

E25 Modulation

Grundlagen

Zur elektronischen Übertragung von Informationen muss im Allgemeinen eine elektrische Wechselspannung geeigneter Frequenz ω_T , mit dem zu übertragenden Signal moduliert werden. Die im Signal auftretenden Frequenzen ω_m sind dabei sehr viel kleiner als die Trägerfrequenz ω_T .

Von den vielen existierenden Modulationsverfahren soll hier die Amplitudenmodulation näher betrachtet werden. Mathematisch lässt sie sich durch die Multiplikation des zu übertragenden Signals¹ $U_M(t) = U_0 + U_M \cos(\omega_M t)$ mit einer harmonischen Trägerspannung $U_T(t) \propto \cos(\omega_T t)$ beschreiben.

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_T t) + \frac{1}{2} \cos((\omega_T + \omega_M)t) + \frac{1}{2} \cos((\omega_T - \omega_M)t) \quad (1)$$

Neben der Trägerfrequenz entstehen Spannungsanteile mit den Seitenfrequenzen $\omega_T + \omega_M$ und $\omega_T - \omega_M$. Ist $U_M(t)$ nicht harmonisch, gilt (1) für jede Spektralkomponente der Modulationsspannung. Ist deren Spektrum durch die Frequenzen $\omega_{M,min}$ und $\omega_{M,max}$ begrenzt, entstehen so genannte Seitenbänder im Bereich von $(\omega_T - \omega_{M,max}) \dots (\omega_T - \omega_{M,min})$ und $(\omega_T + \omega_{M,min}) \dots (\omega_T + \omega_{M,max})$.

Durch die Modulation werden die Signalfrequenzen in einen Bereich um die Trägerfrequenz hin verschoben. Durch die Wahl verschiedener Trägerfrequenzen, welche mindestens im Abstand $B = 2\omega_{M,max}$ liegen müssen, lassen sich so mittels eines Trägermediums (Funkwelle, Kabel, ...) viele Signale gleichzeitig übertragen. Die zur Übertragung benötigten Signale sind vollständig in nur einem Seitenband enthalten. Zur Reduzierung der Sendeleistung und der Übertragungsbandbreite B auf $\omega_{M,max} - \omega_{M,min}$ kann das zweite Seitenband unterdrückt werden. Durch eine Modifizierung des Modulationsverfahrens lässt sich erreichen, dass auch die Trägerfrequenz nicht entsteht, was eine weitere Reduzierung von Sendeleistung und Bandbreite erlaubt.

Die elektrotechnische Umsetzung von (1) gelingt bei den meist erforderlichen hohen Trägerfrequenzen und den benötigten Bandbreiten nur bedingt.

Stattdessen können der Träger und die Modulationsspannung zunächst addiert und danach einem Bauelement mit einer nichtlinearen Kennlinie (z.B. eines Transistors) zugeführt werden. In erster Näherung verläuft die Kennlinie am entsprechenden Arbeitspunkt quadratisch

$$U = a(U_T + U_M)^2 + b(U_T + U_M) + c. \quad (2)$$

Setzt man die entsprechenden Funktionen ein, folgen neben

¹Soll im modulierten Signal ein Anteil mit der Trägerfrequenz enthalten sein, muss die Modulationsspannung einen Gleichanteil U_0 enthalten.

einem konstanten Term Anteile

$$\begin{aligned} &\propto \cos(\omega_T t) \\ &\propto \cos(\omega_M t) \\ &\propto \cos((\omega_T + \omega_M)t) \\ &\propto \cos((\omega_T - \omega_M)t) \\ &\propto \cos(2\omega_T t) \\ &\propto \cos(2\omega_M t) \end{aligned} \quad (3)$$

Neben den schon von der multiplikativen Modulation bekannten Seitenfrequenzen treten hier noch Anteile mit der einfachen und doppelten Frequenz von Träger- und Modulationsspannung auf. Diese können durch geeignete Filter eliminiert werden.

Werden zur Übertragung der Signale sowohl beide Seitenbänder als auch das Trägersignal genutzt, kann die Demodulation im einfachsten Falle durch eine simple Gleichrichtung des Empfangssignals erfolgen. Die Trägerreste werden durch einen Tiefpassfilter, dessen Grenzfrequenz bei $f_{m,max}$ liegt, unterdrückt.

In der Abbildung 1 ist eine einfache Schaltung zur Modulation und nachfolgender Demodulation dargestellt. Die beiden Eingangssignale werden mit den Widerständen R_{1a} und R_{1b} zunächst addiert und dann der einfachen Verstärkerstufe in Emitterschaltung zugeführt. Durch geeignete Wahl des Arbeitspunktes mit R_{B1} arbeitet diese im nichtlinearen Bereich. Durch die Gegenkopplung mit C_G und R_G wird die Bandbreite des Verstärkers vergrößert. Die Trägerfrequenz wird nach Auskopplung des Mischsignals über C_2 mittels eines abstimmbaren Parallelschwingkreises² selektiert. Die Demodulation erfolgt mit einer Diode durch Gleichrichtung des Signals. Hochfrequente Trägerreste werden mit dem Kondensator C_D unterdrückt.

Ist allgemein der Träger vorhanden, kann die Demodulation genau wie die Modulation an einem Bauelement mit einer nichtlinearen (quadratischen) Kennlinie erfolgen. Wenn der Träger zur Übertragung unterdrückt wurde, kann die Demodulation durch Multiplikation mit einer Spannung mit der Frequenz des Trägers erfolgen.

Die oben gemachten Ausführungen lassen sich experimentell mit Hilfe eines Spektrumanalysators verifizieren.

Im Gegensatz zu einem Oszilloskop, welches den zeitlichen Verlauf einer elektrischen Spannung darstellt, zeigt ein Spektrumanalysator die in einer Wechselspannung enthaltenen Frequenzanteile quantitativ an. In digital arbeitenden Geräten wird dazu der Zeitverlauf des Signals einer Fourieranalyse unterzogen.³⁴

In analog arbeitenden Spektrumanalysatoren wird im Wesentlichen das zu untersuchende Signal mit der Frequenz f_s

²Die Bandbreite muss so groß sein, dass die beiden Seitenbänder erhalten bleiben.

³Um die Signale in Echtzeit analysieren zu können, nutzt man übli-

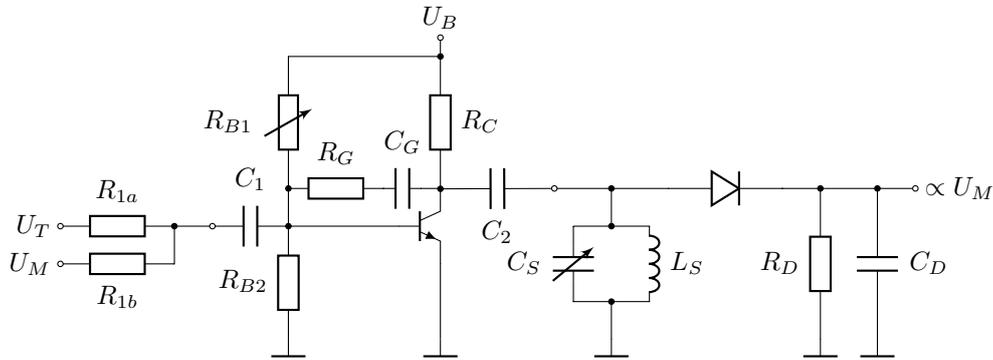


Abbildung 1: Einfache Schaltung zur Modulation zweier Spannungen U_T und U_M mit nachfolgender Demodulation mit Hüllkurvendemodulator.

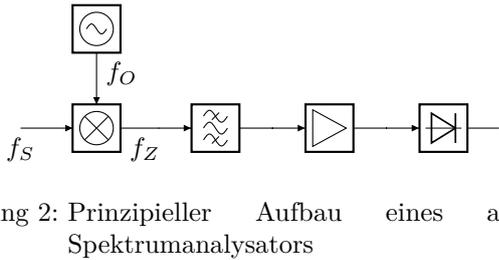


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines analogen Spektrumanalysators

mit einer im Gerät von einem Oszillator erzeugten Wechselspannung der Frequenz $f_O \geq f_S$ in einem Mischer durch Multiplikation, analog zu (1), gemischt. Mit einem auf eine feste Zwischenfrequenz f_Z eingestellten Bandpass wird das unter anderem entstehende Signal mit der Differenzfrequenz selektiert und kann mit einem nachfolgenden schmalbandigem Verstärker verstärkt werden. Die meist einstellbare Bandbreite begrenzt die erreichbare Frequenzauflösung. Nach Gleichrichtung der Zwischenfrequenz wird deren Intensität meist logarithmisch über der Signalfrequenz $f_S = f_O - f_Z$ dargestellt.⁵ Die jeweils verarbeitete Signalfrequenz wird durch die Oszillatorfrequenz bestimmt. Um das Eingangssignal über einen Frequenzbereich $f_{S1} \dots f_{S2}$ darstellen zu können, muss die Oszillatorfrequenz zeitlinear im Bereich $(f_{S1} + f_Z) \dots (f_{S2} + f_Z)$ zyklisch variiert werden.

Für die Darstellung von Frequenzgängen von Vierpolen wie beispielsweise Filtern o. ä. kann mit einem Mitlaufgenerator⁶ eine Wechselspannung mit einer der jeweiligen Signalfrequenz identischen Frequenz konstanter Amplitude erzeugt werden. Sie dient als Eingangssignal des Vierpols dessen Ausgangssignal analysiert werden soll.

Versuchsvorbereitung

- Darstellung zeitlich periodischer Vorgänge im Frequenzbereich

cherweise die Fast Fourier Transformation, kurz FFT.

⁴Für viele Fälle ist die in vielen Digitaloszilloskopen integrierte FFT gut geeignet.

⁵Die Gleichrichtung entspricht der Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals. Deshalb kann der Spektrumanalysator an dieser Stelle als Empfänger z. B. für Rundfunk im LW, MW und KW-Bereich benutzt werden. Das beschriebene Verfahren ist das Standardverfahren für den Empfang von Funkübertragungen. Entsprechende Empfänger werden als Superheterodynempfänger, kurz Superhet bezeichnet.

⁶Der Mitlaufgenerator arbeitet als Wobbelgenerator.

- Kennlinien von Dioden und Bipolartransistoren
- Dimensionieren Sie die Verstärkerstufe (ohne Gegenkopplung) in der Abbildung 1 mit den Parametern aus dem Kennlinienfeld des Transistors im Versuch E22 für eine Betriebsspannung von ca. 15 V. Legen Sie den Arbeitspunkt in den nichtlinearen Bereich.
- Zeigen Sie, dass die beiden Spannungen U_T und U_M durch die Widerstände R_{1a} und R_{1b} addiert werden.
- Schwingkreis, Bandbreite, Resonanzfrequenz
- Zeigen Sie die Gültigkeit von (1) und (3).
- Zeigen Sie, dass bei der Demodulation an einem nichtlinearen Bauelement die Modulationsspannung reproduziert wird.
- Welches Frequenzspektrum entsteht, wenn eine Spannung mit genau einer Frequenz an der quadratischen Kennlinie (2) übertragen wird?
- Frequenzbereiche und Modulationsarten von Funkdiensten
- Machen Sie sich die Arbeitsweise eines Radioempfängers (Superhet) klar.
- Warum werden für Funkübertragungen immer höhere Trägerfrequenzen benutzt?

Aufgaben

- Bauen Sie den in der Schaltung in Abbildung 1 enthaltenen Verstärker auf.
Bestimmen Sie seine Bandbreite ohne Gegenkopplung. Fügen Sie die Gegenkopplung hinzu und beobachten Sie den Frequenzgang des Verstärkers.
- Addieren Sie zwei Gleichspannungen um zu zeigen, dass Ihre Vorbetrachtungen richtig sind.
- Addieren Sie zwei Wechselspannungen. Beobachten Sie das Frequenzspektrum der einzelnen Spannungen und das des Summensignals.

- Verstärken Sie die einzelnen Spannungen bzw. das Summensignal mit dem aufgebauten Verstärker. Beobachten Sie das Frequenzspektrum am Ausgang. Verschieben Sie jeweils den Arbeitspunkt der Schaltung in den nicht-linearen Bereich und beobachten Sie das Frequenzspektrum.
- Filtern Sie mit einem Bandpass die Trägerfrequenz mit den beiden Seitenbändern und demodulieren sie diese.