

# Empfangen mit kleinen aktiven Breitbandschleifen im NDB-Band (250 - 500 KHz)

Receiving with wideband small active loops in NDB band (250 to 500 KHz)

Chavdar Levkov, LZ1AQ Rev. 1.2. Mai 2015

Der Zweck dieser Arbeit ist es, die Möglichkeit zu analysieren, kleine Breitbandschleifen als sehr empfindlichen Sensor zu verwenden, dessen Grundrauschen nur durch das atmosphärische Rauschen im NDB-Band (250 - 500 KHz) begrenzt wird. Der Leser muß frühere Artikel über breite und kleine Schleifen lesen, um deren Verhalten zu verstehen [1], [2], [3], [4].

## 1. Der Common-Base-Verstärker (CB-Verstärker) erhöht das Rauschen, wenn die Schleifenimpedanz klein wird.

Der Common-Base-Balanced-Verstärker (CB-Verstärker), wie in [1], [6] beschrieben, wird als Breitbandverstärker für kleine Loop-Antennen verwendet. Er hat ein typisches Ausgangsrauschspektrum, wie in Abb.1 gezeigt (gelbe Kurve). Es ist ersichtlich, daß das Rauschen in dem Bereich unter 1 MHz, in dem sich das NDB-Band (Non Directional Beacon) befindet, erheblich zunimmt. Beachten Sie, daß der FET-Eingangsverstärker für den elektrischen Feldsensor (kleiner Dipol) von AAA-1 ein viel geringeres Ausgangsrauschen aufweist und dieses Phänomen fast nicht existiert (AAA-1 hat zwei Verstärker - für kleine Schleife und kleinen Dipol). Mit LTspice [7] wird eine Rauschmodellierung durchgeführt, und das Ausgangsrauschdiagramm ist in Abb. 2 dargestellt. Es wird für verschiedene Schleifeninduktivitäten berechnet.

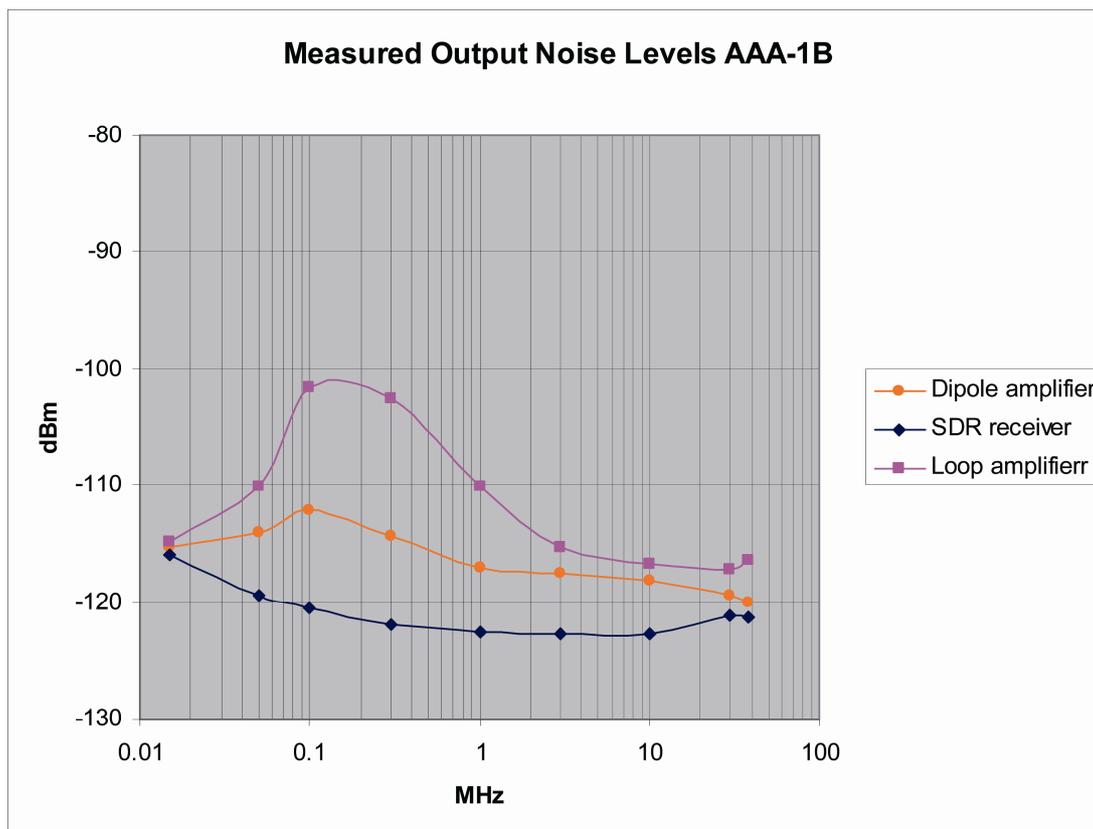


Abb. 1 Ausgangsrauschpegel des aktiven Antennenverstärkers (AAA-1B), gemessen bei 1 kHz Bandbreite (BW) ohne Antenne. Der Schleifenverstärker wird mit einer an den Eingang angeschlossenen Schleifeninduktivität von 2,4  $\mu$ H gemessen. Der Dipolverstärker wird mit einer äquivalenten Dipolkapazität von 10 pF gemessen. Der äquivalente Eingangsräuschpegel eines SD-Empfängers mit direkter Abtastung wird zum Vergleich angegeben. Normalerweise haben der kommerzielle RX und TRX ein ähnliches oder niedrigeres Grundrauschen. Eine praktische Regel ist, daß das Grundrauschen des Empfängers mindestens 6 dB unter dem Ausgangsgeräuschpegel des Antennenverstärkers liegen sollte.

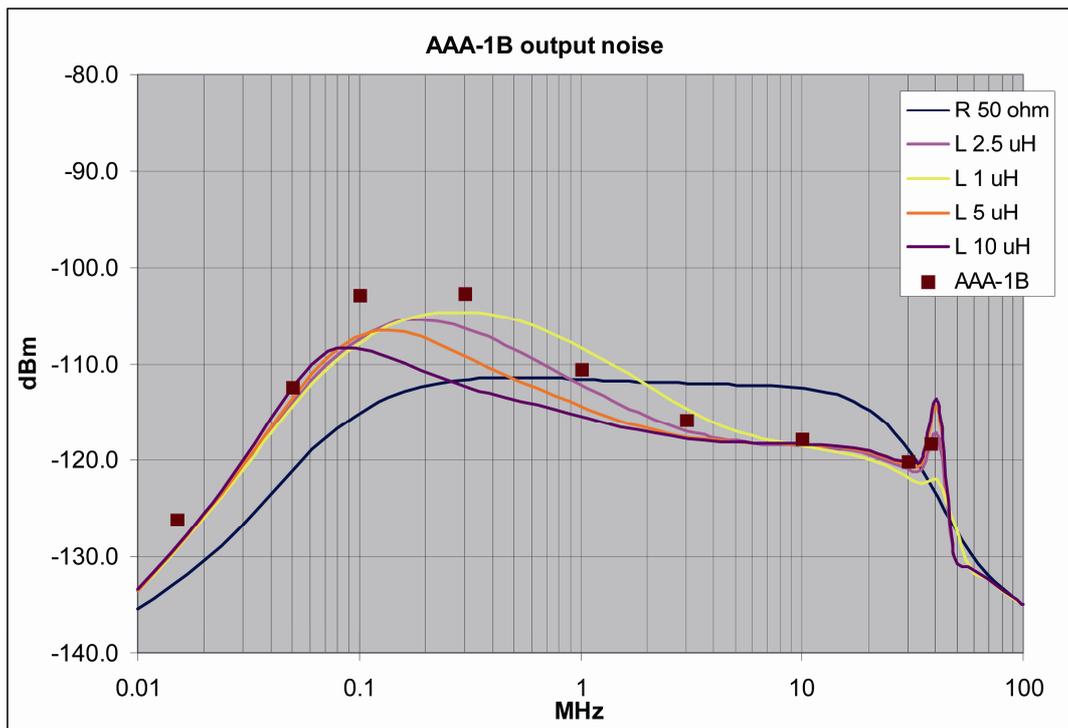
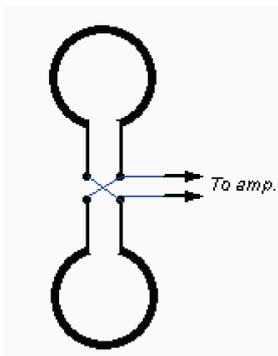


Abb. 2. AAA-1B-Ausgangsrauschen bei 1 kHz BW im Schleifenmodus. Der Parameter ist die Induktivität der Eingangsschleife. R 50 ist, wenn der Eingang mit 50 Ohm abgeschlossen ist. Die Quadrate sind Messwerte von AAA-1B für 2,5  $\mu\text{H}$ . Die Spitze im 40-MHz-Bereich stammt vom Eingangsunterdrückungsfilter für FM b und der abfallende Teil des Diagramms im Niederfrequenzbereich ist auf den Frequenzgang des Ausgangstransformators zurückzuführen (in [1] als L4.L5, L6 bezeichnet). Hinweis: Der im kommerziellen Kit AAA -1 verwendete Breitband-Ausgangstransformator ist mit höherer Induktivität zur Verbesserung des LF-Empfangs - Ringkern mit  $\mu = 4000$  und 10 Windungen Trifilarwicklungen mit jeweils  $L = 180 \mu\text{H}$ .

Wie zu sehen ist, wird die Rauschspitze auf niedrigere Frequenzen verschoben, wenn die Schleifeninduktivität höher wird. Der Schleifenimpuls wirkt als negative Rückkopplung für die interne Rauschquelle des Emitter-Basis-Übergangs der Eingangstransistoren des Verstärkers. Wenn die Eingangsimpedanz sehr niedrig wird, nimmt die Verstärkung der Schaltung für diese interne Rauschquelle zu. Die Messungen des Ausgangsrauschens des Verstärkers der kommerziellen Version AAA-1B [6] sind ebenfalls gezeigt und stimmen gut mit dem Modell überein - Abb. 2.

## 2. Gekreuzte koplanare (CC) Schleifen haben keine Spannung zu einer einzelnen Schleife unterhalb der Grenzfrequenz.

Wenn wir eine gute Empfindlichkeit mit Breitband-Loop haben wollen, sollten wir das Verhältnis  $M = A / L$  erhöhen, wobei A die Schleifenfläche und L die schleifenäquivalente Induktivität am Schleifenanschluß s ist [2], [3]. Der M [ $\mu\text{A} / \text{pT}$ ] -Faktor ist ein zuverlässiges Maß für die Schleifenempfindlichkeit gegenüber einem elektromagnetischen Feld, wenn er mit einem Verstärker mit niedriger Eingangsimpedanz R in geladen wird. Die Breitbandschleife arbeitet fast im



Kurzschlußmodus und je geringer ihre Induktivität ist, desto höher ist der Schleifenstrom. Eine der Methoden zur Erhöhung dieses Verhältnisses ist die Verwendung einer Parallelschaltung von Schleifen, wodurch die Schleifenfläche vergrößert, aber die Induktivität verringert wird. Die effektivste Methode ist die sogenannte gekreuzte koplanare (CC) Schleifenverbindung [2], Abb. 3.

Abb. 3 Typische Parallelschaltung von zwei Einwindungs-Loops im gekreuzten koplanaren (CC) Schema zur Reduzierung der äquivalenten Induktivität. Die Schleifen müssen in einer Ebene liegen. Die äquivalente Schleifeninduktivität ist die Hälfte der Induktivität einer einzelnen Schleife und die Fläche ist doppelt so groß.

Für Breitbandschleifen gibt es eine Grenzfrequenz  $f_{\text{niedrig}}$

$$f_{\text{niedrig}} = R_{\text{in}} / (2\pi L_e)$$

Unterhalb dieser Frequenz wird der Schleifenstrom hauptsächlich aus  $R_{\text{in}}$  und dem Schleifenbereich A und nicht aus der Schleifeninduktivität  $L_e$  bestimmt, und der Frequenzgang der Schleife ist nicht mehr flach. Dies bedeutet nicht, daß die Schleife nicht funktioniert, nur der Frequenzgang wird nicht flach sein, sondern mit einem Abfall von 6 dB / Oktave. Die CC - Verbindung der Schleifen ist nur dann wirksam, wenn die Empfangsfrequenz über  $f_{\text{niedrig}}$  liegt. Unterhalb von  $f_{\text{low}}$  liefern die CC-Schleifen einen geringeren Strom als eine einzelne Schleife mit derselben Fläche.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel, in dem zwei CC-Schleifen mit gleicher Fläche verglichen werden. Die Auftragung des Stromverhältnisses zwischen diesen Schleifen als Funktion der Frequenz ist in Abb. 4b gezeigt. Oberhalb des Tiefs sind die CC-Schleifen besser und erreichen einen um 3,5 dB höheren Strom. Unterhalb dieser Frequenz wird die einzelne Schleife jedoch überlegen und erreicht bei sehr niedrigen Frequenzen 6 dB. Der Grund ist, daß, wenn die induktive Impedanz sehr niedrig wird, ein Teil des Stroms zwischen den beiden CC-Schleifen zu fließen beginnt, anstatt in den Lastwiderstand R zu fließen.

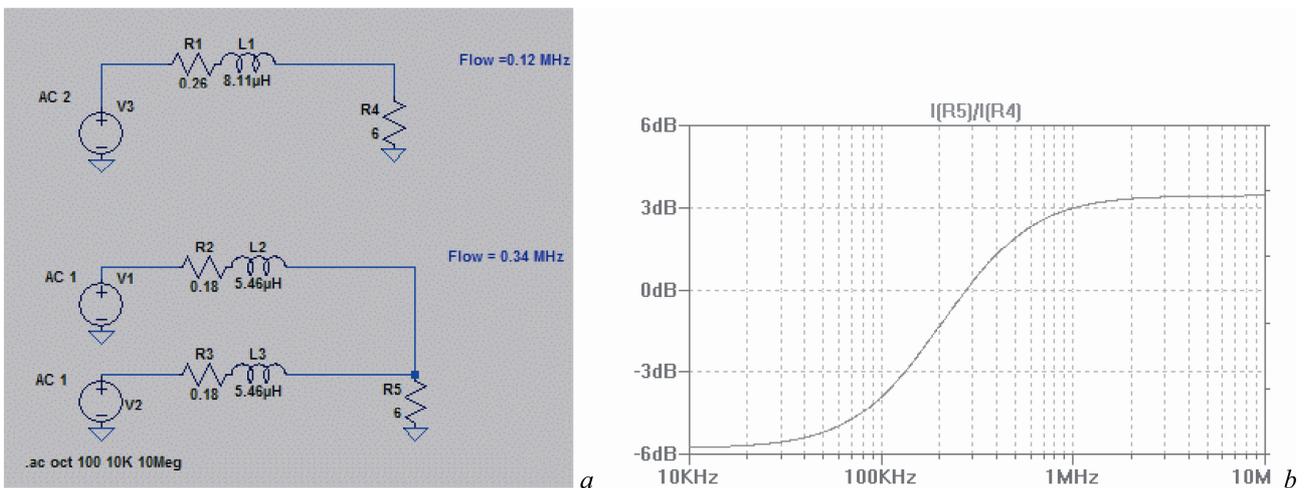


Abb. 4. Verlauf des Niederfrequenzgangs einer einzelnen (Quad 1,41 m Seite) und 2 CC (zwei Quads mit 1m Seite) Schleife mit gleicher Gesamtfläche und gleichem Drahtleiter (Cu,  $d = 1 \text{ mm}$ ). Das Stromverhältnis bei 6 Ohm Last wird angezeigt. Diese Last repräsentiert die Eingangsimpedanz eines symmetrischen CB-Verstärkers. Es ist zu beachten, daß die induzierte Spannung V3 doppelt so groß ist wie die Spannung V1 oder V2, da ihre Fläche zweimal größer ist als die Fläche jeder CC-Schleife.

### 3. Beispiel - CC-Schleife mit unzureichender Impedanz im LF-Bereich

Bei der Verwendung von Breitband-CC-Schleifen für das NDB-Band müssen die oben genannten Fakten berücksichtigt werden. Ein praktisches Beispiel: George Muha, N2XM [9] hat einige Experimente mit CB-Verstärkern [1] und Breitbandschleifen einschließlich 2 CC-Schleifen durchgeführt, um NDBs im Frequenzbereich von 200 bis 600 kHz zu empfangen. Er war mit der Leistung der CC-Schleife im Vergleich zu einer einzelnen Schleife nicht zufrieden. Die verwendeten Schleifen sind wie folgt:

Antenne 1: Einwindungs-Schleife mit 8 Fuß Durchmesser (2,44 m) und Induktivität  $L = 8,6 \text{ uH}$  aus Aluminiumrohr mit 9,5 mm Durchmesser. Die Fläche beträgt  $4,52 \text{ m}^2$ ,  $M = 0,54 \text{ uA / pT}$

Antenne 2: Zwei CC-Schleifen mit jeweils 1,22 m Durchmesser und einer Induktivität von  $3,8 \text{ uH}$  aus Aluminiumrohr mit 12,6 mm Durchmesser. Die Gesamtfläche beträgt  $2,26 \text{ m}^2$  und eine äquivalente Induktivität von  $1,9 \text{ uH}$ ,  $M = 0,6 \text{ uA / pT}$ . Berechnen wir das Grundrauschen der

Schleife bei einer Frequenz von 0,35 MHz in der Mitte des NDB-Bandes. Abb. 5 ist das Modell und Abb. 6 zeigt die Ergebnisse für den Schleifenstrom. Die relativen induzierten Spannungen vom Feld betragen 3,3 und 0,8 V und sind nur für Schleifenbereiche proportional. Die Eingangsimpedanz des Verstärkers beträgt 6 Ohm. Bei hohen Frequenzen sind die Schleifenströme identisch, da ihr M-Faktor nahezu gleich ist. Bei 0,35 MHz ist die einzelne 8- $\mu$ H-Schleife jedoch um mindestens 4 dB besser.

Nehmen wir nun den Einfluß des Verstärkers an. Gemäß dem Modell bei 0,35 MHz beträgt der Ausgangsrauschpegel 1,15  $\mu$ V bei 1 kHz BW für eine 1,8  $\mu$ H-Schleife (CC-Schleifen). Für eine 8,6- $\mu$ H-Schleife bei 0,35 MHz ist die Rauschspannung 0,56  $\mu$ V. Die Differenz beträgt 6,3 dB. Bei 0,35 MHz hat die aktive Einzelschleifenantenne also ein um 10,3 dB (4 + 6,3) niedrigeres Grundrauschen bezogen auf den Verstärkereingang im Vergleich zu einer 2-CC-Schleife, unabhängig davon, daß die CC-Schleife einen etwas höheren M-Faktor aufweist. Für den Hochfrequenzbereich (über 1 MHz) weisen diese beiden Schleifen eine nahezu identische Leistung auf. Die CC-Schleifen haben nur Vorteile für Frequenzen über  $f_{\text{niedrig}}$ .

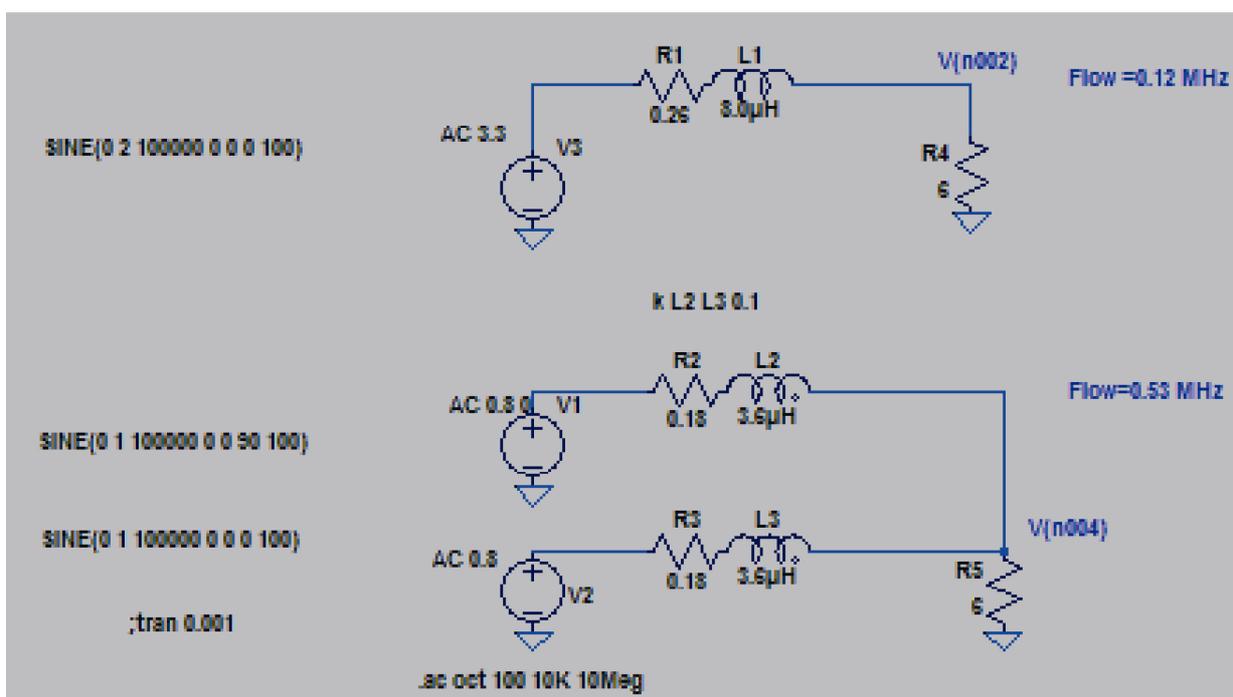


Abb.5. Äquivalenzschaltung.



Abb. 6. Frequenzgang des Schleifenstroms in einen Lastwiderstand von 6 Ohm. Die grüne Linie ist für eine einzelne 8-Zoll-Schleife und die blaue für eine CC-Schleife.

#### 4. Beispiel einer großen CC-Schleife für das NDB-Band

Ich bin kein NDB-Hörer und weiß nicht, wie hoch das übliche Grundrauschen bei diesen Frequenzen ist. Höchstwahrscheinlich N2XM groß 2,44 m Durchmesser. Eine einzelne Schleife hat eine ausreichende Empfindlichkeit und eine größere Schleife wird bei diesem Verstärkertyp nicht benötigt. Aber als Beispiel habe ich eine einfache große 2-CC-Drahtschleife berechnet (noch nicht getestet), die theoretisch 4,5 dB weniger Grundrauschen haben muß als N2XM 8 ft loop für den Fall, daß ein AAA-1 [6] oder ähnlicher [1] Verstärker verwendet wird. Die Antenne ist in Abb. 7 abgebildet und besteht aus 2 mm Kupferkabel. Es kann ein einzelner Mast verwendet werden (8 bis 10 m hoch).

Zwei Quad-Loops werden als CC-Loops mit jeweils 3 m Seite verwendet. Die Einzel-Quad-Loop-Induktivität beträgt  $19 \mu\text{H}$  und die äquivalente CC-Induktivität beträgt  $9,5 \mu\text{H}$  ( $X_L = 21 \text{ Ohm}$  bei  $0,35 \text{ MHz}$ ,  $f_{\text{low}} = 100 \text{ kHz}$ ,  $M = 0,95 \mu\text{A} / \text{pT}$ ). Hier kann der Vorteil der CC-Schleifenverbindung genutzt werden, da die CC-Schleifen bei diesen Frequenzen eine Impedanz von viel mehr als  $6 \text{ Ohm}$  haben. Diese Antenne hat das Muster einer kleinen Schleife mit viel höheren Frequenzen (bis zu  $30 \text{ MHz}$ ) im Vergleich zu einer einzelnen Schleife, wobei  $0,1$  Wellenlängenparameter die Obergrenze ist [2]. Eine zusätzliche orthogonale Schleife kann am selben Mast angebracht werden, um zwei Richtungen zu haben. Der Dynamikbereich des Verstärkers reicht wahrscheinlich aus, um den in einer so großen Schleife induzierten Signalen standzuhalten, aber es sind zusätzliche Messungen erforderlich, um dies zu beweisen.

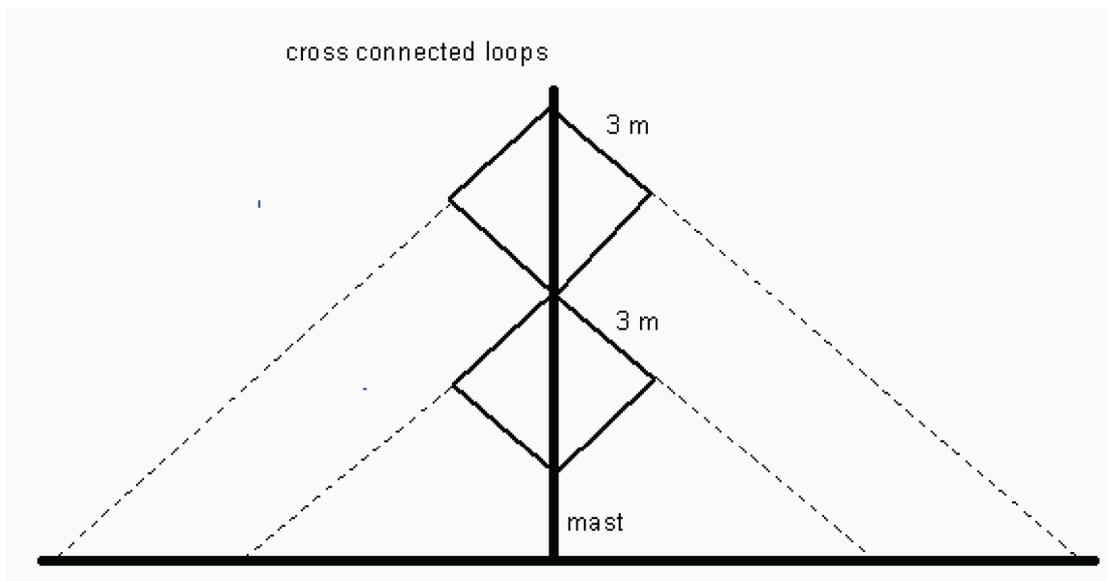


Abb. 7. Hochempfindliche große CC-Schleife für LF- und NDB-Empfang, hergestellt mit Draht an einem einzelnen Mast. Die gestrichelten Linien befestigen Seile.

#### 5. Vergleich von kleinen Schleifen und kleinen vertikalen Dipolen im NDB-Band

Mit dem Perseus DDC-Empfänger (Direct Digital Conversion) wurden zwei Aufnahmen an derselben Stelle und zu derselben Zeit im NDB-Band gemacht. Die Lage war ländlich, weit weg von städtischen Orten und die Stromversorgung erfolgte über Batterien. In östlicher bis  $3 \text{ km}$  Entfernung gab es keine Störquellen in der Nähe. Dieser Ort kann als elektromagnetisch extrem leise angenommen werden.

Der AAA-1-Verstärker wurde im Schleifen- (Fig. 8) und Dipolmodus (Fig. 9) verwendet. Die kleine Rahmenantenne besteht aus zwei kreisförmigen Schleifen mit einem Durchmesser von  $0,7 \text{ m}$ , im CC-Anschluss genau wie in Abb. 3.6, Abb. 3.7 des Antennenteils des Technischen Handbuchs von AAA-1 [6] beschrieben. Die gemessene Induktivität jeder Schleife beträgt  $2,2 \mu\text{H}$  und die CC-Impedanz beträgt  $1,1 \mu\text{H}$ . ( $M = 0,38 \mu\text{A} / \text{pT}$ ,  $f_{\text{niedrig}} = 0,96 \text{ MHz}$ ). Die Dipolantenne besteht aus denselben Schleifen, die als Arme eines vertikalen Dipols fungieren und einen „starken“ Dipol mit

zwei Armen von 0,7 m bilden. (Dieser Modus ist mit dem AAA-1 als Verstärker möglich, wenn sich J1a und J1b in EIN-Position befinden). Das Grundrauschen (Ausgangsrauschen) dieses Aufbaus ohne Antenne, jedoch mit Ersatzinduktivität, beträgt ungefähr -101 dBm bei 1 kHz BW des Schleifenverstärkers und -113 dBm für den Dipolverstärker, wie in Abb. 3 gezeigt [6]. Das gemessene S / N-Verhältnis des Dipolmodus ist mit 4 bis 5 dB im Vergleich zum Schleifenmodus besser (Abb. 8,9).

Beachten Sie, daß im Loop-Modus das Bandrauschen bei 1 kHz BW (auf dem Perseus S-Meter) -10 1,2 dBm beträgt, was fast dem Ausgangsrauschen des Verstärkers mit Ersatzinduktivität am Eingang entspricht. Das Rauschen für den Dipolmodus beträgt -104,9 dBm, was viel höher ist als das Ausgangsrauschen des Dipolverstärkers (mit einer Ersatzkapazität von 15 pF am Eingang), das -113 dBm beträgt. Offensichtlich ist der Empfang im Schleifenmodus durch das interne Rauschen des Verstärkers begrenzt. Der Empfang mit dem Dipol ist auch bei diesem sehr kurzen Dipol nur durch das Umgebungsgeräusch begrenzt.

Diese beiden CC-Schleifen sind für diese Frequenz klein. Es werden größere Schleifen mit besserem M-Faktor [3] und niedrigerem f-Wert benötigt. Die Einschränkungen liegen im schwachen Schleifenstrom und auch im erhöhten Verstärkerrauschen aufgrund der niedrigen Impedanz der Schleifen bei diesen Frequenzen (2 Ohm bei 0,3 MHz). Dieser Vergleich zwischen elektrischen und magnetischen Sensoren wurde in einer extrem ruhigen elektromagnetischen Umgebung durchgeführt.

Unter städtischen Bedingungen ist es sehr schwierig, den elektrischen Dipolmodus so leise zu machen. Das durch das Kabel kommende leitungsgebundene Rauschen ist die Hauptquelle [8] und es ist sehr schwierig, es ohne gute HF-Masse zu entfernen. Unter städtischen Bedingungen liefert der Loop-Modus normalerweise bessere S / N-Verhältnisse.

## 6. Schlußfolgerungen

- Wenn ein in [1], [6]] beschriebener Verstärker für NDB verwendet wird und wir eine höhere Empfindlichkeit benötigen, müssen die Schleifengröße und die Induktivität größer sein (6 - 10  $\mu\text{H}$ ), um das oben erwähnte Rauschen zu vermeiden. Die Impedanz der CC-Schleifen muß höher sein als die Eingangsimpedanz des Verstärkers bei der niedrigsten interessierenden Frequenz, um die Vorteile einer CC-Schleife verwenden zu können. Wenn diese Anforderung nicht erfüllt ist, ergibt eine einzelne Schleife mit derselben Gesamtfläche ein besseres Ergebnis.
- Große CC-Schleifen können verwendet werden, es ist jedoch ein Kenntnis des lokalen Grundrauschens erforderlich, um die Größe der Schleife nicht zu überdimensionieren. Es kann vorkommen, daß bei bescheidenen Loops für bestimmte Standorte ein akzeptables Grundrauschen auftritt. Meine 2-CC-Schleife (jede Schleife mit 0,96 m Durchmesser  $L = 1,4 \mu\text{H}$ ,  $M = 0,53$ ,  $f_{\text{low}} = 0,71 \text{ MHz}$  AAA-1B Ampere) hat ein Grundrauschen von fast 10 dB gegenüber dem üblichen lokalen (atmosphärischen und künstlicher Geräuschpegel, daher gibt es für mich keinen Grund, eine größere Schleife zu bauen.
- Es gibt einen einfachen Test, der von jedem ernsthaften NDB-Hörer durchgeführt werden muß. Messen Sie das Grundrauschen Ihres Verstärkers als Funktion der Frequenz, indem Sie die Schleifeninduktivität durch die Induktivität durch denselben Wert ersetzen. Schließen Sie dann die Loop an den Verstärkereingang an und messen Sie erneut den Grundrauschpegel (bei gleicher Bandbreite!). Wenn der Anstieg über 6 dB liegt, können wir davon ausgehen, daß die Schleifenempfindlichkeit ausreichend ist. Dieses Experiment ist nicht so einfach durchzuführen, da bei den Messungen des Verstärkers kein Ise Floor ohne externen Rauschbeitrag durchgeführt werden muß. Die Ersatzinduktivität muß auf den Ringkern gewickelt sein, um keine externen Signale aufzunehmen. Für den Empfänger müssen DDC-SDR-Funkgeräte verwendet werden. Sie haben einen stabilen und flachen Frequenzgang in dem interessierenden Bereich und die Software ermöglicht es, die Meßbandbreite genau

einzustellen. Die zuverlässigsten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Stromversorgung über Batterien (einschließlich Notebook) erfolgt und an einem Ort durchgeführt wird, an dem keine elektromagnetischen Geräuschquellen vorhanden sind (z. B. außerhalb des Hauses).

Speichern Sie das Grundrauschen des Verstärkers als Referenz, und Sie können jederzeit das atmosphärische Rauschen messen und feststellen, ob Ihr Antennensystem durch das interne Grundrauschen oder nur durch das atmosphärische Rauschen begrenzt ist (Benutzer von AAA-1 können das in Abb. 1 angegebene Rauschdiagramm verwenden).

Die Verwendung von Breitbandschleifen für den Niederfrequenzbereich ist eine Herausforderung. Eine sorgfältige Planung ist erforderlich. Ein grundlegendes Problem gibt es - die induzierte Schleifenspannung nimmt linear mit der Frequenz ab. Vergleichen Sie es mit einem Spannungssensor (kleiner Dipol oder Peitsche), bei dem die induzierte Spannung nicht von der Frequenz abhängt.

Dies ist der Hauptgrund, warum es viel einfacher ist, gute Ergebnisse im LF-Bereich mit einem FET-Spannungsverstärker und einer kurzen Peitsche zu erzielen. Die Schleifen haben jedoch einen wichtigen Vorteil: Für diese Frequenzen, bei denen vertikale Polarisation vorherrscht, haben die Schleifen eine gute Richtwirkung, die mit einem omnidirektionalen Spannungssensor nicht erreicht werden kann.



Abb. 8. NDB-Bandaufzeichnung mit 2 CC-Rahmenantennen.



Abb. 9. NDB-Bandaufzeichnung mit kleiner vertikaler Dipolantenne.

Sofia, März 2015.

#### Links

- [1]Levkov.Ch. LZ1AQ, Very Weak Signal Reception with Small Magnetic Loop Antenna, 2010  
[http://www.lz1aq.signacor.com/docs/fa-eng/Weak\\_signals-mag\\_loop\\_engl.htm](http://www.lz1aq.signacor.com/docs/fa-eng/Weak_signals-mag_loop_engl.htm)
- [2] Levkov.Ch. LZ1AQ, Wideband Active Small Magnetic Loop Antenna, 2011  
<http://www.lz1aq.signacor.com/docs/wsm1/wideband-active-sm-loop-antenna.htm>
- [3]Levkov.Ch. LZ1AQ, Experimental Comparison of Small Wideband Magnetic Loops, 2013  
<http://www.lz1aq.signacor.com/docs/experimental-comparison-v10.pdf>
- [4] Levkov.Ch. LZ1AQ,Receiving Phased Array with Small Electric or Magnetic Active Wideband Elements. Experimental Performance Evaluation. 2013  
[http://www.lz1aq.signacor.com/docs/phased-array/2-ele\\_phased\\_array11.pdf](http://www.lz1aq.signacor.com/docs/phased-array/2-ele_phased_array11.pdf)
- [5] Spreadsheet to Calculate the Parameters of SmallRX Loop.2012  
<http://www.lz1aq.signacor.com/docs/w-loop-calc-v10.xls>
- [6] Active Antenna Kit Technical Documentation. <http://www.active-antenna.eu>,  
<http://active-antenna.eu/amplifier-kit/technical-documentation/>  
[http://active-antenna.eu/tech-docs/1\\_ActiveAA\\_DandS\\_20.pdf](http://active-antenna.eu/tech-docs/1_ActiveAA_DandS_20.pdf)  
[http://active-antenna.eu/tech-docs/2\\_ActiveAA\\_Mount\\_20.pdf](http://active-antenna.eu/tech-docs/2_ActiveAA_Mount_20.pdf)  
[http://active-antenna.eu/tech-docs/4\\_ActiveAA\\_QA\\_21.pdf](http://active-antenna.eu/tech-docs/4_ActiveAA_QA_21.pdf)  
[http://www.active-antenna.eu/tech-docs/3\\_ActiveAA\\_Antena\\_11.pdf](http://www.active-antenna.eu/tech-docs/3_ActiveAA_Antena_11.pdf)
- [7] LTspice  
<http://www.linear.com/designtools/software/>
- [8]Levkov.Ch. LZ1AQ, Reducing the Noise in Dipole Mode with Common Mode Filter. 2014  
<http://active-antenna.eu/tech-docs/comm-filter-ftp-10.pdf>
- [9] George Muha, N2XM. Personal communication. 2015