

Digitale Modulation eines harmonischen Trägers

Vorteile:

- Mehrere Kanäle nebeneinander im Frequenzband möglich
- Antennen können zur Übertragung genutzt werden (Antennen weisen ein BP-Verhalten auf, daher ist die Basisbandübertragung für Antennen nicht geeignet)

Beispiele zur Kanalkapazität

Kabelnetz (Broadcast):

$$C = \frac{850 \text{ MHz} \cdot 80 \text{ dB}}{3} = 22,7 \text{ Gbit / s}$$

DSL (Telco):

$$C = \frac{50 \text{ MHz} \cdot 45 \text{ dB}}{3} = 750 \text{ Mbit / s}$$

ASK (Amplitude Shift Keying = Amplitudenumtastung)

- Modulation der Zustände des Digitalsignals mit einem Trägersignal der Frequenz f_T
- Möglich ist auch die Unterscheidung der Zustände, indem das Trägersignal ein- und ausgetastet wird (OOK = On/Off Keying)

Ermittlung des Spektrums der ASK, für die gilt:

$$s(t) = \begin{cases} 0 & \text{logische "0"} \\ 1 \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0) & \text{logische "1"} \end{cases}$$

Dabei lässt sich das Codesignal $c(t)$ in Form einer Fourierreihe darstellen.

T_{Bit} = Pulsbreite des Signals

T_{Sym} = Dauer einer „Periode“ (zwei Zustände)

$$c(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \frac{1}{5} \cdot \cos\left(\frac{10\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \dots \right)$$

$$s(t) = c(t) \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0)$$

$$\text{Mit } \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cdot \cos(\alpha - \beta)$$

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0) + \frac{\cancel{2} \cdot \hat{s}_T}{\cancel{2} \pi} \cdot$$

$$\left(\cos\left(\omega_T + \frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \cos\left(\omega_T - \frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\omega_T + \frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\omega_T - \frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \dots \right)$$

Demodulation:

1. Inkohärente Demodulation

BP-Filterung mit f_T → Verlauf über nicht-lineares Glied → TP-Filterung → S&H → Ausgabe Basisband-Signal (Hüllkurvendetektor)

2. Kohärente Demodulation

BP-Filterung mit f_T → Mischung mit f_T → TP-Filterung → S&H → Ausgabe Basisband-Signal (Synchrondetektor)

Mischen von Signalen zur Demodulation:

$$s_D(t) = \underbrace{s_N(t)}_{\text{Nachrichtensignal}} \cdot \underbrace{\hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0)}_{\text{Modulation}} \cdot \underbrace{\hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0)}_{\text{Demodulation}}$$

$$\text{mit } \cos^2(\alpha) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos(2\alpha)$$

$$s_D(t) = s_N(t) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos(2\omega_T t) \right)$$

- ➔ Mischung mit demselben Trägersignal → Signal im Basisband + Signal bei doppelter Trägerfrequenz (beide jeweils bei halbem Pegel)
- ➔ Funktioniert nur bei exakt gleichem Träger (Frequenz & Phase)

Problem der ASK bei der Antennenübertragung:

- Beim Wechsel zwischen direkter und gestörter Übertragungsstrecke komme es zu Pegelunterschieden (bis zu Faktor 1000 unterschiedlich)
- ➔ Keine ASK auf Antennenstrecke (→ es werden FSK und PSK verwendet)

FSK (Frequency Shift Keying = Frequenzumtastung)

- Entsprechend der Zustände wird zwischen zwei Trägerfrequenzen umgeschaltet (→ man benötigt 2 Oszillatoren im Modulator)
- Trägerfrequenz: $f_{Tr} = \frac{f_1 + f_2}{2}$ (einzelne Träger bei f_1 und f_2)
- Es muss so viel verstärkt werden, dass 2 Frequenzen unterschieden werden können

Kohärente FSK Demodulation:

2 Bandpässe (f_1 & f_2) → kohärente Demodulation durch entsprechende Mischungen → Summenfrequenzen per TP filtern → Summe +/- → S&H → Ausgabe Basisband-Signal

- Bei Mischung von f_1 mit f_1 entsteht $2 \cdot f_1 + C$, wobei $2 \cdot f_1$ gefiltert wird
- Bei Mischung im f_2 -Zweig entsteht sowohl $f_1 + f_2$ als auch die Schwebung $f_1 - f_2$
- ➔ Entschieden wird auf den jeweils höheren Pegel

- ➔ Gut konstruierte Systeme werden so realisiert, dass im Moment der Abtastung die Kurve der Schwebung einen Nulldurchlauf hat

PSK (Phase Shift Keying = Phasenumtastung)

- Forderung: Die Übertragung soll sicher und bandbreitenniedrig sein
- Es werden 2 Phasenlagen umgetastet (0° und 180°)
- Vergleich mit ASK im Bezug auf die nötige Bandbreite ➔ Bandbreitenbedarf wird sich im gleichen Rahmen aufhalten
 - ➔ Ein Träger mit einer Phasenlage wird eingeschaltet, ausgeschaltet, danach wieder mit einer anderen Phasenlage wieder eingeschaltet (Umschaltung erzeugt die zusätzlichen Anteile im Spektrum)

Ermittlung des Spektrums der PSK, für die gilt:

$$s(t) = \begin{cases} -1 \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_r t + \varphi_0) & \text{logische "0"} \\ 1 \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_r t + \varphi_0) & \text{logische "1"} \end{cases}$$

$$c(t) = \frac{4}{\pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \frac{1}{5} \cdot \cos\left(\frac{10\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \dots \right)$$

$$\text{Mit } \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cdot \cos(\alpha - \beta)$$

$$s(t) = \frac{2 \cdot \hat{s}_T}{\pi} \cdot$$

$$\left(\cos\left(\omega_r + \frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \cos\left(\omega_r - \frac{2\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\omega_r + \frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) - \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\omega_r - \frac{6\pi}{T_{Sym}} \cdot t\right) + \dots \right)$$

Im Spektrum ergibt sich aus dieser Reihe:

- Der informationslose Träger hat keinen Pegel (es wird keine Leistung dafür verschwendet)
- In den Seitenbändern, welche Information enthalten, ist der Pegel verdoppelt
- Keine Bandbreitenvergrößerung im Bezug zur ASK

Bandbreitenanforderung:

$$B_{PSK \min} = S = \text{Baudrate} \quad (\text{Praxis: } B_{PSK \min} = S \cdot (1 + r))$$

Realisierung von weicheren Phasenübergängen:

- Hoher Modulationsgrad ➔ ähnlicher Verlauf wie AM ➔ eigentlich „analoger“ Verlauf
 - ➔ Die Kurve könnte auch analog interpretiert werden

PSK-Demodulation:

Mischung mit exaktem Referenzträger ➔ TP-Filterung ➔ S&H ➔ Ausgabe Basisband-Signal

Eingangssignal:

$$s_E(t) = \pm \hat{s}_E \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0) \rightarrow \text{man „sieht“ } \pm 1\text{-Mal die Schwingung}$$

Referenzsignal:

$$s_R(t) = \pm \hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t + \psi)$$

Demoduliertes Signal:

$$\begin{aligned} s_{\text{Demod}}(t) &= \pm \hat{s}_E \cdot \hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_T t + \psi) \\ &= \pm \hat{s}_E \cdot \hat{s}_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\cos(\varphi_0 - \psi) \cdot \underbrace{\cos(2\omega_T t + \varphi_0 + \psi)}_{\text{wird durch Filterung entfernt}} \right) \\ &= \pm C \cdot \cos(\varphi_0 - \psi) \\ &\quad \left(C = \hat{s}_E \cdot \hat{s}_R \cdot \frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

- ➔ Der Pegel ist nur vorhanden, wenn die Phasenlage günstig ist (idealerweise $0 \rightarrow \cos(0) = 1$ oder $\pi \rightarrow \cos(\pi) = -1$)
- ➔ Referenzträger f_R muss ziemlich genau mit dem Lokaloszillator beim Sender übereinstimmen \rightarrow aus dem Sendesignal muss ein Rückschluss darauf gezogen werden
- ➔ Beim Träger liegt allerdings im Spektrum nichts vor

PSK Trägerrückgewinnung:

- Durch Mischen der zwei ersten Seitenfrequenzen entstehen Anteile bei 0 Hz, im Basisband, bei $2 \cdot f_T$ sowie um $2 \cdot f_T$ herum
- Um f_T herauszufiltern, wird das Signal über einen Frequenzteiler und anschließend durch ein PLL geschickt \rightarrow Zustände können dann herausgelesen werden

DPSK:

- Differentielle PSK als Variante der PSK
- Es wird eine 1 bei Phasendrehung um π übertragen, ansonsten eine 0
- Das Invertieren des Eingangscodes ändert nichts an der Erkennung (\rightarrow Vorzeichendreher spielt keine Rolle)
- Differentielle Codierung braucht ein Gedächtnis, weil sonst kein Vergleichswert vorliegt, mit dem man vergleichen kann

Q-PSK (4-PSK):

- Man überträgt mit 4 Phasenlagen, die jeweils um 90° verschoben sind
- $B_{PSK \text{ min}} = S = \text{Baudrate}$
 - ➔ Es kann bei gleicher Bandbreite mehr übertragen werden (4 Zustände statt 2)
- Signal setzt sich aus Inphasen (Cosinus)- und Quadraturkomponente (Sinus)
 - ➔ Im konstellationsdiagramm sieht man die idealisierten Werte (die Zeitachse muss man sich als Achse im Raum vorstellen)

QAM (Quadraturamplitudenmodulation) – Modulator:

Differenzcoder (Aufteilung in 2 Wege) → Mapper → Pulsformer → Mischer (einmal 0°, einmal 90°) → Summenausgabe

Oszillator z.B. Sinus → +90° → Cosinus als 2. Mischsignal

QAM – Demodulation:

$$s(t) = \pm 1 \cdot \hat{s}_T \cdot \cos(\omega_T t) \pm 1 \cdot \hat{s}_R \cdot \sin(\omega_T t)$$

Sinus-Mischzweig

$$\hat{s}_R \cdot \sin(\omega_T t)$$

$$s_{De\text{mod}}(t) = \pm \frac{1}{2} \cdot \hat{s}_T \cdot \hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t) \cdot \sin(\omega_T t) \pm \frac{1}{2} \cdot \hat{s}_T \cdot \hat{s}_R \cdot \sin(\omega_T t) \cdot \sin(\omega_T t)$$

~~wird zu 0 oder weggefiltert~~

Cosinus-Mischzweig

$$\hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t)$$

$$s_{De\text{mod}}(t) = \pm \frac{1}{2} \cdot \hat{s}_T \cdot \hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t) \cdot \cos(\omega_T t) \pm \frac{1}{2} \cdot \hat{s}_T \cdot \hat{s}_R \cdot \cos(\omega_T t) \cdot \sin(\omega_T t)$$

~~wird zu 0 oder weggefiltert~~

Clusteranalyse:

Broadcast und Telco haben viel Erfolg mit den Systemen und auch gute Systeme entwickelt. Der Productivity-Bereich hat noch sehr wenig Erfahrung auf diesem Gebiet.

