

Aufbau und Charakterisierung eines synthesizergesteuerten 70cm-Transceivers für 9600Bd Packet Radio

Holger Eckardt, DF2FQ, Lorenzstr. 4, 81737 München

1. Vorwort

Dieser Vortrag behandelt die Probleme, die bei Funkgeräten mit FSK Modulation zu beachten sind und zeigt an einem Beispiel, wie man diese mit relativ einfachen Mitteln lösen kann. Es werden einige spezielle Meßverfahren zur Charakterisierung solcher Geräte beschrieben und anhand des vorgestellten Funkgerätes erläutert.

1.1 9k6-Probleme

Bis heute, über 10 Jahre nach Veröffentlichung des G3RUH-Modems, gibt es von den großen Amateurfunkgeräteherstellern noch kein einziges Gerät, das geeignet ist Packet Radio Betrieb mit 9600 Bit pro Sekunde in hinreichend guter Qualität zu ermöglichen. Was ist eigentlich das Problem dabei ?

Als Modulation beim 9k6-Packet Radio Datenfunk wird üblicherweise, wie beim Sprechfunk auch, Frequenzmodulation verwendet. Doch im Gegensatz zum Sprechfunk gibt es hierbei einige Besonderheiten. Die wichtigste davon ist die, daß der Frequenzgang des Übertragungskanals, d.h. der Weg vom Modulationseingang des Senders zum Demodulatorausgang des Empfängers, über einen großen Bereich linear sein muß.

Im Idealfall sollte er von Null Hertz bis ca. 6kHz einen konstanten Verlauf haben. Eine untere Grenzfrequenz von 5 oder 10 Hz verschlechtert jedoch das Signal noch nicht nennenswert. Je höher die untere Grenzfrequenz ist, desto besser muß der Signal-Rauschabstand sein, um noch eine hinreichend fehlerfreie Übertragung zu erzielen. Ab einer Grenze, die etwa bei 50 Hz liegt, ist keine brauchbare Übertragung mehr möglich.

Doch nicht nur der Frequenzgang muß linear sein, auch die Zeit, die ein Signal braucht, um den Übertragungskanal zu durchqueren, muß über die Frequenz mehr oder weniger konstant sein. Man spricht hier von der Gruppenlaufzeit. Dieser etwas abstrakte Begriff soll an einem Beispiel erläutert werden. Das Spektrum eines Rechtecksignals besitzt einen hohen Anteil an Oberwellen. Wenn die einzelnen Spektralanteile verschieden lange brauchen, um den Kanal zu durchlaufen, so ist die Kurvenform des Signals am Ende der Übertragung stark verzerrt und entsprechend schwierig zu dekodieren. Da es sich bei unserem Übertragungsverfahren um rechteckähnliche Signal handelt, machen sich Gruppenlaufzeitverzerrungen stark bemerkbar. Menschliche Sprache kennt aufgrund des oberwellenarmen Spektrums praktische keine Gruppenlaufzeitprobleme.

Ein weiterer Punkt ist die Zeit, die das Funkgerät benötigt um zwischen Senden und Empfangen hin- und herzuschalten. War bei der 1200Bps-Technik 100ms Umschaltzeit noch ein brauchbarer Wert (den dennoch viele Funkgeräte kaum erreichen), so stellt diese Zeitspanne bei 9600 Bps einen bedeutenden Bremsfaktor für den Datendurchsatz dar. Wenn man bedenkt, daß ein z.B. Bestätigungsframe nur 25ms dauert, sieht man, daß selbst bei dem „guten“ 100ms Funkgeräte die meiste Zeit nicht für die Datenübertragung, sondern für die Sende-Empfangsumschaltung in Anspruch genommen wird. Manche der heute noch verkauften Funkgeräte haben bis zu 300ms Umschaltzeit.

Neben den oben aufgezählten Punkten gibt es eine Reihe sekundärer Effekte, die bei den zur Zeit verfügbaren Transceivern noch viel weniger beachtet werden. Ein Beispiel ist das Transientenspektrum beim zyklischen Tasten. Darunter versteht man Aussendungen außerhalb der Nutzfrequenz, die während des Übergangs zwischen Empfang und Senden abgestrahlt werden. Diese Störungen gab es immer schon bei Amateurfunkgeräten. Da aber beim 9k6-Betrieb die Umschaltzyklen viel kürzer sind als beim Sprechfunk, können hierdurch erhebliche Beeinträchtigungen für benachbarte Stationen entstehen. Welche verheerenden Spektren selbst von Geräten neuester Produktion abgestrahlt werden, werde ich in

einem ausführlichen Testbericht über die Datenfunktauglichkeit von Amateurtransceivern zeigen, der im Laufe des Jahres veröffentlicht wird. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Meßverfahren näher eingegangen.

1.2 Eine einfache Lösung

Durch die unzureichende Technik der kommerziellen Afu-Anbieter sind Synthesizergeräte leider sehr diskreditiert worden. Das dies aber nicht nötig wäre sieht man am Beispiel der professionellen Datenfunktechnik, die teilweise mit noch weit härteren Anforderungen zu kämpfen hat (für DECT-Funkgeräte werden z.B. S/E-Umschaltzeiten von 20µs gefordert) und trotzdem hochwertige Lösungen bietet.

Die oben beschriebenen Eigenschaften lassen sich auf mehrere Arten erfüllen. Im Empfangszweig reicht es, statt der üblichen Sprechfunk-ZF-Filter solche zu verwenden, die bezüglich ihrer Gruppenlaufzeitverzerrungen für Datenübertragung optimiert sind. Wichtig ist eine sehr gute Impedanzanpassung, da sonst die spezifizierten Werte nicht erreicht werden.

Beim Sender sind mehrere Verfahren gebräuchlich, um gute Modulationseigenschaften zu erreichen. Wird keine hohe Frequenzagilität gefordert, kann man einen Quarz modulieren, oder einen VCO, der an einen Synthesizer mit sehr niedriger Schleifengrenzfrequenz angebunden ist. Diese Lösung erfordert einen separaten Senderoszillator. Im Falle des Quarzoszillators ist wegen der Vervielfacherstufen ein hoher Selektionsaufwand nötig, die Synthesizer-Version stellt hohe Anforderungen an die Stabilität des VCOs.

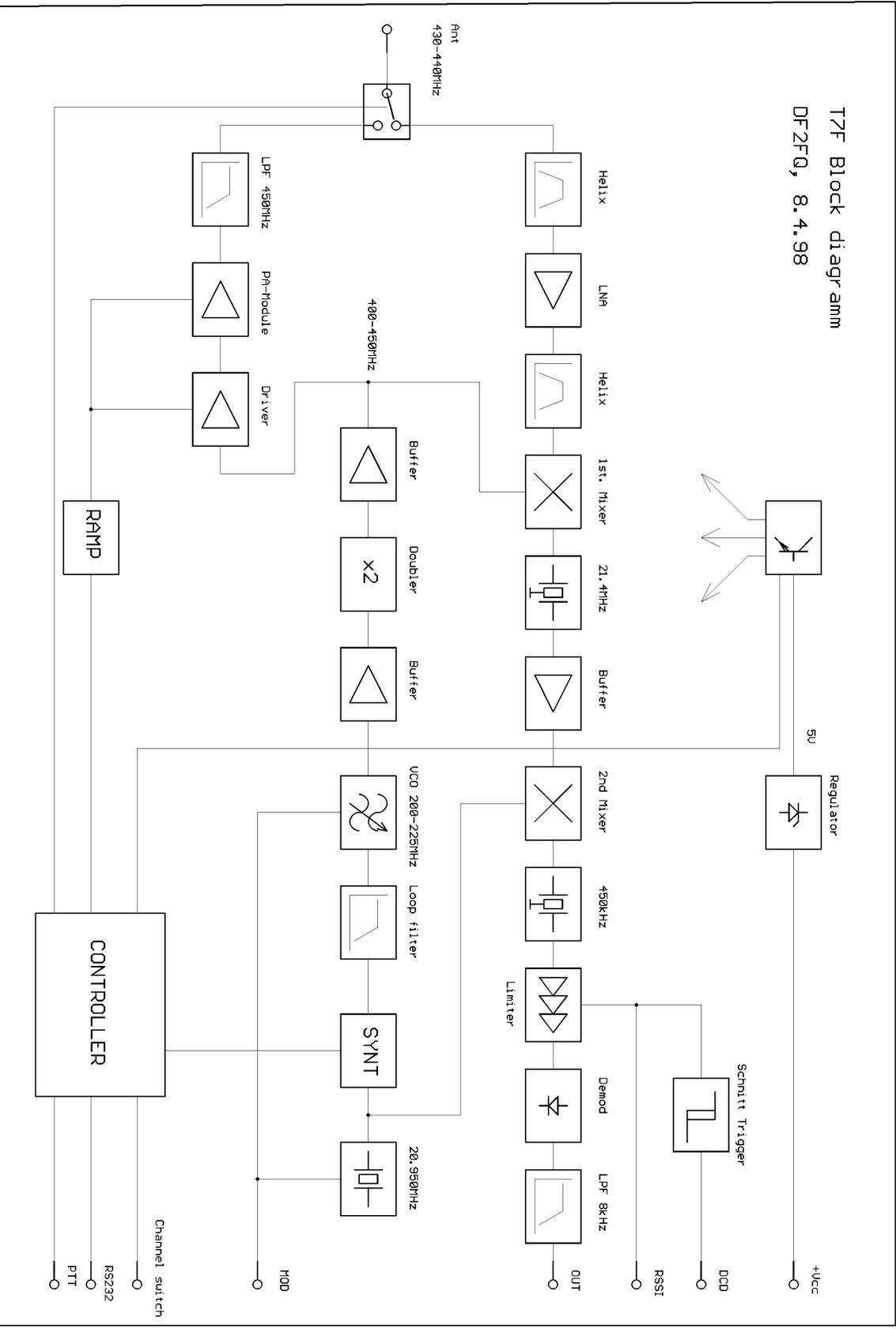
Das Mischprinzip ist am gebräuchlichsten. Ein Quarzoszillator wird mit dem FSK-Signal moduliert und mit Hilfe eines Synthesizers auf die Nutzfrequenz hochgemischt. Diese Lösung erlaubt sehr schnelle S/E-Umschaltzeiten und hat sehr gute Modulationseigenschaften. Jedoch ist der technische Aufwand wegen der verwendeten Mischer und Selektionsglieder sehr hoch.

Eine Schaltung, die mit relativ wenig Aufwand die oben beschriebenen Eigenschaften recht gut erfüllt, ist hier beschrieben. Sie verwendet Zwei-Punktmodulation. Hierbei wird das Modulationssignal an zwei Stellen eingespeist, in den VCO und den Referenzoszillator des Synthesizers. Das Verfahren wird weiter unten noch beschrieben. Es stellt einen guten Kompromiß zwischen technischem Aufwand, Modulationseigenschaften und Umschaltzeit dar.

Folgende Daten werden von dem Gerät erreicht:

Frequenzbereich	430,000 ... 439,975 MHz
Kanalraster	25 kHz
Sende-Empfangsumschaltzeit	≤30ms
Stromversorgung	7...14V, 60mA RX, max. 2,5A TX
Größe	145x75x22mm
Empfänger	
Empfindlichkeit	-118dBm (0,28µV) für 20dB SINAD (CCITT)
Frequenzgang	1Hz ... 7000Hz bei -3dB
Intermodulation	≤-54dB (3-Ton Messung)
Nachbarkanalselektion	>56dB
Nebenempfangsunterdrückung	>60dB 1. Spiegel, >51dB 2. Spiegel
Sender	
Ausgangsleistung	1.5W bei 7V, 6.5W bei 12V
Frequenzgang	1Hz ... 15000 Hz bei -3dB
Klirrfaktor	≤1%
Nebenaussendungen	≤-66dBc (1. OW), <-75dBc sonst
Transiente Nachbarkanalstörungen	≤ -40dB

T7F Block diagram DF2FQ, 8.4.98



2. Die Schaltung im Einzelnen

Es würde den Rahmen des Manuskripts sprengen, hier das komplette Schaltbild zu zeigen. Das Blockschaltbild, Bild 1, zeigt die wesentlichen Baugruppen.

2.1 Der Synthesizer

Kernstück des Synthesizers bildet der VCO, er wird für Sender und Empfänger verwendet. Als Spule wird ein Helixkreis eingesetzt, der ein geringes Oszillatorrauschen und niedrige Mikrofonieempfindlichkeit garantiert. Für Abstimmung und Modulation werden getrennte Varicaps verwendet, dies erleichtert die Einspeisung des NF-Signals. Der VCO schwingt auf der halben Sendefrequenz, um eine größere Entkopplung der Stufe von der PA zu erreichen. Auf den VCO folgt eine Verdopplerstufe, auf diese wiederum ein Puffer.

Die Steuerung des VCOs übernimmt ein Synthesizerbaustein von Fujitsu. Da die Ladungspumpe des ICs für die schnelle Umschaltzeit, die wir benötigen, viel zu wenig Strom liefert, sitzt am Ausgang der Phasenvergleichers eine Gegentaktendstufe. Diese speist das Schleifenfilter.

Würde das Modulationssignal nur in den VCO eingespeist, wäre der Frequenzgang für Packet Radio Betrieb unzureichend. Unterhalb der Grenzfrequenz des Schleifenfilters würde der Hub mit 6dB pro Oktav abnehmen, auf der Schleifenresonanzfrequenz hätte er einen großen Überschwinger. Da die Schleifengrenzfrequenz in unserem Fall bei 700Hz liegt, wäre bei 10Hz kein nachweisbarer Anteil des Modulationssignals mehr vorhanden. Daher wird mit dem NF-Signal auch der Referenzoszillator moduliert. Der Frequenzgang an dieser Stelle ist dem des VCO-Einspeisepunktes komplementär. Zusammengenommen ergibt sich ein völlig lineares Übertragungsverhalten.

Das Signal des Referenzoszillators wird gleichzeitig als Mischsignal für den zweiten Empfängermischer verwendet. Da die Referenzfrequenz ohne Rest durch 25kHz teilbar sein muß, ergibt sich für die zweite ZF ein Wert von 450 statt der sonst üblichen 455kHz. Dies wird beim verwendeten ZF-Filter berücksichtigt.

2.2 Der Empfänger

Der Empfänger benutzt zur Eingangsselektion zwei zweikreisige Helixfilter, eines vor und eines nach der Vorstufe. Dies ergibt eine ausgezeichnete Bandselektion. Wer in der Nähe von Bündelfunk- oder Modacom-Basisstationen wohnt, wird diesen Vorteil zu schätzen wissen.

Der Mischer ist mit einem Dual-Gate-Fet realisiert, die Anpassung der hochohmigen Gates erfolgt mit Hilfe gedruckter Spulen. Im Drainkreis wird das ZF-Signal ausgekoppelt. Wegen der hohen Anforderungen an ein gutes Gruppenlaufzeitverhalten ist ein Trimmer zur Anpassung des Quarzfilters hier unvermeidlich.

Auf das Quarzfilter folgt eine Verstärkerstufe und darauf ein ZF-IC. Dieser Baustein enthält neben dem zweiten Mischer einen Begrenzerverstärker, den Demodulator, eine RSSI-Schaltung und einen Operationsverstärker. Das Filter für die zweite ZF hat gegenüber den etwas gebräuchlicheren CFW-Typen zwar eine um wenige dB schlechtere Nachbarkanalselektion, dafür aber ein erheblich besseres Gruppenlaufzeitverhalten. Der Operationsverstärker ist als 2-poliges Tiefpassfilter zur Unterdrückung von ZF-Resten beschaltet.

Der RSSI-Ausgang (Radio Signal Strength Indikator) gibt einen Strom ab, der über einen Dynamikbereich von ca. 60dB proportional dem Logarithmus der Eingangsspannung ist. Mit Hilfe einer Transistorschaltung wird daraus ein schnelles DCD-Signal (Data Carrier Detect) gewonnen, das vor allem beim Betrieb über Multimode-Digipeatern nützlich ist.

2.3 Der Sendezweig

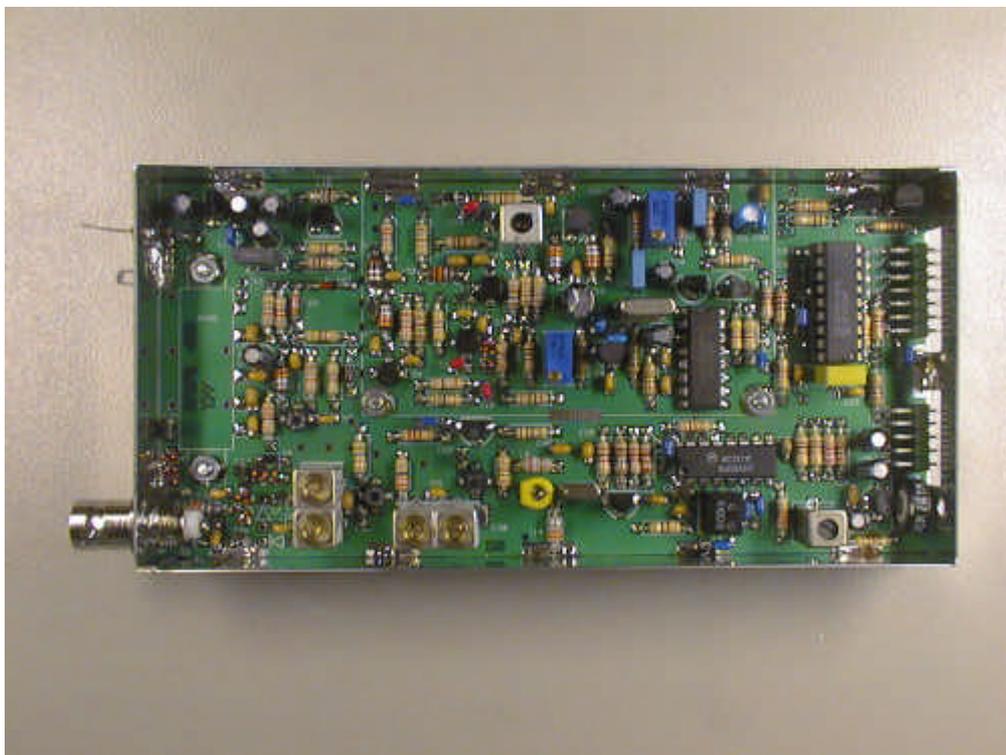
Das VCO-Signal wird in der Treiberstufe auf ca. 30mW verstärkt. Damit wird ein PA-Modul angesteuert, das bei 12Volt Betriebsspannung eine Ausgangsleistung von etwa 7 Watt erzeugt. Hinter dem Tiefpassfilter und dem PIN-Diodenschalter, der für die Sende- Empfangsumschaltung zuständig ist, stehen dann noch gut 6 Watt zur Verfügung. Der Schalttransistor, der die Betriebsspannung des Sendeteils schaltet, wird über eine Konstantstromquelle angesteuert, die mit Hilfe einer RC-Kombination eine lineare Rampe mit einer Zeitkonstanten von 5ms erzeugt. Durch dieses langsame Hochfahren des Senders vermeidet man Störungen in den Nachbarkanälen durch harte Einschaltflanken. Ein 5V-Spannungsregler versorgt alle Schaltungsteile außer Treiber und PA. Der Sendezweig wird aus der unregulierten Betriebsspannung gespeist.

2.4 Die Steuerung

Kein ganz unwesentlicher Teil des Transceiver ist die Steuerung. Es wird hierzu ein Mikrocontroller des Typs PIC16F84 verwendet. Dieser übernimmt vielfältige Aufgaben. Die PTT-Leitung muß abgefragt werden, im Falle eines Wechsels von Senden auf Empfang oder umgekehrt wird der Synthesizerchip neu programmiert und Sender und Empfänger in einem genau vorgegeben Zeitschema ein und ausgeschaltet. Daneben wird die Benutzerschnittstelle kontrolliert, ob z.B. ein Kanalwechsel vorgenommen, oder eine neue Frequenz gespeichert werden soll. Das nötige Programm dazu ist im Flashspeicher des Chips abgelegt.

3. Aufbau und Betrieb

Die komplette Schaltung befindet sich auf einer Platine mit den Abmessungen 72x144mm und paßt damit in ein Standard Weißblechgehäuse. Auf dem Foto sieht man, daß das Gerät trotz der ausschließlichen Verwendung von bedrahteten Bauteilen recht kompakt ist.



Angesichts des normalen Einsatzfalles des Transceivers für Paket Radio Betrieb wurde für die Benutzerschnittstelle eine unkonventionelle Lösung gewählt. Sie ist eher zweckmäßig als komfortabel, dies wirkt sich vor allem positiv auf die Bauteilekosten aus.

Das Gerät besitzt einen Speicher für 10 Kanalpaare für Senden und Empfangen. Der aktuelle Kanal wird über vier Pins des Steckers ausgewählt. Die Einstellung erfolgt im BCD-Code und kann z.B. über einen BCD-Schalter oder mit Steckbrücken vorgenommen werden. Die Kanäle werden über die serielle Schnittstelle mit Hilfe eines Computers mit V24 Schnittstelle und einem Terminalprogramm von Hand eingegeben.

4. Charakterisierung des Gerätes

Auf die Messungen der HF-Eigenschaften des Gerätes, wie Empfindlichkeit und Großsignalverhalten, wird hier nicht näher eingegangen. Aus der Vielzahl mögliche Messungen sind hier drei herausgegriffen, über die man in der Amateurfunkliteratur wenig findet. Interessant sind die Ermittlung der Modulationseigenschaften, der Sende-Empfangsumschaltzeit und der transienten Nachbakanalstörleistung.

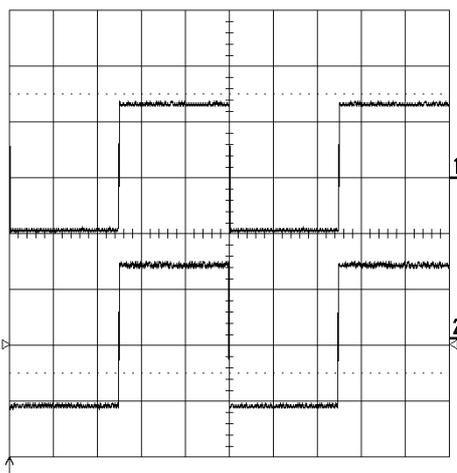
4.1 Übertragungsverhalten

Bei dieser Messung wird der Frequenzgang und das Gruppenlaufzeitverhalten ermittelt. Speziell letzteres ist nur schwer direkt zu messen. Man bekommt aber eine gute qualitative Aussage, wenn man ein rechteckmoduliertes Signal über den Kanal schickt und die dabei auftretenden Verzerrungen beobachtet.

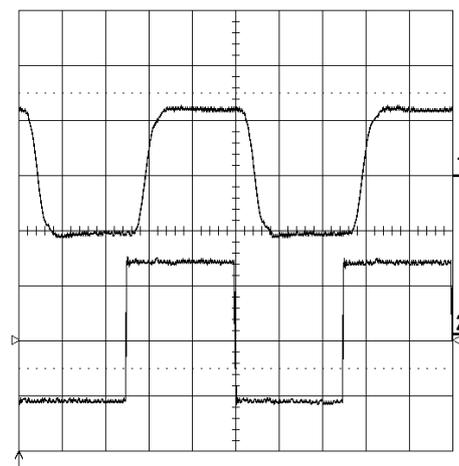
An den Empfängereingang wird ein Meßsender angeschlossen, der auf die Empfangsfrequenz eingestellt wird. Der Meßsender wird mit einem Rechtecksignal mit variabler Frequenz und einem Hub von 3kHz moduliert. Am Demodulatorausgang des Empfängers ist ein Oszilloskop angeschlossen.

Beim Senden wird der Rechteckgenerator am Modulationseingang angeschlossen. Das demodulierte Signal wird an einem breitbandigen Meßempfänger abgenommen.

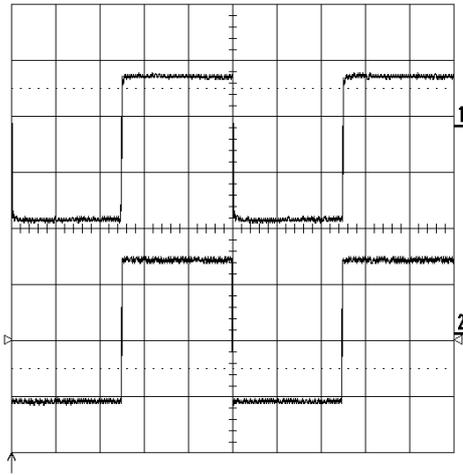
Bild 3 zeigt jeweils ein 10Hz und ein 1kHz Rechtecksignal im Empfangs- und im Sendefall. Auf dem zweiten Kanal ist das Generatorsignal dargestellt. Es sind kaum Verzerrungen zu erkennen.



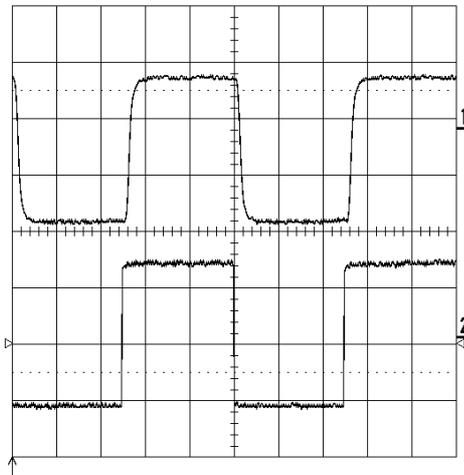
Empfänger, 10Hz



Empfänger, 1kHz



Sender, 10Hz



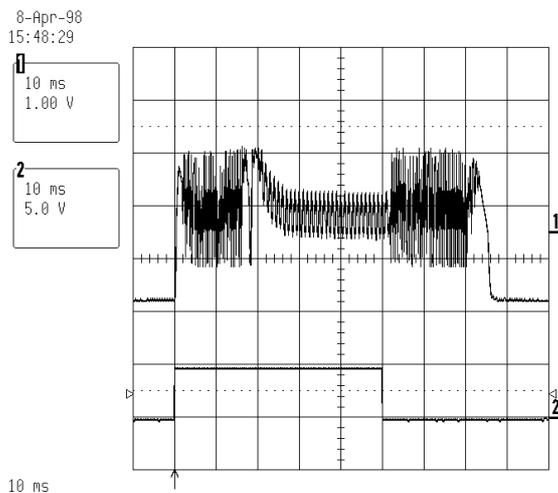
Sender, 1kHz

4.2 Sende/Empfangs Verzögerung

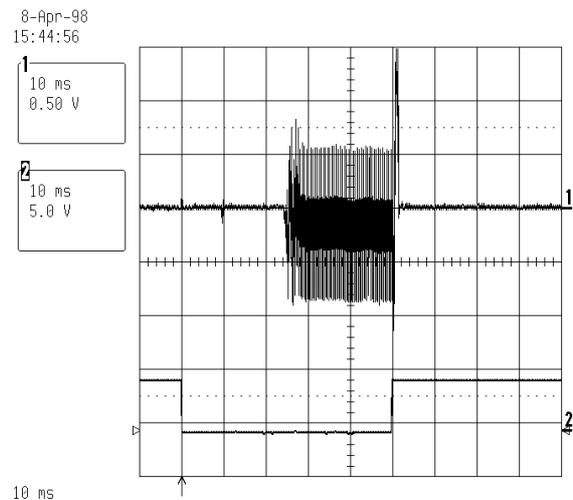
An den Senderausgang wird ein Meßempfänger angeschlossen, der auf die Sendefrequenz eingestellt ist. Am Modulationseingang des Senders liegt ein Signalgenerator, dessen Pegel so einstellt wird, daß sich bei einer Frequenz von 1kHz ein Hub von 3kHz ergibt. Der Ausgang des Meßempfängers wird an ein Speicheroszilloskop angeschlossen. Das Oszilloskop wird vom PTT-Signal des Senders getriggert.

Die Zeitverzögerung zwischen dem Tasten des Senders und dem Zeitpunkt an dem das Modulations-signal stabil ist, ist die Empfangs-/Sende-Verzögerung (TX-Delay).

Das gleiche funktioniert auch in die andere Richtung. An den Empfängereingang wird ein Meßsender angeschlossen, der auf die Sendefrequenz eingestellt ist. Er wird mit einer Frequenz von 1kHz bei einem Hub von 3kHz moduliert. Der Ausgang des Empfängers wird an ein Speicheroszilloskop angeschlossen. Das Oszilloskop wird vom PTT-Signal getriggert.



Empfangsverzögerung



Sendeverzögerung

Die Zeitverzögerung zwischen dem Tasten des Senders und dem Zeitpunkt an dem das Empfangssignal stabil ist, ist die Sende-/Empfangs-Verzögerung.

Bild 4 zeigt das Verhalten von Sender und Empfänger. Auf dem zweiten Kanal ist der Pegel der PTT-Leitung dargestellt.

4.3 Transientenspektrum

An den Senderausgang wird ein Spektrumsanalysator angeschlossen. Der Sender wird zyklisch mit einer Periode getastet die ca. dem doppelten der Sende-Empfangsumschaltzeit entspricht. Die Ablenkzeit des Spektrumsanalysators wird auf das 100-fache dieser Zeit eingestellt. Bei langsamem Durchlaufen des Analyzers über die Frequenzen, mißt er alle Anteile der Senderspektrums, die sich innerhalb und außerhalb des Nutzkanals befinden, auch wenn sie nur für Bruchteile einer Millisekunde auftreten. Er zeigt somit das Nachbarkanalstörleistungsspektrum des Senders an.

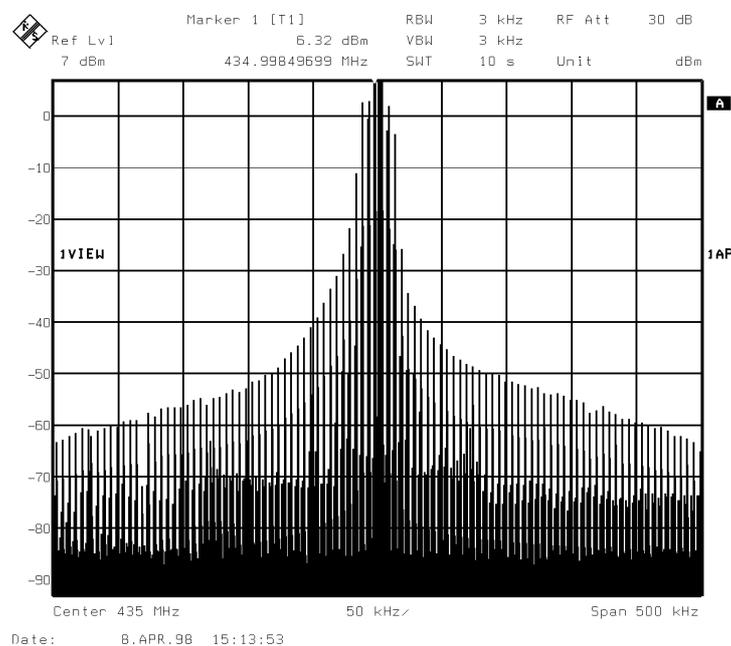


Bild 5 zeigt das Verhalten des Transceivers. Das Gerät ist über ein 30dB-Dämpfungsglied angeschlossen, die Tastfrequenz beträgt 10Hz, die Modulationsfrequenz 1kHz. Der Spektrumsanalysator ist auf eine Ablenkzeit von 10s eingestellt. Jedesmal, wenn der Sender hochgetastet wird, erscheint auf dem Bildschirm eine Linie mit der momentanen Leistung auf der Frequenz, die der Analyser gerade empfängt.

5. Schlußbemerkungen

Eine ausführliche Baubeschreibung des vorgestellten Transceivers erscheint im Laufe des Jahres in der CQ-DL. Ein Artikel in dem eine Reihe auf dem Markt befindlicher mehr oder weniger 9k6-taugliche Funkgeräte getestet wird ist in Vorbereitung.