

Digitale und Analoge Modulationsverfahren

Inhaltsverzeichnis

1	Idealisierte analoge und digitale Signale	1
2	Bezeichnungen für digitale Modulationsverfahren	2
3	Eingriffsmöglichkeiten in den Hochfrequenz-Träger	2
3.1	Amplituden-Modulation	3
3.2	Winkelmodulation	4
4	Modulator-Blockschaltungen	5
4.1	Erzeugung von DSB	5
4.2	Erzeugung von Quadratur-DSB (QDSB) bzw. QAM und QPSK	5
4.3	Erzeugung von Winkel-Modulationen	6
4.3.1	Erzeugung von Winkelmodulation mit NCO	6
4.3.2	Quadratur Phasen-Modulator mit Cos- und Sin-Vorverzerrung	6
5	Vergleich der digitalen und analogen Modulationsverfahren	7
5.1	Übertragungstechnische Einteilung der digitalen Modulationen	10

Abbildungsverzeichnis

1.1	Spektrale Leistungsdichte von rechteckförmigen Daten-Symbolen, in linearer und logarithmischer Darstellung	1
3.1	Typische Zeitverläufe von DSB und AM. Bei einem Nulldurchgang der Hüllkurve (der DSB) erfolgt ein Phasensprung der Trägerschwingung um π (markiert mit \downarrow)	3
3.2	Erzeugung von PM mit FM-Modulator und FM mit PM-Modulator	4
3.3	Schwingungsformen von FM und PM (erzeugt mit FM-Modulator)	4
3.4	FM und PM Zeitverläufe für Cosinus-förmiges Nachrichtensignal	5
4.1	Blockschaltbild zur Erzeugung von DSB	5
4.2	Blockschaltbild zur Erzeugung von QPSK & QAM (analog: QDSB). Das Digital Baseband Signal Processing enthält die Blöcke: Mapping und Interpolator (mit D/A -Wandlung).	6
4.3	Blockschaltbild eines NCO	6
4.4	Zerlegung eines Pendelzeigers in seine „Inphasen“- und „Quadratur“-Komponente. Die Amplitude A ist als \hat{U}_C zu lesen.	7
4.5	Quadratur Phasen-Modulator	7
5.1	Amplituden-, Frequenz-, und Phasentastung	8
5.2	ASK mit bipolarem Datensignal ist eine DSB	8
5.3	Doppelseitenband-Modulation (DSB) und Phasenmodulation (PM) bei verrundetem Datensignal	9
5.4	Hochfrequenz-Bandbreite von DSB bzw. PM/FM	10

Digitale und Analoge Modulationsverfahren

Ganz zu Anfang waren die „analoge Welten“ völlig getrennt von den „digitalen Welten“. Diese lassen sich folgendermaßen charakterisieren.

- Analoge Signale sind **für alle Zeitpunkte** definiert.
- Digitale Signale sind **nur zu den Abtast- oder Taktzeitpunkten** definiert.
- Ein wichtiges Kriterium für analoge Signale ist deren Spektralverteilung und Bandbreite.
- Wichtig für digitale Signale ist die eindeutige Zuordenbarkeit zu logischen „1“ und „0“ Zuständen.

Diese unterschiedlichen Blickwinkel führten dazu, daß sich in jeder dieser „Welten“ praktisch unabhängig von einander Bezeichnungen herausbildeten, und in Folge dessen für gleiche oder ähnliche physikalische Prozesse unterschiedliche und damit in manchen Fällen auch widersprüchliche bzw. irreführende Namen verwendet werden. Dies trifft insbesondere für die Modulationsverfahren zu, welche hier näher betrachtet werden.

1 Idealisierte analoge und digitale Signale

Im Analogen sind die Sinusschwingung bzw. die Cosinusschwingung der Idealtypus eines Signals. Mit Hilfe dieser Signale lassen sich lineare Netzwerke beschreiben, wovon z.B. die komplexe Wechselstromrechnung Gebrauch macht.

Spektral haben Sinus bzw. Cosinus nur eine einzige Linie (bei positiven Frequenzen). Diese Schwingungsformen kommen damit (theoretisch) mit der minimal möglichen Bandbreite $B \rightarrow 0$ bei einer Übertragung aus.

Im Digitalen besteht der Idealtypus eines Signals aus einer rechteckförmigen Zeitfunktion, bestehend aus „1“ und „0“ Bits, die quasi in zufälliger Weise auf einander zu folgen scheinen.

Von einer solchen Zeitfunktion läßt sich infolge mangelnder Kenntnis der genauen Abfolge der „1“ und „0“ Bits unmittelbar keine Spektralverteilung bestimmen. Man muß hier einen Umweg über die **Autokorrelationsfunktion** (AKF) und die spektrale **Leistungs-Dichte** (PSD) wählen. Für den Fall, daß die einzelnen Bits **statistisch von einander unabhängig** sind, so gewinnt man die spektrale Leistungsdichte aus der Form eines einzelnen „1“ Bits.

Damit hat man den wohlbekannten Zusammenhang von rechteckförmiger Zeitfunktion $\Pi(t)$ und $\frac{\sin(x)}{x}$ förmiger Spektralverteilung $F(\omega)$, d.h. $\left(\frac{\sin(x)}{x}\right)^2$ Form der Spektralen Leistungs-Dichte $P(\omega)$, Bild 1.1.

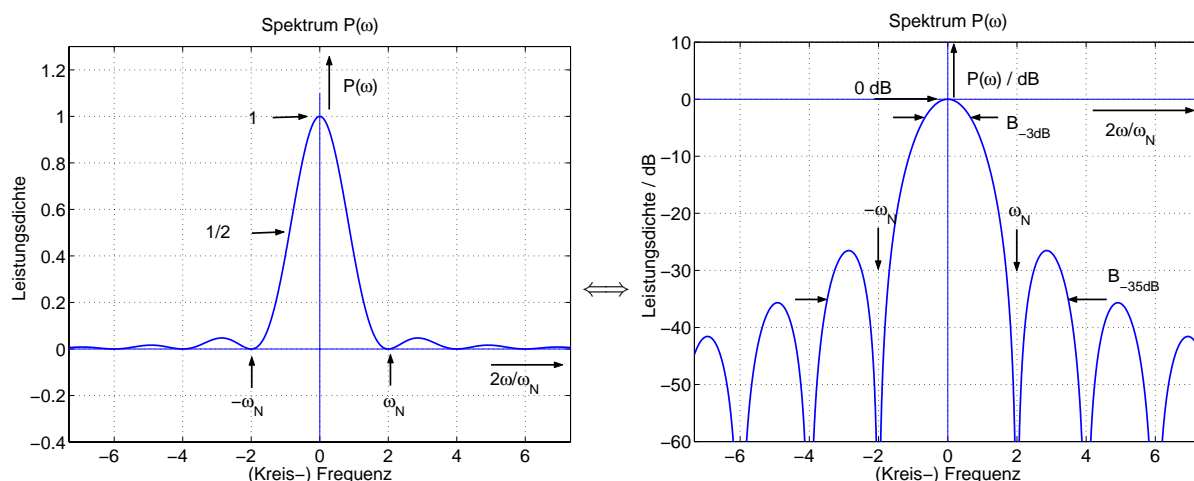


Bild 1.1: Spektrale Leistungsdichte von rechteckförmigen Daten-Symbolen, in linearer und logarithmischer Darstellung

Hieraus geht hervor, daß die Bandbreite B dieses „idealen“ digitalen Signals gegen $B \rightarrow \infty$ geht.

Übertragungskanäle (bzw. Übertragungssysteme) haben grundsätzlich eine begrenzte Bandbreite $B \neq \infty$. Daher sind für eine Übertragung „ideale“ digitale Signale nicht verwendbar. Abhilfe schafft nur, das digitale Signal geeignet zu „verrunden“. Damit wird aus einem „reinen“ Digitalsignal ein **analoges Signal** mit (auf einfache Weise) **digital auswertbaren Eigenschaften**.

Wir sind damit an der Stelle angelangt, wo sich analoge und digitale „Welten“ miteinander verquicken.

2 Bezeichnungen für digitale Modulationsverfahren

Die Bezeichnungen für digitale Modulationen stammen aus deren Eigenschaften zu den Abtastzeitpunkten auf der Empfängerseite. Hierbei wird jeweils die Eigenschaft benannt, die sich von Abtastzeitpunkt zu Abtastzeitpunkt im Empfangssignal geändert haben kann: Phase φ , Frequenz Ω_C , Amplitude \hat{U}_C bzw. Kombinationen daraus. Die wichtigsten hierbei verwendeten Begriffe sind:

PSK Phase Shift Keying

FSK Frequency Shift Keying

ASK Amplitude Shift Keying

QAM Quadrature Amplitude Modulation

APSK Amplitude Phase Shift Keying

CPM Continuous Phase Modulation

MSK Minimum Shift Keying

GMSK Gaussian Minimum Shift Keying

CPFSK Continuous Phase FSK

TFM Tamed Frequency Modulation

Keying bedeutet (Um-) Tasten¹ und dies ist damit ein deutlicher Hinweis darauf, daß die digitale Modulation **nur zu den Abtastzeitpunkten** betrachtet wird. Daher geht aus diesen Bezeichnungen meist nicht hervor, was zwischenzeitlich d.h. zwischen den Abtastzeitpunkten mit dem Signal passiert.

Das geht oft sogar so weit, daß salopp davon gesprochen wird, daß die Amplitude „springt“ oder die Phase „umspringt“.

3 Eingriffsmöglichkeiten in den Hochfrequenz-Träger

Modulation bedeutet, einem hochfrequenten Träger eine Information $u_N(t)$ aufzuprägen. Der hochfrequente Träger ist i.a. eine Cosinusschwingung.

$$u_C(t) = \hat{U}_C \cos\{\psi(t)\} = \hat{U}_C \cdot \cos(\Omega_C t + \varphi) \quad (3.1)$$

Es gibt somit **genau 3 Möglichkeiten**, die Parameter dieses Trägers durch ein Nachrichtensignal $u_N(t)$ zu beeinflussen, egal ob dieses „analog“ oder „digital“ ist:

Amplitude	$\hat{U}_C \implies \hat{U}_C\{u_N(t)\}$:	Amplitudenmodulation	(3.2)
Frequenz	$\Omega_C \implies \Omega_C\{u_N(t)\}$:	Frequenzmodulation	
Phase	$\varphi \implies \varphi\{u_N(t)\}$:	Phasenmodulation	

Um zu erkennen, bei welcher der digitalen Modulationsarten in welchen Parameter der Trägerschwingung eingegriffen wird, werden zunächst die (klassischen) analogen Modulationsverfahren kurz betrachtet und deren charakteristischen Eigenschaften herausgearbeitet.

¹„Key“ ist auch die Bezeichnung für die Morse-Taste.

3.1 Amplituden-Modulation

Bei der Amplitudenmodulation gibt es folgende Varianten, Bild 3.1 :

$$\begin{array}{l} \hat{U}_C\{u_N(t)\} = [\hat{U}_{C_0} + k_{AM} \cdot u_N(t)] : \text{AM } \textbf{„gewöhnliche“ Amplituden-Modulation} \\ \hat{U}_C\{u_N(t)\} = k_{DSB} \cdot u_N(t) : \text{DSB } \textbf{Doppel-Seitenband-Modulation} \end{array} \quad (3.3)$$

- k_{AM} ist die Modulatorkonstante für AM. \hat{U}_{C_0} bestimmt die Amplitude des HF Trägers.
- Die Nachrichtenspannung $u_N(t)$ tritt bei AM als obere und (invertiert) als untere Hüllkurve auf. AM kann daher mittels eines Hüllkurven-Detektors demoduliert werden. (asynchrone Demodulation)
- AM wird i.a. nicht zur Übertragung von Digitalsignalen verwendet.
Ausnahme: Optische Übertragung, bei der ein LASER entsprechend zum Datensignal „1“ eingeschaltet wird.
- k_{DSB} ist die Modulatorkonstante für DSB. **DSB hat im Spektrum keine HF Träger-Linie.**
- Die Nachrichtenspannung $u_N(t)$ tritt bei DSB als Hüllkurve der Hochfrequenz auf. Obere und untere Hüllkurve überschneiden sich, wodurch Phasensprünge von π im hochfrequenten Signal entstehen.
Man beachte die Phasensprünge von π bei der DSB, an den Stellen wo die Nachrichtenspannung $u_N(t)$ durch 0 geht, siehe die Pfeile in Bild 3.1.

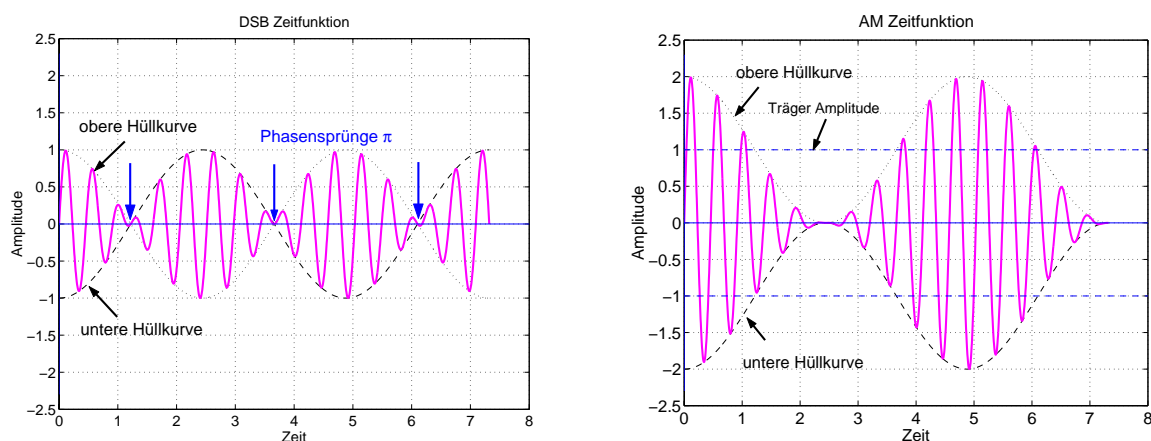


Bild 3.1: Typische Zeitverläufe von DSB und AM. Bei einem Nulldurchgang der Hüllkurve (der DSB) erfolgt ein Phasensprung der Trägerschwingung um π (markiert mit \downarrow)

- Diese Eigenschaft der DSB wird für Datenübertragung benutzt: 0° Phase entspricht logisch „1“, 180° Phase entspricht logisch „0“. Die entsprechenden digitalen Modulationen werden dann jedoch als **Phasen-Umtastung Phase Shift Keying, (PSK)** bezeichnet.
Die Ähnlichkeit im Namen führt häufig zu **Verwechslungen** mit (echter) Phasenmodulation (PM), zumal in der angelsächsischen Literatur PSK oft auch als **„phase modulation“** bezeichnet wird.
- Die digitale PSK Modulation (Phase Shift Keying) ist demzufolge keine Phasen-Modulation im übertragungstechnischen Sinne, sondern eine Doppelseitenband-Modulation (DSB) mit unterdrücktem HF Träger.
- **Charakteristisch für eine Amplitudenmodulation bzw. DSB** sind
 - die **äquidistanten** Nulldurchgänge der modulierten hochfrequenten Schwingung. Dies folgt daraus, weil per Definition hier nur in die Amplitude, nicht aber in die Frequenz oder in die Phase des Hochfrequenz-Trägers eingegriffen wird.
 - daß die Bandbreite der Modulation **exakt das doppelte** der Grenzfrequenz des modulierenden Signals ist.

3.2 Winkelmodulation

Bei der **Winkelmodulation** gibt es zwei **von einander abhängige** Möglichkeiten.

$$\begin{array}{l} \varphi\{u_N(t)\} = k_{PM} \cdot u_N(t) \quad : \quad \text{PM} \quad \text{Phasenmodulation} \\ \frac{d\varphi\{u_N(t)\}}{dt} = k_{FM} \cdot u_N(t) \quad : \quad \text{FM} \quad \text{Frequenzmodulation} \end{array} \quad (3.4)$$

Die Konstanten k_{PM} , k_{FM} in Gleichung (3.4) sind die Modulatorkonstanten für PM bzw. FM. Die Winkelmodulationen haben folgende Eigenschaften:

- Da sich $\varphi(t)$ ändert, wenn sich $d\varphi(t)/dt$ ändert, treten Phasenmodulation und Frequenzmodulation **immer gleichzeitig** auf.
- Man kann daher mit Hilfe eines Phasenmodulators auch eine FM erzeugen und mittels eines Frequenzmodulators eine PM. Dafür muß nur das Nachrichtensignal $u_N(t)$ integriert bzw. differenziert werden, siehe Bild 3.2. FM und PM treten also immer gemeinsam auf, weshalb diese auch mit **Winkel-Modulationen** bezeichnet werden.

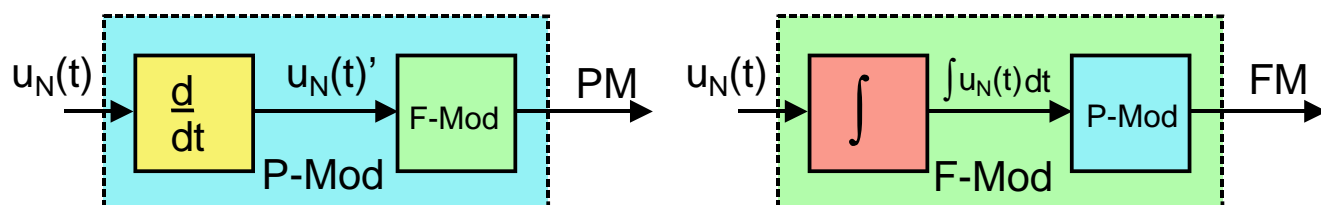


Bild 3.2: Erzeugung von PM mit FM-Modulator und FM mit PM-Modulator

- Die Unterscheidung im Namen (FM, PM) zeigt nur, welche Größe der Nachrichtenspannung proportional ist, Gleichung (3.4) und Bild 3.3¹ [3].

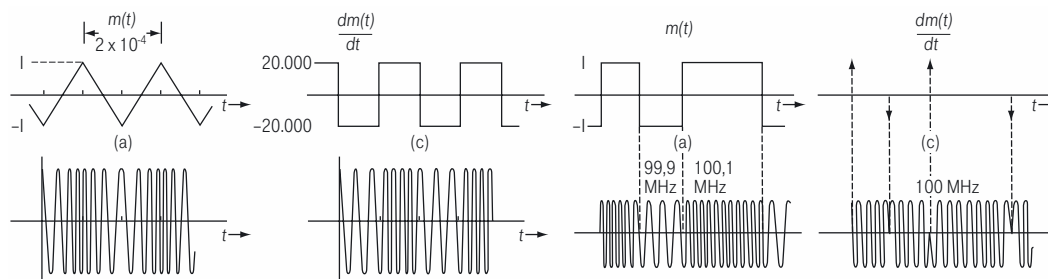


Bild 3.3: Schwingungsformen von FM und PM (erzeugt mit FM-Modulator)

- Demzufolge sind die Zeitverläufe von PM und FM für eine cosinusförmige Nachrichtenspannung bis auf eine Phasenverschiebung gleich, Bild 3.4.
- **Charakteristisch für eine Winkelmodulation** sind
 - die **absolut konstante Amplitude** der modulierten Schwingung. Auch das ist wieder eine Selbstverständlichkeit, denn es wird bei der Winkelmodulation nur in den Winkel, aber nicht in die Amplitude der Trägerschwingung eingegriffen.
 - daß die Bandbreite der Modulation **größer als das doppelte** der Grenzfrequenz des modulierenden Signals ist.

¹Man beachte, daß die Differentiation einer rechteckförmigen Signalspannung auf δ -Impulse führt. Ein realer FM-Modulator wäre damit übersteuert.

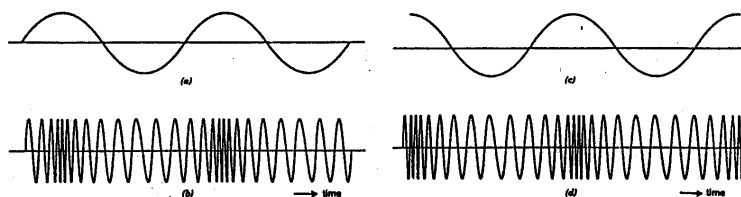


Bild 3.4: FM und PM Zeitverläufe für Cosinus-förmiges Nachrichtensignal

4 Modulator-Blockschaltungen

Die Blockschaltungen zur Erzeugung der Modulationsarten sind sehr hilfreich für den Vergleich zwischen den analogen und den digitalen Modulationsverfahren und für die Klassifizierung der digitalen Modulationsarten im übertragungstechnischen Sinne.

4.1 Erzeugung von DSB

Gemäß Gleichung (3.3) wird zur Erzeugung von DSB das Nachrichtensignal $u_N(t)$ mit dem Trägersignal $\cos(\Omega_C t)$ multipliziert.

Hierzu benötigt man einen Multiplizierer, in Bild 4.1 als \otimes dargestellt, der allerdings technisch auf mehrere Arten realisierbar ist.

- Analoger Multiplizierer (als integrierter Schaltkreis erhältlich)
- Schaltmodulator mit anschließendem Bandpaß-Filter zur Unterdrückung von harmonischen Frequenzen. Der Schaltmodulator wird auch als Ring-Modulator bezeichnet und in Dioden- oder Transistortechnik realisiert.
- Multiplizierender D/A-Wandler

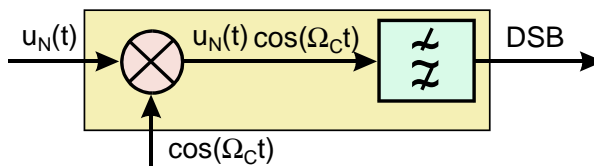


Bild 4.1: Blockschaltbild zur Erzeugung von DSB

4.2 Erzeugung von Quadratur-DSB (QDSB) bzw. QAM und QPSK

QDSB ist eine Erweiterung von DSB. Wird bei DSB das Nachrichtensignal $u_N(t)$ mit einem Cosinus-Träger $\cos(\Omega_C t)$ multipliziert, so stellt QDSB die Möglichkeit dar, zwei von einander unabhängige Nachrichtensignale $u_I(t) = I(t)$ bzw. $u_Q(t) = Q(t)$ mit zwei Trägern $\cos(\Omega_C t)$ bzw. $\sin(\Omega_C t)$ zu multiplizieren¹.

Die beiden modulierten Schwingungen, die so entstehen, haben zwar die gleiche Mittenfrequenz, sind jedoch zu einander **orthogonal**. Sie können daher empfangsseitig wiederum getrennt werden. Die QDSB gestattet daher, im gleichen Frequenzband wie die DSB die doppelte Menge an Information zu übertragen. Das Blockschaltbild des Quadratur-Modulators, Bild 4.2, ist damit unmittelbar aus dem Blockschaltbild des DSB-Modulators (Bild 4.1) zu verstehen. Der linke Block (gelb unterlegt) wandelt die Daten um in verrundete I- und Q-Symbole. Der rechte Teil (grün unterlegt) ist der analoge I/Q Quadratur-Modulator.

Die meisten digitalen Modulationen werden mittels Quadratur-Modulator erzeugt, weil hierdurch eine Modulation mit minimaler Bandbreite entsteht. Die I und Q Symbole müssen zu diesem Zweck verrundet werden, was in Bild 4.2 durch den Block „Digitale Interpolation“ geschieht².

¹ $I(t)$ (In Phase) und $Q(t)$ (Quadratur Phase). Das DSB modulierte $Q(t)$ Signal hat 90° Phasendrehung gegenüber dem DSB modulierten $I(t)$ Signal.

²Für eine analoge QDSB sind die gelb unterlegten Blöcke nicht erforderlich.

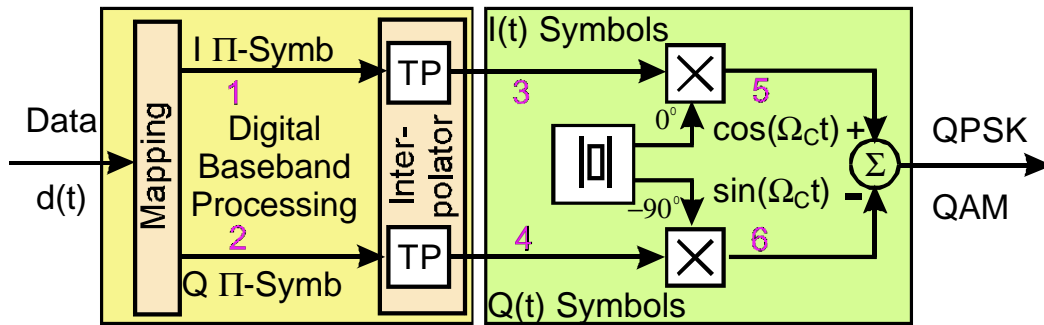


Bild 4.2: Blockschaltbild zur Erzeugung von QPSK & QAM (analog: QDSB). Das Digital Baseband Signal Processing enthält die Blöcke: Mapping und Interpolator (mit D/A –Wandlung).

4.3 Erzeugung von Winkel-Modulationen

Nach Gleichung (3.4) wird in das Argument des hochfrequenten Trägers, also in dessen Phase bzw. Frequenz, eingegriffen.

Viele der für analoge Winkelmodulationen üblichen Schaltungen arbeiten für digitale Anforderungen nicht präzise genug, wie z.B. die Beeinflussung der Frequenz über Kapazitäts-Dioden, wie sie bei Spannungs-gesteuerten Oszillatoren (VCO: voltage controlled oscillator) üblich sind.

Insgesamt gibt es 2 Möglichkeiten, mit der notwendigen Genauigkeit eine Winkelmodulation zu erzeugen.

- Numerisch gesteuerter Oszillator, NCO
- Quadratur-DSB-Modulator mit Cos- und Sin-Vorverzerrung des Nachrichten-Signals (Phasen-Signals)

4.3.1 Erzeugung von Winkelmodulation mit NCO

Bild 4.3 zeigt die Blockstruktur eines NCO (NCO: Numerically Controlled Oscillator). Herzstück eines NCO ist eine Look-Up Tabelle, in der die Stützwerte der Cos- bzw. Sin-Schwingung mit großer Genauigkeit und in ausreichender Anzahl abgelegt sind. Für eine gewünschte Frequenz wird im Phasenaccumulator eine entsprechende Schrittweite eingestellt. Über das Δ-Phasen Register läßt sich die Phase modulieren.

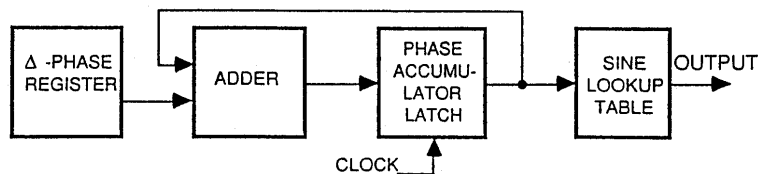


Bild 4.3: Blockschaltbild eines NCO

4.3.2 Quadratur Phasen-Modulator mit Cos- und Sin-Vorverzerrung

Zur Herleitung des Blockschaltbildes zu diesem Winkel-Modulator geht man vom Pendelzeiger-Diagramm der FM/PM aus und zerlegt die Pendelbewegung in eine 0°-Komponente (**Inphase**) und in eine 90°-Komponente (**Quadratur**), Bild 4.4. Diese Zerlegung gilt für beliebig große Phasenauslenkung, also auch für $\varphi \gg \pi$.

Da der Phasenwinkel φ bei der PM (gemäß dem Nachrichtensignal) zeitabhängig ist, wird er als $\varphi(t)$ geschrieben. Damit gilt:

$u_I(t) = \hat{U}_C \cdot \cos\{\varphi(t)\}$	In Phase	(4.1)
$u_Q(t) = \hat{U}_C \cdot \sin\{\varphi(t)\}$	Quadratur Phase	

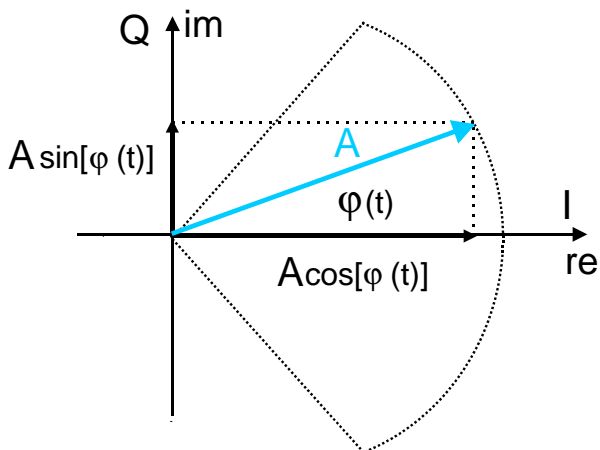


Bild 4.4: Zerlegung eines Pendelzeigers in seine „Inphasen“- und „Quadratur“-Komponente. Die Amplitude A ist als \hat{U}_C zu lesen.

Die Größen $u_I(t)$ bzw. $u_Q(t)$ sind die Amplituden einer Cos-Spannung (In Phase) bzw. einer Sin-Spannung (Quadratur Phase). Damit ergibt sich das folgende Blockschaltbild für einen Phasen-Modulator, Bild 4.5, der sich digital realisieren läßt.

Das Blockschaltbild des Quadratur Phasen-Modulators unterscheidet sich von dem des Quadratur DSB-Modulators, Bild 4.2, in folgenden Punkten:

- Beide Zweige werden vom gleichen Nachrichtensignal gespeist.
- Das Nachrichtensignal wird im I-Zweig gemäß $\cos(\dots)$ und im Q-Zweig entsprechend zu $\sin(\dots)$ verzerrt.

Die beiden Blockstrukturen, Bilder 4.2 und 4.5, sollten also nicht verwechselt werden.

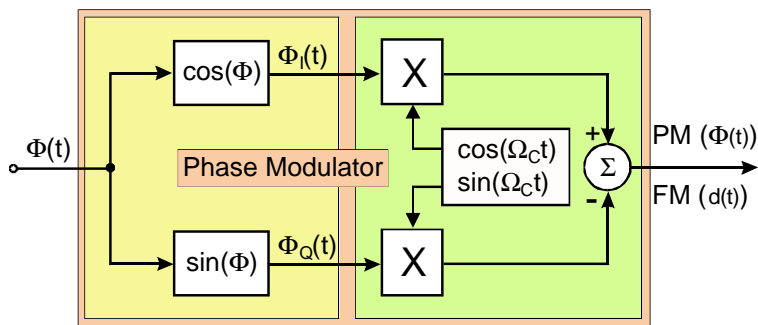


Bild 4.5: Quadratur Phasen-Modulator

5 Vergleich der digitalen und analogen Modulationsverfahren

Bei der Namensgebung für die digitalen Modulationsverfahren wurde das **Digital**signal als **nicht verrundet** unterstellt. Dies drückt sich in der Bezeichnung **Tastung** aus.

Damit ergeben sich zunächst folgende **formale Gleichsetzungen** der Modulationsverfahren, die bei unkritischer Anwendung **eine Quelle von Mißverständnissen** sein können.

Doppelseitenbandmodulation	DSB	⇒	Amplitudentastung	ASK
Frequenzmodulation	FM	⇒	Frequenzumtastung	FSK
Phasenmodulation	PM	⇒	Phasenumtastung	PSK

In Bild 5.1 [1] sind diese Bezeichnungen für die Modulationsverfahren für ein nicht verrundetes digitales Signal dargestellt.

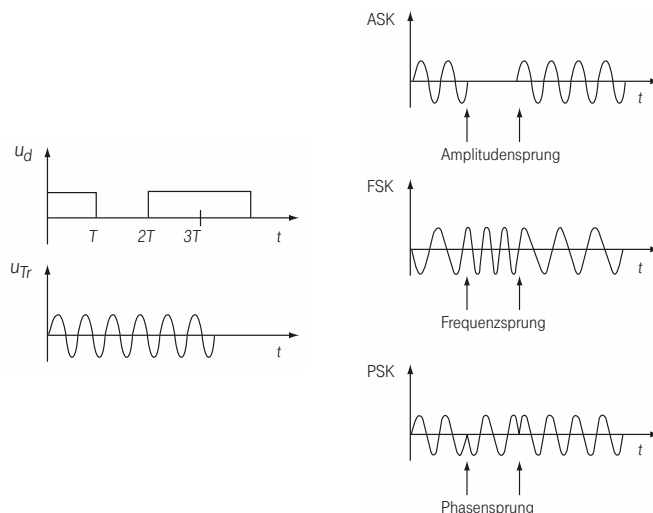


Bild 5.1: Amplituden-, Frequenz-, und Phasentastung

Aufgrund der Darstellung in Bild 5.1 könnten die Modulationen auch wie folgt entstanden sein:

- **ASK** (amplitude shift keying) : Mit Hilfe eines Multiplizierers bzw. eines Schalters
- **FSK** (frequency shift keying) : Mit Hilfe eines Frequenzmodulators, mit der **Nebenbedingung**, daß er eine Modulatorkonstante k_{FM} von genau der Größe hat, daß immer eine volle Anzahl Halbschwingungen der jeweiligen Frequenz in die Bitbreite paßt.
- **PSK** (phase shift keying) : Mit Hilfe eines Phasenmodulators, mit der **Nebenbedingung**, daß er eine Modulatorkonstante k_{PM} von genau der Größe hat, daß jeweils ein Phasensprung von exakt 180° erfolgt.

Mit diesen zusätzlichen Nebenbedingungen und der Unterstellung eines **rechteckförmigen Datensignals** sind die übertragungstechnischen und die digitaltechnischen Definitionen der Modulationen bisher anscheinend noch identisch.

Bei der Datenübertragung wird jedoch kein unipolares Signal verwendet, wie es in Bild 5.1 gezeichnet ist, sondern ein bipolares Datensignal¹ wie in Bild 5.2.[1]

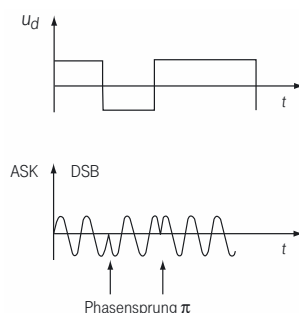


Bild 5.2: ASK mit bipolarem Datensignal ist eine DSB

Die modulierte Schwingung (ASK bzw. DSB) in Bild 5.2 sieht nun in der Tat genauso aus wie die PSK in Bild 5.1. Als Folge davon wird sie in der digitalen Übertragungstechnik auch als PSK bezeichnet.

¹Unterstellt man im Mittel gleich viele logische "1" wie logische "0" in einem Datensignal, so benötigt die bipolare Übertragung — für gleichen Abstand der logischen Pegel — nur die Hälfte der Leistung wie eine unipolare Übertragung.

Bei den Nebenbedingungen gibt es aber einen wesentlichen Unterschied:

- Bei einer DSB sind die Phasensprünge immer exakt 180° .

Die Unterschiede werden noch deutlicher, wenn man ein verrundetes — und kein rechteckförmiges — Datensignal betrachtet, Bild 5.3 [1]. Hier wird nichts mehr „getastet“.

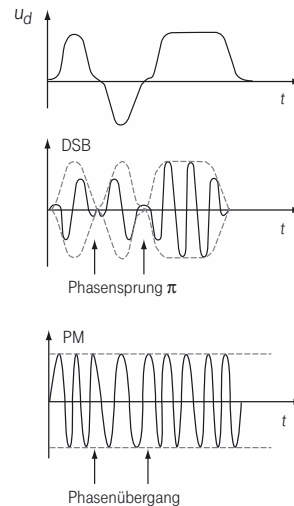


Bild 5.3: Doppelseitenband-Modulation (DSB) und Phasenmodulation (PM) bei verrundetem Datensignal

- Das DSB-Signal hat keine konstante Hüllkurve aber **äquidistante Nulldurchgänge** der Träger-schwingung. Es gibt Phasensprünge von exakt π . Amplituden-„Sprünge“ treten nicht auf.
- Das PM-Signal hat eine **konstante Hüllkurve**, jedoch keine äquidistanten Nulldurchgänge. Phasen-„Sprünge“ treten nicht auf.

Man erkennt hier deutlich die **unterschiedlichen Blickwinkel** in der Betrachtungsweise von analoger und digitaler Übertragungstechnik in Bezug auf das modulierte Signal:

- **Digitale Übertragungstechnik**

- Das Signal interessiert nur zu den Abtastzeitpunkten.
- Die digitale Information soll möglichst *einfach* aus dem analogen Zeitverlauf zurückgewonnen werden können.
- Hat der HF-Träger zum Abtastzeitpunkt eine andere Phase, wird die zugehörige Modulation als **PSK** (phase shift keying) bezeichnet.
- Hat der HF-Träger zum Abtastzeitpunkt eine andere Frequenz, wird die zugehörige Modulation als **FSK** (frequency shift keying) bezeichnet.
- Hat der HF-Träger zum Abtastzeitpunkt eine andere Amplitude, wird die zugehörige Modulation **ASK** (amplitude shift keying) bezeichnet.
- Hat der HF-Träger zum Abtastzeitpunkt eine andere Amplitude & eine andere Phase, wird die Modulation **QAM** (quadrature amplitude modulation) oder **APSK** (amplitude phase shift keying) bezeichnet.

- **Analoge Übertragungstechnik**

- Das Signal interessiert zu allen Zeitpunkten.
- Hat ein Signal Schwankungen in der Hüllkurve und äquidistante Nulldurchgänge, liegt eine Amplitudenmodulation bzw. DSB vor.

- Hat ein Signal eine konstante Hüllkurve und keine äquidistanten Nulldurchgänge, liegt eine Winkelmodulation (FM oder PM) vor.
- Hat ein Signal keine konstante Hüllkurve & keine äquidistanten Nulldurchgänge, liegt in der Regel eine Quadratur-Doppel-Seitenband-Modulation (QDSB) vor.²
- Wesentliches Kriterium ist die Bandbreite des modulierten Signals. Daher muß das modulierende Signal immer „verrundet“, oder mit anderen Worten: bandbegrenzt, sein.

5.1 Übertragungstechnische Einteilung der digitalen Modulationen

Aufgrund ihrer übertragungstechnischen Eigenschaften kann folgende Einteilung der digitalen Modulationen vorgenommen werden:

- Doppelseitenbandmodulationen (DSB) bzw. Quadratur-DSB (QDSB)
 - alle PSK-Verfahren: 2PSK, 4PSK, 8PSK, ...
 - alle QAM-Verfahren: 4QAM, 16QAM, 32QAM, ..., 512QAM
 - alle APSK-Verfahren: ASK, 16APSK, 64APSK, ...
- Frequenzmodulationen (FM).

Zur Datenübertragung wird nur FM (und keine PM) verwendet, obwohl als Bezeichnung dafür **Digital Phase Modulation** üblich ist.

 - alle FSK-Verfahren: FSK, CPFSK
 - alle CPM-Verfahren (continuous phase modulation): CPM, TFM
 - alle MSK-Verfahren (minimum shift keying): MSK, GMSK

Diese Einteilung läßt sich auch ganz einfach mit Hilfe der **Blockschaltbilder** für die zugehörigen Modulationsverfahren erkennen:

- DSB-Verfahren : Multiplizierer oder I/Q-Multiplizierer (Quadratur-Modulator)
- FM/PM-Verfahren : PLL-Strukturen (NCO) oder I/Q-Multiplizierer mit Cos- & Sin-Vorverzerrung (Quadratur Phasen-Modulator)

Bekanntermaßen unterscheiden sich DSB einerseits und PM/FM andererseits auch ganz wesentlich in der **HF-Bandbreite**. Während DSB nur die doppelte NF-Bandbreite — Bandbreite des verrundeten Nachrichtensignals (Datensignals) — benötigt, hat die Winkelmodulation eine HF-Bandbreite B_{HF} , die von der Signalamplitude \dot{U}_N abhängt, Bild 5.4 [1].

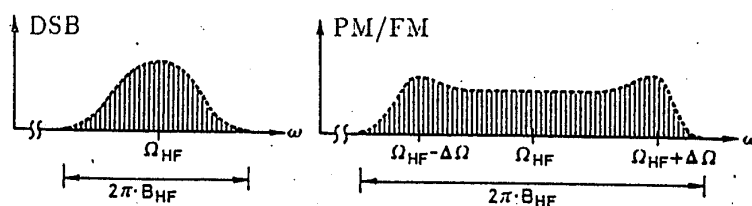


Bild 5.4: Hochfrequenz-Bandbreite von DSB bzw. PM/FM

Der (Kreis-)Frequenzhub beträgt:

$$\Delta\Omega = k_{FM} \cdot |u_N(t)|_{\max} \quad \text{FM}; \quad \Delta\Omega = k_{PM} \cdot \left| \frac{d}{dt} u_N(t) \right|_{\max} \quad \text{PM} \quad \text{Frequenz-Hub} \quad (5.1)$$

Für die HF-Bandbreite der Winkelmodulationen gilt:

$$2\pi B_{HF} \geq 2(\Delta\Omega + 4\pi B_N) \quad \text{HF Bandbreite} \quad (5.2)$$

²Bei der digitalen Übertragung ist dies der Regelfall. Aber auch eine Einseitenband-Modulation (SSB: *single side band*) oder eine kombinierte AM/PM haben ähnliche Eigenschaften bezüglich Hüllkurve und Nulldurchgängen.

Literatur

- [1] Rudolph, D. Kapitel 4 (excl. 4.3) in Bergmann: *Lehrbuch der Fernmeldetechnik*, 5. Auflage, Schiele & Schön 1986.
- [2] Rudolph, D.: *Digitale und Analoge Modulationsverfahren*, Deutsche Telekom Unterrichtsblätter, 9 / 2003, pp 504 — 510
- [3] Lathi, B.P.: *Modern Digital and Analog Communication Systems*, Hault–Saunders 1983 .
- [4] Haykin, S.: *Analog & Digital Communications*, Wiley 1989.
- [5] Stremler, G.F.: *Introduction to Communication Systems*, 3. Auflage, Addison Wesley 1990.