vidíme rozbalenú položku *bEndpointAddress*, ktorej hodnota je 0x81. Siedmy bit tejto hodnoty reprezentuje smer endpointu (IN – slúži na prenos dát device → host, OUT opačne) a dolné 4 bity označujú číslo endpointu. Túto vlastnosť aj napriek jej využitiu mnohé konkurenčné aplikácie postrádajú.

```

    ▾ bEndpointAddress: 0x81 IN Endpoint:1
      1... .... = Direction: IN Endpoint
      .... 0001 = Endpoint Number: 0x1

```

Obr. 1.12: Ukážka vyobrazenia jednotlivých bytov.

Wireshark ponúka interaktívne užívateľské rozhranie. V prípade kliknutia na konkrétny byte v hexdumpe sa nám označí jemu odpovedajúca položka v stromovej štruktúre. Príklad je ukázaný na obrázku 1.13.

```

    ▾ ENDPOINT DESCRIPTOR
      bLength: 7
      bDescriptorType: 0x05 (ENDPOINT)
      > bEndpointAddress: 0x81 IN Endpoint:1
      > bmAttributes: 0x03
      ▾ wMaxPacketSize: 4
        ...0 0... .... = Transactions per microframe: 1 (0)
        .... ..00 0000 0100 = Maximum Packet Size: 4
      bInterval: 10

```

```

00 00 01 03 01 02 00 09 21
07 05 81 03 04 00 0a 09 04
09 21 11 01 00 01 22 16 00

```

Obr. 1.13: Ukážka kliknutia na položku v hexdumpe.

Podobne to funguje aj opačne, takže ak klikneme na položku v stromovej štruktúre, označí sa jej odpovedajúca časť v hexdumpe. Príklad kliknutia na *endpoint descriptor* v stromovej štruktúre a označenia jemu odpovedajúcej časti hexumpu je vidieť na obrázku 1.14.

```

> ENDPOINT DESCRIPTOR (1.0): class HID
> INTERFACE DESCRIPTOR (1.0): class HID
> HID DESCRIPTOR

```

```

00 00 01 03 01 02 00 09 21 ....-2-... ..!
07 05 81 03 04 00 0a 09 04 ...."8-.....-..
09 21 11 01 00 01 22 16 00 .....!.....-..

```

Obr. 1.14: Ukážka kliknutia na položku *endpoint descriptoru* v stromovej štruktúre.

Obecné vyobrazenie pohybu paketov na zbernici bez hlbšej analýzy je ukázané na obrázku 1.15 nižšie.

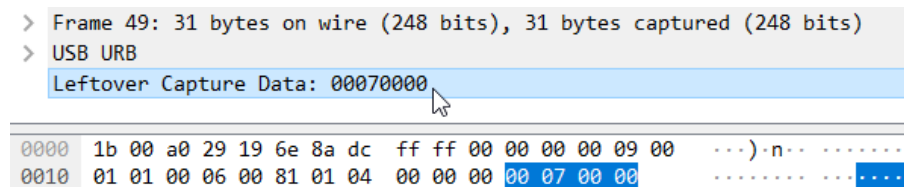
No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	host	1.6.0	USB	36	GET_DESCRIPTOR Request DEVICE
2	0.000684	1.6.0	host	USB	46	GET_DESCRIPTOR Response DEVICE
3	0.000750	host	1.6.0	USB	36	GET_DESCRIPTOR Request CONFIGURATION
4	0.001388	1.6.0	host	USB	37	GET_DESCRIPTOR Response CONFIGURATION
5	0.001432	host	1.6.0	USB	36	GET_DESCRIPTOR Request CONFIGURATION
6	0.002912	1.6.0	host	USB	80	GET_DESCRIPTOR Response CONFIGURATION
7	0.004170	host	1.6.0	USB	36	SET_CONFIGURATION Request
8	0.004827	1.6.0	host	USB	28	SET_CONFIGURATION Response
9	0.004905	host	1.6.0	USB	27	Unknown type 7f

Obr. 1.15: Príklad obecného vyobrazenia jednotlivých paketov vo Wiresharku.

Výhoda Wiresharku je hlavne v tom, že podporuje širokú škálu descriptorov a plná verzia programu je dostupná úplne zadarmo. Z pohľadu užívateľa je až prekvapivé, že aj napriek rozsiahlosti programu je aplikácia veľmi user-friendly orientovaná a dopĺňa ju intuitívne užívateľské rozhranie.

Naopak, jeho nevýhodou je sčasti neprehľadný hexdump. Ako môžeme vidieť na obrázku 1.7, jedná sa o obyčajný hexdump, ktorý nijakým spôsobom neoddeľuje význam dát bez interakcie užívateľa. Preto v momente ak by sme nemali

stromovú štruktúru k odpovedajúcemu hexdumpu, museli by sme sa riadiť špecifikáciou a vlastnou analýzou. V prípade rozsiahlejšieho hexdumpu môže byť veľmi obtiažné sa v ňom potom zorientovať. Ďalšia vec ktorá nám nevyhovuje, je chýbajúca sémantická analýza inputu rôznych zariadení. Ten je vyobrazený len pomocou hexdumpu a popisu „Leftover Capture Data“ ako je ukázané na obrázku 1.16. Zo sekcie 1.1 nám je teda jasné, že vôbec netušíme čo jednotlivé dáta znamenajú, pretože ich význam je definovaný v *Report Desriptore*.

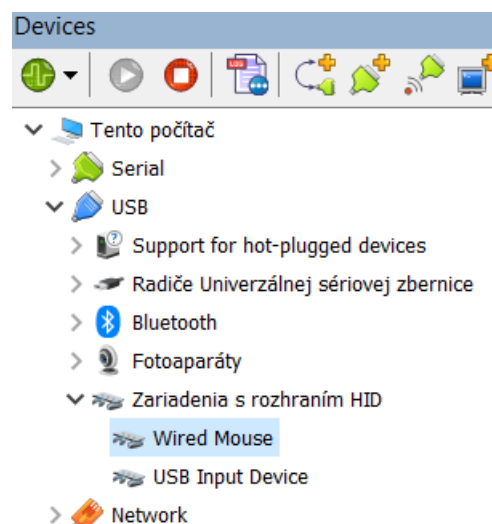


Obr. 1.16: Príklad inputu myši vo Wiresharku.

Device Monitoring Studio

Aplikácia ponúka analýzu sieťových a USB paketov, tak ako aj analýzu komunikácie prebiehajúcej cez sériový port. Zároveň slúži aj ako sniffer na všetkých týchto portoch.

Ako prvé na aplikácii zaujme spôsob zvolenia si zariadenia s ktorým bude sledovaná komunikácia. Je implementovaný štýlom stromovej štruktúry ako je ukázané na obrázku 1.17 nižšie, kde máme konkrétne označenú rovnakú myš s ktorou komunikáciu sme sledovali predchádzajúcim programom.



Obr. 1.17: Ukážka stromovej štruktúry na zvolenie si zariadenia, s ktorým bude zachytávaná komunikácia.

Základná verzia programu ponúka vizuálne zobrazenie *URB*, tak ako aj analýzu jednotlivých paketov. Pod analýzou si tu môžeme predstaviť ale len obyčajný hexdump, ktorý neposkytuje žiadne významové oddelenie dát a tým pádom je obtiažnejšie sa v ňom zorientovať. Príklad môžeme vidieť na obrázku 1.18.


```

05 01 09 02 A1 01 09 01 A1 00 05 09 19 01 29 03 .....~...~.....) .
15 00 25 01 75 01 95 03 81 02 75 05 95 01 81 01 ..%.u.*. .u.*. .
05 01 09 30 09 31 15 81 25 7F 75 08 95 02 81 06 ...0.1. %u.*. .
09 38 95 01 81 06 C0 C0 .8*. .Ř

```

Obr. 1.18: Príklad hexdumpu v Device Monitoring Studio.

Takisto tu nemáme kompletne sémantické vysvetlenie čo dané dáta znamenajú (napríklad pomocou stromovej štruktúry ako to rieši konkurencia). K dispozícii máme len veľmi obmedzený popis jednotlivých paketov (číslo paketu, device request, a pod.), pričom ani nie je veľmi jasné odkiaľ sa tieto informácie vzali. Príklad takéhoto popisu aj s hexdumpom je ukázaný na obrázku 1.19 nižšie.

```

000081: Get Descriptor Request (UP), 2021-04-13 10:17:37,4763790 +0,0000026. (1. Device: Wired Mouse) Status: 0x00000000
Descriptor Type: Device
Descriptor Index: 0x0
Transfer Buffer Size: 0x12 bytes

12 01 10 01 00 00 00 08 58 04 86 01 58 24 04 28 .....X.+XS.(
00 01 ..

```

Obr. 1.19: Príklad analýzy paketov.

Vyobrazenie *URB* (obrázok 1.20) tak ponúka súhrn týchto popisov jednotlivých paketov, ktoré sú postupne zachytené počas komunikácie na zbernici.

```

000222: Control Transfer (UP), 2021-04-05 14:52:08,3172528 +0,0003705. (1. Device: ) Status: 0x00000000
Pipe Handle: Control Pipe
18 03 ..
Setup Packet

000223: Bulk or Interrupt Transfer (UP), 2021-04-05 14:52:10,2584548 +1,9412020. (1. Device: ) Status: 0x00000000
Pipe Handle: 0xbaed3cb0 (Endpoint Address: 0x81)
Get 0x4 bytes from the device

000224: Bulk or Interrupt Transfer (DOWN), 2021-04-05 14:52:10,2584690 +0,0000142 (1. Device: )
Pipe Handle: 0xbaed3cb0 (Endpoint Address: 0x81)
Get 0x4 bytes from the device

```

Obr. 1.20: Ukážka vyobrazenia URB.

Pričom pri dvojkliku na šedé časti textu (napríklad *Setup Packet* alebo *Endpoint Address*) sa užívateľovi rozbalí okno s detailnejším popisom.

Analýza inputu myši, ktorú môžeme vidieť na obrázku 1.21, je riešená podobným spôsobom ako pri analýze descriptorov.

```

00000135 | 2021-04-13 11:57:08,8011899 | +0,0078834 | UP | 0x00000000 | URB_FUNCTION_BULK_OR_INTERRUPT_TRANSFER
/ Complete \
000135: Bulk or Interrupt Transfer (UP), 2021-04-13 11:57:08,8011899 +0,0078834. (1. Device: Wired Mouse) Status: 0x00000000
Pipe Handle: 0x19297890 (Endpoint Address: 0x81)
Get 0x4 bytes from the device
00 00 01 00 .....

```

Obr. 1.21: Príklad inputu myši v Device Monitoring Studio.

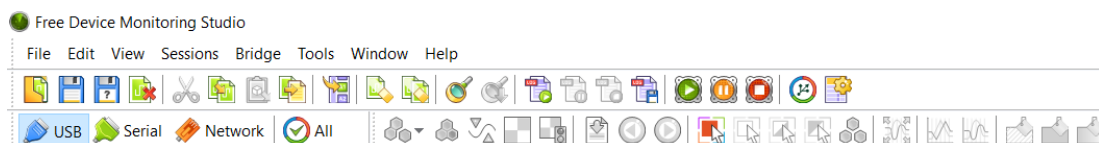
Obecné vyobrazenie jednotlivých paketov bez bližšej analýzy je riešené podobne ako vo Wiresharku, pričom pakety sú farebne oddelené podľa ich smeru pohybu na zbernici (posielané smerom host → zariadenie/smerom zariadenie → host). Toto je veľmi pekná funkcionality, ktorá celkovo sprehľadňuje komunikáciu zariadenia s hostom. Príklad je ukázaný na obrázku 1.22.

00000073	2021-04-13 10:17:35.1931283	+25.9758328	UP	0xc0000011	URB_FUNCTION_BULK_OR_INTERRUPT_TRANSFER
00000074	2021-04-13 10:17:35.1932268	+0.0000985	UP	0xc0010000	URB_FUNCTION_BULK_OR_INTERRUPT_TRANSFER
00000075	2021-04-13 10:17:35.2130691	+0.0198423	UP		PnP: Device Surprise Removal
00000076	2021-04-13 10:17:35.2249868	+0.0119177	DOWN	0xffffd184	URB_FUNCTION_ABORT_PIPE
00000077	2021-04-13 10:17:35.2250067	+0.0000199	UP	0x80000300	URB_FUNCTION_ABORT_PIPE
00000078	2021-04-13 10:17:35.2250219	+0.0000152	UP		PnP: Device Disconnected
00000079	2021-04-13 10:17:37.4763688	+2.2513469	UP		PnP: Device Connected
00000080	2021-04-13 10:17:37.4763764	+0.0000076	DOWN	0x00000000	URB_FUNCTION_GET_DESCRIPTOR_FROM_DEVICE
00000081	2021-04-13 10:17:37.4763790	+0.0000026	UP	0x00000000	URB_FUNCTION_GET_DESCRIPTOR_FROM_DEVICE
00000082	2021-04-13 10:17:37.4763850	+0.0000060	DOWN	0x00000000	URB_FUNCTION_GET_DESCRIPTOR_FROM_DEVICE
00000083	2021-04-13 10:17:37.4763874	+0.0000024	UP	0x00000000	URB_FUNCTION_GET_DESCRIPTOR_FROM_DEVICE

Obr. 1.22: Príklad obecného vyobrazenia jednotlivých paketov v Device Monitoring Studio.

Zaujímavá funkcionálnosť, ktorú ale program ponúka len v platenej verzii, je umožnenie užívateľovi priamo komunikovať so zvoleným zariadením. Môžeme mu tak posilať rôzne požiadavky (niektoré z nich sú spomenuté v USB 2.0 špecifikácii[17] v kapitole 9.4) ako napríklad *GET_REPORT* kde špecifikujeme *Report ID* a prípadné ďalšie parametre, a zariadenie nám patrične odpovie.

Užívateľské rozhranie vyobrazené nižšie pomocou obrázku 1.23, pozostáva z pomerne veľa ikoniek a celkovo sa javí ako trochu neprehľadné. Pri prvotnej interakcii s programom chvíľu trvá, kým človek nájde čo i len základné informácie ako napríklad hlavičky ku jednotlivým paketom. Nepoteší ani fakt, že verzia zadarmo nedovoľuje monitorovanie dlhšie ako 10 minút a maximálny počet monitorovaní za jeden deň je taktiež 10.



Obr. 1.23: Užívateľské rozhranie Device Monitoring Studio.

1.3 Požadované funkcie

Ako prvé by sme si mali zadať platformu na ktorú budeme cieľiť s našou aplikáciou:

P1 Cieľová platforma našej aplikácie by mala byť Windows.

Keďže má naša aplikácia mať výukový charakter, tak sa pozrieme na typický výukový scénár jej používania. Učiteľ si dopredu do súboru zachytí komunikáciu s určitým zariadením na ktorej overí, že je didakticky dobrá a ilustruje to čo má. Následne daný súbor posunie študentom aby si mohli zobrazíť analýzu konkrétnych paketov. Užitočná je ale aj analýza priamej interakcie užívateľa s jeho konkrétnym zariadením, preto by sme zároveň chceli podporovať aby si študenti mohli pripojiť vlastné zariadenie a skúmať s ním komunikáciu v reálnom čase. Z toho nám vyplývajú nasledujúce požiadavky:

P2 Mala by byť schopná analyzovať USB pakety zachytené do súboru v rozumnom formáte pomocou predom definovaného snifferu.

P3 Mala by byť schopná analýzy paketov v reálnom čase. To znamená, že bude podporovať čítanie súboru súvisle s tým ako do neho bude zapisovať iný software (za predpokladu, že to daný software povoľuje).

Ako sme mohli vidieť aj na predchádzajúcich príkladoch, hexdump je jednou zo základných funkcií na analýzu paketov. Zároveň sa nám ale nepáčilo, že väčšina hexdumpov je neprehľadná a ťažko sa v nich orientuje. Preto si zdefinujeme nasledujúce požiadavky:

P4 Mala by pomocou hexdumpu vedieť zobraziť dáta, ktoré daný sniffer zachytí a uloží.

P5 Mala by mať prehľadnejší hexdump a užívateľovi uľahčiť orientáciu v ňom. Jednotlivé znaky by mali byť farebne označené na základe ich významu (hlavička paketu, rôzne typy descriptorov a pod.).

K sémantickej analýze sa nám môže hodiť vedieť zobraziť dáta a ich význam pomocou stromovej štruktúry. Pretože sa s našou aplikáciou budeme snažiť vysvetliť základy komunikácie na USB zbernici, mali by sme podporovať sémantickú analýzu všetkých základných USB descriptorov a takisto inputu určitej podmnožiny HID zariadení. Ako posledné by sa nám zišlo vedieť pomocou stromovej štruktúry vyobraziť hlavičku jednotlivých paketov. Z toho celého dostávame nasledovné:

P6 Mala by podporovať sémantickú analýzu (vyobrazenie pomocou stromovej štruktúry) pre všetky základné USB descriptorov spomenuté v USB 2.0 špecifikácii [17] v kapitole 9.6 (ako napríklad *Device descriptor*, *Interface descriptor*, *Endpoint descriptor*, atď.).

P7 Mala by byť schopná pomocou stromovej štruktúry zobraziť sémantický význam dát posielaných danou podmnožinou HID zariadení, do ktorej patrí myš, klávesnica a joystick.

P8 Mala by byť schopná pomocou stromovej štruktúry zobraziť sémantický význam jednotlivých hlavičiek paketov.

Vyššie v texte sme označili funkciu Wiresharku vyobraziť sémantický význam dát na bitovej úrovni (obrázok 1.12) za zaujímavú. Preto by sme ju chceli implementovať aj v našej aplikácii, z čoho vyplýva:

P9 V miestach kde to dáva zmysel, by aplikácia mala byť schopná zobrazovať význam dát až na úrovni jednotlivých bitov.

Nechceme užívateľov hneď zaplaviť všetkými detailnými informáciami o paketoch. Preto by sme mali vedieť zobraziť zopár obecných vecí ku každému paketu a vyobraziť tak pohyb na zbernici, a až v prípade interakcie užívateľa s aplikáciou zobraziť podrobný popis jednotlivých paketov. Zároveň sa nám páčila funkcia Device Monitoring Studio, kde boli jednotlivé pakety farebne rozlíšiteľné, čo zvyšovalo celkový prehľad pohybu paketov na zbernici. Z toho dostávame nasledujúce požiadavky:

P10 Mala by na prvý pohľad jasne zobrazit základné informácie o každom analyzovanom pakete (ako napr. dĺžka paketu, typ prenosu a pod.) a pri bližšom skúmaní jednotlivých paketov detailnejšie zobrazit celú jeho hlavičku. Tieto základné informácie by mali byť farebne rozlišiteľné na základe smeru paketu po zbernici.

P11 Detailnejšie informácie o pakete budú zobrazované na základe interakcie užívateľa s aplikáciou.

Aby sme boli schopní sémantickej analýzy dát myši, klávesnice alebo joysticku podľa osobného výberu užívateľa, musíme si získať informácie o ich inpute z *HID Report Descriptoru*, takže naša ďalšia požiadavka je:

P12 Mala by byť schopná rozparsovať *HID Report Descriptor* takým štýlom, aby bolo neskôr možné sématicky reprezentovať input nami zvolených HID zariadení – myš, klávesnica a joystick.

1.4 Ciele práce

Celkové ciele tejto práce sú nasledovné :

C1 Naprogramovať funkčný analyzátor, ktorý spĺňa všetky požadované funkcie **P1-P12**

C2 Návrh programu musí byť dostatočne obecný aby splňoval nasledujúce:

- Jednoduché rozšírenie o analýzu ďalších typov USB prenosov.
- Jednoduché pridanie sémantickej analýzy pre ďalšie HID zariadenia.

2. USB

V tejto kapitole si rozšírime znalosti fungovania USB, ktoré sme získali v sekcii 1.1. Najprv si vysvetlíme ako prebieha komunikácia medzi USB zariadením a hostom, následne sa pozrieme na konfiguráciu USB zariadenia po pripojení na zbernicu, prejdeme si niektoré základné USB descriptors a ako posledné si ešte vysvetlíme základnú stavbu USB na Windowse.

2.1 Komunikácia

Detailný popis komunikácie a presunu dát po zbernici je opísaný v USB 2.0 špecifikácii v kapitole 5 [23]. My sa momentálne zameriame len na určité časti, ktoré sú potrebné pre našu prácu. Každé USB zariadenie v sebe obsahuje tzv. *endpointy* [24] – môžeme to považovať za akúsi koncovku komunikácie medzi hostom a zariadením. Koncepčne sa jedná o schopnosť zariadenia v sebe uchovať dáta (memory buffer). Ako už vieme z kapitoly 1.1, komunikáciu riadi USB host, a tá prebieha práve pomocou týchto endpointov – v prípade ak chce host poslať určité dáta zariadeniu, zapíše ich do jeho konkrétneho endpointu. V prípade ak chce zariadenie poslať určité dáta hostovi, zapíše si ich do daného endpointu, odkiaľ ich host potom prečíta.

Endpoint

USB zariadenie typicky pozostáva z niekoľkých na sebe nezávislých endpointov. Každý endpoint je potom jednoznačne určený:

1. Adresou USB zariadenia – tá je pridelená USB zariadeniu pri jeho konfigurácii v momente pripojenia na zbernicu.
2. Číslom endpointu – unikátne číslo, ktoré určuje výrobca zariadenia.
3. Smerom prenosu dát – host \rightarrow device alebo device \rightarrow host.

Do momentu pokiaľ neprebehne konfigurácia USB zariadenia a jeho endpointov, sú endpointy s adresou inou ako 0 v neurčitom stave a nemusia byť pre hosta dostupné. Endpoint s adresou 0, inak nazývaný aj ako „default endpoint“ alebo „Endpoint0“, slúži na nakonfiguráciu daného USB zariadenia. Výrobca zariadenia je povinný poskytnúť aspoň 1 Endpoint0 pre každý smer pohybu dát, prípadne 1 Endpoint0 s možnosťou prenosu oboma smermi. Funkcie (USB zariadenia) môžu obsahovať aj ďalšie endpointy s adresou inou ako 0. Tieto endpointy slúžia na prenos dát špecifických pre dané zariadenie (napríklad na posielanie inputu myši). Rôzne endpointy môžeme zlučovať do určitých množín podľa ich funkcionality. Takúto množinu endpointov potom nazývame *interface*. Niektoré USB zariadenia potom môžu pozostávať z viacerých interfaci, ktoré budú reprezentovať rozličné USB triedy.

Pipe

USB pipe [25] je termín označujúci spojenie medzi konkrétnym endpointom USB zariadenia a Host Controllerom (interface medzi hostom a zbernicou). Reprezentuje schopnosť prenášať dáta medzi hostom a endpointom pomocou memory bufferu. Pipe ktorá pozostáva z dvoch Endpointov sa nazýva „Default Control Pipe“ a je prístupná v momente pripojenia zariadenia na zbernicu a slúži na konfiguráciu daného zariadenia (po konfigurácii môže mať aj iné využitie, ktoré špecifikuje samotný výrobca). Ostatné pipy s ďalšími endpointami (za predpokladu, že existujú) sú vytvorené až po konfigurácii zariadenia.

2.2 Konfigurácia

Konfigurácia USB zariadenia je detailne opísaná v USB 2.0 špecifikácii [26]. Predtým ako začneme využívať funkcionality pripojeného USB zariadenia, je USB host zodpovedný za jeho nakonfigurovanie. Počas konfigurácie posíla USB host zariadeniu tzv. „Device Requests“, na ktoré dané zariadenie odpovedá cez Default Control Pipe. Tieto requests sú špecifikované v *Setup Pakete* – štruktúra veľká 8 bytov so štandardným formátom definovaným v USB špecifikácii 2.0 [27]. Existuje niekoľko základných requestov [28], na ktoré musí každé USB zariadenie vedieť reagovať. Patria medzi ne napríklad:

- Get Descriptor – vypýta si od zariadenia konkrétny descriptor, ktorý mu zariadenie pošle ako odpoveď na tento request (za predpokladu, že daný descriptor existuje)
- Set Configuration – nastaví konkrétnu konfiguráciu zariadeniu

Bežný postup konfigurácie je, že si USB host vypýta rôzne descriptors od zariadenia, ktoré určujú jeho schopnosti (napr. *Configuration Descriptor*, *Interface Descriptor*, *Endpoint Descriptor*) a potom pomocou requestu Set Configuration nastaví požadovanú konfiguráciu (a ak je to nutné, zvolí rôzne dodatočné nastavenie interfacy).

2.3 USB Descriptor

Teraz si prejdeme niekoľko základných USB descriptorov a ich jednotlivé položky, pretože ich význam budeme potrebovať neskôr v tejto práci.

Configuration Descriptor

Configuration Descriptor [29] opisuje informácie o konkrétnej konfigurácii USB zariadenia. Obsahuje položku *bConfigurationValue* – číslo reprezentujúce konkrétnu konfiguráciu, ktorú USB host použije ako parameter v `SetConfiguration()` requeste v prípade, že chce nastaviť práve túto konfiguráciu. Každé zariadenie má aspoň jeden Configuration Descriptor. Každá konfigurácia obsahuje aspoň jeden interface a každý interface má nula alebo viac endpointov. V prípade, že si host vyžiada od zariadenia Configuration Descriptor, dostane spolu s ním aj všetky súvisiace Interface a Endpoint descriptors.

Interface Descriptor

Interface Descriptor [30] opisuje špecifický interface konkrétnej konfigurácie USB zariadenia. Ak zariadenie podporuje viac ako jeden interface, tak všetky Interface Descriptors spolu s im odpovedajúcimi Endpoint Descriptormi sú vrátené ako odpoveď na `GetConfiguration()` request (k Interface Descriptoru nie je možný priamy prístup pomocou `GetDescriptor()` alebo `SetDescriptor()` requestom). Ak interface používa len Endpoint0, tak za Interface Descriptorom nenasleduje žiaden Endpoint Descriptor. Endpoint0 takisto nie je započítaný v položke Interface Descriptoru *bNumEndpoints*, ktorá udáva počet endpointov konkrétneho interfacu.

Endpoint Descriptor

Endpoint Descriptor [31] poskytuje hostovi informácie o konkrétnom endpointe. Tento descriptor obsahuje aj informácie na základe ktorých je host schopný určiť bandwidth konkrétneho endpointu – množstvo dát prenesených za jednotku času (typicky bity za sekundu = b/s, alebo byty za sekundu = B/s). Takisto ako aj pri Interface Descriptore, nie je možné k nemu priamo pristupovať pomocou `GetDescriptor()` alebo `SetDescriptor()` requestov, ale je súčasťou odpovede na `GetConfiguration()` request.

2.4 Windows

Keďže Windows je hlavná platforma na ktorú mierime s našou aplikáciou, priblížime si ako sú reprezentované jednotlivé USB zariadenia a priebeh komunikácie na danej zbernici.

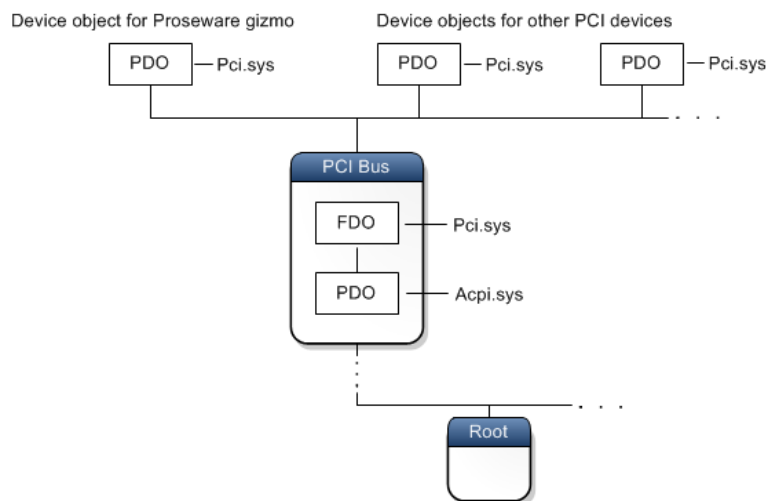
Nasledujúca sekcia poskytuje zjednodušený popis a čerpá (pokiaľ nie je uvedené inak) z toho čo sa nachádza v Microsoft dokumentácii [32]. Windows organizuje zariadenia pomocou stromovej štruktúry nazývanej „Plug and Play device tree“ alebo jednoducho len „device tree“. Správca stromu sa nazýva „PnP manager“ [33]. Vrchol v tomto strome (tzv. „device node“) reprezentuje USB zariadenie alebo nejakú jeho konkrétnu Funkciu. Koreň stromu obecné nazývame „root device node“ a typicky sa v diagramoch kreslí na spodku. Príklad takéhoto diagramu môžeme vidieť na obrázku 2.1 nižšie.

Niektoré vrcholy môžu reprezentovať zbernice samotné, pričom synovia daného vrcholu zase reprezentujú zariadenia pripojené na túto zbernicu.

Windows má definovanú `DEVICE_OBJECT` štruktúru [34] reprezentujúcu *device object* – logické, virtuálne alebo fyzické zariadenie, ktoré využíva driver na spracovávanie I/O (input/output) requestov. Každý device node obsahuje usporiadaný list takýchto device objectov. Usporiadaný list device objectov spolu s ich asociovanými drivermi nazývame *device stack* (môžeme si to predstaviť ako stack dvojíc *device object* ↔ driver). Tento stack má podľa konvencie vrch aj spodok – prvé zariadenie ktoré bolo vytvorené na stacku sa nachádza na spodku a posledné vytvorené je naopak na vrchu. Ukážeme si to na konkrétnom príklade, kde na nasledujúcom obrázku 2.2 môžeme vidieť device node s názvom „Proseware Gizmo“, ktorého device stack obsahuje 3 položky: Vrchný device object má asociovaný „AfterThought.sys“ driver, stredný device object je spojený s driverom

z obrázku 2.2 by to bol Pci.sys driver) aby sčítala všetky zariadenia, ktoré sú na ňu pripojené.

- Ako odpoveď na túto požiadavku vytvorí driver danej zbernice device object pre každé pripojené zariadenie, ktorý nazývame „physical device object (PDO)“. V prípade s Pci.sys driverom by to vyzeralo nasledovne:

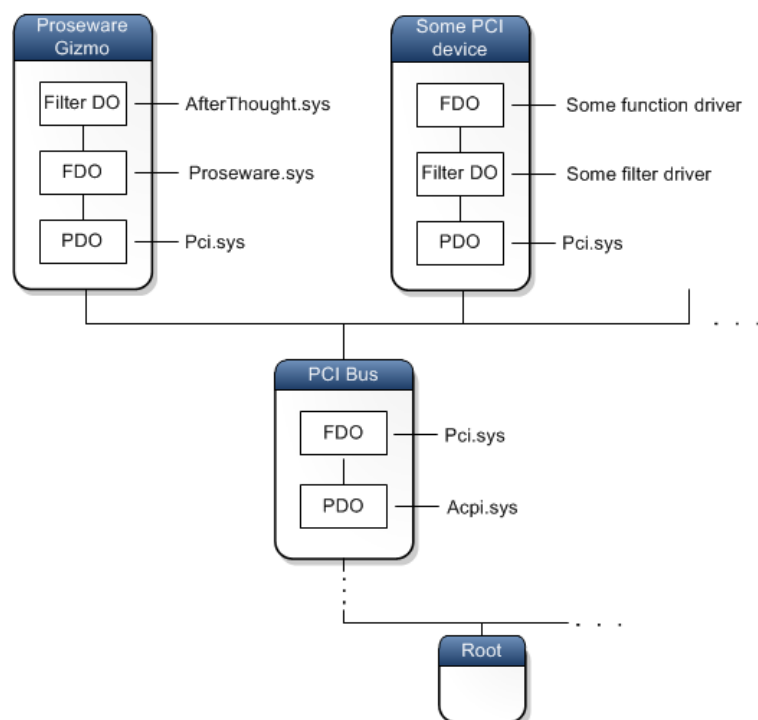


Obr. 2.3: Ukážka vytvorenia konkrétnych PDO Pci.sys driverom. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]

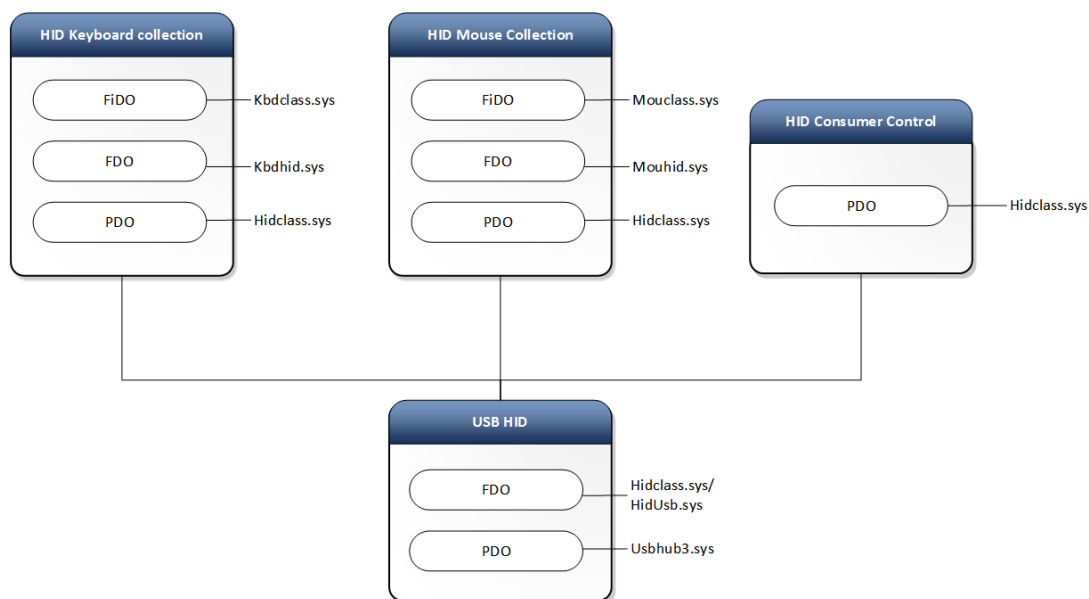
- PnP manager pripradí device node každému novo vytvorenému PDO a pozrie sa do registru, aby zistil aké drivery majú byť súčasťou device stacku daného nodu. Každý device stack musí obsahovať práve jeden *function driver* (hlavný driver device stacku, je zodpovedný za riadenie read, write a control requestov) a nula alebo viac *filter driverov* (Ponúkajú prídavné možnosti v spracovávaní read, write a control requestov. Napríklad môžu meniť dáta, ktoré sú posielané daným requestom).
- Akonáhle sú všetky drivery načítané, každý z nich vytvorí odpovedajúci device object a pripojí ho na daný device stack. Device object vytvorený function driverom nazývame „functional device object (FDO)“ a device object vytvorený filter driverom zase „filter device object (Filter DO)“. Náš konkrétny device tree vyobrazený na obrázku 2.4 by teda vyzeral ako na obrázku 2.4.

Ako is ešte môžeme všimnúť na obrázku 2.4, v device node Proseware Gizmo je filter driver (AfterThought.sys) nad function driverom (Proseware.sys). V takomto prípade je daný filter driver nazývaný „upper filter driver“. Naopak v druhom device node (Some PCI device) je filter driver pod function driverom – takýto filter driver nazývame „lower filter driver“.

Keďže sú pre našu aplikáciu dôležité hlavne HID zariadenia, pozrieme sa teraz na to ako vyzerá driver stack a celková architektúra pre túto triedu zariadení. Základom každého device stacku HID zariadenia je class driver *hidclass.sys*, za ktorým nasledujú už konkrétne function/filter drivery. Príklad device stacku myši a klávesnice, tak ako aj HID triedy môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku 2.5:



Obr. 2.4: Ukážka konkrétneho device tree pre PCI zbernicu. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]



Obr. 2.5: Ukážka konkrétneho device stacku myši a klávesnice. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [35]

Momentálne si vysvetlíme ešte zopár pojmov, ktoré sa nám budú hodiť neskôr v texte. „HID Client“ [36] je termín ktorým označujeme driver, service [37] alebo aplikáciu, ktorá komunikuje s *hidclass.sys* a často reprezentuje konkrétne zariadenie (napríklad myš alebo klávesnicu). „Preparsed Data“ [38] reprezentujú dáta Report Descriptoru asociované s konkrétnym zariadením. Aplikácie ich využívajú aby z nich vytiahli informácie o danom zariadení bez nutnosti parsovania Report Descriptoru.

3. Analýza

V tejto kapitole sa pozrieme na zopár problémov a ich riešení, na ktoré sme narazili počas vytvárania nášho analyzátoru. Ako prvé sme sa museli rozhodnúť v akom jazyku budeme náš projekt implementovať. Na to si autor zvolil obecné rozšírený jazyk C++, pretože ho pozná najlepšie a má s ním najviac skúseností. Táto voľba nás zároveň v ničom zásadne neobmedzila a nemala negatívny dopad na celkový výsledok aplikácie. Teraz sa pozrieme na niekoľko konkrétnych problémov a spôsoby akými sme ich vyriešili.

3.1 Získanie USB packetov

Na získavanie USB packetov nám bude obecné slúžiť paket sniffer. Väčšina paket analyzátorov má implementované vlastné sniffery a preto sme sa o to pokúsili tiež. Narazili sme ale na niekoľko zásadných problémov, ktoré sa úzko viažu s platformou na ktorú cieľme s našou aplikáciou a ktorú sme si zadefinovali v požiadavke **P1**– Windows.

V minulej kapitole 2.4 sme opisovali stavbu HID zariadení vo Windowse, čím sme sa dozvedeli, že device stack každého z nich je postavený na *hidclass.sys*. Microsoft dokumentácia podrobnejšie opisuje komunikáciu medzi HID zariadením a kernel/user-mode aplikáciou [39] za pomoci API tohoto driveru – *HID API* [40]. Pri tejto komunikácii sme schopní zachytiť USB pakety posielané zariadením a neskôr ich analyzovať. Keďže naša aplikácia beží v user-mode, prejdeme si práve tento spôsob komunikácie:

1. Aplikácia nájde a identifikuje HID zariadenie.
2. Aplikácia pomocou metódy `CreateFile` otvorí spojenie s HID zariadením.
3. Aplikácia pomocou *HID API* metód `HidD_Xxx` získa *Preparsed Data* a informácie ohľadom HID zariadenia.
4. **Aplikácia použije metódu `ReadFile` resp. `WriteFile` na získanie inputu zariadenia resp. poslanie reportu zariadeniu.**
5. Aplikácia pomocou *HID API* metód `HidP_Xxx` interpretuje HID reporty.

Podstatný je práve bod 4 v ktorom vidíme, že pomocou metódy `ReadFile` sme schopní od daného zariadenia získať USB pakety, ktoré reprezentujú jeho input. Tie by sme následne mohli pomocou nášho analyzátoru spracovať. Tu narážame na prvý problém, ktorý sa priamo viaže na platformu Windows a ktorý si detailnejšie opíšeme v nasledujúcej sekcii.

Windows exclusive mód

Windows má definovaný tzv. *Access Mode*, ktorý určuje restrikcii prístupu *HID Klienta* k HID zariadeniu. Ten môže byť buď *Shared* alebo *Exclusive*. *Exclusive Mode* zabraňuje ostatným *HID Klientom* v zachytávaní alebo získavaní inputu HID zariadenia, pokiaľ nie sú hlavným príjemcom daného inputu. Preto z

bezpečnostných dôvodov otvára *RIM (Raw Input Manager)* niektoré zariadenia v *Exclusive Mode*.

Ak je zariadenie otvorené v *Exclusive Mode*, aplikácia má stále prístup k niektorým jeho údajom pomocou *HID API* [40] metód *HidD_GetXxx*. Tieto metódy nám obecné umožnia získať niektoré descriptor zariadenia, tak ako aj jeho *Parsed Data*. Nie je nám ale umožnené volať metódu *ReadFile*, takže nemáme akým spôsobom zachytávať komunikáciu HID zariadenia s klientom.

Tabuľka zariadení [41] (obrázok 3.1), ktoré *RIM* otvára v *Exclusive Mode* obsahuje aj tie, ktoré sme si v úvode zvolili ako podmnožinu HID zariadení na analýzu – myš a klávesnica.

Windows supports the following top-level collections:

Usage Page	Usage	Windows 7	Windows 8	Windows 10	Notes	Access Mode
0x0001	0x0001 - 0x0002	Yes	Yes	Yes	Mouse class driver and mapper driver	Exclusive
0x0001	0x0004 - 0x0005	Yes	Yes	Yes	Game Controllers	Shared
0x0001	0x0006 - 0x0007	Yes	Yes	Yes	Keyboard / Keypad class driver and mapper driver	Exclusive

Obr. 3.1: Tabuľka zariadení ich *Access Mode*. Zariadenia postupne po riadkoch – myš, joystick a klávesnica

Známe knižnice

Keďže komunikáciu nemôžeme zachytávať priamo pomocou *HID API* [40] metód, rozhodli sme sa skúsiť použiť niektoré známe knižnice na sledovanie USB zbernice.

Pravdepodobne najznámejšou z nich je *libusb* [42] – knižnica napísaná v jazyku C, ktorá slúži na poskytnutie prístupu k USB zariadeniu. Je cieľená na programátorov aby im uľahčila vývoj aplikácií, ktoré komunikujú s USB hardwarom. Podporuje viaceré platformy, medzi ktorými sa nachádza aj Windows. Zároveň beží v user-mode, takže aplikácia ktorá ju využíva nepotrebuje žiadne špeciálne privilégia na používanie *libusb API*. Ďalšou výhodou je, že podporuje všetky verzie USB od 1.0 až po 3.1. Je schopná zachytiť všetky typy prenosov (control, bulk, interrupt, isochronous), a teda by sme pomocou nej mohli sledovať celú komunikáciu so zariadením vrátane počiatočného nakonfigurovania. Bohužiaľ, ani pomocou tejto knižnice sme neboli schopní získať prístup k zariadeniam, ktoré Windows otvára v exclusive móde.

Keďže sa zameriavame na HID zariadenia, skúsili sme hľadať niečo viac špecifické práve pre túto triedu USB zariadení – to nás zaviedlo k *HIDAPI* [43]. *HIDAPI* je ďalšia veľmi rozšírená knižnica, ktorá umožňuje komunikáciu s USB zariadeniami z HID triedy a takisto beží na viacerých platformách vrátane Windowsu. Pretrváva tu ale rovnaký problém ako s minulou knižnicou – nie je možné získať prístup k zariadeniam, ktoré sú otvorené vo Windows exclusive móde.

Keďže sme nevedeli získať input zariadenia pomocou *hidclass.sys* driveru a ani pomocu iných third-party knižníc, skúsime sa pozrieť či nemáme k dispozícii filter driver, ktorý by nám poskytol prístup k inputu daného zariadenia.

Filter Driver

Windows ponúka niekoľko vstavaných driverov pre rôzne typy zariadení. Konkrétne pre myš a klávesnicu Windows ponúka 2 filter drivery – *Moufiltr* [44] (upper-level filter driver pre myš) a *Kbfiltr* [45] (upper-level filter driver pre klávesnicu). Tie ale podporujú len legacy zariadenia – non-USB, non-Bluetooth a non-I2C zariadenia.

Riešením by teda bolo naprogramovanie vlastného filter driveru pre myš a klávesnicu. Ako sme už ale spomínali v úvode, živé zachytávanie paketov má v našej práci najmenšiu prioritu. Preto sme sa rozhodli, že napísanie vlastného USB snifferu je nad rámec tejto práce a použijeme už existujúcu third-party aplikáciu.

Third-party aplikácie

Na zachytávanie USB paketov sme sa rozhodli použiť *USBPcap* [46], s ktorým sme sa už stretli v kapitole 1.2 keď sme opisovali Wireshark a rôzne sniffery, s ktorými je schopný spolupracovať. USBPcap je veľmi rozšírený Windows sniffer USB paketov a jeho hlavnou výhodou je jednoduchá inštalácia. Takisto nám vyhovuje, že je s ním schopný spolupracovať Wireshark, čo nám častokrát počas vývoja poskytlo spôsob akým sme si mohli overiť správnosť nami vykonanej analýzy niektorých paketov. Daný sniffer zachytáva pakety do súborov v obecné známom formáte pcap [47].

Miernou nevýhodou je, že nepodporuje čítanie zo súboru do ktorého práve zapisuje – analýzu paketov v reálnom čase tak budeme musieť vykonať trochu iným spôsobom, a to za pomoci Wiresharku. Ako sme už spomínali, Wireshark je schopný spolupráce s USBPcapom a zároveň podporuje ukladať výstup analýzy do súboru, ktorý je takisto formátu pcap. Wireshark už ale podporuje čítanie z daného súboru počas toho ako do neho zapisuje. To znamená, že ak budeme chcieť vykonať analýzu v reálnom čase, urobíme to pomocou Wiresharku (konkrétnejší postup si ukážeme neskôr v užívateľskej dokumentácii v kapitole 6).

3.2 Sémantická analýza dát

Ako sme už naznačili v kapitole 1.1, na vykonanie sémantickej analýzy inputu HID zariadenia je potrebné získať informácie o danom inpute z Report Descriptoru konkrétneho zariadenia. Zároveň sme si v požiadavke **P12** definovali, že chceme byť schopní rozparsovať HID Report Descriptor pre neskoršiu interpretáciu inputu. V tejto kapitole si vysvetlíme formát Report Descriptoru a ako nám informácie ktoré reprezentuje pomôžu v sémantickej analýze inputu HID zariadenia.

Report Descriptor

Celková štruktúra Report Descriptoru je opísaná v HID Class Specification [48]. Descriptor sa skladá z tzv. itemov, ktoré obsahujú informácie o danom zariadení. Každý item obsahuje hlavičku, ktorá sa skladá z troch častí:

- Typ
- Tag
- Veľkosť

Existujú 3 typy itemov : *Main*, *Global* a *Local*. Main item udáva informácie o konkrétnej časti zariadenia (napríklad o tlačidlách na klávesnici, alebo o hodnotách osy X a Y pri pohybe myšou, atď.) Global a Local itemy bližšie špecifikujú Main item (napríklad počet bytov, ktorý je potrebný na reprezentovanie jednotlivých súradníc pri pohybe myšou). Local item určuje vlastnosti len najbližšieho Main itemu, zatiaľ čo Global item je platný pre všetky nasledujúce Main itemy.

Main item má momentálne definovaných 5 tagov:

- Input – udáva informácie o inpute zariadenia. Toto je veľmi podstatná časť, pretože práve na základe tohto itemu vieme, že v inpute zariadenia máme očakávať byty reprezentujúce konkrétnu časť zariadenia (bližšie informácie o konkrétnej časti inputu ako napríklad veľkosť a význam, sú poskytnuté Global a Local itemami pred týmto konkrétnym Input itemom)
- Output – podobný význam ako Input item, ale reprezentuje dáta, ktoré sú posielené zariadeniu (napríklad nastavenie LED svetiel na klávesnici)
- Feature – itemy ktoré môžu byť posielené ako input aj output a využívajú sa napríklad na kalibráciu konkrétneho zariadenia.
- Collection – udáva akúsi logickú kolekciu/zoskupenie rôznych Input/Output/Feature itemov. Napríklad kolekcia myši by mohla obsahovať itemy reprezentujúce tlačidlá a súradnice pohybu myši.
- End Collection – udáva koniec kolekcie Collection itemu.

Vysvetlíme si ešte zopár hlavných Local/Global tagov, ktoré budeme potrebovať aby sme pochopili Report Descriptor:

- Usage – reprezentuje odporúčaný význam dát (napríklad, že sa jedná o tlačidlo, osy X/Y/Z, atď.), ale každý výrobca si ho môže definovať po svojom.
- Usage Page – zoskupenie jednotlivých Usage-ov do rôznych tried (napríklad Generic Desktop Page, Keyboard Page, LED Page, atď.). Kompletný výpis je dostupný v HID Usage Tables špecifikácii [49]. To znamená, že Usage s hodnotou 0x00 môže mať iný význam v Generic Desktop Page ako v Keyboard Page.
- Report Size a Report Count – definujú veľkosť dát Input/Output/Feature itemov. Napríklad ak je Report Size = 8 a Report Count = 1, dáta budú reprezentované jednou 8-bitovou hodnotou, takže 1 byte.

- Logical Minimum a Logical Maximum – označujú rozsah hodnôt aké môžu dáta nadobúdať.

Momentálne keď už máme celkový prehľad o základných itemoch, môžeme si ukázať parsovanie Report Descriptoru na konkrétnom príklade. Na obrázku 3.2 môžeme vidieť konkrétny Report Descriptor prevzatý z HID Class Specification [50], reprezentujúci myš. Ten si teraz postupne rozoberieme.

```

Usage Page (Generic Desktop),
Usage (Mouse),
Collection (Application),
    Usage (Pointer),
    Collection (Physical),
        Report Count (3),
        Report Size (1),
        Usage Page (Buttons),
        Usage Minimum (1),
        Usage Maximum (3),
        Logical Minimum (0),
        Logical Maximum (1),
        Input (Data, Variable, Absolute),
        Report Count (1),
        Report Size (5),
        Input (Constant),
        Report Size (8),
        Report Count (2),
        Usage Page (Generic Desktop),
        Usage (X),
        Usage (Y),
        Logical Minimum (-127),
        Logical Maximum (127),
        Input (Data, Variable, Relative),
    End Collection,
End Collection

```

Obr. 3.2: Konkrétny príklad Report Descriptoru myši prevzatý z HID Class Specification [50]

Z prvej časti (obrázok 3.3) si môžeme všimnúť, že sa celý Report Descriptor delí do logických kolekcí – najprv *Application* a potom *Physical*. Hneď na začiatku vidíme definovanú *Usage Page* s hodnotou *Generic Desktop*, ktorá bližšie špecifikuje nasledujúci *Usage (Mouse)* item – takže už vieme, že sa jedná o myš.

```
Usage Page (Generic Desktop),
Usage (Mouse),
Collection (Application),
Usage (Pointer),
Collection (Physical),
```

Obr. 3.3: Časť Report Descriptoru reprezentujúca jednotlivé kolekcie

Na obrázku 3.4 vidíme ďalšiu časť descriptoru, ktorá reprezentuje tlačidlá myši – to sme vyčítali z časti *Usage Page (Buttons)*. Nasledujúce časti *Report Count (3)* a *Report Size (1)* nám naznačujú, že veľkosť istej podmnožiny dát budú tri 1-bitové hodnoty. Ďalej z hodnôt *Logical Minimum (0)* a *Logical Maximum (1)* vidíme že budú nabývať hodnoty medzi 0 a 1. Nasleduje Input item s hodnotami *Data*, *Variable* a *Absolute* – tie nám udávajú, že sa jedná o input zariadenia, ktorý bude modifikovateľný (hodnota *Data*), budú to 3 jednotlivé 1-bitové položky (hodnota *Variable*) a hodnota dát nie je relatívna voči inej hodnote (položka *Absolute*). Ďalej vidíme časti *Report Count (1)*, *Report Size (5)* a *Input (Constant)* – Takže v inpute bude nasledovať časť o veľkosti 5 bitov, ktorá bude mať konštantnú readonly hodnotu (toto v myši väčšinou reprezentuje padding tlačidiel).

```
Report Count (3),
Report Size (1),
Usage Page (Buttons),
Usage Minimum (1),
Usage Maximum (3),
Logical Minimum (0),
Logical Maximum (1),
Input (Data, Variable, Absolute),
Report Count (1),
Report Size (5),
Input (Constant),
```

Obr. 3.4: Časť Report Descriptoru reprezentujúca tlačidlá myši

Z nasledujúcej časti (obrázok 3.5) vidíme, že sa bude jednať o dve 8-bitové hodnoty (položky *Report Size (8)* a *Report Count (2)*). Následne sa prepne *Usage Page* z *Buttons* na *Generic Desktop* a definujú sa 2 Usage pre *X* a *Y* – tie v myši reprezentujú jednotlivé osy pohybu. Ďalej vidíme, že môžu nadobúdať hodnoty od -127 do 127 (položky *Logical Minimum (-127)* a *Logical Maximum (127)*) čo presne odpovedá rozsahu jedného znamienkového bytu.


```

Report Size (8),
Report Count (2),
Usage Page (Generic Desktop),
Usage (X),
Usage (Y),
Logical Minimum (-127),
Logical Maximum (127),
Input (Data, Variable, Relative),

```

Obr. 3.5: Časť Report Descriptoru reprezentujúca osy X a Y pri pohybe s myšou

Na poslednom obrázku 3.6 už len vidíme ukončenie kolekcií, čím končí aj celý Report Descriptor.

```

End Collection,
End Collection

```

Obr. 3.6: Časť Report Descriptoru reprezentujúca ukončenie jednotlivých kolekcií

V konečnom dôsledku nám z toho teda vychádza, že input našej myši bude mať veľkosť 3 byty (sčítanie všetkých *Report Size * Report Count*), kde prvé 3 bity budú reprezentovať stlačenie tlačidiel, nasledujúcich 5 bitov bude výplň a posledné 2 byty reprezentujú osy X a Y v tomto poradí. Toto reprezentuje jeden input report nášho zariadenia na jeho konkrétnom endpointe. Jeden endpoint ale môže obsahovať viac reportov (či už input, output alebo feature). V takom prípade musia byť jednotlivé reporty prefixované 1B hodnotou, ktorú nazývame *Report ID* a ktorá musí byť uvedená v Report Descriptore pri jednotlivých reportoch v podobe *Report ID* itemu. Ako príklad niečoho takého si môžeme predstaviť klávesnicu so zabudovaným zariadením s funkciou myši. Takáto klávesnica môže posilať informácie o stlačení kláves tak ako aj o pohybe myši v jednom endpointe. Na rozlíšenie o ktoré dáta sa jedná by sa použil Report ID.

Ostáva nám ešte jedna možnosť, ktorú sme doteraz nespomenuli – ako priradiť Report Descriptor k jednotlivým reportom pokiaľ ich zariadenie posila z viacerých endpointov. To si vysvetlíme v nasledujúcej sekcii.

Report Descriptor \longleftrightarrow endpoint

Ako už vieme z minulej kapitoly 2.1, jedno USB zariadenie môže pozostávať z viacerých interfacov. Každý interface má dané endpointy, ktoré sa s ním viažu. Pri komunikácii medzi USB hostom a zariadením si z hlavičky jednotlivých paketov vieme vytiahnuť informáciu do ktorého endpointu sa zapisujú, resp. z ktorého endpointu sa čítajú dáta. Takže v prípade reportu poslaného zariadením vieme zistiť k akému endpointu sa viaže. Hodilo by sa nám teda vedieť k jednotlivým endpointom priradiť im odpovedajúci Report Descriptor. Túto informáciu máme nepriamo poskytnutú v Setup Pakete, ktorý posila USB host v momente keď si od zariadenia vypýta jeho Report Descriptor. Špecifikuje v ňom totiž položku *wInterfaceNumber*, ktorá udáva číslo interfacu pre ktorý si USB host vypýtal

Report Descriptor. Teraz nám už len stačí zistiť aké endpointy sa na daný interface viažu – túto informáciu sme získali vyššie pri konfigurácii daného zariadenia, keď si USB host vypýtal od zariadenia Configuration Descriptor a spolu s ním dostal aj Interface Descriptor a jemu odpovedajúce Endpoint Descriptor.

3.3 Voľba frameworku

Pre jazyk C++ existuje hneď niekoľko známych GUI frameworkov nad ktorými sme uvažovali – *Dear ImGui* [51], *SFGui* [52] a *Qt* [53]. Autor tohto projektu nemal so žiadnym z týchto frameworkov predchádzajúcu skúsenosť, ale na základe rešeršu si nakoniec zvolil Qt. Teraz si prejdeme zopár požiadaviek na základe ktorých sme porovnávali jednotlivé frameworky.

Dostupnosť

Jednou zo základných požiadaviek na daný framework je aby bol dostupný úplne zadarmo. Veľakrát môže byť užitočné nahliadnuť do implementácie konkrétnych komponent a metód pre lepšie pochopenie ich fungovania. Práve preto je naša ďalšia požiadavka, aby bol daný framework open-source. Vzhľadom na zameranie našej aplikácie na Windows je pre dôležité aby daný framework fungoval na tejto platforme. Neskôr by sme ale mohli rozmýšľať o rozšírení aj na ďalšie platformy, a preto by sme si už od začiatku chceli zvoliť framework, ktorý podporuje aj iné platformy, ako napríklad Linux a macOS. Z vyššie spomínaných frameworkov to splňajú všetky.

Dokumentácia

Kvalitná dokumentácia je veľmi dôležitá na pochopenie daného frameworku. Tu je Qt jednoznačne lepšie ako ostatné frameworky. Zatiaľ čo ony ponúkajú strohú dokumentáciu na githube v podobe dokumentačných komentárov v kóde, Qt má samostatnú stránku na ktorej je podrobne opísaná každá jedna jeho komponenta.

Príklady

Vzhľadom na to, že autor nemal so žiadnym zo zvolených frameworkov predchádzajúcu skúsenosť, sú ilustračné príklady použitia a ich implementácia dobrý spôsob akým začať prácu s frameworkom a zistiť jeho možnosti. Qt tu má zase obrovskú výhodu pretože poskytuje desiatky rozličných príkladov použitia (so širokou škálou obtiažnosti), ktoré sú detailne zdokumentované. Ostatné frameworky poskytujú zopár jednoduchých príkladov uložených na svojom githube, ktorých dokumentácia sú iba komentáre v kóde.

Rozsiahlosť

Na veľkosť frameworku sa môžeme pozeráť dvoma rozličnými spôsobmi. Na jednu stranu ak je framework príliš rozsiahly, bude ťažšie ho pochopiť a naučiť sa používať. Qt je z daných frameworkov určite najrozsiahlejší. Na druhú stranu poskytuje o to väčšiu funkcionálnu a nemali sme tak problém implementovať

čokoľvek sme chceli. Zároveň poskytuje rôzne ďalšie komponenty, ktoré nesúvisia priamo s implementáciou grafického rozhrania ale ako uvidíme neskôr, veľmi nám počas vytvárania našej aplikácie pomohli.

Vzhľadom na to, že sme si zvolil Qt musíme spomenúť ešte jednu vec, ktorá je pre tento framework špecifická, a to spôsob akým sa v ňom programuje. Využíva sa tu tzv. model/view architektúra [54].

Model/View Architektúra

Qt obsahuje množinu itemov, ktoré používajú model/view architektúru na riadenie vzťahu medzi reprezentáciou dát a spôsobom akým sú vyobrazené. Celá architektúra vychádza zo známeho návrhového vzoru MVC [55] (Model-View-Controller), kde sa View a Controller zlúčia do jedného. V prípade ak chceme mierne upraviť spôsob akým viewer dáta zobrazuje (napríklad zmeniť ich farbu) použijeme na to tzv. *delegate*. Architektúra sa teda dá rozdeliť do 3 hlavných komponent – model, view a delegate. Každá z týchto komponent je definovaná abstraktnou triedou, ktoré ponúkajú jednotný interface a v niektorých prípadoch (napríklad `QFileSystemModel` [56], `QTableView` [57], atď.) máme dokonca už predimplementovanú aj základnú funkcionálnu. Komunikácia medzi komponentami prebieha pomocou tzv. *signals* a *slots* [58]. Signal je vyvolaný konkrétnym eventom (napríklad stlačenie tlačidla na konkrétny item) a slot je funkcia, ktorá sa zavolá ako odpoveď na daný signal.

3.4 Spracovávanie pcap súborov

V sekcii 3.1 sme sa rozhodli, že na zachytávanie paketov budeme používať third-party aplikáciu USBPcap. Tá, ako sme už spomínali, zachytáva pakety do súboru vo formáte pcap, čo je obecné známe formát so špecifickým zameraním práve na ukladanie dát reprezentujúcich pakety. Teraz sa pozrieme na niekoľko možných spôsobov ako daný súbor spracovať:

Npcap API

Npcap [59] je Windows knižnica na zachytávanie sieťových paketov, ktorá poskytuje Npcap API [60] pomocou ktorého sme schopní spracovávať pcap súbory. Schopnosť Npcap zachytávať pakety je nám zbytočná – jednak pretože na to využívame USBPcap a navyše Npcap je schopný zachytiť iba sieťové pakety. Jej API by nám ale mohlo zjednodušiť čítanie nami zachytených pcap súborov. Pomocou volania `pcap_open_offline()` získame handle pomocou ktorého môžeme neskôr čítať jednotlivé pakety volaním funkcie `pcap_next()`, ktorá nám vráti pointer na dáta samotného paketu. Použitie je skutočne jednoduché, má to ale aj svoje nevýhody.

Za prvú nevýhodu môžeme brať nutnosť pridávať do projektu ďalšie knižnice – čo zahŕňa inštaláciu Npcap, linkovanie dodatočných dll súborov a celkovú integráciu nášho projektu s knižnicou. Čo ale môžeme považovať za najväčšiu nevýhodu je fakt, že použitím tejto knižnice úzko viažeme náš program na platformu Windows. Windows je síce platforma na ktorú hlavne cieľime, ale zároveň môžeme uvažovať nad neskôrším rozšírením na iné platformy. V takom prípade

by sme museli prepísať dôležitú časť nášho kódu, ktorá by zahŕňala spracovanie pcap súborov a oddelenie dát jednotlivých paketov.

Keď sa bližšie pozrieme na formát pcap súboru, zistíme, že vôbec nie je zložitý. Celý súbor obsahuje globálnu hlavičku a dáta jednotlivých paketov sú prefixované lokálnymi hlavičkami. Preto spracovanie jednotlivých súborov nie je náročné a môžeme na to použiť bežné spôsoby.

QFile

Bežný prístup k čítaniu súborov v C++ by bolo použitie `std::ifstream` [61], keďže ale používame Qt framework, máme k dispozícii triedu *QFile* [62]. QFile ponúka jednoduché API vďaka ktorému môžeme postupne spracovávať ľubovoľný súbor. Ako sme už spomínali vyššie v kapitole 3.1, na analýzu paketov v reálnom čase používame ukladanie do súboru pomocou Wiresharku. QFile API nám umožňuje tento súbor postupne spracovávať a tým pádom sme splnili požiadavky **P2** a **P3** ohľadom čítania súborov, ktoré sme si na začiatku stanovili.

3.5 Uchovávanie informácií

Počas spracovávania pcap súborov máme k dispozícii dáta popisujúce jednotlivé pakety. Tie si musíme určitým spôsobom zareprezentovať a ukladať, aby sme ich mohli neskôr analyzovať a vyobraziť. V tejto sekcii si rozoberieme niekoľko možných riešení.

char[]

Metóda `read(char*, quint64)` pomocou ktorej čítame zo súboru špecifikuje prvým parametrom miesto do ktorého sa majú zapísať prečítané dáta a druhým parametrom akú veľkosť dát chceme prečítať. Musíme si teda dopredu pripraviť buffer do ktorého budeme zapisovať. Keďže konkrétnu veľkosť jednotlivých paketov zistíme až za run-timu, budeme musieť buffer dynamicky alokovať na halde. Na to existujú 2 hlavné spôsoby ako niečo také dosiahnuť:

- Pomocou `new char[paket_size]` – tento spôsob by sa dal v dnešnom C++ považovať za zastaralý a nebezpečný. Je nutné pečlivo sledovať životnosť takto alokovanej pamäte, musíme si na ňu držať odkaz a keď už ju nebudeme potrebovať, je potrebné na nej zavolať `delete` aby nám nevznikali žiadne memory leaky.
- Pomocou `std::unique_ptr<char[]>` – tento spôsob je určite lepší ako ten predchádzajúci, pretože nám odpadá starosť o memory leaky. Na druhú stranu tu vzniká menší problém s uskladnením alebo s predávaním dát po programe v podobe parametru. Museli by sme sa starať o to, kto je vlastníkom daného objektu a či je ešte korektné ho používať.

Skúsime sa pozrieť na to, čo nám ponúka samotné Qt.

QByteArray

V riešení nám zase pomôže koncept dostupný v Qt – *QByteArray* [63]. *QByteArray* je trieda, ktorá slúži práve na uchovávanie bytov alebo '0'-terminated stringov. Navyše sú uložené dáta copy-on-write takže ušetríme pamäť a zbytočné kopírovanie dát. Obsahuje metódy ako `resize(int)` (zmení veľkosť daného poľa) alebo `data()` (vráti `char*` na začiatok poľa). O životnosť objektu sa nemusíme obávať, pretože Qt používa vlastný reference counting systém, ktorým sa stará o všetky zdieľané objekty medzi ktoré patrí aj *QByteArray*. O ukladaní dát sa budeme bližšie baviť v sekcii 3.7 nižšie ale aby sme to pochopili, vysvetlíme si tu ešte jeden koncept Qt, ktorý neskôr využijeme spolu s *QByteArray* pri ukladaní dát – *QVariant* [64]. *QVariant* je trieda, ktorá sa správa ako union pre väčšinu základných Qt datových typov. Podstatné je, že si doňho vieme zabaliť náš konkrétny *QByteArray* a neskôr ho odtiaľ získať zavolaním metódy `toByteArray()`.

3.6 Spracovávanie live capture

Ako sme už spomínali vyššie v sekcii ??, súbory spracovávame pomocou *QFile*. Ak máme fixný súbor, ktorý sa počas spracovávania a ani po ňom nemení, tak jeho spracovanie je priamočiare – prechádzame `while` cyklom cez súbor až pokiaľ sa nedostaneme na jeho koniec a tým celé psracovanie končí. Počas live capturu to je o trochu komplikovanejšie, pretože potrebujeme neustále sledovať spracovávaný súbor na aktuálne zmeny. To môžeme riešiť viacerými spôsobmi:

Nekonečný cyklus

Jedno z riešení by bolo celý proces spracovávania súboru zabaliť do nekonečného `while(true)` cyklu. Toto riešenie nie je práve ideálne z dvoch hlavných dôvodov:

1. Zátťaž procesora – mohli by sme do kódu pridať napríklad `Sleep(50)`, ale stále to tvorí obrovský nátlak na procesor.
2. User-experience – z užívateľského pohľadu je toto riešenie veľmi nepraktické. Vzhľadom na to, že používame Qt, náš program reaguje na interakciu užívateľa pomocou tzv. „signálov a slotov“ [58]. Zároveň na daný cyklus nevyužívame žiadne metódy paralelného programovania a teda Qt komponenty nemajú možnosť tieto signály emitnúť. Riešenie by bolo volať priebežne metódu `QCoreApplication::processEvents()`, ktorou by sme spracovali dané signály. Takýto prístup má za následok veľmi zlú odozvu vzhľadiska užívateľskej interakcie s aplikáciou, čo pôsobí sekavým dojmom.

QFileSystemWatcher

QFileSystemWatcher [65] Qt trieda ponúka interface na monitorovanie jednotlivých súborov a priečinkov. Pomocou `addPath(QString)` metódy si pridáme cestu k súboru, ktorý chceme sledovať a pokiaľ je daný súbor akýmsi spôsobom

modifikovaný, `QFileSystemWatcher` emitne signál `fileChanged(QString)`. Museli by sme si teda spojiť tento signál s našim konkrétnym slotom (takže ak bude `fileChanged(QString)` signál emitnutý, zavolá sa naša slot funkcia), v ktorom by sme implementovali čítanie súboru po jeho prípadných zmenách. Toto riešenie sme bohužiaľ nemohli implementovať z dôvodu, akým vo Wiresharku funguje zapisovanie do súboru počas zachytávania USB paketov. Zapisovanie prebieha až v momente keď máme Wireshark otvorený ako hlavné okno, a nie keď len beží na pozadí. To znamená, že by sme museli prepínať medzi našou aplikáciou a Wiresharkom aby bol súbor, do ktorého sa zapisuje modifikovaný a tým pádom by bol emitnutý signál `fileChanged(QString)`.

Qtimer

Riešenie nám poskytne trieda `QTimer` [66] a jej signál `timeout()`. Ten sa emitne v pravidelných intervaloch určených metódou `start(std::chrono::milliseconds)` (čím sa zároveň aj spustí daný timer). K tomuto signálu si pripojíme slot, ktorý skontroluje či nebol daný súbor modifikovaný a prípadne spracuje jeho zmeny. Z vyššie opísaných dôvodov pre ktoré sme nemohli použiť `QFileSystemWatcher`, je `QTimer` prijateľná alternatíva, ktorá netvorí záťaž procesora a neprejavuje sa ani čisto z užívateľského pohľadu.

3.7 Zobrazenie základných informácií

V požiadavke **P10** sme si zdefinovali aby aplikácia na prvý pohľad zobrazila len základné údaje o pakete, a detailnejšie informácie by mali byť podľa požiadavky **P11** zobrazené až po interakcii užívateľa. Pravdepodobne najintuitívnejšia interakcia užívateľa ak chce zobraziť detailnejšie informácie je pomocou dvojkliku na konkrétnu položku. Zobrazenie základných informácií by malo byť podobné tým, aké sme mali možnosť vidieť u Wiresharku a Device Monitoring Studia v kapitole 1.2. Takže by sme chceli vyobraziť jednotlivé pakety pomocou ich základných vlastností, ktoré by boli reprezentované v stĺpčekoch, pričom jeden riadok by reprezentoval konkrétny paket. Qt nám poskytuje 2 základné triedy pomocou ktorých budeme schopní jednoducho dosiahnuť žiadaného vzhľadu: `QListWidget` a `QTableWidget`.

QListWidget

`QListWidget` [67] poskytuje vzhľad na základe view triedy `QListView` [68] a jednotlivé položky sú reprezentované pomocou itemu `QListWidgetItem` [69]. Pomocou `QListWidget` sme boli schopní dosiahnuť výsledku ukázaného na obrázku 3.7.

`QListWidget` zároveň podporuje signal `itemDoubleClicked(QListWidgetItem*)`, ktorý má ako parameter konkrétny `QListWidgetItem` na ktorý užívateľ dvojklikol. Keďže chceme po dvojkliku zobraziť detailnejšie informácie o danom pakete, musíme si ich najprv niekde uschovať a následne sa k nim vedieť ľahko dostať. Tu prichádza výhoda použitia `QListWidgetItem` – ten je totiž schopný si v sebe uchovať dáta v podobe `QVariantu`. To nám úplne vyhovuje, pretože ako sme už spomínali vyššie v sekcii 3.5, dáta si uchovávame práve v `QByteArray`, ktorý

0	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	DEVICE_DESCRIPTOR
1	6.0	host	46	CONTROL TRANSFER	
2	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	CONFIGURATION_DESCRIPTOR
3	6.0	host	37	CONTROL TRANSFER	
4	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	CONFIGURATION_DESCRIPTOR
5	6.0	host	80	CONTROL TRANSFER	
6	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	
7	6.0	host	28	CONTROL TRANSFER	
8	host	6.0	27	UNKNOWN TRANSFER	
9	6.0	host	27	UNKNOWN TRANSFER	
10	host	6.0	27	UNKNOWN TRANSFER	
11	6.0	host	27	UNKNOWN TRANSFER	
12	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
13	6.0	host	32	CONTROL TRANSFER	
14	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
15	6.0	host	52	CONTROL TRANSFER	
16	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
17	6.0	host	32	CONTROL TRANSFER	
18	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
19	6.0	host	52	CONTROL TRANSFER	

Obr. 3.7: Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QListWidget

sme schopní zabaliť do QVariantu. Uloženie konkrétneho QVariantu je vykonané pomocou metódy `setData(int role, const QVariant &value)` – `role` môže byť podľa Qt dokumentácie [70] hodnota 256 a vyššie, druhý parameter je práve QVariant, ktorý chceme uložiť. Odkázaním sa na rovnakú `role` hodnotu v metóde `data(int role)` dostaneme ako návratovú hodnotu QVariant ktorý sme si vyššie uložili. Ďalšou výhodou je, že jeden riadok reprezentuje práve jeden QListWidgetItem, takže presne vieme v ktorom iteme máme uložené dáta.

Nevýhody sú naopak nepraktické rozšírenie o ďalšie stĺpčky. Tým, že jeden riadok je práve jeden item, stĺpčky sú tu len akási abstrakcia, pretože všetky informácie ktoré môžeme vidieť na obrázku 3.7 (napríklad index paketu na začiatku alebo typ prenosu), je len jeden dlhý string. Z toho vyplýva, že ak by sme sa v budúcnosti rozhodli rozšíriť funkcionality nášho programu na triedenie itemov na základe hodnoty v jednotlivých stĺpkoch, nebolo by to možné.

QTableWidget

QTableWidget [71] poskytuje vzhľad na základe view triedy QTableView [57] a jednotlivé položky sú reprezentované pomocou itemu QTableWidgetItem [72]. Pomocou QTableWidget sme dosiahli výsledok vyobrazený na obrázku 3.8 nižšie.

Ako si môžeme všimnúť, podoba medzi QListWidget a QTableWidget tak ako aj medzi QListWidgetItem a QTableWidgetItem je zrejmalá, a teda nie je prekvapivé, že budú mať niektoré interné vlastnosti rovnaké. Medzi ne patria našťastie aj metódy `setData(int role, const QVariant &value)` a `data(int role)` – takže výhoda uchovania si dát nám ostala. QTableWidget takisto podporuje signal `itemDoubleClicked(QTableWidgetItem*)` s rovnakými vlastnosťami ako mal QListWidget. Naopak rozdiel je napríklad v tom, že jeden riadok je teraz reprezentovaný niekoľkými QTableWidgetItemami. To nám umožňuje pridať si samotný item pre každú informáciu o pakete, ktorú chceme vyobraziť, čím zároveň vytvárame skutočné stĺpčky. QTableWidget má zároveň možnosť pridania horizontálnej hlavičky, v ktorej vieme špecifikovať význam hodnôt v jednotlivých stĺpkoch.

S týmito vlastnosťami nám ale vznikli aj nové problémy, ktoré musíme riešiť. Prvý problém je, že nie všetky riadky majú jednotnú dĺžku (niektoré nemajú vyplnenú hodnotu „Function“, ako môžeme vidieť na obrázku 3.8 vyššie).

Index	Source	Destination	Length	Transfer type	Function
0	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	DEVICE_DESCRIPTOR
1	6.0	host	46	CONTROL TRANSFER	
2	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	CONFIGURATION_DESCRIPTOR
3	6.0	host	37	CONTROL TRANSFER	
4	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	CONFIGURATION_DESCRIPTOR
5	6.0	host	80	CONTROL TRANSFER	
6	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	
7	6.0	host	28	CONTROL TRANSFER	
8	host	6.0	27	UNKNOWN TRANSFER	
9	6.0	host	27	UNKNOWN TRANSFER	
10	host	6.0	27	UNKNOWN TRANSFER	
11	6.0	host	27	UNKNOWN TRANSFER	
12	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
13	6.0	host	32	CONTROL TRANSFER	
14	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR

Obr. 3.8: Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QTableWidgetItem

To znamená, že riadok tam pôvodne nemá žiaden item – pri dvojkliku na nevyplnenú časť by sa teda nič nestalo. Takisto pri kliknutí na riadok alebo pri vyfarbení daného riadku by bola označená resp. vyfarbená len časť v ktorej sa nachádza text – to pôsobí nekonzistentným dojmom. Riešenie je naštastie triviálne – v prípade, že do daného stĺpčeka nemáme čo vyplniť, vytvoríme prázdny QTableWidgetItem a ten pridáme. Ďalší problém je uchovávanie dát – v prípade QListWidget bol jeden riadok reprezentovaný len jedným itemom, takže v prípade keď užívateľ dvojklikol na paket, ktorý chcel bližšie preskúmať, tak sme v signali `itemDoubleClicked(QListWidgetItem*)` dostali práve item v ktorom sme mali uložené všetky informácie. V prípade QTableWidgetItem ak užívateľ dvojklikne na určitú časť riadku, zvolí sa jeden konkrétny item spomedzi všetkých na danom riadku. Problém teraz spočíva v tom, v ktorom iteme si budeme uchovávať dáta. Trochu prvoplánové riešenie by bolo ukladať si dáta do každého itemu v riadku – toto riešenie nie je príliš ideálne, pretože vzniká zbytočná duplikácia dát. Preto si dáta uchováваме v prvom iteme každého riadku a v prípade keď užívateľ dvojklikom vyberie konkrétny item, zistíme si pomocou metódy `row(QTableWidgetItem*)` číslo riadku na ktorom sa nachádza a následne pomocou metódy `item(int row, int column)` získame prvý item v danom riadku.

V požiadavke **P10** sme si takisto určili, že chceme jednotlivé pakety mať farebne oddelené na základe ich pohybu na zbernici. Túto informáciu získame z hlavičky paketu pri vytváraní jednotlivých riadkov. Rozhodli sme sa vyfarbovať riadky ktoré reprezentujú pakety posielané zariadením hostovi, pretože sa v nich väčšinou nachádzajú zaujímavejšie dáta a myslíme si, že typický užívateľ má tendenciu klikať skôr na farebne zvýraznené časti. Keďže tu nemáme jeden item reprezentujúci celý riadok, zafarbenie prebieha obyčajnou iteráciou cez všetky stĺpčeky a ich samostatným zafarbením. Celkovú funkcionality farebného oddelenia sme rozvinuli ešte o trochu viac oproti ostatným aplikáciám a dokonca ešte aj farba akou je item označený, sa líši na základe typu prenosu. Výsledný vzhľad môžeme vidieť na obrázku 3.9.

Index	Source	Destination	Length	Transfer type	Function
21	6.0	host	28	CONTROL TRANSFER	
22	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	HID_REPORT_DESCRIPTOR
23	6.0	host	84	CONTROL TRANSFER	
24	host	6.1	27	INTERRUPT TRANSFER	
25	host	6.1	27	INTERRUPT TRANSFER	
26	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	
27	6.0	host	28	CONTROL TRANSFER	
28	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	HID_REPORT_DESCRIPTOR
29	6.0	host	50	CONTROL TRANSFER	
30	host	6.0	36	CONTROL TRANSFER	STRING_DESCRIPTOR
31	6.0	host	30	CONTROL TRANSFER	
32	6.1	host	31	INTERRUPT TRANSFER	
33	host	6.1	27	INTERRUPT TRANSFER	
34	6.1	host	31	INTERRUPT TRANSFER	
35	host	6.1	27	INTERRUPT TRANSFER	

Obr. 3.9: Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QTableWidgetItem

3.8 Hexdump

Ako sme si stanovili na začiatku v požiadavke **P4**, chceme aby naša aplikácia bola schopná zobrazovať hexdump dát nad ktorými prebieha analýza. Chceli by sme podporovať základné správanie hexdumpu – označením hexovej časti sa automaticky označia im odpovedajúce tlačiteľné znaky a opačne. Zároveň ale máme na náš hexdump vďaka požiadavke **P5** trochu väčšie nároky, a to farebné vyznačenie jednotlivých znakov podľa významu. V Qt máme 2 základné možnosti ako niečoho takého dosiahnuť – nadefinovanie vlastného widgetu alebo prispôsobenie už existujúceho widgetu naším požiadavkám. Poďme sa teda pozrieť na to čo všetko by sme museli riešiť v prípade nadefinovania vlastného widgetu.

QAbstractScrollArea

QAbstractScrollArea [73] trieda je v podstate widget, ktorý nám poskytuje abstrakciu scrollovacej plochy (scrollovanie samozrejme musíme podporovať v prípade väčšieho množstva dát). Kontent je vykresľovaný do widgetu, ktorý nazývame viewport. Dokumentácia udáva list niekoľkých vecí o ktoré sa musíme postarať ak chceme vytvoriť objekt, ktorý dedí od QAbstractScrollArea:

- Nastavenie scroll-barov – to zahŕňa napríklad ich veľkosť, rozsah pohybu, definovanie o koľko sa má daný scroll-bar pohnúť v prípade ak užívateľ stlačí tlačidlo „Page Up“ resp. „Page Down“, alebo aj sledovanie ich aktuálnej pozície.
- Vykreslenie kontentu, ktorý sa má zobrazíť na základe hodnôt jednotlivých scroll-barov (vykresliť tú časť hexdumpu na ktorej sa momentálne podľa scroll-barov nachádzame).
- Spracovať všetky eventy, ktoré sú prijaté viewportom – napríklad paintEvent (požaduje vykreslenie celého viewportu alebo danej časti), mousePres-

sEvent (kliknutie na viewport), atď.

- Používanie `viewport->update()` k updatenutiu obsahu na viewporte namiesto `update()`.

Podme si ale rozmyslieť, či je skutočne nutné všetky tieto veci implementovať alebo či pre nás nebude výhodnejšie nájsť widget, ktorý to už má celú túto základnú funkcionality nadefinovanú a len ho upravíme našim požiadavkám hexdumpu.

QTableView

S QTableView [57] sme sa už stretli vyššie v sekcii 3.7. Hexdump si v podstate vieme predstaviť ako tabuľku dát, preto dáva zmysel skúsiť upraviť práve túto triedu. QTableView je súčasťou Qt model/view architektúry, takže nám umožňuje logicky oddeliť dáta a ich zobrazovanie. Na reprezentáciu dát máme vytvorený vlastný model, podme sa preto venovať len ich zobrazeniu pomocou table view. Na kompletný hexdump budeme potrebovať 2 samostatné QTableView – jeden pre hexa časť a jeden pre tlačiteľné znaky. Pre vyobrazenie hexdumpu tak, aby sa podobal tomu na čo je bežný užívateľ zvyknutý nám postačia len jednoduché úpravy ako napríklad:

- Odstránenie horizontálnej hlavičky (`horizontalHeader()->setVisible(false)`).
- Nastavenie veľkosti jednotlivých buniek (`resizeColumnsToContents()` a `resizeRowsToContents()`).
- Odstránenie mriežky medzi bunkami (`setShowGrid(false)`).

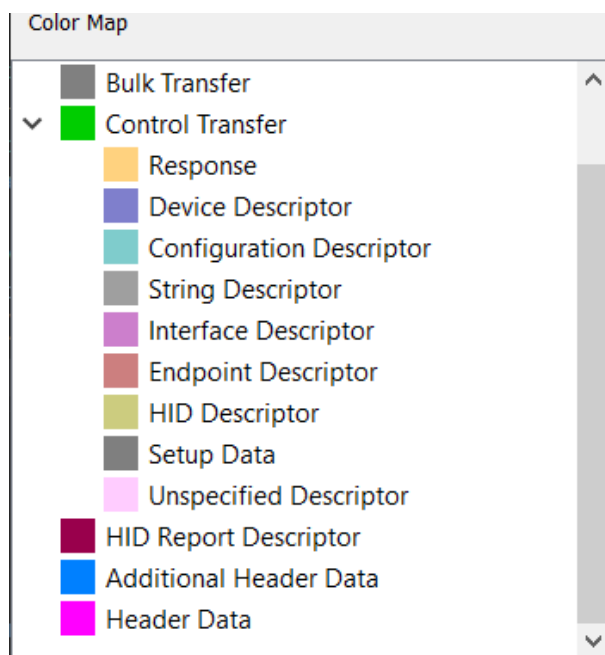
Na implementáciu funkcionality označenia rovnakých častí tlačiteľných znakov ako hexdumpu a opačne nám stačí prepojiť signály `selectionChanged` jednotlivých selection modelov pre oba QTableView s nami definovanými funkciami (bližšie si ich opíšeme v kapitole Vývojová dokumentácia 4). Keďže sa pohybujeme v model/view architektúre, na vykreslenie farebného oddelenia dát a zároveň na vyobrazenie dát samotných použijeme delegate (detailnejší popis jeho fungovania si takisto opíšeme v kapitole Vývojová dokumentácia 4). Ukážku nášho výsledného hexdumpu môžeme vidieť na obrázku 3.10 nižšie.

Address	Hexadecimal values	Printable
000000	1C 00 A0 49 1F 6A 8A DC FF FF 00 00 00 00 08 00	. . . l . j
000010	01 01 00 06 00 80 02 34 00 00 00 03 09 02 34 00 4 4
000020	02 01 00 A0 32 09 04 00 00 01 03 01 02 00 09 21	. . . 2 ! . . .
000030	11 01 00 01 22 38 00 07 05 81 03 04 00 0A 09 04 8
000040	01 00 00 03 00 00 09 21 11 01 00 01 22 16 00 !

Obr. 3.10: Vyobrazenie hexdumpu s farebným oddelením dát podľa významu

Samozrejme, obyčajné vyfarbenie nám k lepšej orientácii v hexdumpe veľmi nepomôže, pokiaľ nepoznáme význam jednotlivých farieb. Preto sme implementovali tzv. Color Map, ktorý nám k jednotlivým farbám priradí ich význam. Jej časť môžeme vidieť na obrázku 3.11.

Takisto si uvedomujeme, že nie každému môže farebné zvýraznenie hexdumpu vyhovovať a preto dávame užívateľovi možnosť ho úplne vypnúť. Výsledok je ukázaný na obrázku 3.12.



Obr. 3.11: Časť Color Map

Address	Hexadecimal values	Printable
000000	1C 00 A0 49 1F 6A 8A DC FF FF 00 00 00 00 08 00 j
000010	01 01 00 06 00 80 02 34 00 00 00 03 09 02 34 00 4 4 .
000020	02 01 00 A0 32 09 04 00 00 01 03 01 02 00 09 21 2 !
000030	11 01 00 01 22 38 00 07 05 81 03 04 00 0A 09 04 " 8
000040	01 00 00 03 00 00 00 09 21 11 01 00 01 22 16 00 ! "

Obr. 3.12: Vyobrazenie hexdumpu bez farebného oddelenia dát podľa významu

3.9 Zobrazenie sémantického významu dát

Ako sme si definovali v požiadavkách **P6**– **P8**, chceme byť schopní vykonávať sémenatiku analýzu pomocou stromovej štruktúry. Vzhľadom na to, že sa jedná o obecné známy spôsob vyobrazenia dát, Qt má na to špeciálnu triedu `QTreeView` [74], ktorá je súčasťou Qt model/view architektúry. Takisto máme opäť možnosť nadefinovať si vlastný view pomocou dedenia od triedy `QAbstractItemView` [75]. Ako sme už ale videli vyššie, museli by sme sami implementovať viaceré funkcionality, ktoré nám `QTreeView` ponúka sám a preto nevidíme dôvod nadefinovania vlastného view.

QTreeView

Celkom používame až 3 `QTreeView` – pre vyobrazenie hlavičky paketu, descriptorov a inputu zariadenia, a ako posledné už vyššie spomínaný Color Map. V našom konkrétnom prípade máme aj 3 odlišné modely – jeden pre každý view. Vzhľadom na to, že sa opäť pohybujeme v Qt model/view architektúre, budeme sa teraz zaoberať iba vyobrazením dát. Keďže nám vyhovuje štandardný spôsob akým `QTreeView` zobrazuje svoje položky, definujeme len niekoľko základných vlastností pre jednotlivé viewery:

- Každému vieweru nastavíme jemu odpovedajúci model pomocou `setModel()`.**■**

- Nastavíme šírku jednotlivých stĺpčekov buď pomocou `resizeColumnToContents()` alebo `setColumnWidth()`.

Príklad výslednej stromovej štruktúry môžeme vidieť na obrázku 3.13.

Additional Transfer Data		
Data	Meaning	Value
> CONFIGURATION_DESCRIPTOR		
> INTERFACE_DESCRIPTOR		
> HID_DESCRIPTOR		
▼ ENDPOINT_DESCRIPTOR		
07	bLength	7
05	bDescriptorType (ENDPOINT_DESCRIPTOR)	5
> 81	bEndpointAddress	129
> 03	bmAttributes	3
> 04 00	wMaxPacketSize	4
0A	bInterval	10
> INTERFACE_DESCRIPTOR		
> HID_DESCRIPTOR		

Obr. 3.13: Vyobrazenie stromovej štruktúry

4. Vývojová dokumentácia

Táto kapitola je zameraná pre programátorov, ktorých by bližšie zaujímali implementačné detaily a štruktúra nášho programu. Najprv si opíšeme ako skompilovať priložené zdrojové súbory práce a neskôr sa pozrieme na stavbu programu.

4.1 Kompilácia

V prílohe tejto práce sa nachádzajú zdrojové kódy nášho programu. Na ich úspešné skompilovanie budeme ale potrebovať splniť niekoľko požiadaviek:

- Podporovaná platforma na kompiláciu je momentálne iba Windows 10 verzie 20H2.
- Ku kompilácii je potrebné Visual Studio 2019 verzie 16.9.0, a Windows 10 SDK verzie 10.0.19041.0
- Qt verzie 5.15.0 ¹

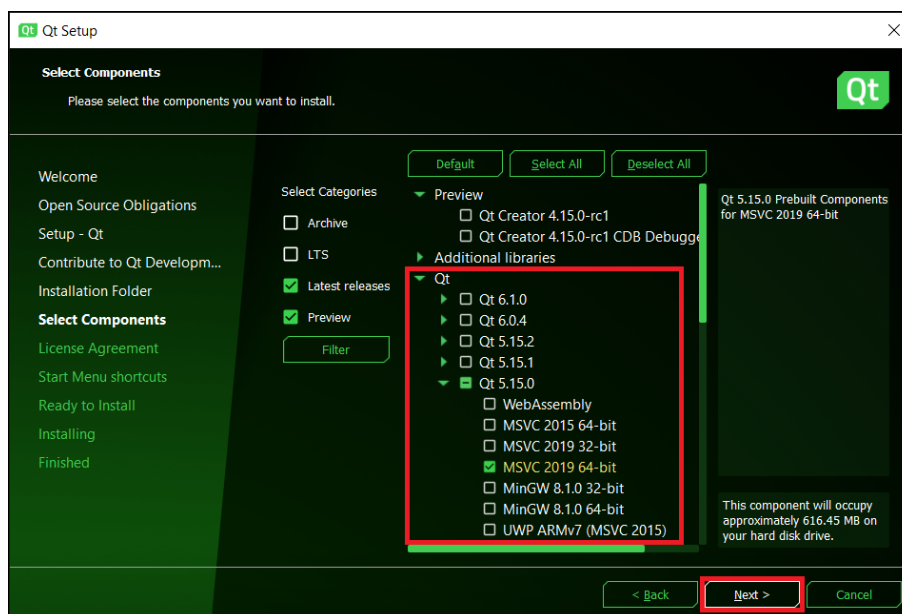
4.1.1 Inštalácia Qt

Keďže ku kompilácii budeme potrebovať samotné Qt, ukážeme si jeho inštaláciu v nasledujúcich krokoch (v prípade, že náš počítač už obsahuje požadovanú verziu Qt, môžeme tieto kroky preskočiť a prejsť na integráciu VS s Qt 4.1.2). Tu je nutné spomenúť, že sa jedná o online inštaláciu a budeme potrebovať pripojenie k internetu:

- Po kliknutí na odkaz <https://www.qt.io/download> sa nám otvorí internetový prehliadač so stránkou na stiahnutie Qt, kde vyhladáme možnosť „Downloads for open source users“ a klikneme na „Go open source“.
- Na aktuálnej stránke nascrollujeme úplne dole, kde klikneme na zelené tlačidlo s nápisom „Download the Qt Online Installer“.
- Na aktuálnej stránke klikneme na „Download“, čím sa nám stiahne „Qt Online Installer“. Ten následne spustíme.
- Ako prvé nás privíta obrazovka, ktorá od nás vyžaduje prihlásenie sa do nášho Qt účtu. Toto je bohužiaľ nutnosť a nie je možné bez toho pokračovať. V prípade, že nemáme žiadny vytvorený Qt účet, môžeme si ho vytvoriť priamo počas inštalácie a celé to nezaberie viac ako dve minúty. Potom klikneme na tlačidlo „Next“.
- Teraz sa postupne preklikáme až po časť, kde máme možnosť si vybrať či chceme zasielať štatistické údaje počas používania Qt Creatoru. Tu si môžeme zvoliť ktorúkoľvek z možností podľa osobných preferencií a pokračovať ďalej v inštalácii.

¹V dobe dokončovania práce bola najnovšia verzia Qt 6.1, ktorá by mala byť spätne kompatibilná, ale netestovali sme to.

- Postupne sa dostaneme na obrazovku kde si zvolíme konkrétne komponenty, ktoré sa nám nainštalujú. Komponenty, ktoré sú zaškrtnuté necháme tak a rozklikneme možnosť Qt←Qt 5.15.0 a zaškrtneme možnosť „MSVC 2019 64-bit“ a klikneme na „Next“ (obrázok 4.1).



Obr. 4.1: „Select Components“ časť Qt Setupu

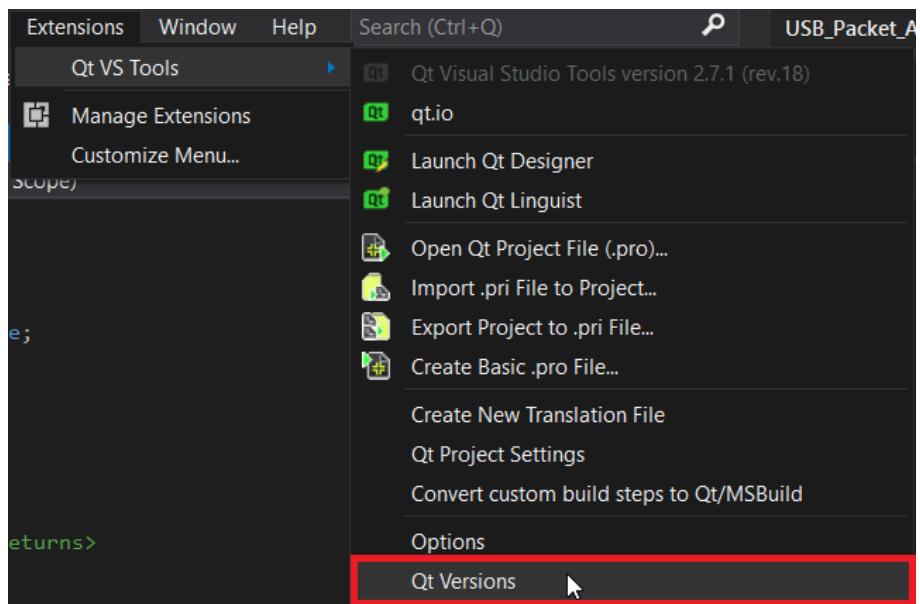
- Ďalej nasledujú bežné kroky pomocou ktorých dokončíme inštaláciu.

4.1.2 Visual Studio 2019 a Qt

Teraz si ešte ukážeme integrovanie Visual studia 2019 spolu s Qt. Budeme si potrebovať nainštalovať *Qt VS Tools*. Podrobný postup si ukážeme v nasledujúcich krokoch:

- Priamo vo Visual Studiu si cez možnosť *Extensions→Manage Extensions* do online hľadania zadáme „Qt“ a stiahneme si rozšírenie „Qt Visual Studio Tools“ [76]
- Po úspešnej inštalácii si musíme ešte vybrať Qt verziu cez možnosť *Extensions→Qt VS Tools→Qt Versions* (ukázané na obrázku 4.2).
- V dialógu sa teraz cez ikonu v stĺpčeku „Path“ (obrázok 4.3) odkážeme do adresáru, kde sme nainštalovali Qt a následne do adresáru *5.15.0msvc2019_64 bin* kde máme nainštalovaný *qmake.exe*.
- Ako posledné si ešte skontrolujeme cez možnosť *Project→Properties* v *Configuration Properties→General* skontrolujeme, že máme nastavený *C++ Language Standard* na možnosť *ISO C++ 17* a *Windows SDK Version* na verziu *10.0.19041.0* ako na obrázku 4.4.

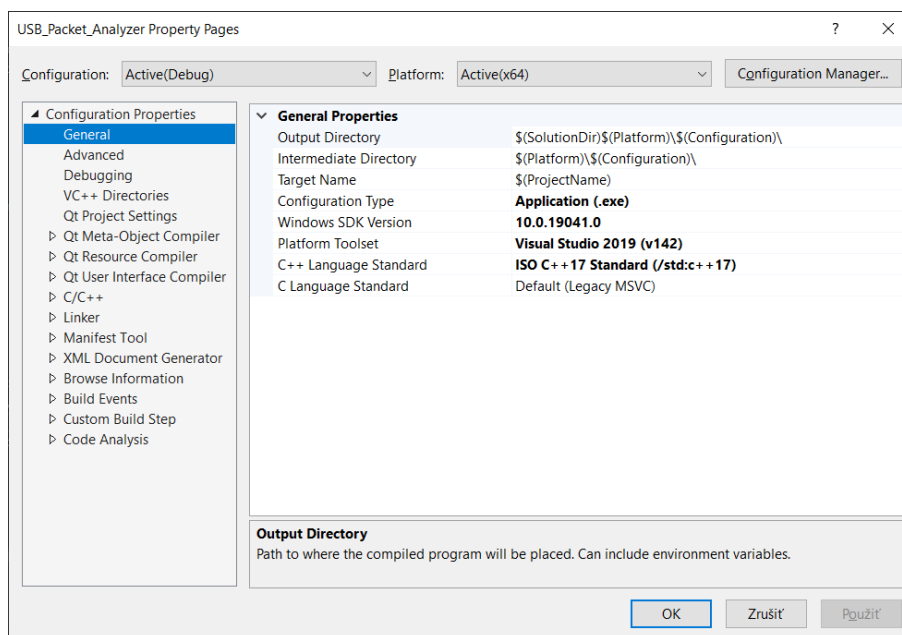
Môže sa stať, že narazíme na bug keď nám krok 4.1.2 nenastaví Qt verziu a nebudeme vedieť projekt preložiť kvôli errorom typu „cannot open source file qbytearray“. V takom prípade prejdeme do možnosti *Project→Properties→Qt Project Settings* a manuálne nastavíme *Qt Installation* na *msvc2019_64* (obrázok 4.5).|



Obr. 4.2: Visual Studio možnosť vybratia Qt verzie.

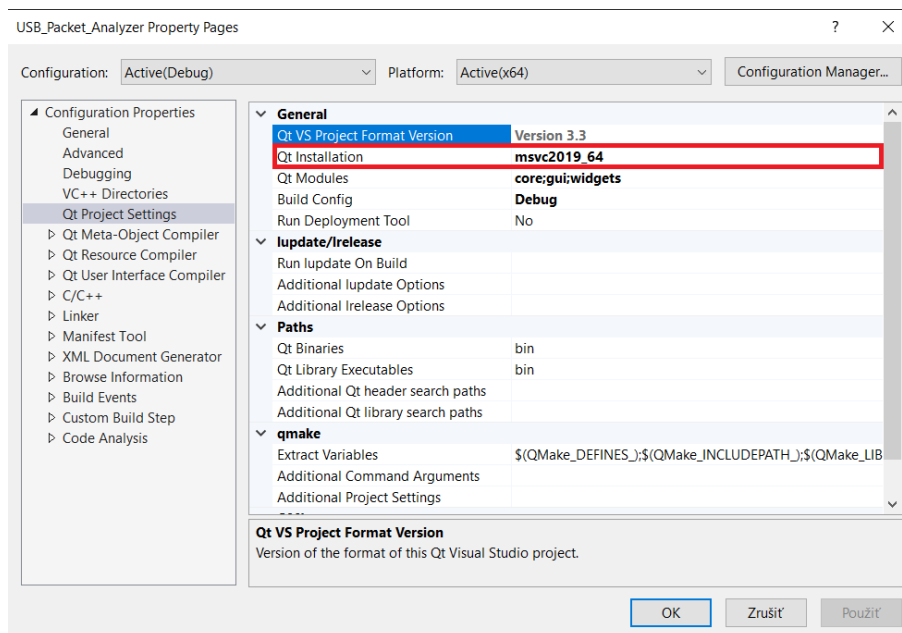
Default	Version	Host	Path	Compiler	
<input checked="" type="checkbox"/>	msvc2019_64	Windows ▾	D:\Qt\5.15.0\msvc2019_64	msvc	
	<add new Qt version>				

Obr. 4.3: Visual Studio zvolenie adresára ku *qmake.exe*.



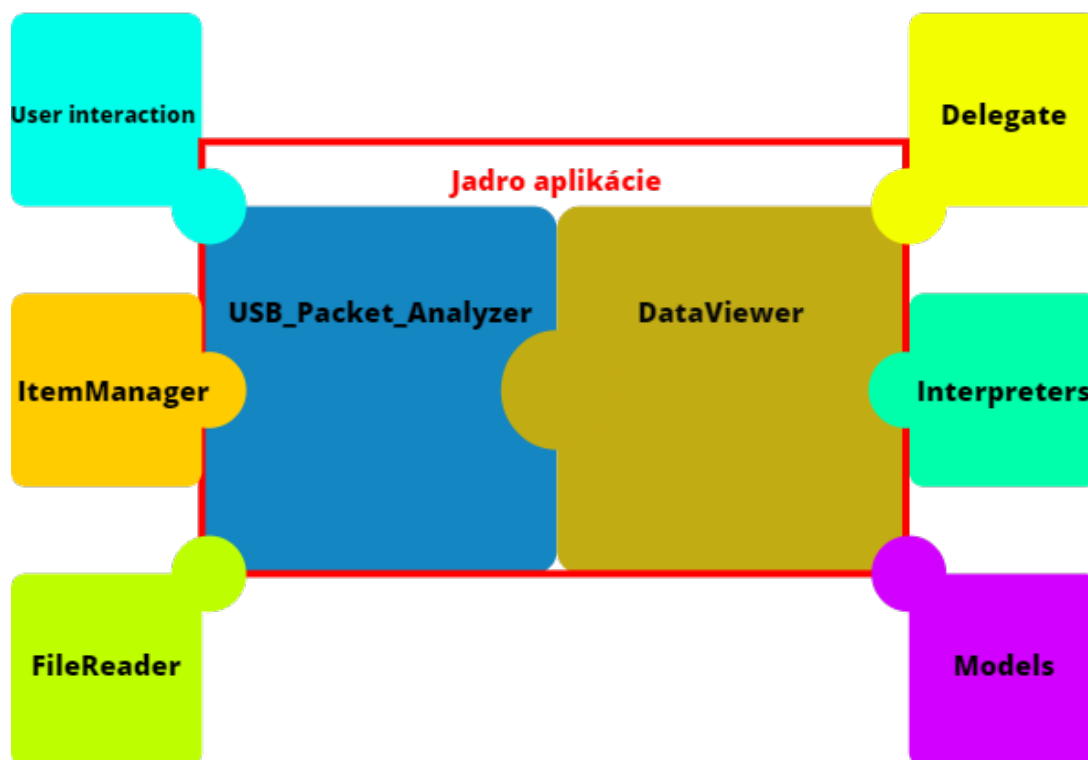
Obr. 4.4: Visual Studio obecné nastavenia projektu.

V tomto momente by sme mali byť schopní úspešne skompilovať a spustiť náš program.



Obr. 4.5: Visual Studio manuálne nastavenie Qt Installation.

4.2 Architektúra aplikácie



Obr. 4.6: Diagram architektúry aplikácie

V tejto sekcii si prejdeme celkovú stavbu aplikácie a akým spôsobom sú jednotlivé komponenty prepojené. Ako vidíme na obrázku 4.6, aplikáciu môžeme rozdeliť do dvoch hlavných komponent, ktoré tvoria logické jadro programu: `USB_Packet_Analyzer` a `DataViewer`, na ktoré sa viažu ďalšie komponenty a dopĺňajú ich funkcionality. Teraz si podrobnejšie opíšeme obe hlavné komponenty spolu s komponentami, ktoré sú na nich napojené.

4.3 USB_Packet_Analyzer

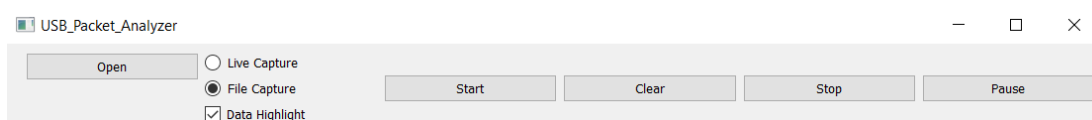
`USB_Packet_Analyzer` tvorí hlavnú triedu programu, ktorá reprezentuje okno zobrazené užívateľovi hneď po zapnutí aplikácie. Naše hlavné okno pozostáva z nasledujúcich komponent:

- `QTableWidget` – slúži na vyobrazenie základných informácií o paketoch.
- 2 `QRadioButton` – slúžia na výber medzi analýzou fixného súboru (file capture), alebo súboru do ktorého môže sniffer počas analýzy niečo pripísať (live capture).
- `QCheckBox` – slúži na výber, či užívateľ chce farebne zvýrazniť detailnejší význam analyzovaných paketov alebo nie.
- `QLabel` – slúži na vyobrazenie názvu súboru, ktorý sa aktuálne spracováva.
- `QProgressBar` – progress bar ukazujúci stav spracovania súboru počas file capture.
- 5 `QPushButton` – tlačidlá, ktorých jednotlivú funkcionality si vysvetlíme nižšie v tejto sekcii 4.3.1.

Zároveň implementuje funkcie spojené s užívateľskou interakciou, od ktorej sa následne odvíja ďalšie správanie aplikácie.

4.3.1 Užívateľská interakcia

Ako sme už spomínali vyššie v kapitole 3.3, Qt využíva na komunikáciu medzi objektami tzv. „Signals & Slots“ [58] mechanizmus, ktorý funguje ako alternatíva ku callback funkciám v iných frameworkoch. Qt widgety majú veľa preddefinovaných signálov (ku ktorým si môžeme dedefinovať ďalšie), ktoré sú emitované pri konkrétnom evente (napríklad `QPushButton` [77] má signál `clicked()` ktorý je emitnutý pokiaľ je dané tlačidlo stlačené). Slot je funkcia, ktorá je zavolaná ako odpoveď na konkrétny signál. Prepojenie signálu so slotom prebieha pomocou metódy `QObject::connect(QObject* sender, signal, QObject* receiver, method)`, kde postupne definujeme inštanciu `QObject` spolu s jej konkrétnym signálom a následne inštanciu `QObject` spolu s jej metódou, ktorá sa má zavolať po emitovaní daného signálu. Qt má takisto možnosť „Auto-Connect“ [78] pri ktorej stačí, že sa budeme držať štandardných konvencií a tým pádom nebudeme musieť manuálne prepájať jednotlivé signály a sloty pomocou `connect()` metódy. Toto využívame napríklad pri tlačidlách, konkrétne so signálom `clicked()`, kde stačí



Obr. 4.7: Tlačidlá v aplikácii.

ak si vytvoríme slot pomocou nasledujúcej mennej konvencie: `void on_<object name>_clicked()`.

Ako môžeme vidieť na obrázku 4.7, naša aplikácia obsahuje hneď niekoľko tlačidiel s odlišnou funkcionalitou o ktorú sa starajú už jednotlivé sloty, ktoré si teraz postupne opíšeme.

Open tlačidlo slúži na vybratie si súboru na analýzu. To funguje na základe triedy `QFileDialog` [79], ktorá slúži na prechádzanie file systému. Užívateľovi sa zobrazí nový dialóg s intuitívnym ovládaním na ktoré je bežný užívateľ zvyknutý. Zároveň slúži na resetovanie progress baru a nastavenie labelu, ktorý zobrazuje aktuálne zvolený súbor.

Start tlačidlo ako už napovedá jeho samotný názov, slúži na začatie analýzy. V tejto chvíli sa začne spracovávať súbor, ktorý si užívateľ zvolil pomocou predchádzajúceho tlačidla `Open` 4.3.1. Spracovanie je následne vyobrazené pomocou `QTableWidgetu`, ktorým ako sme už riešili v kapitole 3.7 vyobrazujeme základné informácie o jednotlivých paketoch. O cekové spracovanie súboru a jeho vyobrazenie tak ako aj o iné veci, sa stará trieda *ItemManager*, o ktorej si povieme viac neskôr v sekcii 4.3.2.

Clear tlačidlo zastáva funkciu vyčistenia plochy `QTableWidgetu` na ktorej sú vyobrazené základné informácie o paketoch. Takisto resetne progress bar, ktorým reprezentujeme v akom stave sa nachádzame z hľadiska spracovania daného súboru.

Stop tlačidlo spôsobí to, že sa úplne zastaví spracovávanie súboru. Využívané je pri analýze paketov v reálnom čase, čím stopne pridávanie nových paketov do `QTableWidgetu`. Akékoľvek ďalšie spracovávanie súborov už nie je umožnené. Ak by sme chceli analýzu len pozastaviť, tak v takom prípade použijeme tlačidlo `Pause` 4.3.1.

Pause tlačidlo ako už bolo naznačené vyššie, slúži na pozastavenie analýzy. To znamená, že nové pakety nie sú pridávané do `QTableWidgetu`. Obnovenie analýzy je možné opätovným stlačením tlačidla (teraz už s nápisom „Continue“), čím bude obnovené pridávanie nových paketov.

Z užívateľskej interakcie máme k dispozícii ešte jednu, o ktorej sme viac hovorili v kapitole 3.7, kde sme sa pre splnenie požiadavky na vyobrazenie detailnejších informácií o pakete na základe užívateľskej interakcie rozhodli pre dvojklik na položku reprezentujúcu daný paket.

`on_tableWidget_itemDoubleClicked(QTableWidget* item)` je slot, ktorý sa volá po dvojkliku na konkrétny item v `QTableWidget` (pointer na daný item je poslaný ako parameter). V tejto metóde vytvoríme novú inštanciu triedy `DataViewer` s odpovedajúcimi parametrami a vyobrazíme jej dialógové okno, ktoré zobrazí detailnejšie informácie o danom pakete.

4.3.2 ItemManager

Interakciu užívateľa so systémom sme si už vysvetlili a teraz sa podme pozrieť na samotné spracovávanie súborov. To má na starosti hlavne trieda `ItemManager`. Tá je implementovaná podľa návrhového vzoru singleton a vytvárame ju v konštrukte hlavnej triedy `USB_Packet_Analyzer`. Tento návrh nám okrem iného zároveň umožňuje počas analýzy v reálnom čase pokračovať v spracovávaní súboru na mieste, kde sme predtým skončili. V kapitole 3.4 sme sa rozhodli, že na čítanie súborov budeme používať `QFile`. `ItemManager` priamo so súborom, ale už len predparovanými dátami v podobe jednotlivých paketov. Tie mu posielajú inštancia triedy `FileReader`, ktorú má uloženú ako dátovú položku. `FileReader` má implementovanú celú logiku práce so súborom, pričom asi najpodstatnejšia je metóda `GetPacket()` – prečíta zo súboru dáta, ktoré reprezentujú jeden paket a tie vráti zabalené v `QByteArray`.

Selekcia paketov

Ako sme už spomínali vyššie, samotná analýza začína stlačením tlačidla Start, kedy sa na inštancii `ItemManagera` zavolá metóda `ProcessFile(QString filename, bool liveReading)`. Ako nám už samotné názvy parametrov napovedajú, predávame v nej názov súboru, ktorý chceme spracovať a `bool` hodnotu určujúcu, či sa jedná o live capture alebo file capture. Táto metóda zaistí prostredníctvom `FileReader` inštancie otvorenie daného súboru a prečítanie jeho globálnej hlavičky. Ak sa jedná o live capture, nastaví timer aby kontroloval zmenu v súbore v pravidelných intervaloch 1 sekundy. Následne zavolá metódu `ProcessFileTillEnd(bool liveReading)`, ktorá pokračuje v spracovaní súboru od miesta kde čítanie naposledy skončilo, až po jeho koniec. Táto metóda je takisto spojená s `QTimer::timeout()` signálom, pre dodatočné spracovanie súboru v prípade pripísania nových paketov počas live capture. V tejto metóde si postupne od `FileReaderu` pýtame pomocou `GetPacket()` metódy dáta reprezentujúce jednotlivé pakety a tie posielame ako parameter funkcie `ProcessPacket(QByteArray)` na ich ďalšie spracovanie. Spracovanie samostatného paketu obsahuje niekoľko fáz:

Kontrola pre špeciálny typ paketu.

Pri spracovaní jednotlivých paketov riešime 2 nasledujúce veci:

- Dáta paketu reprezentujú Configuration Descriptor spolu s Interface/HID/Endpoint Descriptorami – v takomto prípade bolo na zbernicu pripojené nové zariadenie a je potrebné si pre neho vytvoriť novú inštanciu typu `BusDevice`, o ktorej si viac povieme neskôr 4.7.1.
- Dáta paketu reprezentujú HID Report Descriptor – v takom prípade je nutné daný Report Descriptor rozparsovať. Detailnejší opis si povieme nižšie v sekcii 4.5.

Po týchto dvoch kontrolách a prípadne následných úkonoch, ktoré s nimi súvisia, posunieme dáta do metódy `FillUpItem(QByteArray)`.

Rozdelenie dát do logických celkov.

Jej hlavná úloha je rozdeliť celý `QByteArray` na niekoľko menších podľa ich logického významu – hlavička paketu, dodatočné dáta hlavičky a zvyšok poslaných dát. V kapitole 3.5 sme sa rozhodli, že všetky tieto dáta zabalíme do `QVariantu` a uložíme do prvého `QTableWidgetu` na aktuálnom riadku. Ale ešte predtým ako dáta uložíme, si musíme celý riadok s odpovedajúcimi `QTableWidgetami` vytvoriť.

Pridanie jednotlivých riadkov.

Na to nám slúži metóda `InsertRow(PUSBPCAP_BUFFER_PACKET_HEADER, unsigned char*)` – prvý parameter je pointer na štruktúru reprezentujúcu hlavičku paketu, druhý parameter reprezentuje `char*` na dáta paketu. Pomocou tejto metódy teda vytvárame jednotlivé riadky v našej `QTableWidget` komponente. Po pridaní jednotlivých `QTableWidgetItem`ov sa zavolaním metódy `ColorRow(PUSBPCAP_BUFFER_PACKET_HEADER)` postará o farebné oddelenie jednotlivých riadkov podľa ich významu. Po úspešom pridaní riadku do `QTableWidgetu` a naplnení uložením jednotlivých dát do prvého `QTableWidgetItemu` sa vraciame späť do metódy `ProcessPacket(QByteArray)`, kde musíme urobiť ešte poslednú vec – skontrolovať, či daný paket nereprezentuje Setup Paket pomocou metódy `CheckForSetupPacket(QByteArray)`.

Kontrola na Setup Paket.

Ak sa jedná o Setup Paket, skontrolujeme položku `bRequest`. Ak má hodnotu `GET_DESCRIPTOR`, znamená to, že USB host si od zariadenia vypýtal konkrétny typ descriptoru – ten si vieme zistiť z položky `wValue`. V prípade, že sa jedná o Configuration Descriptor alebo HID Report Descriptor tak vieme, že dáta nasledujúceho paketu budú reprezentovať tento konkrétny descriptor a teda bude nutné ho podľa toho spracovať.

`ItemManager` obsahuje ešte jednu dôležitú metódu, a to `GetDataType(QTableWidgetItem*, QTableWidgetItem*)`, ktorá je schopná na základe dát, ktoré sme si uložili do konkrétného `QTableWidgetItemu` zistiť presný typ prenosu. V prípade, že sa jedná o Control Transfer tak určuje aký typ descriptoru reprezentujú „zvyškové dáta“ paketu (dáta nasledujúce po hlavičke a po nepovinnnej dodatočnej hlavičke). V danom prenose sa ale môže nachádzať aj viac descriptorov súčasne – konkrétne je to v prípade ak zariadenie posiela svoj Configuration Descriptor spolu s Interface/Endpoint/HID descriptorami. V tomto prípade metóda vráti, že sa jedná o Configuration Descriptor.

Týmto sme si opísali akým spôsobom sa spracovávajú súbory, vyobrazujú sa základné informácie o paketoch a spôsob uloženia dát jednotlivých paketov. Teraz sa pozrieme ako je v našom programe riešená detailnejšia analýza (napríklad hexdump alebo sémantické vyobrazenie dát) konkrétnych paketov na základe informácií, ktoré sme si pri nich uložili.

4.4 DataViewer

Trieda reprezentujúca pop-up okno s detailnejšou analýzou konkrétneho paketu. Dané okno pozostáva z nasledujúcich komponent:

- 2 QTableView – slúžia na vyobrazenie hexdumpu. Jeden pre hex časť a druhý pre tlačiteľné znaky.
- 3 QTreeView – každý slúži na vyobrazenie sémantického významu rozdielnych dát v podobe stromovej štruktúry. Jeden zobrazuje hlavičku paketu spolu s nepovinnou hlavičkou, ďalší vyobrazuje Color Map slúžiacu na lepšiu orientáciu v hexdumpe a posledný ukazuje zvyškové dáta – napríklad význam rôznych descriptorov alebo inputu zariadenia.
- 6 QLabelov – slúžia na opis toho, čo je vyobrazené na predošlých komponentách.

Ako sme sa si vysvetlili vyššie 4.3.1, nová inštancia DataVieweru sa vytvára v momente keď užívateľ dvojklíkne na riadok reprezentujúci konkrétny paket. Do konštruktoru si predávame 3 základné veci:

1. Pointer na QTableWidgetItem, ktorý v sebe obsahuje dáta daného paketu.
2. Typ prenosu/descriptoru, ktorý získame pomocou vyššie sponínanej metódy `ItemManager::GetDataType(QTableWidgetItem*, QTableWidgetItem*)`.
3. Bool hodnotu, ktorá určuje či budeme dáta v hexdumpe farebne zvýrazňovať alebo nie. Túto hodnotu získame z QCheckBoxu hlavného okna.

V konštruktoe následne inicializujeme naše komponenty – keďže využívame spôsob programovania pomocou Qt Model/View architektúry, inicializácia zahŕňa vytvorenie modelov a delegátov a ich následné priradenie k jednotlivým viewerom. Teraz si povieme obecný spôsob fungovania modelov a delegátov v Qt, a následne si priblížime implementáciu našich konkrétnych modelov.

4.4.1 Model

Model je v Qt obyčajná trieda založená na QAbstractItemModel [?] triede, ktorá spĺňa preddefinovaný interface vďaka ktorému viewery a delegáti prístupujú k dátam. Naše modely môžu byť takisto odvodené od viac špecifických modelov, ktoré poskytuje Qt ako napríklad QAbstractTableModel [80]. Nezáleží na tom akým spôsobom budú naše dáta uložené, modely ich reprezentujú ako hierarchickú štruktúru obsahujúcu tabuľku itemov. Prístup k položkám modelu je potom zaistený pomocou tzv. „model indexov“. Viewery a delegáti používajú tieto indexy aby sa odkázali na konkrétne dáta, ktoré neskôr vyobrazujú. Aby sme získali index na konkrétne dáta, potrebujeme špecifikovať tri veci: číslo riadku, číslo stĺpca a model index rodičovského itemu.

Číslo riadku a číslo stĺpca: Ako sme už spomínali, modely reprezentujú itemy pomocou tabuľkovej štruktúry. Pomocou čísla riadku a stĺpca sa odkážeme na konkrétny item v tabuľke.

Model index rodičovského itemu: Tabuľková štruktúra ponúka dobrú reprezentáciu v prípade tabuliek, avšak nie je úplne ideálna ak si dáta ukladáme a chceme ich vyobraziť v podobe stromovej štruktúry. V takejto štruktúre má prirodzene každý item (až na koreň stromu) rodiča a ľubovoľný počet synov. Na index konkrétneho vrcholu v strome nám tak bude stačiť poznať index jeho rodiča a ktorý syn v poradí to je (to môžeme reprezentovať číslom riadku). Každý item v modeli má definovanú tzv. „role“, ktorá určuje ako sa na dané dáta máme pozeráť. Napríklad *Qt::DisplayRole* označuje dáta, ktoré majú byť vo vieweri vyobrazené ako text

4.4.2 Delegát

Delegáti obecné slúžia na vizualizáciu dát s možnosťou ich editácie. Štandardný interface pre delegátov je poskytnutý triedov `QAbstractItemDelegate` [81]. Od delegátov sa predpokladá, že implementujú metódy `paint()` a `sizeHint()` na vyobrazenie obsahu.

4.4.3 Hexdump

Teraz sa pozrieme na konkrétny model pre naše komponenty reprezentujúce hexdump. Implementujeme ho vlastnou triedou `HexdumpModel`, ktorá je odvodená od `QAbstractTableModel`. V konštruktoze si predávame nasledujúce:

1. `QTableWidgetItem* item` – Pointer na item obsahujúci dáta konkrétneho paketu, ktoré budeme v hexdumpe vyobrazovať.
2. `bool hexView` – Keďže máme rovnaký model pre hex časť a tlačiteľné znaky, potrebujeme vedieť rozlíšiť o ktorú z týchto dvoch možností sa jedná. Na to presne slúži táto bool hodnota.
3. `HeaderDataType additionalDataType` – Typ prenosu/descriptoru dát paketu.
4. `QObject* parent` – Pointer na `DataViewer` inštanciu.

`QAbstractTableModel` ponúka viac špecializovaný interface ako `QAbstractItemModel` a podľa dokumentácie implementuje metódy `index()` a `parent()`. Nám ostáva implementovať metódy `columnCount()`, `rowCount()` a `data()`. Odporúčané je takisto implementovať metódu `headerData()`.

`columnCount()` metóda vráti počet stĺpcov z ktorých bude pozostávať výsledný hexdump. V našom programe sme sa rozhodli zvoliť konštantnú hodnotu, ktorá je pre hexdump bežná – 16.

`rowCount()` metóda vráti počet riadkov, z ktorých bude pozostávať výsledný hexdump. Vzhľadom na to, že máme k dispozícii `QTableWidgetItem` obsahujúci všetky dáta, ktoré budeme chcieť vyobraziť v hexdumpe, stačí nám spočítať ich dĺžku a vydeliť ju počtom stĺpcov na jeden riadok (pričom z výsledku berieme hornú celú časť).

data() metóda vracia `QVariant` reprezentujúci konkrétny item v hexdumpe. Ten pozostáva z dvojice:

1. Konkrétne dáta, ktoré budú vyobrazené – 1B buď v hex tvare, alebo v tvare tlačiteľného znaku
2. **HeaderDataType** položka určujúca presný typ prenosu/descriptoru. Podľa tejto položky budeme následne určovať akou farbou bude daný item v hexdumpe označený. Nemôžeme tu ale iba skopírovať položku, ktorú sme dostali ako parameter v konštruktore, pretože hodnota tejto položky pochádza z metódy `ItemManager::GetDataType` a ako sme už spomínali, tá nevie rozoznať rozdiel medzi jednotlivými descriptorami pokiaľ sú poslané v jednom prenose. My ale chceme vedieť farebne odlíšiť aj descriptor, ktoré zariadenie poslalo v jednom prenose. Konkrétnu hodnotu teda zistíme pomocou metódy `GetDataRepresentationType` v ktorej pokiaľ sa jedná o Configuration Descriptor, prejdeme zvyškové dáta paketu a na základe indexu v ktorej časti sa nachádzame presne určíme typ descriptoru.

headerData() metóda nám umožňuje nastaviť vertikálnu hlavičku na ktorú je užívateľ pri bežnom hexdumpe zvyknutý – offset bytov v hexadecimálnej reprezentácii.

4.4.4 Hexdump delegát

Delegát pre hexdump je naša trieda `HexdumpDelegate` odvodená od triedy `QStyledItemDelegate`. Tento delegát slúži na vyobrazenie jednotlivých položiek v hexdumpe, tak ako aj ich farebné zvýraznenie. Pri vytváraní inštancie daného delegátu jej nastavíme bool parameter *dataHighlight* určujúci, či máme farebne zvýrazňovať dáta v hexdumpe. Ako sme už naznačili vyššie v sekcii 4.4.2, musíme implementovať metódy `paint()` a `sizeHint()`.

paint() metóda dostane ako parameter model index z ktorého získa dvojicu dát `QVariant`, ktorú sme vytvorili pomocou nášho hexdump modelu v metóde `data()`. Podľa dátovej položky *dataHighlight* sa určí, či budeme farebne zvýrazňovať daný item – ak áno, z druhej položky `QVariantu` získaného z model indexu zistíme presný typ prenosu/descriptoru (teraz už aj v prípade, že bolo poslaných viac descriptorov v jednom prenose) a na základe toho zafarbíme daný item.

sizeHint() metódou vrátime konštantnú hodnotu `QSize(30,30)` ktorá určuje veľkosť bunky hexdumpu.

Teraz keď sme si vysvetlili fungovanie `HexdumpModelu` a `HexdumpDelegatu`, stačí ak ich nastavíme danému `QTableViewu`. To urobíme pomocou metódy `setModel()` a `setItemDelegate()`.

Momentálne nám ostávajú ešte modely pre 3 komponenty reprezentujúce Color Map, hlavička paketu a zvyškové dáta. Všetky majú viewer typu `QTreeView`, takže k nim budeme potrebovať model prispôbený na stromovú štruktúru. Každá komponenta má vlastný model, niektorú funkcionality ale majú spoločnú a preto sme si vytvorili triedu `TreeItemBaseModel`, ktorá dedí od triedy

QAbstractItemModel. Každý z modelov pre jednotlivé **QTreeView**ery bude následne dediť od **TreeItemBaseModel**. Musíme ešte vyriešiť spôsob reprezentácie tejto stromovej štruktúry. Na to nám poslúži naša trieda **TreeItem**. Pri implementácii tried **TreeItemBaseModel** a **TreeItem** sme sa inšpirovali príkladom z Qt dokumentácie [82].

4.4.5 TreeItem

Reprezentuje jeden vrchol v stromovej štruktúre. Uchováva si v sebe nasledovné:

- **TreeItem* parent** – pointer na svojho rodiča.
- **QVector< std::shared_ptr< TreeItem>> childs** – list svojich synov
- **QVector< QVariant> data** – dáta, ktoré budú následne vyobrazené v **QTreeView**. Viewer samotný ponúka možnosť viacerých stĺpcov v jednom iteme a preto si dáta ukladáme v **QVectore**. Každá položka **QVariant** vo vectore tak rerezentuje dáta v jednotlivých stĺpcoch.

Následne tu máme implemtované bežné funkcie potrebné pre prácu so stromovou štruktúrou ako napríklad **ChildCount()**, **AppendChild()** alebo **ColumnCount()**, ktorých význam a princíp fungovania je bližšie opísaný v zdrojových kódach v súboroch *TreeItem.hpp* a *TreeItem.cpp*, ktoré boli poskytnuté ako príloha k tejto práci. Trochu podstatnejší je konštruktor, ktorý vyzerá nasledovne: **TreeItem(QVector< QVariant> data_, TreeItem* parent_** – ako parameter dostávame dáta, ktoré si bude daný vrchol držať a pointer na svojho rodiča. V prípade že sa jedná o koreň stromu bude rodič nastavený na **nullptr**.

4.4.6 TreeItemBaseModel

Poskytuje spoločný interface pre modely fungujúcimi pre stromové štruktúry. Takisto v sebe drží **std::unique_ptr< TreeItem>rootItem** reprezentujúci koreň stromu. Ako spoločný predok všetkých modelov pre stromové štruktúry má implementované metódy, ktorých funkcionality sa v odvodených triedach nemení a patria medzi ne:

- **index()** – vytvorí a vráti **QModelIndex** na základe parametrov (číslo riadku, číslo stĺpca a model index rodičovského itemu).
- **parent()** – na základe parametru **QModelIndex** vráti index rodiča daného vrcholu. Ak sa jedná o koreň stromu, podľa konvencie vrátime **QModelIndex()**.
- **rowCount()** – vráti počet synov vrcholu.
- **columnCount()** – vráti počet stĺpcov dát vrcholu.

Následne tu máme ešte implementované metódy, ktoré sa nám hodia pri vyobrazovaní dát v **QTreeView** ale nie sú súčasťou **QAbstractItemModelu**:

- `CharToHexConvert(char** addr, int len, QString& data)` – v parametri *data* vráti hex reprezentáciu prvých *len* znakov char poľa uloženého na adrese *addr*.
- `ShowBits< T>(uint32_t start, size_t size, T number)` – parametrizovaná funkcia, ktorá bola vytvorená pre účel splnenia požiadavky **P9** na vyobrazenie významu dát až na úrovni jednotlivých bitov. Výsledok zapisujeme do `QStringu`, ktorý na konci vrátime. Ako parameter *T* dostaneme číslo, ktorého bity budeme chcieť ukázať. To prechádzame postupne bit po bite a v momente keď sa nachádzame v intervale $< \text{start}, \text{start} + \text{size}$) zapisujeme do `QStringu` hodnoty jednotlivých bitov. Ak sa nachádzame mimo intervalu, zapisujeme „.“.

`TreeWidgetItemBaseModel` obsahuje ešte tzv. „pure virtual“ funkcie `data()` a `headerData()`, ktorých implementácia sa bude líšiť na základe dedenej triedy – je teda ich povinnosťou tieto metódy implementovať.

4.4.7 ColorMapModel

`ColorMapModel` je naša trieda odvodená od `TreeWidgetItemBaseModel` reprezentujúca model pre Color Map. Ako sme už vyššie spomínali, musí implementovať 2 funkcie: `headerData()` a `data()`. Ešte predtým si ale musíme rozmyslieť odkiaľ zoberieme dáta, ktoré budeme chcieť v Color Mape zobrazovať. Vyššie sme si spomínali triedu `TreeWidgetItem` 4.4.5, ktorá reprezentuje jeden vrchol v stromovej štruktúre, ktorá si bude udržiavať naše dáta. Celý strom si musíme najprv vytvoriť a naplniť ho dátami, a o to sa stará funkcia `SetupModelData()`.

`SetupModelData()` je metóda, ktorú voláme priamo v konštruktoze `ColorMapModel`. Keďže dedíme od triedy `TreeWidgetItemBaseModel`, máme k dispozícii koreň stromu (`std::unique_ptr<TreeWidgetItem>rootItem`) pomocou ktorého budeme cez `TreeWidgetItem` metódy budovať strom. Dáta každého vrcholu budú pozostávať z 2 položiek:

- **HeaderDataType** – položka určujúca presný typ prenosu/descriptoru. Vďaka tejto položke budeme schopní priradiť odpovedajúcu farbu každému itemu v `QTreeView`.
- string reprezentujúci názov typu prenosu/descriptoru.

`ColorMapModel` obsahuje ešte jednu špecifickú metódu `GetDataTypeInfoColor(HeaderDataType dataType)`, ktorá na základe parametru *type* vráti jemu odpovedajúcu farbu. Farby ku každému `HeaderDataType` máme nadefinované v triede `DataHolder` o ktorej si povieme viac nižšie 4.6. Teraz si prejdeme implementáciu už spomínaných virtuálnych funkcií:

- `headerData()` – keďže v Color Map nechceme mať žiadnu hlavičku, funkcia vracia prázdny `QVariant()`.
- `data(QModelIndex& index, int role)` – podľa parametru *role* zistíme o aké dáta sa jedná. Ak sa *role* rovná `Qt::DecorationRole`, vrátime farbu pomocou metódy `GetDataTypeInfoColor()`. Ak sa *role* rovná `Qt::DisplayRole`, vrátime textovú reprezentáciu typu prenosu/descriptoru, ktorú sme si uložili

do itemu ako druhú položku. Ak sa role rovná hocičomu inému, vrátime prázdny `QVariant()`.

4.4.8 USBPCapHeaderModel

je trieda odvodená od `TreeItemBaseModel` a reprezentuje model pre `QTreeView`, ktorý vyobrazuje detailnejšie informácie hlavičky paketu. V tejto triede máme takisto metódu `SetupModelData()`, ktorá vytvorí stromovú štruktúru reprezentujúcu hlavičku paketu. Hlavička paketu má fixný formát určený štruktúrou `USBPCAP_BUFFER_PACKET_HEADER`, ktorú definuje sniffer USBPcap cez ktorý zachytávame pakety na zbernici. Virtuálne funkcie sú implementované nasledovne:

- `headerData(int section, Qt::Orientation orientation, int role)` – dáta hlavičky si typicky budeme ukladať do `QVectoru` *data* nášho `rootItem`. Podľa parametru `orientation` zistíme o akú hlavičku sa jedná (vertikálnu/horizontálnu). Keďže v našom `QTreeView` chceme mať horizontálnu hlavičku, testujeme na zhodu práve s `Qt::Horizontal` hodnotou a zároveň kontrolujeme či sa role rovná `Qt::DisplayRole`. Následne už len vrátime dáta zo stĺpca, ktorý je definovaný parametrom `section`.
- `data(QModelIndex& index, int role)` – pokiaľ sa role nerovná `Qt::DisplayRole` alebo `index` nie je validný, vrátime prázdny `QVariant()`. V opačnom prípade is pomocou `indexu` získame pointer na daný item a vrátime dáta z konkrétneho stĺpca (hodnotu stĺpca zistíme takisto z `indexu`).

4.4.9 AdditionalDataModel

je trieda, ktorá je takisto odvodená od `TreeItemBaseModel` a reprezentuje model zvyškových dát paketu. To zahŕňa napríklad dáte reprezentujúce rôzne typy descriptorov, input zariadení atď. Virtuálne metódy `data()` a `headerData` riešime rovnakým spôsobom ako pri `USBPCapHeaderModel` 4.4.8. Problém nastáva až vo funkcii, ktorá má vytvoriť stromovú štruktúru. V minulých modeloch sme totiž presne vedeli čo majú jednotlivé dáta reprezentovať a ako bude vyzerat im odpovedajúci strom. Teraz to ale nie je také jednoduché, pretože zvyškové dáta paketu môžu mať rozličnú reprezentáciu, ktorá je určená až za runtimu. (odkaz na cieľ s ľahkou rozsiritelnosťou ?) Preto túto situáciu vyriešime pomocou známeho návrhového vzoru – factory. Zadefinujeme si triedy, ktorých jediná úloha bude vytvoriť špecifickú stromovú štruktúru odpovedajúcu danému typu dát. Tieto triedy budeme obecné nazývať „Interpretery“.

4.4.10 BaseInterpreter

Je základná trieda od ktorej sú všetky Interpretery odvodené. Obsahuje nasledujúce dátové položky spoločné pre všetky Interpretery:

- `TreeItem* rootItem` – koreň stromu.
- `QTableWidget* item` – pointer na item, ktorý v sebe obsahuje dáta z ktorých budeme zostavovať daný strom.

- `AdditionalDataModel* additionalDataModel` – pointer na model pre zvyškové dáta. Budeme ho potrebovať k využívaniu funkcií `ShowBits()` a `CharToHexConvert()` ktoré sa nám hodia pri vyobrazovaní informácií v `QTreeView`.

Trieda má zadaný konštruktor, ktorý má ako parameter všetky vyššie spomínané dátové položky. Zároveň obsahuje pure virtual funkciu `Interpret()`, ktorú si definuje každý interpret zvlášť a slúži na vytvorenie konkrétnej stromovej štruktúry odpovedajúcej danému interpretu.

Teraz si prejdeme všetky definované Interpretery a akú majú funkcionálnosť:

ConfigDescriptorsInterpreter

Slúži na interpretovanie nasledujúcich descriptorov:

- Configuration Descriptor
- Other_Speed_Configuration Descriptor
- Interface Descriptor
- HID Descriptor
- Endpoint Descriptor
- unknown descriptor – descriptor, ktorého štruktúru nepoznáme. Obecné ale vieme, že prvé 2B každého descriptoru reprezentujú položky *bLength* a *bDescriptorType* takže ich vypíšeme a ako ďalší vrchol stromu pripojíme zvyšné dáta descriptoru.

Keďže Interface/HID/Endpoint/unknown descriptor sú poslané v Control Transfer po Configuration Descriptor/Other_Speed_Configuration Descriptore, tak prechádzame celé zvyškové dáta paketu a postupne stavíme strom pre jednotlivé typy descriptorov.

DeviceDescriptorInterpreter a DeviceQualifierDescriptorInterpreter

Samostatné triedy, ktoré slúžia na interpretovanie Device Descriptoru a Device_Qualifier Descriptoru. Oba descriptor majú zo začiatku rovnakú štruktúru a preto máme metódu `InterpretControlTransferDeviceDescriptorBase< T>()`, ktorá ako parameter zoberie jeden z descriptorov a vyplní spoločnú časť.

ReportDescriptorInterpreter slúži na interpretovanie HID Report Descriptoru, ktoré prebieha v 2 fázach:

1. `ParseReportDescriptor()` – rozparsuje súvislé dáta reprezentujúce Report Descriptor a vytvorí z nich strom kde vrchol reprezentujeme štruktúrou `ReportDescTreeStruct` (ktorú si detailnejšie opíšme nižšie v sekcii 4.7.1). Tento strom slúži len na jednoduchšiu interpretáciu celého Report Descriptoru. Túto metódu voláme priamo z konštruktora interpreteru.
2. `Interpreter()` – slúži na interpretovanie Report Descriptoru. Tu už nepracujeme s dátami poskytnutými `QTableWidgetItem`om ale so stromom, ktorý sme si vytvorili pomocou `ParseReportDescriptor()` metódy.

SetupPacketInterpreter slúži na interpretovanie Setup Paketu.

StringDescriptorInterpreter slúži na interpretovanie String Descriptoru.

InterruptTransferInterpreter

Slúži na interpretovanie Interrupt Transferu, takže musí zároveň riešiť aký typ zariadenia daný input poslalo. Z hlavičky paketu prenosu vieme zistiť adresu zariadenia, ktoré zariadenie poslalo daný input. V **Interpret()** metóde prejde všetky zariadenia, ktoré máme uložené a nájdeme zariadenie s odpovedajúcou adresou. Zároveň sa musíme pozerať na číslo riadku na ktorom sa nachádza náš QTableWidgetItem z ktorého berieme dáta. Môže sa totiž stať, že pripojíme konkrétne zariadenie na zbernicu (napríklad myš) a USB Host mu nastaví adresu napríklad 9. Neskôr zariadenie odpojíme a napojíme namiesto neho iné (napríklad klávesnicu) a USB Host mu priradí teraz už voľnú adresu 9. V takomto prípade máme v liste zariadení 2 s rovnakou adresou a nevieme teda, ktoré z nich si máme vybrať. Toto vyriešime tým, že si u každého zariadenia budeme pamätať rozsah riadkov v ktorom boli pakety s touto adresou posielané ním. Ak také nenájdeme, nemáme informácie o danom zariadení a teda nevieme interpretovať jeho input. Ak sa nám podarí dané zariadenie rozpoznať, vyberieme ešte pomocou metódy **GetInputParser** štruktúru, ktorá presnejšie opisuje daný input a následne zavoláme už konkrétny interpreter pre naše zariadenie. Keďže sme sa na začiatku rozhodli, že budeme podporovať 3 HID zariadenia, máme na výber z týchto možností:

1. **MouseInterpreter** – interpretuje zariadenie myši.
2. **KeyboardInterpreter** – interpretuje zariadenie klávesnice.
3. **JoystickInterpreter** – interpretuje zariadenie joysticku.
4. **UnknownDeviceInterpreter** – snaží sa o obecnú interpretáciu inputu zariadenia, ktoré nie je ani jedno z vyššie uvedených.

Teraz už poznáme všetky Interpreter triedy nášho programu a musíme ešte vyriešiť ako si **AdditionalDataModel** vyberie ten správny. Ako sme už spomínali vyššie, budeme to riešiť pomocou návrhového vzoru factory, konkrétne nám na to bude slúžiť trieda **InterpreterFactory**.

4.4.11 InterpreterFactory

Trieda pomocou ktorej zvolíme správny interpreter pre **AdditionalDataModel**. Keďže bude vytvárať inštancie jednotlivých interpreterov, obsahuje nasledujúce dátové položky:

- **TreeItem* rootItem** – koreň stromu.
- **QTableWidgetItem* item** – pointer na item, ktorý v sebe obsahuje dáta.
- **AdditionalDataModel* additionalDataModel** – pointer na model pre zvyškové dáta paketu.

- **HeaderDataType dataType** – typ prenosu/descriptoru, ktorý reprezentujú dáta.

Následne obsahuje metódu **GetInterpreter()** v ktorej pomocou položky *dataType* vráti novú inštanciu správneho interpreteru.

Takže jediné čo **AdditionalDataModel** musí urobiť keď chce vytvoriť strom pre konkrétny input je vytvoriť si novú inštanciu **InterpretFactory**, získať správny interpreter a na ňom zavolať metódu **Interpret()**.

Momentálne si povieme niečo ešte o triedach a štruktúrach, ktoré nijako priamo neriadia data-flow aplikácie, ale využívame ich všade naprieč naším programom.

4.5 HIDDevices

HIDDevice je trieda implementujúca logiku súvisiacu s HID zariadeniami. Trieda je implementovaná návrhovým vzorom singleton, pretože obsahuje viaceré dátové položky a funkcie, ktoré by mali byť jednotné a chceme k nim mať prístup z viacerých častí programu. Obsahuje **std::vector< BusDevice>devices** – vector zariadení ktoré boli/sú pripojené na zbernicu počas zachytávania paketov. Zároveň v nej máme implementované veľmi dôležité funkcie **CreateDevice** a **ParseHIDReportDescriptor**

CreateDevice(QByteArray packetData) – táto funkcia sa volá z **ItemManager**a počas spracovávania paketu v momente, keď máme paket v ktorom zariadenie pošle **Configuration Descriptor**. Je zodpovedná za vytvorenie nového zariadenia a jeho pridanie do *devices*.

ParseHIDReportDescriptor(QByteArray packetData, USHORT interfaceIndex) – takisto ju voláme z **ItemManager**u počas spracovania paketu. Je zodpovedná za rozparovanie **HID Report descriptor**. Podľa *interfaceIndex* (číslo interfacu zariadenia s ktorým sa **Report Descriptor** viaže) si nájdeme konkrétne endpointy, ktorým bude tento **Report Descriptor** priradený. *packetData* reprezentujú dáta paketu – v nich preskočíme hlavičku paketu a začneme spracovávať dáta, ktoré reprezentujú **Report Descriptor**. Podľa **HID dodatku k USB špecifikácii** [18] má každý item hlavičku z ktorej zistíme tag, veľkosť a typ itemu, pričom tieto tri parametre jednoznačne určujú daný item. Dáta tak spacovávame sekvenčne po jednotlivých itemoch a postupne vytvárame jednotlivé **HIDReportDescriptorInputParse** štruktúry (viac si o nich povieme nižšie v sekcii 4.7.1) reprezentujúce jednotlivé inputy zariadenia.

4.6 DataHolder

Trieda obsahujúca rôzne dátové konštanty a funkcie, ktoré potrebujeme v rôznych častiach programu. Z tohto dôvodu je takisto naimplementovaná ako **Singleton**. Hlavné položky ktoré obsahuje:

- `TRANSFER_LEFTOVER_DATA`, `TRANSFER_OPTIONAL_HEADER` a `USBPCAP_HEADER_DATA` – konštanty určujúce Qt UserRole pri ukladaní/načítaní jednotlivých QByteArray z QTableWidgetItem pomocou `setData()/data()`.
- `BYTES_ON_ROW` – konštanta určujúca počet buniek na jeden riadok v hexdumpe.
- `DataColors` – mapa ktorá priradzuje jednotlivému typu prenosu/descriptoru farebné zložky ktorými budú jeho dáta zvýraznené v hexdumpe a Color Mape.
- `FillDataColorMap()` – metóda naplňujúca *DataColors* fixnými hodnotami.
- Metódy, ktoré vracajú textovú reprezentáciu rôznych enum konštánt.

4.7 PacketExterStructs.hpp

Je súbor skladajúci sa z dvoch častí:

- USBPCap štruktúry – časť tohto súboru definuje USBPCap štruktúry. Táto časť nie je napísaná autorom tohto projektu, ale je prevzatá zo súboru USBPcap.h [83], ktorý je súčasťou open-source zdrojových kódov USBPcapu.
- Nami definované štruktúry a enumy, ktorým sa budeme bližšie venovať v nasledujúcej sekcii 4.7.1

4.7.1 ExternStructs

Obsahuje definíciu všetkých štruktúr a enumov, ktoré používame v programe. Teraz is vysvetlíme vzťahy a význam rôznych štruktúr:

DataTypeColor štruktúra reprezentujúca farebné zložky RGBA.

ReportDescTreeStruct štruktúra slúžiaca na jednoduchšiu interpretáciu Report Descriptoru v stromovej štruktúre. Obsahuje 3 základné parametre hlavičky itemu (tag, veľkosť a typ), QByteArray data reprezentujúci dáta daného itemu, bool premennú určujúcu či sa jedná o koreň stromu a ako posledné vector shared pointerov na svojich synov.

HIDDescriptor štruktúra reprezentuje HID Descriptor definovaný v HID dodatku k USB špecifikácii [84].

InputValues štruktúra reprezentujúca jeden Input item v Report Descriptore. Obsahuje všetky povinné itemy, ktoré v sebe musí Report Descriptor zahrnúť aby opísal dáta posielené zariadením ako napríklad *Report Size*, *Usage Page* atď. Obsahuje takisto niektoré nepovinné itemy (*Usage Minimum*, *Usage Maximum*), ktoré momentálne nepoužívame, ale mohli by sa nám hodiť v prípade rozšírenia našej aplikácie o ďalšie zariadenia.

HIDReportDescriptorInputParse štruktúra reprezentuje jeden konkrétny input report zariadenia. Ako už vieme, zariadenie môže mať k jednému endpointu asociovaných viacero reportov a v takom prípade musia byť prefixované Report ID. V tejto štruktúre si všetky tieto informácie uchováваме a bližšie ich opisujeme v zdrojových kódach, ktoré sú poskytnuté ako príloha k teto práci.

BusDevice je štruktúra, ktorá reprezentuje jedno konkrétne zariadenie ktoré bolo pripojené na zbernicu počas zachytávania paketov. Najdôležitejšie položky sú adresa zariadenia, ktorú jej pridelil USB host počas konfigurácie a vector `HID-ReportDescriptorInputParse` štruktúr aby sme vedeli interpretovať všetky druhy inputov daného zariadenia.

Týmto sme si prešli celkovú stavbu našej aplikácie a mali by sme mať obecný prehľad akým spôsobom náš program funguje. Všetky detailnejšie informácie o popise jednotlivých položiek, tried alebo metód nájdeme v prílohe tejto práce v zdrojových kódach alebo poskytnutej dokumentácie vygenerovanej z dokumentačných komentárov.

5. Možnosti rozšírenia

Rozobrať čo všetko sa dá urobiť s tými dátami, ktoré už mám uložené v pamäti, ale momentálne sa s nimi nič nedeje

5.1 Ukladanie výstupu do súboru

výstup analýzy do súboru(textového)

5.2 Iná vizuálna reprezentácia dát

Momentálne vyzobrazujem dáta prevažne v QTreeView alebo QTableView, ale vďaka tomu ako ich mám uložené + to že nad nimi operuje nejaký model ktorý vie vrátiť dáta na základe indexu, by nemuselo byť taká zložitá pridať inú vizualizáciu dát(napríklad obrázkovú ako tu : https://www.usbmadesimple.co.uk/ums_5.htm)

5.3 Pridávanie nových interpreterov pre descriptoru

pridanie nových druhov descriptorov - pridať nový interpreter do factory

5.4 Pridanie interpreteru na interrupt transfer

pridanie analýzy interrupt transferu aj pre ine ako hid zariadenia

5.4.1 Pridanie nových HID zariadení

nove HID zariadenie - pridanie do interrupt "factory"

5.5 Pridanie analýzy pre isochronous a bulk transfer

semantická analýza aj iných ako interrupt alebo control transferov - momentálne sú rozpoznávané len v hexdumpe

5.6 ?Možnosť rozšírenia na iné platformy?

uprava aplikácie aby bola prenositeľná aj na iné platformy, čo všetko by tam bolo treba upraviť(pravdepodobne nie veľa, keďže Qt je prenosné, a prakticky jedine čo používam spojené s Windowsom sú jeho struktúry na rôzne descriptoru)

6. Užívateľská dokumentácia

6.1 Inštalácia

nastavenie celkovej aplikácie, ale aj nainštalovanie USBPcap + wireshark a ich kombinácia pre live capture

6.2 Orientácia v GUI aplikácie

popis k jednotlivým tlačidlám gui

6.3 Používanie aplikácie

ako spustiť live/offline capture, a celkovo ako pracovať s aplikáciou (popis funkcií - doubleClick na item => zobrazí sa pop-up okno s bližšou analýzou)

7. Záver

7.1 Zhrnutie

celkove zhrnutie prace, ?praca s Qt?

7.2 Budúce plány

Zoznam použitej literatúry

- [1] PS/2 port. https://en.wikipedia.org/wiki/PS/2_port.
- [2] Paralelný port. https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_port.
- [3] RS-232 port. <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>.
- [4] Paralelná SCSI zbernica. https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_SCSI.
- [5] USB 2.0 Specification. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, Figure 4-1].
- [6] USB 2.0 Specification – definícia USB Host a s ním súvisiace pojmy . <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 4.1.1.1].
- [7] USB 2.0 Specification – USB zariadenie definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 4.1.1.2].
- [8] USB 2.0 Specification – USB Hub definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, str. 6].
- [9] USB 2.0 Specification – USB Function definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, str. 6].
- [10] USB 2.0 Specification – USB topológia zbernice. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 4.1.1].
- [11] USB 2.0 Specification – USB descriptor definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.5].
- [12] Zoznam definovaných USB tried. <https://www.usb.org/defined-class-codes>.
- [13] USB 2.0 Specification – USB paket definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, str. 7].
- [14] USB 2.0 Specification – USB typy prenosov definícia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 4.7].
- [15] USB Client Driver. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/usbcon/usb-driver-development-guide>. [sekcia „Where applicable“].
- [16] USB Request Block. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/usbcon/communicating-with-a-usb-device>.

- [17] USB 2.0 Specification. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf].
- [18] USB Human Interface Device Class. <https://www.usb.org/document-library/device-class-definition-hid-111>. [str. 9].
- [19] Genius myš použitá v úvode pri porovnaní existujúcich analyzátorov. <https://us.geniusnet.com/product/dx-120/>.
- [20] Logitech myš použitá na ukážku konkrétneho inputu zariadenia. <https://www.amazon.com/Logitech-Spectrum-Shifting-Personalized-Programmable/dp/B0190B663A>.
- [21] Fotka genius myši prevzatá z oficiálnej genius stránky. https://us.geniusnet.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/01/DX-110_P18_980x600.jpg.
- [22] Fotka logitech myši prevzatá zo stránky obchodu. https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/31qPw4sF6uL._AC_.jpg.
- [23] USB 2.0 Specification – USB Data Flow Model. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 5].
- [24] USB 2.0 Specification – USB Endpoint. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 5.3.1].
- [25] USB 2.0 Specification – USB Pipe. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 5.3.2].
- [26] USB 2.0 Specification – USB konfigurácia. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.2.3].
- [27] USB 2.0 Specification – USB setup paket. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.3].
- [28] USB 2.0 Specification – USB štandardné device requesty. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.4].
- [29] USB 2.0 Specification – USB Configuration Descriptor. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.6.3].
- [30] USB 2.0 Specification – USB Interface Descriptors. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.6.5].
- [31] USB 2.0 Specification – USB Endpoint Descriptor. <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>. [súbor usb_20.pdf, kap. 9.6.6].

- [32] MSDN USB – Device node a device stack. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/gettingstarted/device-nodes-and-device-stacks>.
- [33] MSDN USB – Plug and Play Manager. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/install/pnp-manager>.
- [34] MSDN USB – Device object. https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/ddi/wdm/ns-wdm-_device_object.
- [35] MSDN USB – HID Architecture. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/hid-architecture>.
- [36] MSDN USB – HID Client. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/hid-architecture#hid-clients>.
- [37] MSDN USB – Services. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/services/services>.
- [38] MSDN USB – Prepared Data. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/prepared-data>.
- [39] Komunikácia HID Clienta s HID Class driverom. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/opening-hid-collections>.
- [40] HID Application Programming Interface (API). <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/introduction-to-hid-concepts>.
- [41] Tabuľka HID zariadení a ich Access Mode. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/hid/hid-architecture>. [sekcia „HID Clients Supported in Windows“].
- [42] libusb knižnica. <https://libusb.info/>.
- [43] HIDAPI knižnica. <https://github.com/signal11/hidapi>.
- [44] Moufiltr – filter driver. <https://docs.microsoft.com/en-us/samples/microsoft/windows-driver-samples/mouse-input-wdf-filter-driver-moufiltr/>.
- [45] Kbfiltr – filter driver. <https://docs.microsoft.com/en-us/samples/microsoft/windows-driver-samples/keyboard-input-wdf-filter-driver-kbfiltr/>.
- [46] USBPcap sniffer. <https://desowin.org/usbpcap/>.
- [47] Pcap file format. <https://wiki.wireshark.org/Development/LibpcapFileFormat>.
- [48] Report Descriptor. https://www.usb.org/sites/default/files/hid1_11.pdf. [str. 33].

- [49] HID Usage Tables pre USB. https://usb.org/sites/default/files/hut1_2.pdf.
- [50] Konkrétny príklad Report Descriptoru myši. https://www.usb.org/sites/default/files/hid1_11.pdf. [str. 71].
- [51] Dear ImGui. <https://github.com/ocornut/imgui>.
- [52] SFGUI. <https://github.com/Tank0s/SFGUI>.
- [53] Qt. <https://www.qt.io/>.
- [54] Qt Model/View architektúra. <https://doc.qt.io/qt-5/model-view-programming.html>.
- [55] Návrhový vzor Model-View-Controller. <https://en.wikipedia.org/wiki/Model-view-controller>.
- [56] Qt QFileSystemModel class. <https://doc.qt.io/qt-5/qfilesystemmodel.html>.
- [57] Qt QTableView class. <https://doc.qt.io/qt-5/qtableview.html>.
- [58] Qt signal a slot. <https://doc.qt.io/qt-5/signalsandslots.html>.
- [59] Npcap. <https://nmap.org/npcap/>.
- [60] Npcap API. <https://nmap.org/npcap/guide/wpcap/pcap.html>.
- [61] C++ Input file stream class – std::ifstream. <https://www.cplusplus.com/reference/fstream/ifstream/>.
- [62] Qt QFile class. <https://doc.qt.io/qt-5/qfile.html>.
- [63] Qt QByteArray class. <https://doc.qt.io/qt-5/qbytearray.html>.
- [64] Qt QVariant class. <https://doc.qt.io/qt-5/qvariant.html>.
- [65] Qt QFileSystemWatcher class. <https://doc.qt.io/qt-5/qfilesystemwatcher.html>.
- [66] Qt QTimer class. <https://doc.qt.io/qt-5/qtimer.html>.
- [67] Qt QListWidget class. <https://doc.qt.io/qt-5/qvariant.html>.
- [68] Qt QListView class. <https://doc.qt.io/qt-5/qlistview.html>.
- [69] Qt QListWidgetItem class. <https://doc.qt.io/qt-5/qlistwidgetitem.html>.
- [70] Qt ItemDataRole enum. <https://doc.qt.io/qt-5/qt.html#ItemDataRole-enum>.
- [71] Qt QTableWidget class. <https://doc.qt.io/qt-5/qtablewidget.html>.

- [72] Qt QTableWidgetItem class. <https://doc.qt.io/qt-5/qtablewidgetitem.html>.
- [73] Qt QAbstractScrollArea class. <https://doc.qt.io/archives/qt-5.11/qabstractscrollarea.html>.
- [74] Qt QTreeView class. <https://doc.qt.io/qt-5/qtreeview.html>.
- [75] Qt QAbstractItemView class. <https://doc.qt.io/qt-5/qabstractitemview.html>.
- [76] Qt Visual Studio Tools. <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=TheQtCompany.QtVisualStudioTools2019>.
- [77] Qt QPushButton class. <https://doc.qt.io/qt-5/qpushbutton.html>.
- [78] Qt Auto-Connect. <https://doc.qt.io/qt-5/designer-using-a-ui-file.html#widgets-and-dialogs-with-auto-connect>.
- [79] Qt QFileDialog class. <https://doc.qt.io/qt-5/qfiledialog.html>.
- [80] Qt QAbstractTableModel class. <https://doc.qt.io/qt-5/qabstracttablemodel.html>.
- [81] Qt QAbstractItemDelegate class. <https://doc.qt.io/qt-5/qabstractitemdelegate.html>.
- [82] Qt Tree Model example. <https://doc.qt.io/qt-5/qtwidgets-itemviews-simpletreemodel-example.html>.
- [83] USBPcap súbor USBPcap.h v github repozitári. <https://github.com/desowin/usbpcap/blob/master/USBPcapDriver/include/USBPcap.h>.
- [84] USB Device Class Definition for HID – HID Descriptor. <https://www.usb.org/document-library/device-class-definition-hid-111>. [kap. 6.2.1].

Zoznam obrázkov

1.1	USB topológia. Obrázok prevzatý z USB 2.0 špecifikácie [5].	4
1.2	Ukážka myši, ktorých input budeme porovnávať	6
1.3	Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Genius myši.	7
1.4	Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Logitech myši.	7
1.5	Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Genius myši s významom.	7
1.6	Ukážka hexdumpu so zvýrazneným inputom Logitech myši s významom.	7
1.7	Ukážka hexdumpu vo Wiresharku.	8
1.8	Ukážka hexdumpu so zvýrazneným endpoint descriptorom.	8
1.9	Ukážka hexdumpu s farebným oddelením na základe významu.	9
1.10	Ukážka reprezentácie dát pomocou stromovej štruktúry.	9
1.11	Endpoint descriptor reprezentovaný dátami zvýraznenými na obrázku 1.7 vyššie.	9
1.12	Ukážka vyobrazenia jednotlivých bytov.	10
1.13	Ukážka kliknutia na položku v hexdumpe.	10
1.14	Ukážka kliknutia na položku <i>endpoint descriptoru</i> v stromovej štruktúre.	10
1.15	Príklad obecného vyobrazenia jednotlivých paketov vo Wiresharku.	10
1.16	Príklad inputu myši vo Wiresharku.	11
1.17	Ukážka stromovej štruktúry na zvolenie si zariadenia, s ktorým bude zachytávaná komunikácia.	11
1.18	Príklad hexdumpu v Device Monitoring Studio.	12
1.19	Príklad analýzy paketov.	12
1.20	Ukážka vyobrazenia URB.	12
1.21	Príklad inputu myši v Device Monitoring Studio.	12
1.22	Príklad obecného vyobrazenia jednotlivých paketov v Device Monitoring Studio.	13
1.23	Užívateľské rozhranie Device Monitoring Studio.	13
2.1	Ukážka device tree. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]	19
2.2	Ukážka konkrétnych device nodov. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]	19
2.3	Ukážka vytvorenia konkrétnych PDO Pci.sys driverom. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]	20
2.4	Ukážka konkrétneho device tree pre PCI zbernicu. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [32]	21
2.5	Ukážka konkrétneho device stacku myši a klávesnice. Obrázok prevzatý z Microsoft dokumentácie [35]	21
3.1	Tabuľka zariadenia ich <i>Access Mode</i> . Zariadenia postupne po riadkoch – myš, joystick a klávesnica	23
3.2	Konkrétny príklad Report Descriptoru myši prevzatý z HID Class Specification [50]	26
3.3	Časť Report Descriptoru reprezentujúca jednotlivé kolekcie	27

3.4	Časť Report Descriptoru reprezentujúca tlačidlá myši	27
3.5	Časť Report Descriptoru reprezentujúca osy X a Y pri pohybe s myšou	28
3.6	Časť Report Descriptoru reprezentujúca ukončenie jednotlivých kolekcií	28
3.7	Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QListWidget	34
3.8	Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QTableWidget	35
3.9	Vyobrazenie základných informácií o pakete pomocou QTableWidget	36
3.10	Vyobrazenie hexdumpu s farebným oddelením dát podľa významu	37
3.11	Časť Color Map	38
3.12	Vyobrazenie hexdumpu bez farebného oddelenia dát podľa významu	38
3.13	Vyobrazenie stromovej štruktúry	39
4.1	„Select Components“ časť Qt Setupu	41
4.2	Visual Studio možnosť vybratia Qt verzie.	42
4.3	Visual Studio zvolenie adresára ku <i>qmake.exe</i>	42
4.4	Visual Studio obecné nastavenia projektu.	42
4.5	Visual Studio manuálne nastavenie Qt Installation.	43
4.6	Diagram architektúry aplikácie	43
4.7	Tlačidlá v aplikácii.	45

Zoznam tabuliek

Seznam použitých zkratek

Prílohy

.1 První příloha