

Optiska fordonsnät: ett rätt, ett fel



Nätverkhastigheterna i fordon ökar snabbt. Utvecklingen har gått från 100 Mb/s till 1 Gb/s, vidare till 10 Gb/s och upp mot 25 Gb/s och mer (KDPOF, 2021). Drivkraften är kraven från ADAS, högupplösta sensorer och infotainmentsystem.

Mot den bakgrunden kan det vara frestande för fordonsindustrin att överväga att återanvända en etablerad standard som 25GBASE-SR, ursprungligen framtagen för superdatorberäkningar och datacenter. Den standarden är dock inte utformad för att kunna överleva i fordonsmiljöer med extrema temperaturer, konstanta vibrationer, hårda begränsningar i kostnad och vikt, lång livslängd samt strikta tillförlitlighetskrav (Pardo, Martínez & Rodríguez, 2019; Gorski, 2023).

Som svar på dessa utmaningar har IEEE 802.3 WG tagit fram 25GBASE-AU, en ny medlem i den familj av multigigabit-Ethernet för fordon som definieras i IEEE 802.3cz-2023. Det är en PHY-standard – utvecklad från grunden för fordonsmiljöer – som tar itu med de begränsningar som finns i 25GBASE-SR. Den introducerar funktioner anpassade för fordons driftförhållanden. Denna artikel jämför AU och SR och förklarar varför den förstnämnda är rätt val för framtida fordon och varför den andra faller bort.

25GBASE-SR: Optimerad för datacenter

25GBASE-SR, definierad i IEEE 802.3by, utvecklades för 25 Gb/s Ethernet över multimodfiber i datacenter. Tekniken är avsedd för korta avstånd – typiskt upp till 70 meter med OM3-fiber eller omkring 100 meter med OM4 – i noggrant kontrollerade miljöer (IEEE, 2016). Fördelarna är låg latens, låg kostnad per gigabit samt användning av mogen 850 nm-VCSEL-teknik.

Tekniska egenskaper hos 25GBASE-SR

- **Optiskt medium:** 25GBASE-SR använder OM3/OM4/OM5-multimodfiber (50/125 µm), optimerad för 850 nm-VCSEL-drift. Med OM3-fiber uppnås en räckvidd på upp till 70 meter, under förutsättning att antalet kontakter är begränsat och insättningsförlusten låg (Cisco Systems, 2020).
- **Våglängd:** Liksom tidigare standarder arbetar den vid 850 nm, en våglängd nära infrarött där VCSEL är kostnadseffektivt och lätt att tillverka. Ett problem är laser vid denna våglängd är temperaturkänslig. Prestanda och livslängd försämras signifikant

Av Óscar Ciordia, KD



Óscar Ciordia har mer än 20 års erfarenhet av elektroniksystemteknik i multinationella företag som Hewlett-Packard, Ficoso International och TRW. Under fem år var han chef för den spanska nationella myndigheten för fordonssäkerhetsteknik med målet att avsevärt minska antalet dödsolyckor i trafiken i Spanien. Óscar Ciordia har en magisterexamen i telekommunikationsteknik och en kandidatexamen i tillämpad ekonomi. Han är marknads- och försäljningsdirektör på KD.



Bild 2. 25GBASE-AU kombinerar multigigabit-dataöverföring med tillförlitlighet för nästa generations uppkopplade fordon.

KÄLLA: KD

vid omgivningstemperatur över cirka 85 °C – vilket är långt under de temperaturkrav som gäller i fordonsmiljöer (Pardo et al., 2019).

- **Länkbudget:** Den tillåtna kanalinsättningsförlusten för 25GBASE-SR är endast 1,8 dB, inklusive fiber och samtliga kontakter (IEEE, 2016). Av denna budget är typiskt omkring 1,5 dB allokerat till kontaktin-

sättningsförluster. Antagandet är en ren och stabil miljö – rimligt i datacenter, men helt otillräckligt i fordon med multipla inline-anlutningar, termiska variationer och långvarig åldring.

- **Driftsmiljö:** Standardsändtagare för 25GBASE-SR är normalt klassade för kommersiella (0–70 °C) eller industriella miljöer (typiskt upp till cirka 85 °C) och är inte



Bild 1. Det ökande antalet sensorer i autonoma fordon kräver kraftfulla, ultrasnabba nätverkinuti fordonet.

KALLA: KD

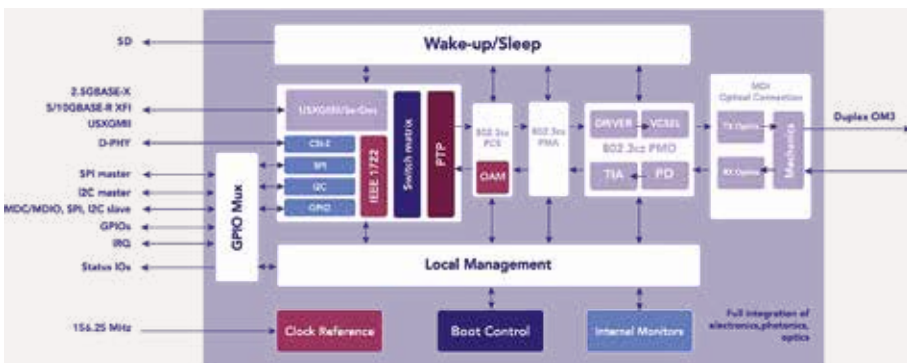


Bild 3. Blockdiagram över KD7251-transceivern för multigigabit med 2,5, 5 och 10 Gbit/s, kompatibel med IEEE Std 802.3cz-standardens specifikationerna för höghastighetsdatakommunikation i fordon. KALLA: KD

anpassad för multigigabit optisk kommunikation i fordonsklass. I stället för att modifiera datacenter teknik som 25GBASE-SR har 25GBASE-AU utformats från grunden för att klara de tuffa fysiska, elektriska och miljömässiga förhållanden som råder i fordon – samtidigt som den levererar 25 Gb/s full-duplex Ethernet med hög tillförlitlighet.

Viktiga tekniska egenskaper hos 25GBASE-AU

● **Optiskt medium:** 25GBASE-AU använder OM3-multimodfiber i en robust konstruktion som är specifikt anpassad för fordonsindustrin. Fibern är vanligtvis tätt buffrad, böjningsökänslig och mantlad med robusta, slitstarka och temperaturbeständiga material. Denna fiber stöder en länklängd på minst 40 m samtidigt som den tål upp till fyra inline-kontakter och ändå bibehåller prestandan under fordonets livslängd (IEEE, 2023).

● **Våglängd:** Till skillnad från SR:s 850 nm VCSEL:er arbetar 25GBASE-AU vid 980 nm, vilket ger överlägsen termisk stabilitet och lång livslängd för lasern. VCSEL som arbetar vid denna våglängd är mindre känsliga för värmeförstöring och bibehåller optisk uteffekt och moduleringsprestanda vid temperaturer upp till 105 °C (Pardo et al., 2019). Detta gör dem mycket tillförlitliga under de kontinuerliga temperaturväxlingar som förekommer i fordonsmiljöer.

● **Modulering och utjämnning:** Liksom 25GBASE-SR använder AU NRZ-modulering, vilket minskar kravet på signal-brusförhållande, och integrerar stark framåttfelkorrigerig (FEC) samt adaptiv utjämnning med realtidsåterkopplingsmekanismer. Dessa DSP-funktioner gör det möjligt för systemet att kompensera för temperaturförändringar, åldersrelaterade förluster, modaldispersion och variabilitet i anslutningar, vilket säkerställer långsiktig felfri prestanda (KDPOF, 2021).

● **Länkbudget och kontaktförlust:** En av de avgörande styrkorna hos 25GBASE-AU är dess generösa länkbudget. Den är konstruerad för upp till 8,5 dB total kanalsättningsförlust vid 25 Gb/s – nästan 7 dB mer än 25GBASE-SR. Detta inkluderar upp till 8 dB för kontaktförlust, vilket möjliggör användning i verkliga situationer där optiska länkar passerar svåra sträckor med flera, potentiellt ofullkomliga anslutningar. Denna marginal är avgörande för att uppnå "nollfel" i kommunikationen under en livslängd på 15 år i fordonet.

● **Miljöklassificering:** Alla komponenter i 25GBASE-AU-transceiverimplementeringen är kvalificerade enligt AEC-Q100 klass 2 eller bättre, vilket innebär att de stödjer drift vid omgivningstemperaturer mellan -40°C och +105°C. Denna klassificering säkerställer att PHY förblir funktionell i motorrum, takkameror, bagageutrymmes-ECU:er eller sensornav under sätena utan speciella kylningslösningar (Gorski, 2023).

kvalificerade för det temperaturområde på -40°C till 105°C som krävs i fordonsapplikationer, exempelvis enligt AEC-Q100 Grade 2 (Gorski, 2023). Det finns inget stöd för utökad temperaturbeständighet, ingen vibrationskvalificering och ingen livscykelmodellering utöver några få år.

● **Anslutningstopologi:** SR är utformad för ett begränsat antal anslutningar i en strukturerad kabeldragning, typiskt en eller två kontakter. Den stöder inte flera inline-anslutningar och tål inte heller mekaniska felinriktningar, damm eller vibrationsinducerade förluster. På grund av det sjunker dess tillförlitlighet kraftigt när den placeras i tuffa fordonsmiljöer.

● **Diagnostik och utjämnning:** 25GBASE-SR saknar integrerad adaptiv utjämnning, framåttfelkorrigerig (FEC) samt inbanddiagnostik (drift-, administrations- och underhållsfunktioner, OAM), som obligatoriska delar av standarden. Dessa funktioner är antingen valfria eller förutsätts hanteras av värdsystemet. I nätverk av fordonsklass är motsvarande mekanismer dock centrala för att proaktivt kunna upptäcka, kompensera och korrigerar gradvisa försämringar av länkar.

Även om 25GBASE-SR är en beprövad lösning för höghastighetskommunikation inom rack i datacenter, var den aldrig avsedd för användning i fordon. Beroendet av rena fiberkanaler, korta avstånd och strikt begränsade kontaktförluster innebär att tekniken blir känslig i miljöer där temperaturvariationer, mekaniska vibrationer och elektromagnetiska störningar är normaldrift.

Dessutom begränsar dess snäva länkbudget för kanalsättningsförlust på bara 1,8 dB dess praktiska användning inom fordonsområdet. Även en enda feljusterad eller förorenad kontakt kan få en 25GBASE-SR-länk att överskrida sin förluströskel. Ett fordon kan dock ha tre, fyra sådana kontakter i en enda optisk väg där var och en adderar förlust, reflektioner och modala variationer.

Av alla dessa skäl är 25GBASE-SR dåligt lämpad för fordonsmiljöer. Att anpassa den för fordon skulle kräva inte bara en robustare konstruktion, utan en total omdesign – som 25GBASE-AU redan har uppnått.

25GBASE-AU: Specialutvecklad för fordonsnät

25GBASE-AU, definierad i IEEE 802.3cz-2023, är en nästa generations PHY som är särskilt

- Mekanisk motståndskraft:** 25GBASE-AU-transceivrar och -kontakter testas för stötar, vibrationer, fuktinträning och felinriktning av kontakter. Till skillnad från LC-kontakterna som används i SR-transceivrar använder AU kompakta, fordonskvalificerade optiska kontakter som bibehåller inriktningen och signalintegriteten under kontinuerlig rörelse.
- Diagnostik och underhåll:** Standarden inkluderar in-band-funktioner för drift, administration och underhåll (OAM) för länkövervakning, väcknings- och vilofunktioner samt feldiagnostik. Detta möjliggör realtidsdetektering av försämringar, såsom strömavbrott eller kontaminerade kontakter, vilket gör det möjligt att utföra förebyggande underhåll innan fel uppstår (IEEE, 2023).
- Energieffektivitet och integration:** Fordonssystem kräver kompakta lösningar med låg strömförbrukning. 25GBASE-AU PHY är utformade för att förbruka mindre än 1 W, även vid drift i 25 Gb/s. Dessutom möjliggör deras integration i samförpackade kiselmoduler direkt SMT-montering på ECU:er, vilket eliminerar behovet av skrymmande optiska sändtagare som de som används i 25GBASE-SR-system.



på 8,5 dB vid 25 Gb/s är det som möjliggör multigigabitnätverk i fordon trots extrema temperaturer, fiberåldring och komplexa kontakter. Detta är förhållanden där 25GBASE-SR helt enkelt skulle misslyckas. I huvudsak möjliggör 25GBASE-AU 25 Gb/s Ethernet under samma tuffa förhållanden där äldre kopparlösningar en gång dominerade, och erbjuder inte bara prestandaparitet utan också ett stort framsteg när det gäller vikt, EMI-immunitet och livslängd.

Teknisk jämförelse: Varför 25GBASE-AU överträffar 25GBASE-SR för fordonsindustrin

Nu när vi har undersökt designen och syftet med både 25GBASE-SR och 25GBASE-AU kan vi granska skillnaderna mellan dem i de viktigaste dimensioner som är relevanta för fordonsapplikationer. Kontrasten blir särskilt tydlig när man tittar på länkbudget, termisk

motståndskraft, stöd för kontakter och långsiktig robusthet.

Slutsats

I takt med att fordonen i allt högre grad integreras med komplexa sensorer, högupplösta kameror, LiDAR och centraliserade datorplattformar är 25 Gb/s-nätverk i fordon inte längre en futuristisk lyx – det är en teknisk nödvändighet. De fysiska och miljömässiga kraven på dessa nätverk skiljer sig dock från allt som finns i datacenter. De kräver teknik som kan fungera inom ett brett temperaturområde, tåla försämring av kontakter och leverera felfri kommunikation under 10–15 års daglig användning.

25GBASE-SR är effektivt i datacentrets rena, temperaturkontrollerade miljöer, men uppfyller inte kraven för användning i fordon.

Däremot har 25GBASE-AU utvecklats just för att fylla denna lucka. Kort sagt gör 25GBASE-AU 25 Gb/s Ethernet möjligt inom fordonsindustrin utan kompromisser.

Utvecklingen av 25GBASE-AU visar att det inte räcker med att bara anpassa datacenter-teknik. Det som fordonsapplikationer kräver är en specialkonstruerad design, från det fysiska lagret till förpackningen, som förutser verkliga begränsningar. Med 25GBASE-AU har tillverkarna äntligen en standard som kombinerar multigigabitprestanda med fordonsklassad motståndskraft – en grund som är tillräckligt stark för att stödja de autonoma och uppkopplade fordonen under det kommande decenniet.

Varje designbeslut bakom 25GBASE-AU – från våglängd, moduleringschema och DSP-arkitektur till termisk och mekanisk kvalificering och generös länkbudget – har fattats med tanke på verkligheten inom fordonsindustrin. Dess tolerans för kanalförlust

	25GBASE-SR	25GBASE-AU	Comparison
Wavelength	850nm	980nm	Only 980nm device warrants automotive life requirements
Link Budget	1.8 dB	8.5 dB	Critical to allow >10m channels with multiple connectors
Coding/ Modulation	Simple NRZ modulation	Adds FEC + adaptive equalization	Accommodates rough environments and wearing
Env/Mech robustness	No auto qualification	AEC-Q100 grade 2 qualified	Toleration to dust, bending, vibrations, temp..
Package/ Power	Pluggable modules	Co-package device. <0.5W	Single component solderable with low power dissipation

Tabell 1. Teknisk jämförelse: Varför 25GBASE-AU överträffar 25GBASE-SR för fordonsindustrin. Kontrasten blir särskilt tydlig när man tittar på länkbudget, termisk motståndskraft, anslutningsstöd och långsiktig robusthet.

KÄLLA: KD

Attribute	25GBASE-AU	25GBASE-SR
AEC-Q100 Qualification	Yes	No
Vibration Testing	Yes	No
Humidity Resistance	Yes	Not guaranteed
Connector Misalignment Tolerance	High	Low
Long-Term Reliability	15+ years	~5 years (typical IT)

Tabell 2. Jämförelsen visar att 25GBASE-AU är den framtidssäkra tekniken för dataöverföring i fordon.

REFERENSER

Cisco Systems. (2020). *10 Gigabit and 25 Gigabit Ethernet: Technical Overview*. Cisco White Paper.

Gorski, D. (2023). PHY testing for multi-gigabit automotive Ethernet over glass optical fiber. *Electronic Design Magazine*, February 2023.

IEEE. (2016). *IEEE Standard for Ethernet Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s Operation Over MMF*. IEEE Std 802.3by-2016.

IEEE. (2023). *IEEE Standard for Ethernet Amendment 12: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Multi-Gigabit Automotive Optical PHYs*. IEEE Std 802.3cz-2023.

KDPOF. (2021). *Optical Multi-Gigabit Connectivity in Vehicles – Whitepaper*. Madrid, Spain: Knowledge Development for POF S.L.

Pardo, C., Martínez, M., & Rodríguez, J. (2019). *Automotive Optical Multi-Gigabit PHY – Call-For-Interest Presentation*. IEEE 802.3 Next-Gen Automotive Ethernet.

Pérez-Aranda, R., Pankert, J. (2013). *Optical neurons to interconnect sensors and artificial brains in autonomous vehicles*. *Photonics Views*, Volume 21, Issue 1, February/March 2024, Pages 39-43, <https://doi.org/10.1002/phvs.202300047>