

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Single Pair Ethernet

Ethernet s jedným párom vodičov

Učebný text

2023

Peter Drahoš

1. Charakteristika SPE štandardov

Single Pair Ethernet (SPE) umožňuje prenos Ethernetu len cez jeden pár vodičov a zaisťuje cenovo výhodné a priestorovo nenáročné pripojenie snímačov. Je tak možná konzistentná komunikácia na báze IP až po úroveň prevádzky t.j. zo snímačov až do cloudu. Single Pair Ethernet spĺňa požiadavky na jednotnú sieťovú infraštruktúru, ktorá je základom Industry 4.0 a priemyselného internetu vecí (IIoT).

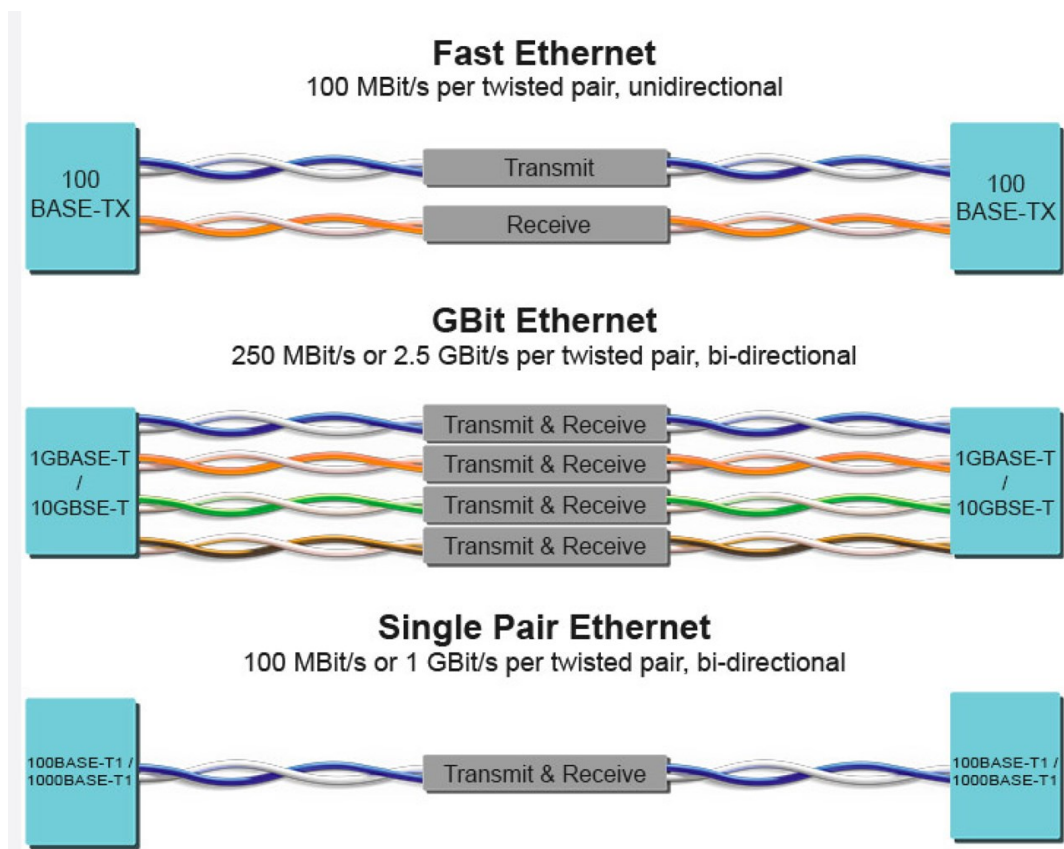
Single Pair Ethernet je ďalšou formou fyzickej vrstvy. Tam, kde boli predtým potrebné dva páry vodičov na prenos Fast Ethernet (100 MBit/s) alebo štyri páry vodičov pre Gigabit Ethernet, Single Pair Ethernet umožňuje prenos dát len cez jeden krútený pár vodičov (jeden pár). To umožňuje nové možnosti pripojenia kompaktných zariadení, snímačov a akčných členov priamo z úrovne poľa. Významné je tiež to, že ďalšie podsystémy alebo komunikačné brány už nie je potrebné do siete implementovať. SPE je preto materiál šetriaci a ľahký ethernetový vývoj pre mnohé súčasné a budúce oblasti použitia [1].

Vývoj prvého SPE, známy pod názvom Automotive Ethernet, sa začal v automobilovom priemysle, kde boli potrebné menšie a výkonnejšie zariadenia. Technológiu SPE je dnes možné použiť naprieč aplikáciami v priemysle aj v automatizácii budov. Poskytuje vhodnú topológiu, dosah do vzdialenosti od 15 až do 1000 metrov a vysoké prenosové rýchlosti od 10 Mbit/s až do 10 GBit/s.

Technológia Single Pair Ethernet umožňuje okrem prenosu dát aj súčasné napájanie koncových zariadení cez tie isté „dátové“ vodiče: PoDL - Power over Data Line, s výkonom až 50 W.

Cieľom učebného textu je poskytnúť čitateľovi základný prehľad o najnovších trendoch vo vývoji komunikačných systémov. SPE je reálna technológia podporená šandardizáciou, výrobou čipov a zariadení, ktoré sa postupne presadzujú v praxi.

1.1. „Klasický“ Ethernet a Single Pair Ethernet



Obr. 1. Ilustračný obrázok pre porovnanie dvoch verzií SPE a klasického Ethernetu [2].

Single Pair Ethernet (SPE) bol vyvinutý z jediného dôvodu. Jeho zámerom bolo vyplniť poslednú veľkú medzeru v sieťovom svete orientovanom na TCP/IP – priepasť medzi klasickými IT a automatizačnou technológiou (OT), ktorá sa stáva čoraz dôležitejšou pre pripojenie veľkého množstva senzorov, aktuátorov a riadiacich jednotiek v rôznych prostrediach [2].

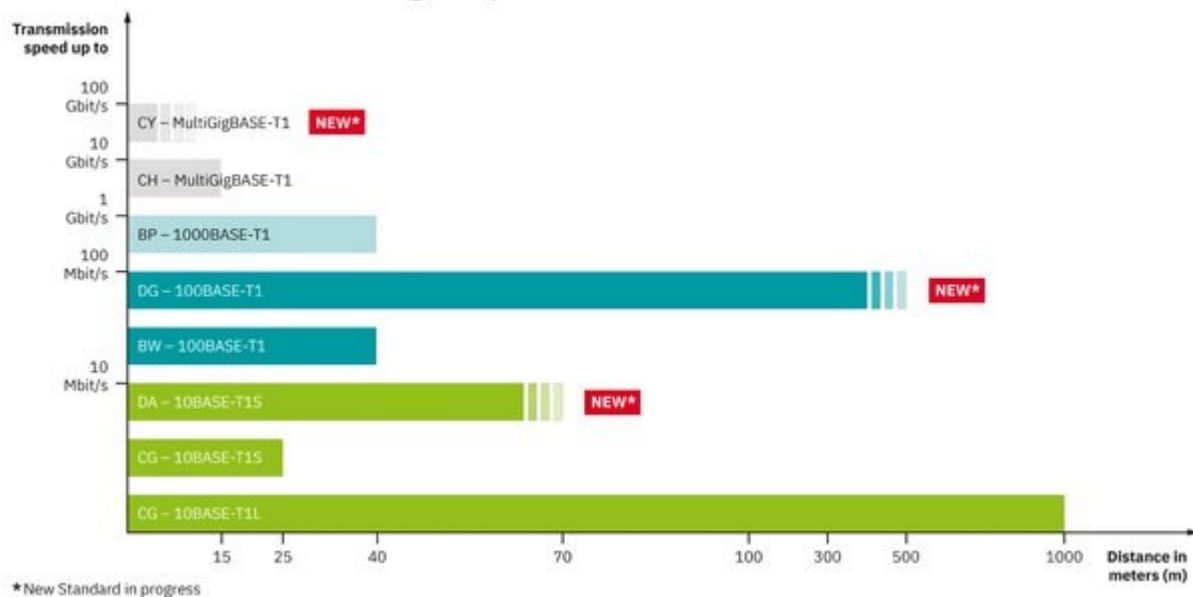
1.2. Jednopárové štandardy Ethernetu - IEEE 802.3

Jednopárový Ethernet (SPE) je pokrytý niekoľkými medzinárodnými štandardmi. Jednotlivé normy SPE sú definované v IEEE 802.3. Líšia sa rôznymi prenosovými rýchlosťami a vzdialenosťami obr. 2. Ďalšia norma IEC 63171 popisuje kompatibilné konektory pre tieto štandardy SPE. Pre rôzne aplikácie boli ako prvé definované tri štandardy pre SPE relevantné pre automatizáciu aj pre automobil:

1. **Automotive Ethernet. Štandard IEEE 802.3 bw popisuje fyzickú vrstvu 100BASE-T1 100 Mbit/s.** Umožňuje plný duplex na jednej netienenej skrútenej dvojlinke do 15 m alebo na kábel s tienením do 40 m. Predpokladá sa použitie aj v priemysle (v rozvádzačoch).
2. **Gigabitový Ethernet. Štandard IEEE 802.3 bp** popisuje fyzickú vrstvu **1000BASE-T1** s dvomi medenými vodičmi, ktorá umožňuje **1 Gbit/s** na vzdialenosť 40 m cez tienené linky alebo 15 m cez netienené linky. Aplikácia: vysoké prenosové rýchlosti - napríklad kamery, lidary, backbone a pod.
3. **10BASE-T1. Štandard IEEE 802.3 cg (10 Mbit/s),** ktorý má dve verzie fyzickej vrstvy:
 - **10BASE-T1L (Long)** Tiež označovaný ako **Advanced Physical Layer (APL)** na vzdialenosť až do 1000 m. Aplikácie v PA (Process Automation)
 - **10BASE-T1S (Short)** podporuje **Multidrop topológiu** bez switchov ako úsporný variant pre **Automotive Ethernet** aj pre priemysel (FA) do vzdialenosti 25m.

Pri vývoji SPE ide teda o rôzne komunikačné technológie, ktoré majú spoločný cieľ - umožniť komunikáciu od senzorov do cloudu na dvoch vodičoch s veľmi jednoduchým pripojením k IT sieťam. SPE nemá za cieľ nahradiť klasický Ethernet, ale umožniť pripojenie zariadení v náročnom prevádzkovom prostredí (automobil, priemysel, Ex prostredie,...) , tam kde sa klasický Ethernet nesmie použiť. V tomto zmysle sa hovorí, že SPE umožňuje rozvoj a je aktivátorom internetu vecí (IoT) a najmä priemyselného internetu vecí (Industrial IoT).

IEEE SPE Standards and Working Groups

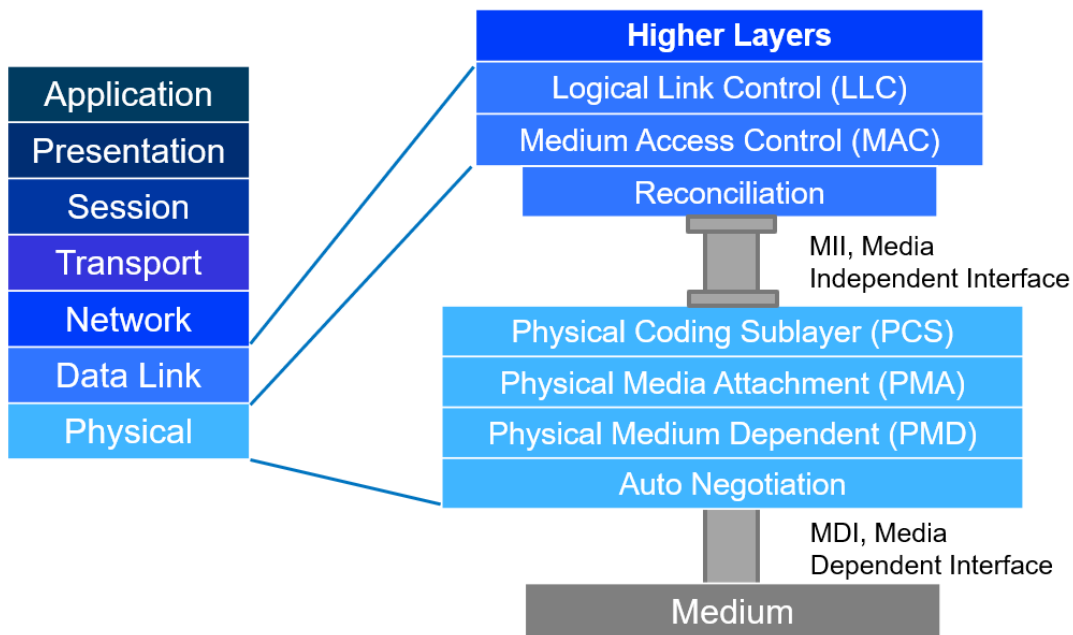


Obr. 2 Prehľad štandardov SPE podľa rýchlosti a vzdialenosti [1].

Tabuľka 1. Štandardy SPE v porovnaní s klasickým Fast Ethernet a Gigabit Ethernet [3,4].

Ethernet štandard	Označenie	Rok	Rýchlosť prenosu	Kábel
802.3 u	100BASE-TX	1995	100Mb/s	2x TP (RJ 45), 100 m
802.3 ab	1000BASE-T	1998	1000Mb/s	4x TP (RJ 45), 100 m
802.3 bw	100BASE-T1	2015	100Mb/s	SPE, UTP 15 m/ TP 40 m
802.3 bp	1000BASE-T1	2016	1000Mb/s	SPE, TP 40 m
802.3 cg	10BASE-T1S	2020	100Mb/s	SPE, 25 m
802.3 cg	10BASE-T1L	2019	100Mb/s	SPE, APL 1000 m , Ex

Rozdiely rôznych variantov SPE (Tab.1.) oproti konvenčnému Ethernetu spočívajú vo vrstve 1, teda fyzickej vrstve (PHY) modelu ISO OSI obr. 3. Nové IEEE štandardy T1 nie sú spätne na úrovni fyzickej vrstvy kompatibilné so staršími štandardmi IEEE 802.3. Od vrstvy 2 vyššie však rôzne normy SPE nemajú žiadny vplyv, teda sú kompatibilné. A to je mimoriadne dôležité. O pripojenie na fyzickú vrstvu sa postarajú špecializované a lacné integrované obvody (ASICs), ktoré sú z „druhej strany“ nezávislé od média - MII (rovnaká linková vrstva 2) a teda plne kompatibilné so svetom Internetu. Na vytvorenie spojenia medzi dvoj- a štvorvodičovým Ethernetom potrebujete konvertor médií, ktorý funguje ako most. Tento konvertor medzi dvoma médiami nefunguje na MAC vrstve, a preto nepotrebuje a nemá MAC adresu, ale spája T1 Ethernet PHY priamo so štvorvodičovým Ethernet PHY cez MII (Media Independent Interface), viď príklad na obr.3. a 4.



Obr. 3. Z pohľadu ISO OSI modelu je SPE realizovaný vo fyzickej vrstve [5].

Ethernet s jedným párom vodičov (SPE) ponúka množstvo výhod:

- je kompaktný, ľahko sa inštaluje a je pripravený na budúcnosť (future proof),
- prenáša dáta a energiu na jednej skrútenej dvojici vodičov,
- možno ho ľahko integrovať do existujúcich systémov,
- je flexibilný z hľadiska prenosovej rýchlosti a dĺžky kábla,
- je nákladovo efektívny,
- je vhodný pre mnohé prípady použitia a aplikačné oblasti,
- umožňuje pripojenie Industrial IoT od okraja siete až po cloud,
- je aktivátorom rozvoja IIoT a Industry 4.0.

2. Automotive Ethernet 100BASE-T1

Ethernet je dlhodobo, populárny komunikačný protokol pre komerčné a priemyselné aplikácie. Až do zavedenia systému 100BASE-T1 sa však v automobilovom priemysle ešte nedokázal výrazne presadiť. Niektoré vozidlá používali 100BASE-TX pre čítačky OBD (On-Board Diagnosis), ale 100BASE-TX v automobilovom ekosystéme nerástli, pretože to vyžaduje dve skrútené dvojlinky. A najmä klasický Ethernet nespĺňa prísne limity pre vyžarované rušenie EMI podľa normy CISPR 25, v 5.0, 2021. CISPR je Medzinárodný špeciálny výbor pre rádiové rušenie a je súčasťou Medzinárodnej elektrotechnickej komisie (IEC) [6].

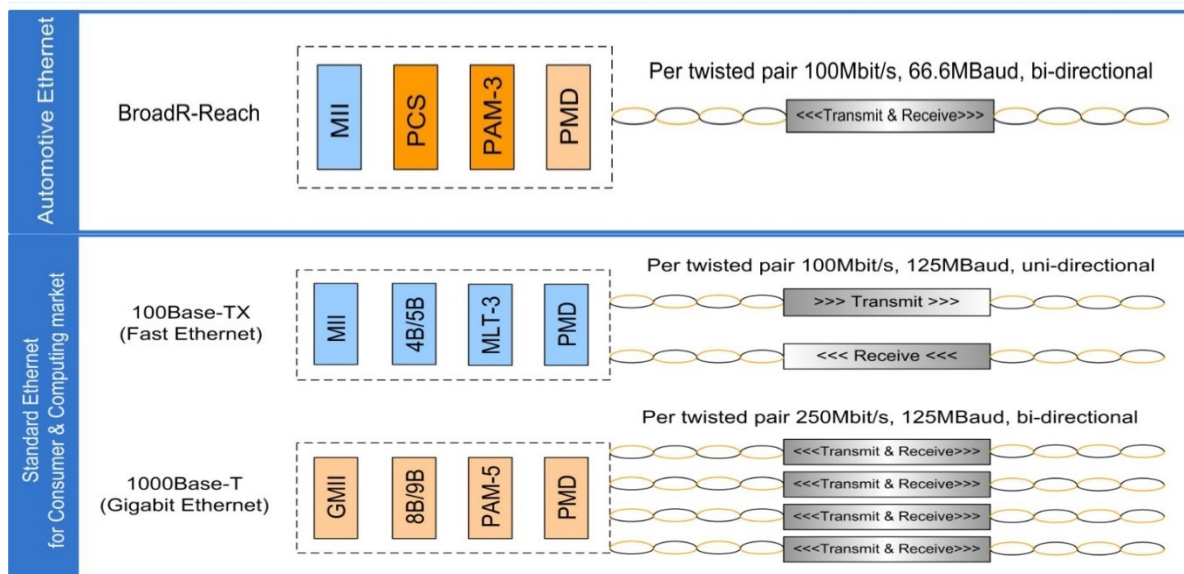
Úplne nový štandard Ethernet 100BASE-T1 je určený špeciálne pre komunikačné siete v motorových vozidlách, bol vyvinutý podľa požiadaviek automobilových systémov. Na odosielanie a prijímanie dát pri rýchlosti 100 Mbps na vzdialenosť 15 metrov potrebuje len netienený kábel s jednou skrútenou dvojlinkou – UTP (Unshielded Twisted Pair).

So superpozíciou signálu pri plne duplexnej komunikácii a špeciálnymi technikami kódovania znižuje 100BASE-T1 elektromagnetickú interferenciu (EMI). Znižuje hmotnosť, výrobné náklady a priestor oproti štandardu 100BASE-TX - klasickému Ethernetu.

Z historického pohľadu novú technológiu fyzického prenosu pôvodne vyvinula spoločnosť Broadcom a Open Alliance BroadR-Reach. Neskôr bola s malými úpravami štandardizovaná ako IEEE 100BASE-T1. Transformáciu na štandard IEEE vykonala OPEN SIG Alliance. (OPEN = One Pair Ether-Net, SIG = Special Interest Group).

Zvlášť prítlačlivým aspektom tejto fyzickej vrstvy je, že informácie môžu byť prenášané obojsmerne na dvojici vodičov (skrútená netienená dvojlinka -UTP) pri prenosovej rýchlosti

100 Mbit/s. Dva vzájomne prepojené uzly, point to point (vzdialené max. 15 m) môžu vysielat' a prijímať súčasne - plný duplex na jednej skrútenej dvojlinke!



Obr. 4. Porovnanie: Automotive Ethernet (hore) a klasický Fast a Gigabit Ethernet.

Vysvetlivky k obr. 4 :

MII – Media Independent Interface – štandard. MII je štandardizovaný v IEEE 802.3u a pripája rôzne typy fyzickej vrstvy cez špeciálne integrované čipy k MAC vrstve.

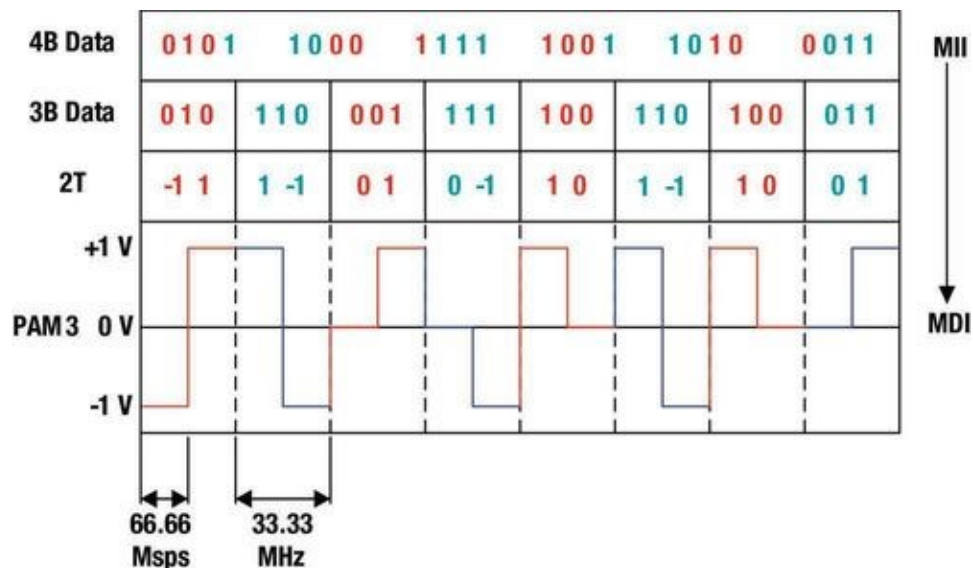
GMII - Gigabit Media Independent Interface

PCS – Physical Coding Sublayer

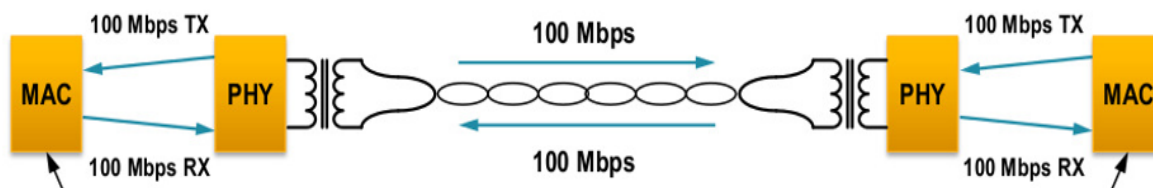
PAM – Pulse- Amltitude Modulation: PAM-3 (s logickými úrovňami +1, 0 -1)

PMD – Physical Media Dependent alebo **MDI** – Media Dependent Interface

Automobilový Ethernet využil z pôvodných technológií: Viacúrovňový prenos PAM-3 (pulzne amplitúdová modulácia – 3 úrovne) a obojsmerný prenos (bi-directional) oboje aplikoval (vo fyzickej vrstve) na jednej netienenej skrútenej dvojlinke (UTP).

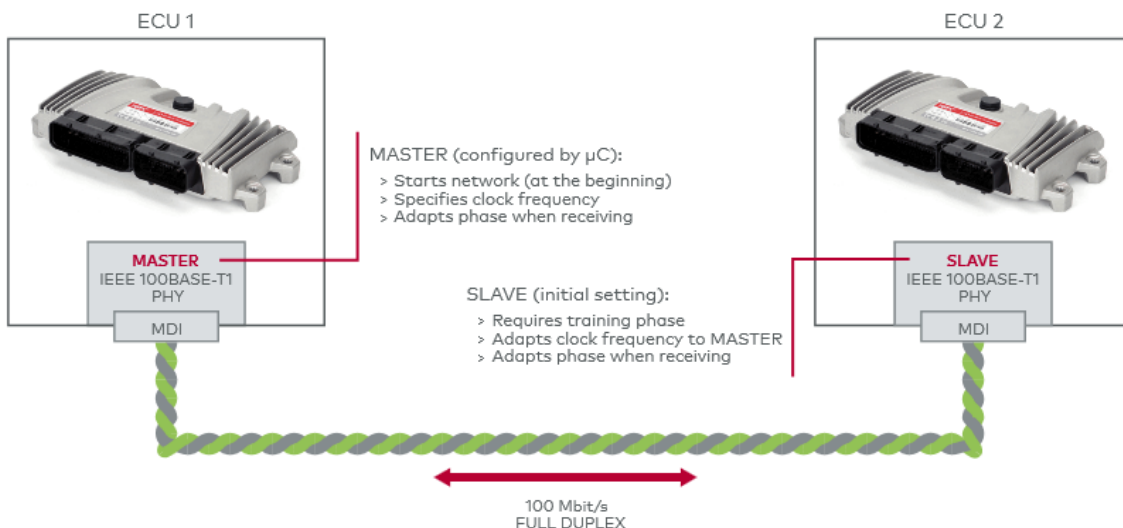


Obr. 5. Ternárne kódovanie v Automotive Ethernet. Vďaka PAM-3 je nosná frekvencia nižšia ako u klasického Ethernetu.



Obr. 6. Full duplex na SPE. Jediná zmena je na strane vodičov- fyzická vrstva (PHY). Vrstva MAC zostáva nezmenená a kompatibilná s klasickým Ethernetom.

Na jeden kábel sú vždy pripojené len dva uzly, teda iba topológia bod-bod, ktorá musí mať definované uzly ako Master a Slave, Obr. 7. Pomocou spojovacieho prvku je možné pripojiť viac ako dva uzly. Obvykle sa tu používa prepínač, ktorý ako spojovací prvok linkovej vrstvy 2 umožňuje pripojenie k viacerým fyzickým uzlom a môže nezávisle posielat' správy z vetvy do vetvy.

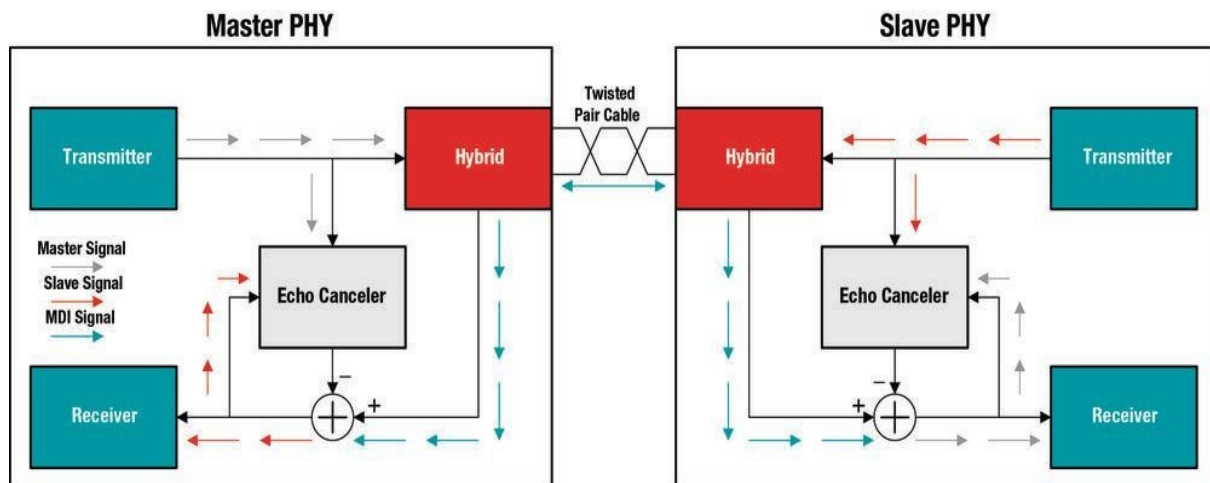


Obr. 7. Spojenie dvoch riadiacich jednotiek automobilu. Zdroj: Vector informatik.

Použitie obojsmerného prenosového média znižuje celkovú hmotnosť káblov inštalovaných vo vozidle, čo znižuje nielen náklady na materiál ale aj hmotnosť vozidla.

Dva vzájomne prepojené uzly môžu vysielat' a prijímať súčasne – full duplex. Duplexný prenos sa fyzicky dosahuje na princípe superpozície (skladania) signálu z dvoch vysieláčov;. Uzol ako odosielateľ (vysielač) pridáva svoje vlastné diferenciálne napätie na dva vodiče; zatiaľ čo ten istý uzol ako prijímač odpočíta vlastné (vysielané) napätie od

aplikovaného (superpozícia) celkového napätia na zbernici. Výsledok odčítania zodpovedá napätiu, ktoré poslal opačný uzol. Tento princíp vysvetľuje metóda potlačenia ozveny na obr.8, ktorá sa používa aj v iných komunikačných systémoch.

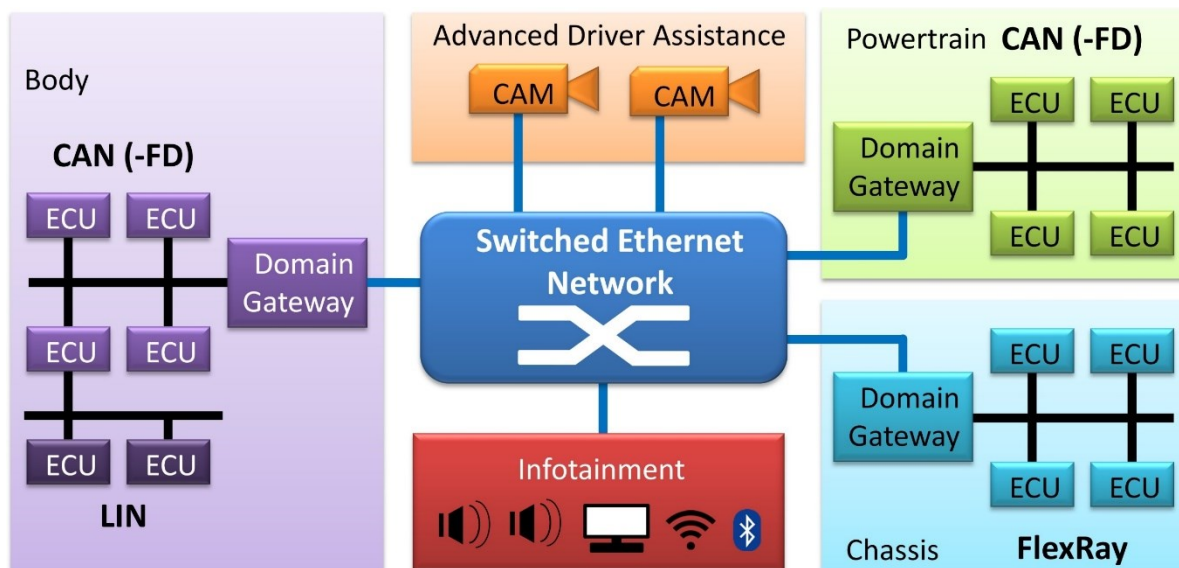


Obr. 8. Metóda potlačenia ozveny pre obojsmerný prenos na skrútennej dvojlinke.

Zložený signál na skrútennej dvojlinke SPE je na obr. 8 označený ako „MDI Signal“. Master odpočíta od zloženého signálu vlastný „Master Signal“ a získa do svojho prijímača „Slave Signal“. Podobne je to u druhého komunikujúceho uzla. Pre pochopenie princípu je potrebné sledovať na obrázku signály označené šípkami podľa farieb.

Aplikačné sféry Ethernetu sa v automobile postupne rozširujú aj výrazným príspevom SPE.

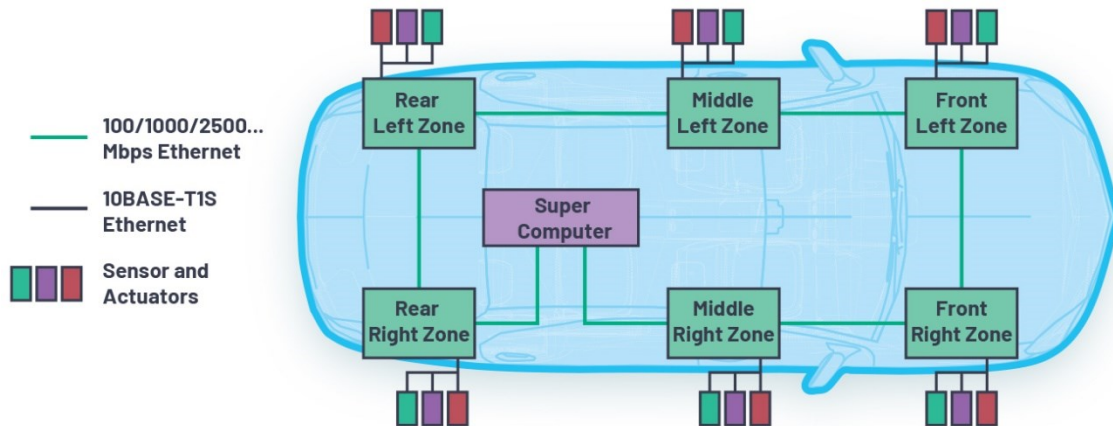
- Komunikácia na pozadí - fabrická a prevádzková diagnostika, flashovanie ECU.
- Infotainment. Streaming AVB - Audio Video Bridging - s použitím 100BASE-T1 (po kompresii videa) a 1000BASE-T1 (aj bez kompresie)
- Pokročilé asistenčné systémy vodiča (ADAS) s použitím senzorov ako sú kamery, lidary, radary,...
- Synchronizované a bezpečné riadenie v reálnom čase, chybovo tolerantné systémy, spínaný Gigabitový Ethernet pre backbone siete, pre ADAS a autonómne vozidlá.



Obr. 9. Aplikácie Ethernetu v automobile môžu postupne nahradiť pôvodné domény automobilových zberníc ako sú: LIN, CAN, CAN-FD, FlexRay, MOST a iné.

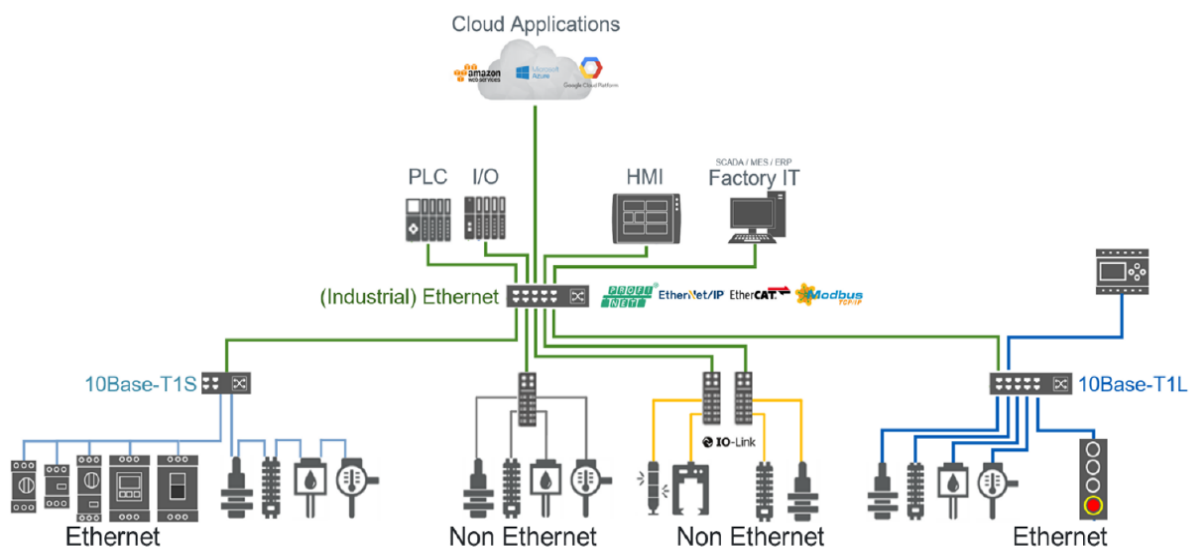
3. Technológia 10BASE-T1

10BASE-T1S tiež označovaná ako **MULTIDROP** je najnovšia technológia používaná na rozšírenie Ethernetu na okraj sietí v automobile aj v priemysle do prevádzkových technológií (OT), v oboch prípadoch s jednoduchým prepojením na informačné technológie (IT). Táto technológia, podobne ako jej využitie v iných odvetviach, prináša významné výhody aj pre automobilový priemysel, kde má ambíciu nahradiť pôvodné používané zbernice (CAN, LIN,...), obr. 10. Technológia 10BASE-T1S založená štandardom IEEE® poskytuje 10 Mbps multidrop prenosové médium, ktoré môže obsahovať až osem uzlov vysielateľa a prijímača. Uzly vysielateľa a prijímača sa pripájajú k spoločnému zmiešavaciemu segmentu (zbernici) s dĺžkou do 25 m. (Podľa špecifikácie IEEE sú tieto limity v skutočnosti „minimálne maximá“; to umožňuje využívať viac ako osem uzlov a vysielat' na väčšie vzdialenosti.)



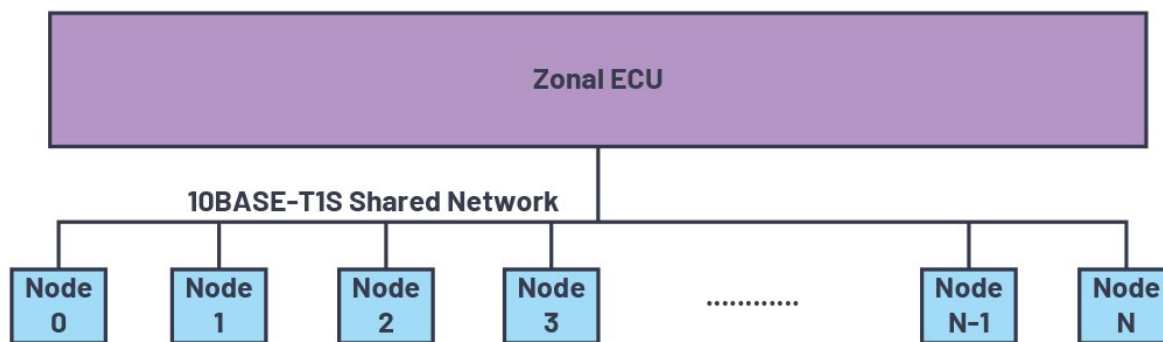
Obr. 10. Systémová „zonálna“ architektúra s použitím rôznych SPE v automobile.

Táto technológia umožňuje štandardnú Ethernet komunikáciu, čím eliminuje potrebu brán (na prepojenie nekompatibilných komunikačných systémov). 10BASE-T1S znižuje celkové náklady na systém použitím jedného páru vodičov a architektúry multidrop zbernice. 10BASE-T1S tiež zvyšuje škálovateľnosť systému, pretože niekoľko uzlov môže pracovať na rovnakej zbernicovej linke s vysokou dátovou priepustnosťou, obojsmerne ako polovičný duplex. To umožňuje systému vyžadovať menej portov, káblov a prepínačov [7] v aplikáciách v automobile aj v priemysle, obr. 11.



Obr. 11. Systémová architektúra v priemysle: 10Base-T1S Multidrop (25m) pre Factory Automation a 10Base-T1L Point to Point (1000M) pre Process Automation [8].

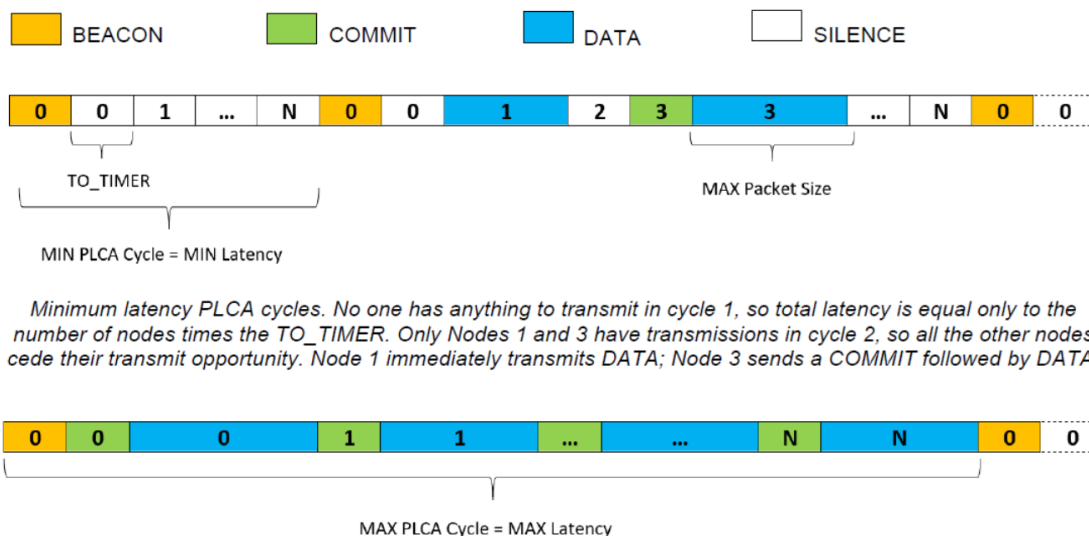
10BASE-T1S poskytuje chýbajúce prepojenie v automobilovom ethernetovom ekosystéme, umožňuje skutočnú konektivitu Ethernet až po okraj (prevádzky). Jedinečným aspektom 10BASE-T1S, ktorý sa líši od iných automobilových ethernetových technológií, je podpora Multidrop topológie, obr. 12, so všetkými uzlami pripojenými cez rovnaký netienený krútený párový kábel – bez switchov. Táto implementácia vyžaduje iba jeden Ethernet PHY v každom uzle, čím sa odstraňuje potreba implementácie prepínača alebo hviezdicovej topológie. Norma určuje, že musí byť podporovaných najmenej osem uzlov (je možné podporiť oveľa viac) a musia byť možné dĺžky zbernice až 25 m.



Obr. 12. Topológia siete typu Multidrop 10Base-T1S.

Master (ECU) v sieti multidrop riadi prístup uzlov na zbernicu metódou PLCA (Physical-Layer Collision Avoidance). Hlavnými cieľom vrstvy 10Base-T1S (PHY) je zosúladienie prenosov a zabezpečenie kooperatívneho správania uzlov na multidrop zbernici. Jedným zo spôsobov, ako to dosiahnuť, je použitie technológie PLCA, aby sa minimalizovala strata času a zabránilo sa kolíziám. Pracovný princíp PLCA spočíva v tom, že každému PHY na multidrop sieti je udelená jedna možnosť prenosu, čo je určitý časový úsek na odoslanie kompletného

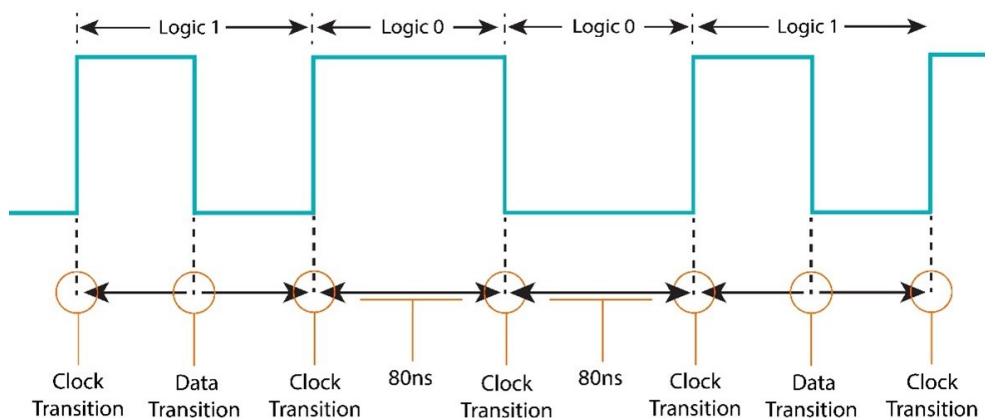
ethernetového rámca na základe prideleného jedinečného ID uzla. Samotný cyklus PLCA pozostáva z BEACON (master označuje začiatok cyklu), po ktorom nasleduje N+1 časových intervalov, čo umožňuje odoslať N+1 paketov DATA s premenlivou veľkosťou. Master riadi vysielací cyklus PLCA a vytvára možnosti hovoriť (Transmit Opportunities -TOs) a poradie, v ktorom je možné počuť uzly, pričom ponecháva dostatočnú flexibilitu, aby sa nestrácal čas čakáním na tých, ktorí nemajú čo povedať.



Obr. 13. PLCA - prístup uzlov na zbernicu bez kolízií v 10Base-T1S [5].

Na začiatku každého prenosového cyklu sa uzlu 1 na zbernici najskôr prideli možnosť vysielania. Ak tento uzol nemá žiadne DATA na prenos a nemôže/ nechce komunikovať - COMMIT, postúpi svoju vysielaciu príležitosť ďalšiemu uzlu na zbernici. Výhodou tohto systému je, že jednotlivé uzly sledujú TO_TIMER nezávisle od BEACON. Keďže uzly, ktoré nemajú žiadne údaje na prenos, sa vzdajú svojej príležitosti na prenos, krátke okno, ktoré poskytuje TO_TIMER, zabezpečuje minimálnu stratu priepustnosti alebo zvýšenie

oneskorenia. Toto premenlivé oneskorenie je podobné TDMA, ale PLCA nie je pevnou alebo absolútnou referenciou pre časované pakety; namiesto toho sa prispôsobuje podľa vysielačích potrieb každého uzla na zbernici [5]. Na kódovanie signálu sa používa Differential Manchester Encoding (DME), ktorý okrem spoľahlivého prenosu správ slúži zároveň na synchronizáciu hodín zariadení (uzlov) a umožňuje PLCA deterministickú komunikáciu.

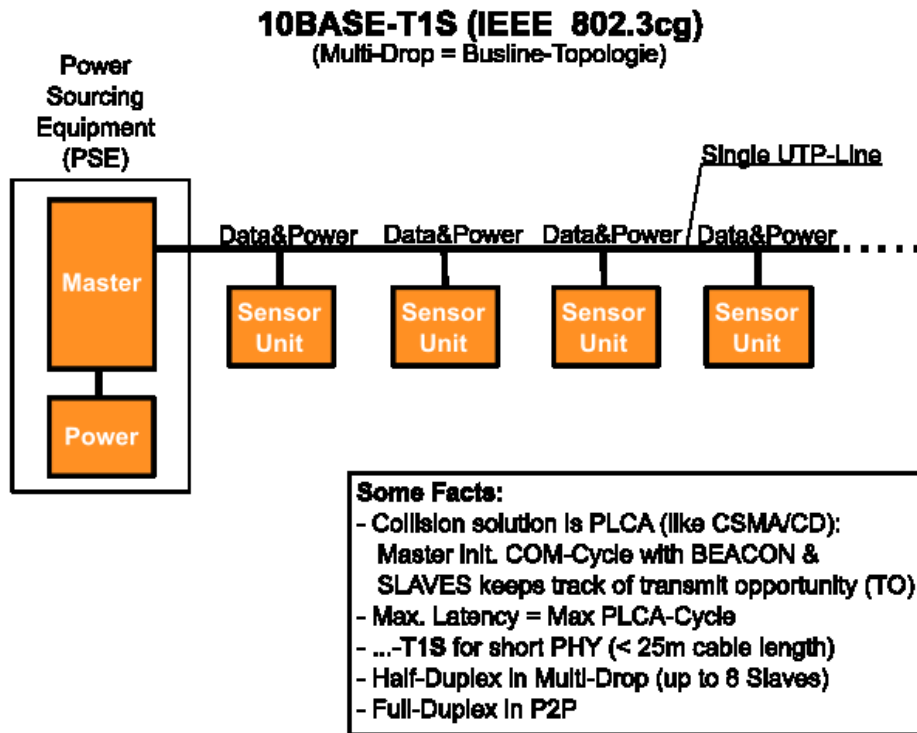


Obr. 14. 10base-T1S používa Differential Manchester Encoding [9].

Signál 10BaseT1 tvorí diferenciálne napätie 1 V od špičky po špičku s 20 % rezervou. Prechod/hrana signálu (Clock Transition) hodín pomáha synchronizovať všetky uzly. Ak je prechod (Data Transition) medzi periodickým Clock Transition, považuje sa to za logickú 1. Ak medzi hodinovými prechodmi nie je žiadny (datový) prechod, považuje sa to za logickú 0. Vo všetkých ostatných ethernetových štandardoch sa údaje bežne kódujú pomocou napäťových úrovní, ale v 10Base-T1S sa údaje kódujú pomocou hodinových prechodov. To poskytuje lepšie tienenie EMI.

4. Napájanie energiou: Power over Dataline (PoDL)

IEEE 802.3bu je štandard pre napájanie pripojených zariadení až do 50 W cez ten istý krútený párový kábel. SPE tak umožňuje prenos energie a dát po jednom a tom istom páre vodičov, ktorý sa označuje ako Power over Data Line (PoDL), vrátane špeciálnej verzie 10Base-T1L (Long) do 1000 m označovanej tiež ako Advanced Physical Layer (APL).



Obr. 15. Napájanie zariadení energiou – PoDL pre 10Base-T1S (Short) multidrop.

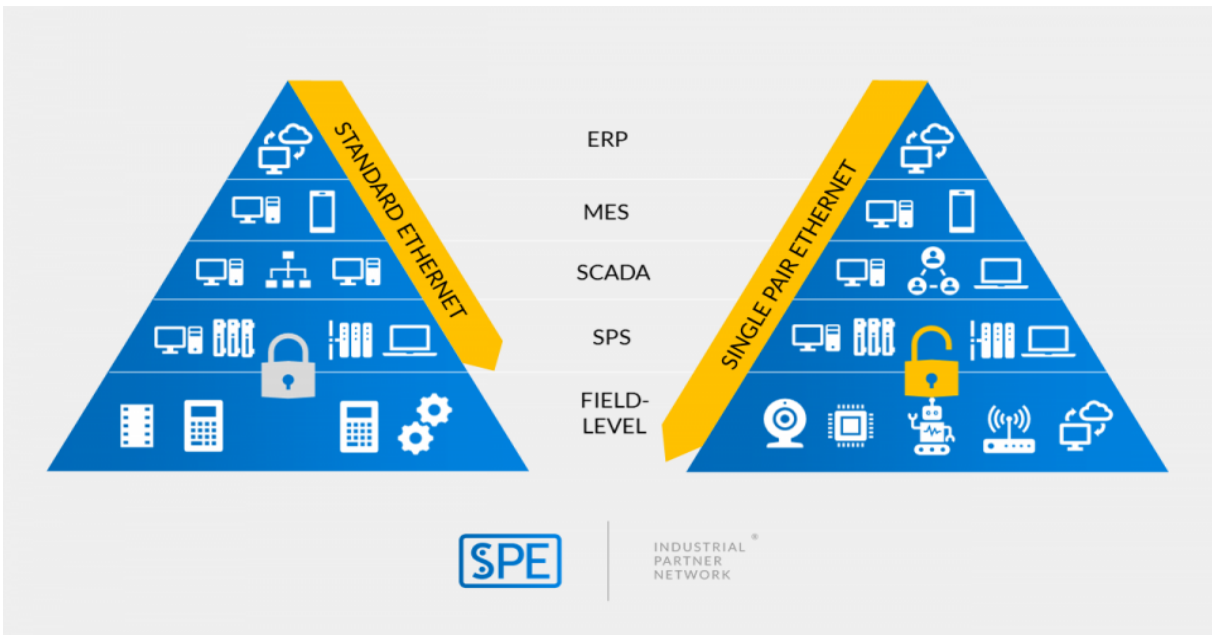
Pôvodne boli triedy (Class #) 0 až 9 štandard IEEE 802.3bu navrhnuté pre 100BASE-T1 a 1000BASE-T1 pre automotive sektor, zatiaľ čo triedy 10 až 15 štandard IEEE 802.3cg sú rozšírením pre 10Base-T1. Spoločne definujú výkon od 0,5 do 50 wattov pri rôznych úrovniach napätia, Tab. 2. Šesť typov systémov (A až F) je definovaných ako zdroj energie (PSE) pre napájanie zariadení. Nie každý typ zariadenia však funguje s každým variantom SPE [10].

Tabuľka 2. Možnosť napájania zariadení cez datové vodiče PoDL [10].

Class	IEEE 802.3bu										IEEE 802.3cg						Units
	12 V unregulated		12 V regulated		24 V unregulated		24 V regulated		48 V regulated		24 V			55 V			
Class #	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$V_{PSE(max)}$	18				36				60		30			58			V
$V_{PSE(min)}$	6		14,4		12		26		48		20			50			V
$I_{PI(max)}$	101	227	249	471	97	339	215	461	735	1360	92	240	632	231	600	1579	mA
$P_{PD(max)}$	0,5	1	3	5	1	3	5	10	30	50	1,23	3,2	8,3	7,7	20	52	W

Záver

Aby sa ethernetová technológia dostala od senzora až po cloud, musia byť vyvinuté nové technológie so štandardizovanými, nákladovo efektívnymi a priestorovo úspornými komponentmi. SPE spĺňa jednu zo základných požiadaviek pre Industrial IoT a aplikácie Industry 4.0, konkrétne end-to-end inteligentné siete na všetkých úrovniach. Škálovateľné, deterministické a plne kompatibilné, takže všetky komponenty môžu medzi sebou navzájom komunikovať [11].



Obr. 16. Vízia jednotnej komunikácie od senzora po cloud [12].

Na základe vlastných odhadov IEEE predpovedala trhový potenciál 250 miliónov SPE uzlov na všetkých trhoch, z toho 50 miliónov v automatizácii tovární v roku 2030 [11].

Referencie:

- [1] Ethernet s jedným párom. PhoenixContact. <https://www.phoenixcontact.com/de-at/technologien/single-pair-ethernet#ex-88aet>
- [2] Single Pair Ethernet, RJ45 and clarifying the mating interfaces. 2020. Industrial Ethernet book <https://iebmedia.com/single-pair-ethernet-rj45-and-clarifying-the-mating-interfaces/>
- [3] Ethernetové štandardy IEEE 802.3. Elektronik kompendium. <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1406171.htm>
- [4] SPE Single Pair Ethernet. Elektronik kompendium <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/n.et/2706091.htm>
- [5] Was ist 10Base-T1S Automotive Ethernet? 2022. Teledyn Lecroy. <https://de.teledynelecroy.com/doc/10base-t1s-auto-ethernet-tech-brief>
- [6] CISPR 25: TESTOVANIE EMC AUTOMOBILOVÝCH KOMPONENTOV. <https://www.tuvsud.com/en-us/industries/mobility-and-automotive/automotive-and-oem/automotive-testing-solutions/emc/cispr-25>
- [7] Microchip. <https://www.microchip.com/en-us/solutions/ethernet-technology/single-pair-ethernet/10base-t1s>
- [8] Single Pair Ethernet for Field Devices. Whitepaper, 2023. Weidmuller.
- [9] Overview of the Protocol 10BaseT1S. 2023 Prodigy Technovations. <https://prodigytechno.com/10baset1s-protocol/>
- [10] SPE System Alliance. SPESA_Whitepaper_EN_3003202278.pdf <https://singlepairethernet.com/en/references/whitepaper/>
- [11] SPE System Alliance – Our Vision. <https://singlepairethernet.com/en/the-spe-technology/the-principle/>
- [12] WHAT IS SINGLE PAIR ETHERNET? <https://www.single-pair-ethernet.com/en/technology>