

MATLAB-ADS CO-SIMULATION OF A GFSK MODEM ALGORITHM

S. Gangl, M. Gruber, H. Flühr
 FH JOANNEUM Graz, Studiengang Luftfahrt/Aviation
 Alte Poststraße 149, A-8020 Graz
 Österreich

SUMMARY

In today's commercial air traffic digital data link communications became vital to cope with the increasing traffic density. Currently VHF Data Link (VDL) Mode 2 is operational in Europe at Maastricht Upper Area Control Centre (MUAC) for this purpose. But further demand for higher transmission capacity is obvious. In order to overcome the bottleneck in capacity, systems like Mode S Extended Squitter (1090ES) or VDL Mode 4 (VDLm4) could be solutions [1]. Implementation of VDL Mode 4 (which is studied in this paper) is suggested to be realised in software radio architecture using DSP for signal generation and analysis.

For VDLm4 according to ICAO Annex 10, ETSI standard EN 301 842-1 respectively, a system-level simulation of the physical layer was carried out. Using EDA (electronic design automation) software (Advanced Design System (ADS), Agilent Technologies), the basic specifications of VDLm4 were implemented. A base band generator component was developed to provide NRZ-I coded digital data at a bit rate of 19.2 kbit/s. The modulation scheme used in VDLm4 is GFSK, requiring Gaussian filtering of the bit stream for spurious reduction and bandwidth limitation. The specified bandwidth-time-product of 0.28 was implemented utilizing a Gauss shaped low-pass filter. The FSK part of the GFSK modulator requires a modulation index of 0.25. This was established introducing a conventional FM modulator. Demodulation was realized using a combination of synchronous FM demodulator, low-pass filtering, and limiter for edge reconstruction of the digital signal. As a step towards Software Defined Radio (SDR)-based implementations, the modulation and demodulation sub-blocks were replaced by a co-simulation running MATLAB. Appropriate MATLAB routines were derived to establish proper functionality.

The methodology used allows simulating the physical layer of a VDLm4 transceiver. Co-simulation with MATLAB enables the replacement of system library components with equivalent software routines. Signal processing capabilities are therefore integrated into state-of-the-art system simulation. Comparison of both conventional simulation and co-simulation shows no difference in the results.

1. EINLEITUNG

Im heutigen kommerziellen Flugverkehr nimmt die Bedeutung von Datenverbindungen stark zu. Für zukünftige Konzepte der Flugsicherung, wie das EUROCONTROL LINK2000+ Programm [1], bieten solche Datenverbindungen einen Lösungsansatz für

Kapazitätsengpässe aufgrund des zunehmenden Luftverkehrs und des Mangels an Frequenzbändern.

Software Defined Radios (SDR) stellen hierbei die Bestrebung dar, möglichst die gesamte Signalverarbeitung mittels Software durchzuführen. Damit soll eine hohe Flexibilität erreicht werden, indem die Implementierung unterschiedlicher Standards durch alleinigen Austausch der Software ermöglicht wird. Als Beispiel eines ersten Schritts hin zu einer solchen Software beschäftigt sich diese Arbeit mit der Datenübertragung entsprechend VHF Data Link Mode 4 (VDLm4).

Eine wesentliche Bestrebung dabei besteht darin, die vorhandenen ADS-Elemente Modulator und Demodulator mittels einer MATLAB-Routine vollwertig zu ersetzen und eine MATLAB-ADS Co-Simulation durchzuführen.

2. METHODEN

An dieser Stelle sollen Eigenschaften und Funktionsweise des VHF Data Link Mode 4 [2-6] erläutert und die Vorgehensweise bei der Co-Simulation dargestellt werden.

2.1. Aeronautisches Telekommunikationsnetzwerk

Für die weltweite digitale Datenkommunikation in der Luftfahrt wird das aeronautische Telekommunikationsnetzwerk (ATN) von der Internationalen Zivilen Luftfahrtorganisation (ICAO) standardisiert. Neben den bodengestützten Datennetzwerken der Flugsicherungsdienste umfasst das ATN auch drei Bord-Boden-Subnetzwerke, die eine digitale Übermittlung von Daten zwischen den Flugzeugen und den Bodenstationen ermöglichen. Diese sind das Mode S-Sekundärradar, das Inmarsat-Satellitenetzwerk, sowie der VHF Data Link. Der Vollständigkeit halber muss auch noch der HF Data Link angeführt werden, der vor allem der Kommunikation auf polaren Routen dient. Über die Avionik-Subnetzwerke sind die Flight Management Systeme (FMS) und die bordseitigen Applikationen für die digitale Bord-Boden-Datenkommunikation unmittelbar in das ATN eingebunden. Über den Bord-Router erfolgt der Zugang zu den Subnetzwerken.

2.2. VHF Data Link Mode 4

Eine typische Anwendung des VDL Mode 4 ist die direkte Bord-Bord-Datenkommunikation. Ermöglicht wird die direkte Übertragung von einem Flugzeug zum nächsten durch den selbstorganisierenden Kanalzugriff, bei dem keine zentrale Bodenstation, jedoch eine Synchronisation

mit der UTC-Zeit benötigt wird. Die VDL-Radios senden im VDL Mode 4 zusammen mit den Nutzdaten Reservierungen aus, in denen sie allen anderen Teilnehmern mitteilen, in welchen Zeitschlitzten sie im nächsten MAC-Zyklus (Medium Access Control) auf den Funkkanal zugreifen werden. Bei VDLm4 kommt eine GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) Modulation mit einer Kanaldatenrate von 19.200 Bit/s zur Anwendung.

VDL Mode 4 arbeitet im aeronautischen UKW-Spektrum im Bereich zwischen 117,975 und 137 MHz. Es sendet digitale Daten in einem gewöhnlichen Sprechfunkkanal und verwendet ein selbstorganisierendes Zeitmultiplexverfahren (STDMA, Self-organising Time Division Multiple Access). Bei diesem Verfahren wird der Kommunikationskanal in Zeitsegmente gegliedert, wobei ein Rahmen (frame) definiert wird, welcher wiederum in Zeitschlitzte (time slots) unterteilt wird. Bei jedem Start eines Zeitschlitztes wird einer Station die Möglichkeit zum Senden eingeräumt.

Jeder Zeitschlitz kann von einem VDLm4-Transponder, welcher auf einem Flugzeug, einer fixen oder mobilen Bodenstation montiert ist, für die Datenübertragung genutzt werden. Das exakte Timing der Zeitschlitzte und die geplante Nutzung derselben für die Übertragung sind allen Benutzern in Reichweite zueinander bekannt, wodurch eine effiziente Nutzung der Datenverbindung gewährleistet werden kann und keine Stationen gleichzeitig senden.

2.2.1. VDLm4-Transponder

Jeder Transponder besteht aus den Elementen GNSS-Empfänger (Global Navigation Satellite System), UKW-Sende-/Empfangseinheit und COM-Prozessor. Durch den GNSS-Empfänger steht die Positions- und Zeitinformation weltweit zur Verfügung. Die UKW-Sende-/Empfangseinheit bewerkstelligt die Datenübermittlung, wobei stets auch die Position der eigenen Station gesendet wird. Dies gilt auch für stationäre Bodenstationen. Der COM-Prozessor ist ein Computer, der die Verwendung der Kommunikationskanäle koordiniert. Der Prozessor enthält in seinem Speicher ein virtuelles Abbild der Zeitfenster. Der Prozessor regelt die Slot-Vergabe für die stationseigene Sendung, wobei das eigene Slot-Verzeichnis ständig auf den neuesten Stand gebracht wird.

2.2.2. Modulationsschema

Bei VDLm4 werden die Gauss-Filterung gemeinsam mit einer Frequenzumtastung (GFSK) verwendet, wie dies beispielsweise auch bei Bluetooth der Fall ist. Bei diesem Modulationsverfahren wird durch den Gauss'schen Filter der Übergang zwischen logischen Zuständen geglättet und somit der Oberwellenanteil des Signals reduziert. Die Frequenzumtastung ist die digitale Form der Frequenzmodulation. Jeder Frequenzwert entspricht einem bestimmten digitalen Level. Erfolgt die Umschaltung zwischen den Frequenzen ohne Phasensprung so spricht man von einer phasenkontinuierlichen Frequenzmodulation, auch „weiche FSK“ genannt.

Die Modulationsrate bei VDL Mode 4 beträgt 19.200 Bits pro Sekunde. Der Modulationsindex ist mit 0,25 definiert,

das Bandbreite-Bitdauer-Produkt des Gauss-Filters mit 0,28.

2.2.3. Zeitmultiplexverfahren

Ein wichtiger Begriff beim Kanalmanagement des VDLm4 ist der so genannte Superframe. Dieser umspannt eine Periode von 60 Sekunden und enthält wiederum eine Reihe von kürzeren Zeitfenstern, die so genannten Slots. Ein Superframe enthält exakt 4.500 Slots, das ergibt 75 Slots pro Sekunde. Ein Slot kann von jeder Station für den Empfang oder das Senden beansprucht werden. Die maximal erlaubte Länge einer Sendung beträgt eine Sekunde, also eine Spanne von 75 Slots.

2.2.4. Slotauswahl

Ist ein Kanal wenig genutzt, so ist die Slotauswahl unkompliziert, da ein vorher noch nicht reservierter Slot einfach gefunden werden kann. Ist ein Kanal stärker belegt, sodass nicht reservierte Zeitfenster schwieriger zu finden sind, erlaubt VDL Mode 4 einer Station die Verwendung von anderen, von entfernten Stationen bereits reservierten Slots. Bei stärkerer Auslastung des Kanals reduziert sich also nur der Versorgungsbereich einer Station, nicht aber die Kommunikationsfähigkeit.

Die speziellen Regeln für die Wiederverwendung von bereits reservierten Slots basieren auf zwei Leitprinzipien:

- 1) Robin Hood Prinzip:

Slots, die vorher von einer anderen Station reserviert wurden, können für die Übertragung verwendet werden. Es müssen aber jene Slots bevorzugt ausgewählt werden, die von der am weitesten entfernten Station reserviert wurden.

- 2) CCI-Schutz (Co-Channel Interference, Schutz bei Signalüberlagerung):

Sieht die Benutzung von bereits reservierten Slots vor. Jede Station muss die erwünschten (stärkeren) Signale von den unerwünschten (schwächeren) unterscheiden können, wenn die Stationen gegenseitig in Funkreichweite sind. Es können Unterscheidungen getroffen werden, solange sich die überlagernden Signale um 12 dB unterscheiden. Dies entspricht einem ungefähren Entfernungsverhältnis von 1:4 zwischen den überlagernden Stellen.

2.2.5. Slotzugriffsmanagement

Das wichtigste autonome Zugriffsschema für den gesamten VDLm4-Betrieb ist das *periodic broadcast protocol*. Jede Station sendet dabei periodisch Reservierungen aus. Diese enthalten die ID der Station, die Standortinformation und Informationen zur Steuerung des Protokolls. Jede andere Station, die diese Nachricht empfängt, kann sich daraufhin eine Reservierungstabelle zusammenstellen und ist im Bilde über andere Stationen in Reichweite. Die Information dient aber auch zur Steuerung des Zugriffs auf den Datenlink, da voraussichtliche Reservierungen anderer Stationen bekannt sind.

2.3. Simulationsumgebung

Der Systementwurf wurde mit der kommerziellen EDA-Software ADS (Advanced Design System, Agilent Technologies) durchgeführt. ADS ist Industriestandard im Bereich der Simulation von RF-Systemen und der digitalen Signalverarbeitung. Das Programm Paket stellt verschiedene Simulatoren zur Verfügung, von denen in diesem Fall die Ptolemy-Simulation, eine Technik mit synchronem Datenfluss, entwickelt an der Universität von Kalifornien in Berkely, zur Anwendung kommt. Die Software bietet Schnittstellen zwischen Signalgeneratoren und Messgeräten, wobei sie auch zur Erzeugung von realen Signalen und damit zur Verifikation von Hardwaresystemen verwendet werden kann.

2.4. Simulationstechniken

2.4.1. Modulation mittels ADS-Bausteinen

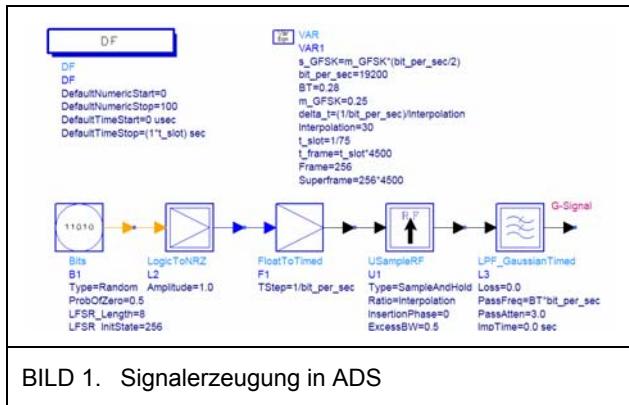


BILD 1. Signalerzeugung in ADS

Am Beginn der Simulation findet die Signalerzeugung statt (BILD 1). Der *Data Flow Controller* (*DF*) steuert den Simulationsablauf. Durch die entsprechenden Parameter werden der Startvorgang, sowie die Beendigung der Simulation festgesetzt. Die für die Simulation benötigten Variablen werden im ADS-Element *VAR* deklariert. Als Quelle erzeugt das Element *Bits* eine zufällige Bitfolge. Im nächsten Schritt wird der logische Pegel in einen NRZ (Non Return to Zero)-Leitungscode umgewandelt. Das bedeutet, dass den logischen Pegeln Spannungswerte zugewiesen werden. Der Zeitbezug wird mit dem Baustein *FloatToTimed* eingeführt. Durch den *Upsampler* wird das Signal während eines Zeitschrittes durch Einfügen von Zwischenwerten auf konstantem Level gehalten. Der Gauss-Tiefpassfilter flacht die stark ansteigenden bzw. fallenden Übergänge ab und erzielt damit eine Bandbegrenzung (BILD 2). Weiters kommt es zu einer Verzögerung des Signals aufgrund der Filterdurchlaufzeit.

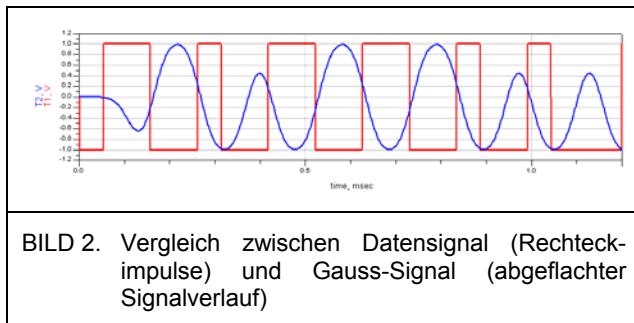


BILD 2. Vergleich zwischen Datensignal (Rechteckimpulse) und Gauss-Signal (abgeflachter Signalverlauf)

Das erzeugte Signal wird anschließend frequenzmoduliert und verstärkt (BILD 3).

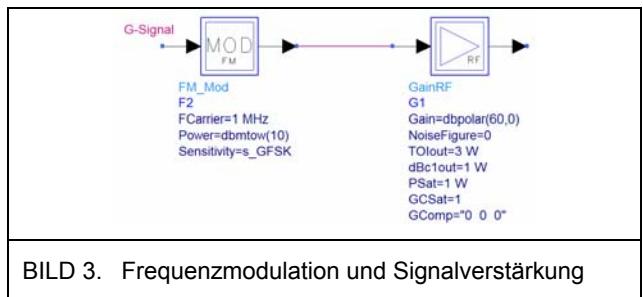


BILD 3. Frequenzmodulation und Signalverstärkung

Der Baustein *FM_Mod* moduliert das eingehende Bitmuster auf eine Trägerfrequenz auf. Dieser Baustein wird später durch eine MATLAB-Routine ersetzt.

Der Baustein *GainRF* wird verwendet um das Eingangssignal zu verstärken. Das verstärkte Signal stellt das Sendesignal dar.

2.4.2. Modulation mittels MATLAB-Routine

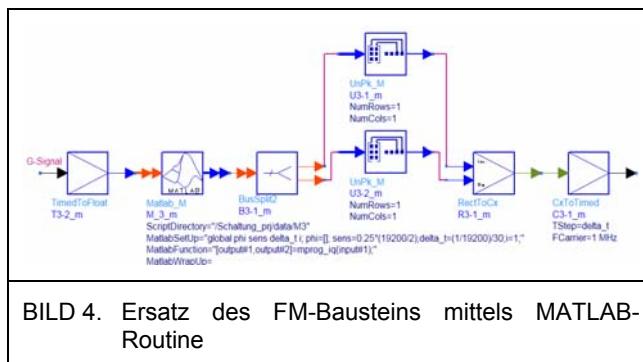


BILD 4. Ersatz des FM-Bausteins mittels MATLAB-Routine

Hier wird der vorgefertigte ADS-Baustein für die Frequenzmodulation durch eine MATLAB-Routine ersetzt (BILD 4). Der Baustein *TimedToFloat* formt das zeitabhängige Gauss-Signal in ein zeitunabhängiges Signal um, damit Werte an MATLAB übergeben werden können. Der Baustein *M_MATLAB* dient als Hauptelement der ADS-MATLAB Verknüpfung.

Nach der Frequenzmodulation eines Signals in ADS liegt dieses nicht in Form einer hochfrequenten Schwingung, sondern vielmehr in einer komplexen Darstellung vor. Das Modulationselement in ADS bildet lediglich das vorliegende Basisbandsignal, welches in der Frequenzmodulation wiederum maßgeblich für die Frequenzänderung der Trägerschwingung ist, als rotierenden Zeiger in einer komplexen Ebene ab. Die reelle Achse wird hierbei als I (In-Phase), die imaginäre Achse als Q (Quadratur) bezeichnet (BILD 5). Die eigentliche Trägerfrequenz für die Frequenzmodulation wird in ADS als reine Konstante mitgeführt (Bandpassdarstellung des Signals), die vorliegende Darstellung liefert also nur eine Beschreibung der Abweichung von dieser Mittenfrequenz. Der Betrag des komplexen Zeigers ist stets 1 und die Simulation beginnt bei positiver, reeller Zeigerstellung. Für die momentane Winkelgeschwindigkeit des Zeigers ausschlaggebend sind der Signalwert vor der Modulation und die Empfindlichkeit, die beim Modulator in Hz/V angegeben wird.

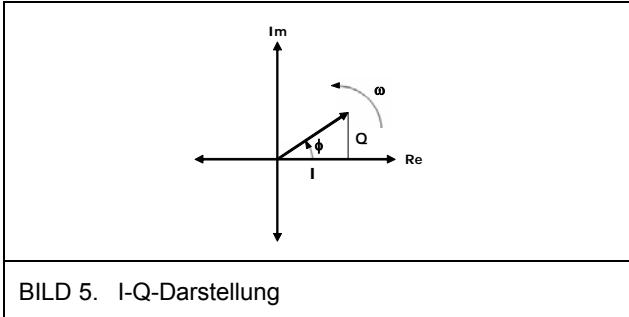


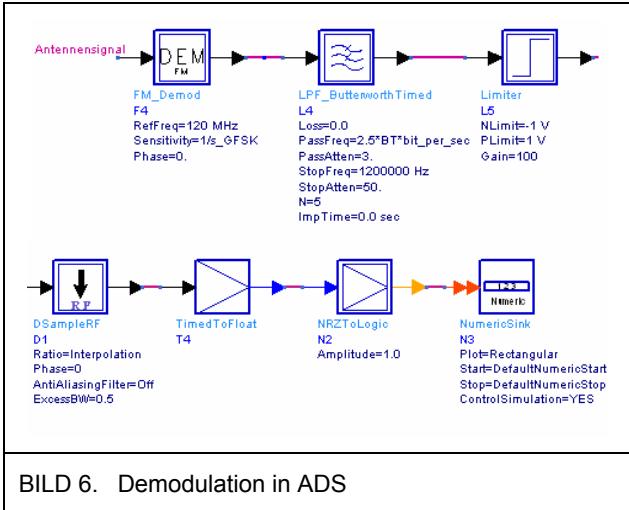
BILD 5. I-Q-Darstellung

Das erstellte MATLAB-File führt die eigentliche FM-Modulation durch. Der I- und Q-Anteil des Signals wird ermittelt. Dazu wird für jeden Zeitschritt Δt der Phasenwinkel $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ berechnet. Der Winkel ϕ_0 ist aus dem vorigen Zyklus bekannt. Mit der Sensitivität s_{FM} des Demodulators gilt:

$$(1) \quad \begin{aligned} \Delta\phi &= \omega \cdot \Delta t = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \\ \Delta\phi &= 2\pi \cdot \hat{u}_{DEM,ein} \cdot s_{FM} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

Schlussendlich werden noch die entsprechenden I- und Q-Werte mit Hilfe der Winkelfunktionen berechnet und an ADS zurückgegeben. Die am Bus anliegenden I- und Q-Signale werden mittels *BusSplit2* aufgeteilt und auf die entsprechenden Ausgänge weitergegeben. Anschließend werden sie mit *UnPk_M* in skalare Werte umgewandelt. *RectToCx* führt den imaginären Wert (Q) und den reellen Wert (I) in eine komplexe Zahl über. Das Element *CxToTimed* wandelt das zeitunabhängige, komplexe Signal in ein zeitabhängiges um, wobei die Zeitschritte durch den Parameter *TStep* angegeben werden. Weiters wird *CxToTimed* verwendet um die Trägerfrequenz wieder in die Modulation mit einzubeziehen.

2.4.3. Demodulation mittels ADS-Baustein



Das entwickelte Verfahren zur Demodulation des in BILD 3 generierten Signals und zur Rückgewinnung der digitalen Information ist in BILD 6 dargestellt. *FM_Demod* übernimmt hierbei die Frequenzdemodulation, wobei der Empfindlichkeitsparameter die Spannungsänderung des Basisbandsignals bei der Frequenzänderung des HF-Signals von einem Hertz darstellt. Ein Tiefpassfilter mit Butterworth-Charakteristik filtert den entsprechend

relevanten Frequenzbereich. Der Signalbegrenzer (*Limiter*) verstärkt das Eingangssignal und limitiert dann das Ausgangssignal auf einen Maximalwert. Damit wird aus dem für die Übertragung notwendigen Signal mit weichen Übergängen wieder das Rechtecksignal gewonnen. Im Wesentlichen handelt es sich hier um eine Detektion der Nulldurchgänge. Durch den Abtaster (*DSampleRF*) werden die zeitlichen Diskretisierungsstufen vergrößert. Die bei der Modulation eingeführte Interpolation wird also entfernt, um als zeitliche Diskretisierungsstufe wieder genau eine Bitlänge zu erhalten. Der Signalwandler *TimedToFloat* wandelt Werte aus dem Zeitbereich in Werte in Gleitkommadarstellung um. Das Element *NRZToLogic* wandelt Pegel, die im NRZ-Code vorliegen, in logische Zustände um. Ist der Wert am Eingang größer oder gleich Null, so ist der Ausgang logisch 1, andernfalls 0. Die numerische Senke (*NumericSink*) sammelt schließlich die numerischen Daten zur Auswertung.

2.4.4. Demodulation mittels MATLAB-Routine

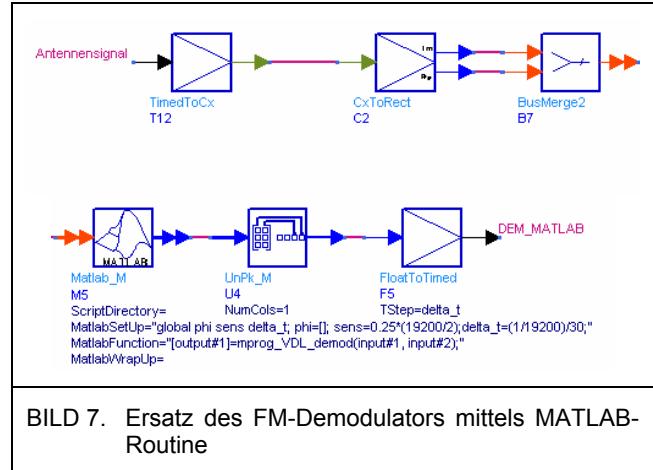


BILD 7. Ersatz des FM-Demodulators mittels MATLAB-Routine

BILD 7 zeigt den vollständigen Ersatz des ADS-Demodulators durch eine MATLAB-Berechnung und dessen Implementierung in die Gesamtsimulation. Um Signaldaten von ADS nach MATLAB übergeben zu können wurden zunächst zwei Signalkonverter verwendet. Im ersten Schritt wurde das Antennensignal vom Zeitbereich in eine komplexe Darstellung überführt, welche im zweiten Schritt in Real- und Imaginärteil aufgespalten wird. Beide Anteile werden schließlich auf einen gemeinsamen Bus gelegt. Das Element *MATLAB_M* stellt wiederum die Schnittstelle zwischen den Programmen dar. Es ist in der Lage auf seine Eingänge MATLAB-Funktionen anzuwenden und reale Matrizen in Gleitkommadarstellung auszugeben. Der MATLAB-Funktion liegen folgende Zusammenhänge zu Grunde:

$$(2) \quad \phi_{(i)} = \arctan\left(\frac{Q_{(i)}}{I_{(i)}}\right)$$

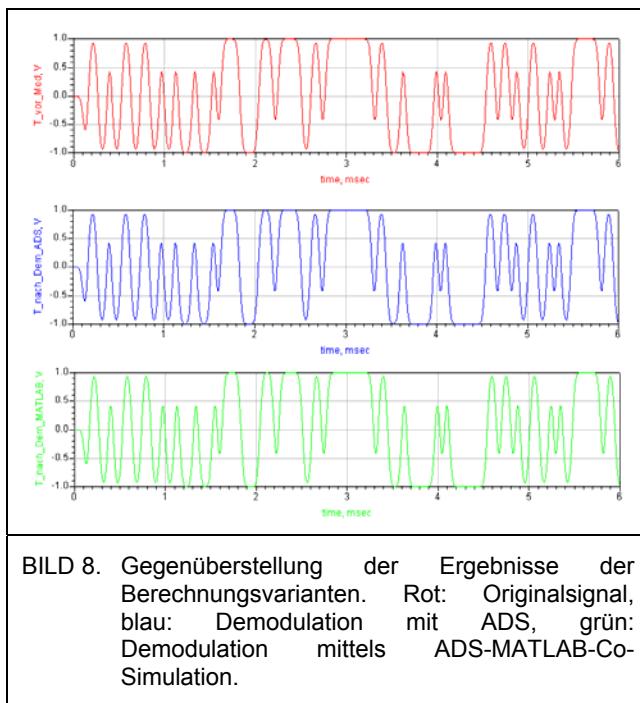
$$(3) \quad \Delta\phi_{(i)} = \phi_{(i)} - \phi_{(i-1)}; -\pi/120 \leq \Delta\phi_{(i)} \leq \pi/120$$

$$(4) \quad y_{(i)} = \frac{\Delta\phi_{(i)}}{2\pi \cdot sens \cdot \Delta t}$$

Hier geben $y(i)$ den aktuellen Wert des unmodulierten Signals, $sens$ den Empfindlichkeitsparameter und $\Delta\phi_{(i)}$ die jeweilige Winkeländerung an. MATLAB-spezifisch kommt hier noch die Funktion „*ATAN2(Q,I)*“ zur Anwendung. Diese Umkehrfunktion des Tangens berücksichtigt alle vier Quadranten und liefert als Ergebnis einen Winkel $-\pi \leq \text{ATAN2}(Q,I) \leq \pi$. Nachdem die Ausgabe des MATLAB-Elements stets eine Matrix ist, wird das Element *UnPk_M* verwendet, um für jedes Sample einen skalaren Wert zu erhalten. Anschließend wird mit einem Signalkonverter der Zeitbezug wieder hergestellt, indem der Parameter für den Zeitschritt auf das systemspezifische Zeitinkrement gesetzt wird.

3. ERGEBNISSE

Mit Hilfe der I-Q-Darstellung ist es in ADS möglich, eine Frequenzmodulation sowie -demodulation durchzuführen, ohne dass die Trägerfrequenz direkt eingeht. Diese Trägerfrequenz wird als konstanter Wert intern mitgeführt. Somit ist es möglich, die Rechenzeit der Systemsimulation zu begrenzen. Die programmierten Varianten des I-Q-Verfahrens entsprechen vollständig den Funktionen der ADS-Elemente, die Zeitverläufe des modulierenden Signals, des Signals nach der ADS- und nach der MATLAB-Demodulation sind ident (BILD 8).



4. DISKUSSION

Durch den Einsatz der Co-Simulation wurde der

vollwertige Ersatz des ADS-Demodulators erreicht. Für Anwendungenfälle, bei denen keine vorgefertigten Elemente in der EDA-Programmumgebung vorhanden sind, erweist sich die Co-Simulation als effektiver Ansatz. Auch für die Entwicklung von Software Defined Radios (SDR) kann die Methodik eingesetzt werden. Die Arbeit zeigt, dass der Aufbau eines solchen Systems mit relativ geringem Aufwand durchführbar ist und ein vergleichsweise hohes Maß an Flexibilität bietet.

Nicht behandelt wurden Verluste und Rauscheinflüsse zwischen Sender und Empfänger, sowie die Fehlererkennung. Weiters wurde an dieser Stelle auf eine detaillierte Nachbildung der speziellen VDLm4-Eigenschaften, wie den Zugriffsverfahren, verzichtet. Auch die Verbindung der Software zur geeigneten Hardware bietet Potential für eine weitere Auseinandersetzung mit der Thematik.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] EUROCONTROL: *LINK2000+ Programme Baseline 1 (Version 1.0)*. European Organisation for the Safety of Air Navigation, Brussels/Belgium, 2005.
- [2] Übersicht VDL Mode 1, 2, 3 und 4. TU Hamburg-Harburg. Online unter URL: <<http://et2.tu-harburg.de/Mitarbeiter/Berghalm/DGON/avigen.pdf>>, (21.10.2005)
- [3] ICAO: *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Vol. I (Radio Navigation Aids)*. International Civil Aviation Organization, 1999.
- [4] ETSI EN 301 842-1 (v1.2.1): *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); VHF air-ground Digital Link (VDL) Mode 4 radio equipment; Technical characteristics and methods of measurement for ground-based equipment; Part 1: EN for ground equipment*. European Telecommunications Standards Institute, Sophia-Antipolis Cedex/France, 2005.
- [5] ICAO: *VDL Mode 4 Implementation Manual (Draft V1.1)*. International Civil Aviation Organization, Montreal/Canada, 2002.
- [6] ETSI EN 301 841-1 (v1.2.1): *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); VHF air-ground Digital Link (VDL) Mode 2; Technical characteristics and methods of measurement for ground-based equipment; Part 1: Physical Layer and MAC Sub-layer*. European Telecommunications Standards Institute, Sophia-Antipolis Cedex/France, 2003.
- [7] *ADS2005A Manual*. Agilent Technologies Inc., Palo Alto/USA, 2005
- [8] *MATLAB Documentation*. MathWorks Inc., Natick, 2005.