

Nyquist ve aliasing: sensör verisini ne hızla örneklemelisiniz

Analiz bandınıza göre örnekleme hızını hesaplayın, aliasing'in yanıltıcı düşük frekanslı tepeler ürettiğini görün ve PLC ya da SCADA kayıtlarının neden yetersiz olduğunu anlayın.

Kısaca

- Örnekleme hızı, ilgilenilen en yüksek frekansın en az iki katı olmalıdır; aksi halde bileşenler spektrumda katlanır.
- Pratik FFT analizörleri, analiz edilen en yüksek frekansın yaklaşık 2,56 katında örnekleme yapar; bu bir koruma payıdır.
- PLC okumaları ve historian sıkıştırması aliasing benzeri bozulmalar ekler; yüksek hızlı titreşim ölçümünün yerini tutamazlar.

01 / Nyquist sınırı: f_s ve f_{maks}

Bir sinyali dijitalle çevirdiğinizde örnekleme hızı f_s , örnekler arasındaki zaman aralığını belirler. Nyquist-Shannon örnekleme teoremine göre, bir sinyalin içerdiği en yüksek frekans f_{maks} ise, sinyali bozulmadan yeniden oluşturmak için f_s değerinin f_{maks} 'ın en az iki katı olması gerekir. Bu eşiğe Nyquist sınırı denir. Dijital ölçümde $f_s/2$, doğru temsil edilebilecek en yüksek frekanstır.

Bu koşul sağlanmadığında hata yalnızca grafiğin görünümünde kalmaz. Spektrumda yanlış bir frekansta sahte bir tepe belirir. İlgilenmediğiniz yüksek frekanslı bileşenler de örnekleme sırasında düşük frekanslı bölgeye katlanabilir. Teorem sinyalin bant sınırlı olduğunu varsayar. Gerçek sensör çıkışlarında ise her zaman bir miktar yüksek frekanslı gürültü bulunur; bu yüzden sınırlama, yazılımdan önce analog bir filtreyle yapılmalıdır.

02 / Aliasing: katlanan frekans

Örneklenmiş veride $f_s/2$ üzerindeki bir bileşen, daha düşük bir frekansla aynı görünür. Görünen frekans, k en yakın tamsayı olmak üzere $|f - k \cdot f_s|$ ile bulunur. Bu olguya aliasing ya da frekans katlanması denir.

İki örnek kuralı netleştirir. 60 Hz'lik bir titreşim 50 Hz'de örneklenirse, $k = 1$ alındığında görünen frekans $|60 - 50| = 10$ Hz olur. Başka bir örnek: 0,9 Hz'lik bir pulsasyon saniyede bir kez okunursa, $f_s = 1$ Hz olur ve görünen frekans $|0,9 - 1| = 0,1$ Hz'dir. İki durumda da veriye bakan kişi, sinyalde bulunmayan bir düşük frekanslı olay görür.

03 / Analog filtre: örneklemeden önce

Aliasing, örneklemeden sonra geri alınamaz. Bu nedenle anti-aliasing filtresi analog olmalı ve dönüştürücüden önce uygulanmalıdır. Filtre, analiz bandının üzerindeki bileşenleri örneklemeden önce yeterince zayıflatır. Yazılımda sonradan yapılan filtreleme, sinyal zaten katlanmışsa bu hatayı düzeltemez.

Alt-örnekleme (downsampling) yapılırken de aynı mantık geçerlidir: örneklerin yalnızca bir kısmını tutmadan önce, yeni Nyquist sınırının üzerindeki içeriği kaldıran bir alçak geçiren filtre uygulanmalıdır. Aksi halde yüksek frekanslı içerik, yeni ve daha düşük bantta katlanır. Filtrenin kesim frekansı analiz bandının üstünde, ama $f_s/2$ 'nin altında olmalıdır. Kesim çok düşük seçilirse analiz bandının kendisi zayıflar; çok yüksek seçilirse $f_s/2$ civarındaki bileşenler katlanmadan geçer.

04 / PLC ve SCADA kayıtlarında gizli katlanma

Veri hattında ayrı bir sorun ortaya çıkar. Bir PLC ya da SCADA sistemi değerleri sabit aralıklarla okur. Örneğin okuma periyodu 1 saniyeyse, saniyede bir alınan değerler yalnızca 0,5 Hz'in altındaki değişimleri doğru temsil edebilir. Historian tarafındaki deadband ya da sıkıştırma ek bir bozulma getirir: değer yeterince değişmeden yeni kayıt yazmaz, dolayısıyla saklanan seri artık düzenli örneklenmiş bir süreç verisi olmaz. Sonuç aliasing'e benzer bir görünüm verebilir.

Bu yüzden yavaş taranmış veriden yüksek frekanslı bir spektrum kurmaya çalışmayın. Etkin örnekleme hızı, yalnızca sensöre değil, toplama zincirinin her halkasına bağlıdır.

05 / Örnekleme hızını seçmek

Pratik bir kural, ilgilendiğiniz en yüksek frekansı f_{maks} olarak belirleyip f_s 'yi ona göre seçmektir. Spektrum analizinde FFT analizörleri sık olarak $f_s \approx 2,56 \times f_{\text{maks}}$ kullanır; bu, Nyquist'in teorik alt sınırının üzerinde bir koruma payı bırakır. Dalga biçimini de görmek istiyorsanız, f_{maks} 'ın 5 ila 10 katı bir hız daha uygundur. Örneğin $f_{\text{maks}} = 400$ Hz için $f_s = 2,56 \times 400 = 1\,024$ Hz alınır; bu durumda $f_s/2 = 512$ Hz olur. Anti-aliasing filtresinin geçiş bandı 400 Hz ile 512 Hz arasına sığmalıdır.

Analiz bandını ilgilendiğiniz arıza frekanslarından çok daha geniş seçmek, gereksiz veri hacmi ve gereğinden yüksek bir f_s anlamına gelir; bandı ilgilendiğiniz frekanslarla sınırlayın.

Seçimden sonra $f_s/2$ yakınındaki spektrumu kontrol edin. Bu bölgede düz ya da düşük bir seviye olmalıdır. Belirgin bir enerji görüyorsanız bu, ya gerçek bir içeriğin sınıra yakın olduğunu ya da anti-aliasing filtresinin yumuşak kaldığını gösterebilir. Her iki durumda da $f_s/2$ yakınındaki veriye, nedeni anlaşılmadan dayanarak sonuç çıkarmayın.

06 / Kendi sisteminizde ilk kontrol

Yeni bir ölçüm kurmadan önce mevcut ayarları yazın: kanal, okuma ya da örnekleme hızı, analog filtre olup olmadığı ve historian'da sıkıştırmanın açık olup olmadığı. Sonra küçük bir test yapın. Bilinen frekanslı bir referans sinyali (örneğin bir sinyal üretici) bağlayın ve tepenin beklenen yerde görünüp görünmediğine bakın. Tepe, f_s değiştirildiğinde yer değiştiriyorsa büyük olasılıkla bir alias tepesidir.

Bu kontrol, verinin ileride makine öğrenmesi ya da spektral teşhis için kullanılacağı durumlarda geçerlidir. Önce ölçüm zincirini doğrulayın, sonra analiz yöntemini seçin. Test sonuçlarını referans frekansı, ayarlanan f_s , görülen tepe ve farkın açıklamasıyla birlikte yazılı tutun. Bu kayıt, sistemde sonra yapılacak değişikliklerden sonra karşılaştırma için kullanılabilir.

Uygulayın

Open a built-in synthetic signal in spectra, look at the spectrum near half the sampling rate, and write down how you would tell a real peak from a folded one.

Kaynaklar ve çevrimiçi rehber

Güncel çevrimiçi rehberi açın

[Nyquist-Shannon sampling theorem \(Wikipedia\)](#)

[Aliasing \(Wikipedia\)](#)

[Discrete Fourier Transforms \(scipy.fft\) \(SciPy\)](#)

[Accelerometer \(Wikipedia\)](#)

Önerilen pilot adımları saha doğruluk iddiası içermez. Sentetik örnekler gerçek tesis ölçümü değildir.