Frequenzkammgenerator mit Harmonischen von 100 kHz bis 600 MHz

Reinhard Noll, DF1RN

Einer periodischen Folge von Nadelimpulsen im Zeitbereich entspricht eine periodische Folge von Maxima im Frequenzraum. Letztere stellt einen Frequenzkamm dar, der aus einer Serie von Frequenzmarken im Abstand einer festen Frequenz Δf besteht. Den Zusammenhang zwischen der Impulsfolge im Zeitbereich und dem Frequenzkamm vermittelt die Fourier-Transformation.

Hans Nussbaum, DJ1UGA, hat in [1] eine einfache Schaltung für einen Impulsgenerator beschrieben, der als Frequenzkammgenerator bis zu Frequenzen von 600 MHz einsetzbar ist. Bild 1 zeigt die Schaltung. Für eine nähere Beschreibung dieser Schaltung wird auf [1] verwiesen.

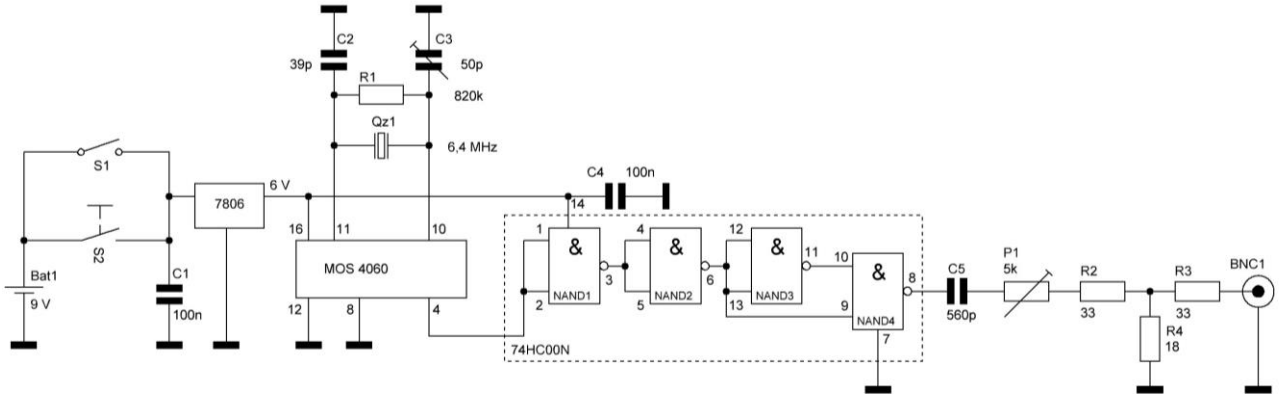

Bild 1: Schaltung des Impulsgenerators nach [1]

Die Schaltung kann auf einer Lochrasterplatine aufgebaut werden. Bild 2 zeigt den fertigen Generator in einem HF-Gehäuse. Auf der Vorderseite ist der Schalter S1 zu sehen mit dem ein kontinuierlicher Betrieb des Impulsgenerators aktiviert werden kann, der Taster S2 überbrückt diesen Schalter für eine nur kurzzeitige Erzeugung von Impulsen. Auf der linken Seite befindet sich die BNC-Buchse mit dem Ausgangssignal.

Bild 2: Impuls- und Frequenzkammgenerator

Bild 3 zeigt ein Oszillogramm der Ausgangsimpulse gemessen am 50 Ω Eingang des Oszilloskops Tektronix TK 7844, Einschub 7A24

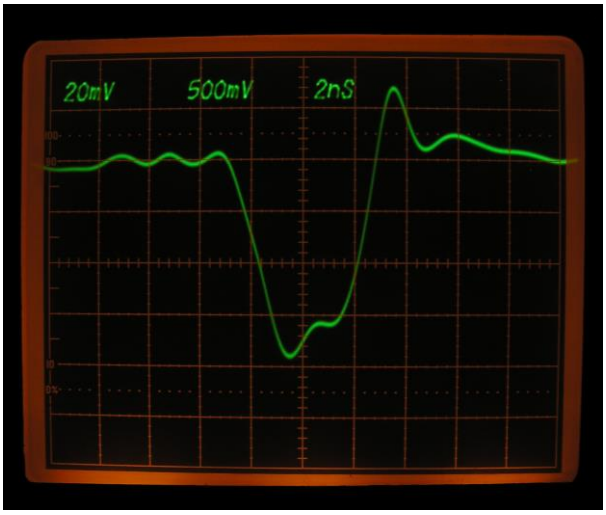

Bild 3: Oszillogram des Impulses gemessen mit dem TK 7844 am 50 Ω-Eingang des Einschubs 7A24

Die Halbwertsbreite dieses Impulses beträgt 3,9 ns, das ist deutlich geringer als die in [1] angegeben 12 ns.

Welche Frequenzen können wir für einen Impuls dieser Form erwarten? Näherungsweise läßt sich der experimentell beobachtete Impuls durch einen Trapezpuls annähern, wie er in Bild 4 dargestellt ist (hier als äquivalentes positives Signal wiedergegeben). Dabei vernachlässigen wir den genauen zeitlichen Verlauf im Impulsmaximum sowie den Überschwinger bei der Rückkehr des Signals zum Ausgangspegel (vgl. Bild 3).

Eine periodische Folge von Trapezpulsen kann durch vier Parameter beschrieben werden: a) die Amplitude A_{max}, b) die Pulsperiode T_p, c) die Halbwertsbreite der Impulse τ_m, d) die Fußbreite der Impulse τ_p.

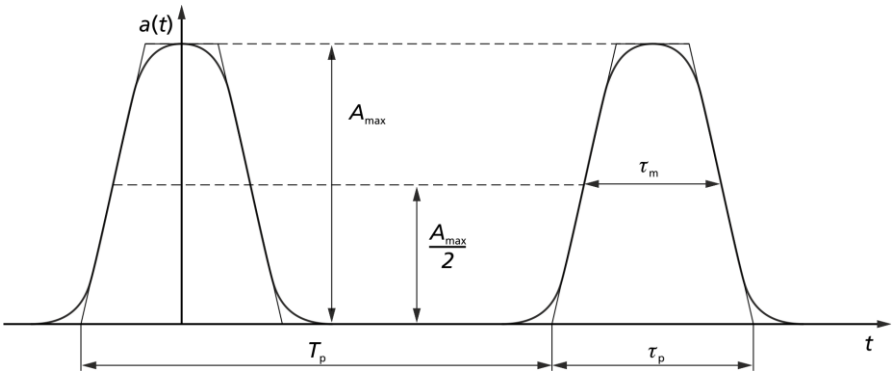

Bild 4: Trapezpulse (entspricht Abb. 13.1/9a aus [2]).

Mit Hilfe der Fourier-Transformation folgt für ein solches Signal für die Amplituden der *n*-ten Harmonischen im Frequenzraum bei nf mit $f = 1/T_p$ [2]:

$$A(nf) = 2A_{max}\frac{\tau_m}{T_p}\left(\frac{\sin n\pi\frac{\tau_m}{T_p}}{n\pi\frac{\tau_m}{T_p}}\right)\left(\frac{\sin n\pi\frac{\tau_p-\tau_m}{T_p}}{n\pi\frac{\tau_p-\tau_m}{T_p}}\right), \qquad (1)$$

wobei n = 1, 2, ... ist. Die Beziehung (2) zeigt, dass die Amplitude der Harmonischen nf proporotional zum Produkt zweier sinc-Funktion ist (sinc(x) = (sin x)/x). Für den Effektivwert der Amplitude der n-ten Harmonischen gilt:

$$A_{eff}(nf) = A(nf)/\sqrt{2}\,. \qquad (2)$$

Für kleine n und mit $\tau_m, \tau_p << T_p$ gehen die beiden sinc-Funktionen gegen 1 ($\lim_{x\to 0}(\mathrm{sinc}(x)) = 1$) und es gilt näherungsweise:

$$A_{eff}(nf) \approx \sqrt{2} A_{max} \frac{\tau_m}{T_p} \ . \qquad (3)$$

Setzen wir die aus dem Oszillogramm von Bild 3 gemessenen Werte: A_{max} = 78 mV, τ_m = 3.9 ns, τ_p = 6 ns und die Pulsperiode T_p = 10 µs in (3) ein, so folgt: $A_{eff}(nf) \approx 43$ µV. Das entspricht näherungsweise einem Pegel etwas unterhalb von S9 (50 µV im HF-Bereich).

Die Effektivwerte der Harmonischen n = 1 bis 2500 sind als Funktion von nf entsprechend den Beziehungen (1) und (2) für die gemessenen Werte (τ_m = 3,9 ns, τ_p = 6 ns) in Bild 5 als dunkelgrüne quadratische Datenpunkte aufgetragen.

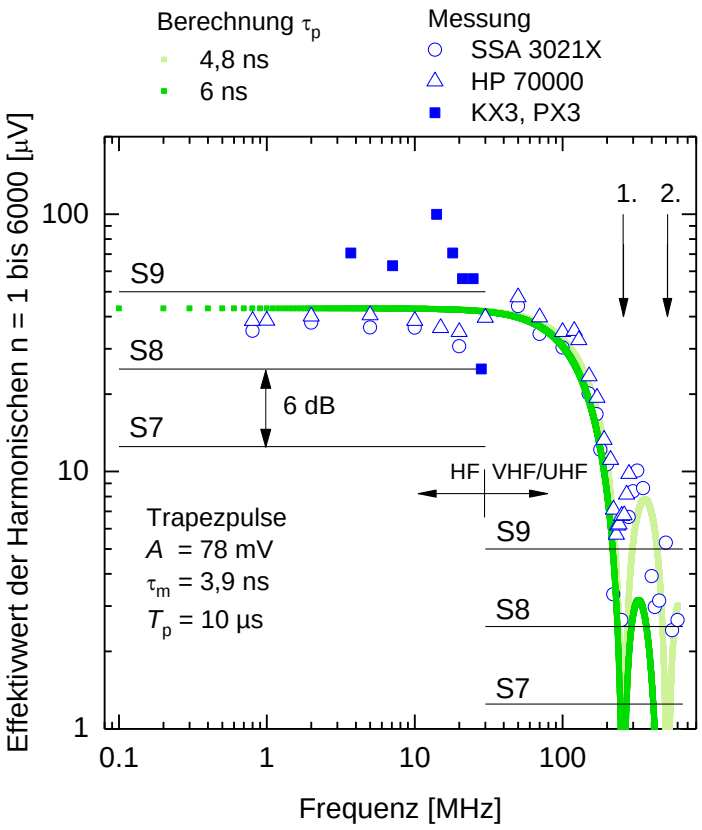

Bild 5: Berechnete Effektivwerte der Harmonischen der Trapezpulse des Impulsgenerators als Funktion der Frequenz für die Parameter (τ_m, τ_p) = (3,9 ns, 4,8 ns), hellgrüne Datenpunkte und (3,9 ns, 6 ns), dunkelgrüne Datenpunkte. Messungen der Harmonischen mit den Spektrumanalysatoren SSA 3021X und HP 70000 sind als offene blaue Datenpunkte eingetragen. Die Pfeile 1. und 2. zeigen die Lage der ersten und zweite Nullstelle der Funktion (1) an

Bild 5 zeigt, dass bis zu Frequenzen von ca. 70 MHz der Effektivwert der Harmonischen näherungsweise konstant etwas unterhalb von S9 bleibt. Bei 150 MHz sinkt der Pegel auf S8. Bei 250 MHz erreicht der Pegel gemäß (1) die erste Nullstelle:

$$f_{1.} = \frac{1}{\tau_m} \ . \qquad (4)$$

Mit der gemessenen Impulshalbwertsbreite folgt aus (4): $f_{1.} =$ 256 MHz. Die Lage dieser Nullstelle ist in Bild 5 mit dem Pfeil "1." markiert. Die zweite Nullstelle liegt gerade bei der doppelten Frequenz: $f_{2.} = 2 f_{1.}$, also bei 512 MHz (siehe Pfeil "2.").

Das sind die berechneten Werte – doch wie sehen die tatsächlichen Amplituden der Fourierkomponenten aus? Dazu haben Günter Dörflinger, DC3KQ, Manfred Jost, DH0KA und ich auf unseren wöchentlichen Treffen an der Clubstation DB0AC des OV Aachen, eine Messung mit Günters Spektrumanalysator der Fa. Siglent, Modell SSA 3021X durchgeführt. Als erstes haben wir die Amplitude des Sinusgenerators DDS 20 G mit einem Siglent Oszilloskop SDS 2204X auf einen Pegel entsprechend 0 dBm eingestellt ($u_{ss} \approx 632$ mV) und damit die dBm-Skala des Spektrumanalysators kalibriert.

Bei 24 Frequenzen im Bereich von 0,8 bis 600 MHz haben wir jeweils die Pegel des Fre–quenzkamms des Impulsgenerators gemessen, diese in Effektivwerte in µV umgerechnet und die Ergebnisse als blaue, runde Datenpunkte in Bild 5 eingetragen. Bis zu Frequenzen um 200 MHz folgen diese recht gut den berechneten dunkelgrünen Datenpunkten. Oberhalb von 200 MHz zeigen die Messpunkte ein erstes Minimum an, steigen dann wieder an, um bei ca. 500 MHz wieder deutlich abzufallen. In diesem Bereich liegen die Messpunkte deutlich oberhalb der berechneten dunkelgrünen Datenpunkte. Nehmen wir für die Berechnung der Effektivwerte der Harmonischen statt des Wertepaares $(\tau_m, \tau_\mathrm{p}) = (3{,}9\ \mathrm{ns},\ 6\ \mathrm{ns})$, das Wertepaar $(\tau_m, \tau_\mathrm{p}) = (3{,}9\ \mathrm{ns},\ 4{,}8\ \mathrm{ns})$, wählen also eine kürzere Fußbreite τ_p, so resultieren die hellgrünen Datenpunkte in Bild 5. Zwischen der ersten und der zweiten Nullstelle steigen die berechneten Pegel nun deutlich an und die Messpunkte (blau, offene Kreise) liegen viel näher zu dieser Kurve. Das Wertepaar $(\tau_m, \tau_\mathrm{p}) = (3{,}9\ \mathrm{ns},\ 4{,}8\ \mathrm{ns})$ würde bedeuten, dass die Anstiegszeit der Impulses etwa $t_\mathrm{a} \approx \tau_\mathrm{p} - \tau_\mathrm{m} = 0{,}9\ \mathrm{ns}$ beträgt, also deutlich kürzer wäre, als es dem Oszillogramm in Bild 3 zu entnehmen ist. Schätzen wir die Anstiegszeit des Oszilloskops TK 7844 mit der Beziehung $t_\mathrm{a} = 0{,}35 / f_\mathrm{g}$, f_g -3dB-Grenzfrequenz, ab, so folgt: $t_\mathrm{a} \approx 0{,}88\ \mathrm{ns}$. Dieser Wert stimmt recht gut mit der aus dem Wertepaar $(\tau_m, \tau_\mathrm{p}) = (3{,}9\ \mathrm{ns},\ 4{,}8\ \mathrm{ns})$ geschätzten Anstiegszeit von 0,9 ns überein.

Zur weiteren Prüfung der Pegel der Harmonischen habe ich eine ergänzende Messung mit dem Spektrumanalysator HP 70000 von Hewlett Packard durchgeführt, siehe offene, blaue Dreiecke in Bild 5. Auch diese Messpunkte folgen näherungsweise den berechneten hellgrünen Datenpunkten, allerdings sinken die Messwerte im Bereich der ersten Nullstelle nicht soweit ab. Das ist dem deutlich geringeren Dynamikbereich des HP 70000 im Vergleich zum SSA 3021X geschuldet.

Schließlich habe ich den Impulsgenerator an den Antenneneingang des Elecraft KX3 Transceivers mit dem Panoramaadapter PX3 angeschlossen und die S-Meteranzeige in den Kurzwellenbändern 80 m, 40 m, 20 m, 17 m, 15 m, 12 m und 10 m bestimmt. Bild 6 zeigt beispielhaft die Anzeige auf dem PX3 im 40 m Band. Die 71. Harmonische liegt etwas unterhalb von 7,1 MHz und zwar um ca. 300 Hz. Das liegt daran, dass die Pulswiederholfrequenz des Generators nicht ganz exakt auf 100 kHz eingestellt ist, sondern etwas mehr als 4 Hz unter 100 kHz liegt. Die aus diesen Spektren ermittelten S-Pegel sind als gefüllte, blaue Quadrate in Bild 5 eingetragen. Im Kurzwellenbereich weichen diese Werte um einige dB von den berechneten Kurven ab.

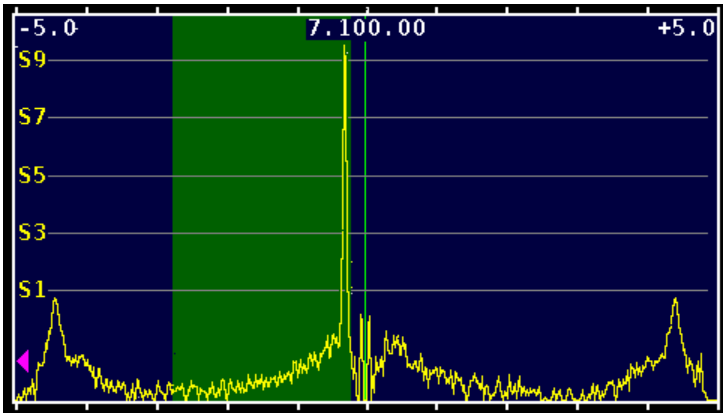

Bild 6: Anzeige des Spektrums auf dem PX3 im Bereich der 71. Harmonischen des Kammgenerators im 40 m-Band, die Frequenzkammlinie erreicht etwas mehr als S9

Fazit

Mit einem einfachen Frequenzkammgenerator lassen sich tausende Frequenzlinien bis in den UKW-Bereich erzeugen. Ihre Amplituden hängen von der zeitlichen Struktur der Pulse insbesondere ihrer Halbwerts- und Fußbreite ab. Die Pegel der Harmonischen zwischen der ersten und zweiten Nullstelle im Spektrum zeigen, dass die Pulse im Zeitbereich Anstiegs–zeiten < 1 ns haben. Die Experimente und Berechnungen verdeutlichen anschaulich den komplementären Zusammenhang zwischen den Signalen in Zeit- und Frequenzbereich.

26.2.2018, Reinhard, DF1RN

Literatur

[1] Hans Nussbaum, HF-Messungen für den Funkamateur, Teil 2, Verlag für Technik und Handwerk, 2007, S. 84-86
[2] O. Zinke, H. Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag, 1965, S. 501 ff.