

Übung 3: Physical layer and limits

2019-10-31

1. Basisband/Breitband

Diese Aufgabe soll den Unterschied zwischen Basisband- und Breitbandverfahren verdeutlichen.

- (a) Erläutern Sie, wie ein Basisbandverfahren Daten überträgt.

Lösung: Bei einem Basisbandverfahren wird ein Signal (genauer: mehrere Signalformen) benutzt, das sehr niedrige Frequenzen (ggf. bis zu 0 Hz, als einem Gleichspannungsanteil) bis zu einer oberen Maximalfrequenz benutzt. Basisbandverfahren benutzen keine Modulation.

Damit ein Basisbandverfahren funktionieren kann, muss der Übertragungskanal Tiefpass-Charakter haben, d.h. auch sehr niedrige Frequenzen bis hin zum Gleichstrom (= 0 Hz) sind übertragbar.

Daten werden direkt einer der entsprechenden Signalformen zugeordnet, ohne dass durch Modulation die Frequenz verschoben wird. Für ein Breitbandverfahren kann man sich nun streiten, ob die Modulation auf Trägerfrequenz ein separater Schritt ist oder Teil der Auswahl der Signalform; aber das ist weitgehend akademisch.

- (b) Welche sind wünschenswerte Eigenschaften von Basisbandverfahren?

Lösung: Erwünschte Eigenschaften von Basisbandverfahren sind:

- kein Gleichstromanteil (nur mit bipolaren Basisbandverfahren möglich), Gründe:
 - Trafos/Kapazitäten (Verstärker, kapazitive Entkopplung von Bauelementen) können keinen Gleichstromanteil übertragen
 - Unnötiger Energieverbrauch
 - enthält nicht unbedingt Information
- Wiedergewinnung des Taktes aus ankommender Signalfolge (Selbsttaktung)

- Niedrige Fehleranfälligkeit bei Dekodierung

Beispiele sind: NRZ, NRZI, Manchester (verwendet für Ethernet IEEE 802.3), Differential Manchester (Details siehe Skript).

- (c) Welches Problem tritt auf, wenn Sie Daten als Rechteckimpulse übertragen?

Lösung: Die ideale Übertragung digitaler Signale im Rechteckformat erfordert die Übertragung sowohl sehr hoher als auch sehr niedriger Frequenzen (sehr breites Fourierspektrum!). Tatsächlich sind solche Frequenzen nicht ohne weiteres (aus technischen wie wirtschaftlichen Gründen) übertragbar (\rightarrow Kanal mit Tiefpass).

- (d) Erläutern Sie, wie ein Breitbandverfahren Daten überträgt.

Lösung: Breitbandverfahren modulieren digitale Daten auf analoge Signalträger auf, um eine bessere Anpassung an die Übertragungscharakteristik des Übertragungsmediums zu erreichen. Modulation ist dabei die planmäßige Beeinflussung eines Trägersignals (Trägerfrequenz) durch das modulierende Signal. Beispiele: Amplitudenmodulation (AM) (ASK), Frequenzmodulation (FM) (FSK), Phasenmodulation (PM) (PSK) oder Kombinationen dieser Modulationsarten.

- (e) Welcher Zusammenhang sollte zwischen Signalbandbreite und Kanalbandbreite bestehen, damit ein Breitbandverfahren problemlos zum Einsatz kommen kann? Ist die absolute Lage der Harmonischen des Signals und des Übertragungsfensters des Kanals dabei relevant?

Lösung: Bei einem Breitbandverfahren sollte die Kanalbandbreite größer sein als die Signalbandbreite (wie auch bei einem Basisbandverfahren), da es sonst zu Dämpfung relevanter Harmonischer des Signals kommt (was sich in Übertragungsfehlern niederschlagen wird). Die absolute Lage ist aber egal; durch Modulation auf die Trägerfunktion kann ja die Lage der Harmonischen des Signals entsprechend in das Übertragungsfenster des Kanals verschoben werden (anders als bei einem Basisbandverfahren).

2. Theoreme von Nyquist und Shannon

Ein Modem verwendet eine Übertragungstechnik mit dem Symbolvorrat $\{00, 01, 10, 11\}$.

- (a) Welche ist die maximale Datenrate, die Sie bei einer Kanalbandbreite von 10 MHz erreichen können?

Lösung: $R \leq 2H \log_2 V = 20 \text{ MHz} \log_2 4 \text{ bits} = 40 \text{ Mbits/s}$

- (b) Welche Symbolrate liegt bei dieser Übertragungsrate vor?

Lösung: 20 Mbaud

- (c) Welches Signal-zu-Rauschverhältnis (**SNR!**) benötigen Sie am Empfänger, um diese Datenrate tatsächlich erreichen zu können?

Lösung: $R < H \log_2 \left(1 + \frac{S_1}{N_1} \right) \Leftrightarrow \frac{S_1}{N_1} > 2^{\frac{R}{H}} - 1 = 2^4 - 1 = 15$

- (d) Um welchen Faktor verändert sich die benötigte *Sendeleistung*, wenn Sie eine höherwertige Übertragungstechnik verwenden, mit der sich ein Byte pro Symbol übertragen lässt (die Rauschleistung sei konstant)?

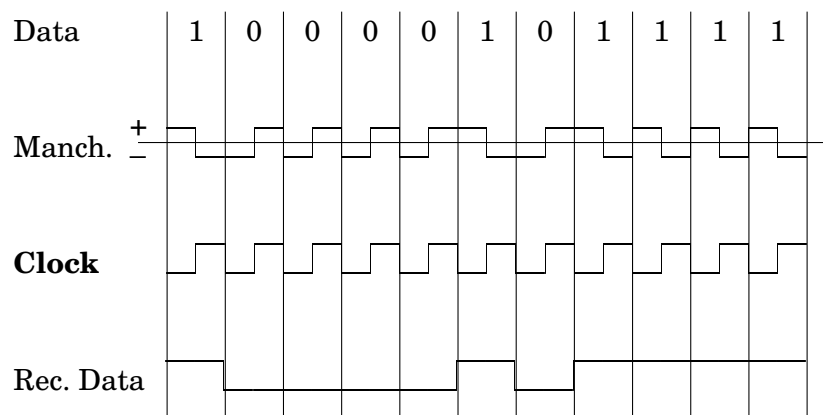
Lösung: Nach Nyquist folgt für die maximale Datenrate $R \leq 20 \text{ MHz} \log_2 256 \text{ bits} = 160 \text{ Mbits/s}$ und somit nach Shannon $R \leq H \log_2 \left(1 + \frac{S_2}{N_2} \right) \Leftrightarrow \frac{S_2}{N_2} \geq 2^{\frac{R}{H}} - 1 = 2^{16} - 1 = 65535$. Mit $a \frac{S_1}{N_1} = \frac{S_2}{N_2} \Rightarrow a = \frac{S_2}{S_1}$ (weil $N_1 = N_2$) gilt $a = \frac{65535}{15} = 4369$.

3. Manchester-Codierung

Gegeben sei die Bitkette 10000101111.

- (a) Stellen Sie den Signalverlauf am Sender und am Empfänger bei Manchester-Codierung dar. Stellen Sie dabei zusätzlich die Extraktion des Taktsignals am Empfänger dar.

Lösung: Eine mögliche Darstellung ist die folgende:



- (b) Welches Problem kann bei der Übertragung von Bitketten mittels Manchester-Codierung auftreten, wenn zwischen den einzelnen Bitketten längere Übertragungspausen liegen (beispielsweise bei der Bitkette 01 nach längerer Übertragungspause)? Wie kann dieses Problem gelöst werden?

Lösung: Bei langen Übertragungspausen kann der Empfänger nicht mehr zweifelsfrei zwischen einem Flankenwechsel zu Beginn oder erst in der Mitte des Bits unterscheiden, da er seine Synchronisation zum Sender verloren

hat. Das Problem kann aber durch eine zusätzliche Rahmensynchronisation gelöst werden, z.B. durch absichtliche Kodeverletzung (code violation) oder durch Trainingssequenzen mit vordefinierten Bitmustern (Präambel). Dadurch wird der Empfänger wieder auf die Bits synchronisiert.

4. **Modulation** Ein Kommunikationssystem verwendet *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*, um binäre Daten auf einen Träger zu modulieren. Es sollen $\frac{1}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi$ als Repräsentation für die Symbole verwendet werden.

- (a) Zeichnen Sie den Signalverlauf auf (Amplitude als Funktion der Zeit), der sich ergibt, wenn Sie die Bitfolge 011000101101 mit Hilfe dieser Modulation übertragen. Jedes Symbol soll drei Perioden der Trägerfrequenz lang sein.

Lösung:

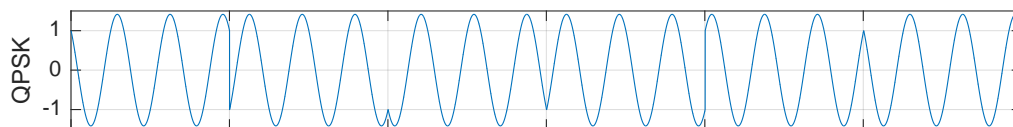
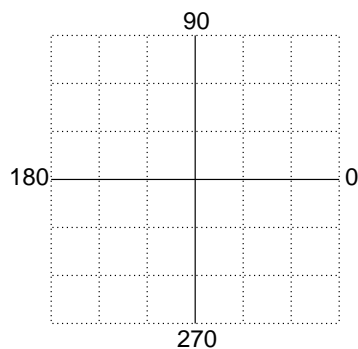
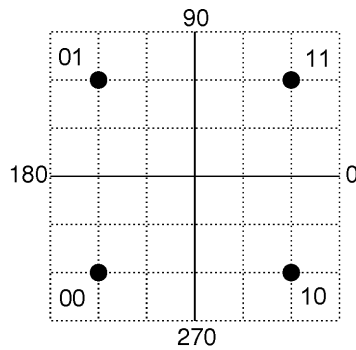


Abbildung 1: QPSK Signal

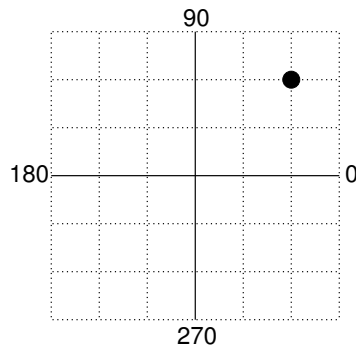
- (b) Zeichnen Sie das Konstellationsdiagramm.



Lösung: Vier Markierungen, jeweils eine auf der Winkelhalbierenden der Quadranten, in identischem Abstand zum Ursprung. Beispiel:

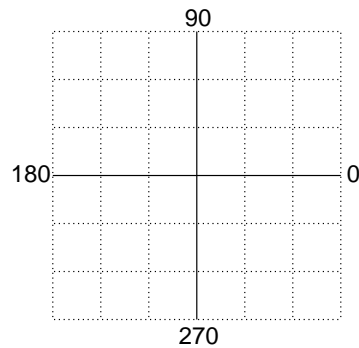


- (c) Um ein größeres Symbolalphabet zu unterstützen, wird nun *Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)* verwendet. Sie übertragen darüber ein und dasselbe Symbol viele Male nacheinander. Die analoge Darstellung dieses Symbols sieht folgendermaßen aus:

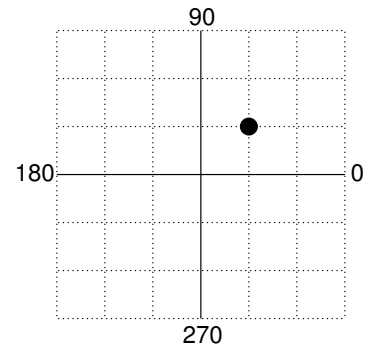


Während der Übertragung wird die analoge Darstellung eines gesendeten Symbols im Medium durch verschiedene Einflüsse verfälscht. Zeichnen Sie im Folgenden jeweils alle empfangenen Wiederholungen in ein *einzelnes* Diagramm. Dabei soll *nur* der in der Teilaufgabe angegebene Einfluss gewirkt haben.

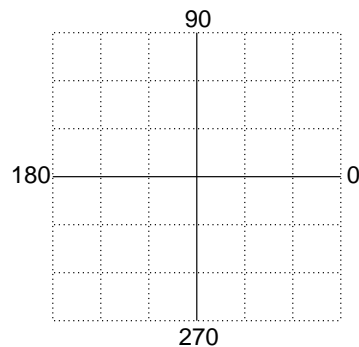
- i. Konstante Dämpfung



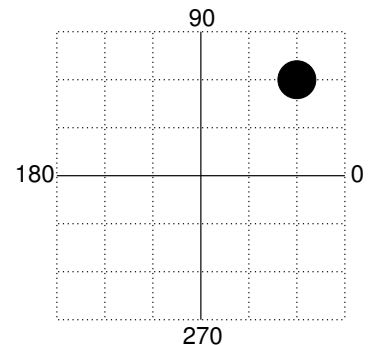
Lösung: Markierung wandert in Richtung Ursprung. Beispiel:



ii. Rauschen



Lösung: Markierung bleibt an ihrer Position, wird aber größer. Beispiel:



iii. Erklären Sie, warum die in den beiden vorherigen Teilaufgaben gezeigten Einflüsse problematisch am Empfänger sind.

Hinweis: Überlegen Sie was passiert, wenn verschiedene Symbole übertragen werden sollen.

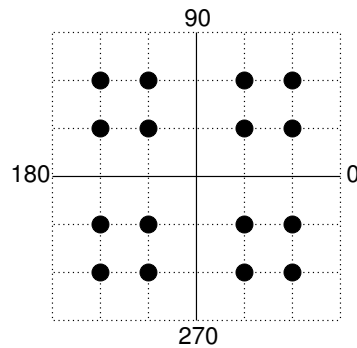
Lösung: Durch die Einflüsse kommen sich die Symbolgrenzen näher. Dadurch wird deren Unterscheidung am Empfänger schwieriger und die Fehlerrate der Übertragung steigt.

iv. Geben Sie für das in der vorherigen Teilaufgabe gegebene Symbol die Formel des Signals im Zeitbereich an. Im Konstellationsdiagramm soll die Kantenlänge eines Kästchen hierfür b sein.

Lösung: Amplitude durch Pythagoras. $s(t) = \sqrt{8b^2} \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{4})$ für ein im Konstellationsdiagramm nicht dargestelltes f .

Dabei sei jeweils ein Strich im Konstellationsdiagramm eine Amplitude von 1

v. Betrachten Sie nun das folgende 16-QAM Konstellationsdiagramm:



Die Abstände zwischen den einzelnen Symbolen sind hier ungleich gewählt, wodurch sich vier Symbolgruppen bilden. Wie können Sie diese Eigenschaft ausnutzen, um zwei gleichzeitig übertragene Datenströme unterschiedlich zu priorisieren? Beschreiben Sie Ihr Verfahren.

Lösung:

- Zwei Datenströme und 4 Bits → 2 Bits pro Datenstrom
- Idee: hochpriorisiert = weniger Fehler = größerer Abstand → Quadrant
- 2 Bits (für prio Daten) kodieren Quadrant (LO = 00, RO = 01, ...)
2 Bits kodieren Konstellationspunkte innerhalb eines Quadranten (LO = 00, RO = 01)
- z.B. 0000 = Quadrant LO, Punkt LO = 1. Spalte 1. Zeile
0100 = Quadrant RO, Punkt LO = 3. Spalte 1. Zeile

5. Phasenrauschen im Konstellationsdiagramm durch AWGN-Kanal

Erstellen Sie ein Konstellationsdiagramm für die *empfangenen* Konstellationspunkte. Gehen Sie von folgenden Annahmen aus:

- QPSK-Simulation
- AWGN-Kanal mit einstellbarem SNR

Simulieren Sie die Übertragung von Symbolen. Berechnen Sie die Signale (für eine sinnvoll gewählte Abtastrate); addieren Sie weißes Gaussches Rauschen (AWGN) entsprechend der gewählten SNR. Berechnen Sie für jedes empfangene Signal die Fourier-Transformation und entnehmen Sie den Koeffizienten der Sendefrequenz. Berechnen Sie anhand dieses Koeffizienten Winkel und Abstand, um einen Punkt ins Konstellationsdiagramm zu plotten.

Was beobachten Sie für sehr niedrige SNRs? Ist das plausibel? An welcher Vereinfachung könnte das liegen?

Sie können hierzu z.B. das Notebook `Notebook ConstellationPhaseNoise.ipynb` bearbeiten.