Schaltungsbeschreibung

Eingangssignalaufbereitung
Die Audiosignale werden nach Pegeleinstellung mit Poti P2A/P2B mit R25/C12 (linker Kanal) bzw. R27/C14 (rechter Kanal) entzerrt (Höhenanhebung gemäss Norm) und mit den OpAmps A5/A6 gepuffert und verstärkt, um die Verluste durch die Höhenanhebung zu kompensieren.
Mit A4 wird die Summe des linken und rechten Signals gebildet (Signal M) und mit A2 die Differenz L-R (Signal S), wobei dazu A3 das Signal vom rechten Kanal invertiert und A2 die Summe von L und invertiertem R bildet. Die beiden LEDs am Summensignal sind eine sehr einfache Aussteuerungsanzeige, sobald der Signalpegel des Summensignals (Monosignal) die Schwellspannung der LEDs überschreitet, beginnen sie zu leuchten und zeigen so Übersteuerung an. Es müssen möglichst effiziente LEDs mit einer Flussspannung von ca. 2.5V eingesetzt werden, also gelbe oder grüne LEDs.

Zusammensetzen der Multiplex-Komponenten und Filterung
OpAmp A8 addiert das Summensignal (M) von A4, das mit dem Differenzsignal S modulierte 38kHz-Zweiseitenbandsignal von A7 sowie den 19kHz-Pilotton, dessen Amplitude mit dem Trimmpoti P3 eingestellt wird. Am Ausgang des Addierers folgt mit R38/L3/C19 ein Tiefpassfilter, das die unerwünschten Mischprodukte des Modulators abschwächt. Danach folgt mit A9 ein Puffer und ein weiterer Tiefpass. C21 beseitigt den bis hier aufgelaufenen Offset (die ganze Schaltung ist gleichspannungsgekoppelt) und mit P5 wird der gewünschte Ausgangspegel des Multiplexsignals eingestellt. A10 verstärkt das Signal um den Faktor 3 und sorgt so für eine hohe Ausgangsamplitude von bis zu 20Vss, damit auch Röhren-Prüfsender angesteuert werden können, die höhere Spannungen brauchen. Als Nebeneffekt wird A10 auch toleranter gegenüber kapazitiver Belastung, wie sie durch lange Koaxkabel auftreten, daher ist auch R42 nötig.

Taktsignalerzeugung
Damit der 38kHz-Träger (und damit auch der 19kHz-Pilotton) genau und stabil ist, wurde hier ein Quarzoszillator aufgebaut. Die Quarzfrequenz von 7.6MHz ist nicht Standard, aber bei gewissen Distributoren preiswert erhältlich, und diese Frequenz gibt nach Teilung durch 25 die benötigten Frequenzen. Alternativ kann statt einem Quarz auch ein LC-Schwingkreis gebaut werden, wobei dann die Stabilität ein Problem sein dürfte. Nach Norm darf der 38kHz-Träger maximal +/-4Hz abweichen.
Der Oszillator ist mit T1 aufgebaut, C6 dient zum Feinabgleich der Frequenz. Der Teiler durch 25 mit IC4 aufgebaut, einem 74HC393. Dies ist ein doppelter Dezimalzähler. Da die beiden Zähler in ein simples Flipflop und einen Zähler von 0..4 geteilt sind, kann man mit den beiden Zählern ohne Zusatzaufwand einen Zähler von 0..24 und damit einen Teiler durch 25 bauen. Es muss nur beachtet werden, dass das Ausgangssignal ziemlich asymmetrisch ist, was hier aber egal ist.
Der Binärzähler 4040 (IC5) erzeugt durch Teilung durch 2, 4, 8 und 16 alle benötigten Taktsignale, was Frequenzen von 152kHz, 76kHz, 38kHz und 19kHz entspricht. IC enthält 6 Flipflops (es werden aber nur 4 gebraucht) und dient hier dazu, die Taktsignale zu synchronisieren, damit alle gleichzeitig und nicht nacheinander den Pegel wechseln, weil der 4040 ein asynchroner Zähler ist. Diese Synchronisation verbessert die Signalqualität des Mischers, weil so Spikes vermieden werden. Das 19kHz-Signal wird mit dem LC-Kreis L2/C16/C17 gefiltert, so dass ein sauberes 19kHz-Sinussignal als Pilotton entsteht. Da die Phasenlage des Pilottons gegenüber dem 38kHz-Träger relevant ist, muss die Resonanzfrequenz hier genau eingestellt werden, was entweder durch eine abgleichbare Spule

(Handarbeit) oder durch steckbare Zusatzkondensatoren (C17) gemacht wird. Mit umsteckbaren Kondensatoren kann für L2 eine handelsübliche Induktivität verwendet werden. Als nützlich hat sich hier eine IC-Fassung erwiesen, wo man die Kondensatoren einstecken kann.

Modulator (Mischer)

Der Mischer bereitete einiges Kopfzerbrechen. Die Anforderungen sind folgende:

1. keine Verzerrung des Audiosignals (Differenzsignal)
2. sehr gute Unterdrückung des Trägers und des Eingangssignals (Differenzsignal)
3. möglichst wenig Oberwellen des Zweiseitenbandsignals

Punkt 1 dürfte selbstredend sein.

Punkt 2 ist einerseits von der Norm her gefordert (Trägeramplitude max. 1% vom Spitzen-Signalpegel) und andererseits kann der Dekoder die beiden Audiokanäle nicht korrekt dekodieren, wenn vom Differenzsignal Reste auf dem Summensignal vorhanden sind (diese würden im Summensignal den Anteil vom linken Kanal erhöhen und den vom rechten Kanal reduzieren).

Punkt 3 ist technischer Natur. Damit die HF-Bandbreite nicht unzulässig gross wird (was bei FM im Gegensatz zu AM Verzerrungen im Empfänger gibt), muss die Bandbreite des Multiplex-Signals auf 53kHz begrenzt bleiben und damit sind Oberwellen vom 38kHz-Zweiseitenbandsignal verboten. Da die Oberwellen aber nahe am Nutzsignal sind und zudem das Zweiseitenbandsignal in der Phase nicht verzerrt werden darf, wird eine Filterung sehr aufwendig. Somit muss man also die tieffrequenten Oberwellen verhindern.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Mischern: analoge Multiplizierer und geschaltete Mischer. Ein analoger Multiplizierer liefert theoretisch das perfekte Zweiseitenbandsignal, wenn er mit einem sinusförmigen 38kHz-Signal gefüttert wird. In der Praxis gibt es aber zwei Probleme: Diese Dinger sind schweineteuer und Offsetspannungen sorgen dafür, dass doch wieder etwas von den Eingangssignalen am Ausgang erscheint. Zudem haben sie recht hohe Verzerrungen.

Somit bleiben nur die geschalteten Varianten übrig, die in der HF-Technik als Dioden-Ringmischer bekannt sind. Bei 38kHz kann man statt Dioden auch CMOS-Schalter verwenden, was die Schaltung vereinfacht. Im einfachsten Fall braucht man einen Umschalter (z.B. 4053), der mit 38kHz getaktet wird und so im 38kHz-Takt zwischen dem nichtinvertierten und dem invertierten Audiosignal hin- und herschaltet. Bei korrekter Invertierung und genau 50% Pulsweite ist so am Ausgang das Audiosignal komplett unterdrückt, und der 38kHz-Träger ist ebenfalls unterdrückt, wenn das Audiosignal gleichspannungsfrei ist. Mathematisch ist das eine Multiplikation des Audiosignals mit einem 38kHz-Rechtecksignal. Somit gibt es im Ausgangsspektrum neben dem gewünschten Doppelseitenbandsignal noch alle ungeraden Harmonischen davon, welche aufwendig weggefiltert werden müssen.

Um diesen Filteraufwand zu reduzieren, gibt es einen Trick, der z.B. bei Frequenzumrichtern als ‚Multi-Level' bekannt ist: Man fügt weitere Zwischenpegel in das Rechtecksignal, um die gewünschte Sinusform anzunähern. In unserem Fall wäre die erste Verbesserung mit Null als drittem Pegel neben dem nichtinvertierten und dem invertierten Differenzsignal S und entsprechend 4 Schalterstellungen, welche mit 76kHz Taktfrequenz weitergeschaltet werden:

Stellung 0: keine Spannung
Stellung 1: +S
Stellung 2: keine Spannung
Stellung 3: -S

Diese Massnahme bringt zwar nichts für die 3. Oberwelle, aber die 5. wird so vollständig unterdrückt, ebenso die 9., 15. usw.
Damit die am stärksten störende 3. Oberwelle ebenfalls unterdrückt wird, wird dieser Trick weitergezogen. Neben 0, +S und -S (welche den Winkeln 0, 90, 180 und 270 Grad des Trägers entsprechen) werden noch die Zwischenwerte 0.707*S und -0.707*S eingefügt, welche den Trägerwinkeln 45, 135. 225 und 315 Grad entsprechen (sin(45 Grad) = 1/sqrt(2) = 0.707). Die Zählfrequenz wird jetzt auf 152kHz vervierfacht, damit die Trägerfrequenz weiterhin 38kHz beträgt und der Schalter hat 8 Stellungen:

Stellung 0: keine Spannung
Stellung 1: +0.707 * S
Stellung 2: +S
Stellung 3: +0.707 * S
Stellung 4: keine Spannung
Stellung 5: -0.707 * S
Stellung 6: -S
Stellung 7: -0.707 * S

Mit diesem Schaltmuster ist die erste störende Frequenz bei 266kHz, also die 7. Oberwelle. Diese hat so viel Abstand zum Nutzsignal, dass sie mit einfachen LC-Tiefpässen weggefiltert werden kann.
In der Schaltung ist IC7 der 8fach-CMOS-Schalter, der von IC6 die synchronisierten Steuersignale zur Auswahl der Schalterstellung erhält und so im 152kHz-Takt die Schalterstellung von 0..7 durchschaltet. OpAmp A2 liefert das Differenzsignal +S und OpAmp A1 das invertierte Signal -S. Der Spannungsteiler R9/R10 erzeugt +0.707*S und der Spannungsteiler R8/R7 erzeugt -0.707*S. Über das Tiefpassfilter R32/L1/C15 wird das Zweiseitenbandsignal abgenommen. IC7 braucht hier auch eine negative Spannung an Pin 7, damit es negative Eingangsspannungen verarbeiten kann. Die Z-Diode D1 begrenzt zusammen mit R6 die -15V auf einen für das IC erträglichen Wert von 7.5V. Will man einen 74HC4051 verwenden (der dürfte einiges besser sein, habe es aber noch nicht ausprobiert), muss man die Spannung auf 6V begrenzen, also eine 5V6-Z-Diode verwenden. Mit dem Poti P1 kann der Offset auf dem Differenzsignal eingestellt werden, um den Träger möglichst gut zu unterdrücken.

Stromversorgung
Die Schaltung benötigt +/-15V und +5V oder +6V, die Stromaufnahme ist ca. 100mA, je nach Audiopegel und Lastwiderstand. Die üblichen ‚Dreibeiner' 7815, 7915 und 78L05 (oder 78L06) stabilisieren die gleichgerichtete Spannung vom Trafo.
Um Störungen zu vermeiden, ist es wichtig, den analogen vom digitalen Schaltungsteil vollständig zu trennen. Die analoge und digitale Masse werden dabei bei Pin 8 von IC7 verbunden, das ist der einzige Berührungspunkt (neben den Analogsignalen an IC7). So werden unerwünschte HF-Störsignale an den Audioanschlüssen oder im Multiplex-Signal vermieden. Ein Metallgehäuse ist hier ein Muss, auch um Brummeinstreuungen zu vermeiden.
Ebenfalls notwendig ist die saubere Entkopplung der Betriebsspannungen an den ICs. Dazu wird bei den digitalen ICs jeweils direkt am IC ein 100nF-Keramikkondensator zwischen den Versorgungs-Pin und den Masse-Pin geschaltet. Bei den OpAmps gibt es je einen Kondensator von der positiven Spannung nach Masse und der negativen Spannung nach Masse.

OpAmps

Als OpAmps eignen sich TL074 (4fach) und TL072 (2fach) sehr gut und diese sind auch preiswert. Für den Ausgang (A10) kann auch ein NE5534 oder NE5532 verwendet werden, der kann wesentlich mehr Ausgangsstrom liefern und 600Ω-Lasten treiben, während man beim TL072 bei 2kΩ bleiben sollte. Will man andere OpAmps einsetzen, müssen solche mit FET-Eingängen verwendet werden (ausser A9 und A10), damit die Offsets nicht zu gross werden, und sie müssen ausreichend Bandbreite haben, da hier Frequenzen bis 53kHz vorkommen. Somit ist eine Bandbreite von mehreren MHz notwendig, um Verzerrungen zu vermeiden.