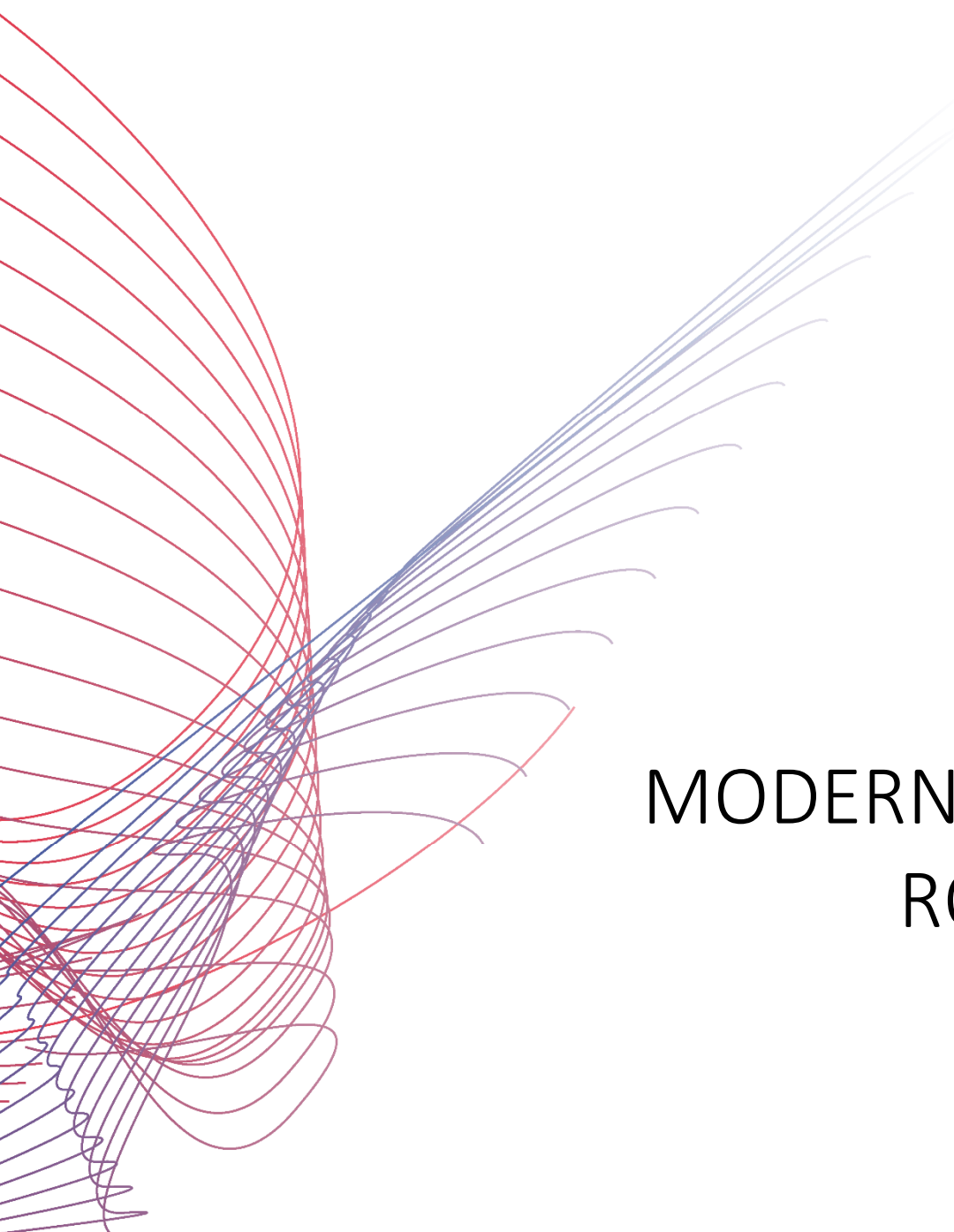




TECH pedia



MODERNÉ DÁTOVÉ ROZHRANIA

IVAN PRAVDA

Názov: Moderné dátové rozhrania
Autor: Ivan Pravda
Preložil: Renata Rybárová
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktná adresa: Technická 2, Praha 6, Česká republika
Tel.: +420 224352084
Tlač: (iba elektronická)
Počet strán: 36
Edícia (vydanie): 1. vydanie, 2017
ISBN 978-80-01-06270-8

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

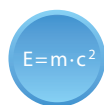
<http://www.techpedia.eu>



Tento projekt bol financovaný s podporou Európskej Komisie.

Táto publikácia (dokument) reprezentuje výlučne názor autora a Komisia nezodpovedá za akékoľvek použitie informácií obsiahnutých v tejto publikácii (dokumente).

VYSVETLIVKY



Definícia



Zaujímavosť



Poznámka



Príklad



Zhrnutie



Výhody



Nevýhody

ANOTÁCIA

Nová verzia rozhrania USB 3.0, ktorého štandardy boli vydané v novembri 2008, priniesla oproti predchádzajúcej verzii (2.0) množstvo vylepšení. Hlavnými prednosťami nového rozhrania sú vysoká rýchlosť, až 5 Gbit/s, rozšírené možnosti riadenia spotreby zbernice a spätná kompatibilita s predchádzajúcimi verziami. Veľmi perspektívnymi a konkurencie schopnými rozhraniami sa v súčasnosti javia technológie Thunderbolt, kombinujúce vlastnosti rozhraní PCI-Express a Display Port. Zaujímavé je porovnanie práve s rozhraním USB 3.0.

CIELE

Študent sa zoznámí so základnými princípmi a vlastnosťami perspektívnych rozhraní USB 3.0 a Thunderbolt. Získa znalosť o spôsobe fungovania rozhrania prostredníctvom popisu jednotlivých vrstiev ich modelov. Hlavný dôraz je kladený na protokolovú vrstvu. Modul tiež popisuje rozdiely oproti predchádzajúcim verziám rozhrania a spätnú kompatibilitu s nimi.

LITERATÚRA

- [1] HP, Intel, Microsoft, NEC, ST-Ericsson, Texas Instruments. *Universal Serial Bus 3.0 Specification* [online]. 2011, 2011-01-05 [cit. 2012-01-06]. Dostupné z: <http://www.usb.org/>. 531 stran.
- [2] INTEL CORPORATION. Thunderbolt Technology [online]. Intel corp., 2011. [2013-01-16]. Dostupné z: http://download.intel.com/newsroom/kits/research/2011/pdfs/IntelThunderbolt_Overview.pdf
- [3] Martínek, T.: Architektura sběrnic PCI, PCI-X a PCI Express. [online]. [2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.europen.cz/Proceedings/35/pci.pdf>
- [4] Thunderbolt Technology Community [online]. Intel corp. (2013) [2013-01-27] Dostupné z: <https://thunderbolttechnology.net/>

Obsah

1	Prehľad perspektívnych vysokorýchlostných dátových rozhraní	6
2	Rozhranie USB 3.0 SuperSpeed	8
2.1	Úvod do problematiky.....	8
2.2	Základné vlastnosti rozhrania USB 3.0.....	10
2.3	Architektúra rozhrania USB 3.0.....	11
2.4	Modely dátových prenosov.....	14
2.5	Zhlukový prenos dát (Bursting).....	15
2.6	Pakety rozhrania USB SuperSpeed.....	17
2.7	Typy dátových prenosov.....	18
2.8	Konektory rozhrania USB 3.0.....	20
2.9	Kabeláž rozhrania USB 3.0.....	22
2.10	Možnosti napájania.....	24
2.11	Inventarizácia zbernice.....	26
2.12	Koncové zariadenia USB 3.0.....	27
2.13	Rozbočovač rozhrania USB 3.0.....	28
2.14	Možnosti využitia rozhrania USB 3.0.....	29
3	Rozhranie Thunderbolt	30
3.1	Charakteristiky rozhrania.....	30
3.2	Architektúra rozhrania.....	32
3.3	Prenos dát.....	35

1 Prehľad perspektívnych vysokorýchlostných dátových rozhraní

Dátové rozhrania sa dajú podľa fyzických médií, ktoré prenášajú dáta medzi hosťiteľom a pripojeným zariadením rozdeliť do niekoľkých kategórií. Najpoužívanejšími kategóriami sú:

- metalické rozhrania,
- optické rozhrania,
- bezdrôtové rozhrania.

Každé z vyššie uvedených typov rozhraní má svoje klady a zápory, ktoré určujú prevládajúci spôsob ich využitia. Všeobecne sa dá povedať, že hlavnými parametrami pri výbere typu rozhrania sú **cena** (výhoda metalických rozhraní), **rýchlosť** (výhoda optických rozhraní) a **mobilita** (výhoda bezdrôtových rozhraní).

Rozhranie USB patrí medzi metalické rozhrania a je jedným z najrozšírenejších hlavne vďaka svojej nízkej cene a vysokej rýchlosti. Jeho hlavný konkurent, rozhranie Firewire, nikdy nedosiahlo také rozšírenie predovšetkým kvôli vyššej cene pri porovnateľnej rýchlosti.

V dnešnej dobe sa ako najväznejšia konkurencia pre rozhranie USB 3.0 javí rozhranie Thunderbolt, v aktuálnej verzii metalické, ponúkajúce vyššie prenosové rýchlosti pri menšej rézii a širšie možnosti vývoja do budúcnosti (počíta sa už aj s optickou verziou). Rozhranie Thunderbolt je v podstate externým variantom zbernice PCI Express a v súčasnosti je využívané v niekoľkých produktoch firmy Apple (napr. na pripojenie monitorov).

Výhody rozhrania Bluetooth sú predovšetkým v mobilite pripojených účastníkov a v rýchlosti jeho implementácie. Nakoľko sa jedná o bezdrôtové rozhranie, sú často zmieňované práve tieto dva benefity v porovnaní s klasickými „pevnými“ rozhraniami.

Porovnanie parametrov vybraných typov súčasných rozhraní

Rozhranie	Prenosová rýchlosť	Dosah	Typ rozhrania
USB 3.0	Až 5 Gbit/s	cca 3 m	Metalické
USB 2.0	Až 480 Mbit/s	5 m	Metalické
Firewire 800	Až 3,2 Gbit/s	10 m	Metalické
Thunderbolt	Až 10 Gbit/s	3 m	Metalické/Optické
Bluetooth 2.0	Až 3 Mbit/s	Základné 10 m	Bezdrôtové
HDMI 1.4	Až 10,2 Gbit/s video	cca 10m	Metalické
Wi-Fi (802.11n)	Až 600 Mbit/s	Stovky m	Bezdrôtové
PCI Express 3.0	Až 256 Gbit/s pre 16xlink	-	Metalické
eSATA	Až 3 Gbit/s	2 m	Metalické

2 Rozhranie USB 3.0 SuperSpeed

2.1 Úvod do problematiky



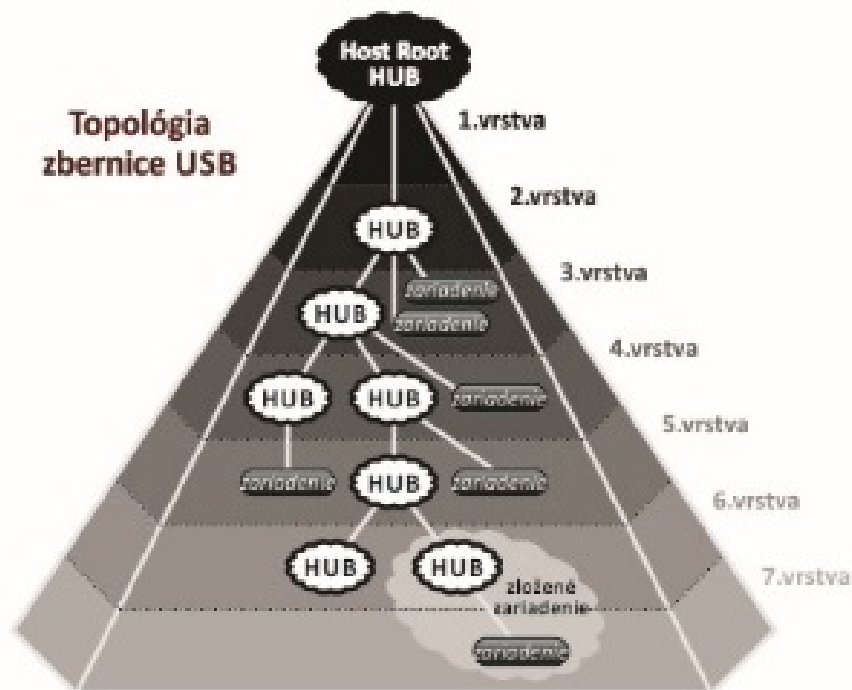
$E=mc^2$

Rozhranie **USB** (*Universal Serial Bus*) je sériové rozhranie typu zbernica. Medzi jeho kľúčové prednosti patrí predovšetkým:

- nízka cena,
 - relatívne vysoká prenosová rýchlosť (závislá na konkrétnej špecifikácii),
 - plná podpora prenosu audio a video dát prenášaných v reálnom čase,
 - dynamická rozširiteľnosť (podpora Plug&Play, t. j. bez reštartu zariadenia a inštalácie ovládačov)
 - prenos napájania cez zbernicu (jednosmerné napájanie 5 V, odber až 100 mA (max. 500 mA)).
-



Všetky zariadenia pripojené cez rozhranie USB medzi sebou zdieľajú celú šírku prenosového pásma. Samotná zbernica USB je tak riadená jedným centrálnym zariadením (*Host Root HUB*), ktoré koordinuje vysielanie a príjem dát, resp. súčinnosť ostatných USB zariadení. V ceste medzi riadiacim (centrálnym) zariadením USB a akýmkoľvek iným USB zariadením môže byť maximálne päť rozbočovačov (HUB). Maximálna dĺžka kábla medzi dvoma USB zariadeniami je obmedzená na 5 metrov.



Topológia klasickej zbernice USB



Jednotlivé USB zariadenia na zbernici jednoznačne identifikuje tzv. USB adresa, ktorá je pridelená ihneď po pripojení zariadenia k danému rozhraniu. Na zbernicu je možné pripojiť až 127 zariadení.

Rýchlostné režimy prenosu dát



- extrarýchlostný režim prenosu dát (*Super Speed*) – rýchlosť až 4,8 Gbit/s, špecifikácia USB 3.0
- vysokorýchlostný režim prenosu dát (*High Speed*) – rýchlosť až 480 Mbit/s, špecifikácia USB 2.0
- plnerýchlostný režim prenosu dát (*Full Speed*) – rýchlosť až 12 Mbit/s, špecifikácia USB 1.1
- nízkorýchlostný režim prenosu dát (*Low Speed*) – rýchlosť až 1,5 Mbit/s, špecifikácia USB 1.1

Jednotlivé typy USB zariadení

- rozbočovač USB (*USB HUB*) – slúži k rozšíreniu (predĺženiu) zbernice USB
- koncové zariadenie USB – zariadenie využívajúce vlastnú funkcionality rozhrania USB pre prenos dát, resp. výmenu informácií.

2.2 Základné vlastnosti rozhrania USB 3.0

Nová verzia rozhrania USB 3.0, nazvaná *SuperSpeed*, bola vytvorená v novembri 2008. Jej zavedenie do praxe trvalo takmer tri roky. Rozhranie USB 3.0 je nasledovník rozhrania USB verzie 2.0 a má mnoho spoločných vlastností s predchádzajúcimi verziami rozhrania USB, pretože jednou z hlavných požiadaviek pri jeho vývoji bola spätná kompatibilita. Výhody, ktoré ponúka nová verzia **USB** oproti predchádzajúcim verziám:



- vyššia prenosová rýchlosť – až 5 Gbit/s,
- plne spätná kompatibilita (s výnimkou niektorých konektorov),
- rozšírené možnosti riadenia spotreby,
- až 80% nárast možného odberu energie zo zbernice,
- pakety sú po zbernici smerované (t. j. jedná sa o selektívne smerovanie dát ku konkrétnemu zariadeniu podľa jeho adresy).

Samozrejme, nová verzia rozhrania USB nemá len výhody, avšak tie prevládajú nad nedostatkami. Medzi hlavné nevýhody patrí:



- zvýšenie počtu vodičov kábla,
- vyššia náchylnosť voči elektromagnetickému rušeniu **EMI** (*Electromagnetic Interference*), ktorá súvisí s využívaním viacerých vodičov v kábli a vyššou modulačnou rýchlosťou,
- niektoré typy konektorov obmedzujú spätnú kompatibilitu.

Ak hovoríme o novej verzii zbernice USB, je nutné poznamenať, že sa v podstate jedná o vedľa seba stojace zbernice **USB 2.0** a novú zbernicu USB Superspeed. Tento fenomén je podrobnejšie popísaný ďalej.



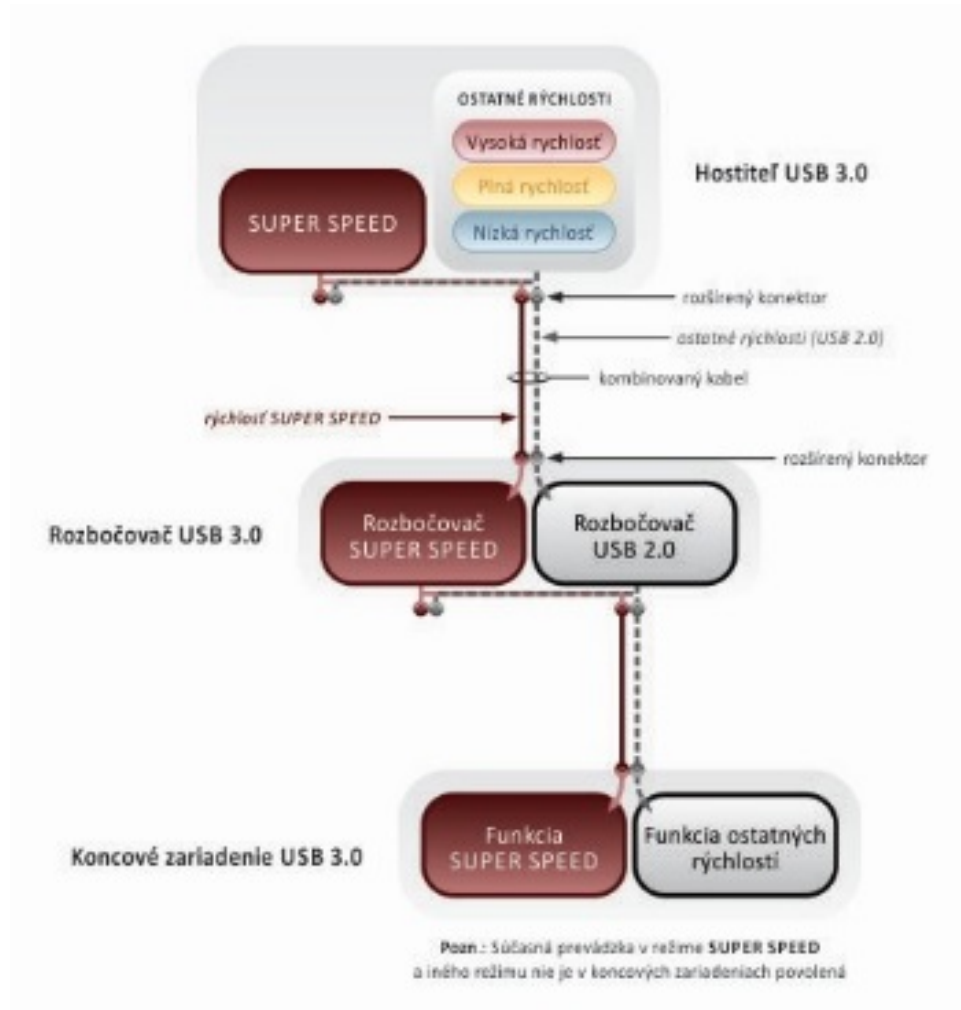
Rozhranie USB vo verzii 3.0 výrazne rozširuje možnosti a uplatnenie predchádzajúcich verzií rozhrania USB.



Od júla roku 2013 je pripravovaná inovovaná verzia rozhrania USB vo verzii 3.1 (USB 3.1 Gen 2). Táto verzia býva označovaná ako *SuperSpeed+*. Výhodou novej generácie rozhrania USB má byť jeho rýchlosť (až 10 Gbit/s) a zníženie réžie pri kódovaní signálu. Rozhranie má byť spätne kompatibilné s rozhraním USB 3.0, t. j. dajú sa využiť zariadenia a rozbočovače pre USB 3.0 a USB 2.0.

2.3 Architektúra rozhrania USB 3.0

Obdobne ako pri rozhraní USB 2.0 sú základnými prvkami architektúry hostiteľ, rozbočovač a koncové zariadenie. Hlavný rozdiel medzi verziou USB 2.0 a verziou USB 3.0 je paralelné zapojenie dvoch fyzických zberníc, konkrétne USB 2.0 a novej USB SuperSpeed.



Architektúra rozhrania USB 3.0 SuperSpeed



Voľbou tejto architektúry je splnenie požiadavky na spätnú kompatibilitu, pretože hostiteľ a rozbočovač umožňujú súčasnú prevádzku oboch fyzických zberníc prostredníctvom kombinovaných káblov a konektorov. Koncové zariadenie potom podľa svojich možností využíva buď časť zbernice USB 2.0 alebo USB Superspeed.



Podobne je zachovaná fyzická topológia zbernice, resp. stromová štruktúra, kde sa v koreni nachádza hostiteľ, ku ktorému môže byť pripojený väčší počet koncových zariadení či rozbočovačov.

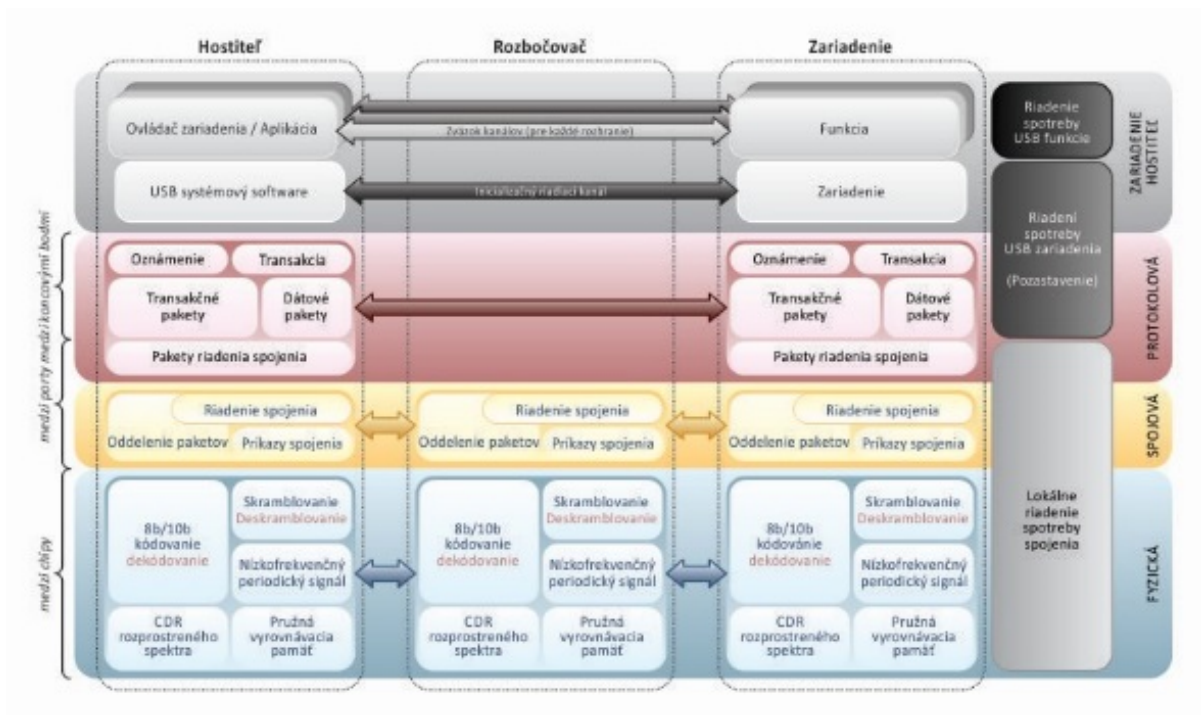


Rozbočovače tak môžu ďalej poskytovať pripojenie ďalším koncovým zariadeniam alebo ďalším rozbočovačom.

Porovnanie USB SuperSpeed a USB 2.0

Vlastnosť	USB SuperSpeed	USB 2.0
Dátové kanály	Dva simplexné – súčasné obojsmerné toky dát, dva vodiče na smer (celkom 4)	Poloduplexné – jednosmerné toky s vyjednávanou zmenou smeru, dva vodiče
Rýchlosť	SuperSpeed – 5 Gbit/s	Podľa režimu 1,5 – 480 Mbit/s
Protokol prenosu	Asynchrónny tok dát riadený hosťiteľom, smerované pakety	Hosťiteľ prideluje dátový tok (polling), pakety vysielané všetkými smermi
Riadenie spotreby	Na úrovni spojení, zariadení a funkcií, niekoľko stavov	Na úrovni spojení a zariadení, iba stav pozastavenia
Napájanie zbernice	Podobne ako u USB 2.0, vyššie limity (o 50 % pre nekonfigurované a 80 % pre konfigurované zariadenia)	Nízko a vysoko výkonové zariadenia, nižší limit pre nekonfigurované zariadenia

Každé pripojenie medzi hosťiteľom a zariadením (prípadne rozbočovačmi) sa dá znázorniť pomocou tzv. komunikačných vrstiev. Na nasledujúcom obrázku je diagram, ktorý popisuje jednotlivé vrstvy prepojení (viď riadky), ich prvky v jednotlivých častiach topológie (viď tri ľavé stĺpce) a vplyv riadenia spotreby (viď pravý stĺpec).



Komunikačné vrstvy zbernice SuperSpeed



Rozhranie USB 3.0 je duálna zbernica (*Dual Bus Architecture*), ktorá je paralelnym spojením USB 2.0 a novej zbernice USB SuperSpeed. Vďaka tejto koncepcii je možné používať koncové zariadenia USB 2.0 na radičoch USB 3.0. Na jednom koncovom zariadení však nie je možné používať obidve zbernice súčasne.

2.4 Modely dátových prenosov



Rozhranie USB SuperSpeed preberá modely dátových prenosov od rozhrania USB 2.0. Výmena dát medzi koncovým zariadením a hosťiteľom prebieha prostredníctvom tzv. kanálov (*pipes*). Dátové prenosy sú tak realizované medzi koncovým bodom zariadenia pridruženým k funkciám a softwarom hosťiteľa.

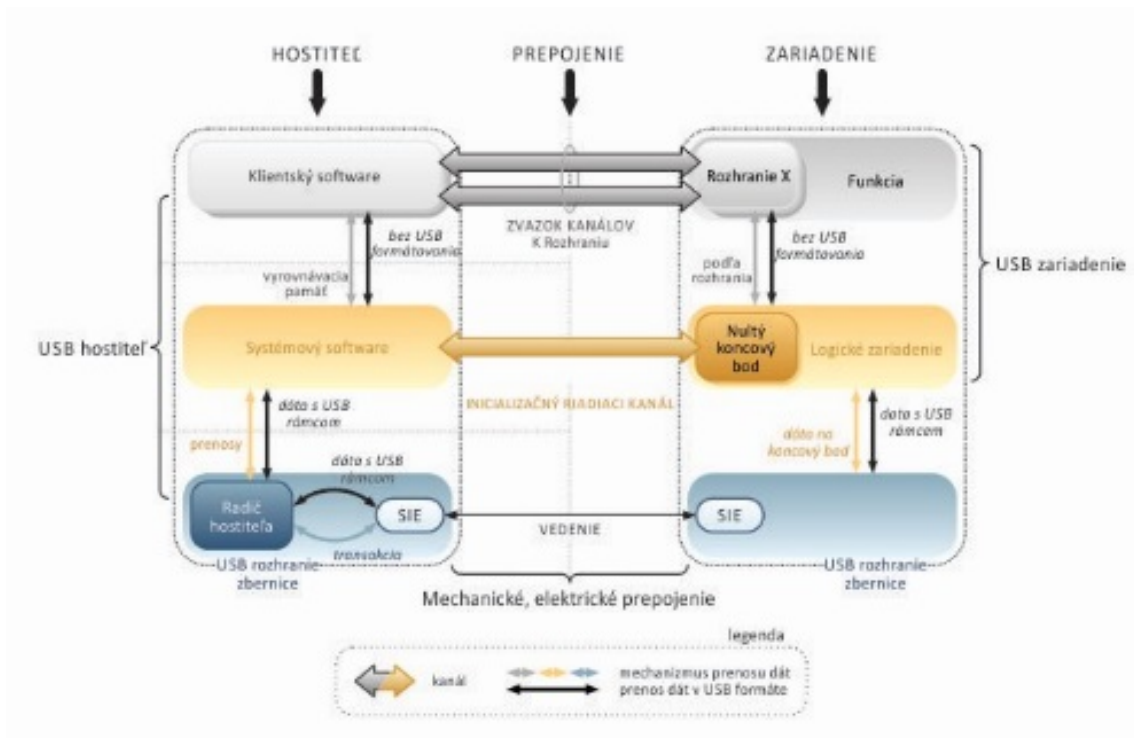


Samozrejme hovoríme o logickom prepojení, fyzické spojenie tvorí vždy iba jediný kábel.

Okrem východzieho riadiaceho kanála a koncového bodu sú všetky kanály a koncové body vytvárané pri konfigurácii zariadení a podporujú jeden zo štyroch typov prenosu – objemový prenos, riadiaci prenos, synchronný prenos a prenos s prerušením.



Rovnako ako pri rozhraní USB 2.0 existujú dva druhy kanálov – prúdové kanály (nemajú štruktúru danú rozhraním **USB**) a kanály správ (ich formát je definovaný rozhraním **USB**).



Model dátových prenosov na USB



Na záver môžeme teda konštatovať, že komunikácia na zbernici **USB** prebieha medzi hosťiteľským softwarom a koncovým bodom zariadení cez tzv. virtuálne kanály.

2.5 Zhlukový prenos dát (Bursting)



Zhlukový prenos dát je nová funkcia USB SuperSpeed, zvyšujúca efektivitu prenosu odstránením času, počas ktorého sa čaká na potvrdenie každého dátového paketu. Každý koncový bod zariadenia SuperSpeed uvádza vo svojom popisovači maximálny počet paketov, ktoré môže prijať alebo odoslať bez toho, aby čakal na ich potvrdenie (stav).



Hostiteľ môže dynamicky meniť počet paketov v zhluke pre každú transakciu podľa svojich potrieb (nemôže však presiahnuť maximálnu veľkosť zhuku pre daný koncový bod). V prípade OUT transakcií tak hostiteľ obmedzuje veľkosť zhuku jednoducho, pri IN transakciách ju nastavuje pomocou počtu v potvrdzovacích paketoch **ACK** (*ACKnowledge*).



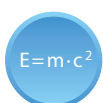
Zhlukový prenos dát je teda funkcia zbernice SuperSpeed umožňujúca odoslať viac dátových paketov naraz bez toho, aby sa čakalo na potvrdenie ich doručenia.

1. IN PRENOSY

Pri IN prenosoch koncové zariadenie posieľa dáta hostiteľovi. Tieto prenosy zahajuje hostiteľ zaslaním potvrdzujúceho IN paketu koncovému zariadeniu, ktoré je pomocou obsiahnutých informácií smerované ku koncovému zariadeniu. Súčasťou je tiež informácia o očakávanom sekvenčnom čísle paketu a počte očakávaných paketov. Ako odpoveď hostiteľovi posieľa koncové zariadenie dátové pakety s odpovedajúcimi sekvenčnými číslami.



Pretože hostiteľ musí potvrdiť potvrdzovacím **ACK** paketom každý prijatý dátový paket, koncové zariadenie môže odoslať všetky vyžiadané dátové pakety bez čakania na ich potvrdenie.



SuperSpeed IN prenos sa skladá z jednej alebo viacerých IN transakcií obsahujúcich jeden alebo viac paketov. Je ukončený, pokiaľ boli všetky dáta prenosu úspešne prijaté, koncový bod odošle paket, ktorého veľkosť je menšia než maximálna pre daný koncový bod alebo koncový bod odpovie chybou.

2. OUT PRENOSY

Pri OUT prenosoch hostiteľ posieľa dáta ku koncovému zariadeniu. Hostiteľ zahajuje OUT prenos odosielaním súvislého sledu dátových paketov koncovému zariadeniu. Každý dátový paket obsahuje informácie potrebné k smerovaniu paketu a sekvenčné číslo daného paketu. Koncové zariadenie odpovedá potvrdzovacím **ACK** paketom, ktorý obsahuje sekvenčné číslo ďalšieho očakávaného paketu. Paket zároveň potvrdzuje úspešné prijatie predchádzajúceho paketu.

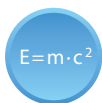


Podobne ako u IN prenosu musí koncové zariadenie posielat' potvrdzovací **ACK** paket za každý prijatý dátový paket, ale hositeľ na tieto potvrdzovacie **ACK** pakety nemusí čakať.



SuperSpeed OUT prenos sa skladá z jednej alebo viacerých OUT transakcií obsahujúcich jeden alebo viac paketov. Je ukončený, pokiaľ boli všetky dáta prenosu úspešne odoslané, hositeľ odošle paket, ktorého veľkosť je menšia ako maximálna pre daný koncový bod alebo koncový bod odpovie chybou.

2.6 Pakety rozhrania USB SuperSpeed



Všetky pakety rozhrania USB SuperSpeed začínajú 16-bitovým záhlavím, ktoré môže tvoriť celý paket. Záhlavie paketu začína informáciou o type paketu, ktorá je použitá k zisteniu spôsobu narábania s paketom. Záhlavie paketu je chránené 16-bitovým kódom **CRC** (*Cyclic Redundancy Check*) a končí dvojbajtovým riadiacim slovom. Väčšina typov paketov tiež obsahuje smerovacie informácie použité pri smerovaní paketu od hostiteľa.



Na rozhraní USB SuperSpeed existujú štyri druhy paketov:

- paket správy spojenia **LMP** (*Link Management Packet*) je posielaný iba medzi dvoma priamo spojenými portami a je určený k riadeniu tohoto spojenia,
 - transakčný paket **TP** (**Transaction Packet**) prechádza všetkými spojeniami na priamej ceste medzi zariadením a hostiteľom, je používaný k riadeniu toku dátových paketov, konfigurácii zariadení a rozbočovačov, je tvorený iba záhlavím,
 - dátový paket **DP** (*Data Packet*) taktiež prechádza všetkými spojeniami na priamej ceste medzi zariadením a hostiteľom, má dve časti – záhlavie dátového paketu (podobné transakčnému paketu) a používateľské dáta dátového paketu (obsahujú dátový blok a 32-bitový kód **CRC**),
 - izochrónny časovací paket **ITP** (*Isochronous Timestamp Packet*) je paket posielaný metódou multicast na všetky spojenia v aktívnom stave.
-



Rozhranie USB SuperSpeed využíva štyri druhy paketov – paket správy spojenia **LMP**, transakčný paket **TP**, dátový paket **DP** a izochrónny časovací paket **ITP**.

2.7 Typy dátových prenosov

$E=m \cdot c^2$

Dátové prenosy sú zložené z jednej alebo viac transakcií, ktoré sú realizované pomocou paketov. Jednotlivé typy dátových prenosov potom odpovedajú použitým typom paketov.

1. RIADIACI PRENOS

Účel a funkcia riadiaceho prenosu je prakticky totožná s rozhraním USB 2.0. Umožňuje komunikáciu medzi softwarom hostiteľa a koncovým zariadením na účely konfigurácie, ovládania a zisťovania stavu.

Riadiaci prenos využíva kanály správ. Každé zariadenie musí podporovať počítačový riadiaci kanál. Riadiace prenosy majú najväčšiu prioritu na zbernici. Podobne ako pri rozhraní USB 2.0 nemožno požadovať konkrétnu šírku pásma. Maximálna dĺžka užitočných dát je 512 bitov a nemožno využiť zhlukovanie.

2. OBJEMOVÝ PRENOS

Rovnako ako u riadiaceho prenosu funguje objemový prenos podobne ako na rozhraní USB 2.0. Je určený pre koncové zariadenia, ktoré potrebujú presúvať relatívne veľké objemy dát. Využíva akúkoľvek dostupnú šírku pásma (nízka priorita), napríklad pre kopírovanie dát na externý disk.

Objemový prenos garantuje doručenie dát, avšak nezaručuje šírku pásma a oneskorenie. Využíva prúdové kanály, takže nie sú kladené žiadne požiadavky na štruktúru dát. Prúdové kanály sú jednosmerné. Pre obojsmerný tok dát sú potrebné dva (IN a OUT). Objemový prenos môže byť rozdelený na viac transakcií.

3. OBJEMOVÝ PRENOS S PRÚDMI (STREAMS)

Ide o celkom nový typ prenosu na rozhraní USB SuperSpeed. Štandardný kanál pre objemový prenos predstavuje schopnosť presunu jedného prúdu dát typu **FIFO** (*First In First Out*) medzi hostiteľom a koncovým zariadením cez pamäťový zásobník hostiteľa. SuperSpeed prúdy (*SuperSpeed Streams*) poskytujú podporu pre viacprúdový model na úrovni protokolu. Prúdy medzi hostiteľom a koncovým zariadením spravuje tzv. prúdový protokol. Každému prúdu je pridelené ID prúdu **SID** (*Stream ID*).

$E=m \cdot c^2$

Prúdový protokol definuje stavové správy, ktoré umožnia hostiteľovi alebo koncovému zariadeniu ustanoviť aktuálne ID prúdu **CSID** (*Current Stream ID*) koncového bodu. Hostiteľ používa **CSID** k výberu vyrovnávacej pamäte koncového bodu, ktorý bude použitý pri následných prenosoch kanálom. Koncové zariadenie používa **CSID** k výberu dátovej vyrovnávacej pamäte pre funkciu.

i

SuperSpeed prúdy umožňujú, aby koncové zariadenie využilo viac vyrovnávacích pamätí hostiteľa (štandardne je iba jedna). V prípade zlyhania štandardného objemového kanála, ktorý SuperSpeed prúdy využíva, dôjde k prerušeniu prúdov. SuperSpeed prúdy rozširujú možnosti objemových prenosov s minimálnymi

zmenami hardwaru. Využitie môže byť napríklad pre zariadenie USB Mass Storage.

4. PRENOS S PRERUŠENÍM

Podobne ako na rozhraní USB 2.0 je prenos s prerušením určený pre koncové zariadenia, ktoré vyžadujú vysokú spoľahlivosť prenosu malého množstva dát v obmedzenom obslužnom intervale, napríklad myš alebo klávesnica. Hostiteľ v pravidelných intervaloch požaduje dáta a koncové zariadenie ich podľa svojich možností poskytuje.

Prenos s prerušením zaručuje maximálny obslužný interval (oneskorenie dát). Používa prúdové kanály, takže dáta nemusia mať definovaný formát a kanál je jednosmerný. Prenosom s prerušením môže byť pridelených až 90 % dostupnej šírky pásma. Koncový bod môže vo svojom popisovači požadovať obslužný interval v násobkoch 125 μ s. Umožňuje zaslanie troch paketov na obslužný interval.

5. SYNCHRÓNNY PRENOS

Synchrónny prenos a jeho účel sa oproti rozhraniu USB 2.0 nemenia. Slúžia k streamovaniu dát, t. j. pre periodické prenosy s obmedzeným obslužným intervalom a toleranciou chýb, umožňujúce sústavný tok dát. Rozhranie USB SuperSpeed využíva k synchronizácii izochrónne časovacie pakety **ITP**.

Synchrónny prenos zaručuje šírku pásma pre prenosy s obmedzeným oneskorením a je tiež zaručená požadovaná šírka pásma udaná v popisovači. Synchrónne kanály sú prúdové s jednosmerným tokom dát. Kvôli možnému oneskorenému prenosu spôsobenému riadením spotreby hostiteľ pred zahájením prenosu posiela transakčný paket zariadeniu (*PING*), čím dôjde k uvedeniu všetkých spojení na cestu do aktívneho stavu. Maximálna šírka pásma a obslužné intervaly sú zhodné s prenosom s prerušením. Synchrónny prenos umožňuje až tri zhukové prenosy po 16 paketov na obslužný interval.



Rovnako ako na rozhraní USB 2.0 existujú štyri základné druhy prenosov – riadiaci prenos, objemový prenos, prenos s prerušením a synchrónny prenos. Rozhranie USB SuperSpeed navyše ponúka rozšírenie objemového prenosu o tzv. SuperSpeed prúdy.

2.8 Konektory rozhrania USB 3.0

Konektory rozhrania USB 3.0 boli vyvinuté na základe požiadaviek na vyššiu rýchlosť, obmedzenie vplyvu elektromagnetického rušenia, podporu mobility a nízke ceny. To všetko pri zachovaní maximálnej kompatibility s rozhraním USB 2.0. Špecifikácia rozhrania USB 3.0 definuje rovnaké typy konektorov ako rozhranie USB 2.0 až na jeden nový - napájaný konektor typu B.

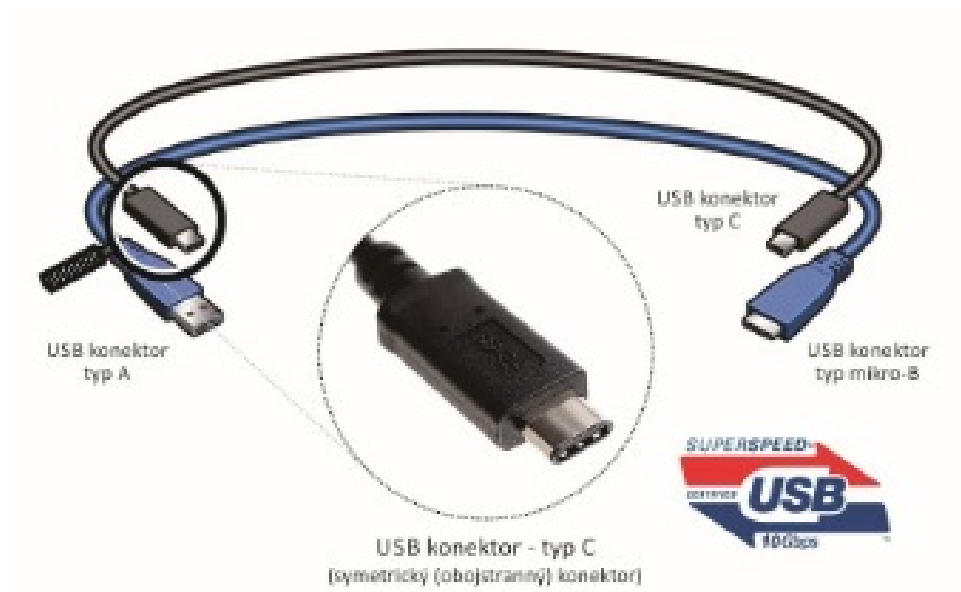
1. štandardný konektor typu A – asi najpoužívanejší konektor, konektor hostiteľa. Tvar a rozmery sú zhodné s odpovedajúcim konektorom USB 2.0, ale s pridanými kontaktami pre ďalšie dva dátové páry a uzemnenie. Poskytuje úplne spätnú kompatibilitu. Pre rozlíšenie by sa malo používať odpovedajúce zafarbenie ako je zrejme z nasledujúceho obrázku.
2. štandardný a napájaný konektor typu B – určený pre pripojenie väčších stacionárnych zariadení. Neposkytuje úplne spätnú kompatibilitu. Konektor je kvôli pridaným kontaktom väčší, je možné teda zapojiť USB 2.0 vidlicu do zástrčky USB 3.0, ale naopak to možné nie je. Napájaný konektor sa líši iba ďalšími dvoma pridanými kontaktami, umožňujúcimi zariadeniu poskytnúť napájanie.



Štandardná vidlica typu A a B

3. mikrokonektory typu A a B – určené pre relatívne malé a ľahké zariadenia, čomu odpovedá aj ich veľkosť a teda rovnako ako konektory typu B neposkytujú úplne spätnú kompatibilitu. Existujú zástrčky typu B a typu AB, do zástrčky typu AB je možné zapojiť vidlice typu A i B, do zástrčky typu B iba vidlicu typu A.

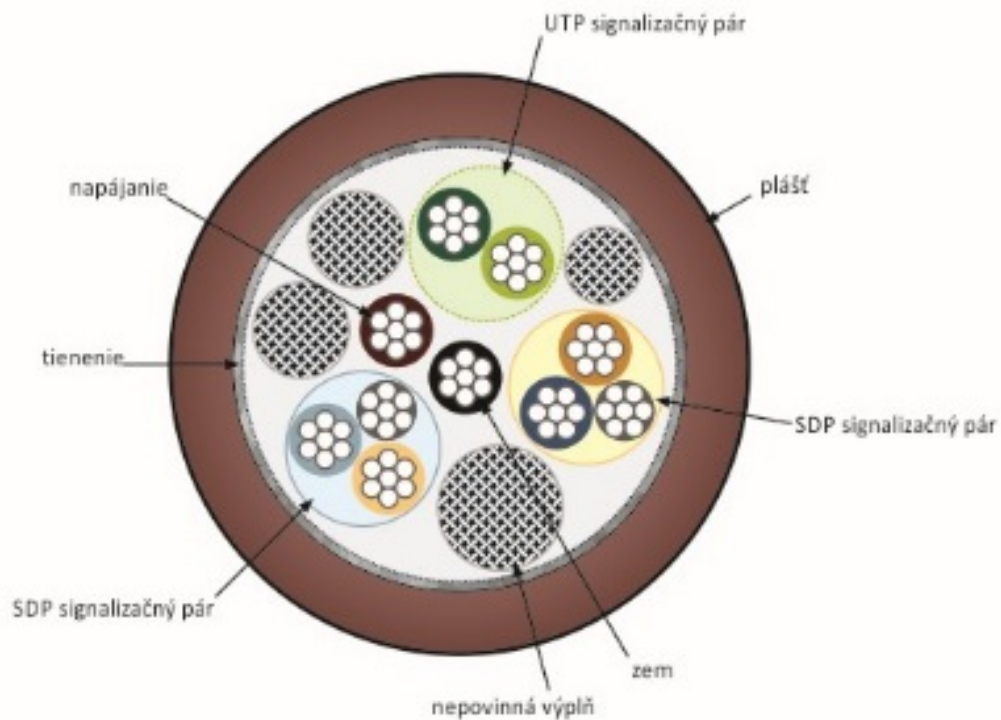
4. konektor typu C – jedná sa o nový univerzálny konektor pre rozhranie USB, ktorý je mechanicky symetrický (t. j. nie je nutné rozlišovať smer prepojenia). Vo vnútri kábla je usporiadaných 24 vodičov určených pre: napájanie, dáta USB 2.0, 2× dáta USB 3.0, konfiguračne pólly a pólly pre ďalšie účely. Voliteľnou možnosťou je tzv. aktívny kábel (obsahuje čip). Napájanie je klasické 5 V s prúdom až 3 A (maximálne 20 V s prúdom 5 A). Rozmery konektorov sú 8,4×2,6 mm. Nový konektor implicitne podporuje aj alternatívne prenosové protokoly.



Symetrický USB konektor typu C

2.9 Kabeláž rozhrania USB 3.0

Nasledujúci obrázok znázorňuje prierez káblom špecifikácie USB 3.0. Je zrejmé, že sú tri skupiny vodičov – signalizačný pár **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*), krížené páry (tienené diferenciálne páry **SDP** (*Shielded Differential Pairs*)), napájacie a uzemňovacie vodiče.



Prierez káblom špecifikácie USB 3.0



UTP je určený pre prenos signálov USB 2.0, **SDP** sú pre špecifikáciu USB SuperSpeed. Ako je zrejme z názvu, **SDP** majú vlastné tiernenie kvôli integrite signálu a obmedzeniu rušení **EMI**. Navyše je ku každému tienenému páru pridaný ďalší vodič, označovaný ako *DRAIN*, ktorý je pripojený na uzemnený pin v konektore (odlišný od uzemňovacieho napájania, označovaný je *GND_DRAIN*).



Schéma káblu špecifikácie USB 3.0



Tienenie uzatvárajúce všetky vodiče je realizované metalickým oplotením pripojeným ku kovovej časti vidlice a slúži k zachyteniu **EMI** rušení. Farby v obrázkoch odpovedajú farbám izolácií vodičov.



Dĺžka káblov nie je špecifikáciu obmedzená, avšak je limitovaná stratami na zostavenie a poklesom napätia na dĺžke vodiča. Tieto straty na jeden kábel nesmú prekročiť hranicu 20 dB. To odpovedá doporučenej dĺžke kábla maximálne 3 m.

2.10 Možnosti napájania

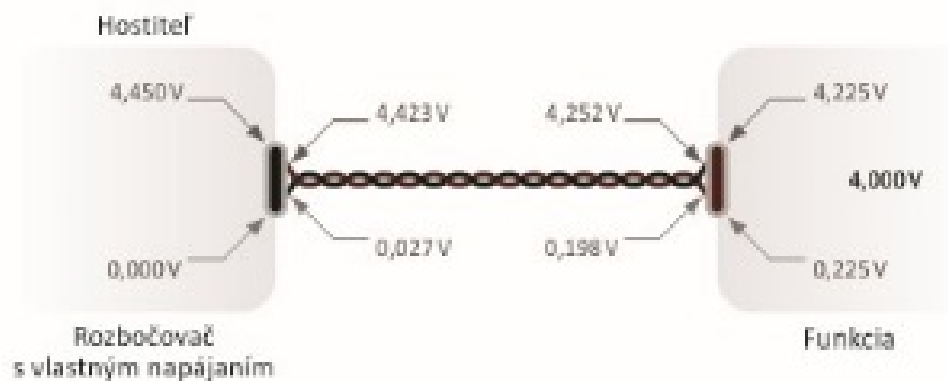
Rozhranie USB 3.0 poskytuje napájanie prostredníctvom dvoch konektorov - štandardného konektoru „typ A“ a napájaného konektoru „typ B“. Napájanie cez štandardný konektor typu A má podobné vlastnosti ako u rozhrania USB 2.0. Opäť je pre zjednodušenie definované jednotkové zaťaženie, v prípade rozhrania USB SuperSpeed je však prúd jednotky zvýšený na 150 mA. Rozhranie USB obsahuje niekoľko typov zdrojov a spotrebičov:

- koreňový rozbočovač – je pripojený priamo na radič USB hostiteľa, porty hostiteľa pripojené ku zdroju napätia musia dodávať aspoň 6 jednotiek záťaže, resp. porty hostiteľa, ktorého zdrojom je batéria môžu dovoliť zaťaženie len 1 jednotky
- rozbočovač s vlastným napájaním – neodoberá energiu potrebnú na prevádzku a zostupné porty z vodiča V_{BUS} , napriek tomu môže odoberať až 1 jednotku záťaže na funkciu vzostupného portu. V prípade vypnutia zbytku rozbočovača, každý vzostupný port potom poskytuje až 6 jednotiek záťaže
- nízko výkonové zariadenie – získava všetku potrebnú energiu z vodiča V_{BUS} , neodoberá viac ako 1 jednotku záťaže
- vysoko výkonové zariadenie – získava energiu z vodiča V_{BUS} , po zapnutí môže odoberať 1 jednotku záťaže, po nakonfigurovaní až 6 jednotiek
- zariadenie s vlastným napájaním – môže odoberať maximálne 1 jednotku zaťaženia z vodiča V_{BUS} pre zaistenie fungovania portu a to aj v prípade vypnutia zbytku zariadenia



Žiadne zariadenie nesmie dodávať prúd na vodič V_{BUS} vzostupného portu. Obdobne ako u rozhrania USB 2.0 musí byť u hostiteľa a rozbočovačov s vlastným napájaním zaistená ochrana proti prúdovému preťaženiu. Obnovenie normálneho fungovania je možné bez zásahu používateľa.

Najväčšie povolené úbytky napätia v rámci topológie zbernice sú uvedené na nasledujúcom obrázku.



Topológia zbernice pri najväčšom dovolenom úbytku napätia

Napájaný konektor typu B bol zavedený, aby sa umožnilo ďalším zariadeniam, ako sú napr. tlačiarne, pripojenie a napájanie iných zariadení (napr. adaptérov bezdrôtového USB). Táto možnosť tak eliminuje potrebu externého napájania pre adaptér. Napájaná zástrčka typu B musí byť schopná poskytovať napätie 5 V v celom rozsahu prúdu až do 1 A, poskytovať ochranu proti prúdovému preťaženiu, dodávať maximálnu energiu bez ohľadu na stav koncového zariadenia. Koncové zariadenie poskytujúce napájanie prostredníctvom tohoto konektora musí byť nízko výkonové a koncové zariadenie, ktoré je týmto konektorom napájané, nemôže poskytovať žiadne štandardné zástrčky typu A.

2.11 Inventarizácia zbernice

Pri pripojení alebo odpojení koncového zariadenia so zbernicou USB používa hostiteľ proces nazvaný inventarizácia zbernice k identifikácii a správe stavu koncového zariadenia. Tento proces sa skladá z niekoľkých nasledujúcich krokov:



1. Rozbočovač, ku ktorému je zariadenie pripojené, informuje hostiteľa o tejto udalosti špeciálnym kanálom (koncové zariadenie je v tejto chvíli po povelu *RESET* v inicializačnom stave, t. j. nemôže odoberať viac než 150 mA z V_{BUS} a odpovedá na počiatočnej adrese).
2. Hostiteľ následne určí presnú povahu udalosti dotazom na rozbočovač, keď hostiteľ pozná port, ku ktorému je koncové zariadenie pripojené, môže vykonať opätovný povel *RESET* koncového zariadenia.
3. Následne hostiteľ priradí zariadeniu unikátnu adresu a informuje zariadenie o synchrónnom oneskorení a niekoľkých ďalších parametroch.
4. Ďalej prebehne čítanie všetkých konfigurácií koncového zariadenia hostiteľom a prípadné nastavenie časovačov $U1/U2$ pre zostupný port, na ktorom je koncové zariadenie.
5. Na základe informácií o konfigurácii a spôsobe použitia koncového zariadenia určí hostiteľ hodnoty nutné pre nastavenie koncového zariadenia, ktoré sa tak dostáva do stavu *NASTAVENÉ* a je tak pripravené na použitie.

Pri udalosti odpojenia zariadenia je rozbočovačom poslané oznámenie a hostiteľ môže aktualizovať miestne informácie o topológii.

2.12 Koncové zariadenia USB 3.0



$E=mc^2$

Všetky koncové zariadenia USB 3.0 podporujú spoločnú množinu všeobecných operácií. Uved'me aspoň ich základný prehľad – dynamické pripojenie a odpojenie, priradenie adresy, konfiguráciu, prenos dát, riadenie spotreby, spracovávanie požiadaviek a chybové požiadavky.



$E=mc^2$

Koncové zariadenia oznamujú svoje vlastnosti pomocou tzv. popisovačov. Popisovač je dátová štruktúra definovaného formátu. Každý popisovač začína jednobajtovým poľom, obsahujúcim počet bajtov deskriptora, nasledovaný jednobajtovým poľom, ktorý určuje typ popisovača.

Každá konfigurácia môže používať aj popisovače alebo ich časti z iných konfigurácií. Koncové zariadenia môžu tiež mať špeciálne popisovače podľa svojej triedy alebo výrobcu.



Existuje niekoľko typov popisovačov – popisovač zariadenia, popisovač konfigurácie, popisovač združených rozhraní, popisovač rozhraní, popisovač koncového bodu, popisovač koncového bodu SuperSpeed, reťazový popisovač a binárna pamäť objektov zariadení **BOS** (*Binary Device Object Store*).

Popisovač **BOS** definuje koreňový popisovač, ktorý je podobný popisovaču konfigurácie a je inicializačným bodom pre prístup k sade súvisiacich popisovačov. Tieto popisovače sa potom ďalej delia na niekoľko typov. *Bezdrôtové USB* popisuje schopnosti zariadenia pre rozhranie bezdrôtového **USB**. *Rozšírené USB 2.0* je popisovač indikujúci možnosť rozšíreného riadenia spotreby aj vo vysokorýchlostnom režime USB 2.0. Schopnosť SuperSpeed USB zariadení popisujúca napríklad podporu rôznych rýchlostných režimov alebo doby prechodov zo stavov U_1 a U_2 do stavu U_0 . Posledným je *ID kontajneru* obsahujúce identifikačné číslo umožňujúce hostiteľovi identifikáciu zariadení bez ohľadu na režim, v ktorom koncové zariadenie pracuje.

2.13 Rozbočovač rozhrania USB 3.0

$E=mc^2$

Rozbočovače rozhraní poskytujú elektrické prepojenie medzi hostiteľom a koncovými zariadeniami. Umožňujú rozhraniu USB byť ľahšie k dispozícii pre bežného používateľa. Starajú sa o správanie pri pripájaní zariadení, riadenie spotreby, detekcii zlyhania zbernice a zotavenie aj podporu zariadení vo všetkých rýchlostných režimoch.

Rozbočovač USB 3.0 obsahuje rozbočovač USB 2.0 a rozbočovač SuperSpeed. Rozbočovač SuperSpeed sa ďalej skladá z opakovača a kontrolóra rozbočovača:

- opakovač slúži k sprostredkovaniu pripojenia, detekciu pripojenia a odpojenia zariadení, detekciu chýb a zotavení
- kontrolér zaisťuje komunikáciu medzi rozbočovačom a hostiteľom, ktorá umožňuje nastavovať rozbočovač a jeho zostupné porty

Rozbočovač SuperSpeed sa tiež stará o smerovanie paketov ako je popísané v predchádzajúcich kapitolách. Rozbočovač USB 3.0 je logickou kombináciou rozbočovača USB 2.0 a rozbočovača SuperSpeed, jedinou zdieľanou časťou je logika, starajúca sa o riadenie V_{BUS} , ako je zrejme z nasledujúceho obrázku.



Rozbočovač USB 3.0

2.14 Možnosti využitia rozhrania USB 3.0



Rozhranie USB 3.0 sa oproti predchádzajúcej verzii dočkalo výrazného vylepšenia. Zrejme najvýraznejším rozdielom je prenosová rýchlosť, ktorá sa zvýšila približne desaťnásobne oproti predchádzajúcemu rozhraniu USB 2.0. Teoreticky tak zbernica ponúka rýchlosť až 5 Gbit/s ako je zrejme z vlastností fyzickej vrstvy rozhrania.

Samozrejme táto rýchlosť u koncových prenosov dátových rozhraní nemôže byť dosiahnutá. Po započítaní strát spôsobených 8B/10B kódovaním (cca 20 %) a spôsobom zapúzdrenia dát v spojovej a protokolovej vrstve (cca 2,4 %), dostávame najvyššiu možnú prenosovú rýchlosť 3,88 Gbit/s.



Špecifikácia udáva reálne dosahované rýchlosti nad 400 MB/s (3,2 Gbit/s).

V dnešnej dobe je aj 3,2 Gbit/s pomerne vysoká prenosová rýchlosť, ktorou môže rozhranie USB 3.0 smelo konkurovať väčšine súčasných vysokorýchlostných rozhraní. Jedným z mnohých príkladov praktického využitia rozhrania by mohlo byť pripojenie zariadení využívajúcich tzv. Flash pamäte ako sú pamäťové karty, Flash disky alebo aktuálne populárne pevné disky **SSD** (*Solid State Disc*), ktoré sú schopné aspoň čiastočne využiť ponúkanú rýchlosť.



Uplatnenie rozhrania USB 3.0 bude teda najmä pri prenose veľkých objemov dát. Viac súčasne vykonávaných OUT transakcií spolu s jednou IN transakciou potom znamená možnosť súčasného využitia zbernice viacerými zariadeniami, napriek tomu že posielat' dáta hostiteľovi môže aktívne iba jedno z nich. V rýchlosti prenosu dát môže lepšie konkurovať rozhraniu ako je **eSATA** (*external Serial Advanced Technology Attachment*), ktoré zatiaľ bolo v oblasti prenosu dát úspešnejšie.



V súčasnej dobe sa ako jediný vážny konkurent rozhrania USB 3.0 javí rozhranie Thunderbolt, ktoré vo svojej podstate predstavuje externú zbernicu **PCI-E** (*Peripheral Component Interconnect - Express*), ponúka ešte vyššiu rýchlosť než rozhranie USB 3.0 a navyše aj možnosť reťazenia zariadení. V súčasnej dobe sa rozhranie Thunderbolt používajú prakticky výhradne produkty firmy Apple.

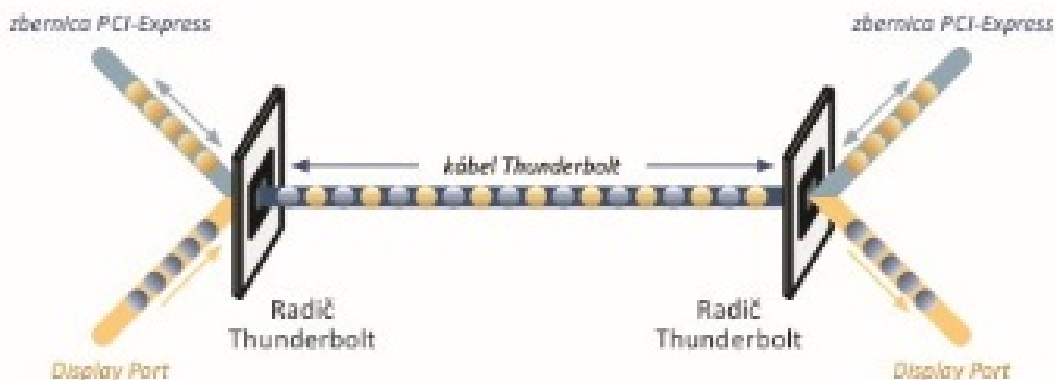
3 Rozhranie Thunderbolt

3.1 Charakteristiky rozhrania

Rozhranie Thunderbolt **TB** je rozhranie, ktoré do sveta počítačového priemyslu prináša rad nových konštrukčných riešení, funkcií a vylepšení. Rozhranie Thunderbolt sa vyvíja v spolupráci spoločností Intel a Apple. V roku 2009 bol verejnosti predstavený prvý prototyp tohoto rozhrania. V tej dobe mal ešte označenie LightPeak. Prvým sériovo vyrábaným zariadením s rozhraním Thunderbolt bol v roku 2011 notebook MacBook Pro od spoločnosti Apple.



Odlišnosť rozhrania Thunderbolt od ostatných rozhraní je najmä v jeho konštrukčnom riešení. Skladá sa z kombinácie dvoch rôznych rozhraní – externej zbernice **PCI-E** a portu **DP** (*Display Port*). Komunikácia prebieha obojsmerne a spojenie je plne duplexné. Pakety obidvoch protokolov sú prenášané súčasne jedným spojením. Kontrolný radič tieto pakety na strane vysielača multiplexuje do jedného dátového toku a na strane prijímača prepína medzi jednotlivými protokolmi.



Princíp komunikácie na rozhraní Thunderbolt



Výhodou a cieľom rozhrania **TB** je vysokorýchlostné pripojenie rozličných zariadení a podpora niekoľkých typov dátových prenosov pomocou jedného unifikovaného konektora.



Pre tento účel bol použitý upravený konektor *Mini DisplayPort*.



S teoretickou prenosovou rýchlosťou až 10 Gbit/s na kanál prevyšuje rozhranie **TB** štandardy ako **eSATA**, **USB** a **Firewire**. V porovnaní so zbernicou USB 3.0 je jeho

rýchlosť takmer dvojnásobná (v závislosti na použítom hardwari a softwari) a má menšie nároky na réžiu. Reálna prenosová rýchlosť sa pohybuje okolo hranice 6,4 Gbit/s na kanál.

$E=m \cdot c^2$

K jedinému konektoru **TB** je možné pripojiť až sedem **TB** zariadení. Jeden port **TB** tiež zvládne súčasne prenášať dáta pre dva displeje s portom **DP** vo vysokom rozlíšení **HD** (*High Definition*).

i

Pre prenos dát a napájanie boli aj napriek počiatočným plánom s optickými káblami (technológia *Silicon Photonics Link*) použité iba metalické vodiče.

+

Výhodou medených párov je zvládnutie dostatočných prenosových rýchlostí. Výrobná cena je v porovnaní s optickými vodičmi výrazne nižšia a je cez ne možné bezproblémovo napájať pripojené zariadenia až do príkonu 10W.

-

Ich značnou nevýhodou je však obmedzená dĺžka kábla, ktorá môže byť najviac 3 metre.

i

Do budúcnosti sa však s optickými káblami naďalej počíta, najmä kvôli ich možnostiam pri navýšení prenosových rýchlostí až k hodnotám rádovo 100 Gbit/s a výrazne väčšej možnej dĺžke káblov pri stálych prenosových podmienkach.



Spoločnosť Intel sľubuje prenesenie dvojhodinového videa vo Full HD rozlíšení do 30 sekúnd a prenesenie záznamov vo formáte mp3 trvajúcich jeden rok za 10 minút.

3.2 Architektúra rozhrania

$E=m \cdot c^2$

Architektúra rozhrania Thunderbolt je založená na dvoch perspektívnych štandardoch. Prvým je štandard **PCI-E** a druhým je štandard **DP**.

+

Výhodou štandardu **PCI-E** je jeho univerzálnosť, široké uplatnenie v existujúcich počítačoch typu **PC** (*Personal Computer*). Veľké množstvo technológií je koncipovaných práve pre spojenie a spoluprácu so zbernicou typu **PCI-E** a možnosť priameho spojenia so zbernicou **PCI-E** na základnej doske **PC**.

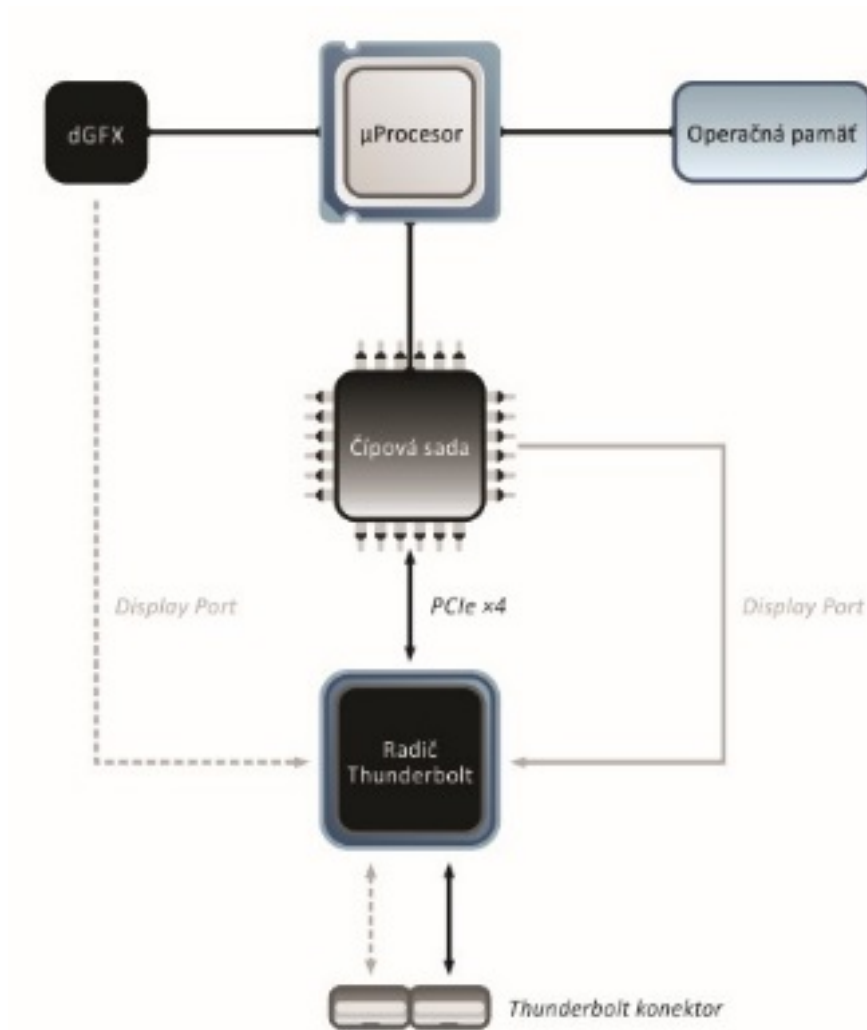
+

Výhodou portu **DP** je schopnosť dosahovať aj vyššie rozlíšenie než Full HD (napr. 4K či 5K) so stále väčšou snímkovou frekvenciou. S obrazom je možné súbežne prenášať aj 8 kanálový zvuk.

i

Fyzický konektor **Mini DP** je spätne kompatibilný s klasickým portom **DP**. Maximálna prenosová rýchlosť samotného **DP** je 5,4 Gbit/s pri využití štyroch liniek. Pri spojení so zariadením s rozhraním **TB** sa rýchlosť zvýši na 10 Gbit/s. Celková rýchlosť pri obojsmernom dvojkanálovom prenose je teda 20 Gbit/s.

Bloková schéma architektúry rozhrania Thunderbolt je na nasledujúcom obrázku.



Architektúra rozhrania Thunderbolt

Do radiča **TB** vstupujú dáta z portu **DP** a zo zbernice **PCI-E**. Radič dáta spája do paketov, ktoré sú spoločne prenášané cez jeden aktívny **TB** kábel.



Použitie aktívnych káblov má však nepriaznivé teplotné dôsledky. Na pripojenom nečinnom konektore môžeme namerať teplotu okolo 43°C. V aktívnom stave môže teplota vzrásť až na 50°C. Na kábli medzi konektormi sa teplota nelíši od okolia.



Zahrievanie koncov kábla je spôsobené zabudovaním čipu *Gennum GN2033* priamo do konektora. Ten aj napriek svojim veľmi malým rozmerom dokáže zaistiť podmienky pre vysokorýchlostný a bezchybný prenos dát cez tenký medený pár. Čip nie je priamo nevyhnutný pre technológiu **TB**, ale jeho prítomnosť vylepšuje prenosové rýchlosti a prenosové charakteristiky rozhrania. Pri prechode na optické káble nebude jeho začlenenie nutné.



Zvýšené teploty nie sú pre používateľa nebezpečné, ale určite prispievajú k celkovému zahrievaniu zariadení a tým aj k vyšším nárokom na ich chladenie. Napríklad konektory v rozhraní USB 3.0 podobný problém nemajú, ich teplota je len málo odlišná od okolitej.



Použitie aktívnych káblov má (okrem veľkého zahrievania) pre používateľa ešte ďalšiu nevýhodu, ktorou je vyššia obstarávacia cena oproti konkurenčným typom rozhraní.

3.3 Prenos dát

$E=m \cdot c^2$

Kľúčovým komponentom pre prenos dát je radič. Radič je súčasťou ako vysielacieho tak aj prijímacieho zariadenia. Radič je navrhnutý na komunikáciu s veľmi malým oneskorením a s podporou kritérií **QoS** (*Quality of Service*).

$E=m \cdot c^2$

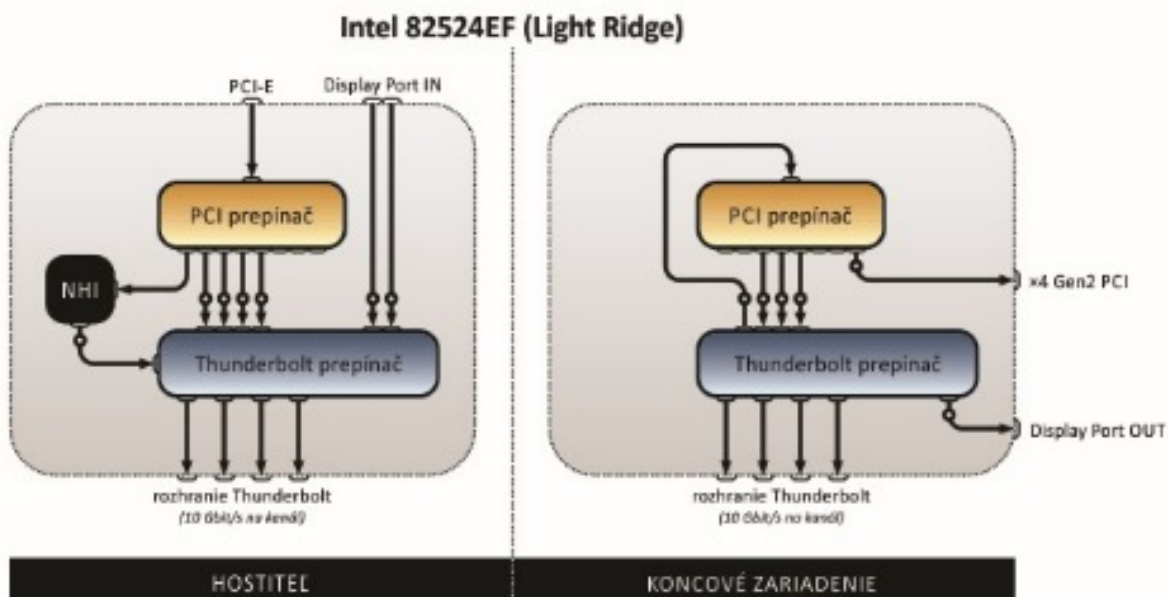
Jednou z mnohých vlastností **QoS** je schopnosť siete dopredu poskytnúť informácie o šírke pásma, oneskorení a podľa priority rezervovať a riadiť dátový tok. Každý paket má určenú svoju prioritu v rámci záhlavia paketu TLP Header.

i

Hodinová synchronizácia s pripojeným zariadením prostredníctvom rozhrania **TB** prebehne do 8 ns.



Radič **TB** umiestnený na základnej doske **PC** je vždy v režime *Host* (viď nasledujúci obrázok). Radič obsahuje nezávislý vstup pre dáta z rozhrania **PCI-E** a z portu **DP**. Vo vnútri radiča je **PCI-E prepínač** (*PCI-E Switch*), ktorý riadi pripojenie koncového zariadenia a člen **NHI** (*Native Host Interface*), ktorý je použitý pre detekciu pripojeného zariadenia (podpora funkcie Plug&Play). Posledným členom je prepínač Thunderbolt (*Thunderbolt Switch*), ktorý obidva typy dát združuje do jedného dátového toku.



Radič rozhrania Thunderbolt



Jeden port **TB** vyžaduje dva kanály. Každý sa skladá z dvoch dráh kvôli obojsmernému prenosu a má priepustnosť 10 Gbit/s. Jeden kanál je použitý pre obrazové dáta a druhý pre ostatné dáta. Pretože sa výkon kanála nesčíta, oficiálne uvedená priepustnosť je 10 Gbit/s na jeden port. Podľa uvedeného konštrukčného riešenia teda radič obsahuje štyri výstupy.

Pre koncové zariadenia pripojené k **PC** sa nachádza radič **TB** v koncovom režime (*Endpoint*). K dispozícii sú štyri vstupy resp. výstupy podľa typu operácie. Prijaté dáta vstupujú do prepínača Thunderbolt, ktorý je veľmi výkonným protokolovým prepínačom. Dáta sa v ňom rozdelia podľa ich protokolu. Dáta portu **DP** vystupujú z radiča (*DP out*) a dáta zbernice **PCI-E** vstupujú do prepínača **PCI-E**. Ten následne dáta rozdelí podľa špecifikácie 4 dráhového štandardu PCI-E 2.0. K nemu možno pripojiť jedno (4dráhy), dve (2 dráhy) alebo štyri (1 dráha) zariadenia. Pri sériovom zapojení viacerých zariadení riadi smerovanie dát prepínač PCI-E, ktorý je pred daným zariadením. Každý člen zapojený do sériového spojenia musí obsahovať dva porty. Pokiaľ obsahuje iba jeden, nie je schopný preniesť dáta na ďalšie zariadenie a je preto pripojené na koniec reťazca. Takým zariadením je typicky monitor. Najmenšie oneskorenie má tak zariadenie, ktoré je v topológii zapojené na prvom mieste. Po rozdelení dát dôjde k ich vstupu do mikročipu **PCH** (*Platform Controller Hub*), ktorý určuje dátové cesty a riadi pomocné funkcie v spolupráci s **CPU** (*Central Processing Unit*) (napr. systémové hodiny) a pamäťou. Spojenie medzi radičom a **PCH** zahrňuje rozhranie **FDI** (*Flexible Display Interface*), teda pásmo pre samostatný prenos obrazových dát.



Pri aplikácii technológie optických vlákien nebude nutné hardwarovo meniť súčasné zariadenie s rozhraním **TB**. To je už dnes schopné prenášať dáta prostredníctvom medených tak aj optických káblov. V prípade optiky môžu mať káble dosah až niekoľko desiatok metrov pri súčasnom napájaní pomocou metalického vodiča. Pri absencii napájania sa počíta s prenosom optického signálu až do stoviek metrov vzdialeného zariadenia.
