



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission

This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

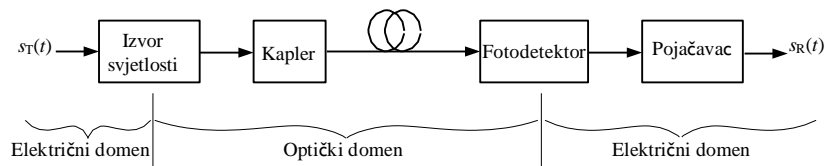
DBBT

**Digital Broadcasting &
Broadband Technologies**

Optički telekomunikacioni sistem

Optički telekomunikacioni sistem se sastoji od tri osnovne komponente: *optički predajnik*, *optičko vlakno* i *optički prijemnik* (sl.1). Funkcija optičkog predajnika je konverzija ulaznog električnog signala u odgovarajući optički signal za prenos optičkim vlaknom, koje u ovom slučaju predstavlja komunikacioni kanal.

Osnovne komponente optičkog predajnika su optički izvori i modulatori. Optički predajnici koriste poluprovodničke izvore svjetlosti, kao što su svjetlosne diode – LED (engl. Light- Emitting Diode) i poluprovodnički laseri.



Sl.1 – Model optičkog sistema prenosa

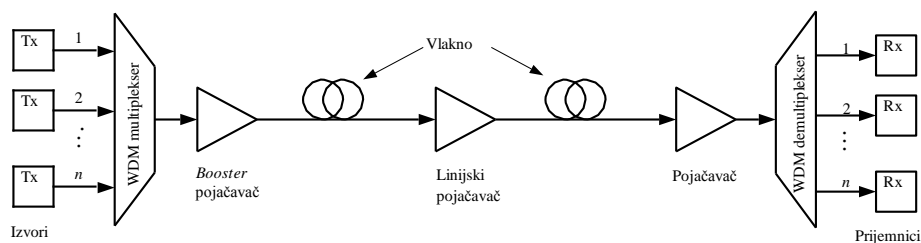
Savremeni optički sistemi prenosa uglavnom koriste poluprovodničke lasere zbog sljedećih karakteristika:

- relativno uzak izlazni snop talasa u poređenju sa LED, što omogućava bolje uvođenje svjetlosti u vlakno;
- emisiju snage od oko 100 mW za predajne lasere;
- mala spektralna širina emitovane svjetlosti omogućava realizaciju prenosa brzinama i preko 40 Gb/s;
- mogućnost direktne modulacije na frekvencijama do 25 GHz.

Ovi izvori imaju nekoliko osnovnih prednosti, kao što su: visoka efikasnost, pouzdanost prenosa, emisiona površina kompatibilna sa dimenzijama optičkog vlakna, odgovarajući opseg talasnih dužina i mogućnost direktne modulacije na visokim frekvencijama. Ukoliko nije moguća direktna modulacija, koristi se, npr. elektro-apsorpcioni modulator za modulisanje jačine svjetlosnog snopa preko električnog napona.

Uloga optičkog prijemnika je konverzija optičkog signala u električni i rekonstrukcija signala nakon prenosa optičkim sistemom. Osnovne komponente su *fotodetektor*i, koji konvertuju svjetlosni signal u električni primjenom fotoelektričnog efekta. Karakteristike fotodetektora su slične onim koje treba da imaju i optički izvori. Najveću primjenu imaju PIN i lavinska (engl. avalanche) fotodioda.

U optičkim sistemima baziranim na WDM multipleksiranju, prenos podataka iz pojedinih izvora se realizuje preko jednog optičkog vlakna, primjenom različitih talasnih dužina (sl.2). Na strani predajnika, podaci iz n nezavisnih izvora se modulišu na n frekvencija nosilaca, svaki sa jedinstvenom talasnom dužinom (λ_i). Razmak između talasnih dužina je određen ITU-T standardima. Multiplekser talasnih dužina kombinuje ove optičke signale i uvodi ih u optičko vlakno. Na prijemnom kraju, demultiplekser razdvaja optičke signale u odgovarajuće kanale. Za ovu namjenu se koristi n optičkih filtara sa *cut-off* frekvencijom (3 dB granična frekvencija) podešenom u odnosu na frekvenciju izvora svjetlosti. Ukupan kapacitet WDM linka zavisi od rastojanja između susjednih kanala u raspoloživom prozoru prenosa.



Slika 2. – Princip WDM multipleksiranja u optičkom sistemu

Osnovni ograničavajući faktor u prenosu optičkim sistemima predstavljaju gubici optičkog vlakna. U ranijim realizacijama sistema, primjenjivali su se regeneratori u kojima se optički signal prvo konvertovao u električni, a onda regenerisao u predajniku. U WDM sistemima se primjenjuju optički pojačavači koji direktno pojačavaju optički signal, bez potrebe za konverzijom u električni.

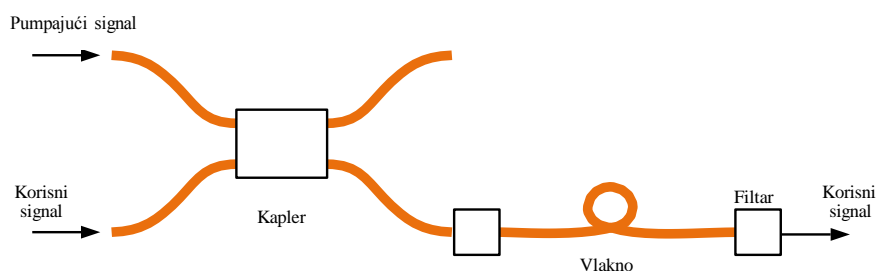
Postoji više vrsta optičkih pojačavača, ali se u praktičnim primjenama najviše koriste erbijum-dopirani optički pojačavač, poluprovodnički optički pojačavači i Ramanovi pojačavači.

Ramanov pojačavač zasnovan je na stimulisanom Ramanovom rasijanju – SRS (engl. Stimulated Raman Scattering), koje sa stanovišta prenosa optičkog signala kroz vlakno predstavlja negativnu pojavu. Međutim, ovaj nelinearni efekat se može iskoristiti za pojačanje signala. Ramanov pojačavač predstavlja nedopirani optički pojačavač koji koristi tzv. pumpajuće lasere velike snage, kako bi se iskoristile nelinearne osobine optičkog vlakna.

Ramanovi pojačavači, u zavisnosti od dizajna, mogu biti diskretni ili distribuirani. Diskretni Ramanov pojačavač se sastoji od dovoljno dugog namotaja specijalno pripremljenog vlakna, koji se pakuje zajedno sa pumpajućim laserom.

Kod distribuiranih Ramanovih pojačavača, isto vlakno koje se koristi za prenos signala, koristi se i za pojačanje. Pumpajući snop se često ubacuje u suprotnom smjeru, da bi se postiglo pojačanje signala i na udaljenostima većim od 20 km.

Na sl.3 ilustrovan je princip rada distribuiranog Ramanovog pojačavača. Pumpajući i korisni signal se uvode u optičko vlakno primjenom optičkog kaplera. Pri tome, primjenom SRS, energija se prenosi od pumpajućeg lasera do signala.



Slika 3 – Šematski prikaz Ramanovog pojačavača

Najznačajnija osobina Ramanovih pojačavača je veliki propusni opseg, koji obuhvata talasne dužine od 1300 nm do 1600 nm (za razliku od EDFA

koji pojačavaju signale u C i L opsezima od 1528–1605 nm), te pojačanja koja omogućavaju prenos terabitskim brzinama. Nedostatak primjene ovog pojačavača predstavlja potreba za korišćenjem pumpajućih lasera velike optičke snage (veće od 1 W).

Praktična realizacija prenosa u optičkim telekomunikacionim sistemima podrazumijeva povezivanje većeg broja linkova, odnosno povezivanja optičkih vlakana. Prenosni parametri tako povezanih linkova moraju uzeti u obzir ne samo karakteristike pojedinih kablova, izraženih kroz gubitke snage, već i statističke osobine takvog povezivanja (uticaj konektora, spojeva, mehaničkih procedura, nehomogenosti materijala i dr.), kao i uticaj hromatske disperzije.

Disperzija, odnosno širenje impulsa, predstavlja jedan od osnovnih faktora koji ograničavaju brzinu i kapacitet prenosa u optičkim sistemima. Ukoliko je ovo širenje značajno, dolazi do pojave intersimbolske interferencije, koja uzrokuje nastanak bitskih grešaka u prenosu. Prilikom projektovanja i implementacije optičkih mreža, moraju se primijeniti odgovarajuće metode za kompenzaciju disperzije. Razlikuju se tri vrste disperzije:

- *modalna* disperzija – širenje impulsa kod ove vrste disperzije nastaje usljed prostiranja modova kroz vlakno putanjama različite dužine;
- *hromatska* disperzija – različite brzine prostiranja spektralnih komponenti svjetlosnog impulsa uzrokuju širenje impulsa;
- *disperzija* polarizacionog moda – u ovom slučaju, širenje impulsa nastaje usljed različitih brzina prostiranja X i Y polarizacione komponente svjetlosnog impulsa.

Modalna disperzija nastaje u višemodnom optičkom vlaknu. Svjetlosni zraci se, pri prenosu kroz vlakno, prostiru različitim putanjama. Neki od njih se prostiru pravolinijski, ali se većina prenosi putanjama različite dužine. Kao rezultat, svjetlosni zraci dolaze u detektor u različitim vremenskim trenucima, odnosno, nastaje širenje impulsa. Primjenom optičkih vlakana sa gradijentnim indeksom prelamanja, smanjuju se efekti modalne disperzije i povećava se propusni opseg do vrijednosti oko 1 GHz/km. Modalna disperzija se ne javlja u jednomodnim vlaknima, zbog postojanja samo jednog moda prenosa.

Hromatska disperzija nastaje i kod jednomodnih i kod višemodnih vlakana. Izvori svjetlosti (laseri i svjetlosne

diode) proizvode svjetlosne zrake različitih talasnih dužina, koji se prenose različitim brzinama. U prijemu, na ulazu u detektor, stižu u različitim vremenima, pri čemu nastaje širenje impulsa.

Disperzija polarizacionog moda nastaje u optičkim sistemima prenosa sa jednomodnim vlaknima, a posebno u kičmenom dijelu mreže, te u WAN mrežama velike brzine. Kod jednomodnih vlakana, jedan mod prostiranja ima dvije polarizacije: horizontalnu i vertikalnu (X i Y komponente). Indeks prelamanja za ove dvije komponente može biti različit, što utiče na njihove relativne brzine.

Vrijednost disperzije je veća na talasnim dužinama oko 1550 nm (u odnosu na opseg 1300 nm), što značajno ograničava domet prenosa. Kompenzacija hromatske disperzije na dugim optičkim linkovima postiže se primjenom kompenzacionog vlakna – DCF (engl. Dispersion Compensating Fiber). Ovo vlakno djeluje kao ekvalizator, kompenzovanjem efekta disperzije, jer u trećem optičkom prozoru 1550 nm ima negativnu vrijednost disperzije. Kalemovi sa kompenzacionim vlaknom se postavljaju duž linka. Time se unose i određeni gubici (3–10 dB), pa je potrebna primjena optičkog pojačavača.

Smanjenje intersimbolske interferencije, odnosno kompenzacija disperzije, postiže se i primjenom vlakna sa Braggovom rešetkom – FBG (engl. Fiber Bragg Grating). FBG je vlakno dužine nekoliko centimetara, sa periodičnim promjenama indeksa prelamanja. Ova tehnologija podrazumijeva kratkotrajno izlaganje vlakna snopu infracrvenog ili ultraljubičastog laserskog zračenja, što uzrokuje promjene indeksa prelamanja. Pomenu-tim postupkom nastaju raspodijeljene refleksije više talasnih dužina, ali sa različitim kašnjenjem, što se primjenjuje za kompenzaciju hromatske disperzije.

Kada se kombinuju različite komponente ili tipovi vlakana, tada je ukupna hromatska disperzija jednaka zbiru pojedinačnih vrijednosti disperzije. Varijacije ukupne disperzije linka zavise od raspodjele elemenata koji su zastupljeni u realizaciji linka.

Opšta formula za određivanje gubitaka na optičkom linku može se dati u sljedećem obliku:

$$A = \alpha \cdot L + \alpha_s \cdot N_s + \alpha_k \cdot N_k \text{ [dB]} \quad (1)$$

gdje je α tipičan koeficijent slabljenja optičkog vlakna na linku, L dužina linka, α_s srednji gubici spojeva, N_s broj spojeva na linku, α_k srednji gubici konektora i N_k broj konektora na linku.

Prilikom projektovanja optičkog sistema prenosa utvrđuje se i odgovarajuća margina, kako bi se uzele u obzir i buduće modifikacije konfiguracije kabla (dodatni spojevi, povećanje dužine kabla, varijacije temperature, starenje materijala i dr.). Koeficijent slabljenja vlakna, α , zavisi od talasne dužine, λ , kao posljedica sljedećih uticaja: Rayleighovog rasijanja, apsorpcije vode, gubitaka makro i mikro povezivanja.

Pr imjer

Odrediti slabljenje linka optičkog sistema prenosa, ako su poznati sljedeći parametri: dužina linka $L = 1,75$ km, broj spojeva $N_s = 7$, srednje slabljenje spojeva $\alpha_s = 0,10$ dB, broj konektorskih spojeva $N_k = 2$, srednje slabljenje konektora $\alpha_k = 0,50$ dB. Sistem radi u drugom prozoru, u kojem podužno slabljenje jednomodnog vlakna iznosi $0,37$ dB/km. Predvidjeti rezervu od 2 dB.

Na osnovu (1), uzimajući u obzir predviđenu rezervu, ukupno slabljenje je:

$$A = 0,37 \cdot 1,75 + 0,10 \cdot 7 + 0,5 \cdot 2 + 2 \approx 4,35 \text{ dB.}$$

Uvođenje Gigabit Ethernet (GbE) standarda u realizaciju telekomunikacionih mreža, primarno je bilo fokusirano na primjenu optičkih vlakana. Razvijeno je nekoliko standarda čije su karakteristike predstavljene u tabeli 1.

Standard 1000Base-SX koristi tzv. *short-wave* lasere na talasnim dužinama oko 850 nm. Osnovna karakteristika ove vrste lasera je efikasno

povezivanje sa višemodnim optičkim vlaknima – MMF (engl. MultiMode Fiber) za prenos na relativno kratkim rastojanjima. Standard 1000Base-LX koristi *long-wave* lasere na talasnim dužinama bliskim 1300 nm. Ovaj standard obezbeđuje poboljšane performanse na dugim rastojanjima.

| Standard | Tip vlakna | Prečnik jezgra [μm] | λ [nm] | Modalni propusni opseg [MHz/km] | Maksimalno rastojanje |
|----------------|------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1000Base-SX | MMF | 62,5 | 850 | 160 | 220 m |
| 1000Base-SX | MMF | 62,5 | 850 | 200 | 275 m |
| 1000Base-SX | MMF | 50,0 | 850 | 400 | 500 m |
| 1000Base-SX | MMF | 50,0 | 850 | 500 | 550 m |
| 1000Base-LX | MMF | 62,5 | 1300 | 500 | 550 m |
| 1000Base-LX | MMF | 50,0 | 1300 | 400 | 550 m |
| 1000Base-LX | MMF | 50,0 | 1300 | 500 | 550 m |
| 1000Base-LX | SMF | 9,0 | 1310 | – | 5 km |
| 10GBase-SR,SW | MMF | 62,5 | 850 | 160 | 300 m |
| 10GBase-LR, LW | SMF | 8,3 | 1310 | – | 10 km |
| | | 9,0 | | | |
| | | 10,0 | | | |
| 10GBase-ER, EW | SMF | 8,3 | 1550 | – | 40 km |
| | | 9,0 | | | |
| | | 10,0 | | | |
| 10GBase-LX4 | MMF | 50,0 | 1310 | 550 | 300 m |
| 10GBase-LX4 | SMF | 62,5 | | | |
| 10GBase-LX4 | SMF | 10,0 | 1310 | – | 10 km |

Tabela 1 – Specifikacije za Gigabit Ethernet (IEEE 802.3z) i 10GbE (IEEE 802.3ae) standarde

Standard IEEE 802.3ae definiše karakteristike optičkih vlakana potrebnih za ovu vrstu primjene. Standardi koji se odnose na višemodna vlakna su 10GBase-SW i 10GBase-SR, a koriste *short-wave* lasere u opsegu talasnih brzina oko 850 nm, kao što je to slučaj sa 1000Base-SX standardom za GbE. Oznaka S u nazivu standarda se odnosi na sisteme malog dometa (S potiče od Short), oznaka L u 10GBase-LR standardu označava prenos na dugim rastojanjima (engl. Long Range), dok oznaka E u 10GBase-ER standardu određuje prošireni opseg prenosa (engl. Extended Range).

Pomenuti standardi su namijenjeni specifičnim *point-to-point* 10GbE aplikacijama. Oznaka X ukazuje na 8B/10B kodovanje signala, a oznaka R na primjenu 64B/66B postupka za kodovanje signala. Broj 4 u oznaci standarda 10GBase-LX4 ukazuje na četiri talasne dužine, koje se primjenjuju u okviru CWDM (engl. Coarse Wavelength Division Multiplexing) multipleksnih sistema. Ovi sistemi koriste veći razmak između kanala (20 nm), pa ne zahtijevaju precizno upravljanje talasnim dužinama kod predajnih lasera. Maksimalan broj optičkih kanala koji se koriste u prenosu je manji u poređenju sa DWDM sistemima.

Oznaka W u 10GBase-SW standardu odnosi se na WIS (engl. WAN Interface Sublayer), koji obezbjeđuje kompatibilnost između 10GbE uređaja i SONET uređaja u primjenama koje povezuju LAN sa WAN mrežama (interfejsima).

Modalni propusni opseg, izražen u megahercima po kilometru, predstavlja mjeru kapaciteta višemodnih optičkih vlakana u primjenama koje podrazumijevaju prenos gigabitskim brzinama. MMF sa većim modalnim propusnim opsegom podržava prenos na dužim rastojanjima, za datu brzinu prenosa. Modalni propusni opseg je određen osobinama disperzije vlakna, uzimajući u obzir i modalnu i hromatsku disperziju. Prečnik jezgra MMF (50 μm i 62,5 μm) predstavlja jedan od parametara koji utiče na modalni propusni opseg.

Izbor određenog prenosnog medijuma za realizaciju telekomunikacione mreže zavisi od brojnih kriterijuma, a osnovni su:

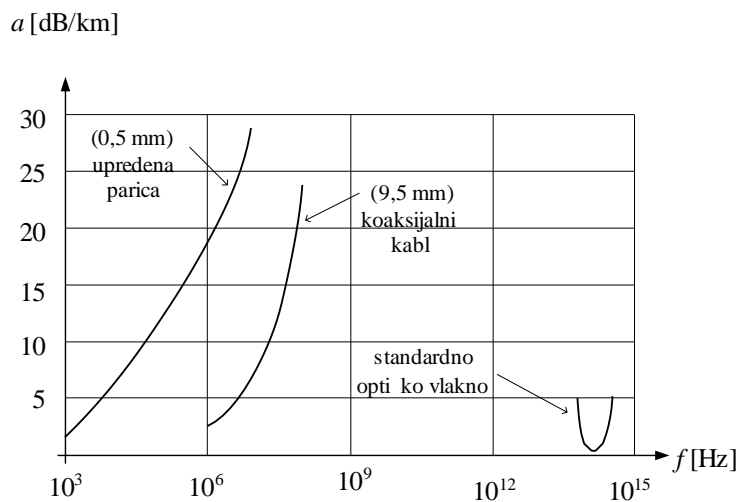
- opšte karakteristike prenosa (propusni opseg, brzina prenosa, greške u prenosu itd.),
- udaljenost između prenosnih uređaja,
- propagaciono kašnjenje,
- pouzdanost i sigurnost prenosa,
- mehanička otpornost i fizičke dimenzije,
- brzina uvođenja sistema u rad,
- održavanje, mogućnost proširenja sistema,
- cijena realizacije sistema.

Za realizaciju Fast Ethernet prenosa (100 Mb/s), na primjer, mogu se koristiti UTP kablovi kategorije 3 i 5, kao i optička vlakna. Poređenje parametara prenosa dato je u tabeli 2.

| Standard | Tip kabla | Dupleks | Maks. nominalno rastojanje |
|------------|--------------|---------------|----------------------------|
| 100Base-T4 | ≥ kat. 3 UTP | polu- ili pun | 100 m |
| 100Base-TX | ≥ kat. 5 UTP | polu- ili pun | 100 m |
| 100Base-FX | MMF | pun | 2 km |
| 100Base-FX | SMF | pun | 40 km |

Tabela 2 – Poređenje karakteristika Fast Ethernet (100 Mb/s) standarda

U tabeli 3 dat je pregled osnovnih parametara prenosa kablovskih sistema. Na sl.4 dat je uporedni prikaz podužnog slabljenja u funkciji frekvencije.



Slika 4 – Poređenje podužnog slabljenja kablovskih sistema prenosa

| Tip medijuma prenosa | Frekv. opseg | Podužno srednje slabljenje [dB/km] | Srednje kašnjenje [μ s] | Rastojanje između ripitera [km] |
|------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Upredena parica | 0–3,5 kHz | 0,2 na $f = 1$ kHz | 50 | 2 |
| Upredene parice (kabl) | 0–1 MHz | 3 na $f = 1$ kHz | 5 | 2 |
| Koaksijalni kabl | 0–500 MHz | 7 na $f = 10$ MHz | 4 | 1–9 |
| Optičko vlakno | 180–370 THz | 0,2–0,5 | 5 | 40 |

Tabela 3 – Poređenje osnovnih karakteristika kablovskih sistema prenosa

PRILOG A

Podjela opsega talasnih dužina prema ITU-T

| Naziv opsega | λ [nm] |
|--------------|----------------|
| O | 1260 – 1360 |
| E | 1360 – 1460 |
| S | 1460 – 1530 |
| C | 1530 – 1565 |
| L | 1565 – 1625 |
| U | 1625 – 1675 |

Podjela optičkih vlakana prema ITU-T

| Preporuka | Opis | Primjena |
|--------------|--|-------------------------|
| G.651 | Standardna višemodna vlakna sa jezgrom od 50 μm | LAN |
| G.652 | Standardna jednomodna vlakna sa nepomjerenom disperzijom | LAN, MAN, WAN |
| G.653 | Jednomodna vlakna sa pomjerenom disperzijom (DSF) | mreže dugog dometa, WAN |
| G.654 | Vlakna sa minimalnim slabljenjem na 1550 nm | MAN, WAN |
| G.655, G.656 | Vlakna sa pomjerenom disperzijom koja nije jednaka nuli (NZ-DSF) | DWDM |

PRILOG B

Primjer monomodnog optičkog kabl

Oznaka kabl: TOSM 03 (X × Y) × II × 0,4 × 3,5 CMAN

TO – telekomunikacioni optički kabl

SM – kabl sa monomodnim optičkim vlaknima (9/125 μm)

03 – nearmirani optički kabl sa PE omotačem

3 – broj cjevčica u kabl

4 – broj vlakana u cjevčici

II – drugo talasno područje (1300 nm)

0,4 – maks. vrijednost koeficijenta slabljenja optičkog vlakna

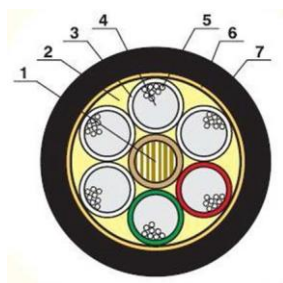
3,5 – srednja vrijednost koeficijenta hromatske disperzije ps/nm · km

C – optička vlakna u cjevčicama

M – kabl punjen vodonepropusnom masom

A – kabl sa aramidnim vlaknima kao spoljašnjim nosećim elementima

N – bez metalnih elemenata.



1. Centralni rasteretni element kabl
2. Masa za punjenje jezgra kabl
3. Cijev sekundarne zaštite optičkog kabl (poliester)
4. Vodonepropusna masa za punjenje cjevčica
5. Optičko vlakno (0,25 mm)
6. Pojasna izolacija sa nitima za ojačanje od kevlara
7. Spoljašnji zaštitni omotač kabl (PE)



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission

This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

DBBT

**Digital Broadcasting &
Broadband Technologies**