

High-Speed Optical Transmission Systems*

Empfänger

18. Februar 2011

In dieser Übung werden verschiedene Empfänger aufgebaut. Zunächst wird der Geradeausempfänger für die Detektion intensitätsmodulierter Signale behandelt. Dabei wird besonders auf die Bedeutung des optischen Filters in Einkanal- und WDM-Systemen eingegangen. Der zweite Teil dieser Übung behandelt den Gegentaktempfänger, der zur Detektion von DPSK-Signalen eingesetzt wird.

1 Geradeausempfang (*direct detection*)

Für den Empfang intensitätsmodulierter Signale werden üblicherweise Geradeausempfänger verwendet. In der Fachliteratur wird für solche Systeme häufig die Abkürzung IMDD oder auch IM/DD (*intensity modulation / direct detection*) verwendet. In dieser Aufgabe soll solch ein Geradeausempfänger aufgebaut werden. Er besteht üblicherweise aus einem optischen Bandpassfilter, einer Photodiode, einem elektrischen Tiefpassfilter und einer Taktrückgewinnungseinheit (Abb. 1). Das optische Bandpassfilter dient im Einkanalssystem der Begrenzung der Bandbreite des ASE-Rauschens und in Mehrkanalsystemen mit Wellenlängenmultiplex (*wavelength-division multiplexing-WDM*) der Trennung der Wellenlängenkanäle.

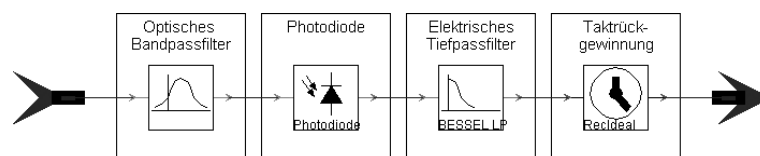


Abb. 1: Geradeausempfänger

*Diese Übungsblätter basieren auf der ersten Ausarbeitung von Johannes Fischer, mit dem zusammen ich diese Veranstaltung entwickelt habe.

Benötigte Module:

- Wiring Tools/input
- Optical Filters, FBG & AWG/FilterOpt
- Receivers/Photodiode
- Electrical Filters/FilterBesselLP_El
- Timing & Sampling/ClockRecoveryIdeal
- Wiring Tools/output

Einstellungen:

Photodiode	ThermalNoise	0.0
	ShotNoise	Off
ClockRecoveryIdeal	Resynchronize	On

Aufgabe 1a:

Speichern Sie den Aufbau gemäß Abb. 1 als Galaxy mit dem Namen *RX_Direct*. Erstellen Sie folgende Parameter:

Modul: FilterOpt
Name: CenterFrequency
Default Value: 193.1e12
Name: Bandwidth
Default Value: 4*BitRateDefault
Name: GaussianOrder
Type: Integer
Default Value: 2
Modul: FilterBesselLP_El
Name: CutOffFrequency
Default Value: 0.7*BitRateDefault
Name: FilterOrder
Type: Integer
Default Value: 5
Modul: ClockRecoveryIdeal
Name: ChannelLabel
Type: String
Default Value: Ch1

2 Einfluss der optischen Filterbandbreite

In dieser Aufgabe soll der Einfluss des optischen Filters genauer untersucht werden. Zu diesem Zweck wird sowohl in einem Einkanal-, als auch in einem Mehrkanalsystem bei verschiedenen Filterbandbreiten die Bitfehlerwahrscheinlichkeit (*bit-error rate* - BER) geschätzt. In Systemen mit mehreren Wellenlängenkanälen kann es dabei bei kleinen Kanalabständen zu kohärentem Kanalübersprechen kommen, was die genaue Schätzung der BER erheblich erschwert.

Benötigte Module:

- Optical Amplifiers/AmpSysOpt
- Optical Sources/NoiseWhiteGaussOpt
- Passive Components/Combine_Pow_N_1¹
- Receivers/BER_OOK_S
- Wiring Tools/Ground
- Analyzers/ViScope
- Analyzers/Numerical Analyzer2D
- Sweep & Math Functions/Const

Einstellungen:

TX_NRZ	PRBS_Order	11
AmpSysOpt	SystemModelType-Ampl. Type	POWER
	LockedTarget	1e-3 W
	IncludeNoise	Off
NoiseWhiteGaussOpt	NoisePowerDensity	1.0e-3/12.5e9*1e-2
	RandomNumberSeed	1
BER_OOK_S	IncludeShotNoise	No
	ThermalNoise	0.0
	ChannelLabel	Ch1
Const	level	Bandwidth*1e-9
ViScope	Type	Eye
	Options	-nl -grading
Numerical Analyzer2D	Options	-x "Filterbandbreite [Ghz]" -y "BER" -erfc

¹Es handelt sich hier um einen 3-dB-Koppler. Somit erhält jedes die dieses Bauteil eingekoppelte Signal eine Dämpfung von 3 dB.

Aufgabe 2a:

Erstellen Sie einen Simulationsaufbau gemäß Abb. 2. Für Sender und Empfänger nutzen Sie Ihre erstellten Module *TX_NRZ* und *RX_Direct*. Bei einer Bitrate von 40 Gbit/s sollen 2048 bit mit einer Auflösung von 32 Abtastpunkten pro bit simuliert werden.

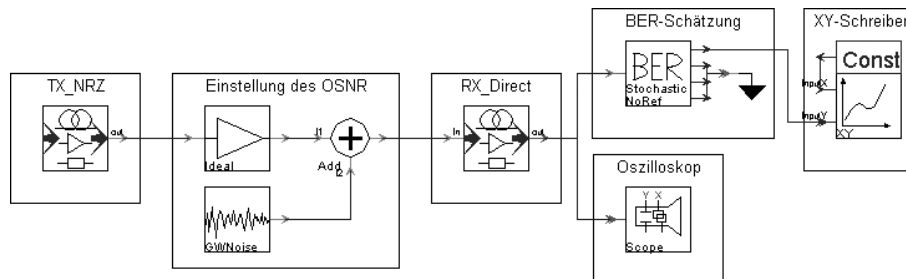


Abb. 2: Simulationsaufbau

Durch den idealen Verstärker (kein Rauschen) und die Rauschquelle kann vor dem Empfänger das OSNR (*optical signal-to-noise ratio*) eingestellt werden. Dieses ist mit der mittleren Signalleistung P_{sig} (in Watt) und der Rauschleistung P_{ASE} (in Watt) definiert als

$$\text{OSNR} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{sig}}{P_{ASE}} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{sig}}{\Delta f \cdot S_{ASE}} \right). \quad (1)$$

Dabei bezeichnet S_{ASE} die spektrale Rauschleistungsdichte und Δf die Auflösungsbandbreite, auf die das OSNR bezogen wird. Die Auflösungsbandbreite wird wellenlängenbezogen angegeben und beträgt üblicherweise $\Delta \lambda = 0.1 \text{ nm}$ (entspricht $\Delta f \approx 12.5 \text{ GHz}$ bei $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$).

Durch Umstellen von Gl. (1) kann die benötigte spektrale Rauschleistungsdichte (Parameter *NoisePowerDensity* im Modul *NoiseWhiteGaussOpt*) bestimmt werden, um ein definiertes OSNR einzustellen.

$$S_{ASE} = \frac{P_{sig}}{\Delta f} \cdot 10^{-\frac{\text{OSNR}}{10}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{12,5 \text{ GHz}} \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

Mit dem oben unter "Einstellungen" angegebenen Wert für den Parameter *NoisePowerDensity* wird also ein OSNR von 20 dB eingestellt.

Variieren Sie die Bandbreite des optischen Filters von 30 GHz bis 160 GHz mit einer Schrittweite von 5 GHz. Erstellen Sie dazu aus dem Parameter *Bandwidth* des Moduls *RX_Direct* einen globalen Parameter (Rechtsklick + *Create Schematic Parameter*). Im globalen Parametereditor können Sie dann durch Rechtsklick + *Create Sweep Control* auf einfache Weise den Parameter variieren. Wodurch wird die BER für kleine und grosse Filterbandbreiten begrenzt?

Aufgabe 2b:

In dieser Aufgabe soll die optische Filterbandbreite in einem WDM-System optimiert werden. Speichern Sie den Aufbau aus Aufgabe 2a unter neuem Namen und erweitern Sie den Simulati-

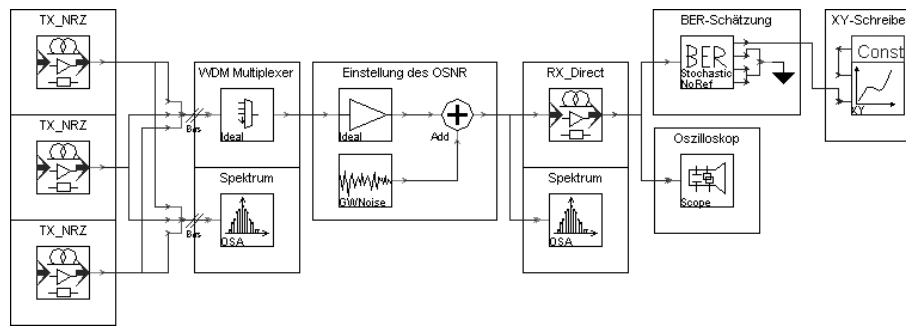


Abb. 3: Simulationsaufbau

onsaufbau gemäß Abb. 3.

zusätzlich benötigte Module:

- Wiring Tools/BusCreate3_1
- Analyzers/ViOSA
- WDM Multiplexers/WDM_MUX_N_1_Ideal

Einstellungen:

TX_NRZ (oben)	EmissionFrequency	193.1e12-50e9
	ChannelLabel	Ch2
	RandomNumberSeed	2
TX_NRZ (unten)	EmissionFrequency	193.1e12+50e9
	ChannelLabel	Ch3
	RandomNumberSeed	3
ViOSA (links)	Title	Spektrum ohne Rauschen
	Options	-gauss 2e9 -1 "Ch1" -2 "Ch2" -3 "Ch3" -minx 192.9e12 -maxx 193.3e12 -hc
ViOSA (rechts)	Title	Spektrum mit Rauschen
	Options	-gauss 2e9 -nl -minx 192.9e12 -maxx 193.3e12 -hc
ViScope	Title	Empfangenes Signal
	Options	-nl -grading
AmpSysOpt	LockedTarget	!"expr 0.0+10*log(3)"

Die Option `-gauss 2e9` schaltet im Modul `ViOSA` eine Glättung des Spektrums mit einer Auflösung von 2 GHz ein. Mit `-1 "Ch1"` usw. kann die Legende beschriftet werden. Die Werte `-minx` und `-maxx` geben Anfang und Ende der x -Achse an. Die Optionen `-hc`, `-grading` und `-nl` dienen der Vollbilddarstellung, dem Einschalten einer Farbkodierung des Augendiagramms und zum Verbergen der Legende.

Damit die Leistung pro Wellenlängenkanal (wie in Aufgabe 2a) 0 dBm beträgt, muss die Ausgangsleistung des optischen Verstärkers angepasst werden. Der Parameter *LockedTarget* gibt die gesamte mittlere Ausgangsleistung P_{ges} in der Einheit [dBm] an. Es gilt also

$$P_{ges} = 10 \cdot \log \left(\frac{N \cdot P_{ch}}{1 \text{ mW}} \right) = P_{ch,dBm} + 10 \cdot \log (N), \quad (3)$$

wobei N die Anzahl der WDM-Kanäle, P_{ch} die mittlere Leistung pro Kanal in der Einheit [W] und $P_{ch,dBm}$ die mittlere Leistung pro Kanal in der Einheit [dBm] bezeichnet.

Die Verbindungen nach den beiden Modulen *BusCreate3_1* sind sogenannte Busse. Um einen Bus zu erzeugen öffnen Sie den Parameter-Editor der Verbindung mit einem Doppelklick auf die Verbindung. Wählen Sie als *Link Type* den Eintrag *Bus* aus und setzen Sie den Wert *Bus Width* in diesem Fall auf den Wert 3.

Starten Sie eine einzelne Simulation für eine Filterbandbreite von 50 GHz (globaler Parameter *Bandwidth=50e9*) und vergleichen Sie die Spektren mit und ohne Rauschen.

Schalten Sie die beiden Module *ViOSA* aus und variieren Sie die optische Filterbandbreite von 30 GHz bis 80 GHz in Schritten von 5 GHz und bestimmen Sie die optimale Filterbandbreite. Wodurch wird hier die BER für grosse Filterbandbreiten begrenzt?

Aufgabe 2c:

Um den Einfluss des kohärenten Kanalübersprechens genauer zu untersuchen, sollen nun die gesendeten Bitsequenzen der Nachbarkanäle geändert werden. Setzen Sie dazu den Parameter *RandomNumberSeed* des obersten Senders auf den Wert 100 und den des untersten Senders auf den Wert 200. Wiederholen Sie die Optimierung der Filterbandbreite und vergleichen Sie die erreichte BER und die Augendiagramme mit den vorhergehenden Ergebnissen.

Aufgabe 2d:

Löschen Sie alle Module, bis auf die zur Einstellung des OSNR benötigten Module (*AmpSysOpt*, *NoiseWhiteGaussOpt*, *AddSignalsOpt*), sowie im globalen Parametereditor die Kategorie *Physical*. Fügen Sie ein *input* und ein *output* Modul hinzu und speichern Sie den Aufbau als Galaxy unter dem Namen *SetOSNR*. Erstellen Sie folgenden Parameter:

Modul:	NoiseWhiteGaussOpt
Name:	RandomNumberSeed
Type:	Integer
Default Value:	1

Zusätzlich müssen folgende globale Parameter erzeugt werden:

Category:	OSNR Parameter
Name:	OSNR
Default Value:	20
Name:	WDMChannels
Type:	Integer
Default Value:	1

Einstellungen:

AmpSysOpt	SystemModelType	Power
	LockedTarget	! "expr 0.0+10*log({WDMChannels})"
	IncludeNoise	Off
NoiseWhiteGaussOpt	NoisePowerDensity	$1.0e-3/12.5e9*10^{(-OSNR/10)}$

3 Gegentaktempfänger

Für den Empfang von DPSK-Signalen wird üblicherweise ein Mach-Zehnder Interferometer mit Verzögerungsleitung (*Mach-Zehnder delay interferometer* - MZDI) gefolgt von einem Gegentaktempfänger eingesetzt (Abb. 4). Das MZDI dient der Umwandlung der differentiellen Phasenmodulation in eine Amplitudenmodulation. Bei einer gesendeten logischen Eins (d.h. ein Phasensprung zwischen zwei benachbarten Pulsen) erscheint der entsprechende Puls vom Eingang des MZDI am oberen Ausgang, bei einer gesendeten logischen Null (kein Phasensprung) dagegen am unteren Ausgang. Die Signale an beiden Ausgängen werden mit jeweils einer Photodiode getrennt empfangen. Das Differenzsignal wird nach elektrischer Filterung ausgewertet.

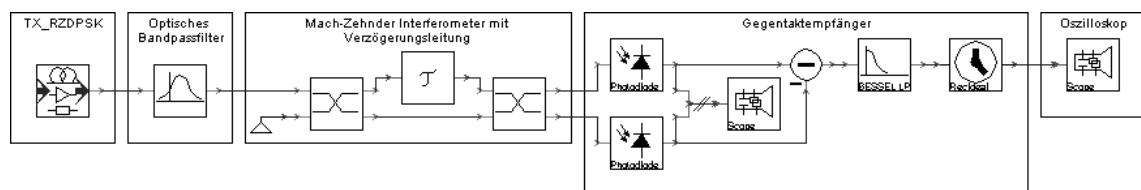


Abb. 4: Simulationsaufbau

Benötigte Module:

- Optical Filters, FBG & AWG/FilterOpt
- Wiring Tools/NullSource
- Passive Components/X_Coupler

- Passive Components/DelaySample
- Receivers/Photodiode
- Wiring Tools/BusCreate2_1
- Analyzers/ViScope
- Electrical Components/SubtractSignalsEl
- Electrical Filters/FilterBesselLP_El
- Timing & Sampling/ClockRecoveryIdeal

Einstellungen:

TX_RZDPSK	PRBS_Order	3
DelaySample	DelayTime	1/BitRateDefault
Photodiode (beide)	ThermalNoise	0.0
	ShotNoise	Off
ClockRecoveryIdeal	ChannelLabel	Ch1
	Resynchronize	On
ViScope (links)	Options	-1 "Upper Port (Ones)" -2 "Lower Port (Zeros)"

Aufgabe 3a:

Erstellen Sie den Simulationsaufbau gemäß Abb. 4 und starten Sie eine Simulation mit 8 bit und 32 Abtastwerten pro bit bei einer Bitrate von 10 Gbit/s. Öffnen Sie das Modul *TX_RZDPSK* und fügen Sie am Ausgang des Moduls *PRBS* ein Modul *CoderRZ_EL* und ein *ViScope* ein, um die gesendete Bitsequenz anzuzeigen. Vergleichen Sie die gesendete Bitsequenz mit den empfangenen Signalen nach den Photodioden und nach der Differenzbildung.

Aufgabe 3b:

Löschen Sie das Modul *TX_RZDPSK*, die beiden Module *ViScope* und das Modul *BusCreate2_1*. Fügen Sie ein *input* und ein *output* Modul ein und speichern Sie den Aufbau als Galaxy *RX_Balanced*. Die Galaxy soll folgende Parameter aufweisen:

Modul: FilterOpt
Name: CenterFrequency
Default Value: 193.1e12
Name: Bandwidth
Default Value: 4*BitRateDefault

Name:	GaussianOrder
Type:	Integer
Default Value:	2
Modul:	DelaySample
Name:	DelayTime
Default Value:	1/BitRateDefault
Modul:	FilterBesselLP_EI
Name:	CutOffFrequency
Default Value:	0.7*BitRateDefault
Name:	FilterOrder
Type:	Integer
Default Value:	5
Modul:	ClockRecoveryIdeal
Name:	ChannelLabel
Type:	String
Default Value:	Ch1

4 Anforderungen an reale DPSK-Empfänger

In dieser Aufgabe sollen Anforderungen an die Fertigungstoleranzen von DPSK-Empfängern ermittelt werden. Besonders kritisch ist die Symmetrie der 3 dB-Koppler und die Einhaltung der genauen Verzögerungszeit. Mit einem Simulationsaufbau gemäß Abb. 5 soll die Toleranz bezüglich Variation der Verzögerungszeit bestimmt werden. Als Gütekriterium soll hier die *eye-opening penalty* (EOP) verwendet werden. Die EOP ist ein Maß für die Verringerung der Augenöffnung und ist definiert als

$$EOP = 10 \cdot \log \left(\frac{EO_{BtB}}{EO} \right) \quad (4)$$

wobei EO_{BtB} die Augenöffnung ohne Störung und EO die Augenöffnung des gestörten Signals bezeichnet.

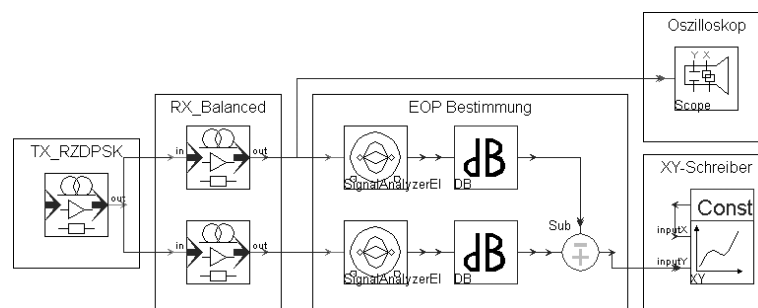


Abb. 5: Simulationsaufbau

Benötigte Module:

- Instrumentation/SignalAnalyzerEl
- Signal Processing/Nonlinear Functions/Other Nonlinear Functions/DB
- Signal Processing/Arithmetics/Subtractors/Sub
- Analyzers/ViScope
- Analyzers/Numerical Analyzer2D
- Math Functions/Const

Einstellungen:

SignalAnalyzerEl (beide)	SampleType	RELATIVE
	ChannelLabel	Ch1
DB (beide)	inputIsPower	TRUE
ViScope	Type	Eye
	Options	-nl -grading
ViXY	Options	-nl -x "Verzögerungszeit [ps]" -y "EOP [dB]"
Const	level	DelayTime*1e12

Aufgabe 4a:

Erstellen Sie einen globalen Parameter für die Verzögerungszeit des oberen MZDI (Parameter *DelayTime* im oberen Modul *RX_Balanced*). Variieren Sie diesen bei einer Bitrate von 10 Gbit/s (128 bit, 32 Abtastwerte pro Bit) von 50 ps bis 150 ps mit einer Schrittweite von 5 ps. Bestimmen Sie den Toleranzbereich (EOP < 1 dB) für die Verzögerungszeit.

Aufgabe 4b:

Variieren Sie bei einer Bitrate von 40 Gbit/s (128 bit, 32 Abtastwerte pro Bit) die Verzögerungszeit im oberen *RX_Balanced* von 12,5 ps bis 37,5 ps mit einer Schrittweite von 1,25 ps. Bestimmen Sie auch hier den Toleranzbereich (EOP < 1 dB) für die Verzögerungszeit.