

Ein UMTS-Testsignal für bio-elektromagnetische Experimente

Einleitung

Die für die nahe Zukunft geplante Markteinführung von UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), eines Mobilfunksystems der so genannten 3. Generation, hat die bereits im Zusammenhang mit dem bestehenden GSM-System geführte Diskussion über mögliche Gesundheitsrisiken neu entfacht. Insbesondere im Hinblick auf die bis zum Jahr 2003 erwarteten ca. 60.000 zusätzlichen Basisstation-Antennen scheint in Teilen der Bevölkerung die Angst vor einer Exposition durch elektromagnetische Felder zu wachsen. Unter Berücksichtigung der publizierten wissenschaftlichen Forschungsergebnisse zur Wirkung hochfrequenter Felder auf biologische Organismen kommt die durch die Bundesregierung eingesetzte Strahlenschutzkommission allerdings auch in ihrer jüngsten Empfehlung [1] zu dem Schluss, dass der Schutz der Bevölkerung durch die derzeitige gesetzliche Grenzwertregelung, die sich auf die EU-Ratsempfehlung [2] bzw. auf die Aussagen der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection [3] stützt, gewährleistet ist. Während die Grenzwerte mit einem vorsorglichen Sicherheitsabstand unterhalb der Schwelle für eine thermische Gewebelastung definiert sind, wird jedoch zuweilen behauptet, dass biologische Effekte oder sogar schädigende Einflüsse bereits bei Feldstärkewerten beobachtet worden seien, die deutlich kleiner als die festgesetzten Grenzwerte waren; häufig werden derartige Beobachtungen nicht direkt dem hochfrequenten Feld, sondern den ihm

aufmodulierten Signalen zugeschrieben, im Falle des GSM-Systems beispielsweise der typischen niederfrequenten Pulsung der Signale. Entsprechende Ergebnisse konnten bisher nicht reproduziert werden und gelten somit nicht als anerkannter Stand der Wissenschaft. Trotzdem empfiehlt die Strahlenschutzkommission, solchen Hinweisen nachzugehen und durch Intensivierung der Forschungsaktivitäten entsprechende Befunde zu bestätigen oder zu verwerfen. Da bisher keine Modelle für Mechanismen existieren, wie schwache elektromagnetische Felder des Mobilfunks auf biologische Systeme einwirken könnten, ist – zumindest zurzeit – kein theoretischer, sondern ausschließlich ein experimenteller Ansatz für Untersuchungen zu diesem Thema möglich, bei dem der zeitliche Verlauf des Mobilfunksignals eine Schlüsselrolle spielt.

In Forschungsprojekten zur Problematik UMTS – Biologisches System, die von der Forschungsgemeinschaft Funk initiiert werden, soll daher zwecks späterer Vergleichbarkeit mit anderen Experimenten ein einheitliches UMTS-Signalschema verwendet werden (im Folgenden „generisches UMTS-Testsignal“ genannt). Dazu ist es nicht erforderlich und auch gar nicht wünschenswert, ein echtes UMTS-Signal auszuwählen, das alle zur Realisierung einer Nachrichtenverbindung notwendigen Einzelheiten enthält. Vielmehr sollen, wie bereits bei dem in bio-elektromagnetischen Versuchen zum GSM-System eingesetzten Testsignal [4], diejenigen Anteile aus der Vielfalt sehr komplexer UMTS-Signale zu-

K

I

N

H

C

E

T

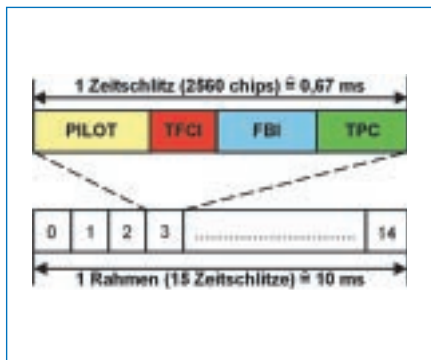


Bild 1: Struktur des Kontrollkanals am Beispiel des 'uplinks' [9]

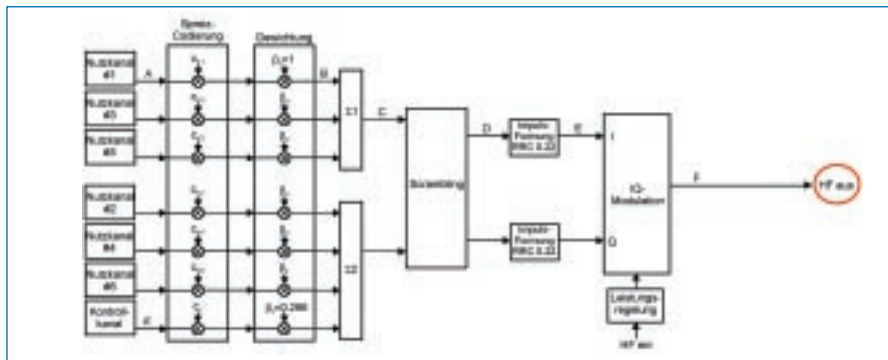


Bild 2: Blockschaltbild für die Signalaufbereitung des Sendeteils eines UMTS-Endgeräts

Erläuterungen zu Bild 1:

PILOT-Feld: Die Pilot-Bits werden für die Abschätzung der Übertragungsqualität und für die Rahmensynchronisation (FSW: Frame Synchronization Word) benötigt.

Transport Format Combination Indicator (TFCI): Die TFCI-Bits beinhalten die Information über die Datenraten der Nutzkanäle

Feedback Information (FBI): Die FBI-Informationen dienen der Unterstützung des sogenannten closed loop transmission diversity-Modus im 'downlink'. Bei diesem Modus wird das Signal eines Teilnehmers von der Basisstation mit zwei Antennen gesendet, um ungünstige Empfangsbedingungen des Endgeräts zu verbessern. Die vom Endgerät gesendeten FBI-Bits enthalten die notwendigen Kommandos zur Nachregelung der Phasen und Amplituden der beiden Sendesignale.

Transmit Power Control (TPC): Die TPC-Bits enthalten die Kommandos für die Leistungsregelung, die zum Ausgleichen des schnellen Fadings eingesetzt wird.

Bemerkung: Die PILOT- und TPC-Bits sind immer im Kontrollkanal vorhanden, während die TFCI und FBI-Bits optional sind.

sammengefasst werden, denen (zumindest von Mobilfunk-Kritikern) ein Potential für mögliche biologische Wirkungen zugetraut wird. Dies sind vor allem zeitliche Amplitudenschwankungen von Antennen-Sendesignalen, die in den Niederfrequenzbereich fallen, wo vorzugsweise auch natürliche biologische Vorgänge ablaufen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt – ausgehend von den wesentlichen Eigenschaften typischer Signale auf der UTRA-Luftschnittstelle (UMTS Terrestrial Radio Access [5, 6]) – den Entwurf eines für Expositionsversuche geeigneten generischen UMTS-Testsignals [7].

UMTS-Signaleigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Hauptmerkmale von UMTS-Signalen, die zwischen Sender und Empfänger transmittiert werden, kurz behandelt. Für einen ausführlicheren Überblick sei auf [8] verwiesen, umfangreiche Informationen sind in [9] enthalten, und die detaillierten technischen Spezifikationen finden sich im In-

ternet unter [10], insbesondere in [5, 6, 11-15].

UMTS ist ein digitales, voll duplexfähiges mobiles Nachrichtenübertragungssystem. Als Duplexverfahren zur Trennung der beiden Übertragungsrichtungen werden der Frequency Division Duplex (FDD)-Modus und der Time Division Duplex (TDD)-Modus verwendet.

Im TDD-Modus sind bei gleicher Frequenz die Sendesignale von Basisstation („downlink“) und Endgerät („uplink“) durch Zuweisung unterschiedlicher Zeitschlitze voneinander getrennt, so dass sich eine gepulste Signalstruktur ergibt. Da bei der Einführung von UMTS zunächst kein Zeit-Duplexverfahren (TDD) verwendet wird und die TDD-Betriebsart auch später auf lokale Systeme (Pikozellen) beschränkt bleiben soll, berücksichtigt dieser Artikel nur den FDD-Modus.

Der FDD-Modus des UMTS-Systems zeichnet sich dadurch aus, dass „uplink“- und „downlink“-Kanäle zeitgleich in getrennten Frequenzbändern mit einem Du-

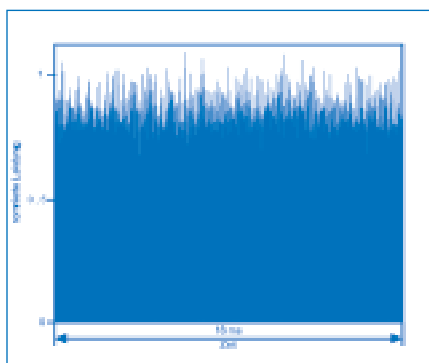


Bild 3: Zeitlicher Verlauf eines UMTS-Signals ohne Leistungsregelung

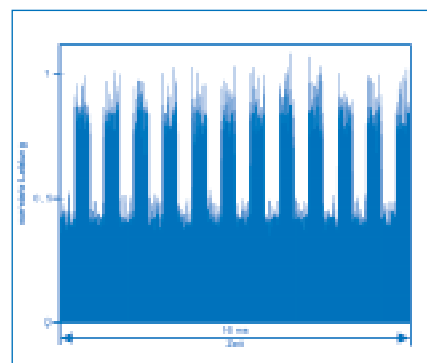


Bild 4: Zeitlicher Verlauf eines UMTS-Signals mit Leistungsregelung

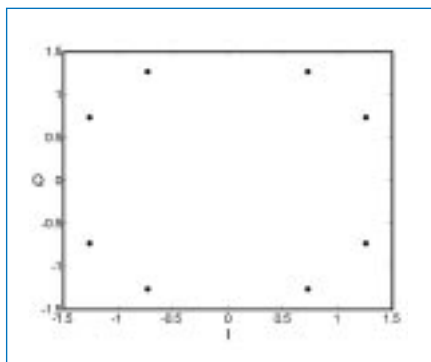


Bild 5a: Konstellationsdiagramm
(1 Nutzkanal mit 960kbit/s, 1 Kontrollkanal)
ohne Impulsformung

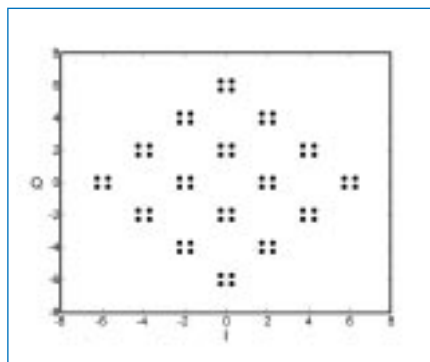


Bild 5b: Konstellationsdiagramm
(6 Nutzkanäle mit 960kbit/s, 1 Kontrollkanal)
ohne Impulsformung

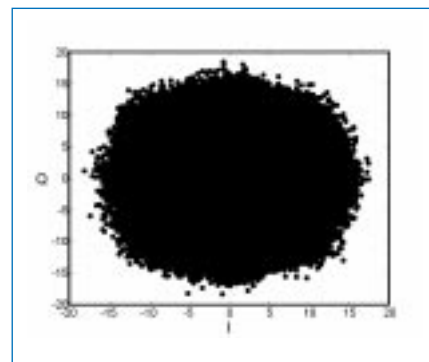


Bild 5c: Konstellationsdiagramm
(6 Nutzkanäle mit 960kbit/s, 1 Kontrollkanal)
mit Impulsformung

plexabstand von 190 MHz übertragen werden. Für den FDD-Betrieb des UMTS-Systems ist der Frequenzbereich 1,92-1,98 GHz („uplink“) und 2,11-2,17 GHz („downlink“) vorgesehen.

Bei UMTS kommt die Code Division Multiple Access (CDMA)-Technologie als Vielfachzugriffsverfahren zum Einsatz. Dieses Verfahren erlaubt die gleichzeitige Ausnutzung der Funkressourcen eines Mobilfunksystems durch mehrere Teilnehmer. Der Hauptunterschied zu den beispielsweise beim GSM-Mobilfunksystem eingesetzten Vielfachzugriffsverfahren Frequency Division Multiple Access (FDMA) und Time Division Multiple Access (TDMA) besteht darin, dass bei CDMA alle Teilnehmer im selben Frequenzband gleichzeitig kommunizieren. Die Trennung der Teilnehmersignale erfolgt durch Bewertung mit orthogonalen Spreiz- und ‘scrambling’-Codes, die die Identifizierung der einzelnen Basisstationen und Teilnehmer erlauben und gewährleisten, dass zugewiesene Informationen nur von den berechtigten, nicht jedoch von anderen Teilnehmern entschlüsselt werden können. Die Codes bestehen aus binären Chipfolgen der Chiprate 3,84MChip/s, mit denen sowohl die nachrichtentragenden Nutzsignale als auch die Kontrollsignale, die der Übertragung notwendiger Steuerinformationen für das System dienen, multipliziert werden. Durch die Spreizcodes wird die Bandbreite jedes Kanals auf etwa 5 MHz verbreitert, unabhängig von der Bruttodatenrate der Signale, die maximal 960 kbit/s betragen darf.

Der Kontrollkanal wird im ‘uplink’ mit eigenem Spreizcode parallel und im ‘downlink’ mit gleichem Spreizcode seriell zu den Nutzkanälen übertragen (vgl. [8]). Während die Nutzkanäle kontinuierlich mit den Signalinhalten gefüllt sein können, weist der Kontrollkanal immer eine logische Struktur auf, bei der definierten Zeitabschnitten bestimmte Kommandofunktionen zugeordnet sind [12] (vgl. Bild 1).

Im ‘uplink’ wie im ‘downlink’ werden die zu einer Verbindung gehörenden Nutz- und Kontrollkanäle codiert, gewichtet und nach einer 90°-Phasenverschiebung eines Teils der Signale so überlagert, dass eine komplexwertige Chipfolge entsteht, aus der – nach einer weiteren (‘complex scrambling’-) Codierung und einer Impulsformung durch ein Wurzel-Cosinus-Filter (Root Raised Cosine Filter RRC 0.22 mit ‘roll-off’-Faktor von 0,22) – die Eingangssignale für den In-Phase- bzw. für den Quadratur-Eingang eines IQ-Modulators (QPSK-Modulator) gebildet werden, in dem die Phasenlage des hochfrequenten Trägersignals im Takt der Eingangssignale umgetastet wird.

Bild 2 zeigt das Blockschaltbild für die Signalaufbereitung am Beispiel des Sendeteils eines UMTS-Endgerätes, Bild 3 einen Ausschnitt aus dem berechneten zeitlichen Verlauf eines UMTS-Signals auf der Luftschnittstelle (an Punkt F in Bild 2, hier als Leistung des äquivalenten Tiefpass-Signals dargestellt), das durch die Überlagerung eines 960 kbit/s-Nutzsignals (Bruttodatenrate) mit einem typischen Kontrollsignal und anschließender QPSK-Modulation erzeugt wurde. Offensichtlich unter-

liegt die Einhüllende des HF-Signals zeitlichen Variationen; deren Form hängt ab von der Anzahl überlagerter Kanäle, ihrer Datenraten und Signalformen.

Eine essentielle Eigenschaft von UMTS ist die Implementierung einer sehr schnellen Regelung der Sendeleistung, die einerseits sicherstellen soll, dass – selbst bei einem mit hoher Geschwindigkeit bewegten mobilen Teilnehmer – Schwankungen der Empfangsfeldstärke durch zeitvariante Funkfelddämpfung oder Interferenzen bei Mehrwegeempfang nicht zu einer Beeinträchtigung der Übertragungsqualität führen, und die andererseits zur Minimierung der Leistung aller Signale notwendig ist, damit das für den jeweiligen Empfänger bestimmte Signal nicht durch die Überlagerung von gleichzeitig im selben Frequenzband gesendeten stärkeren CDMA-Signalen gestört wird. Bei einer bestehenden Verbindung teilt der Empfänger durch Übermittlung von Transmit Power Control (TPC)-Kommandos, die im Zeitschlitztakt des Kontrollkanals (1500 Hz) übertragen werden, der Senderseite mit, ob die Leistung gesteigert oder erniedrigt werden soll. Im ‘uplink’ kann die Leistung alle 0,67 ms = 1/1500 Hz in Stufen von 1, 2 oder 3dB bis zu einer Gesamtdynamik von 83 dB geregelt werden [11], während ein Leistungsinkrement im ‘downlink’ 0,5 dB bzw. 1 dB bei einer Regeldynamik von mindestens 18 dB beträgt [6]. Unter Berücksichtigung der Leistungsregelung könnte das Signal aus Bild 3 beispielsweise wie in Bild 4 gezeigt modifiziert sein. Es ist ersichtlich, dass die durch die Leistungsregelung



Bild 6: Bitstruktur eines Zeitschlitzes des Kontrollkanals am Beispiel des 'uplinks'

Erläuterungen zu Bild 6:

Der UMTS-Kontrollkanal hat eine Datenrate von 15 kbit/s. Dies entspricht 10 Bits pro Schlitz. Nachfolgend wird die konkrete Belegung der Zeitschlitz des nachgebildeten Kontrollkanals beschrieben.

Das PILOT-Feld wird als eine deterministische Bitfolge mit 6 Bits pro Zeitschlitz realisiert. Die Belegung der jeweiligen Zeitschlitz innerhalb eines Rahmens ist in [12] spezifiziert und in Tabelle 1 angegeben.

Bit-Nummer	1	2	3	4	5	6
Zeitschlitz-Nummer 1	1	1	1	1	1	0
Zeitschlitz-Nummer 2	1	0	0	1	1	0
Zeitschlitz-Nummer 3	1	0	1	1	0	1
Zeitschlitz-Nummer 4	1	0	0	1	0	0
Zeitschlitz-Nummer 5	1	1	0	1	0	1
Zeitschlitz-Nummer 6	1	1	1	1	1	0
Zeitschlitz-Nummer 7	1	1	1	1	0	0
Zeitschlitz-Nummer 8	1	1	0	1	0	0
Zeitschlitz-Nummer 9	1	0	1	1	1	0
Zeitschlitz-Nummer 10	1	1	1	1	1	1
Zeitschlitz-Nummer 11	1	0	1	1	0	1
Zeitschlitz-Nummer 12	1	1	0	1	1	1
Zeitschlitz-Nummer 13	1	1	0	1	0	0
Zeitschlitz-Nummer 14	1	0	0	1	1	1
Zeitschlitz-Nummer 15	1	0	0	1	1	1

Tabelle 1: Belegung der Zeitschlitzes des Kontrollkanals: Für den TFCI wurde der Wert 0 gewählt und entsprechend der Spezifikation [12] zu einem 30 Bit langen Wort codiert, das sequentiell mit jeweils zwei Bits auf die Zeitschlitz verteilt wird. Die Wahl des TFCI kann hier willkürlich erfolgen, da keine Nachricht übertragen werden soll.

Die TPC-Bits werden durch einen Zufalls-generator realisiert und belegen paarweise gemäß [12] aufeinanderfolgende Zeitschlitzes. Die erwähnten FBI-Bits (vgl. Bild 1) werden hier nicht berücksichtigt, da sie nur bei einem speziellen Übertragungsmodus gesendet werden.

bedingten Variationen der Einhüllenden die bisher diskutierten Schwankungen deutlich überwiegen können.

Neben dem beschriebenen normalen Übertragungsmodus kennt das UMTS-System weitere spezielle Betriebsarten, von denen hier nur einige erwähnt werden sollen: DTX (Stichwort: Übertragungspause), 'packet mode' (Stichwort: SMS), 'compressed mode' (Stichwort: 'handover'), 'power save mode' (noch in Planung) und 'PRACH mode' (Stichwort: Gesprächsaufbau).

Generisches UMTS-Testsignal

Zur Konzipierung eines einheitlichen Expositionssignals für biologische Experimente, die zum Nachweis oder Ausschluss des Einflusses von Hochfrequenzfeldern des Mobilfunks durchgeführt werden, ist es wichtig, dass die Mechanismen, die im praktischen System zu zeitlichen Amplitudenänderungen der Sendesignale führen können, im Sinne eines 'worst case'-Cocktails in angemessener Weise kombiniert werden. Dabei muss jeder Mechanismus so stark gewichtet werden, dass sein Auftreten im realen System mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit denkbar ist.

Nachstehend wird erläutert, welche Überlegungen hinter der Auswahl der jeweiligen Parameter für das generische UMTS-Testsignal stehen.

Grundsätzliche Auswahlkriterien sind:

1. Die Festlegungen müssen sich an den technischen Spezifikationen des UMTS-Systems orientieren, damit das Testsignal weitgehend der Realität angepasst ist.

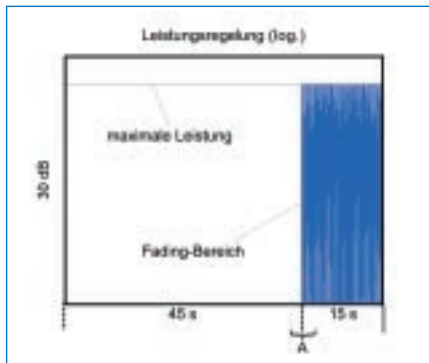


Bild 7a: Leistungsregelung (Gesamtausschnitt)

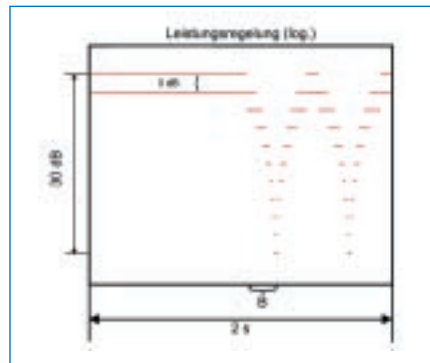


Bild 7b: Leistungsregelung (Ausschnitt A)

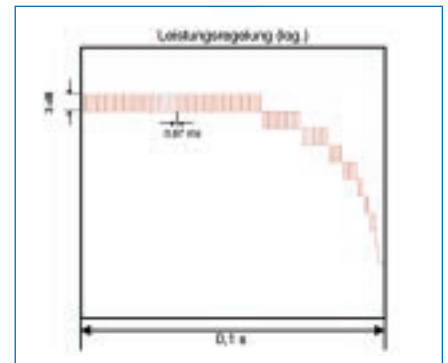


Bild 7c: Leistungsregelung (Ausschnitt B)

2. Der Schwerpunkt wird auf die von Mobilfunksystemen der 2. Generation (GSM, DECT) abweichenden Charakteristika gelegt.

3. Es sind diejenigen Parameter zu identifizieren, die einen Einfluss auf die zeitlichen Schwankungen des hochfrequenten Signals auf der Luftschnittstelle haben.

4. Die Kombinationen der diversen Parameter sind so zu gestalten, dass im Sinne einer 'worst case'-Betrachtung eine maximale Signalvariation mit niederfrequenten Spektralanteilen erzielt wird.

5. Zur Verwendung als Expositionssignal in biologischen Experimenten muss das Signal periodisch fortgesetzt werden mit einer Wiederholrate, die deutlich unterhalb der Modulationsfrequenzen realer UMTS-Signale sowie der für biologische Abläufe maßgeblichen Frequenzen liegt.

Unter diesen Prämissen werden die folgenden Eigenschaften fixiert:

FDD- oder TDD-Modus: Aus den bereits oben angeführten Gründen und weil außerdem bereits Ergebnisse aus etlichen biologischen Experimenten mit GSM-Signalen, deren Zeitschlitzstruktur dem TDD-Modus von UMTS ähnelt, vorliegen, wird es hier als sinnvoll erachtet, ein UMTS-Testsignal im FDD-Modus nachzubilden.

Trägerfrequenz: Es ist allgemein akzeptiert, dass so genannte „Fenstereffekte“ bei biologischen Systemen in einem Frequenzintervall von nur 15 % relativer Bandbreite, wie es beim FDD-Betrieb ausgenutzt wird, nicht zu erwarten sind; daher hat die definitive Wahl der Trägerfrequenz des

generischen UMTS-Testsignals keine wesentliche Relevanz für das biologische Experiment.

Modulation: Die technisch einfachste Lösung der Verwendung eines HF-Signals mit Rauschzusatz, das die häufig als „rauschähnlich“ bezeichneten UMTS-Signale [8] repräsentieren könnte, verbietet sich deshalb, weil die typische Bandbreite und die diskreten Spektralanteile eines realen Signals damit nicht nachgebildet werden können. Daher ist es notwendig, das generische UMTS-Testsignal über ein Verarbeitungsschema zu erzeugen, das sich eng an die in Bild 2 gezeigten, für das UMTS-System spezifizierten Funktionsblöcke anlehnt: Spreizcodierung der seriellen binären Datenkanäle (Nutz- und Kontrolldaten), Gewichtung, $/2$ -Phasenverschiebung und Summation zweier oder mehrerer Kanäle zu einer „komplexen“ Chipsequenz ($(1 + j)2$), Multiplikation mit einem „komplexen“ 'scrambling'-Code und physikalische Trennung von I- und Q-Kanal, Impulsformung und I/Q-Modulation.

Damit sind bereits zwei Ursachen für realistische Signalschwankungen berücksichtigt: Während sich beispielsweise bei nur einem binären Eingangssignal (+ 1 Kontrollsignal) ein Konstellationsdiagramm gemäß Bild 5a einstellt, das nur wenige (näherungsweise diskrete) Phasenzustände und somit nur geringfügige Amplitudenschwankungen repräsentiert, ist mit einer größeren Anzahl von belegten Eingangskanälen eine Auffüllung des Konstellationsdiagramms verbunden (vgl. Bild 5b für 6 Nutzsingale + 1 Kontrollsignal),

so dass die Phase eine deutlich höhere Wertigkeit annimmt und die zugehörigen Signalamplituden ebenfalls erheblich größere Unterschiede aufweisen. Außerdem bewirkt das Wurzel-Cosinus-Filter zur Impulsformung eine Beschneidung des Spektrums, was weitere Verformungen des Signals, also eine Erhöhung der Anzahl unterschiedlicher Amplituden zur Folge hat (vgl. Bild 5c). Der konkrete Verlauf der zeitlichen Variationen der Einhüllenden des HF-Signals auf der Luftschnittstelle hängt wesentlich auch von den Mustern der Eingangssignale ab, die für ein reproduzierbares Testsignal spezifiziert werden müssen.

Kontrollsignale: Aufgrund der in Abschnitt 2 beschriebenen Struktur des Kontrollkanals können sich periodisch im Rahmen- (1/100Hz) oder Schlitztakt (1/1500Hz) wiederkehrende Kontrollsequenzen in entsprechend niederfrequenten Schwankungen der Einhüllenden niederschlagen. Daher ist es notwendig, für die Nachbildung der Kontrollsignale in dem generischen UMTS-Testsignal an reale Formate angelehnte Datensequenzen in Übereinstimmung mit [12] zu verwenden. Als Belegung der Zeitschlitze des Kontrollkanals werden für das generische UMTS-Testsignal die in Bild 6 dargestellten Festlegungen getroffen.

Nutzsignale (nachrichtentragende Signale): Die Nutzsignale besitzen im normalen Betriebsmodus keine mit dem oben erwähnten Rahmenformat vergleichbare Struktur; deshalb ist ihre konkrete Nachbildung für ein generisches UMTS-Test-

	Codebezeichnung	Codelänge	Chipsequenz
Nutzkanäle	$C_{ch,4,0}$	4 Chips	{1,1,1,1}
	$C_{ch,4,1}$	4 Chips	{1,1,-1,-1}
	$C_{ch,4,2}$	4 Chips	{1,-1,1,-1}
	$C_{ch,4,3}$	4 Chips	{1,-1,-1,1}
Kontrollkanal	$C_{ch,256,0}$	256 Chips	{1,1,1,1,1,1,.....,1}

Tabelle 2: Spreiz-Codes des generischen UMTS-Signals

signal von sekundärer Bedeutung. So könnte man für ein Signal mit niedriger Datenrate ein beliebiges Sprachsignal und für ein Breitbandsignal eine Folge von Rechnernetzdaten wählen. In beiden Fällen können aber auch Pseudobitfolgen zur Anwendung kommen, was auch mit Vorteilen bei der technischen Realisierung verbunden ist.

Da in eigenen Rechnersimulationen für die höchste bei UMTS im FDD-Modus ('uplink') vorgesehene Datenrate von 960 kbit/s größere Signalschwankungen mit den hier relevanten Frequenzkomponenten gefunden wurden als bei geringeren Bitraten, wird im Sinne der 'worst case'-Regel entschieden, beim generischen UMTS-Testsignal mit dieser hohen Datenrate zu arbeiten.

Der Inhalt des Datenkanals wird durch eine so genannte Pseudonoise-Bitfolge (PN-Folge) nachgebildet. Eine PN-Folge ist eine konstruierte periodische, zeitdiskrete Binärfolge, die in ihren Eigenschaften einer Zufallsfolge (zufällig verteilte, binäre Zeichen gleicher Auftrittswahrscheinlichkeit) nahe kommt [16]. Hier wird als PN-Folge eine binäre 'maximum length'-Folge verwendet.

Anzahl der Nutzkanäle: Für den 'downlink' (Basisstations-Sendesignal) ist in der Praxis immer von einer Überlagerung vieler Kanäle (z. B. > 50) auszugehen, die von einer Basisstation mit demselben ('long') scrambling code, aber unterschiedlichen 'spreading codes' gesendet werden. Ein Endgerät kann im 'uplink' neben dem Kontrollkanal maximal sechs Nutzkanäle mit verschiedenen 'spreading codes' und einem gemeinsamen 'scrambling code' verarbeiten.

Abgesehen von Details, die aber nur für die Signalverarbeitung von Interesse sind, ähneln sich die Signale einzelner Kanäle in ihrer grundsätzlichen Zeit- und Frequenzstruktur.

Die durch die schnelle Leistungsregelung ausgelösten dominanten Signalvariationen wirken sich im 'uplink' stärker aus als im 'downlink', da sie beim Endgerät die gesamte Sendeleistung betreffen, während von der Basisstation ständig ein 'common channel' konstanter Leistung zusätzlich zu den vielen, nicht synchron zueinander leistungsgeregelten Verkehrskanälen abgestrahlt wird, sodass die Schwankungen des Gesamtsignals hier weniger deterministisch, als vielmehr rauschähnlich ausfallen.

Daher wird für das generische UMTS-Testsignal in Anlehnung an den Vollbetrieb eines Endgerätes eine Überlagerung von 6 synchron leistungsgeregelten Nutzkanälen der Bruttodatenrate 960 kbit/s (zuzüglich eines Kontrollkanals) vorgesehen.

Spezielle Betriebsarten: Diejenigen Betriebsarten des UMTS-Systems, die nur temporär auftreten, wie DTX, 'packet mode' usw., sollten für das generische UMTS-Testsignal unberücksichtigt bleiben, weil biologische Experimente meist über längere Zeiträume durchgeführt werden und die genannten Betriebsarten somit im Vergleich zum normalen Übertragungsmodus nicht relevant sind. Außerdem gehen die meisten dieser Betriebszustände mit einer dem TDD-Modus ähnlichen Signalstruktur einher, so dass die Erkenntnislage aus biologischen Untersuchungen im GSM-Bereich voraussichtlich übertragbar ist.

Spreiz-Codes: Die Wahl der in relativ engen Grenzen vorgeschriebenen 'sprea-

ding codes' [14] bewirkt bezüglich der zeitlichen Schwankungen keine nennenswerten Unterschiede im Signal auf der Luftschnittstelle. Für die im generischen UMTS-Testsignal verwendeten Spreiz-Codes kommen die Chipfolgen gemäß Tabelle 2 zur Anwendung.

'scrambling codes': Für die Signalschwankungen ist maßgeblich, ob bei den 'scrambling codes' nach [14] lange oder kurze Sequenzen verwendet werden. Grundsätzlich treten bei 'long scrambling codes' 100 Hz-Anteile und Harmonische auf, während bei 'short scrambling codes' zusätzlich 1,5 kHz- und 15 kHz-Anteile einschließlich ihrer Harmonischen möglich sind. Letztere müssen als 'worst case' betrachtet werden und sind somit für das generische UMTS-Testsignal vorzusehen. Die 'short scrambling'-Codes, deren Bildungsgesetz in [14] angegeben ist, haben eine Länge von 256 Chips und sind durch ihre Codenumber eindeutig spezifiziert. Von den insgesamt 224 möglichen Codes wird für das generische UMTS-Testsignal der Code mit der Codenumber 30 ausgewählt.

Leistungsregelung ('inner loop power control'): Wie in Abschnitt 2 gezeigt, ist die Leistungsregelung die zweite wesentliche Ursache für Veränderungen der HF-Sendeleistung, also für weitere niederfrequente Variationen der Einhüllenden des Signals auf der Luftschnittstelle. Sie soll Schwankungen der Empfangsleistung minimieren, die durch die – meist unbekannte – Zeitvarianz der Übertragungsfunktion der Luftschnittstelle verursacht werden. Zur Beschreibung der räumlichen Änderung der Funkfelddämpfung existieren für den Frequenzbereich um 2 GHz semi-empirische, auf Messungen basierende Standards (erweitertes COST-Hata-Modell, COST-Walfisch-Ikegami-Modell), die aber lediglich eine Aussage über die zu erwartende mittlere Funkfelddämpfung in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Umgebung ('rural', 'urban' etc.), vom Abstand des Mobilteils von der Basisstation und von den

UMTS

Antennenhöhen gestatten [17]. Die überlagerten räumlichen und zeitlichen Variationen der Funkfelddämpfung, die für die Nachbildung eines konkreten Regelsignals zu analysieren sind, lassen sich nur mit Hilfe stochastischer Modelle [18] oder anhand einer deterministischen Feldanalyse ausgewählter Szenarien für Landschafts- oder Bebauungstopologien gewinnen.

Für das generische UMTS-Testsignal wird ein Zeitverlauf der Ausgangsleistung festgelegt (Bilder 7a, 7b und 7c), der zum einen typische Merkmale der schnellen Leistungsregelung enthält und zum anderen eine Periodizität des Gesamtsignals sowie eine relativ geringe Differenz zwischen mittlerer und maximaler Leistung sicherstellt (ca. 2dB).

Ein derartiges Expositionssignal könnte in der Praxis beispielsweise dann auftreten, wenn ein Mobilfunkteilnehmer zunächst 45 s lang an einem Ort mit sehr schlechten Empfangsbedingungen verweilt (die Sendeleistung bleibt maximal mit der immer überlagerten Regelschwankung (hier 3 dB)) und sich dann für 15 s in einem Bereich mit variierenden Empfangsbedingungen bewegt, wobei die Sendeleistung alle 0,67 ms (1/1500 Hz) in 3 dB-Stufen dem Fadingverlauf antikorreliert angepasst wird.

Absolute HF-Leistung: Die für UMTS spezifizierte maximale Ausgangsleistung eines Endgerätes ('user equipment') beträgt 2 W. Demgegenüber wird die von einer Basisstation stammende und in einem zulässigen Abstand auf eine Person treffende Gesamtleistung normalerweise viel geringer als die von einem Endgerät gesendete Leistung sein. Hinzu kommt, dass wegen der bereits oben erwähnten Forderung nach gleichwertigen Empfangssignalen verschiedener Kanäle die Sendeleistungen immer auf den geringstmöglichen Pegel geregelt werden.

Die in biologischen Experimenten verwendeten Leistungen orientieren sich indes nicht an den in der Praxis tatsächlich auftretenden sehr kleinen Leistungen, son-

dern – wegen des Ziels des Nachweises bzw. der Widerlegung eines biologisch relevanten Effektes – nach der Spezifischen Absorptionsrate, die einem System zugemutet werden kann, ohne dass Grenzwerte, die sich meist auf die thermische Schwelle beziehen, überschritten werden. Um derart hohe SAR-Werte im Experiment zu erreichen, sind bei 'in vivo'-Versuchen generell deutlich höhere HF-Leistungen erforderlich, als sie bei UMTS vorkommen. Sie hängen wesentlich von Anzahl, Form und Materialparametern der Versuchsobjekte sowie von der Art der benutzten Expositionseinrichtung ab (vgl. [19]).

Die Leistung des generischen UMTS-Testsignals muss also für das jeweils beabsichtigte Experiment neu angepasst werden.

Zusammenfassung: Der Artikel beschreibt detailliert die Eigenschaften eines generischen UMTS-Testsignals, das als Expositionssignal in Experimenten zum Einsatz kommen soll, die die Untersuchung der Verträglichkeit biologischer Systeme mit modulierten elektromagnetischen Feldern zum Ziel haben. Das Signal enthält einen Cocktail derjenigen neuen UMTS 'features', die aufgrund ihres Beitrags zu niederfrequenten Signalfluktuationen als biologisch relevant angesehen werden könnten.

Für die praktische Realisierung des vorgeschlagenen generischen UMTS-Testsignals wurde ein Signalgenerator entwickelt (GUS 6960 S), der bei fest programmierter Signalform mittlere Ausgangsleistungen zwischen -20 dBm und +10 dBm liefert und unmittelbar zur Ansteuerung eines HF-Leistungsverstärkers geeignet ist.

Die Autoren danken allen Mitgliedern der 'ad hoc'-Arbeitsgruppe „UMTS-Signal“ der Forschungsgemeinschaft Funk für ihre Mitwirkung bei der Festlegung der Signalspezifikationen.

Dr. J. Streckert, Dr. H. Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, Dr. A. Bitz, Prof. Dr. V. Hansen Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Bergische Universität Wuppertal

Literatur

- [1] Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Juli 2001.
- [2] EU-Kommission: Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder (0Hz - 300GHz). 1999/519/EG, Juli 1999.
- [3] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, 74, 494-522, 1998.
- [4] Schüller, M., Streckert, J., Bitz, A., Menzel, K., Eicher, B.: Proposal for generic GSM test signal. Proc. 22st BEMS Annual Meeting, Munich, Germany, 122-123, 2000.
- [5] 3G TS 25.102: Universal Mobile Telecommunication System (UMTS); UTRA (UE) TDD; Radio Transmission and Reception (FDD), Version 3.1.0, January 2000.
- [6] 3G TS 25.104: 3rd Generation Partnership Project (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks UTRA (BS) FDD; Radio transmission and reception, Version 3.2.0, March 2000.
- [7] Bitz, A., Bökelmann, V., Gerhardt, D., Hansen, V., Hombach, V., Streckert, J., Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H.: A generic UMTS test signal for bio-experiments. 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA), Helsinki, Finland, 173-174, 2001.
- [8] Steiner, B.: Neue Technologie UMTS - das Mobilfunksystem der nächsten Generation. FGF Newsletter, 8, 16-22, 1/2000.
- [9] Holma, H., Toskala, A.: WCDMA for UMTS, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, Revised Edition Spring 2001.
- [10] <http://www.3gpp.org>
- [11] 3G TS 25.101: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Networks; UE Radio transmission and Reception (FDD), Version 3.2.2, April 2000.
- [12] 3G TS 25.211: Universal Mobile Telecommunication System (UMTS); Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD), Version 3.3.0, June 2000.
- [13] 3G TS 25.212: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Multiplexing and channel coding (FDD), Version 3.2.0, March 2000.
- [14] 3G TS 25.213: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Spreading and modulation (FDD), Version 3.2.0, March 2000.
- [15] 3G TS 25.214: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer procedures (FDD), Version 3.2.0, March 2000.
- [16] Lüke, H.D.: Signalübertragung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999.
- [17] Geng, N., Wiesbeck, W.: Planungsmethoden für die Mobilkommunikation: Funknetzplanung unter realen physikalischen Ausbreitungsbedingungen. Springer-Verlag, Berlin 1998.
- [18] Proakis, J.G.: Digital Communications. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [19] Streckert, J., Bitz, A., Hansen, V., Buschmann, J.: High SAR exposure of 24 rats at 900 MHz: problems of temperature limits and uniform field distribution. Millenium Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Heraklion, Greece, October 2000, 185-195. ■