

Es muss nicht immer DDS sein

Von Nothart Rohde / März 2011

-1-

Extreme Frequenzstabilität bei gleichzeitiger Durchstimbarkeit ist bei nachrichtentechnischen Oszillatoren seit jeher die große Herausforderung. Das beginnt ja schon im nächsten Radio. Irgendwann kamen die DDS-Systeme auf (Direkte Digitale Synthese), zunächst als Einschub, inzwischen als Baugruppe / IC. Als Allheilmittel gepriesen, können sie auch nicht alles. Von Aufwand und Kosten ganz zu schweigen.

1 Das Problem

Die Natur liefert den Elektronikern und Physikern sehr schmalbandige Resonatoren zu geringem Preis. Nur damit ist die Funktechnik mit ihren vielen Kanälen, zumindest die klassische, überhaupt möglich geworden. Bei der Realisierung stößt man aber schnell auf das Problem, dass man gleichzeitig hohe Frequenzstabilität mit Veränderbarkeit verbinden muss, was sich weitgehend ausschließt. Hier fällt wohl nur der YIG-Oszillator aus dem Rahmen, der aber wegen Aufwand und Kosten auf Spezialanwendungen beschränkt bleibt. In allen anderen Fällen muss man durch stufenweise Vorgehensweise das Problem in Schritten abbauen. Etwa in der Form, dass man einen stabilen, hochfrequenten Oszillator mit einem durchstimbaren, niederfrequenten Kollegen mischt, also die beiden erzeugten Sinussignale miteinander multipliziert oder irgendwie addiert.

Das Standard-Repertoire an stabilisierenden Elementen für Oszillatoren, das normalerweise zur Verfügung steht, besteht, nach absteigender Stabilität, aus Quarzen unterschiedlicher Ausprägung, aus LC-Kreisen und aus RC-Gliedern. Neben Quarz können auch andere Kristalle verwendet werden (Keramik-Schwinger), weiterhin können anderer Schwingungsphänomene in Kristallen genutzt werden (SAW-Resonatoren) oder ganz aktuell, aber noch sehr im Fluß, kleinste frei schwingende Siliziumstrukturen (MEMS-Resonatoren). Dabei ist nicht jeder Oszillator bei jeder Frequenz verfügbar, was die Auswahl kompliziert macht.

Der Übersichtlichkeit halber und orientiert an klassischer Funktechnik, sollen daher im Folgenden nur der Quarzoszillator und der LC-Oszillator betrachtet werden. Der erste ist sehr genau, aber nur bei tiefen Frequenzen verfügbar und nur im Sub-Promillebereich veränderbar. Der zweite ist ziemlich universell, weitreichend abstimmbare, aber damit auch instabiler. Abgestimmt wird mit Kapazitätsdioden. Nicht mehr verwendet wird die induktive Abstimmung, eine Lösung, die in den ersten Autoradios zur Anwendung kam, weil die damals üblichen Drehkondensatoren nicht rüttelfest genug waren.

Eine klassische Lösung, verfügbar seit Erfindung der ECL-Logik, ist die "Anbindung" eines LC-Oszillators (VCO) an einen Quarz mittels einer PLL. Die Oszillatorfrequenz wird dabei geeignet geteilt, im einfachsten Fall binär, soweit, dass man sie mit einer gängigen Quarzfrequenz vergleichen kann. Mit dem Teilerfaktor 1 : 128 könnte man z.B. einen 1,28 GHz-Oszillator auf 10 MHz beziehen. Das wäre ein gängiger Referenzwert.

Vorteil ist, dass man einen sehr hochfrequenten Oszillator mit Quarzeigenschaften erhält, bei Frequenzen, für die es keine Quarze gibt. Verändern lässt er sich aber nicht. Hierzu wurden die "dual modulus"-Teiler eingeführt, die sich zwischen 2 Teilerstufen, meist $n / n+1$ umschalten lassen. Der zusätzliche Aufwand ist vertretbar und es gibt inzwischen Teiler, die noch mehr einstellbare Verhältnisse anbieten. Feinabstimmung erreicht man dadurch, dass man eine gewisse Zeit lang das eine Teilverhältnis und eine gewisse Zeit lang das andere einstellt. Es entsteht dabei ein Jitter, der irgendwo zeitlich gemittelt werden muss, was meist die analoge Regelschleife der PLL mit übernimmt. Im oben genannten Beispiel hätte man damit einen Stellbereich des VCO von 1,28 ... 1,29 GHz. Das ist nicht sehr viel, aber der Abstimmbereich von 10 MHz könnte für eine übliche Funkanwendung durchaus genügen.

Mit schnellerer Logik und höhere Integrationsdichte ist ein weiteres Verfahren eingeführt worden, die direkte digitale Synthese (DDS) eines abstimmbaren, aber trotzdem quarzgenauen Sinussignals. Hier wird die Sinusfunktion in einer Tabelle abgelegt und mit verschiedener Geschwindigkeit via D/A-Wandler ausgelesen. Eine analoge Nachfilterung zur Bandbegrenzung ist sinnvoll. Würde man im oben genannten Beispiel die Quarzreferenz durch ein DDS-System ersetzen, hätte man trotz fester Vorteilung eine sehr weite Durchstimmbarkeit, die nur noch von den Möglichkeiten des VCO begrenzt wird. DDS ist also sinnvoll, wenn weite Durchstimmbarkeit bei digitaler Steuerung gefordert wird oder wenn die VCO-Frequenzen so hoch sind, dass man sie gerade noch binär teilen kann.

2 Alternative Lösungen

Das Problem "Stabilität gegen Durchstimmbarkeit" steht immer im Raum und man freut sich über irgendwelche alternativen Ideen. Vor einiger Zeit habe ich mir daher eine ganz alte Notiz in der Zeitschrift "Elektronik" von 1982 hergenommen und die dort vorgetragenen Ideen etwas hin- und hergeschoben. Anlass war die Frage, welche weiteren Integrationsmöglichkeiten bestehen, weil alle genannten Lösungen zentrale, leider nur analog realisierbare Baugruppen enthalten oder weil die üblichen Lösungen für manche schlichte Anwendung zu aufwändig sind.

Die Verbindung eines hochfrequenten, stabilen Signals mit einem niederfrequenten, durchstimmbaren Signal wird üblicherweise durch Mischen / Multiplizieren erreicht. Leider entstehen dabei 2 gleichwertige Frequenzen. Zur Unterdrückung der zweiten Frequenz wurde die Einseitenband-Mischung erfunden, für die es mehrer Lösungsansätze gibt. Man kann diese

Strukturen mit gewissem Erfolg rein digital nachbilden und sich das Ergebnis auf dem Spektrumanalysator ansehen : es ist besser als erwartet. Für diese Spiele wird die Multiplikation durch EXOR ersetzt, Addition wahlweise durch UND oder ODER, Invertierung bleibt Invertierung und die notwendige 90° Verschiebung wird durch EXOR + Flipflop erreicht.

Für diese Schaltungen, aber ebenso für die nachfolgenden, einfacheren Vorschläge ist stets das EXOR (hier Typ xx86) der Engpass. Bezüglich Geschwindigkeit, wie auch bezüglich Logikfamilie und Hersteller. Das Gatter kann eine erhebliche Rauschquelle sein, oder aber auch nicht. Je nach Schaltungsstruktur gibt es dabei Fälle, wo im erzeugten Signal nachfolgende Flanken starken, aber gegenphasigen Jitter aufweisen. Den sieht man weder auf dem Oszilloskop, noch auf dem Spektrumanalysator. Erst nach Teilung durch 2 enthüllt sich das Problem ! Sollen diese eigentlich quartzgenauen Signale nachrichtentechnischen Standards genügen, sind sie daher nach Fertigstellung des Aufbaus oder der FPGA-Programmierung testhalber durch Faktor 2 zu teilen, am besten extern mit der geeigneten Logikfamilie.

Die Verbindung von zwei Digitalsignalen geht additiv auch durch einfaches Hinzufügen oder Wegnehmen von Pulsen oder Flanken. Für das Verständnis sind Nadelimpulse am einfachsten, für die praktische Anwendung sollte man aber eher von einem Tastverhältnis 1 : 1 bei nicht idealen Flanken ausgehen. **Bild 1**

zeigt das Prinzip : die Subtraktion erfolgt dadurch, dass im Takt des einen Signals im anderen Signal ein Polaritätswechsel **nicht** stattfindet. Die Addition erfolgt dadurch, dass ein nicht vorhandener Wechsel zusätzlich erzeugt wird. Da beide Signale frequenzfremd sind, müssen sie vor der Verarbeitung synchronisiert werden. Speziell für die Addition ist es außerdem sinnvoll, den zusätzlichen Polaritätswechsel zeitlich balanciert auf die schon vorhandenen Flanken zu beziehen. Alle diese Maßnahmen benötigen zusätzliche Flipflops und senken das Frequenzniveau um Faktor 2 oder 4 .

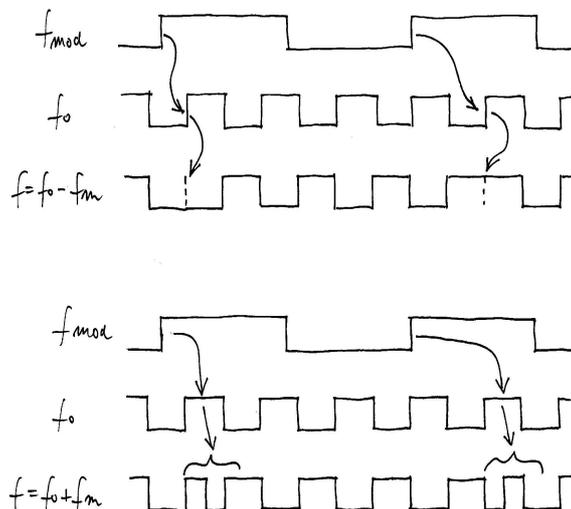
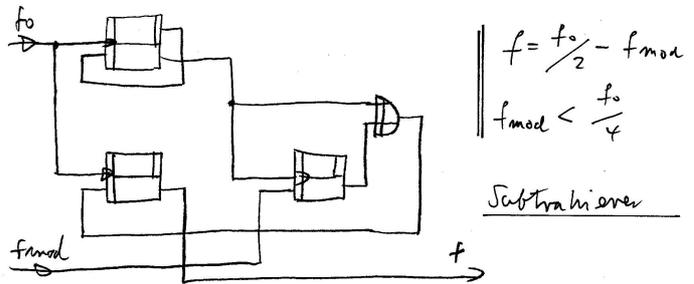


Bild 1 Prinzipielle Logiksignale bei Subtraktion und Addition. Vor- und gegebenenfalls Nachsynchronisierung sind nicht dargestellt.

Für die Aufgabe sind sicher mehrere Lösungen möglich, ein Kriterium wäre, dass sie trotz Freiheit von Jitter und Überlappungsproblemen das Frequenzniveau nicht zu sehr drücken.

Bild 2 zeigt Vorschläge für die Subtraktion, die Addition und ein kombiniertes Rechenwerk. Ein DDS-artiger Aufbau bestünde dann z.B. aus dem genannten Subtrahierer, einem möglichst hoch liegenden Quarztakt, einer mit einfachsten Mitteln abstimmbaren Modulationsfrequenz und nachfolgender Binärteilung zur Mittelung des Jitters. Ein wenig Analogtechnik ist für die Modulationsfrequenz notwendig. Wenn sie aber nur zu Bruchteilen das quarzstabile Endergebnis beeinflusst, reduziert sich im gleichen Maß der Einfluß von Nichtlinearitäten bei der Abstimmung. Der geringste Aufwand wäre lediglich ein rückgekoppeltes Schmitt-Trigger-Gatter (**Bild 3**). Wichtig : dieser Oszillator muss extern sein, sonst lässt er sich durch Übersprechen im IC nicht frei durchstimmen.

Bild 2



Verschiedene Rechenwerke für Subtraktion und Addition.

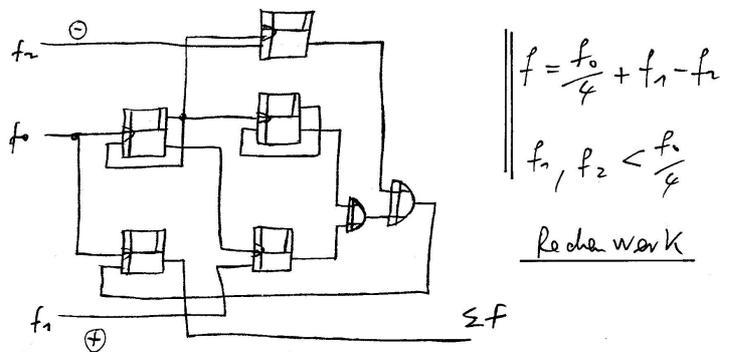
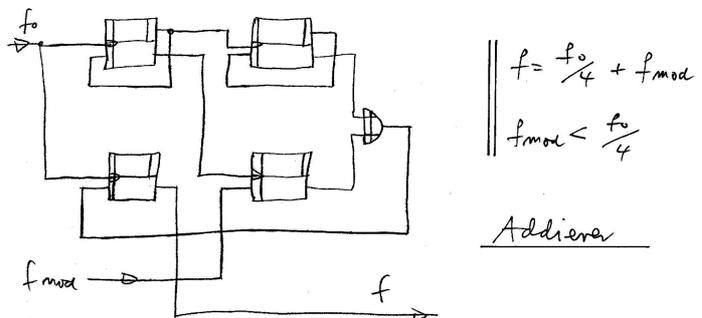
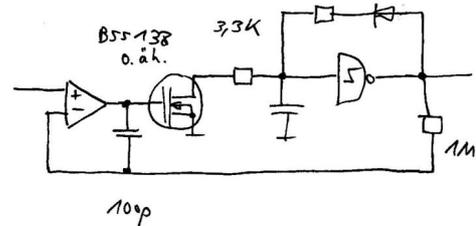
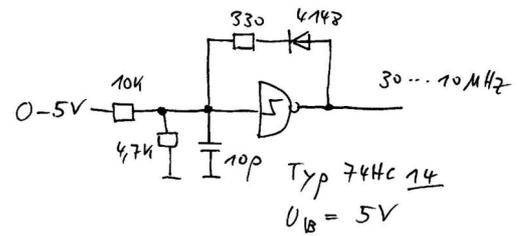


Bild 3

Einfachst-Oszillatoren zur Feinabstimmung. Diese Schaltungen erzeugen Nadelimpulse, die man gegebenenfalls noch durch 2 teilen kann / sollte.

Die Grundschialtung lässt sich deutlich linearisieren, wenn man die Pulse integriert und in einen Regelkreis einspeist.



3 DDS mit der Lupe betrachtet

Für den nachrichtentechnisch orientierten Leser soll anhand **Bild 4** noch gezeigt werden, dass die Verwendung eines DDS-System tückisch sein kann, wenn man "krumme" Frequenzen einstellt. Es wurde ein VCO bei 1,5 GHz konventionell mit einer PLL stabilisiert. Durch den hohen Teilungsfaktor ist der Informationsweg von der Endfrequenz bis zum Vergleich mit der Quarzfrequenz recht lang. Daher ergibt sich zwar eine stabile Mittenfrequenz, die Linie ist aber mit etwas Rauschen überlagert. Zur Verbesserung wurde der VCO zusätzlich an eine Oberwelle eines DDS-Systemes angebunden. Damit ergibt sich eine merkliche Verbesserung rund um den Träger. Der Preis ist zwar ein breiterer "Rauschsockel" außerhalb der zusätzlichen Feinregelung via DDS-Anbindung, aber insgesamt ergibt sich eine Verbesserung. Experimentiert man mit der Feinabstimmung der DDS-Frequenz, findet man aber immer wieder krumme Werte, die deutlich instabiler sind und im Rahmen dieser Darstellung eher eine Verschlechterung darstellen, sobald man sich etwas vom Träger entfernt.

Wird die vom DDS-System erzeugte Frequenz auf ähnlichem Frequenzniveau verwendet, muss das überhaupt nicht stören. Bei Frequenzvervielfachung muss man jedoch wegen des damit verbundenen Lupeneffektes aufpassen. Aber auch direkt im DDS-Signal erkennt man die kritischen Frequenzen. Es sind die Fälle, bei denen die immer vorhandenen Nebenfrequenzen zum Träger hingewandert sind und durch die analoge Nachfilterung nicht mehr bedämpft werden können. Diese Spezialfälle gibt es immer, man muss sie allerdings suchen.

Literaturstelle : H. Henkel, "Digitale Modulatoren", "Elektronik", Heft 22, 1982, Seite122

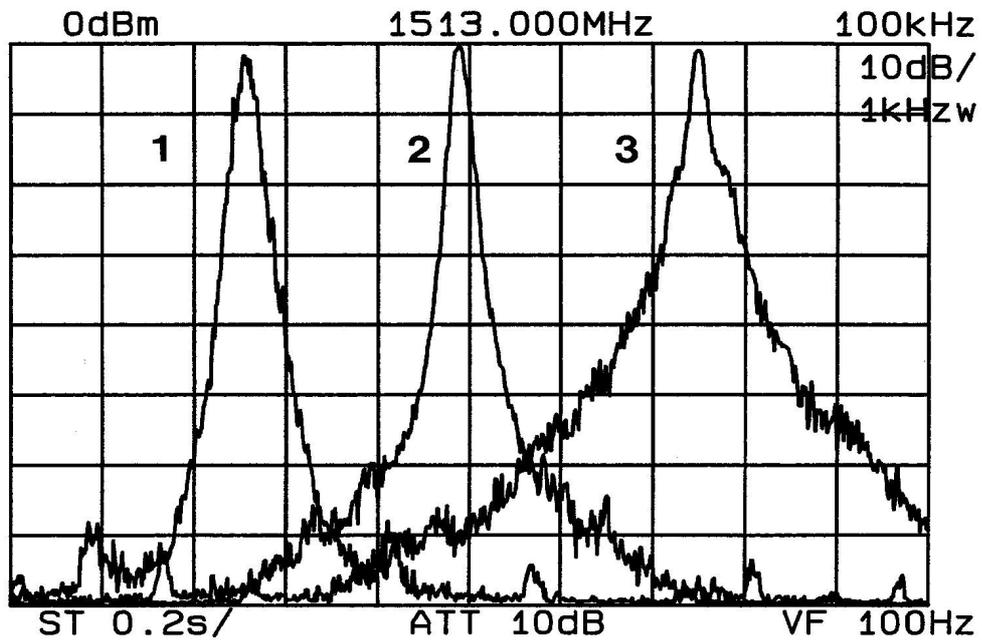


Bild 4

VCO mit konventioneller PLL und zusätzlicher Stabilitätskorrektur mittels DDS.
Die Linien sind in der Horizontalen grafisch verschoben.

- 1 Stabilisierung mit Prescaler und PLL.
- 2 Zusätzliche Anbindung an die 756. Oberwelle eines 2 MHz-DDS-Signals.
- 3 Wie 2, aber unglückliche Wahl des Auslesezyklus im DDS-System.