

Ein Injection Locked Oszillator als adaptives Filter

Herbert Weidner, Am Stutz 3, 63864 Glattbach, Email: herbertweidner@gmx.de

Zusammenfassung: Ein Injection Locked Synchronous Oscillator ist ein schmalbandiges digitales Filter, das seine Frequenz einem frequenzvariablen Signal nachführt. Damit lassen sich schwache Signale veränderlicher Frequenz trotz starkem Rauschhintergrund nachweisen. Das Signal wird im Zeitbereich bei vernachlässigbarer Phasenverschiebung verarbeitet. Der Berechnungsaufwand ist wesentlich geringer als bei vergleichbaren Filtertypen.

Einleitung: Das folgende Programm ist ein Baustein der Analyse von NMR-Daten im Magnetfeld der Erde. Die Präzessionsfrequenz der Protonen, die in Mitteleuropa um 2140 Hz schwankt, wird mit einem 24-Bit-ADC digitalisiert. Ohne weitere Maßnahmen würde das [Nyquist-Theorem](#) eine Samplingrate von mindestens 5000 Hz erfordern und bei einer Langzeitmessung würde ein tägliches Speichervolumen von mehr als 1 GB erzeugt. Zu viele Daten für überschaubar wenig Information.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich das Magnetfeld meist so langsam ändert, dass eine Samplingfrequenz unter zehn Hertz ausreicht. Deshalb wird die Signalfrequenz vor der Digitalisierung und Speicherung auf 40 Hz reduziert. Vor der Analyse mischt das Programm die Frequenz der gespeicherten Daten auf fünf Hertz. Die Frequenzänderungen verändern nicht den Signalinhalt, haben aber mehrere Vorteile: Die notwendige geringe Bandbreite der Filter lässt sich einfacher realisieren und Rechenzeit und Speicherbedarf verkürzen sich insgesamt um den Faktor 400.

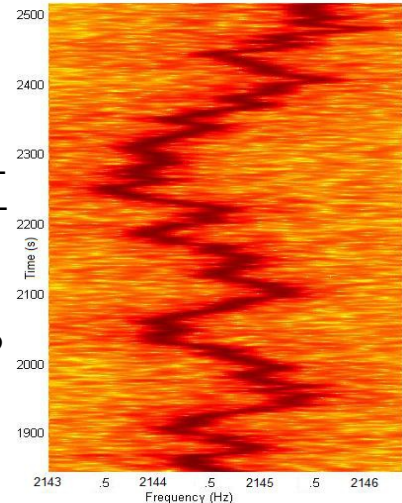


Abbildung 1: NMR-Signal nach selektiver Filterung mit einem ILO ($BW=0,1$ Hz).

Das Spektrogramm in Abb. 1 zeigt, dass sich die Frequenz der Protonen-NMR im Erdmagnetfeld innerhalb weniger Sekunden um etwa ein Hertz ändern kann, das ist ein Vielfaches der gewünschten Bandbreite. Die extrem schwachen NMR-Signale in Magnetfeldern unter 1 mT sind im Rauschen schwer nachweisbar und weil sich ihre Frequenz ständig unvorhersehbar ändert, sind übliche schmalbandige Filter ungeeignet. Man benötigt eine automatische Nachführung, die dafür sorgt, dass der Filterkorridor der Frequenz des Eingangssignals folgt. Wenn die Bandbreite bei fester Zentralfrequenz zu klein ist, wird das Signal den Filterkorridor verlassen und ist nicht mehr nachweisbar. Vergrößert man die Bandbreite, durchlaufen zu viele Störungen das Filter und das Signal verschwindet im Rauschen.

Ein [Injection Locked Oszillator](#) (ILO) kann dieses Problem lösen, weil er sich einfach durch ein Fremdsignal synchronisieren lässt. Ein ILO üblicher Bauart kann verdrauschte Signale konstanter Frequenz sehr gut regenerieren, scheitert aber, wenn die Signalfrequenz den engen Korridor des Haltebereichs verlässt. Eine brauchbare Schaltung muss deshalb folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Bandbreite soll 0,1 Hz nicht überschreiten, um das Signal-Rausch-Verhältnis ausreichend zu verbessern. Da hohe Filtergüten oft unerwünschte Nebeneffekte wie „Klingeln“ (engl.: Ringing artifacts) erzeugen, zwingt die geforderte Bandbreite zu Filterfrequenzen unter 10 Hz.
- Die Frequenz des ILO muss der des Signals auch dann noch automatisch folgen, wenn die Bandbreite mehrfach überschritten wird. Abb. 1 zeigt, dass die Signalfrequenz in einem Bereich wandert, der die Bandbreite bis zu 20-fach überschreitet.
- Wenn die Signalamplitude während einiger Schwingungen zu gering ist, dürfen sich Frequenz und Phase des Oszillators in dieser Zeit nur wenig ändern, damit dieser umgehend einrastet, sobald die Signalamplitude wieder ausreicht.

Die Funktion eines ILO *ohne* Frequenznachführung ist [hier](#)^[1] detailliert beschrieben. Im Folgenden geht es ausschließlich um die Erweiterung durch eine Frequenznachführung.

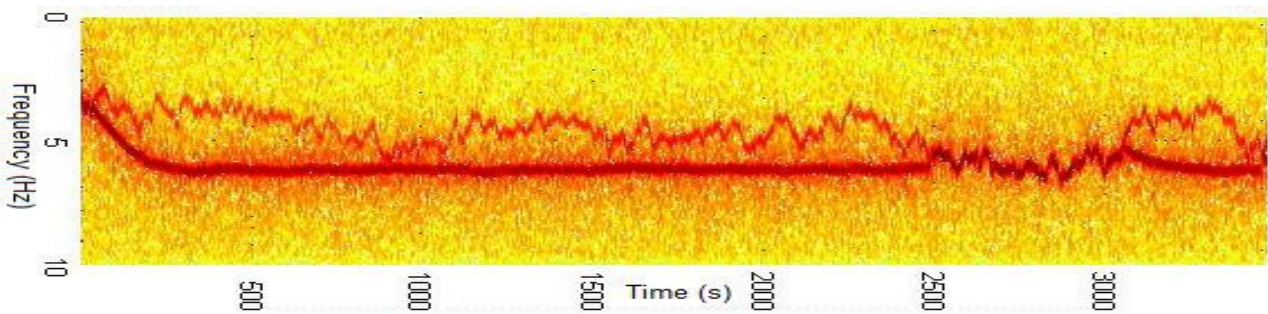


Abbildung 2: Unvollständige Synchronisation bei fehlender Frequenznachführung. Die obere Kurve ist das NMR-Signal, die untere Kurve zeigt die Frequenz des ILO.

Im Spektrogramm in Abb. 2 sieht man, dass ein ILO *ohne* Frequenznachführung nur dann einrastet, wenn die variable Signalfrequenz zufälligerweise in den schmalen Fangbereich gerät. Andernfalls schwingt der ILO auf seiner voreingestellten, fast konstanten Frequenz und ignoriert das tieferfrequente Signal. Wenn die Signalfrequenz nach dem Lock-in zu stark von der voreingestellten Frequenz des ILO abweicht, übersteigt der Phasenunterschied zwischen Signal und ILO den kritischen Wert $\pi/2$ und die Synchronisation endet.

Es gibt zwei Lösungen, um einen ILO dauerhaft trotz großer Frequenzänderungen des Signals zu synchronisieren:

1. Man erhöht die Frequenz des ILO, um den Fangbereich zu verbreitern, denn dieser beträgt etwa 5% der mittleren Frequenz. Diese Maßnahme vergrößert aber auch die Bandbreite und deshalb verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis.
2. Man misst laufend die aktuelle Frequenz des ILO und korrigiert seine programmierte Sollfrequenz, um die Phasendifferenz zwischen Signal und ILO zu verringern. Mit dieser Methode kann man trotz geringer Bandbreite sehr weiten Frequenzwanderungen des Signals folgen.

Frequenznachführung (zweiter Weg): Die Signalfrequenz lässt sich meist nicht unmittelbar bestimmen, weil die Amplitude zu klein und zu verrauscht ist. Deshalb berechnet das Programm (in der Annahme, dass Synchronisation vorliegt) in regelmäßigen Abständen (beispielsweise nach zehn Schwingungen) die tatsächliche Frequenz f_{neu} des ILO und vergleicht diese mit dem vorhergehenden Wert f_{alt} . Damit die Differenz minimal bleibt, errechnet das Programm immer wieder korrigierte Parameter „z“ und „v“ des ILO (die Aufgaben dieser beiden Werte ist in [1] beschrieben). Auf diese Weise folgt die Sollfrequenz des ILO der tatsächlichen Signalfrequenz.

Für die Berechnung existieren bewährte Methoden der Regelungstechnik, die an die Signalqualität angepasst werden müssen:

- Wenn sich die Frequenz langsam ändert *und* ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis vorliegt, wird ein [PD-Regler](#) gute Ergebnisse bringen. Man kann auch schnelle Änderungen erkennen, weil der Differentialanteil diese „voraussieht“ und sofort reagiert. Die vielen kleinen Korrekturen verstärken das Phasenrauschen des Ausgangssignals.
- Bei schlechtem SNR kann ein P- oder PI-Regler bessere Ergebnisse liefern, weil sie blind sind für schnelle Änderungen. Deshalb zeichnet sich das Ausgangssignal durch geringes Phasenrauschen aus.
- Das Verfahren „[linear prediction](#)“ liefert vergleichsweise mäßige Resultate und wurde nicht ausführlich untersucht.

1 Herbert Weidner, [Detektion schwacher Signale mit einem Injection Locked Oszillator](#), 2020

Das lauffähige Programm eines *nachgeführten ILO* ist ein Minimalgerüst, enthält nur die notwendigen Schritte und keine Vorkehrungen gegen Datenfehler:

```

%3-Ringoszillator mit Frequenznachführung
%die Datei ys enthält die Messdaten vom ADC; Die Samplingfrequenz beträgt Fs=48;

ys1=0.6e-6*ys;%Wertbereich normieren: -0,1<ys1<+0,1;
ILO=zeros(length(ys1),3); %Inverter-Ausgänge
ILO(1,3)=1e-3; %Starter für die Iterationen
b=3.5; %Hz Startfreq des lock-in range, experimentell ermitteln oder raten
z = min(roots([-2.07,9.6953,0.2468-b]));
zk=1-z; %speed up the program
v=polyval([-2.03572,5.344,-7.355],z); %Verstärkung jeder Stufe
for k=2:20 %kurzer Vorspann wegen Frequenznachführung
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,3)))-0.5); ILO(k,1)=z*b+zk*ILO(k-1,1)+ys1(k);
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,1)))-0.5); ILO(k,2)=z*b+zk*ILO(k-1,2);
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,2)))-0.5); ILO(k,3)=z*b+zk*ILO(k-1,3);
end
while k>2 %letzten Nulldurchgang suchen
    if ILO(k-1,3)<0 && ILO(k,3)>0, break, end
    k=k-1;
end, k0=k+ILO(k,3)/(ILO(k-1,3)-ILO(k,3)); zaehl=1;
for k=21:size(ILO,1) %Hauptprogramm
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,3)))-0.5); ILO(k,1)=z*b+zk*ILO(k-1,1)+ys1(k);
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,1)))-0.5); ILO(k,2)=z*b+zk*ILO(k-1,2);
    b=v*(1/(1+exp(-ILO(k-1,2)))-0.5); ILO(k,3)=z*b+zk*ILO(k-1,3);
    %wenn sich f ändert, müssen z und v korrigiert werden
    if ILO(k-1,3)<0 && ILO(k,3)>0, zaehl=zaehl+1;
        if zaehl>5 %Länge eines Schwingungspaketes 3..20
            k1=k+ILO(k,3)/(ILO(k-1,3)-ILO(k,3)); %Nulldurchgang berechnen
            b=(zaehl-1)*Fs/(k1-k0); %aktuelle Frequenz
            b = min(roots([-2.07,9.6953,0.2468-b]));
            z=(z+b)/2; %PI-Regler
            %z=(3*z+b)/4; %PI mit größerer Zeitkonstante
            %z=b+(b-z)/5; %PD-Regler, nervöses Verhalten
            v=polyval([-2.03572,5.344,-7.355],z); %Verstärkung aktualisieren
            zk=1-z; k0=k1; zaehl=1;
        end
    end
end
end
spectrogram(ILO(:,3),300,240,2^11,Fs); beep

```

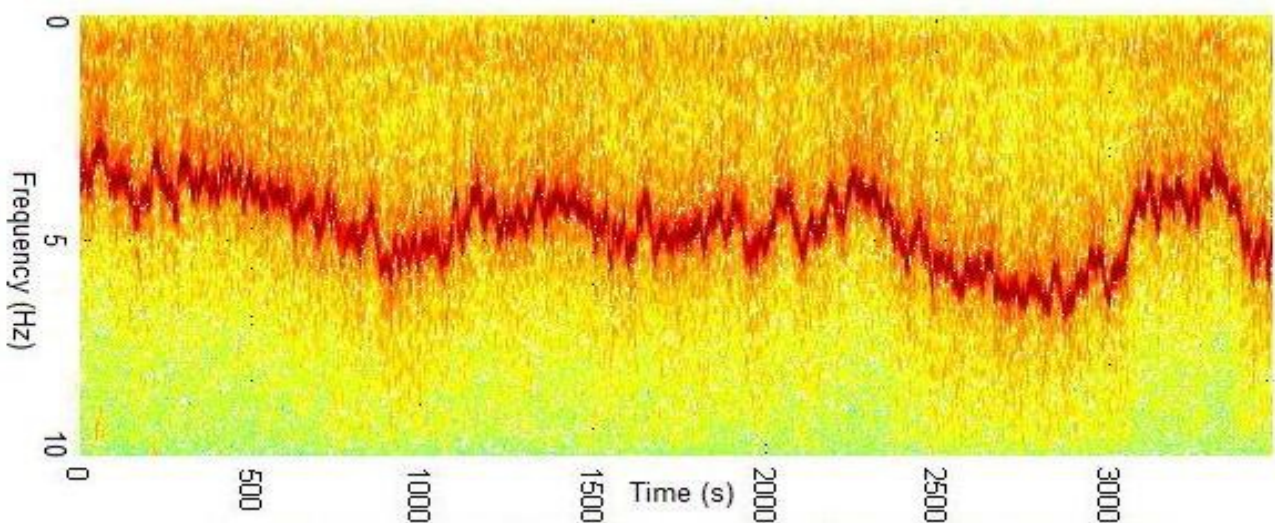


Abbildung 3: Fehlerfreie Synchronisation des ILO durch das Signal dank Frequenznachführung. Die Rohdaten für Abb 2 und Abb 3 sind identisch.