



Fachhochschule Kaiserslautern

Felix Schad
Prof. Dr. Andreas Steil

Abschlussbericht

Untersuchung zur
Generierung und Mischung von
DRM+ - Signalen
zur UKW-Senderansteuerung

3. Januar 2007

Zusammenfassung

Dieser Bericht dokumentiert die Ergebnisse der Arbeiten zur „Untersuchung zur Generierung und Mischung von DRM+ - Signalen zur UKW-Senderansteuerung“.

Kapitel 1 stellt die Aufgaben und Ziele der Untersuchung vor. In Kapitel 2 wird das geplante System vorgestellt. Der Status der dazugehörigen Hardwareaufbauten zum Abschluss der Untersuchung ist in Kapitel 3 festgehalten. Das Zusammenarbeiten der in Kap. 3 beschriebenen Aufbauten sowie Empfangsprognosen sind in Kapitel 4 dokumentiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
1.1	Arbeitspaket 1	4
1.2	Arbeitspaket 2	4
2	Systementwurf	5
3	Hardwareaufbauten	8
3.1	Antialiasingfilter	8
3.2	I/Q-Modulator	8
3.3	Frequenzerzeugung	10
4	Zusammenspiel der vorgestellten Module	14
4.1	NiDAQ und Taktfrequenzgeber	14
4.2	Mischung der DRM-Signale	14
4.3	Empfang der DRM30-Signale	17
5	Literaturverzeichnis	21

1 Aufgabenstellung

Dieser Abschlussbericht bezieht sich auf die folgenden im „Werksvertrag zur Diplomarbeit: Untersuchung zur Generierung und Mischung von DRM+-Signalen“ vom 15.5.2006 genannten Arbeitspakete und Ziele:

1.1 Arbeitspaket 1

Erweiterung des an der FH Kaiserslautern bereits entwickelten Software-Prototypen um die Funktionalität eines geeigneten Resamplings.

Aufgrund einer ungeplanten Überschneidung hat Hr. Michael Feilen kurze Zeit nach dem Beginn dieser Diplomarbeit diese Funktion in den Software-Prototypen beinahe vollständig integriert. Diese Überschneidung macht ca. einen Monat Vorarbeit meinersats zunichte. Dafür konnte jedoch entsprechend früher mit der Bearbeitung von Arbeitspaket 2 begonnen werden.

1.2 Arbeitspaket 2

Die Aufgabenstellung des Arbeitspaketes 2 umfasste den Entwurf, Aufbau, Test und Inbetriebnahme eines Quadratur-Direktmischers mit handelsüblichen Bauteilen. Gefordert ist ein Quadratur-Direktmischer inklusive eines an die Samplingfrequenz des D/A-Wandlers angepassten Aliasingfilters, den eigentlichen Quadraturmischer sowie geeignete Schnittstellen inkl. der nötigen Anpassungen für die I/Q-Eingänge. Entwurf, Aufbau, Test und Inbetriebnahme eines Synthesizers zur Ansteuerung des Quadratur-Direktmischers mit dem hochfrequenten Trägersignal bei gleichzeitiger Erzeugung des Abtasttaktes der D/A-Wandlerkarte mit handelsüblichen Bauteilen. Der Synthesizer soll ein möglichst geringes Phasenrauschen aufweisen und über geeignete Schnittstellen von außen steuerbar sein.

2 Systementwurf

Das Systemkonzept ist im Vergleich zu dem Zwischenbericht unverändert geblieben. Die bereits dort genannten Forderungen

- möglichst einfacher Aufbau
- möglichst durchgehend homogener Aufbau zur Senderansteuerung im 11-Meter (DRM30) und UKW-Band (DRM+)
- Realisierung mit handelsüblichen Bauteilen
- möglichst direktes und einfaches Zusammenspiel mit bereits vorhandenen Komponenten des Vorgängerprojekts „Objektorientierte Implementierung eines Sendesystems für Digital Radio Mondiale“[Fei05].

sind erfüllt worden.

Grobe Systemspezifikationen, die sich entweder aus dem Sendeaufbau ergeben bzw. aus einzuhaltenen Bedingungen zu beachten sind, werden in der nachfolgenden Erläuterung angegeben.

Abb. 2.1 stellt das Gesamtschema des Sendesystems dar. Abb. 2.2 zeigt das vereinfachte Schema für ein einziges Frequenzband. Es besteht aus folgenden Systembausteinen:

1. Analoge Audioquelle; liefert Eingabedaten für den Softwareteil des DRM-Senders
2. Analog-/Digitalwandlung des Eingangssignals (z.B. via Soundkarte)
3. Generierung des DRM(30,+)-Datenstroms gem. ETSI ES 201 980 bzw. den experimentellen Adaptionen für DRM+([Ber05],[SKL⁺06])im Basisband
4. Ausgabe des DRM(30,+)-Datenstroms über eine NiDAQ Digital-/Analogwandlerkarte (Details im Anhang)
5. Tiefpassfilterung zur Elimination der spektralen Replika des Basisbandsignals (Antialiasing); eine möglichst verzerrungsfreie Übertragung durch konstante Gruppenlaufzeit zur Wahrung der zeitlichen / spektralen Eigenschaften des Basisbandsignals ist anzustreben
6. Direkte Aufwärtsmischung der Inphasal-/Quadraturkomponenten zur Trägerfrequenz; Kernkomponente von (AP2)

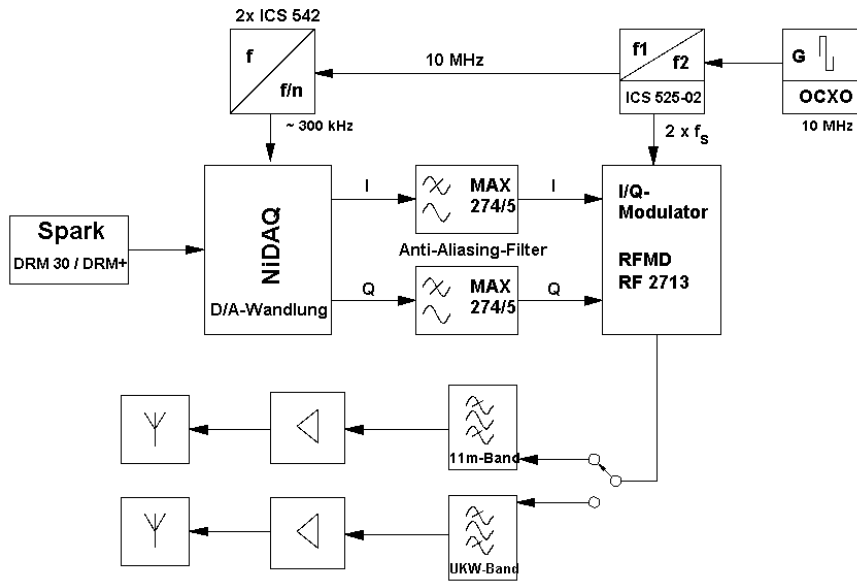


Abbildung 2.1: Darstellung des Sendesystems mit Umschaltung des Frequenzbereichs

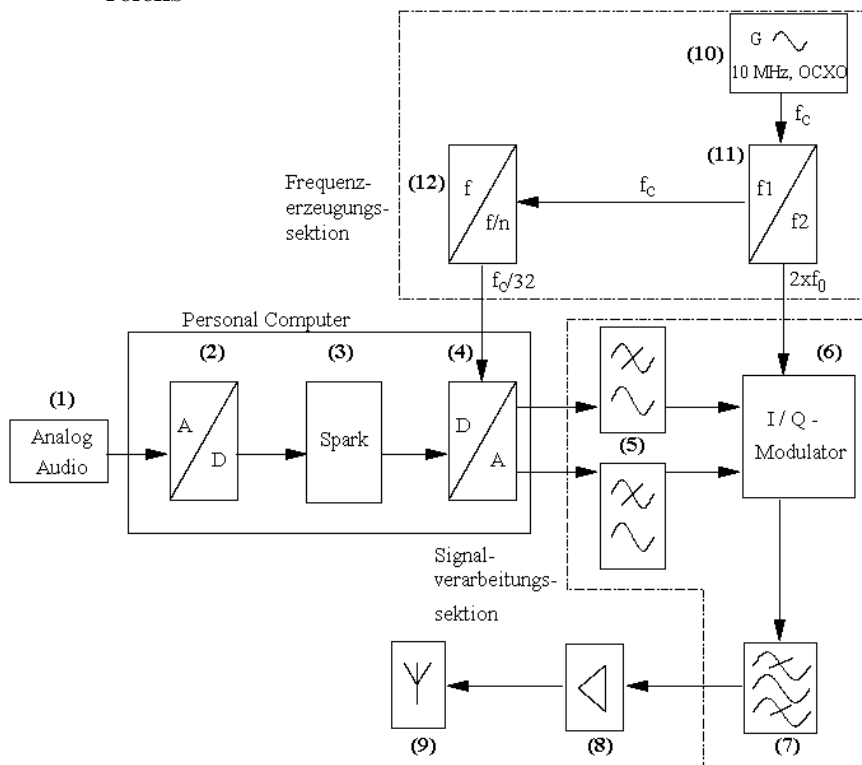


Abbildung 2.2: Darstellung des Sendesystems zur Erläuterung der einzelnen Blöcke

7. Filterung von Intermodulationsprodukten. Da diese spektral weit genug von der Trägerfrequenz sowie der Sendebandgrenzen entfernt sind wird erwartet, daß ein einfaches, breitbandiges LC-Filter an dieser Stelle ausreichend ist.
8. Treiberstufe und Leistungsendstufe; das hochfrequente Signal wird an die erforderlichen Pegel der Leistungsendstufe angepasst und zur Erreichung der gewünschten Sendeleistung weiter verstärkt
9. Sendeantenne
10. Oszillator zur Erzeugung der Systembasisfrequenz; ein möglichst geringes Phasenrauschen an dieser Stelle (≤ -110 dBc) liefert den ersten Beitrag zu einem möglichst niedrigem Gesamtphasenrauschen gemäß Aufgabenstellung von (AP3)
11. Umsetzung der Basisfrequenz auf eine möglichst frei wählbare Sendefrequenz; gleichzeitig: Signalaufbereitung zur Ansteuerung des Frequenzteilers (12)
12. Frequenzteilung der Systembasisfrequenz zur Nutzung als Abtastfrequenz der D/A-Wandlerkarte (4). Der erwünschte Effekt im Gegensatz zur Verwendung eines handelsüblichen, generischen Rechteckgenerators ist die weitere Verbesserung des Signal-zu-Rauschverhältnisses (S/N) der DRM-Basisbandsignale am Ausgang von Komponente (4)

3 Hardwareaufbauten

Dieser Abschnitt beschreibt die im Hinblick auf die Anforderungen aus Kap. 1 und Kap. 2 entworfenen Module des Sendesystems.

3.1 Antialiasingfilter (5)

Dieses Filter ist der D/A-Wandlerkarte NiDAQ nachgeschaltet. Es unterdrückt die durch die Analogisierung der digitalen Ausgangssignale entstehenden spektralen Signalreplika derart, dass nur noch das relevante Basisbandspektrum der DRM-Signale dem nachfolgenden Modulator eingespeist wird. Die Forderung des Systementwurfs einer möglichst verzerrungsfreien Filterung wird durch den Filtertyp ‚Bessel‘ realisiert. Desweiteren wird das durch die Analogisierung leicht treppenförmige Ausgangssignal des D/A-Wandlers geglättet. Das Filter ist mit einem aktiven RC-Filter auf Basis des integrierten Filterbausteins MAX274 bei Erfüllung der Anforderungen aufgebaut worden. Die wichtigsten gemessenen Eigenschaften des Aufbaus sind in Abb. 3.1 dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, ist die Umsetzung der Bessel’schen Filtercharakteristik gelungen. Der hierbei entscheidende Aspekt der Erzeugung eines linearen Phasengangs ist deutlich erkennbar voll erfüllt worden.

Das Filter befindet sich momentan noch auf einer Lochrasterplatine und beinhaltet gleichzeitig eine Stufe zur Einstellung der Modulatoreingangsspegel und Impedanzanpassung. Ein dazugehöriges Leiterplattenlayout wurde erstellt. Die Filtercharakteristik des endgültigen Entwurfs wurde gegenüber Abb. 3.1 den vorliegenden Gegebenheiten im Hinblick auf ein schmaleres Durchlassband angepasst worden. Details hierzu sind [Sch06] zu entnehmen.

3.2 I/Q-Modulator (6)

Diese Stufe erfüllt zwei Aspekte: einerseits werden die Basisbandsignale der Inphasal- und Quadraturkomponente durch die Mischung mit dem hochfrequenten Synthesizerausgangssignal auf die gewünschte Sendefrequenz gebracht, andererseits werden die hochfrequenten Signale derart miteinander addiert, dass der letzte notwendige Schritt zum Abschluss der Modulation vollzogen wird. Dies bedeutet, dass das zur digitalen Modulation notwendige Signal

$$x(t) = x_I(t) \sin(2\pi f_0 t) + x_Q(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

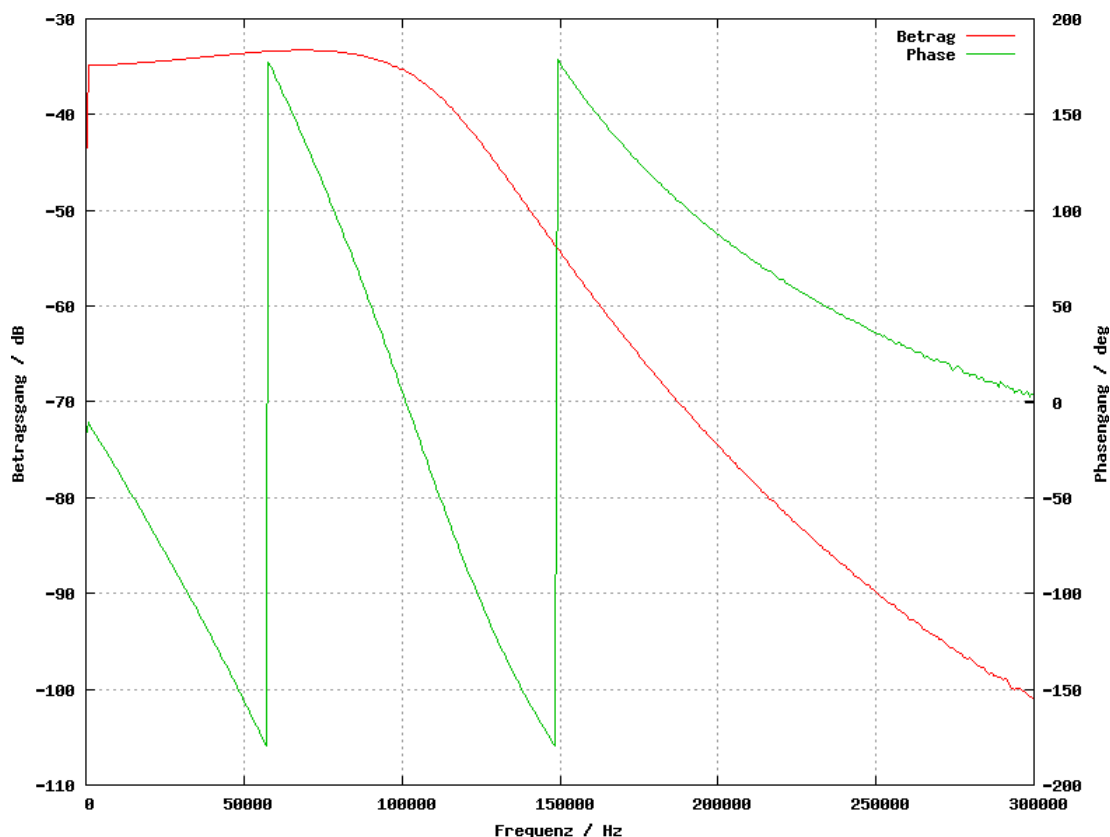


Abbildung 3.1: Betrags- und Phasenverlauf des Antialiasingfilters, Referenzeingangsspegel: -30 dBm

aus den Basisbandsignalen $x_I(t)$ sowie $x_Q(t)$ erzeugt wird. Der Modulator wird mit dem doppelten der gewünschten Sendefrequenz angesteuert. Modulatorintern wird diese Frequenz halbiert. Dieses Verfahren spaltet das Signal der doppelten Sendefrequenz in zwei Signale auf. Diese schwingen jeweils orthogonal zueinander auf der Sendefrequenz. Auf diese Art entstehen die in der oben angeführten Gleichung Sinus- bzw. Cosinussignale. Im Anschluss daran werden die Basisbandsignale in zwei getrennten Mischerzellen mit dem Sinus- bzw. Cosinussignal multipliziert und sind daraufhin als hochfrequentes Signal mit der Mitten- bzw. Trägerfrequenz f_0 verfügbar. Durch Zusammenschaltung dieser Signale wird die oben geforderte Addition der beiden Signalanteile erreicht.

Die beschriebene Funktionalität wird durch Einsatz des Quadraturmodulator RF2713 erreicht. Die im Zwischenbericht gezeigte Platine wurde in Betrieb genommen. Die Erwartungen an den Baustein sind erfüllt worden. Die verfügbare Ausgangsleistung ist relativ gering, was mehrere Folgeverstärkerstufen nötig macht, aber notwendig um eine verzerrungsarme Signalerzeugung zu garantieren. Die in Abschnitt 3.1 erwähnte Pegelanpassung minimiert störende Intermodulationsprodukte und sorgt somit für eine hohe Qualität des Mischprodukts.

Da die Trägerfrequenz keine Information transportiert und somit auch zum Empfang nicht notwendig ist, ist eine Unterdrückung dieser wünschenswert, um

den Energiebedarf der Sendekette zu reduzieren. Dazu wurden verschiedene Maßnahmen erfolgreich appliziert. Die momentan verwendete Platine ist in Abb. 3.2 dargestellt.

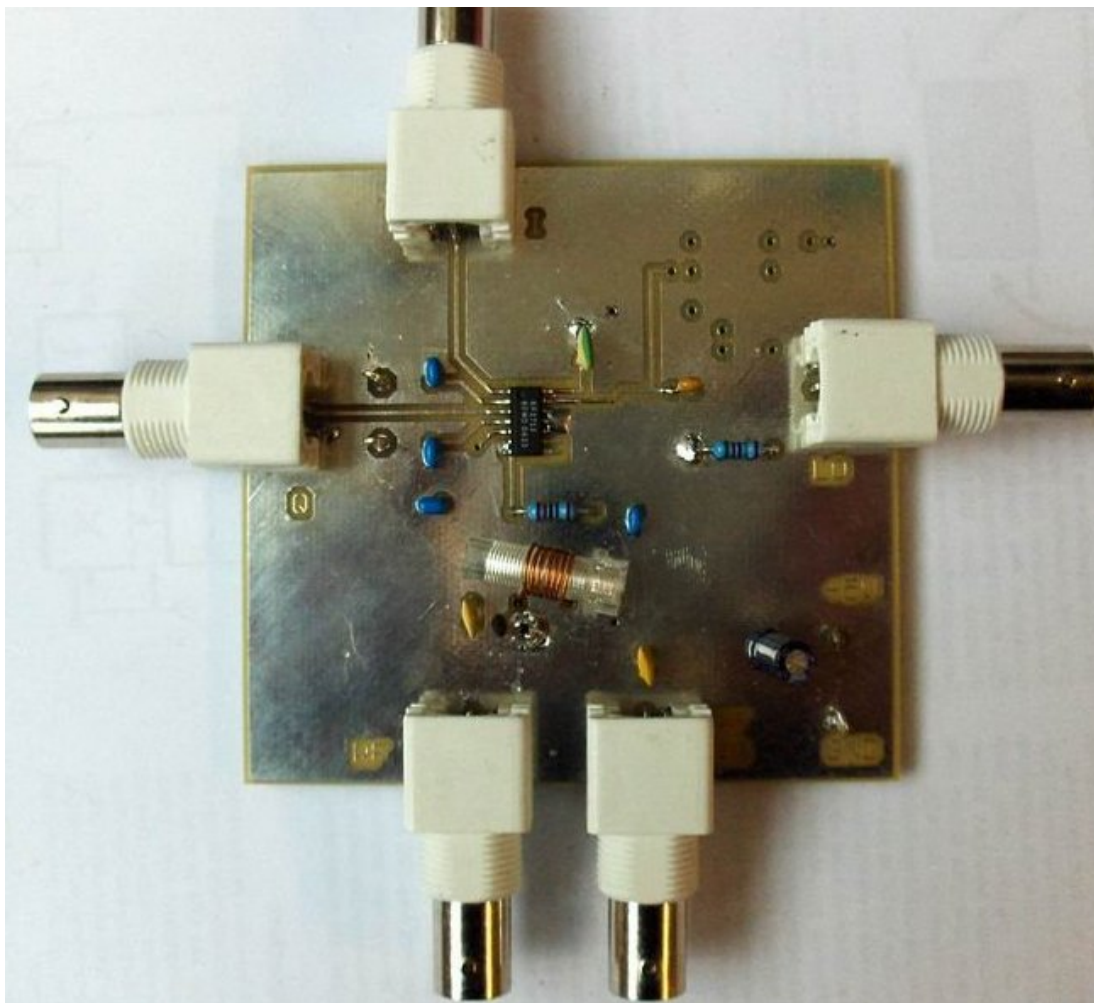


Abbildung 3.2: Mischerplatine des DRM-Senders

3.3 Frequenzerzeugung (10-12)

Die Frequenzerzeugung wird gemäß den Anforderungen durch einen Synthesizer vorgenommen. Dieser leitet aus einer hochstabilen Referenzschwingung mittels einer PLL¹ eine einstellbare Frequenz ab. Gleichzeitig wird durch eine Teilung der Referenzfrequenz die Taktung der D/A-Wandlerkarte erzeugt.

Der OCXO² (10) wird an den Synthesizerbaustein ICS525-02 angebunden. Mittels DIP-Schaltern kann die gewünschte Ausgangsfrequenz selektiert werden. Diese ist – wie in Abschnitt 3.2 erläutert – das Doppelte der Sendefrequenz. Nach

¹Phase Locked Loop

²Oven Controlled Oscillator

einer Pegelanpassung wird das in dieser Sektion erzeugte Signal der Modulatorstufe zugeführt. Darüberhinaus stellt der Baustein die OCXO-Referenzfrequenz von 10 MHz als Rechtecksignal zur Verfügung. Damit werden zwei digitale Frequenzteiler des Type ICS 542 angesteuert, die den hochstabilen Abtasttakt für den D/A-Wandler liefern. Die bereits im Zwischenbericht erwähnte und in Abb. 3.3) dargestellte Testplatine wurde entsprechend des in Kap. 2 dargestellten Schemas der Frequenzerzeugungssektion entworfen, durch die Leiterplattenfertigung der TU Kaiserslautern angefertigt und nach der Bestückung erfolgreich in Betrieb genommen.

Die Messbilder 3.4 bis 3.6 zeigen die notwendigen Ausgangssignale zur Sendung von DRM-Signalen im Kurzwellen- und Ultrakurzwellenbereich sowie den Abtasttakt im Frequenzbereich. Die Abbildungen 3.4 und 3.6 zeugen von einer hohen Stabilität und Rauscharmut der auf diese Weise erzeugten Frequenzen. Im UKW-Bereich (Abb. 3.5) ist nimmt die Signalgüte allerdings ab.

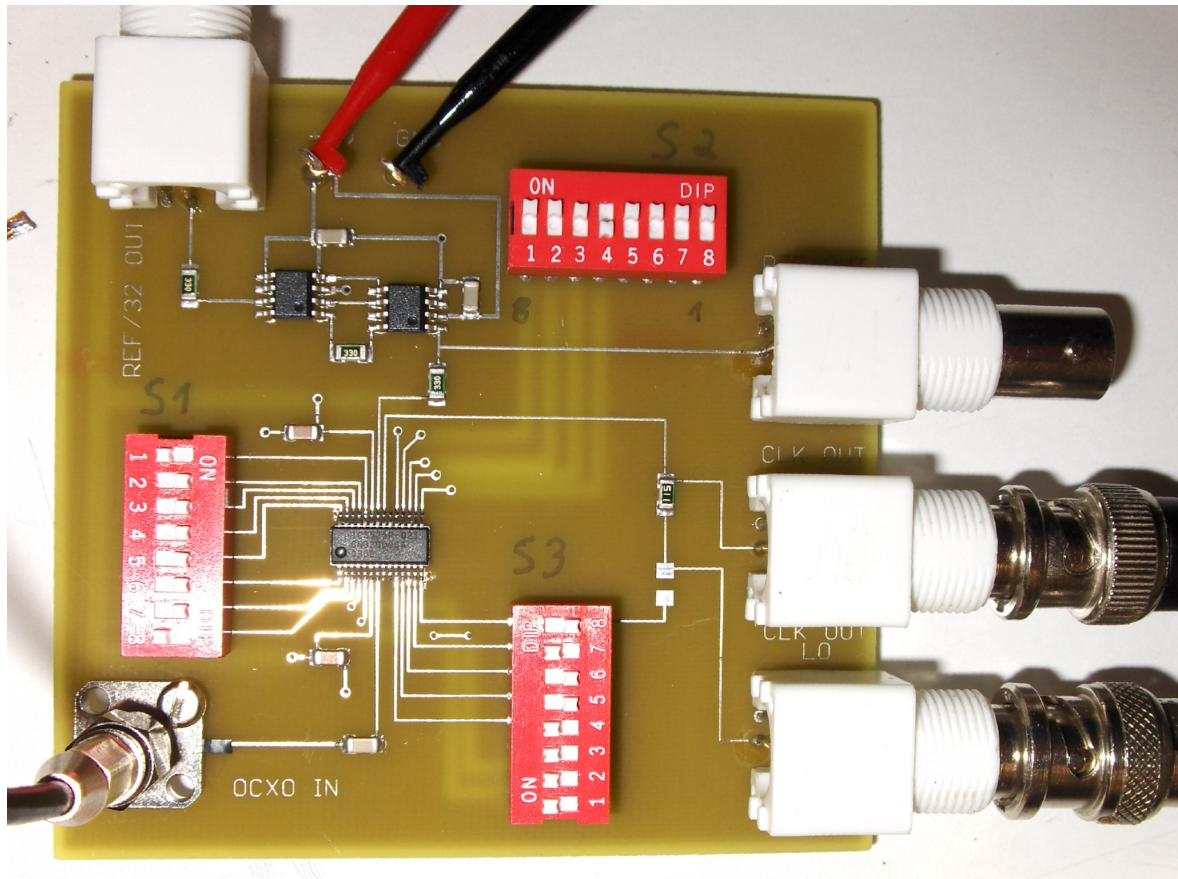
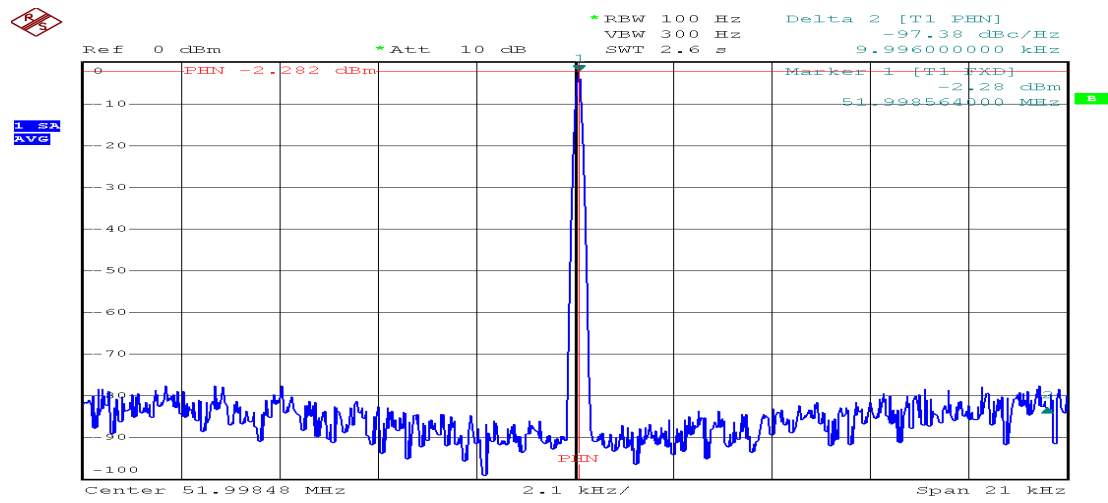


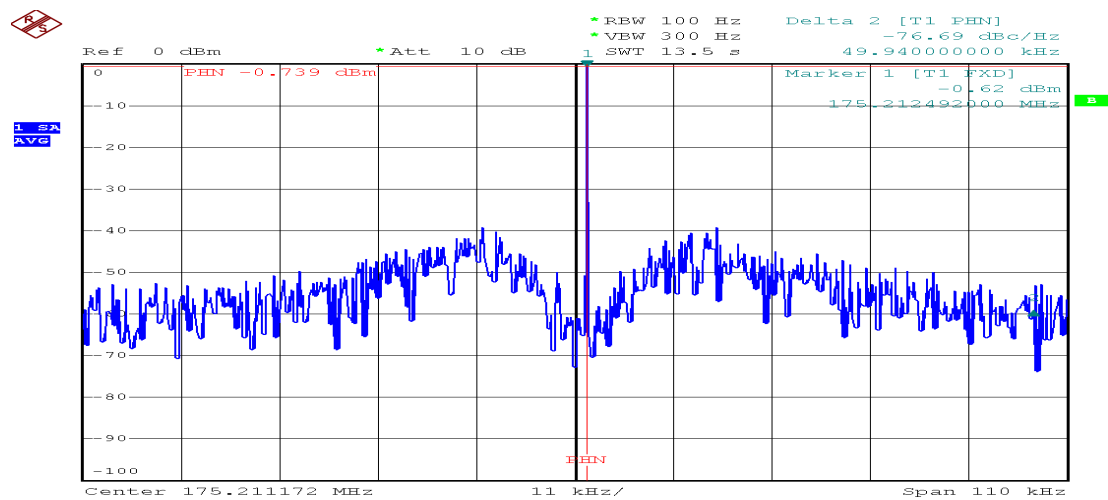
Abbildung 3.3: Frequenzerzeugungsboard zum DRM-Sender



ics525-02

Date: 30.OCT.2006 12:14:23

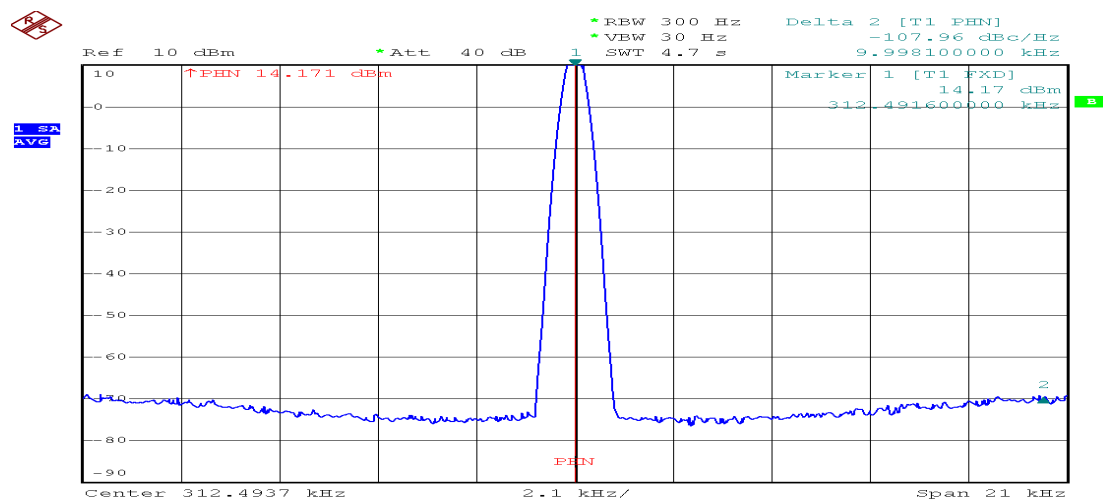
Abbildung 3.4: Ausgangsspektrum des Frequenzsynthesizers bei 52 MHz



ics525-02

Date: 30.OCT.2006 12:11:39

Abbildung 3.5: Ausgangsspektrum des Frequenzsynthesizers bei 175.2 MHz



ics542

Date: 25.OCT.2006 11:57:58

Abbildung 3.6: Ausgangsspektrum des Frequenzteilers zur Ansteuerung des D/A-Wandlers

4 Zusammenspiel der vorgestellten Module

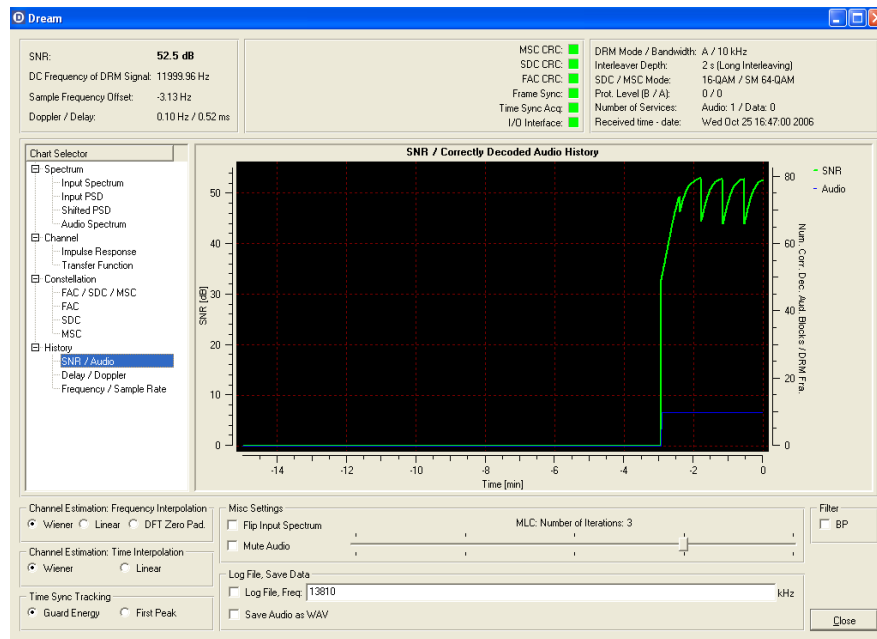
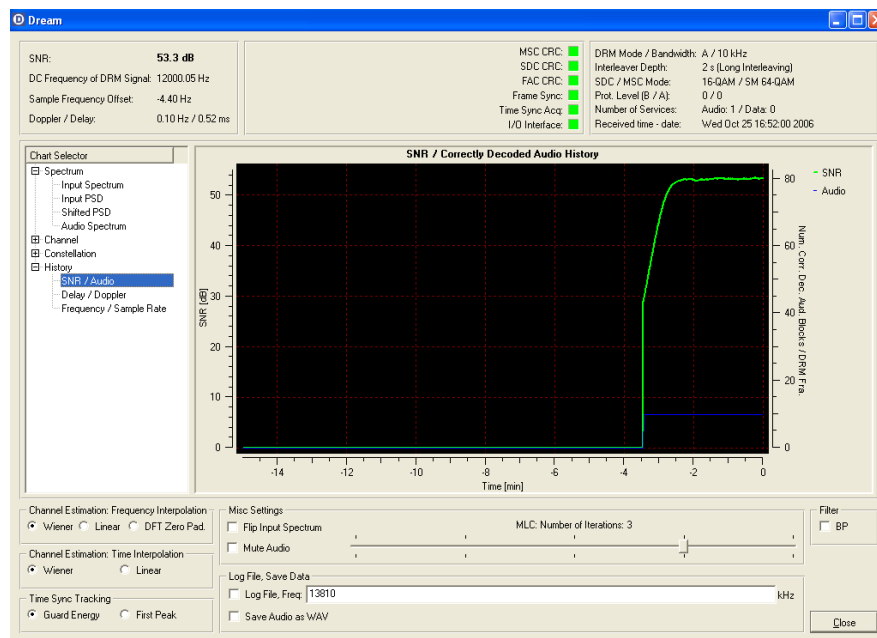
Nach Fertigstellung und Vermessung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Module wurden diese schrittweise in das System integriert.

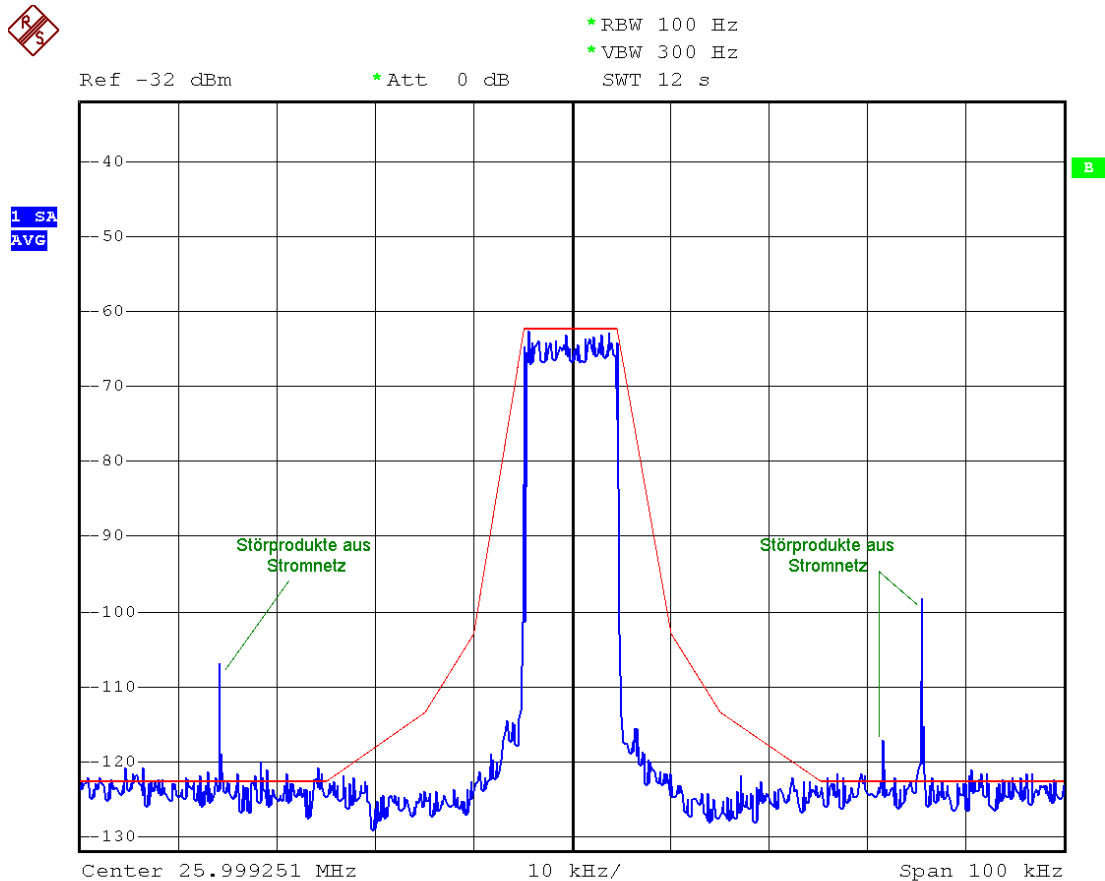
4.1 NiDAQ und Taktfrequenzgeber

Zur Verifizierung der Funktion von Modul (12) wurde – wie auch bei bisherigen Arbeiten mit der Sendesoftware Spark – der Ausgang der NiDAQ direkt mit einem Empfänger ausgestatteten PC verbunden und ein Signal mit einer Zwischenfrequenz von 12 kHz erzeugt. Abb. 4.1 und 4.2 zeigen die Empfangssituation bzw. das SNR bei Taktung der NiDAQ durch ihren internen bzw. den in Kap. 3.3 vorgestellten Taktgeber. Es ist insbesondere die hohe Stabilität, die das neu entworfene Modul kennzeichnet. Entsprechend kann prognostiziert werden, dass dieses Modul im Langzeitbetrieb des Senders eine dauerhaftere und hochwertigere Analogisierung der DRM-Basisbandsignale ermöglicht, wie es bisher der Fall war. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass die in Abb. 4.1 erkennbaren deutlichen Einbrüche des Signal-/Rauschverhältnisses S/N (grüner Graph) in Abb. 4.2 nicht mehr vorhanden sind.

4.2 Mischung der DRM-Signale

Durch das Anpassnetzwerk im Antialiasingfilter wird erreicht, dass die DRM-Signale verzerrungsfrei in die HF-Ebene transformiert werden können. Dieser Schritt ist ein entscheidender Faktor zur Schaffung einer hohen Signalqualität im Sinne des Schulterabstandes bzw. des empfängerseitigen S/N . Der Begriff des Schulterabstandes bezeichnet den Abstand des DRM-Signals vom Rauschen bzw. den an den ungewollten Mischprodukten am Rande des DRM-Spektrums. Je höher dieser ist, umso höher ist auch die empfangbare Signalqualität. Abb. 4.3 zeigt ein DRM30-Signal auf einer Sendefrequenz von 26 MHz. Wie man sehen kann, wird die von der ITU geforderte Spektrumsmaske deutlich eingehalten. In diesem Bereich sind Schulterabstände von bis zu 60 dB möglich, was gleichzeitig im Sinne der Verzerrungsfreiheit und Aussteuerbarkeit das Optimum bei diesem Mischer bedeutet. Zudem ist der Schulterabstand durch die Auflösung der D/A-Wandlerkarte begrenzt. Im Vergleich mit anderen DRM-Sendern – die oftmals lediglich modifizierte AM-Sender sind – stellt dieser Wert jedoch ein hervorragendes Ergebnis dar. Bei der Mischung von DRM+-Signalen gelten die gleichen Aus-

Abbildung 4.1: Dream: Empfang bei interner Taktung der NiDAQ, $f_s = 384$ kHzAbbildung 4.2: Dream: Empfang bei Taktung durch den ICS542, $f_s = 312.5$ kHz

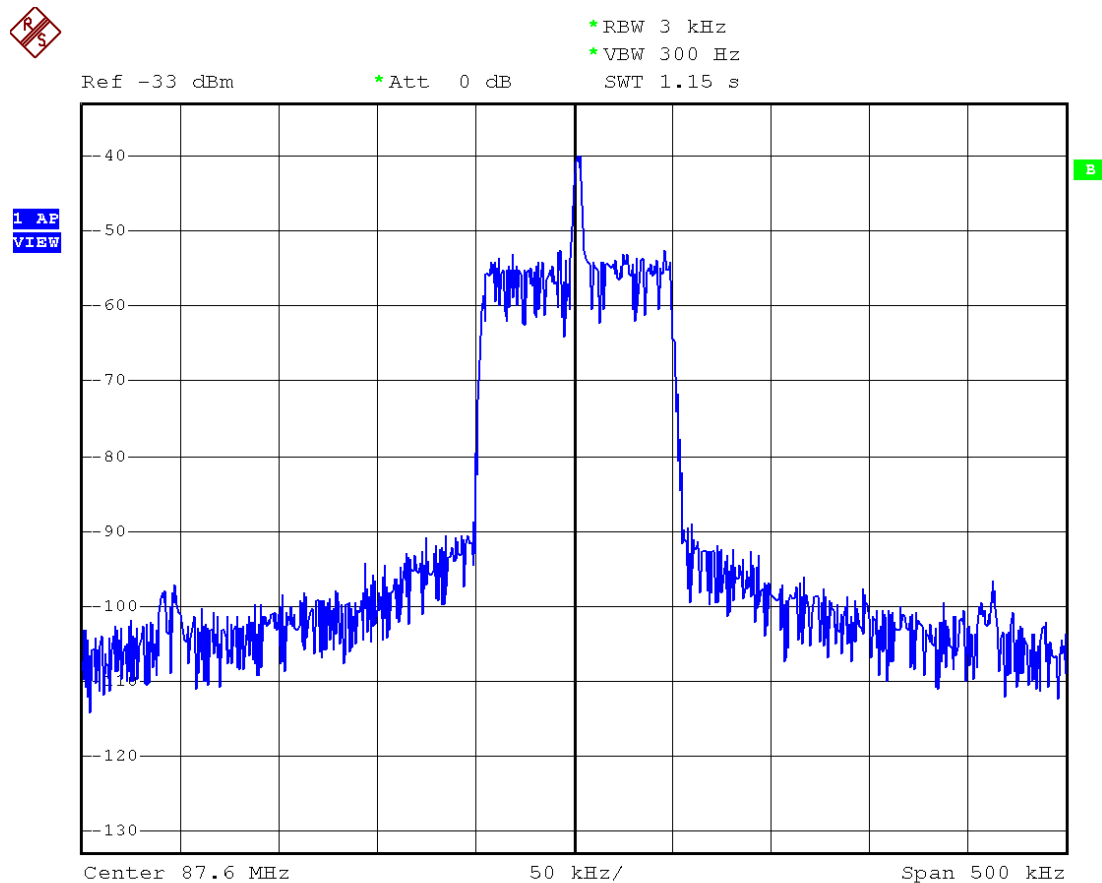


DELAY-I-Q

Date: 29.NOV.2006 15:46:04

Abbildung 4.3: DRM30-Spektrum auf 26 MHz mit eingezeichneter ITU-Spektrumsmaske

sagen. Allerdings hat sich gezeigt, dass das Rauschen des Synthesizers im UKW-Bereich zu stark für einen sinnvollen Betrieb ist. Es können max. Schulterabstände von ca. 10 dB realisiert werden. Durch das Verwenden einer anderen Referenzfrequenz (z.B. 33.69 MHz, erzeugt durch einen freischwingenden Signalgenerator R&S SMX im Austausch mit dem OCXO aus Abschnitt 3.3) kann eine Situation wie in Abb. 4.4 geschaffen werden (Abbildung ohne Applikation der Maßnahmen zur Trägerunterdrückung). Bindet man den Signalgenerator SMX mittels des Referenzausgangs des ICS525 an den hochstabilen OCXO, so kann man weiterhin die hohe Güte des Samplingtaktgebers (12) nutzen und gleichzeitig die spektrale Reinheit des SMX-Ausgangssignals erhöhen. Mit dem SMX als lokalen Oszillator verhält sich ein DRM+-Signal im UKW-Band wie in Abb. 4.5 dargestellt. Entsprechend dieser Ergebnisse ist daher Arbeitspaket 2 erfolgreich abgeschlos-



DELAY-I-Q

Date: 30.NOV.2006 14:29:46

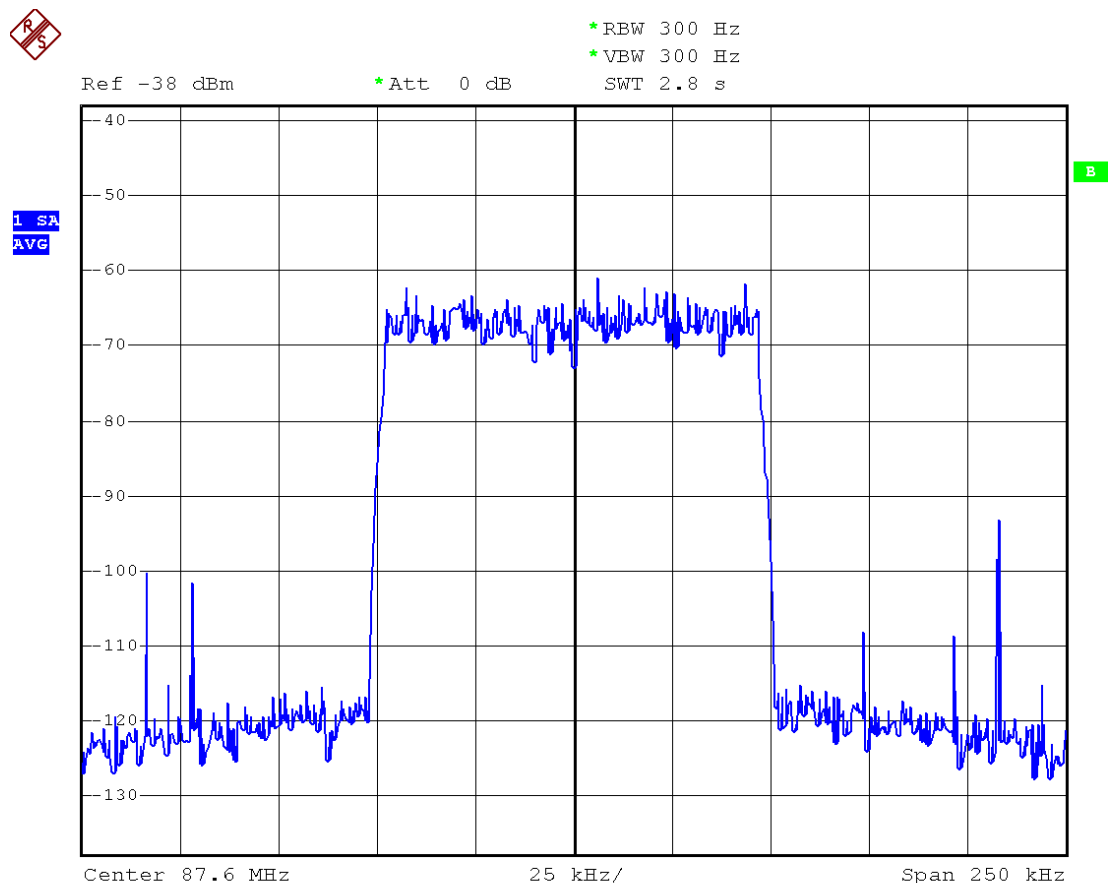
Abbildung 4.4: DRM+ auf 87.6 MHz bei Verwendung eines R&S SMX-Signalgenerator als externe Referenz

sen.

4.3 Empfang der DRM30-Signale

Um die Güte der Signale bis zu diesem Punkt der Sendestrecke bewerten zu können, wurde der Ausgang des Modulators mit dem Weltempfänger Yaesu FRG8800¹ sowie dem DRM-Empfänger der elektronikzeitschrift ‚Elektor‘ verbunden, welche über eine hochwertige Soundkarte des Typs ‚M-Audio Delta 1010‘ die auf 12 kHz heruntergemischten DRM-Signale in die Empfangssoftware ‚Dream‘ einspeisen. Der DRM30-Multiplex wurde zuvor auf eine Zwischenfrequenz von 26 MHz ge-

¹mit DRM-Modifikation



DELAY-I-Q

Date: 29.NOV.2006 16:21:43

Abbildung 4.5: DRM+ auf 87.6 MHz bei Verwendung des durch den ICS525 angeordneten SMX-Signalgenerator als lokalen Oszillator

mischt. Die Abbildungen 4.6 bis 4.8 zeigen, das

- das erzeugte Signal nach Durchlaufen des Sendesystems bis zum Modulatorausgang empfangbar ist
- S/N-Verhältnisse gemessen werden, welche den Erfahrungen nach das Maximum für den FRG8800 darstellen
- die erreichte Signalqualität über einen längeren Zeitraum gleichbleibend hoch bleibt. Der in Abb. 4.7 sichtbare Einbruch stammt nicht vom System, sondern wurde durch eigene Störungen provoziert
- innerhalb der Übertragungstrecke die Amplitudenbalance und der Phasenversatz zwischen den Basisbandsignalkomponenten erhalten bleibt. Stö-

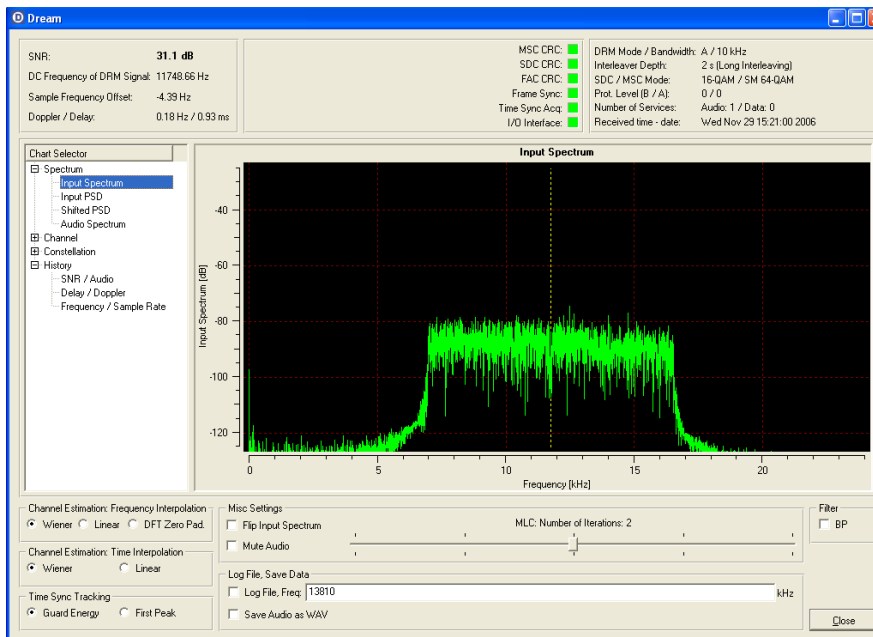


Abbildung 4.6: Empfangenes Signalspektrum (DRM30) in Dream

reinflüsse wie Intermodulation, Breitband- und Phasenrauschen o.ä. sind anhand der Konstellationsdiagramme nicht auszumachen.

- der HF-Träger ausreichend unterdrückt worden ist

Vergleichbare Aussagen können in Ermangelung von Empfangsmöglichkeiten für DRM+ zum momentanen Zeitpunkt leider nicht getroffen werden. Dennoch kann man davon ausgehen, dass eine vergleichbare Situation wie bei DRM30 besteht; das Empfängerseitige S/N wird aufgrund der reduzierten Schulter leider etwas schlechter sein. Ersten Feldversuchen zur Verifikation des vorläufigen OFDM-Parametersatzes [SKL⁺06] steht dies jedoch nicht im Wege. Wenn mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Aufbau auch DRM+-Signale empfangbar wären – was aufgrund fehlender Abwärtsmischer im UKW-Frequenzbereich und der fehlenden Empfangssoftware tatsächlich nicht möglich ist – so könnte den Erfahrungen im DRM30-Bereich nach beim DRM+-Empfang ein S/N von ca. 25 dB erreicht werden.

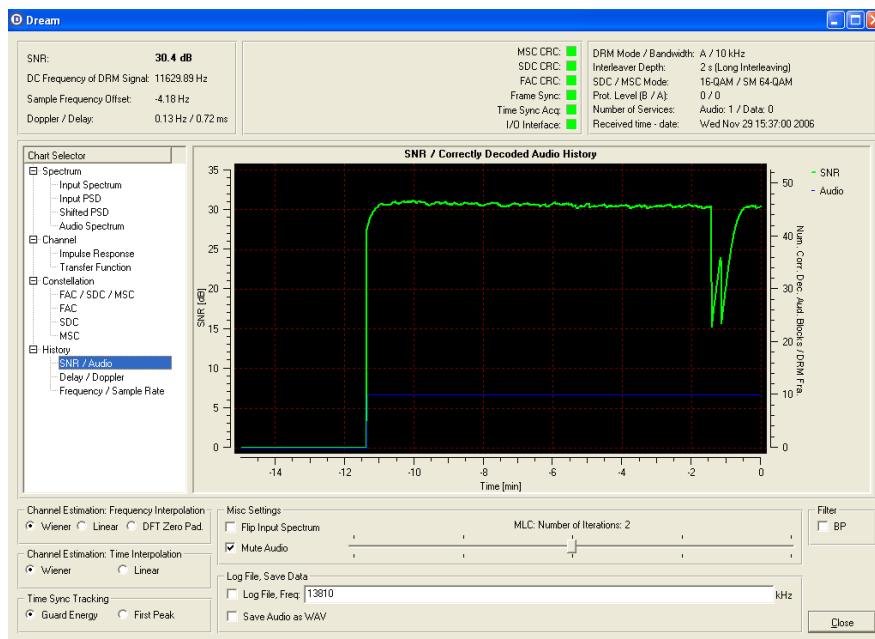


Abbildung 4.7: Verlauf des empfangen S/N im Dauerbetrieb

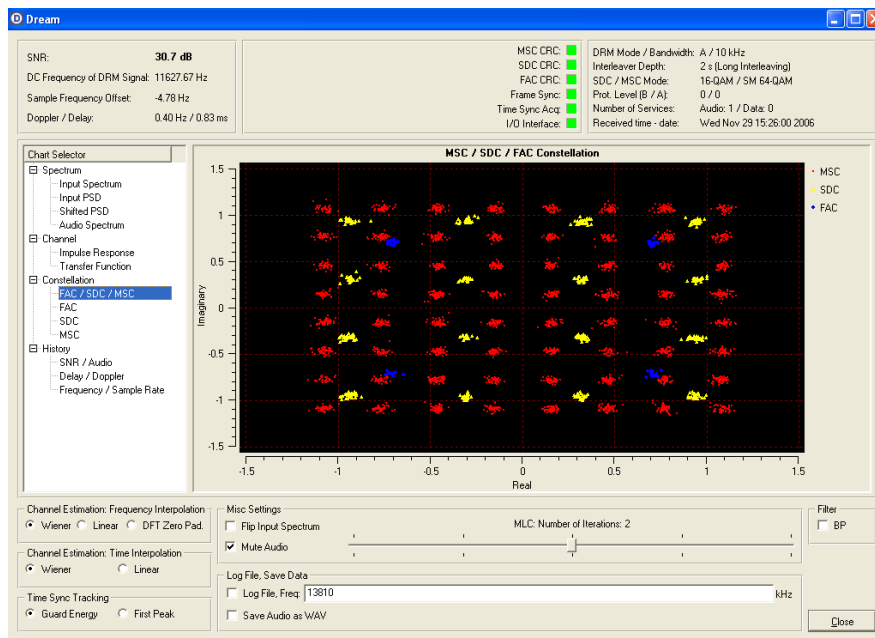


Abbildung 4.8: Empfangene Konstellationsdiagramme der logischen DRM30-Datenkanäle

5 Literaturverzeichnis

- [Ber05] BERNHARDT, Frank: *Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystems auf OFMDM-Basis im UKW-Frequenzbereich*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, November 2005
- [Fei05] FEILEN, Michael: *Objektorientierte Implementierung eines Sendesystems für Digital Radio Mondiale*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, Oktober 2005
- [Sch06] SCHAD, Felix: *Generierung und Mischung von DRM-Signalen zur Senderansteuerung*, Fachhochschule Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2006
- [SKL⁺06] STEIL, Prof. D. ; KREUTZER, Prof. D. ; LEHNERT, Dipl.-Ing. ; FEILEN, Dipl.-Ing.(FH) ; URBANSKY, Prof. ; SAUER-GREFF, Prof.: Technical feasibility study and field trial concept for DRM-based digital radion in the VHF-FM radio band. In: *7th Workshop on Digital Broadcasting*, 2006, S. 67ff.