Theorie erklärt

Grundlagen der Quadratur-Signalverarbeitung

Gerrit Buhe, DL9GFA

Basis fast jeder modernen analogen oder digitalen Signalverarbeitung in der Nachrichtentechnik ist die Quadraturmodulation. Dieser Beitrag erklärt ihre Funktionsweise und die Darstellung der beteiligten Signale.

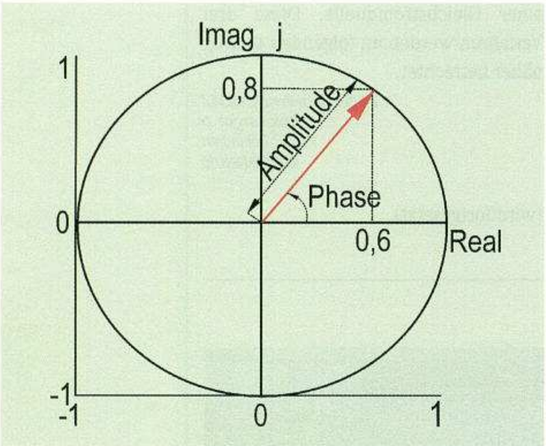


Bild 1: Darstellung eines Quadratursignals als komplexer Zeiger

Während die herkömmlichen Modulationsarten im Amateurfunk die Information entweder in der Amplitude **oder** in der Frequenz bzw. Phase transportieren, werden bei modernen Übertragungsverfahren Amplitude und Phase gleichzeitig und unabhängig moduliert.

Komplexe Modulation entsteht

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von komplexer Modulation. Um ein solches Signal zu jedem Zeitpunkt vollständig zu beschreiben, reicht ein einziger Parameter, z.B. die Amplitude, nicht mehr aus; ein weiterer Wert muss die Eindeutigkeit herstellen. So ist zusätzlich noch eine Aussage zur momentanen Phase zu treffen.

Ein solches so genanntes komplexes Signal wird auch als Quadratursignal bezeichnet und meist als rotierender Zeiger beschrieben. Dabei stellt dessen Länge die Amplitude und der Winkel zur Abszisse (x-Achse) die aktuelle Phase (**Bild 1**) dar. Die Frequenz ist nicht so gut ablesbar; sie entspricht der Änderung der Phase mit der Zeit, also der Rotationsgeschwindigkeit des Zeigers.

Die Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde ist gleich der Frequenz [Hz]. Bei einem 500-Hz-Ton würde die Projektion dieses rotierenden Zeigers auf die Abszisse über der Zeit einen Kosinus mit der Frequenz von 500 Hz beschreiben, während auf der Ordinate (y-Achse) ein Sinus gleicher Frequenz abgebildet würde (**Bild 2**). Hat man diese beiden Projektionen bzw. Signalanteile vorliegen, kann man zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Zeigerlänge (Amplitude) und den Winkel (Phase) bestimmen. Fehlt eines davon, kommt es zu Doppeldeutigkeiten (Bild 2).

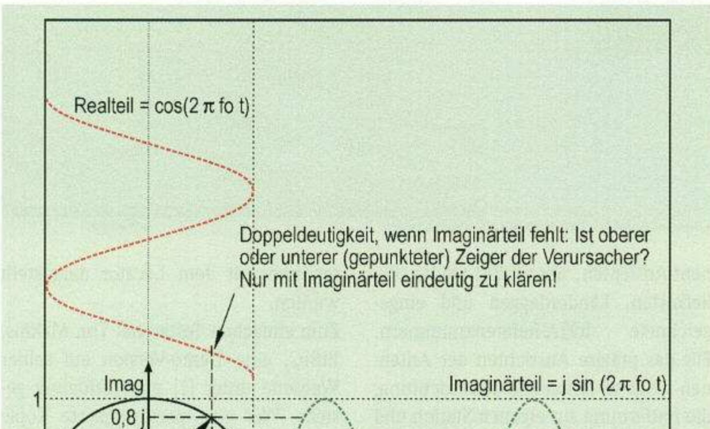


Bild 2: Real- und Imaginärteil als Projektion des komplexen Zeigers

Weitere Darstellungsarten der Modulation

Interessanter für moderne digitale Übertragungsverfahren ist aber die Darstellung bestimmter diskreter Zustände in Amplitude und Phase zu gegebenen Zeitpunkten. Diesen kann man dann verschiedene digitale Informationen (Bitfolgen) zuordnen, die übertragen werden sollen (Bild 8).

Dabei wird der Zeiger meist nicht mehr durch seine Länge und seinen Winkel beschrieben, sondern durch den Punkt, auf den die Spitze zeigt. Die beiden Koordinaten dieses Punktes, abgelesen von Ab-

Autor

Gerrit Buhe, DL9GFA
Jahrgang 1971. Studium der Elektrotechnik, Fachrichtung Nachrichtentechnik. Sechs Jahre in der Entwicklung von Mobilfunk-Basisstationen bei Siemens tätig. Jetzt bei Sennheiser für die Entwicklung von professionellen Drahtlos-Mikrofonen zuständig.
Amateurfunkgenehmigung seit 1985 als Y39FA, ab 1991 DL9GFA
Veröffentlichungen in Amateurfunkmedien zu Software-Defined-Radio

Gerrit Buhe, DL9GFA
Eichenkamp 5
30900 Wedemark
dl9gfa@darc.de

szisse und Ordinate, werden meist als komplexe (quasi zweidimensionale) Zahl angegeben. Sie entsprechen dem jeweils momentanen Wert der erwähnten Projektionen. Zur Unterscheidung spricht man auch von Real- und Imaginäranteil sowie bei den entsprechenden Achsen von realer (Abszisse) und imaginärer Achse (Ordinate).

Da letztere orthogonal zur realen ist, d.h. senkrecht auf ihr steht, ist der zugehörige Signalanteil um 90° phasenverschoben betrachtet. Den Imaginäranteil kennzeichnet man nun mit einem Operator namens „j", der genau diese 90° Verschiebung beschreibt. Der Sachverhalt ist wichtig: Eine Multiplikation mit j entspricht einer Drehung von 90°. Multipliziert man demnach zweimal mit j, beträgt die resultierende Phasendrehung 180°, was identisch mit einer Phasenumkehr, also einer Multiplikation mit dem Faktor –1 ist. Man kann daher schreiben:

$$j^2 = -1$$

und somit

$$j = \sqrt{-1}$$

Das sieht für Nicht-Mathematiker vielleicht ein bisschen komisch aus. Es sollte aber trösten, dass selbst die Mathematiker viele Jahrzehnte gebraucht haben, um sich an diesen j-Operator zu gewöhnen. Letztlich ist er sehr praktisch, weil er den Zusammenhang zwischen reellen (eindimensionalen) und komplexen (zweidimensionalen) Zahlen herstellt.

Eine solche komplexe Zahl, z.B. 0,6 + 0,8j (Bild 2), charakterisiert unser Signal zum gegebenen Zeitpunkt vollständig, genauso wie es die beiden Parameter Amplitude und Phase tun. Die erste Darstellungsform nennt man kartesisch, die Beschreibung in Amplitude und Phase bezeichnet man als polar; sie lassen sich ineinander umrechnen. **Tabelle 1** gibt eine Übersicht. Zusätzlich ist noch die trigonometrische Darstellung aufgeführt.

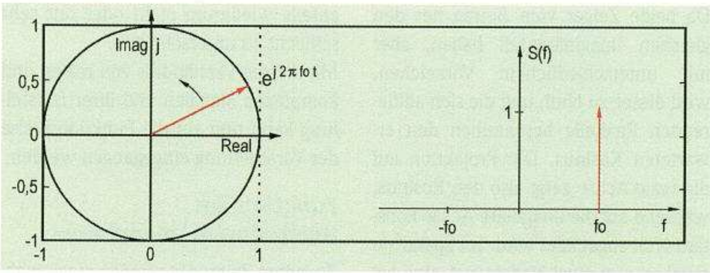


Bild 3: *Zeigerdarstellung und Spektrum der komplexen Exponentialfunktion*

Es gibt also verschiedene Möglichkeiten, ein komplexes Signal zu beschreiben. Jedoch müssen alle mindestens zwei unabhängige Werte enthalten. Liegt nur ein Wert vor, kommt es zu Doppeldeutigkeiten.

Untersuchungen im Zeit- und Frequenzbereich

Meist muss man ein Signal im Zeit- und Frequenzbereich untersuchen, um alle Informationen zu erhalten. Um auch das Spektrum unseres Quadratursignals darstellen zu können, muss das Zeitsignal Fourier-transformiert werden. Bei Verwendung einfacher Signale und geschickter Schreibweise kann man die Frequenzanteile leicht direkt ablesen. Wählen wir zuerst unseren Zeiger aus Bild 2, der mathematisch durch die komplexe Exponentialfunktion beschrieben ist:

$$s = Ae^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)}$$

Es handelt sich hierbei um einen Zeiger mit der Länge A (Amplitude), der Frequenz fo (Rotationen pro Sekunde) und der Phase φo. Zur besseren Übersicht sind im Folgenden A = 1 und φo = 0 gewählt.

Transformiert in den Frequenzbereich, ist diese Funktion ein Dirac-Impuls (schmale Nadel). Der Exponent j(2πfot + φo) ist positiv, der Zeiger rotiert in mathematisch positiver Richtung, also entgegen dem Uhrzeigersinn. Deshalb wird diese Nadel auf der positiven Frequenzachse an der Stelle fo platziert **(Bild 3)**.

Wie wir sehen, gibt es keine negativen Frequenzanteile. Das ist bei analytischen (komplexen) Signalen möglich, während in der Natur vorkommende immer ein symmetrisches Spektrum haben, also gleich große negative wie positive Anteile aufweisen. Wie sieht nun ein reales Signal aus, das z.B. von einer Antenne empfangen wird?

Drückt man den realen Kosinus durch Exponentialfunktionen aus (nach dem Mathematiker Euler, der auch den j-Operator einführte), sieht man, dass er aus der Summe zweier komplexer Zeiger mit entgegengesetzter Drehrichtung (Vorzeichen des Exponenten!) entsteht **(Bild 4)**:

$$\cos(2\pi f_0 t) = \frac{1}{2} e^{j2\pi f_0 t} + \frac{1}{2} e^{-j2\pi f_0 t}$$

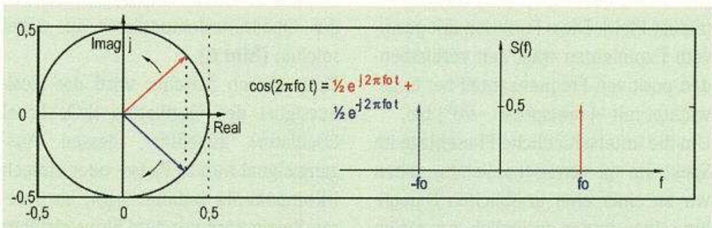


Bild 4: *Zusammensetzung des realen Kosinus mit zugehörigem Spektrum*

Tabelle 1: *Darstellungsmöglichkeiten des komplexen Signals s(t)*

Tabelle 1

Darstellungsart	Mathematische Schreibweise	Umrechnungen	Bemerkung
Polar (Exponentialschreibweise)	$s(t) = Ae^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)}$	Realteil $I = A\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$ Imaginärteil $Q = A\sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)$	Amplitude A, Frequenz fo und Phase φo sind direkt ablesbar, einfaches Rechnen mit mehreren Signalen möglich, daher allgemein bevorzugt
Kartesisch	$s(t) = I + jQ$	Amplitude $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$ Phase $\varphi_0 = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$ Frequenz $f_0 = \frac{d\varphi_0}{dt}$	Rechtwinklige Koordinaten (I, Q) direkt ablesbar, oft vorteilhaft bei Konstellationsdiagrammen (z.B. 16-QAM)
Trigonometrisch	$s(t) = A\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + jA\sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)$	Erster Summand ist Realteil, zweiter Imaginärteil	Amplitude, Frequenz und Phase direkt ablesbar, Darstellungsform wird zu Gunsten obiger selten verwendet

Da beide Zeiger vom Betrag her den gleichen Imaginäranteil haben, aber mit unterschiedlichem Vorzeichen, wird dieser zu Null, und die sich addierenden Realteile beschreiben den erwarteten Kosinus. Die Projektion auf die reale Achse zeigt also den Kosinus, während auf die imaginäre Achse konstant Null abgebildet wird. Im Spektrum tauchen nun zwei Nadeln auf, eine bei der positiven und die andere bei der negativen Frequenz. Der reale Sinus ist auch aus zwei komplexen Exponentialfunktionen (kurz: e-Funktionen) zusammengesetzt, die diesmal aber mit j bzw. –j gewichtet und damit um 90° bzw. –90° phasenverschoben sind:

$$\sin(2\pi f_0 t) = j\frac{1}{2}e^{-j2\pi f_0 t} - j\frac{1}{2}e^{j2\pi f_0 t}$$

Es handelt sich quasi um eine Subtraktion der beiden rotierenden Zeiger, die den Realteil eliminiert und den Imaginärteil aufgrund der Vorzeichen summiert **(Bild 5 links)**. Durch anschließende Multiplikation mit j ($j \cdot j = -1$) wird letzterer dennoch real, wie wir es schließlich von einem echten Sinus erwarten.

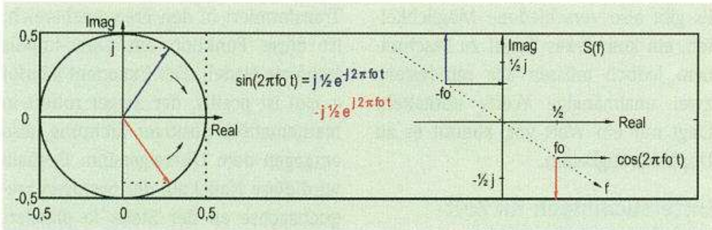


Bild 5: Zusammensetzung des realen Sinus mit komplex (phasenrichtig) dargestelltem Spektrum

Die e-Funktion mit negativem Exponenten ergibt nun wieder die Nadel bei der negativen Frequenz –fo. Sie ist mit j gewichtet, also 90° phasenverschoben (blauer Pfeil). Die e-Funktion mit positivem Exponenten trägt den verbleibenden positiven Frequenzanteil bei fo gewichtet mit –j (entspricht –90°) bei.

Um die unterschiedliche Phasenlage im Spektrum zu veranschaulichen, gehen wir zu einer eher unüblichen Darstellung über, in der zusätzlich zur realen und Frequenzachse auch die imaginäre abgebildet wird **(Bild 5, rechts)**. Mit schwarzen Pfeilen ist der reale Kosinus aus Bild 4 nochmals eingezeichnet, damit der Übergang leichter fällt. Diese Form wird ihre Vorteile dann offenbaren, wenn sich Signalanteile aufgrund ihrer umgekehrten Phasenlage auslöschen, was sonst nicht im (selbst skizzierten) Spektrum überschaubar wäre. Solche Phasenbeziehungen würde man zwar im Zeitbereich gut sehen, aber dort sind die verschiedenen Frequenzanteile wiederum nicht oder nur sehr schlecht zu unterscheiden.

Mit diesem Verständnis von realen und komplexen Signalen und ihrer Darstellung kann nun auf die Funktionsweise der Verarbeitung eingegangen werden.

Funktion des Quadratur(de)modulators

Zu jedem Zeitpunkt werden zwei unabhängige Werte für die eindeutige Auswertung benötigt. Woher bekommt man den Real- und Imaginärteil des Empfangssignals vom Transceiver?

Die Produktdetektoren herkömmlicher Amateurfunkgeräte haben nur einen Ausgang, daher ist auch nur die Ausgabe eindimensionaler, also realer Signale möglich. Durch die Umsetzung in das Basisband (NF) auf ein einziges Signal ist der Imaginärteil unwiederbringlich verloren gegangen.

Schon die Zeigerdarstellung im rechtwinkligen Diagramm deutet an, dass das Signal zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet wird. Dabei muss zwischen diesen eine Phasenverschiebung von genau 90° vorliegen. Wie aber kann man das erreichen? Statt einem herkömmlichen einzigen Pfad mit Mischer und Tiefpassfilter besteht der Quadraturdemodulator aus zwei solchen **(Bild 6)**.

Dem oberen Mischer wird das Kosinussignal des Oszillators (LO, Local Oscillator) zugeführt, dessen Ausgangssignal nun In-Phase- oder einfach I-Komponente genannt wird. Im unteren Zweig wird mit dem Sinus gleicher Frequenz gemischt, was zur so genannten Quadrature- oder Q-Komponente führt.

Nach der Nomenklatur zuvor entspricht I dem Real- und Q dem Imaginärteil. Die Tiefpassfilter dienen konventionell der Unterdrückung der Summen-Mischprodukte. Sie sind nötig, da schließlich der I- und Q-Zweig nach wie vor real sind (symmetrisches Spektrum). Nur die Art der Behandlung hier im Demodulator (ein 90° phasenverschobenes LO-Signal entspricht der Multiplikation mit j) und spätere Interpretation beider Ausgangskomponenten als ein einziges macht das zweidimensionale bzw. komplexe Signal I + jQ daraus.

Wir erhalten quasi die Koordinaten der Zeigerspitze des Eingangssignals und können daraus die exakte Amplitude und Phase bestimmen (Tabelle 1):

$$\text{Amplitude } A = \sqrt{I^2 + Q^2},$$

$$\text{Phase } \varphi = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right).$$

Oftmals wird gleich mit I und Q weitergearbeitet, ohne dass eine Umrechnung erfolgt.

Der Modulator für den Sendezweig arbeitet in genau der gleichen Weise, nur eben in umgekehrter Richtung **(Bild 7)**. Die I- und Q-Signale werden im Basisband auf die beiden Eingänge gegeben, um 90° zueinander versetzt hochgemischt und schließlich summiert auf der Zwischen- (ZF) oder schon Endfrequenz ausgegeben.

Analoge und digitale Quadratur(de)modulatoren

Solche Quadratur(de)modulatoren können analog, digital oder auch vollständig per Software realisiert werden. Je nach Anforderungen sind sie auch in allen Formen anzutreffen; es gibt keine allgemein bevorzugte Variante.

Ein Beispiel, bei dem die Vorteile der Quadraturverarbeitung sehr gut zur Geltung kommen, zeigt **Bild 8** in Form eines Zustandsdiagramms. Die gesamte Anordnung nennt man auch Konstellation, und bei den einzelnen Zuständen spricht man von Konstellationspunkten oder Symbolen.

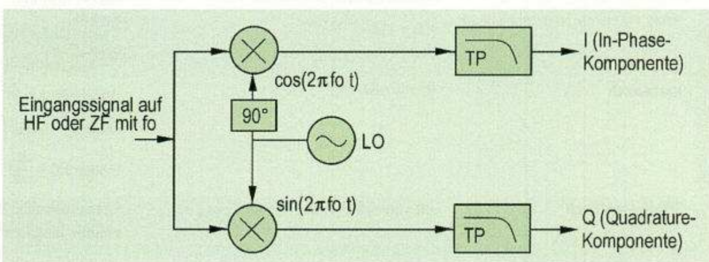


Bild 6: Der Quadraturdemodulator

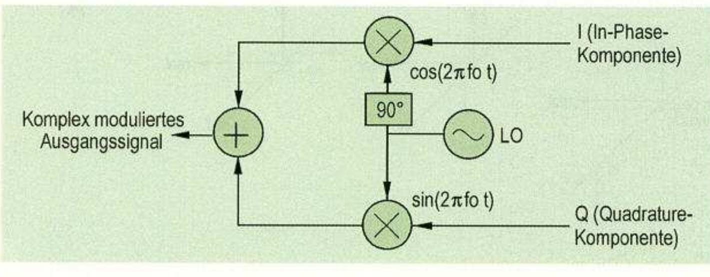
Definiert man zwei von ihnen, kann man genau ein Bit an Information transportieren (0 oder 1). Entsprechend werden bei vier oder gar 16 Konstellationspunkten, 2 bzw. 4 Bit pro Symboldauer, in der das modulierte Signal von einem zum nächsten Zustand wechselt, übertragen. In Bild 8 handelt es sich um eine 16-QAM (Quadratur-Amplituden-Modulation), bei der jedem Symbol eine 4-Bit-Folge zugeordnet ist (nur teilweise eingezeichnet).
Mit der Entscheidung im Empfänger, auf welches Symbol im Signalraum die aktuelle Amplitude und Phase zeigt, sind also 4 Bit an Information übertragen, was sehr angenehm für eine hohe Datenrate ist. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Synchronisation, damit der Zeiger nicht auf dem Weg von einem dieser Zustände zum anderen ausgewertet wird, sondern nur präzise zum vorbestimmten Symboltakt. Dieser ist maßgeblich und muss erst aus dem Empfangssignal zurückgewonnen werden. Außerdem wird nicht hart von einem Zustand zum anderen geschaltet, weil das Spektrum der Übertragung sonst zu breit würde. Um das zu vermeiden, erfolgt eine Tiefpass-Filterung (mit besonders geeigneten Formen, meist so genannten Root-Raised-Cosine-Filtern), welche die Übergänge abrundet (Bild 8, eingezeichnete Wege zwischen den Konstellationspunkten).
Eine solche Übertragung von digitalen Datenströmen ist auch für Sprachübertragung geeignet. Dazu wird die digitalisierte Sprache mit Hilfe eines Codecs (Coder-Decoder) in der Datenrate reduziert und zusätzliche Information für die Fehlererkennung und ggf. Reparatur von Übertragungsfehlern hinzugefügt. Erst dann erfolgt die Zuordnung der Bit-Sequenzen auf IQ-Symbole. Anschließend werden I- und Q-Signal gefiltert, um das Spektrum zu formen und dann die Quadraturmodulation vorgenommen. Details dazu würden den Rahmen dieses Beitrages sprengen und werden eventuell in einem weiteren Artikel erläutert.

Auch PSK31 ist Quadraturdemodulation

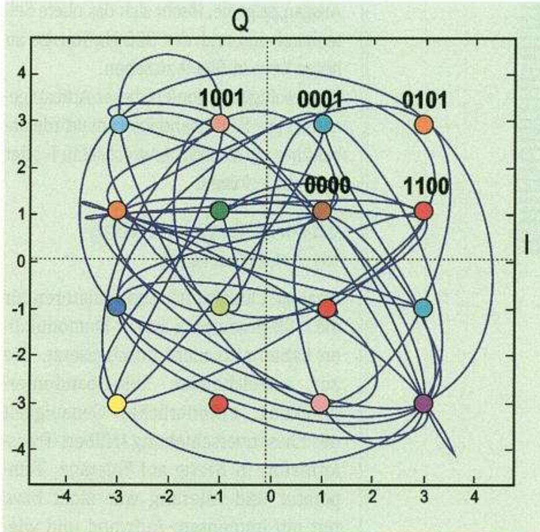
Eine bekannte Amateurfunk-Betriebsart offenbart die Anwendung der Quadratursignalverarbeitung nicht ganz so deutlich, nutzt sie aber dennoch: PSK31. Um trotz eines herkömmlichen Transceivers mit nur einem „einfachen" Produktdetektor eine Quadraturdemodulation vornehmen zu können, wird das Empfangssignal auf eine „Offset"-Frequenz von ca. 1 kHz eingestellt, die als zusätzliche ZF fungiert.
Das reale Signal wird von der Soundkarte abgetastet. Anschließend nimmt der PC die Quadraturdemodulation vor, um das komplexe Signal zu reproduzieren. Dazu mischt der nun digitale LO das Eingangssignal der Soundkarte mit einem Sinus und Kosinus der Frequenz 1 kHz. Da die komplexe Modulation unterschiedliche Information in beiden Seitenbändern transportiert, funktioniert das nur, solange beide Seitenbänder verarbeitet werden können.
Eine Soundkarte mit 48 kHz oder gar 96 kHz Abtastrate ist diesbezüglich für alle Amateurfunk-Betriebsarten geeignet. Aber der Empfängerausgang kann dieses Kriterium für „breitere" Modulationen (SSB) in der Regel nicht erfüllen, weil das Einseitenband-Filter in der ZF seinem Namen gerecht wird.

SSB mit dem Quadratur(de)modulator

Bei der Darstellung der komplexen Exponentialfunktion im Frequenzbereich haben wir gesehen, dass die negative Frequenz im Spektrum fehlte. Demnach ist es möglich, im komplexen Zahlenbereich unsymmetrische Spektren zu erzeugen. Eine hervorragende Anwendung dafür sind Einseitenbandsignale, bei denen das zweite Seitenband unterdrückt werden soll.
Tatsächlich ist die Quadraturanordnung – ergänzt durch einen Phasenschieber – in der Lage, Einseitenbandsignale nach der Phasenmethode zu modulieren bzw. demodulieren. **Bild 9** zeigt dies beispielhaft.



▲ ***Bild 7:*** *Aufbau eines Quadraturmodulators*



▲ ***Bild 8:*** *Zustandsdiagramm einer 16-QAM*

Zur Anschauung ist dem Empfangssignal im unteren Seitenband ein 300-Hz-Ton (blau) und im oberen ein 600-Hz-Ton (rot) gleicher Amplitude aufmoduliert. Auf diese Weise lassen sie sich auch überlagert im Spektrum gut auseinanderhalten und am Ende die Seitenbandunterdrückung direkt ablesen. Hier offenbart nun die zuvor eingeführte Darstellungsweise ihre Vorteile. Denn die Funktion des Phasenschiebers und die Auslöschung des jeweils unerwünschten Seitenbandes werden sichtbar.
Das Empfangssignal gelangt über die Antenne, eventuell über andere vorgesetzte Mischstufen, an den Quadraturdemodulator. Das Produkt im I-Pfad bleibt in Phase, das im Q-Pfad wird durch die Mischung mit dem Sinus bei negativen Frequenzen um +90° und bei positiven um –90° gedreht. In den folgenden Filtern werden die Summen-Mischprodukte bei ±2fo unterdrückt: das Quadratursignal im Basisband (NF) aus I und Q liegt vor.
Um durch Addition oder Subtraktion dieser beiden eines der Seitenbänder auszulöschen, muss eine Phasendifferenz von 180° vorliegen. Deshalb wird im Q-Pfad ein Phasenschieber eingesetzt, um die negativen Frequenzen um weitere +90° und die positiven Frequenzen um weitere –90° zu verschieben. Hierbei handelt es sich um einen so genannten Hilbert-Transformator (HT). Addiert man nun die resultierenden Ausgangssignale, wird das untere Seitenband durch die entgegengesetzte Phase ausgelöscht (300 Hz, blau) und das obere überlagert sich konstruktiv – der 600-Hz-Ton ist laut und deutlich (Bild 9). Subtrahiert man hingegen beide

Ausgangssignale, löscht sich das obere Seitenband aus und der 300-Hz-Ton ist zu hören bzw. in Bild 9 zu sehen.
Sendeseitig funktioniert dieser Aufbau genauso. Die Seitenbandauswahl würde dabei über ein Vorzeichenwechsel in I- oder Q-Zweig erfolgen.

Quadraturverarbeitung im Amateurfunk

Analoge Quadratur(de)modulatoren für die SSB-Erzeugung bzw. -Demodulation haben sich nicht durchgesetzt. Die zur ausreichenden Seitenbandunterdrückung erforderliche Genauigkeit der Phasenverschiebung (Hilbert-Transformator) in Bezug auf Toleranz, Temperatur und Alterung war nicht bzw. nur mit immensem Aufwand und wiederholtem Abgleich zu erreichen.
In neueren Geräten wird nach analoger Quadraturdemodulation zumindest das Basisband (NF) digital verarbeitet (dort würde man auch den HT einbauen), sodass diese Probleme der Vergangenheit angehören.
Heutige Transceiver tasten das Empfangssignal schon in der meist einzigen Zwischenfrequenz ab und nehmen die Quadraturdemodulation in dazu vorgesehenen digitalen Bausteinen vor (DDC: Digital Down Converter, FPGA: Field Programmable Gate Array). Auch sendeseitig wird die Seitenbandunterdrückung durch HT und Quadraturmodulation bereits in der digitalen Ebene realisiert (DUC: Digital Up Converter, FPGA), sodass weder analoge Phasenschieber noch SSB-Filter benötigt werden.
Neben modernen Geräten nach SDR-Konzept (Software-Defined-Radio [1, 3, 4]) und damit auf Grundlage digitaler Quadraturverarbeitung, dürften auch Versuche mit einfachen Direktmischempfängern und -sendern auf Quadraturbasis interessant sein.
Der Vorteil der Seitenbandunterdrückung führt dazu, dass nicht mehr alle Stationen doppelt zu empfangen sind. Die anderen Nachteile des Direktmischers bleiben allerdings erhalten. Die I- und Q-Signale könnten dann der Soundkarte zugeführt und dort weiter verarbeitet werden. Wie bei PSK31, kann die Quadraturverarbeitung auch vollständig ohne Hardware erst auf dem PC mit Hilfe von Software erfolgen, wenn man eine zusätzliche Zwischenfrequenz in der NF einführt.
Der Empfänger sollte dann für SSB-Empfang aber mindestens eine NF-Bandbreite von ca. 6 kHz haben (beide Seitenbänder, „niedrige ZF“ also ca. 3 kHz) und die Soundkarte mit einer entsprechend hohen Abtastrate (>12 kHz) betrieben werden. Ein solcher Aufbau bietet eine einfache und damit schnelle Möglichkeit, sich mit der Materie zu beschäftigen und Erfahrungen zu sammeln.

Grundlage der modernen Nachrichtentechnik

Die Quadratursignalverarbeitung bietet aufgrund ihrer vollständigen Beschreibung eines beliebig komplexen Signals die Möglichkeit, jede erdenkliche Modulationsart zu realisieren. Egal, ob es sich um FM, PM, AM oder eine Kombination daraus handelt. Aus diesem Grund ist sie die wichtigste Grundlage in der modernen Nachrichtentechnik und Basis für jedes Software-Defined-Radio.
Will man sich mit dieser Thematik beschäftigen, leisten mathematische Simulationsprogramme, von denen es hervorragende zum Herunterladen im Internet gibt [2], gute Hilfe.
Auch ohne Hardware kann man damit die gesamte Signalverarbeitungskette (Bild 9) simulieren, um in diesem Fall beispielsweise die Seitenbandunterdrückung abzuschätzen.

Gerrit Buhe, DL9GFA

Literatur und Bezugsquellen

[1] *Gerrit Buhe, DL9GFA: „Software-Radio - genauer hingesehen“, CQ DL 11/00, S. 802*

[2] *Gerrit Buhe, DL9GFA: „Werkzeuge für die digitale Signalverarbeitung“, CQ DL 10/01, S. 741*

[3] *Hans Zahnd, HB9CBU: „Software-Radio – Technologie der Zukunft“, CQ DL 8/00, S. 580*

[4] *Martin Klaper, HB9ARK: „Zukunftstechnik fürs Shack“, CQ DL 10/03, S. 698*

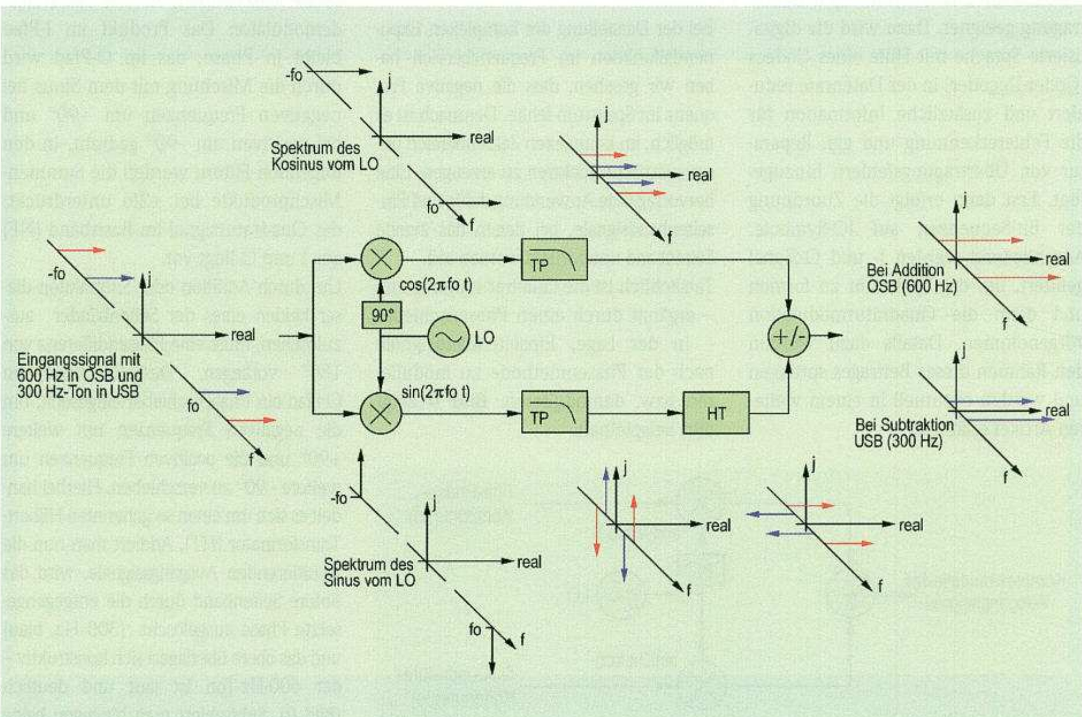


Bild 9: *SSB-Demodulation mit Quadraturdemodulator und Hilbert-Transformator*