

Auch heute noch interessant: DAFC zur VFO-Stabilisierung

WERNER SCHNORRENBURG – DC4KU

Eine der möglichen schaltungstechnischen Maßnahmen zur Verringerung der Drift von abstimmbaren LC-Oszillatoren ist die digitale automatische Frequenznachregelung. Obwohl seit mehr als 40 Jahren bekannt, ist sie bei Selbstbau- oder historischen Funkgeräten auch heute noch eine überlegenswerte Option, um die Oszillatorstabilität signifikant zu erhöhen. Die DAFC kann zwar aus einem schlechten Oszillator keinen guten, aber aus einem guten einen deutlich besseren machen.

Abstimmbaren LC-Oszillatoren begegnet man auch heute noch als VFO in Selbstbaugeräten oder historischer Funktechnik. Problematisch ist ihre Frequenzdrift. Eine Möglichkeit, diese deutlich zu reduzieren, ist die seit den 1970er-Jahren als DAFC bekannt gewordene Schaltung (engl. *Digital Automatic Frequency Control*). Diese bindet den VFO in einen Regelkreis aus Digitalzähler, Ladungspumpe und Kapazitätsdiode ein.

heruntermisch, bevor es dann weiterverarbeitet wird. Nachfolgend geht es um die erstgenannte Methode. Die grundlegende Funktionsweise der DAFC lässt sich anhand des Blockschaltbilds in Bild 1 recht gut beschreiben. Wer sich für die zugrunde liegende Detailschaltung interessiert, findet diese in [1]. Die DAFC arbeitet im Prinzip wie ein einfacher Frequenzzähler, der in der letzten Stelle eine Auflösung von 40 Hz besitzt.

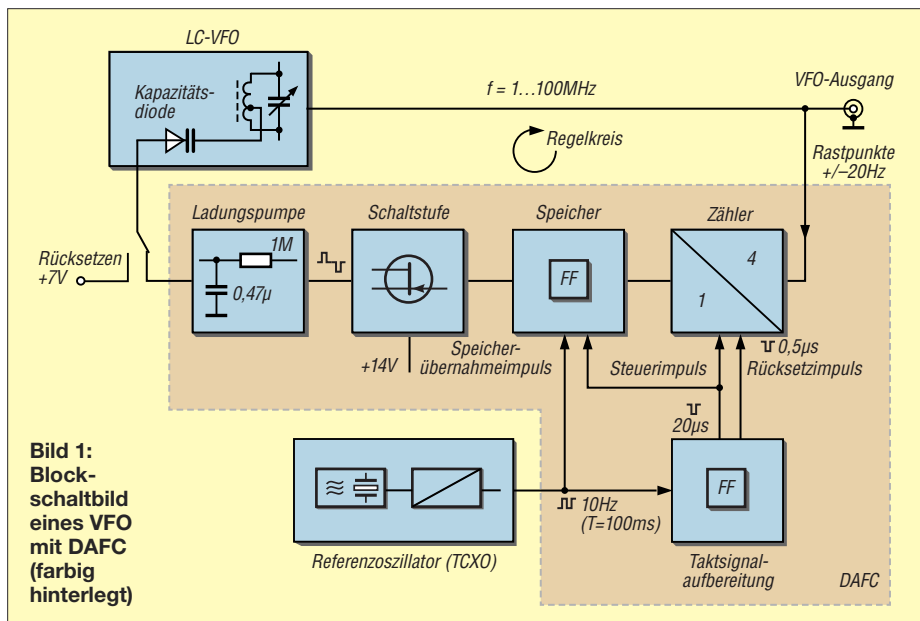


Bild 1: Blockschaltbild eines VFO mit DAFC (farbig hinterlegt)

Die Literaturangaben zum vorliegenden Beitrag sind Beispiele für die zahlreichen Veröffentlichungen zu diesem Thema, das für die Selbstbauer unter den Funkamateuren auch heute durchaus noch interessant sein kann.

■ Funktionsprinzip

Es gibt zwei einfache Arten der Frequenzstabilisierung von freilaufenden LC-Oszillatoren. Eine davon verwendet einen digitalen Zähler, der die VFO-Frequenz periodisch misst. Frequenzänderungen führen zur automatischen Nachstimmung. Ein weiteres Verfahren nutzt einen digitalen Mischer, der das VFO- mit einem hochfrequenten Referenzsignal (TCXO) auf einen niedrigen Wert

Diese entsteht, indem die Frequenz des vom VFO kommenden Eingangssignals zunächst durch 4 geteilt und anschließend mit 10 Hz abgetastet wird (Bild 1). Der 10-Hz -Referenztakt ist auch die Basis für die Bereitstellung der Steuerimpulse mit $t = 20 \mu\text{s}$ sowie die erforderlichen Speicherübernahme- und Rücksetzimpulse.

Im Weiteren ist nur das letzte Bit des Frequenzzählers von Bedeutung (engl. *Least Significant Bit*, abgekürzt *LSB*), welches entweder logisch 1 oder 0 sein kann. Bei konstanter VFO-Frequenz schwankt der Ausgangszustand des 1-Bit-Zählers statistisch (über die Zeit) mit dem Bitfehler, d. h. im Mittel erscheinen die Zustände 1 und 0 gleich häufig. Leitet man dieses Ausgangs-

signal des Zählers (im Beispiel betragen $U_1 = +14 \text{ V}$ und $U_0 = 0 \text{ V}$) an eine als *Ladungspumpe* bezeichnete RC-Kombination, dann liefert diese an ihrem Ausgang eine Spannung von $U_M = +14 \text{ V}/2 = +7 \text{ V}$ (Bild 2). Diese Ausgangsspannung gelangt wiederum an eine Kapazitätsdiode (Bild 3) im Schwingkreis des VFO. Wenn sich die Ausgangsspannung der Ladungspumpe nicht ändert, d. h. wie im Beispiel konstant $+7 \text{ V}$ beträgt, verstimmt die Kapazitätsdiode den VFO nicht und die eingestellte Frequenz bleibt stabil auf ihrem Wert.

Ausregelung der Drift

Driftet nun die eingestellte Oszillatorfrequenz durch Temperaturänderung um einige Hertz nach unten, dann entstehen am Ausgang des Zählers mehr 1- als 0-Signale und das daraus resultierende Spannungsniveau der Ladungspumpe steigt langsam an. Die Kapazitätsdiode im Oszillatorschwingkreis erhält daraufhin eine etwas höhere Spannung als $+7 \text{ V}$, wodurch sich ihre Kapazität verringert und die VFO-Frequenz wieder in Richtung der ursprünglich eingestellten Frequenz gezogen wird. Ist diese erreicht, gibt der Zählerausgang wieder gleich viele 1- und 0-Signale ab und der Nachregelvorgang ist abgeschlossen.

Driftet die VFO-Frequenz nach oben, läuft das Ganze ebenso ab, nur umgekehrt. Der Rastpunkt jeder Synchronisierung (besser *Stabilisierung*) beträgt somit $\pm 20 \text{ Hz}$ und es ergeben sich 40-Hz -Rastpunkte entlang der Frequenzachse.

Wird bei eingeschalteter DAFC die Frequenzabstimmung des VFO z. B. mithilfe eines Drehkondensators betätigt, so ist die resultierende Frequenzänderung pro Zeiteinheit wesentlich höher als die Nachregelgeschwindigkeit und die Ladungspumpe gibt im steten Wechsel positive und negative Impulse ab. Sobald man den Abstimmknopf wieder loslässt, wird der nächste Rastpunkt angefahren und die Frequenz ist anschließend wieder stabil.

Bei einem Frequenzwechsel muss die DAFC also nicht abgeschaltet werden. Nur unmittelbar nach dem Einschalten des Transceivers sollte sie zunächst deaktiviert

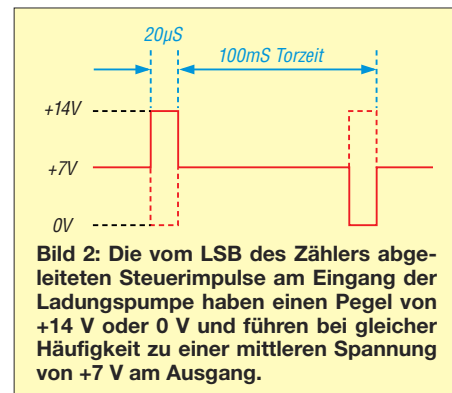


Bild 2: Die vom LSB des Zählers abgeleiteten Steuerimpulse am Eingang der Ladungspumpe haben einen Pegel von $+14 \text{ V}$ oder 0 V und führen bei gleicher Häufigkeit zu einer mittleren Spannung von $+7 \text{ V}$ am Ausgang.

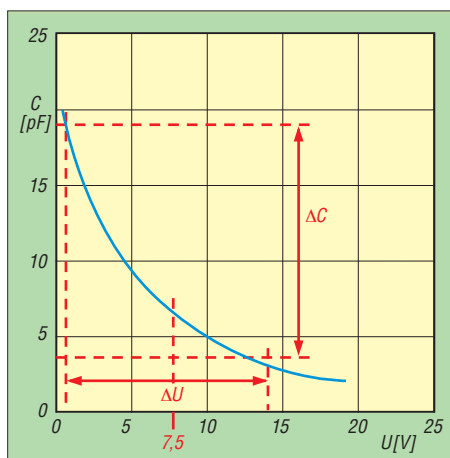


Bild 3: Beispiel für die Kennlinie einer Kapazitätsdiode mit dem Einstellbereich der Steuerspannung ΔU und der resultierenden Kapazitätsänderung ΔC

sein, bis sich die Ladungspumpe auf den Bezugspunkt $U_M = +7\text{ V}$ eingestellt und der VFO von seiner anfänglichen Einschalt- drift etwas „erholt“ hat. Nach kurzer Zeit kann die DAFC aktiviert werden. Sie sorgt dann für die Stabilität der gewählten Frequenz auf dem nächstgelegenen Rastpunkt.

Regelgeschwindigkeit

Die Steuerimpulse am Eingang der Ladungspumpe ($R = 1\text{ M}\Omega$, $C = 0,47\text{ }\mu\text{F}$) haben eine Länge von $t \approx 20\text{ }\mu\text{s}$ und eine Wiederholrate von 10 Hz. Pro Impuls wird der Ladungspumpe ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = \frac{7\text{ V}}{1\text{ M}\Omega} = 7\text{ }\mu\text{A}$$

aufgeprägt und ihre Ausgangsspannung steigt oder fällt um den Betrag von

$$\Delta U = \frac{t}{C} \cdot I = \frac{20\text{ }\mu\text{s}}{0,47\text{ }\mu\text{F}} \cdot 7\text{ }\mu\text{A} = 0,3\text{ mV.}$$

Die Nachstimmempfindlichkeit der Kapazitätsdiode im Oszillatorkreis sei in unserem Fall 150 mV/kHz. Demnach verursacht ein einziger 20- μs -Impuls eine Frequenzverstimmung (Schrittgröße) von

$$\Delta f = \frac{0,3\text{ mV}}{150\text{ mV}} \cdot 1000\text{ Hz} = 2\text{ Hz.}$$

Bei einer Zähler-Torzeit $T = 100\text{ ms}$ erfolgen zehn Messungen pro Sekunde. Daraus ergibt sich eine Nachregelgeschwindigkeit von $v_R = 2\text{ Hz} \cdot 10\text{ s}^{-1} = 20\text{ Hz/s}$, was einem Wert von 1,2 kHz/min entspricht. Diese wird in der Praxis aber nicht erreicht, da die Anzahl der positiven und negativen Impulse statistisch verteilt ist. Für 20 Hz „Regelstrecke“ werden daher bis zu 3 s benötigt.

Betrieb

Damit die DAFC zufriedenstellend funktioniert, muss der VFO von Haus aus schon relativ frequenzstabil sein. Falls er schnell

ler driftet, als die Regelzeit erlaubt, dann versucht der VFO auf beliebige 40-Hz-Punkte ober- oder unterhalb der gewählten Frequenz einzurasten und die Drift kann nicht mehr korrigiert werden. Deshalb muss die maximale Drift des VFO stets kleiner sein als die Regelzeit zwischen zwei 40-Hz-Punkten.

Driftet der Oszillator trotz aller Maßnahmen aufgrund unzureichender Temperaturkompensation mit mehr als 500 Hz/min, sollte man durch Änderung des Teilverhältnisses der Rastpunktabstand auf 80 Hz und die Schrittgröße auf 3 Hz bis 4 Hz pro Impuls erhöhen.

Funktionskontrolle

Die Funktionskontrolle der DAFC erfolgt am besten auf der NF-Ebene mithilfe eines einfachen Oszilloskops. Dazu sind ein quarzstabiles HF-Signal mit $P \approx -50\text{ dBm}$ in den Antenneneingang des SSB-Empfängers einzuspeisen, dieser auf etwa 1 kHz Überlagerungston abzugleichen und der Lautsprecher Ausgang mit dem Eingang des analogen Oszilloskops zu verbinden. Deswegen Zeitablenkung wird getriggert und so eingestellt, dass etwa 20 NF-Sinustdurchgänge auf dem Bildschirm sichtbar sind (Einstellung der Zeitablenkung auf 1 ms pro Skalenteil).

Wichtig: Anschließend dehnt man die horizontale Ablenkung noch um den Faktor 10 und verschiebt das Sinussignal so weit nach links, dass dessen rechtes Ende auf dem Bildschirm sichtbar ist (Bild 4).

Am Ende des Kurvenzugs ist nun die Oszillatordrift durch ein langsames Wandern des NF-Sinussignals in Richtung höherer oder niedrigerer Frequenz sofort erkennbar. Akustisch kann man das Wandern des NF-Signals nicht wahrnehmen (zumindest ich selbst habe es nicht gehört).

Sobald die DAFC eingeschaltet ist, „kriecht“ das Sinussignal nur noch ein kleines Stück nach oben oder unten, um dann beim nächstgelegenen Rastpunkt in maximal $\pm 20\text{ Hz}$ Entfernung stehen zu bleiben. Die Funktion der Regelung erkennt man nun daran, dass das NF-Signal langsam über einem Fangbereich von etwa $\pm 3\text{ Hz}$ um diesen Rastpunkt herum nachgezogen bzw. -geregelt wird. Das Ende des Kurvenzugs wandert also ständig leicht nach oben oder unten.

Die Frequenzregelung geschieht kontinuierlich, der VFO „rastet“ quasi auf dieser Frequenz ein und bleibt über Stunden, Tage und Wochen stabil auf diesem Punkt stehen, lediglich abhängig von der Drift des Referenzoszillators.

Hinweis: Das quantitative Phasenrauschen des Oszillators kann man z. B. am schnellen Jittern des Elektronenstrahls am Ende des Kurvenzugs erkennen. Überhaupt las-

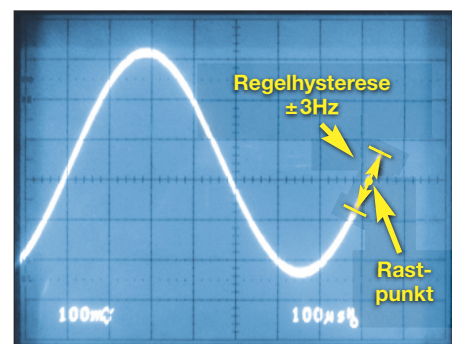


Bild 4: Einfache Funktionskontrolle der DAFC im Zeitbereich; dargestellt ist das 1-kHz-Signal mit zehnfacher Dehnung bei einer Zeitablenkung von 1 ms/Skalenteil. Foto: DC4KU

sen sich viele Eigenschaften von VFO und Empfänger aus diesem NF-Signal ablesen.

Zusammenfassung

Der Vorteil eines abstimmbaren und mittels DAFC stabilisierten LC-Oszillators (VFO) ist das geringe Phasenrauschen. Da die Frequenznachregelung nur langsam erfolgt, wird das Seitenbandrauschen des Oszillators – im Gegensatz zur klassischen PLL – durch die DAFC nicht negativ beeinflusst. Im eingerasteten Zustand regelt sie das driftende Oszillatorsignal stetig und relativ langsam innerhalb einer Frequenzdifferenz von wenigen Hertz (Fangbereich). Der VFO muss also schon eine gute Grundstabilität aufweisen, wenn die DAFC zuverlässig funktionieren soll. Seine resultierende Frequenzgenauigkeit hängt dann ausschließlich von der Stabilität des Referenzoszillators ab, der das 10-Hz-Torsignal des Zählers der DAFC bereitstellt. Das bedeutet, dass z. B. bei einem Referenz-TCXO mit einer Stabilität von 1×10^{-9} /Tag auch der VFO dann diesen Wert besitzt. dc4ku@dar.c.de

Literatur

- [1] Schnorrenberg, W., DC4KU: Stabilisierung von LC-Oszillatoren mit DAFC. www.dc4ku.darc.de/Stabilisierung_VFO.pdf
- [2] Lechner, D., Y21TD: Kurzwellenempfänger, MV der DDR, 2. Aufl., Berlin 1985, Kapitel 10, S. 311; Reprint: FA-Leserservice, Best.-Nr. X-9365
- [3] Barthels, E., Y22UL: Erfahrungen mit einer digitalen Frequenznachregelung (DAFC). FUNK-AMATEUR 29 (1980) H. 5, S. 247–248
- [4] Geerligs, F. H. V., PA0FRI: PAØKSB's VFO Stabilisator getest en toegepast. <http://pa0fri.home.xs4all.nl/Diversen/VFOstab/vfostab.htm>
- [5] van Trotsenburg, M. J., PA0TRT: Huff Puff Stabilizer for the Drake TR7 or TR7A transceiver. www.qsl.net/py4bl/vfoesta.htm
- [6] Latzel, G. DL6GL: Historisches: Clapp-VFO mit DAFC. <http://dl6gl.de/amateurfunk/historisches-clapp-vfo-mit-dafc>
- [7] Martin, M., DJ7VY: Rauscharmer UKW-Oszillator für einen Empfängereingangsteil mit großem Dynamikbereich. CQDL 48 (1977) H. 10, S. 387–389
- [8] Schnorrenberg, W., DC4KU: Rauscharmer VFO für großsignalfeste KW-Empfänger (2). FUNK-AMATEUR 50 (2001) H. 11, S. 1243–1245
- [9] Strate, U., DF4KV: Einfache Frequenz-Rasteinrichtung. CQDL 56 (1985) H. 12, S. 695–696. www.qsl.net/df4kv/dafc85.pdf