

# VU Telekommunikation 389.138

## Übung 3 (4. – 6. Juni 2012)

### Beispiel 1 – PSK

Es soll ein PSK-Übertragungssystem mit  $M = 2^N$  Symbolen und folgenden Parametern entworfen werden:

- Graycodierung der Sendesignale
- Die Kanalbandbreite  $B$  beträgt 150 kHz
- Bitrate  $R_b = 1$  Mbit/s
- Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $P_b \leq 10^{-5}$

Bestimmen Sie die Symbolanzahl  $M$  und das benötigte SNR für dieses System.

### Beispiel 2 – BFSK

Ein Kommunikationssystem überträgt Daten mittels binärer FSK-Modulation über einen AWGN-Kanal. Der Empfänger verwendet einen kohärenten Detektor und ein signalangepasstes Filter um die geforderte Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $P_b\{\mathcal{E}\} = 10^{-5}$  zu erreichen. Das Modulationsformat arbeitet in der fünften Nullstelle des  $\rho/T_0$ -Diagramms. Die kleinere Symbolfrequenz beträgt 70 MHz. Am Empfängereingang liegt das Nutzsignal mit einer Leistung von 25 dBm und Rauschen mit einer zweiseitigen spektralen Rauschleistungsdichte von 0,2 nW an.

1. Fertigen Sie eine Skizze des Kommunikationssystems und der verwendeten Signale an.
2. Welche Datenrate ist erzielbar und welche Bandbreite ergibt sich daraus für die Sendesignale?
3. Sind die errechneten Werte realistisch für ein Funkübertragungssystem?

### Beispiel 3 – 8-FSK

Zwei Computer sind über spezielle Datenmodems miteinander verbunden. Mittels 8-FSK wird eine Datenrate von 80 kbaud erreicht, wobei in der dritten Nullstelle des  $\rho/T_0$ -Diagramms gearbeitet wird.

1. Skizzieren Sie das I/Q-Diagramm.
2. Geben Sie die spektrale Effizienz des Systems an.
3. Skizzieren Sie das Spektrum.

## Beispiel 4 – Vergleich von 3–PSK und 3–APK

Gegeben sind zwei Modulationsformate. Das erste ist 3–APK mit folgenden Symbolen:

$$\{0, e^{\frac{\pi j}{3}}, e^{\frac{2\pi j}{3}}\}$$

Das zweite Modulationsformat ist 3–PSK. Die Auftrittswahrscheinlichkeit der drei Symbole ist jeweils gleich.

1. Skizzieren Sie das I/Q–Diagramm.
2. Geben Sie Amplitude und Phase der Symbole für 3–PSK an, wenn beide Modulationsformate mit gleicher Bitfehlerrate operieren sollen.
3. Drücken Sie das Leistungsverhältnis  $P_{\text{ASK}}/P_{\text{PSK}}$  in Dezibel aus.

## Beispiel 5 – RFID–Restträger

Ein passives RFID (Radio Frequency Identification) arbeitet bei 866 MHz. Das Lesegerät verwendet eine Richtantenne mit einem Gewinn  $G = 10$  dB mit äquivalenter Antennentemperatur  $T_{\text{Ant}} = 290$  K und liest damit einen 10 m entfernten RFID Tag aus. Der Tag sendet dabei effektiv folgendes äquivalente Basisbandsignal isotrop aus:

$$A_{\text{TagEIRP}} = \sqrt{P_{\text{Tag}} Z} (5 - j + 2mj) \quad m \in [0, 1], \quad j^2 = -1,$$

wobei  $m \in [0, 1]$  das Informationsbit symbolisiert,  $P_{\text{Tag}} = -58$  dBm. Die Bitrate beträgt  $R_b = 320$  kbit/s, die Empfangsbandbreite  $B = 10/T_0$ , es wird ein Korrelationsempfänger mit einer Rauschzahl  $F = 12$  dB und einer Eingangsimpedanz von  $Z = 50 \Omega$  verwendet, die einseitige gaußsche Rauschleistungsdichte am Korrelatoreingang beträgt  $N_0 = -174$  dBm/Hz, was einer Temperatur von 290 K entspricht.

1. Skizzieren sie das System und das Konstellationsdiagramm.
2. Welche Modulationsart liegt vor?
3. Welches SNR ergibt sich am Eingang des Korrelators, wenn Sie als Signalleistung nur jenen Teil berücksichtigen, der Information enthält?
4. Welche Bitfehlerrate ergibt sich?
5. Der Korrelationsempfänger sei nun digital implementiert. Die Analog-Digitalwandlung erfolgt mit einem mit Gesamtempfangssignal voll ausgesteuerten 12 bit ADC. Welches mittlere  $\text{SN}_{\text{qR}}$  (Sie können eine gleichwahrscheinliche Auswahl der Quantisierungsstufen annehmen.) ergibt sich rein durch die Quantisierung für:
  - a) Das gesamte Empfangssignal?
  - b) Den Information tragenden Teil des Empfangssignals? Hinweis: Überlegen Sie sich, wie viele Quantisierungsstufen durch den Informationssignalanteil ausgefüllt werden.
6. Am Empfängereingang tritt zusätzlich ein frequenzsynchrones Sinusstörsignal mit einer Spitzenspannung von  $U = 12 \mu\text{V}$  auf, das sich geometrisch zur bestehenden Signalkonstellation addiert.
  - a) Skizzieren Sie das Konstellationsdiagramm am Empfängereingang, für zwei Phasenzustände des Störsignals, wenn Sie jeweils den besten und schlechtesten möglichen Fall aus Sicht des digitalen Empfängers berücksichtigen.
  - b) Welches  $\text{SN}_{\text{qR}}$  ergibt sich nun für den Information tragenden Teil des Empfangssignals im schlechtesten möglichen Fall?

## Beispiel 6 – Superheterodynempfänger

Gegeben ist ein Superheterodynempfänger mit folgenden Komponenten, der bei Labortemperaturen betrieben wird: Nach dem Antennenanschluss folgt ein Bandpassfilter mit einer Bandbreite von 5 MHz und einem Verlust von 0,5 dB. Es folgt ein rauscharmer Verstärker (LNA) mit einem Gewinn von 15 dB und einer äquivalenten Rauschtemperatur von 40 K und ein passiver Mischer mit 6 dB Verlust.

In der Zwischenfrequenzebene wird ein 200 kHz Bandpassfilter mit 3 dB Verlust von zwei ZF-Verstärkern gefolgt. Der Erste weist eine Rauschzahl von 4 dB und einen Gewinn von 15 dB auf, der Zweite verstärkt das Zwischenfrequenzsignal um 20 dB bei einer Rauschzahl von 5 dB. An den Empfänger ist eine Antenne mit einer äquivalenten Rauschtemperatur von 100 K angeschlossen.

1. Skizzieren Sie den Empfänger.
2. Tragen Sie in die Skizze die Rauschzahlen aller Komponenten ein.
3. Berechnen Sie die Gesamtrauschzahl des Empfängers.
4. Berechnen Sie die äquivalente Rauschtemperatur des Empfängers.
5. Berechnen sie die Rauschleistung am Ausgang des Empfängers.
6. Berechnen Sie die Gesamtrauschzahl des Empfängers, wenn das Eingangsfiler wie das ZF-Filter beschaffen wäre (nur mit anderer Mittenfrequenz).

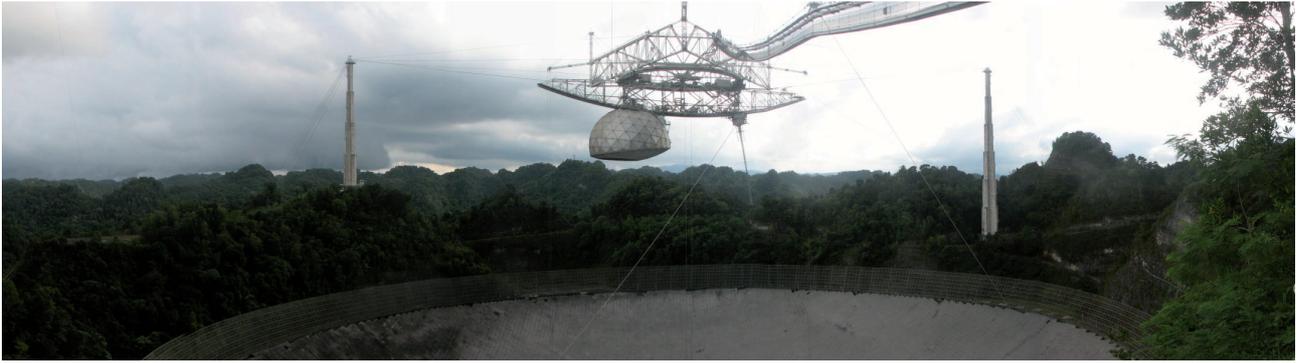
## Beispiel 7 – Richtfunk

Gegeben ist eine Daten-Richtfunkstrecke bei 40 GHz mit gleichartigen Sende- und Empfangsantennen die antipodales PSK über einen AWGN Kanal betreibt. Der Antennengewinn beträgt 50 dB, die Apertur-effizienz beträgt 95 %. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger beträgt 20 km, die Empfängerrauschzahl beträgt  $F = 8$  dB. Die Daten werden in Nibbles aufgeteilt und mittels Blockcode gesichert. Die Prüfmatrix lautet:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

1. Skizzieren Sie den Sachverhalt
2. Wie groß ist die Richtwirkung der Antennen?
3. Wie groß ist die wirksame Antennenfläche?
4. Wie groß ist die minimale Hammingdistanz des Codes?
5. Wie viele Fehler können korrigiert werden?
6. Welches SNR ist nötig um eine Nibblefehlerwahrscheinlichkeit von  $1 \cdot 10^{-6}$  zu erreichen?
7. Welche Sendeleistung ist nötig, um die oben genannte Fehlerwahrscheinlichkeit auch bei Starregen mit einem zusätzlichen Verlust von 20 dB erreichen zu können?

## Beispiel 8 – Arecibo Teleskop



Um auch technisch weniger gut ausgerüsteten Funkamateuren einen Erfolg mit der Betriebsart Erde–Mond–Erde (EME bzw. Moonbounce) zu ermöglichen, wurde als einmaliges Ereignis vom 16. bis 18. April 2010 über das Radioteleskop Arecibo in Puerto Rico unter dem Rufzeichen KP4AO Amateurfunkbetrieb abgewickelt.

Das Teleskop besteht aus einem unbeweglichen parabolischen Reflektor mit einem Durchmesser  $D = 305$  m. Für den Amateurfunkbetrieb wurde für Senden und Empfang eine Frequenz von 432,045 MHz verwendet, die Antennenspeisung erfolgt über einen 457 m langen Hohlleiter mit einer Dämpfung von 0,13 dB/100 m sowie mehrere Hohlleiterdrehverbindungen. Die physikalische Temperatur von Antenne, Verbindern und Hohlleiter liegt im tropischen Klima bei  $T_{\text{ph}} = 310$  K. Die Rauschzahl des Empfängers von KP4AO ist durch einen GaAs HEMT Vorverstärker mit einer äquivalenten Rauschtemperatur von 35 K dominiert. Durch den hohen Gewinn der Antenne von 61 dBi wird nur etwa ein Drittel der Mondoberfläche vom Teleskop beleuchtet, die Arperturntemperatur  $T_a$  des Teleskops ist daher durch die Oberflächentemperatur des Mondes von 210 K dominiert. Die gemessene Systemrauschtemperatur des gesamten Empfangssystems beträgt  $T_e = 350$  K. Der Sender von KP4AO verwendete wahlweise eine Sendeleistung von 35 W bzw. 350 W.<sup>1</sup>

Einer einfach ausgerüsteten Gegenstation stehen 10 W Sendeleistung zur Verfügung, sowie ein Empfänger mit einer Rauschzahl von  $F = 15$  dB und eine einfache Richtantenne mit Gewinn  $G_2$ . Zu untersuchen ist die Betriebsart (Modulationsformat) SSB (Single Side Band) mit einer Bandbreite von  $B=3,2$  kHz und einem benötigten  $\text{SNR} = 20$  dB.

Weitere Angaben: Abstand Erde–Mond: 384 400 km, Radarquerschnitt Mond  $\sigma_M = 9,5 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$ ,  $T_{\text{Ant}} = T_a \eta_\Omega + T_{\text{ph}}(1 - \eta_\Omega)$ .

1. Berechnen Sie die Effizienz der Antenne. Nehmen sie für den folgenden Schritt an, dass es sich dabei rein um die ohmsche Effizienz  $\eta_\Omega$  handelt und  $\eta_a = 1$ .
2. Berechnen Sie die Dämpfung der Hohlleiterdrehverbindungen aus der Systemtemperatur.
3. Geben Sie einen Ausdruck für die Signaldämpfung auf der Strecke Erde–Mond–Erde an.
4. Welchen Gewinn  $G_2$  muss die Antenne der Gegenstation aufweisen, um KP4AO empfangen zu können?
5. Welchen Gewinn  $G_2$  muss die Antenne der Gegenstation aufweisen, um von KP4AO empfangen zu werden?

<sup>1</sup>Alle technischen Angaben zu KP4AO und Arecibo entstammen dem Artikel: J. Taylor, A.Vazquez, and J. Breakall, „Moonbounce from Arecibo Observatory“, QST. ARRL August 2010

## Beispiel 9 – Arecibo JT65

Dieses Beispiel behandelt wie Beispiel 8 Amateurfunkbetrieb von Arecibo, allerdings soll nun die digitale Betriebsart JT65 untersucht werden, die speziell für EME-Verbindungen im Amateurfunk entwickelt worden ist.<sup>2</sup> Die für EME-Verbindungen üblichen Daten werden bei dieser Betriebsart mittels Quellcodierung auf 72 bits reduziert. Zu diesen 72 bits an Nutzdaten werden mittels Reed-Solomon-Code weitere 306 bits hinzugefügt, die zu 63 Symbolen zusammengefasst werden.

Als Modulationsformat wird 65-FSK verwendet. In der im Modem (PC-Soundcard) verwendeten Zwischenfrequenzebene stellt sich die Modulation wie folgt dar: Ein Rahmen enthält 126 Symbole, die Symboldauer beträgt  $T_0 = 0,372$  s. Als Grundton wird die Frequenz  $f_0 = 1270,5$  Hz verwendet. Die Modulationstöne werden entsprechend folgender Formel gebildet:

$$f_m = f_0 + 2,6917 \text{ Hz} \cdot (N + 2)m, \quad N \in \{1, 2, 4\},$$

wobei  $m \in [1, 65]$  den Symbolindex darstellt. Das Symbol „0“ wird als Synchronisationssymbol in den restlichen der 126 Zeitschlitzte gesendet, die nicht mit einem der 63 Datensymbole belegt sind.

Hinweis: Reed-Solomon-Codes sind Maximum-Distance-Codes und erfüllen daher:  $d_{\min} = n - k + 1$ .

1. Skizzieren Sie die verwendete Datenaufbereitung sowie das zu erwartende Spektrum.
2. Wie viele Bits werden in ein Symbol encodiert?
3. Wie groß ist die Coderate der verwendeten Vorwärts-Fehler-Korrektur?
4. Sind die Symbole bei dem verwendeten Modulationsformat orthogonal?
5. Wie lange dauert die Übertragung eines Rahmens?
6. Stellen Sie einen Ausdruck für die Wahrscheinlichkeit eines Blockfehlers auf.
7. Die zulässige Bitfehlerwahrscheinlichkeit der RS-codierten Daten beträgt  $1/4$ . Berechnen Sie unter der Annahme von perfekter Synchronisation für  $N = 2$ :
  - a) Die zulässige Symbolfehlerwahrscheinlichkeit bei Graycodierung.
  - b) Das hierfür notwendige SNR.
  - c) Die notwendige EIRP einer Amateurfunkstation um KP4AO zu erreichen.
  - d) Den notwendigen Antennengewinn dieser Amateurfunkstation um KP4AO zu hören, wenn diese mit der geringeren Sendeleistung sendet und sonst alle Daten wie in der Angabe zu Bsp 8 bleiben.

---

<sup>2</sup>Alle technischen Angaben aus: J. Taylor K1JT „The JT65 Communications Protocol“, <http://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/JT65.pdf>

## Beispiel 10 – SDH Richtfunkstrecke

Ein Richtfunkssystem für SDH Hierarchiestufe STM-4 (622 Mbit/s) soll zwischen zwei Berggipfeln im Abstand von 30 km bei einer Betriebsfrequenz von 26 GHz mittels graycodierter QAM-64 errichtet werden. Um die Übertragungssicherheit zu erhöhen wird ein (10,8)-Blockcode verwendet. Für eine praktisch fehlerfreie Übertragung ist eine uncodierte Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $P_{br} \leq 10^{-6}$  nötig. Sende- und Empfangsantennen sind Muschelantennen mit einer effektiven Antennenfläche  $a_e = 1 \text{ m}^2$ . Der Korrelationsempfänger weist eine Rauschzahl  $F$  von 4 dB auf, für die Hintergrundtemperatur der Antenne kann  $T_a = 313 \text{ K}$  angenommen werden,  $T_0 B = 1$ .

1. Skizzieren Sie den Sachverhalt.
2. Berechnen Sie die Gewinne der verwendeten Antennen.
3. Wie groß ist die benötigte Sendeleistung, wenn für Starkregen eine Pegelreserve von 20 dB eingeplant werden soll?
4. Welche Sendeleistung wäre nötig, wenn bei sonst gleich bleibenden Parametern statt QAM-64 PSK-64 verwendet werden soll? Schätzen Sie das Ergebnis auch mit einer Geometrieüberlegung über das Konstellationsdiagramm ab.