



Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών

www.telecom.ntua.gr/photonics

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Photonics Communications Research Laboratory



ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ 4^{ης} ΕΝΟΤΗΤΑΣ

- 1) Κατηγοριοποίηση οπτικής διαμόρφωσης
- 2) Απευθείας διαμόρφωση
- 3) Εξωτερική διαμόρφωση
- 4) Σχήματα διαμόρφωσης πλάτους
NRZ, RZ, CSRZ, DB, SSB, VSB
- 5) Σχήματα διαμόρφωσης φάσης
PSK, DPSK, DQPSK



ΟΠΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Όπως είδαμε στην πρώτη ενότητα, για να μεταδοθεί πληροφορία σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης θα πρέπει να διαμορφωθεί το φως που παράγει μία οπτική πηγή.

Το σήμα μετά τη διαμόρφωση θα είναι της μορφής:

$$E(t) = A(t) \cdot \cos[\omega(t)t + \varphi(t)]$$

Η πληροφορία μπορεί να είναι 'κρυμμένη' είτε στο πλάτος $A(t)$ είτε στη φάση $\varphi(t)$, είτε σπανιότατα στη συχνότητα $\omega(t)$.

Σε κάθε περίπτωση η ισχύς του οπτικού σήματος ισούται με $A^2(t)$



Κατηγορίες διαμόρφωσης

Διαμόρφωση πλάτους (ASK ή OOK)

Διαμόρφωση φάσης (PSK)

Διαμόρφωση συχνότητας (FSK)

Τρόποι διαμόρφωσης

Απευθείας διαμόρφωση (Direct modulation)

Εξωτερική διαμόρφωση (External modulation)

Σχήματα διαμόρφωσης

Για OOK: NRZ, RZ, CS-RZ, Duo-binary κ.λ.π.

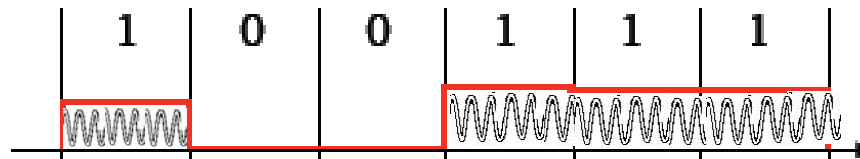
Για PSK: PSK, DPSK, QPSK, DQPSK κ.λ.π.



ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Όλες οι κατηγορίες διαμόρφωσης μπορούν να υλοποιηθούν με τη μέθοδο της απευθείας διαμόρφωσης.

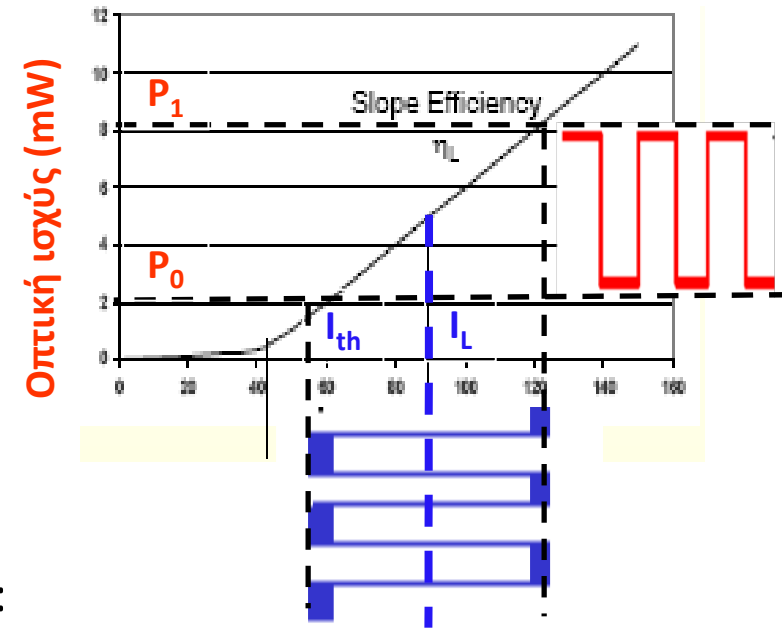
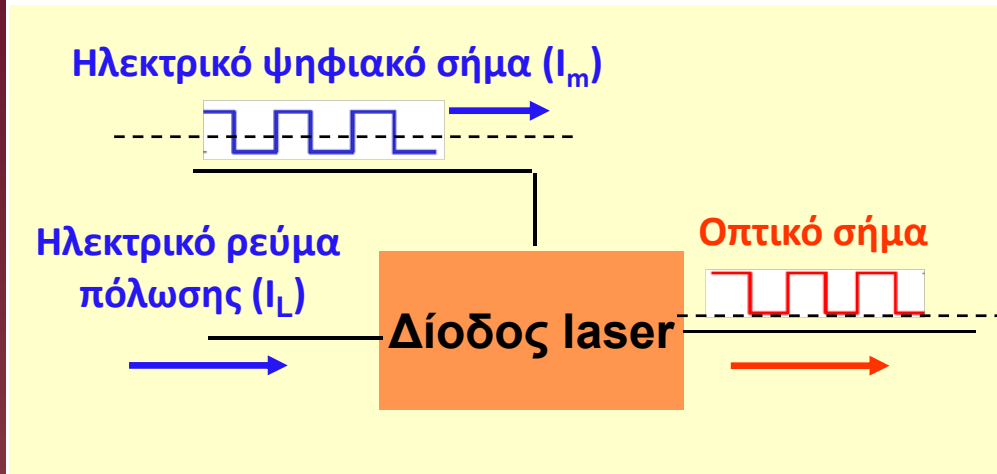
Συνήθως χρησιμοποιείται για διαμόρφωση ΟΟΚ και πιο συγκεκριμένα για σχήμα διαμόρφωσης NRZ. Αποτελεί φθηνή και ικανοποιητική λύση για χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μικρές αποστάσεις διάδοσης.



Το ηλεκτρικό ρεύμα που κάνει την άντληση σε ένα laser ημιαγωγού 'μεταφέρει' την πληροφορία. Σύμφωνα με το σήμα πληροφορίας γίνεται η άντληση και επομένως παράγεται το οπτικό σήμα.



ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ



Η οπτική ισχύς εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$P(I_m) = n_L (I_L - I_{th} + I_m)$$

Ο λόγος σβέσης (extinction ratio) ορίζεται ως:

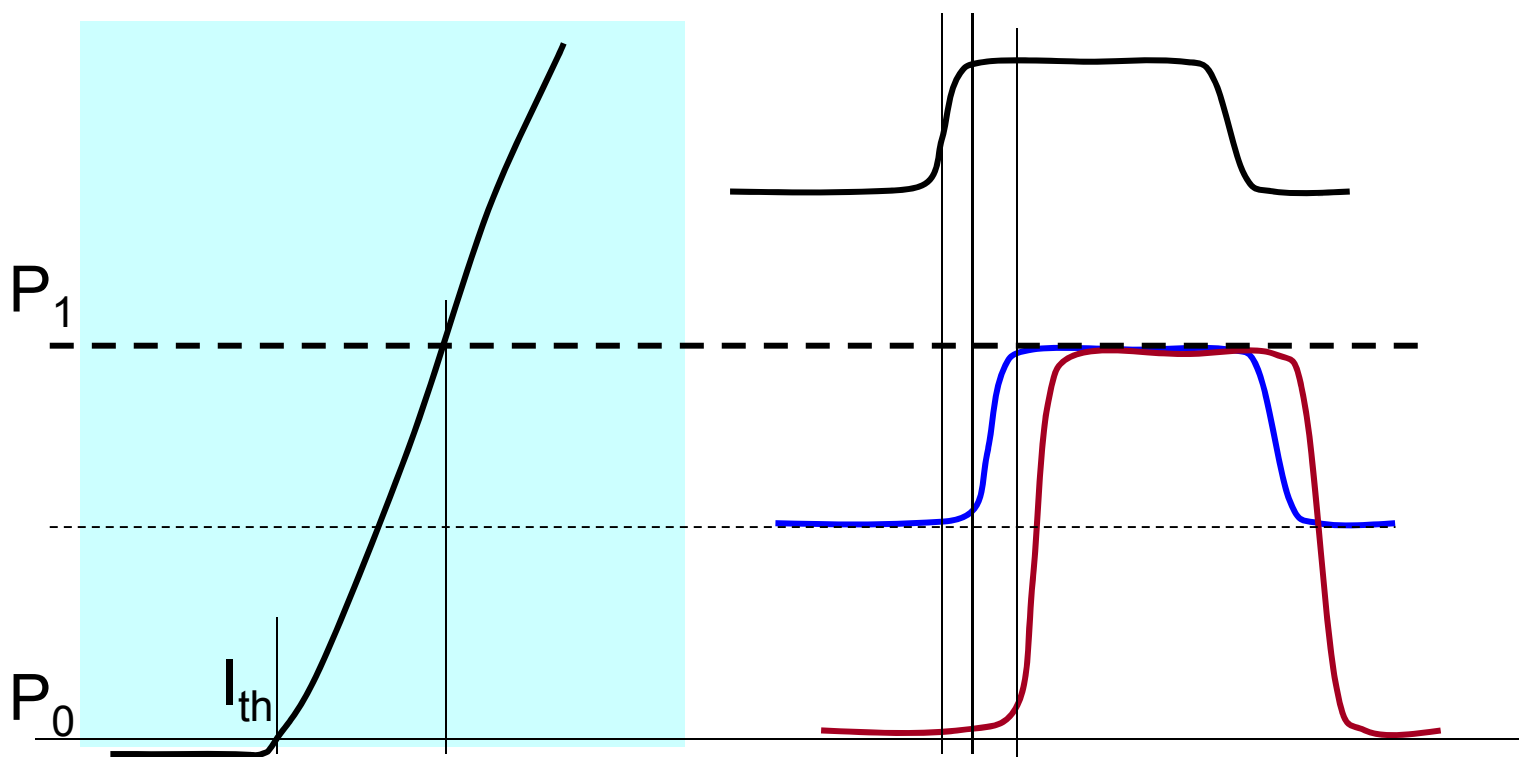
$$ER = \frac{P_1}{P_0}$$



ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Προβλήματα της απευθείας διαμόρφωσης

Η διαδικασία της διαμόρφωσης περιλαμβάνει μεταφορά φορέων, άρα δεν έχει ακαριαία απόκριση και επομένως δεν είναι κατάλληλη για υψίρρυθμα σήματα. Αν το bias είναι ψηλότερο και οι μεταβάσεις μικρότερες τότε η διαδικασία γίνεται πιο γρήγορη, αλλά μειώνεται ο λόγος σβέσης.





ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

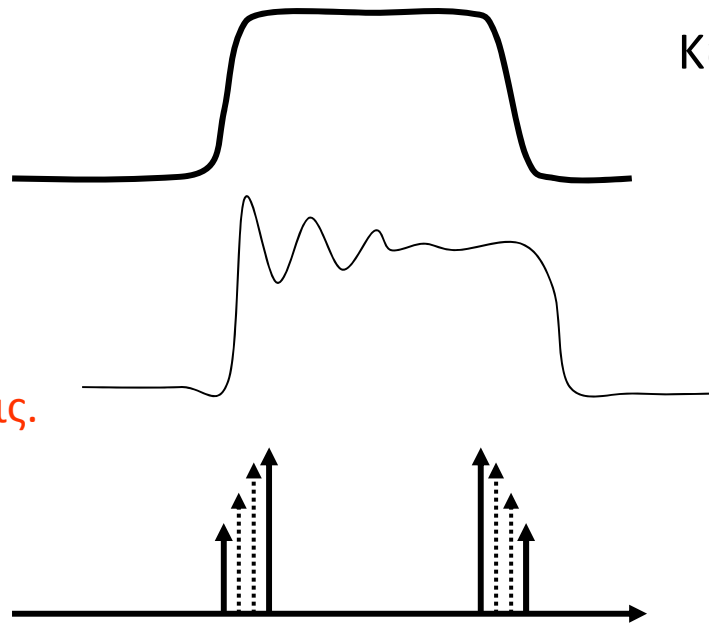
Προβλήματα της απευθείας διαμόρφωσης

Η απευθείας διαμόρφωση προκαλεί ολίσθηση συχνότητας (chirp) κατά τις αλλαγές του επιπέδου άντλησης (τυπ. τιμή $df/dI \sim 120 \text{ GHz/mA}$)

Το chirp με τη σειρά του μειώνει την εμβέλεια της μετάδοσης λόγω διασποράς.

Και για το πρόβλημα του chirp, οι μεταβολές σε μικρότερα εύρη ρεύματος βελτιώνουν το chirp αλλά 'χαλάνε' το λόγο σβέσης.

Η μετάβαση από το '0' στο '1' συνοδεύεται από φθίνουσες ταλαντώσεις.



Κυματομορφή ηλεκτρικού
σήματος

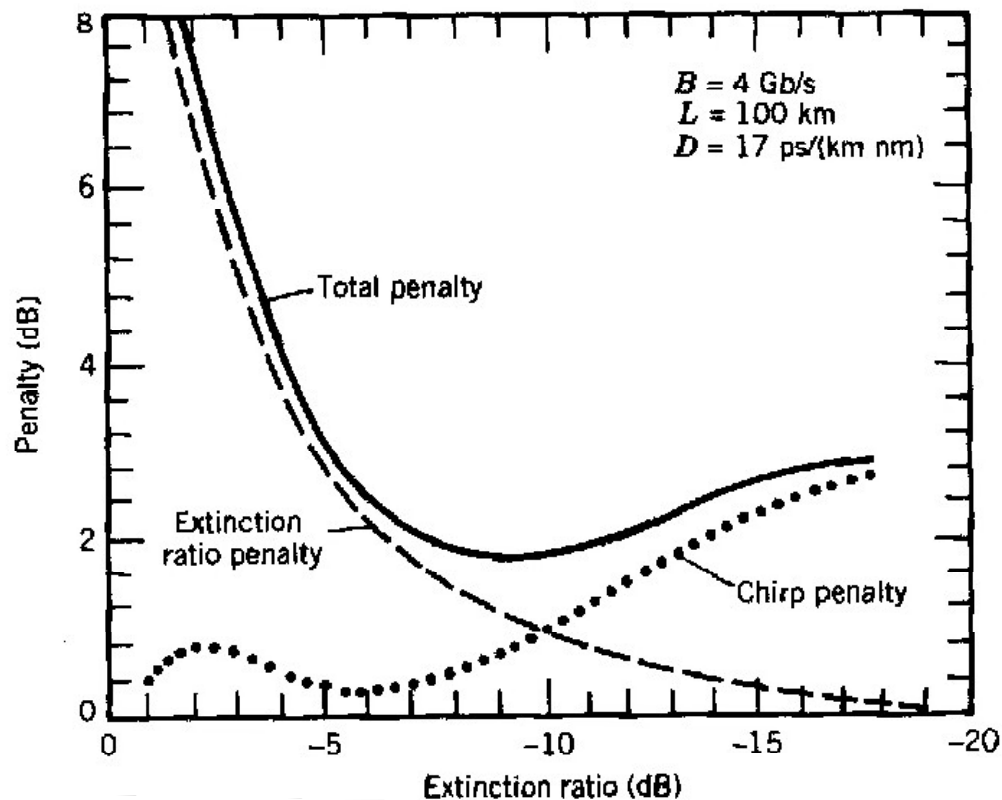
Κυματομορφή οπτικού
σήματος

Μεταβολή στιγμιαίας
συχνότητας



ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Συμβιβασμός μεταξύ ολίσθησης συχνότητας και λόγου σβέσης
(Για ρυθμό μετάδοσης 4 Gbit/s)





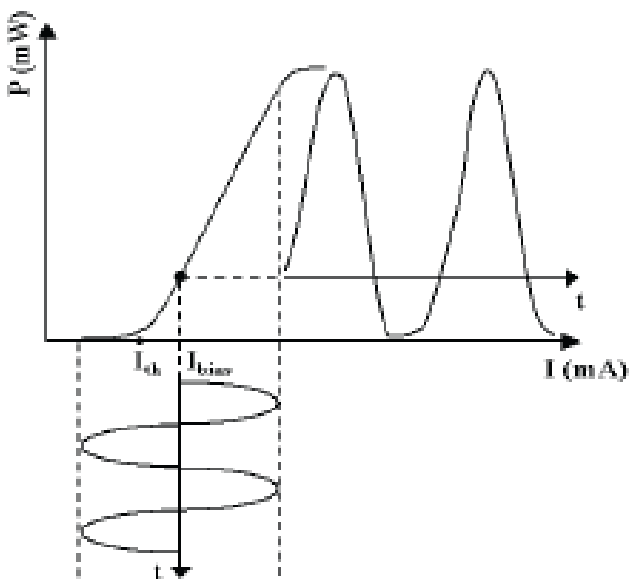
ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Κυριότερες εφαρμογές

Μετάδοση πληροφορίας σε χαμηλούς ρυθμούς (μέχρι 2.5 Gb/s) και σε αποστάσεις μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα (δίκτυα πρόσβασης)

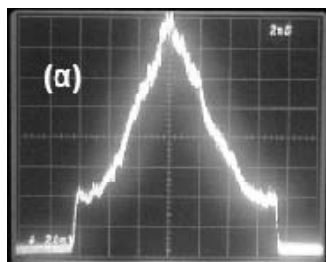
Το κόστος και η απλότητα του πομπού παίζουν σημαντικό ρόλο.

Δημιουργία οπτικού ρολογιού (optical clock) για διαμόρφωση RZ.

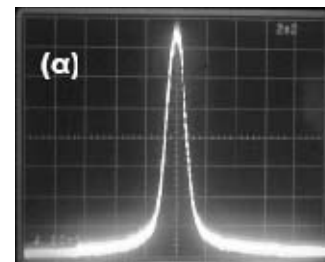


DFB laser δέχεται ως είσοδο ένα μικροκυματικό ημίτονο και βγάζει μία οπτική παλμοσειρά στην ίδια συχνότητα επανάληψης. Χρήση DCF στην έξοδο.

Έξοδος DFB
(FWHM ~ 35 ps)



Έξοδος DCF
(FWHM ~ 9 ps)



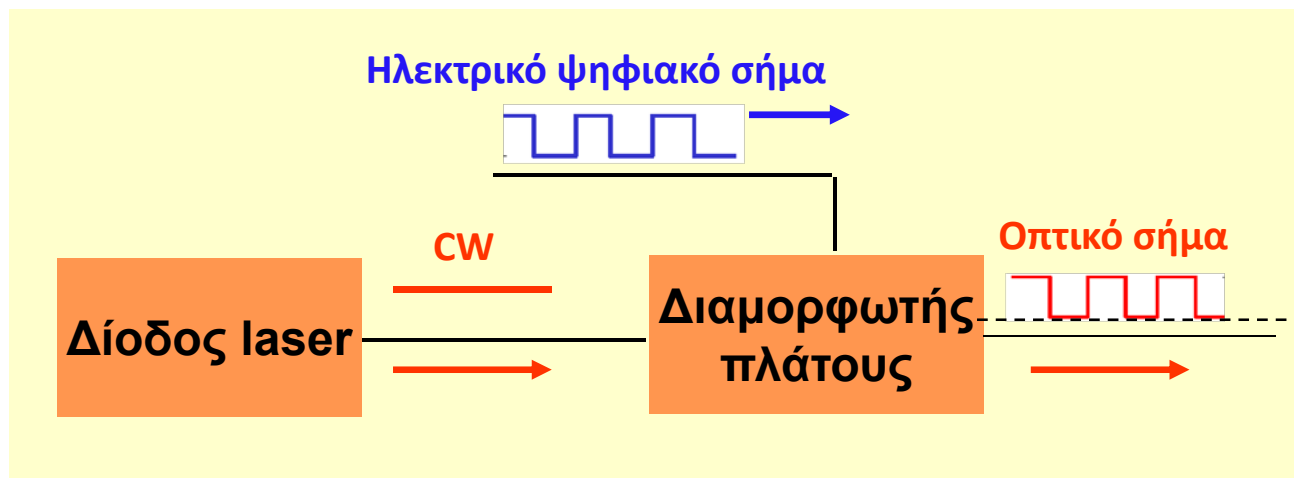


ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η εξωτερική διαμόρφωση βασίζεται περισσότερο σε αμιγώς οπτικά φαινόμενα και επομένως είναι κατάλληλη για διαμόρφωση σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων.

Χρησιμοποιείται και για διαμόρφωση OOK και για διαμόρφωση PSK.

Για σήμα NRZ η διάταξη είναι:





ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Οι διαμορφωτές που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε ένα από τα δύο φαινόμενα:

Ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο

Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.

Φαινόμενο Ηλεκτρο-απορρόφησης

Απορρόφηση του οπτικού πεδίου από ένα υλικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης.



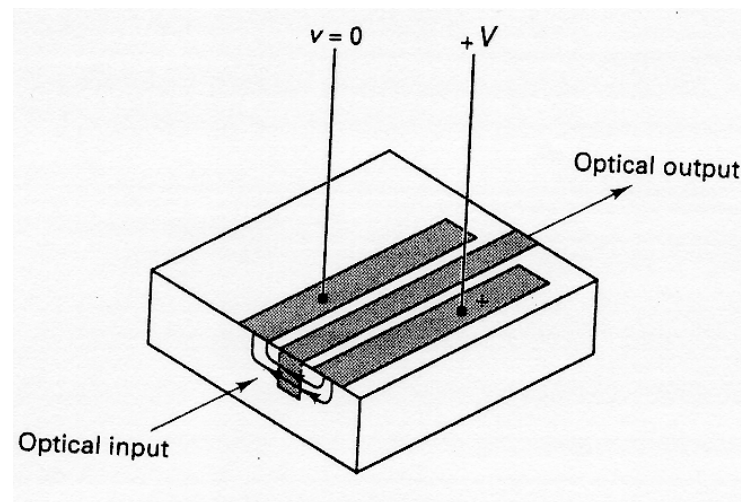
Ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο (φαινόμενο Pockels)

Όταν ένα οπτικό πεδίο διαδίδεται κατά μήκος ενός κυματοδηγού μήκους L η φάση φ που συσσωρεύει είναι:

$$\varphi = k \cdot L = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} \cdot L$$

Αν υπάρξει μια διαφοροποίηση του δ.δ. Δn τότε η διαφοροποίηση της φάσης είναι:

$$\Delta\varphi = \Delta k \cdot L = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta n}{\lambda} \cdot L$$



Σε ηλεκτρο-οπτικά υλικά (LiNbO_3 , GaAs κ.λ.π.) η διαφοροποίηση Δn μπορεί να προέλθει με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου E σε κατάλληλη διεύθυνση:

$$\Delta n \propto r \cdot E$$

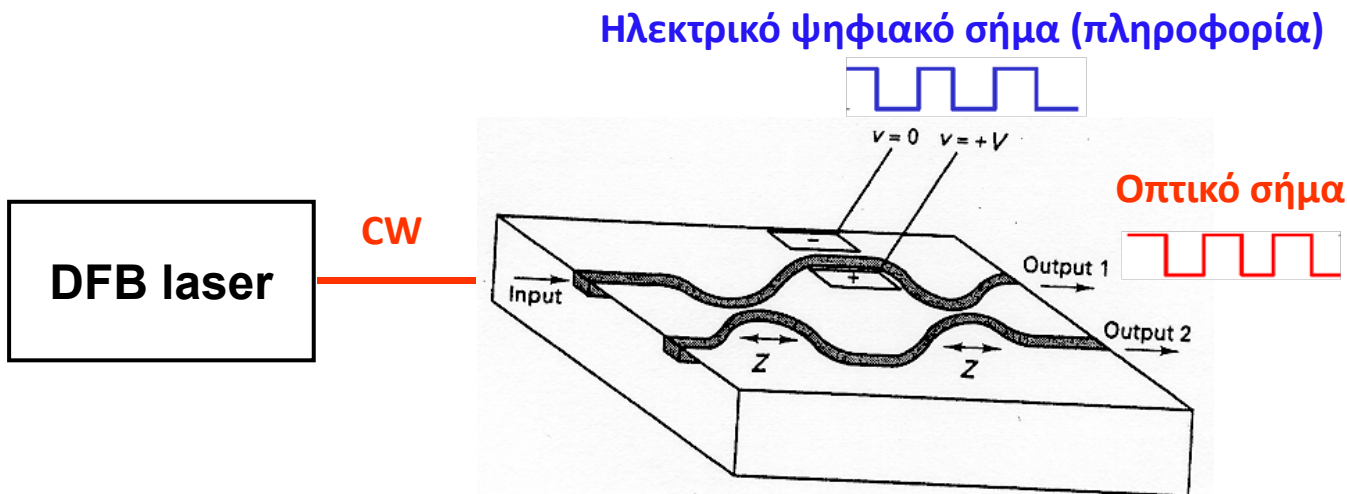
r : ηλεκτροοπτικός συντελεστής.



Εξωτερική διαμόρφωση πλάτους

Η διαφοροποίηση της φάσης $\Delta\phi$ ως απόκριση σε ένα ηλεκτρικό σήμα τάσης χρησιμοποιείται στην εξωτερική διαμόρφωση NRZ.

Για τη μετατροπή της διαφοράς φάσης σε διαφορά (διαμόρφωση) πλάτους απαιτείται η χρήση συμβολομετρικής διάταξης. Συνήθως χρησιμοποιείται το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI).

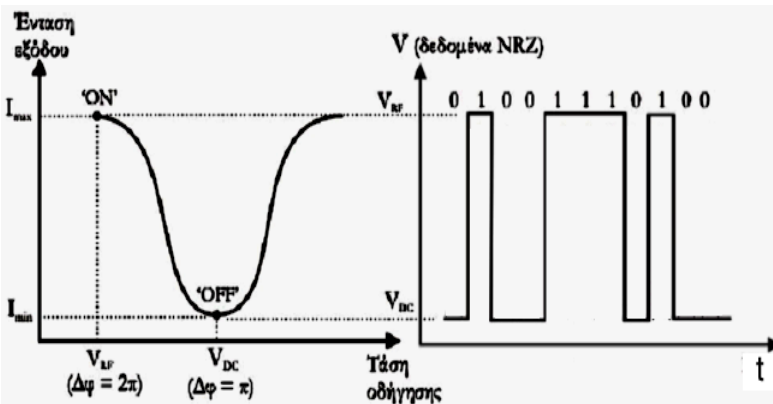
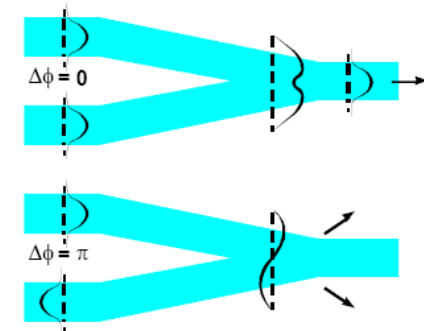
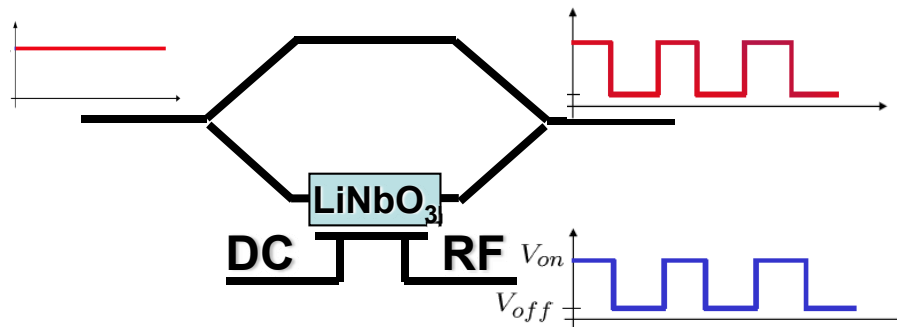




ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ MACH-ZEHNDER

Όταν οι οπτικοί δρόμοι στους δύο βραχίονες είναι ίσοι, δηλαδή $\Delta\phi = 0$, όλη η ισχύς εμφανίζεται στην έξοδο.

Όταν λόγω του ηλεκτρο-οπτικού φαινομένου εισαχθή μία διαφορά φάσης π , τότε στην έξοδο εμφανίζεται μηδενική ισχύς.



$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left[\frac{\Delta\phi(V)}{2} \right]$$

Ανάλογα με το επίπεδο DC, επιλέγεται μία συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας.

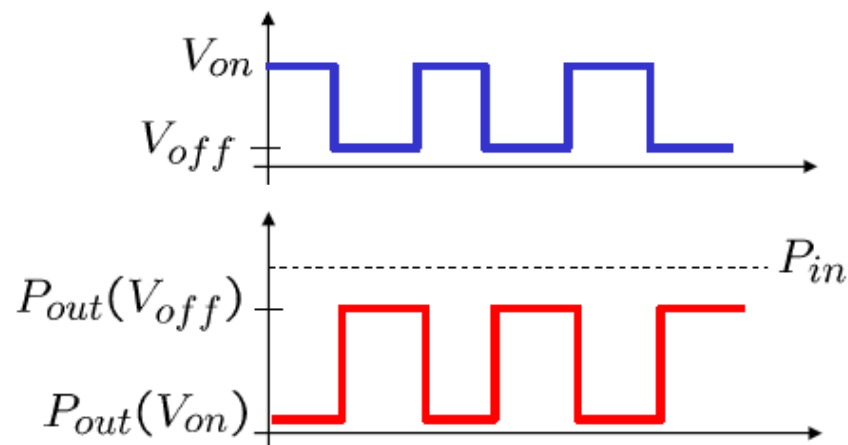
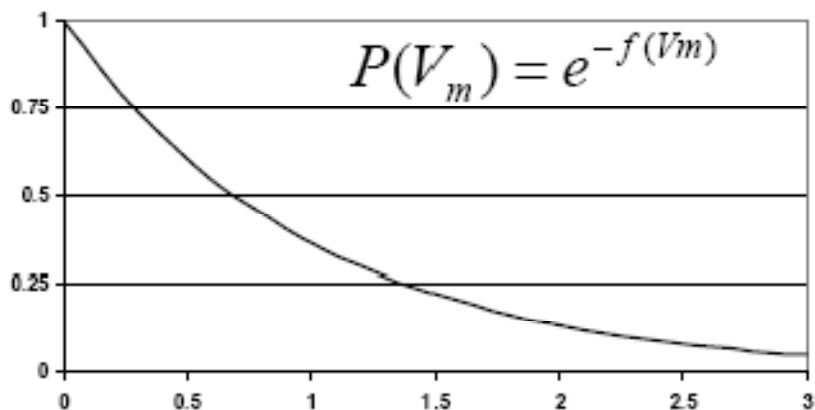


ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (ΕΑΜ)

Το ποσοστό ισχύος που μεταδίδεται μέσα από ένα υλικό είναι:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp(-\alpha L)$$

Ο ΕΑΜ βασίζεται στην εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης α συγκεκριμένων υλικών από την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.



Γενικά, όσο μεγαλύτερη η εφαρμοζόμενη τάση τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση και επομένως τόσο μικρότερη η μετάδοση

Με τον τρόπο αυτό 'γράφεται' η ψηφιακή πληροφορία πάνω στο οπτικό φέρον.



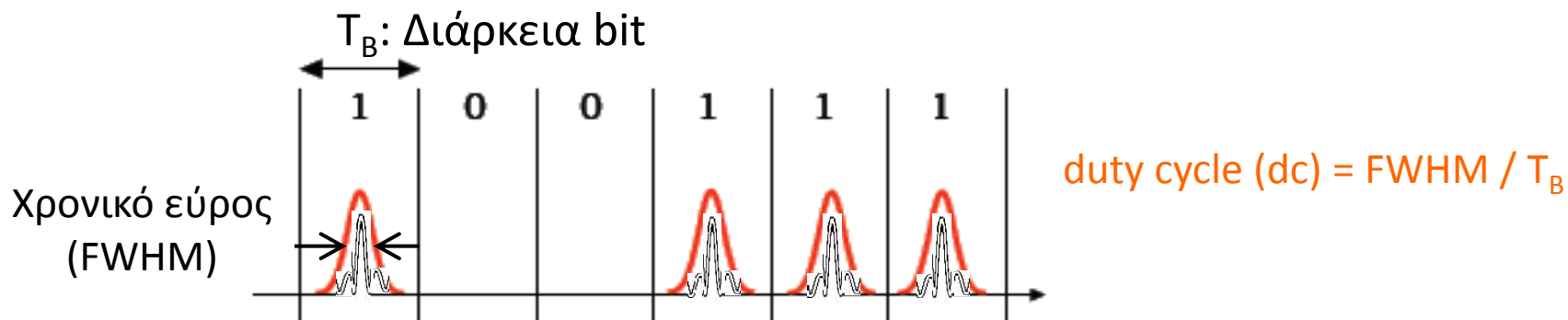
ΣΥΝΟΨΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Τύπος διαμόρφωσης	Πολυπλοκότητα	Συχνότητα διαμόρφωσης
Άμεση διαμόρφωση	<u>Μικρή</u> : Ένα μόνο οπτικό στοιχείο	<12 GHz
Ηλεκτρο-απορρόφηση	<u>Μέση</u> : laser + ημιαγώγιμα ολοκληρώσιμος διαμορφωτής	40+ GHz
Ηλεκτροοπτικό φαινόμενο	<u>Υψηλή</u> : laser και ανεξάρτητος διαμορφωτής	40+ GHz



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ RZ

Το δεύτερο πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σχήμα για διαμόρφωση ΟΟΚ είναι η διαμόρφωση RZ.



Πλεονεκτήματα

Δυνατότητα για πολυπλεξία OTDM και επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης (μέχρι 640 Gb/s) σε ένα μόνο κανάλι.

Διατήρηση χρονισμού σε μεγάλες ακολουθίες '1'.

Μεγαλύτερη ανοχή σε διασπορά

Μειονεκτήματα

Πολυπλοκότητα στον πομπό

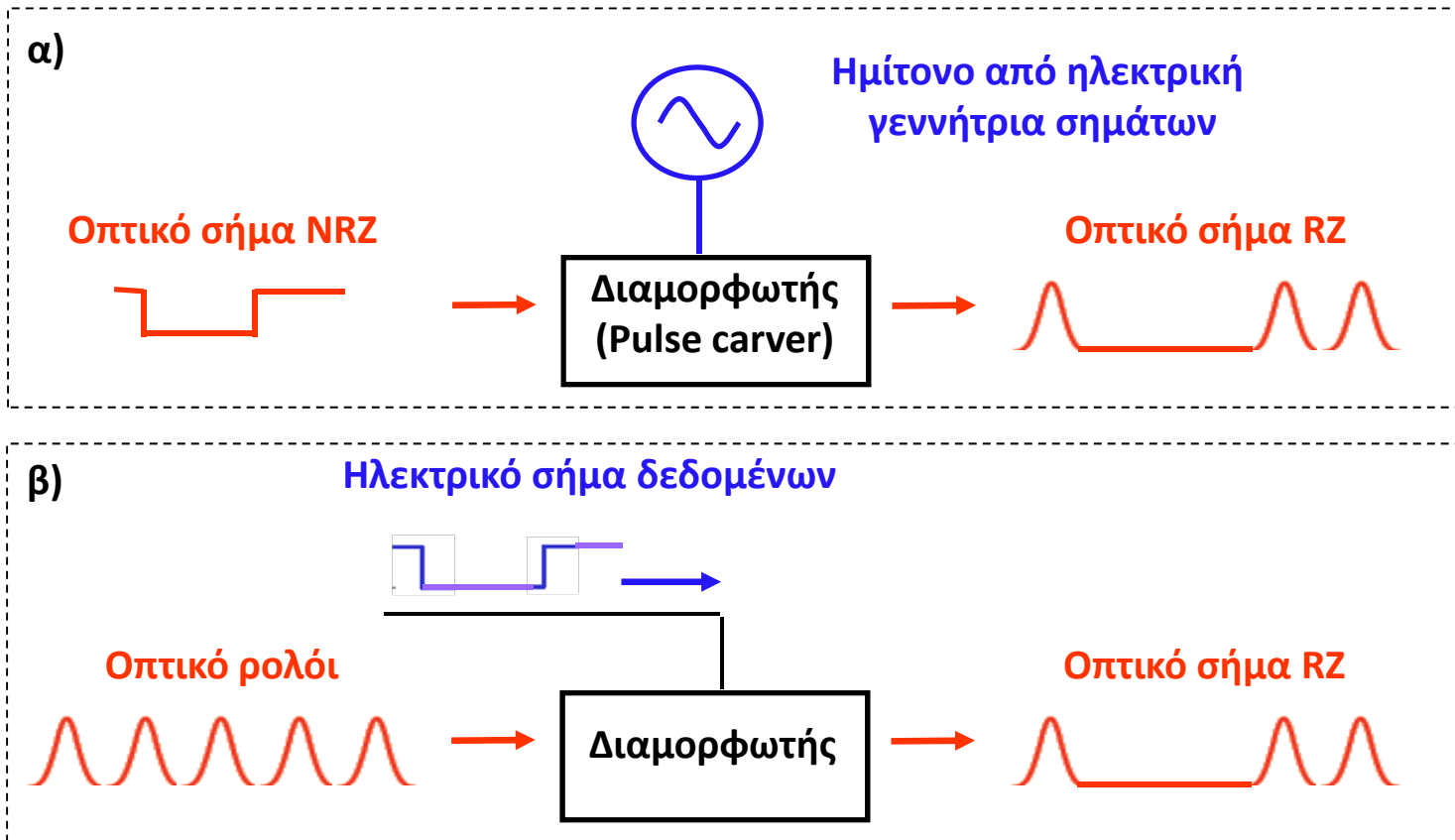
Μεγαλύτερο φασματικό περιεχόμενο για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης

Πιο έντονα μη γραμμικά φαινόμενα



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ RZ

Για την παραγωγή RZ σήματος χρησιμοποιούνται οι εξής δύο τρόποι:

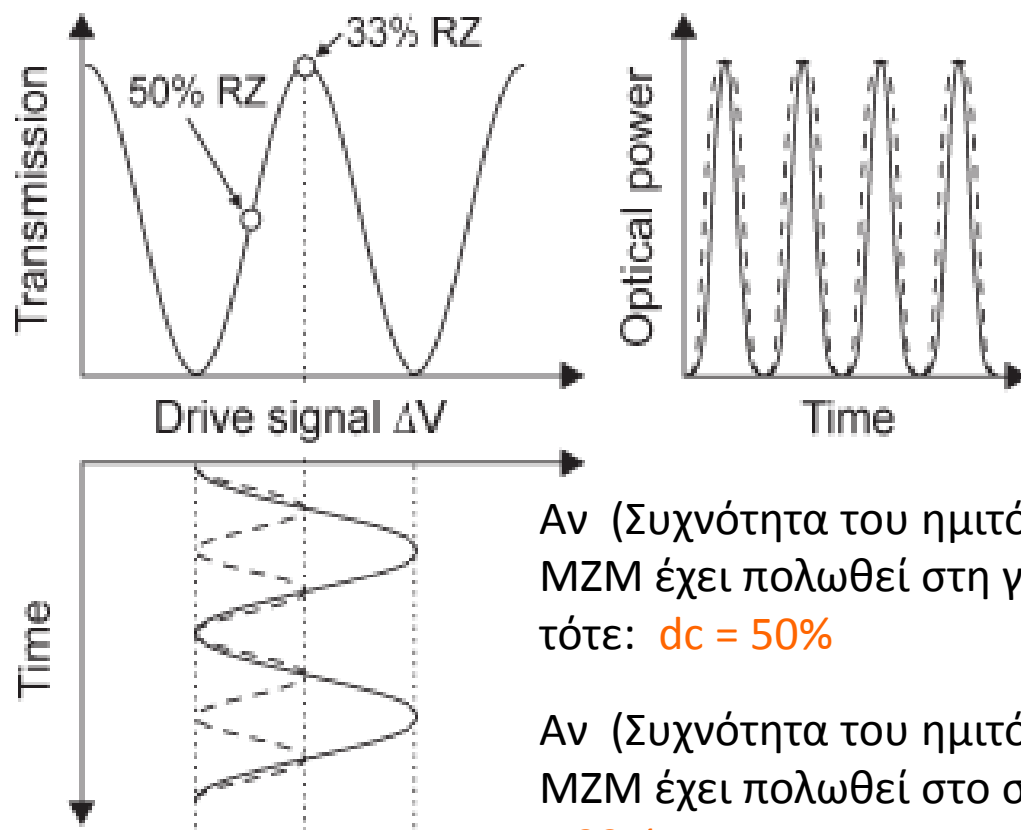


Και με τους δύο τρόπους η πολυπλοκότητα του πομπού RZ είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν του πομπού NRZ



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ RZ

Στον πρώτο τρόπο ένα NRZ σήμα μπαίνει σε έναν εξωτερικό ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder και δημιουργούνται οι παλμοί



Αν (Συχνότητα του ημιτόνου) = (Ρυθμός μετάδοσης) και ο MZM έχει πολωθεί στη γραμμική περιοχή, τότε: **dc = 50%**

Αν (Συχνότητα του ημιτόνου) = (Ρυθμός μετάδοσης/2) και ο MZM έχει πολωθεί στο σημείο μέγιστης μετάδοσης, τότε: **dc = 33%**



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ RZ

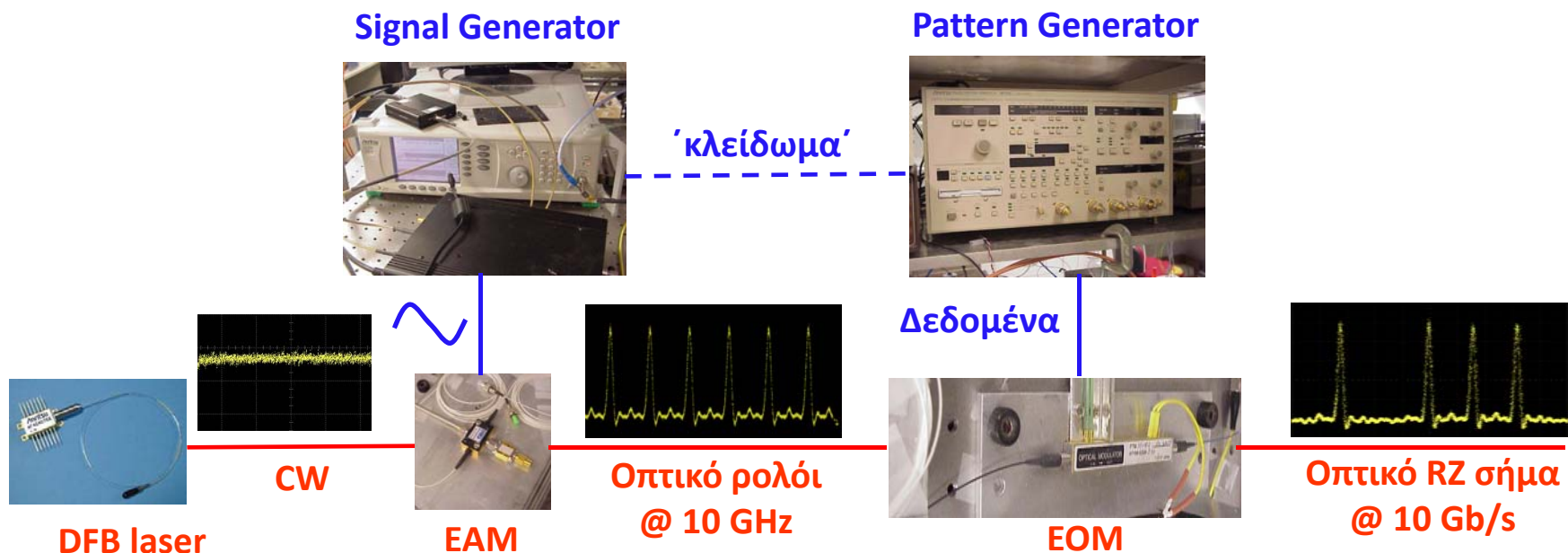
Στο δεύτερο τρόπο, το οπτικό ρολόι ('τρένο παλμών') δημιουργείται με:

Χρήση παλμικού laser (**mode-locked laser**): FWHM 2-3 ps

Απευθείας διαμόρφωση DFB laser (**Gain switching**): FWHM > 7 ps

Εξωτερική διαμόρφωση DFB laser (**Pulse carving**): Χρονικό εύρος > 5 ps

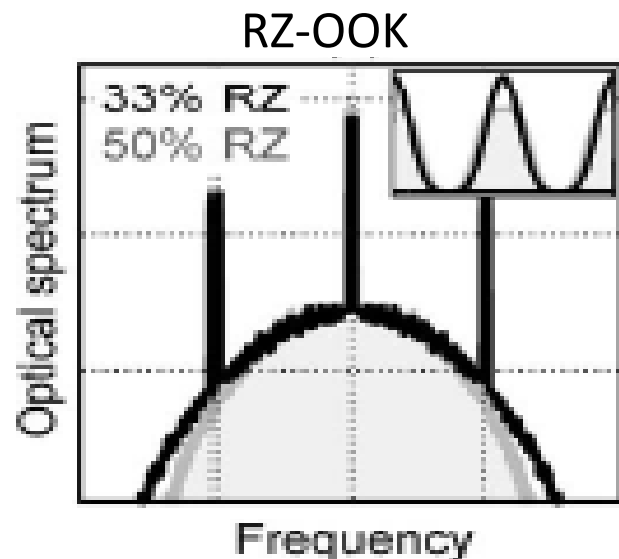
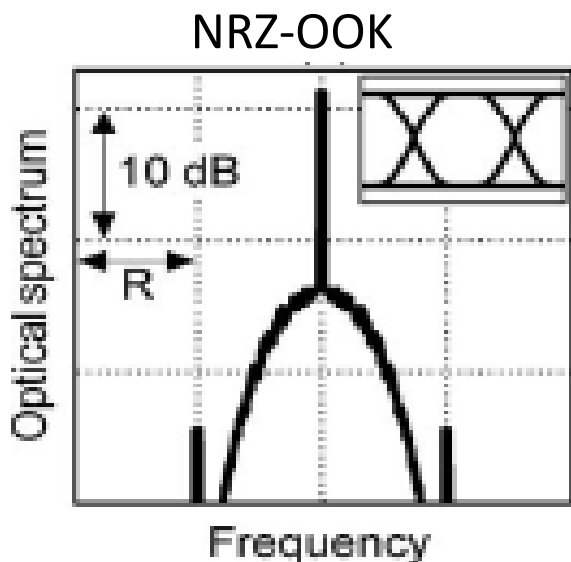
Εργαστηριακή διάταξη υλοποίησης δεύτερου τρόπου:





ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΗΜΑΤΩΝ NRZ ΚΑΙ RZ

Στα διαγράμματα φαίνεται το φάσμα και το διάγραμμα οφθαλμού για σήματα NRZ και RZ (33% και 50% duty-cycle).



Για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης το φάσμα των σημάτων RZ είναι πολύ πιο ευρύ από το φάσμα των NRZ σημάτων (ακόμα πιο ευρύ για 33% RZ).

Στα οπτικά φάσματα ο ρυθμός μετάδοσης δηλώνεται από την απόσταση των φασματικών τόνων.



Κριτήρια αξιολόγησης των σχημάτων διαμόρφωσης

Αποδοτική χρήση φάσματος (spectral efficiency)

Απαιτούμενη ευαισθησία δέκτη και απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος για ανίχνευση

Ανοχή σε φαινόμενα διάδοσης (διασπορά, μη γραμμικότητες)

Πολυπλοκότητα του πομπού και του δέκτη

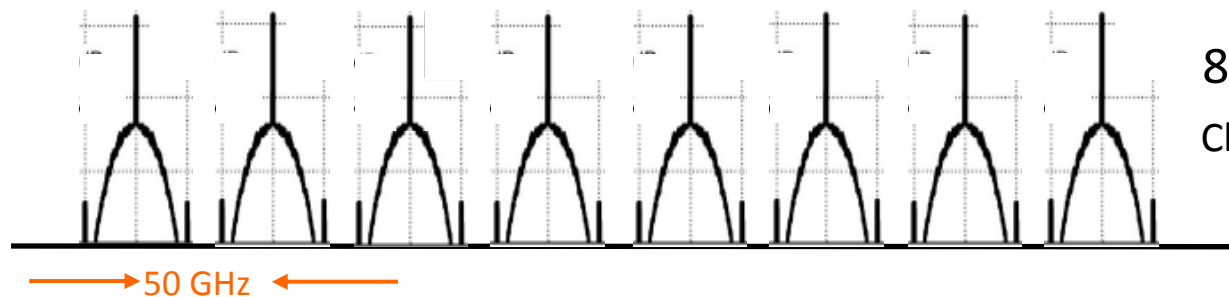
Η αξιοποίηση του φάσματος σε WDM συστήματα προϋποθέτει μεγάλο ρυθμό μετάδοσης ανά κανάλι και μικρή φασματική απόσταση μεταξύ των καναλιών.

Όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης, τόσο μεγαλύτερο το φασματικό εύρος του καναλιού, και επομένως τόσο μεγαλύτερο το απαιτούμενο channel spacing

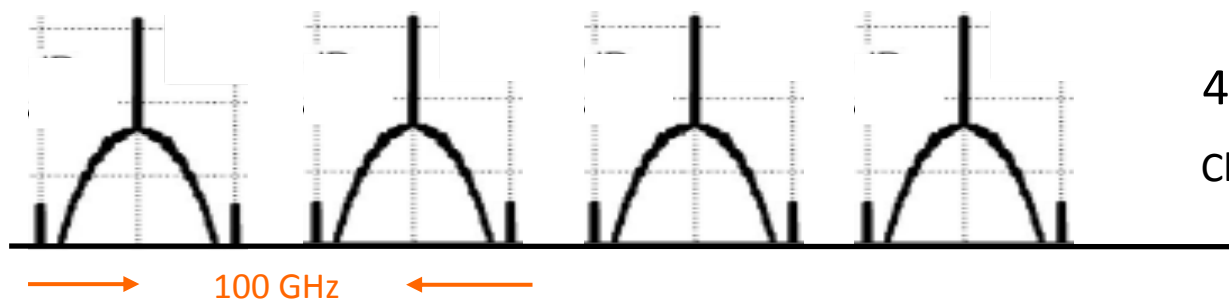


ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Spectral efficiency = (Ρυθμός μετάδοσης ανά κανάλι) / (channel spacing)



8 κανάλια x (10 Gbit/s)
Channel spacing = 50 GHz



4 κανάλια x (20 Gbit/s)
Channel spacing = 100 GHz

Και για τους δύο τρόπους μετάδοσης: **Spectral efficiency = 0.2 bit/s/Hz**

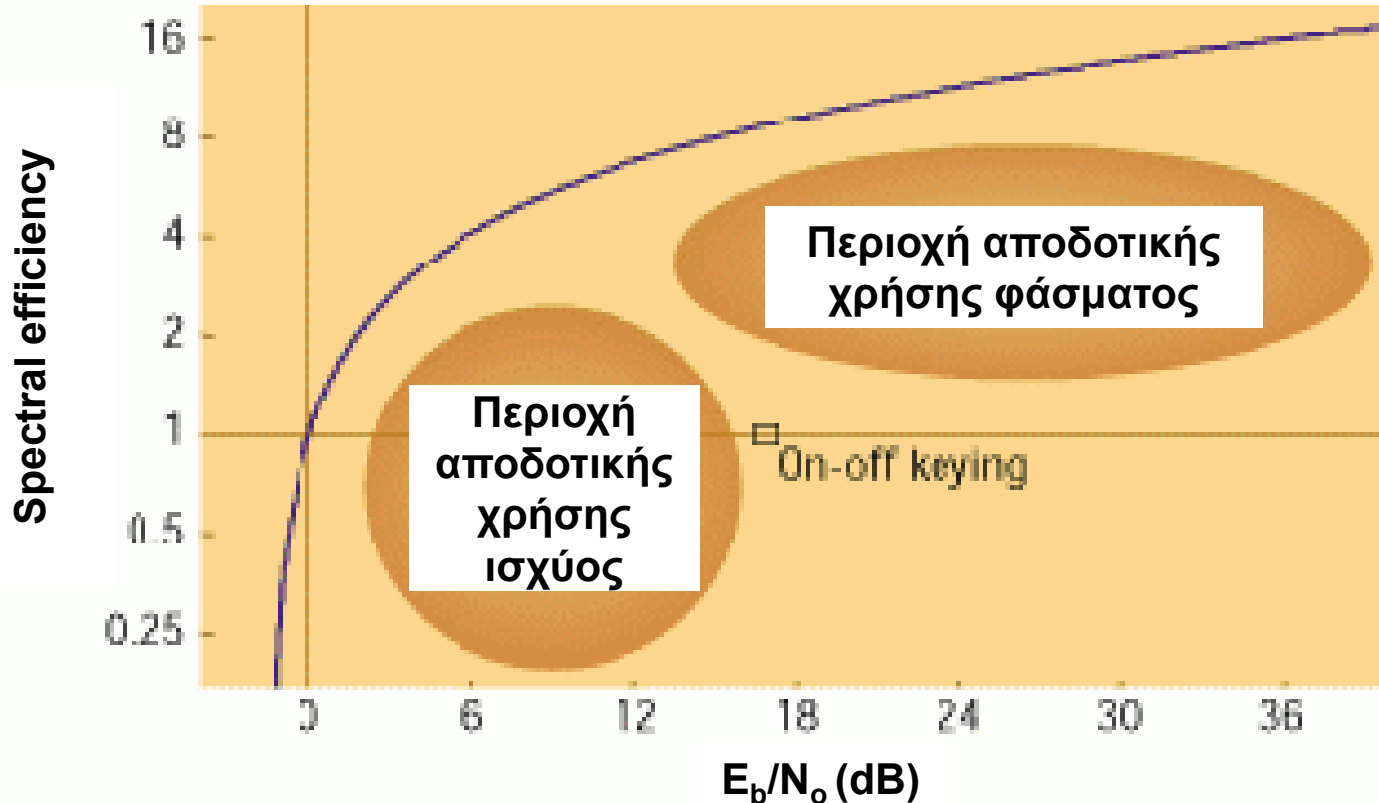
Η λύση είναι η χρήση σχημάτων διαμόρφωσης, τα οποία για τον ίδιο ρυθμό μεταδιδόμενης πληροφορίας, να έχουν στενότερο φάσμα



ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣ vs ΙΣΧΥΟΣ

Διάφορα σχήματα διαμόρφωσης που επιτρέπουν μεγαλύτερη spectral efficiency από τα απλά σχήματα OOK-NRZ και OOK-RZ.

Το τίμημα είναι η ανάγκη υψηλότερης μεταδιδόμενης ισχύος για την επίτευξη καλύτερου σηματοθορυβικού λόγου.





ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στενότερο φάσμα για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης μπορεί εν γένει να επιτευχθεί με:

Πολυεπίπεδα σχήματα διαμόρφωσης (multi-level modulation formats)

Σχήματα διαμόρφωσης όπου το φάσμα φιλτράρεται από τη μία πλευρά του φέροντος (single-sideband (SSB), vestigial-sideband (VSB))

Σχήματα διαμόρφωσης όπου το φάσμα διαμορφώνεται (shaping) και συμπυκνώνεται (carrier-suppressed RZ, duobinary)



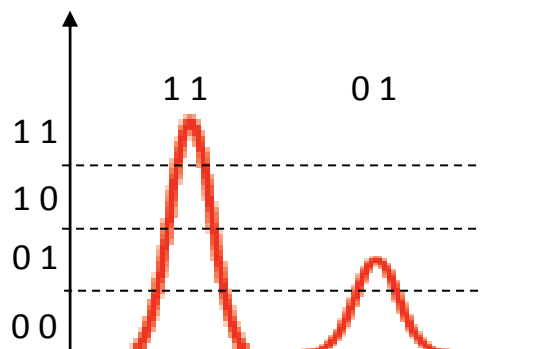
ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (M-ASK)

Όταν πρόκειται για διαμόρφωση πλάτους τα πολυεπίπεδα σχήματα διαμόρφωσης αναφέρονται ως M-ASK.

Αντίστοιχα πολυεπίπεδα σχήματα διαμόρφωσης υπάρχουν και για διαμόρφωση φάσης, τα οποία θα εξεταστούν στη συνέχεια.

Στην M-ASK $\log_2(M)$ bits πληροφορίας κωδικοποιούνται σε ένα μόνο παλμό. Επομένως η ίδια πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί με μειωμένο ρυθμό μετάδοσης συμβόλων (παλμών):

$$R_{\text{symbol}} = R_{\text{data}} / \log_2(M)$$



Η μεταδιδόμενη πληροφορία είναι **1 1 0 1** και μεταδίδεται χρησιμοποιώντας δύο παλμούς.

Με τον τρόπο αυτό **διπλασιάζεται το spectral efficiency**.

Στον δέκτη όμως πρέπει να φθάσει μεγαλύτερη ισχύς και με καλύτερο OSNR, ώστε να γίνει σωστά ο διαχωρισμός.



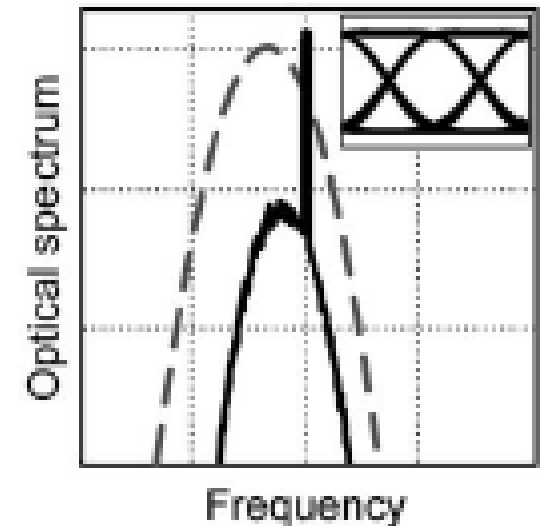
SINGLE-SIDEBAND (SSB) – VESTIGIAL-SIDEBAND (VSB)

Με οπτικό φιλτράρισμα είναι δυνατόν να απορριφθεί το μισό φασματικό περιεχόμενο (SSB) αυξάνοντας τη δυνατότητα να τοποθετηθούν πιο κοντά τα κανάλια WDM.

Το φάσμα του σήματος πληροφορίας στη βασική ζώνη είναι συμμετρικά τοποθετημένο γύρω από το 0. Το ίδιο συμβαίνει και στο οπτικό σήμα γύρω από τη συχνότητα του φέροντος. Η απόρριψη του μισού φασματικού περιεχομένου δεν στερεί τίποτα από τη μεταδιδόμενη πληροφορία.

Στην πράξη ένα οπτικό φίλτρο τοποθετείται ασύμμετρα γύρω από το φέρον, οπότε η μία φασματική πλευρά φιλτράρεται περισσότερο από την άλλη.

Στην περίπτωση αυτή η διαμόρφωση ονομάζεται vestigial side-band (VSB).



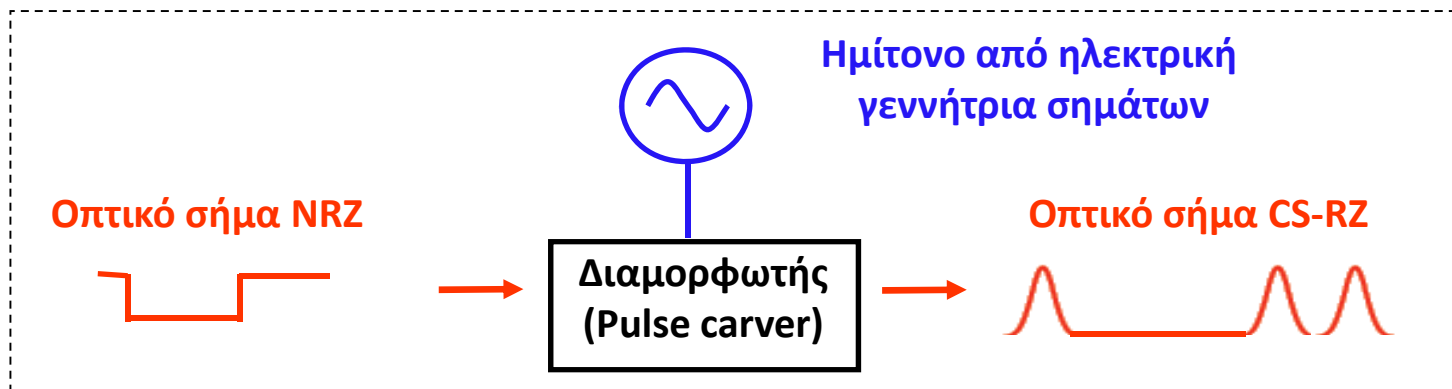


CARRIER-SUPPRESSED RZ (CS-RZ)

Η διαμόρφωση CS-RZ είναι δύο επιπέδων και παρέχει στενότερο φάσμα από τη διαμόρφωση RZ για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης.

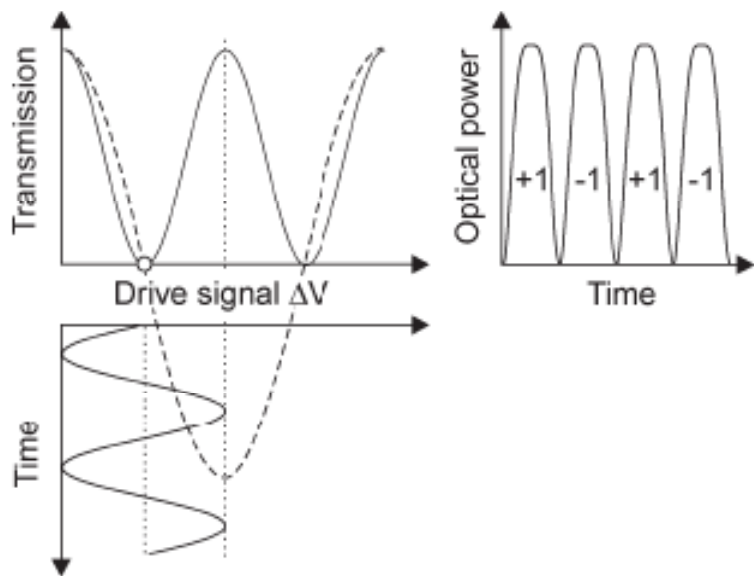
Ως αποτέλεσμα η διαμόρφωση CS-RZ προσφέρει αυξημένη spectral efficiency και μεγαλύτερη ανοχή σε φαινόμενα διασποράς.

Όπως και για την απλή διαμόρφωση RZ, ένα οπτικό σήμα NRZ εισέρχεται σε ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI), για να σχηματιστούν οι παλμοί.



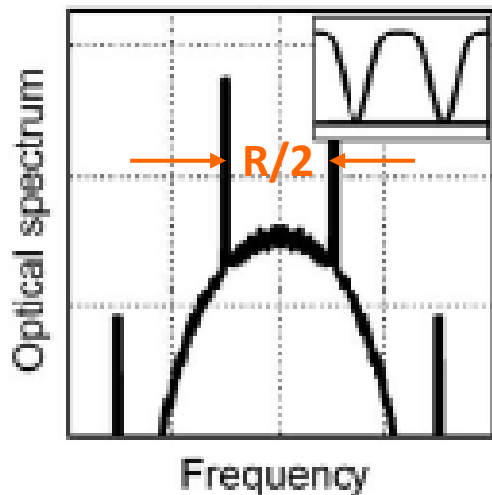


CARRIER-SUPPRESSED RZ (CS-RZ)



Ως σημείο λειτουργίας (bias) επιλέγεται το ελάχιστο της μετάδοσης.

Το ηλεκτρικό ημίτονο έχει τη μισή συχνότητα από το ρυθμό μετάδοσης.



Η φάση διαδοχικών bits είναι αντίθετη (ανεξάρτητα από την πληροφορία).

Μηδενίζεται η ισχύς του φέροντος.

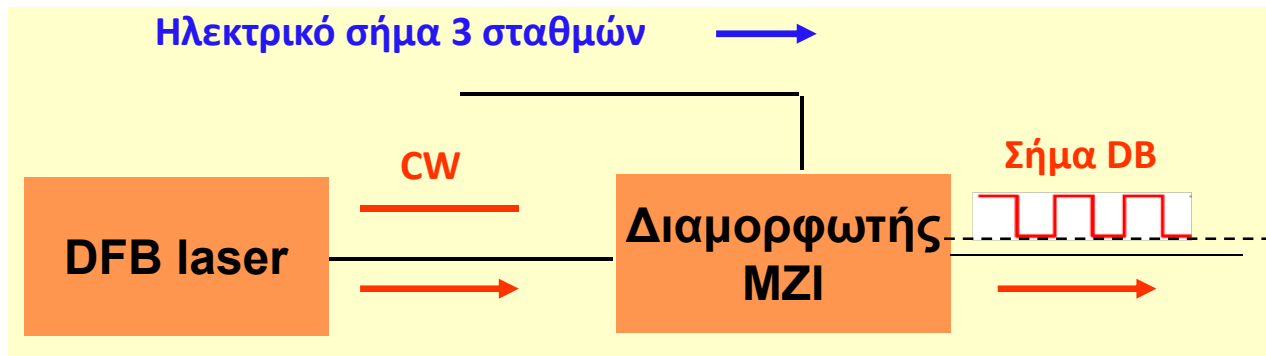


ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DUOBINARY (DB)

Η DB αποτελεί παράδειγμα συσχετισμένης (correlative) κωδικοποίησης:

Από το αρχικό σήμα πληροφορίας (data) προκύπτει ένα νέο ψηφιακό σήμα (precoded data) όπου έχουμε αλλαγή της κατάστασης για κάθε '0' των data.

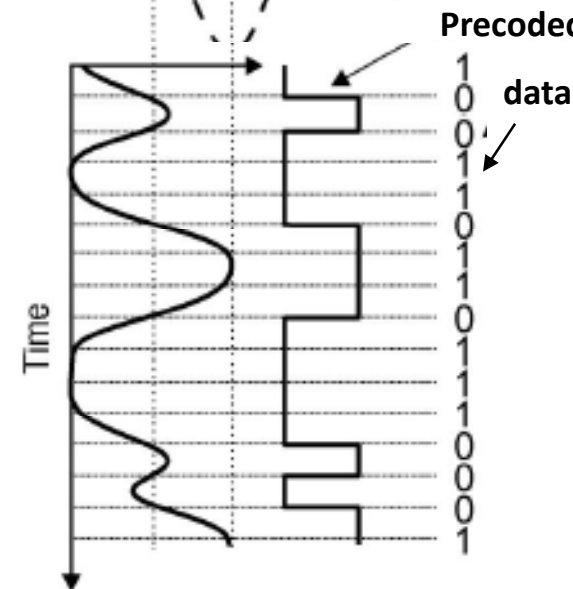
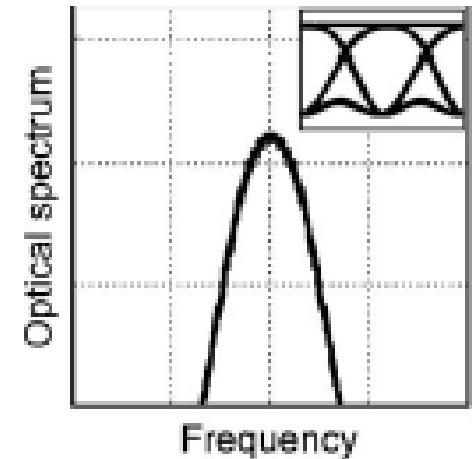
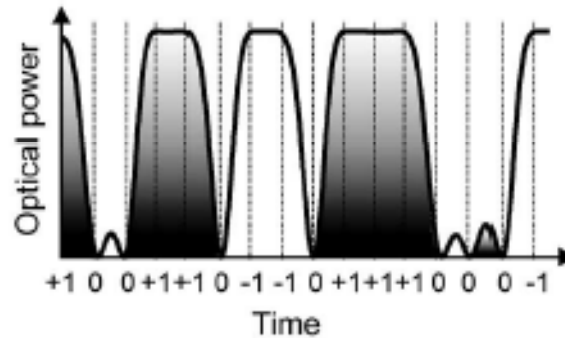
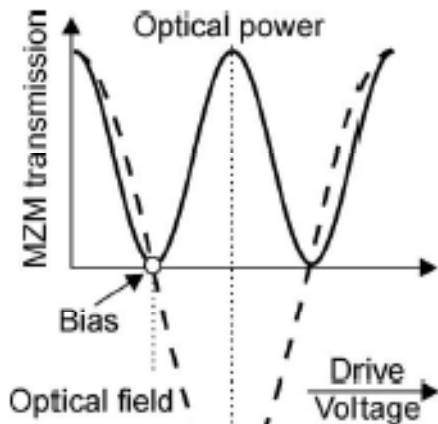
Το ηλεκτρικό σήμα στο διαμορφωτή MZI είναι το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος των precoded data. Το σήμα αυτό έχει 3 διακριτές στάθμες (0, 1, 2).



Η διαμόρφωση DB έχει στενότερο φάσμα από τη διαμόρφωση NRZ κάνοντας εφικτή την πραγματοποίηση συστημάτων ultra-dense WDM



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΥΟΒΙΑΝΑΡΥ (DB)



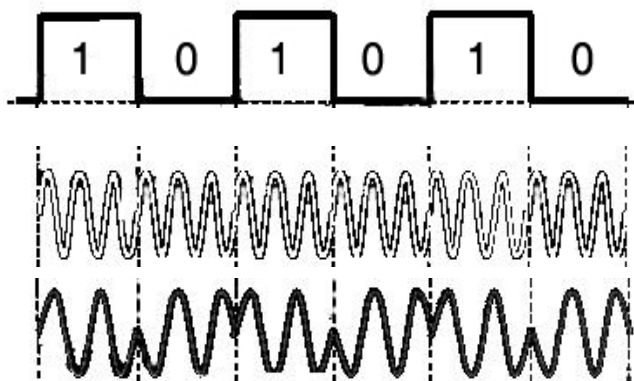
Οι στάθμες 0 και 2 αντιστοιχούν σε μέγιστη και η στάθμη 1 σε μηδενική μετάδοση.

Όπως και για τη διαμόρφωση CS-RZ, το φέρον καταπιέζεται

Το τμήμα του στενότερου φάσματος είναι το μικρότερο άνοιγμα στο eye-diagram και ισοδύναμα η μεγαλύτερη απαιτούμενη ισχύς στο δέκτη



Όπως έχει αναφερθεί, η πληροφορία μπορεί να κωδικοποιηθεί στη φάση του οπτικού φέροντος



Στην πιο απλή περίπτωση:

Όταν υπάρχει '1' στα data η φάση του παλμού είναι π .

Όταν υπάρχει '0' στα data η φάση του παλμού είναι 0.

Αυτό το σχήμα διαμόρφωσης ονομάζεται **phase-shift keying (PSK)**

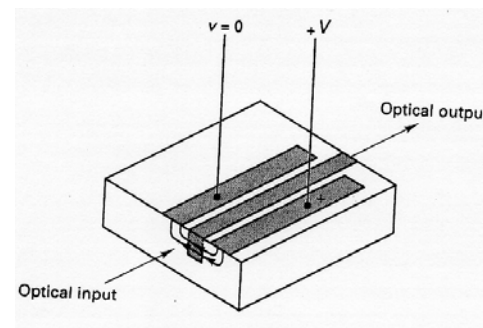
Η οπτική ισχύς του σήματος είναι σταθερή ανεξάρτητα από την αλληλουχία των bits.

Εξ' αιτίας αυτής της σταθερότητας η διαμόρφωση PSK έχει μεγαλύτερη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα διάδοσης.



Ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής είναι διαμορφωτής φάσης.

$$\Delta\varphi \propto V$$



Η χαμηλή στάθμη του ηλεκτρικού σήματος αντιστοιχεί σε στροφή φάσης 0, ενώ η υψηλή σε στροφή φάσης π (V_π)



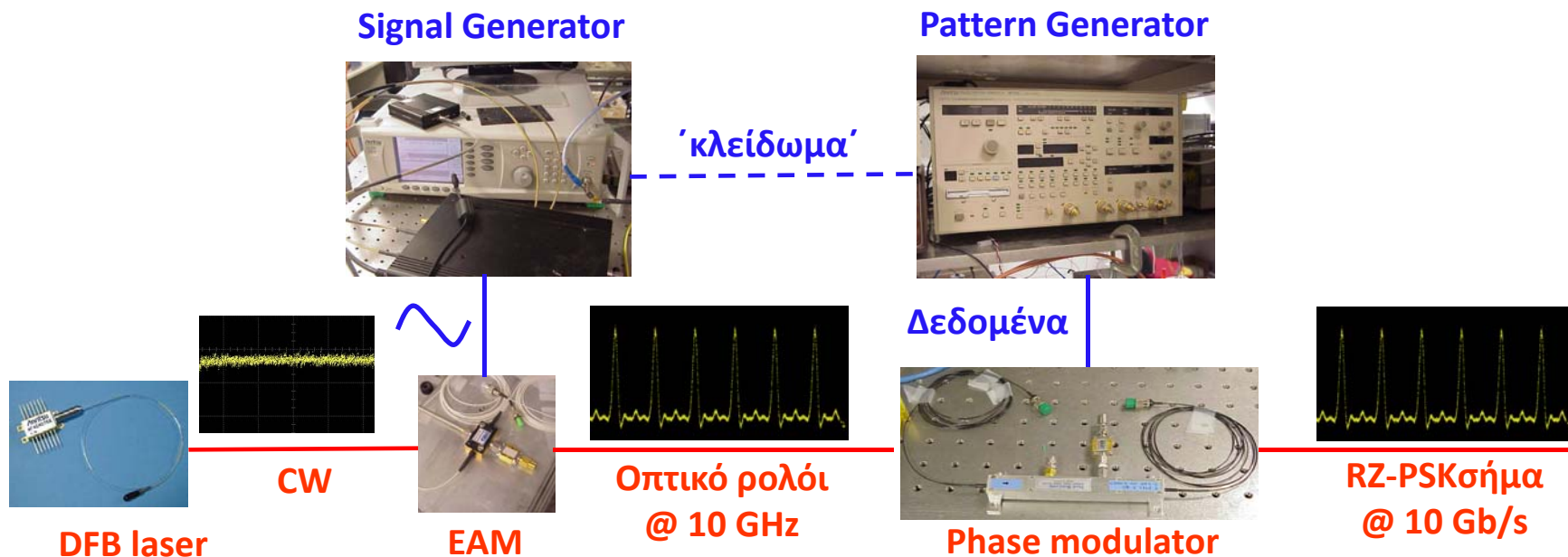
Η οπτική είσοδος στο διαμορφωτή είναι είτε CW είτε οπτικό ρολόι.

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε NRZ-PSK ενώ στη δεύτερη RZ-PSK

Στην έξοδο, τα οπτικά σήματα έχουν την ίδια μορφή όπως και στην είσοδο.



Διάταξη διαμόρφωσης RZ-PSK



Στον παλμογράφο, το σήμα RZ-PSK φαίνεται όπως το απλό οπτικό ρολόι.

Η πληροφορία όμως έχει κωδικοποιηθεί στη φάση των διαδοχικών παλμών.



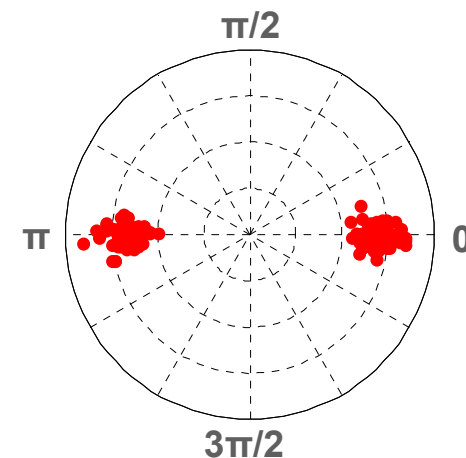
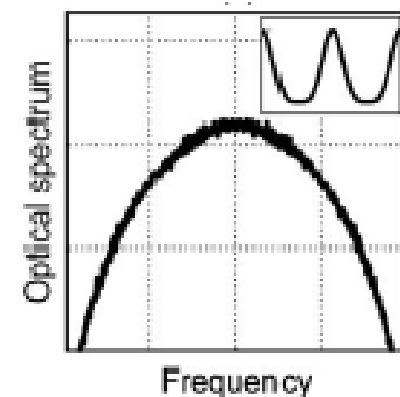
Φάσμα, διάγραμμα οφθαλμού και constellation diagram

Στο διάγραμμα οφθαλμού σήματος RZ-PSK απουσιάζουν μηδενικοί παλμοί.

Δειγματοληπτώντας για κάθε bit στη μέση της χρονοθυρίδας, μπορούμε να αποτυπώσουμε τα δείγματα στο μιγαδικό επίπεδο δημιουργώντας **constellation diagrams**

Η απόσταση του κάθε σημείου από την αρχή των αξόνων δηλώνει την ισχύ του αντίστοιχου παλμού.

Η φάση δηλώνεται από τη γωνία στην οποία βρίσκεται το σημείο.



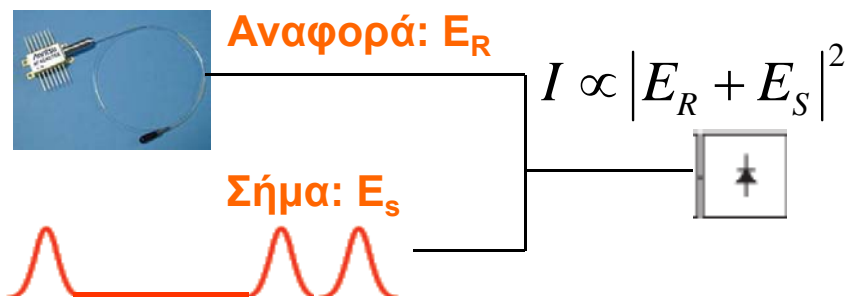


ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PSK

Καθώς το σήμα προσπίπτει στη φωτοδίοδο, παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο της ισχύος του. **Με τον τρόπο αυτό χάνεται η πληροφορία της φάσης.**

$$\text{(Τετραγωνικός νόμος: } I \propto E^2 \text{)}$$

Για να ανακτηθεί η πληροφορία, θα πρέπει το διαμορφωμένο κατά φάση σήμα να προσπέσει μαζί με ένα άλλο σήμα αναφοράς καθορισμένης φάσης και ισχύος (**σύμφωνη ανίχνευση**).



Στην πράξη είναι δύσκολο να 'κλειδώσουν' ως προς τη φάση το σήμα και η πηγή αναφοράς.

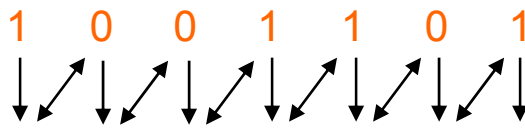
Επίσης, είναι πρακτικά αδύνατο να καθοριστεί απόλυτη αναφορά για την τιμή 0 και π της φάσης. Για το λόγο αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται η διαμόρφωση DPSK.



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DPSK

Το κάθε bit του κωδικοποιημένου σήματος συγκρίνεται με το επόμενο bit του κανονικού σήματος πληροφορίας. Μετάβαση από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 αντιστοιχεί σε φάση π ενώ διατήρηση της αξίας του bit αντιστοιχεί σε φάση 0.

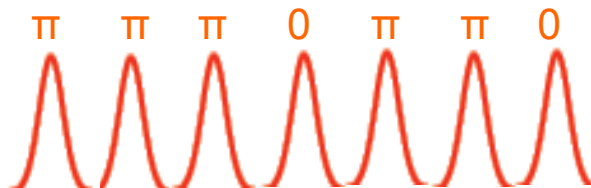
Data



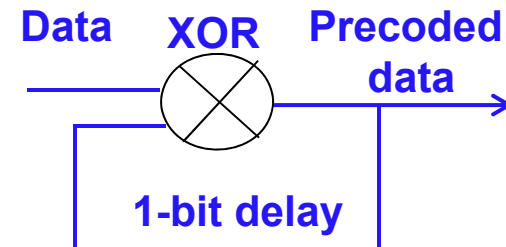
Precoded data



Σήμα RZ-DPSK



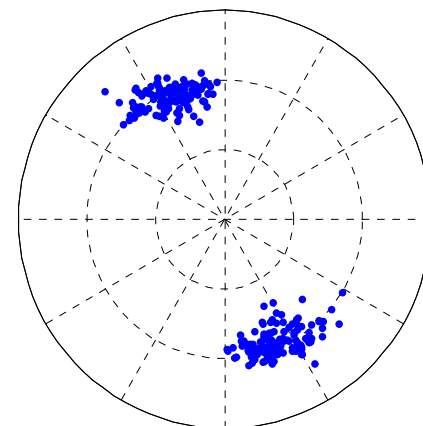
Ο precoder υλοποιείται με μία απλή πύλη XOR. Στη συνέχεια η προκύπτουσα ακολουθία οδηγεί έναν phase modulator, όπως και στη διαμόρφωση PSK





Μετά από διάδοση, το constellation diagram έχει την εξής μορφή:

Τα σημεία έχουν περιστραφεί και διασπαρεί στο μιγαδικό επίπεδο.



Η περιστροφή δηλώνει τη συσσώρευση φάσης λόγω διάδοσης

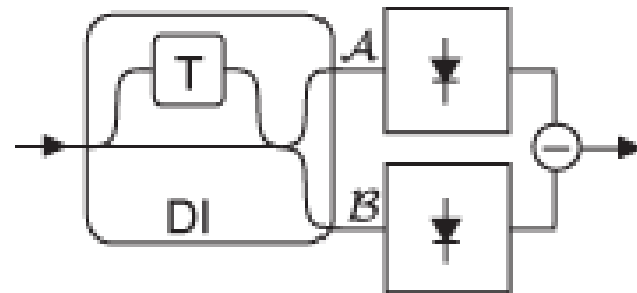
Η διασπορά στην ακτινική συνιστώσα δηλώνει το θόρυβο πλάτους και στην εφαπτομενική το θόρυβο φάσης

Όποια και αν είναι η περιστροφή, τα δείγματα βρίσκονται γύρω από δύο αντιδιαμετρικά σημεία. Επομένως η διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών εξακολουθεί να βρίσκεται είτε κοντά στο 0 είτε κοντά στο π .



ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DPSK

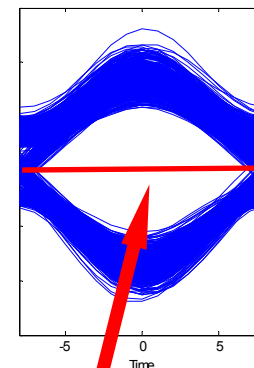
Πριν τη φωτοδίοδο η διαμόρφωση φάσης μετατρέπεται σε διαμόρφωση πλάτους με τη χρήση ενός συμβολομέτρου καθυστέρησης 1-bit (**delay interferometer – DI**)



Αν η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών παλμών είναι 0, ένας παλμός βγαίνει στη θύρα B. Αν η διαφορά φάσης είναι π , ο παλμός εμφανίζεται στη θύρα A.

Στις δύο θύρες προκύπτουν δύο συμπληρωματικές ακολουθίες. Αν τα ηλεκτρικά σήματα των δύο φωτοδίοδων αφαιρεθούν, προκύπτει το διάγραμμα οφθαλμού της DPSK.

Λόγω αυτής της διαφορικής λήψης η DPSK έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στο δέκτη κατά 3 dB.



Threshold



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DQPSK

Όπως και στη διαμόρφωση πλάτους, έτσι και στη διαμόρφωση φάσης μπορούμε να χρησιμοποιηθούν πολυ-επίπεδα σχήματα διαμόρφωσης. Το πιο κοινό από αυτά είναι η **DQPSK (differential quadrature phase-shift keying)**

Η DQPSK είναι σχήμα 4 επιπέδων. Η φάση κάθε συμβόλου (παλμού) έχει 4 διακριτές καταστάσεις, και επομένως μπορεί να περιγράψει 2 bits πληροφορίας.

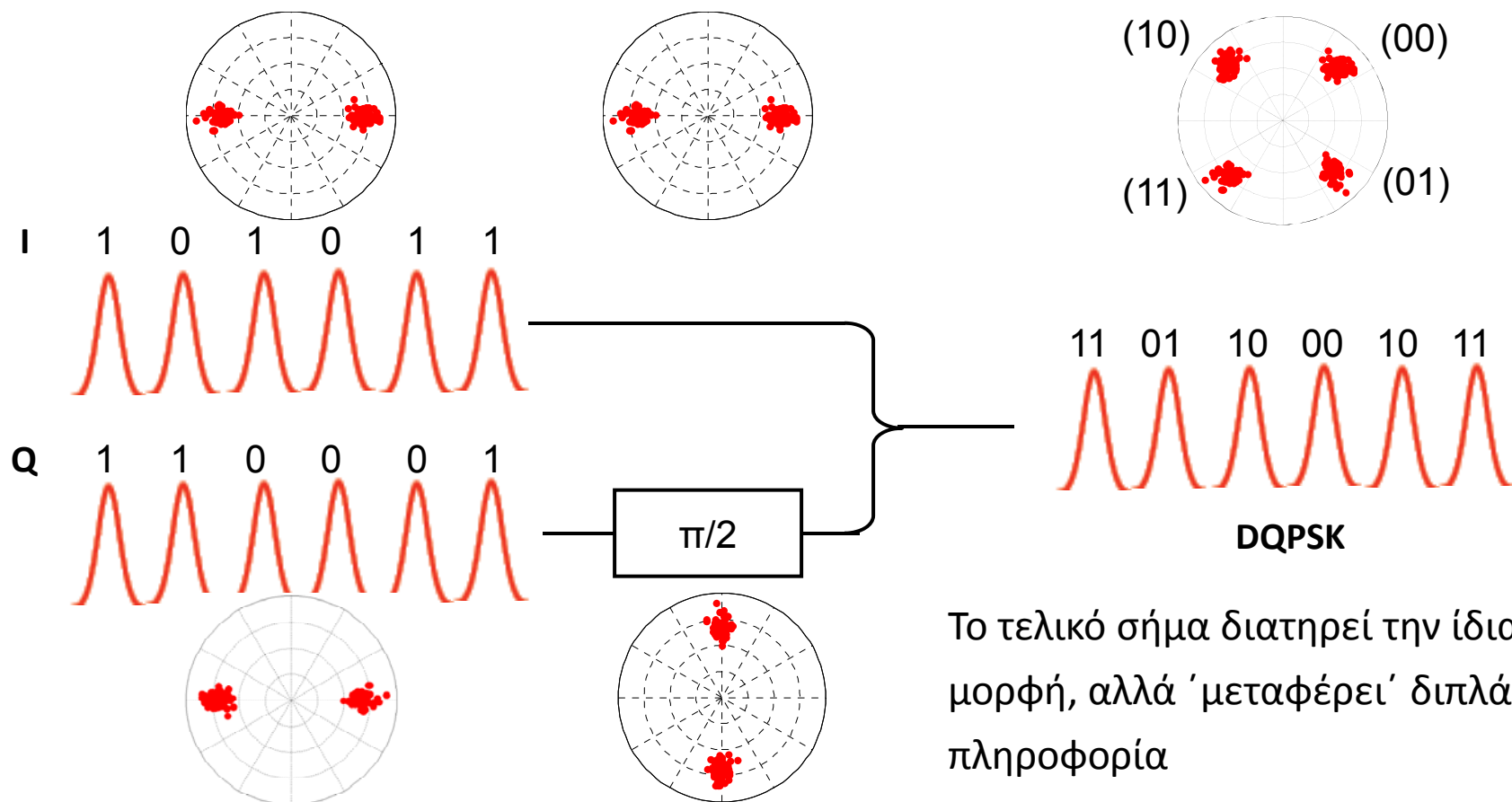
Επομένως, ρυθμός μετάδοσης συμβόλων 10 Gbaud/s αντιστοιχεί σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 20 Gbit/s

Με τον τρόπο αυτό, διπλασιάζεται η *spectral efficiency* ή ισοδύναμα δια τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης, το σήμα γίνεται πολύ πιο ανθεκτικό κυρίως στη χρωματική διασπορά και τη διασπορά τρόπων πόλωσης.



ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DQPSK

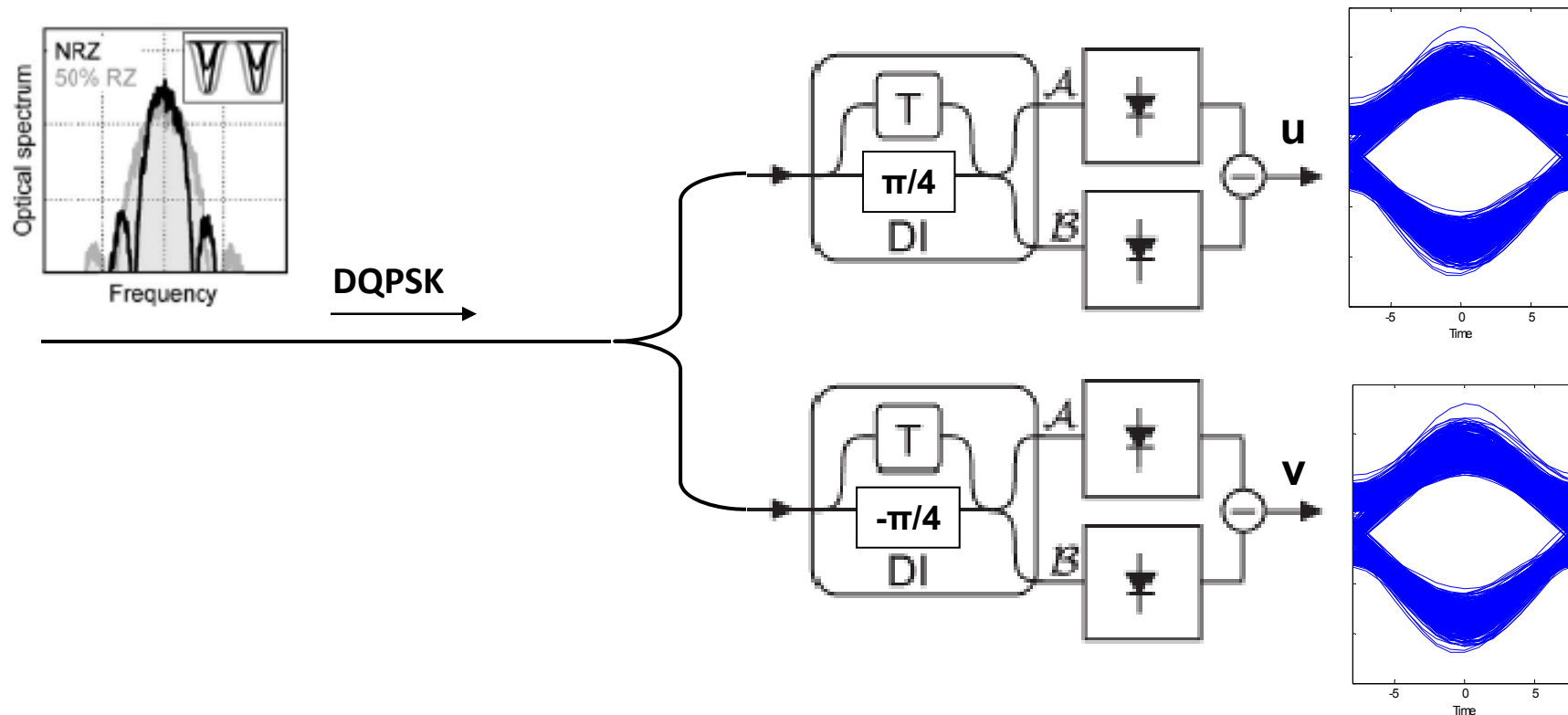
Δύο ανεξάρτητα σήματα πληροφορίας u και v συσχετίζονται και παράγουν τα σήματα I και Q (precoding)



Το τελικό σήμα διατηρεί την ίδια μορφή, αλλά 'μεταφέρει' διπλάσια πληροφορία



ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ (D)QPSK



Για την αποδιαμόρφωση, το σήμα DQPSK χωρίζεται σε δύο μέρη. Το καθένα οδηγείται σε ένα DI. Τα DIs είναι πολωμένα με διαφορά φάσης μεταξύ τους 90° .

Τα δύο DIs αποδίδουν τις αρχικές ακολουθίες u και v .



ΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

