

Exposé

Optimiertes Messverfahren für Raumimpulsantworten

André Giese
TU Berlin
Fachgebiet Kommunikationswissenschaft / Audiokommunikation
andreATfosburyflop.de

Abstract

Die Messung von Datensätzen binauraler Raumimpulsantworten für die Anwendung in der virtuellen Akustik (Auralisation, dynamische Binauralsynthese) erfordert eine hohe Anzahl Einzelmessungen mit hohem Signalrauschabstand. Lange Nachhallzeiten und hohes Grundrauschen erfordern lange Messzeiten und die Anwendung von Mittelungsverfahren. Das am Fachgebiet entwickelte automatische Kunstkopfmesssystem FABIAN verwendet dazu spektral gefärbte Sweeps¹ von 0,7-6 Sekunden Dauer mit 2- bis 8-facher Mittelung. Bei bis zu 2000 Einzelmessungen je Quelle-Empfängerposition entstehen so hohe Gesamtmessdauern. Unter Verwendung mehrerer Quellen erlaubt die Erweiterung der klassischen Sweepmesstechnik [Müller & Massarani, JAES, 2001] durch Interleaving und Overlapping („MESM“ – multiple exponentielle Sweep Methode) eine Beschleunigung des Messverfahrens um bis zu Faktor 4.

Einleitung

TUB-Auralisierungsverfahren

Im Rahmen des sich in Planung befindlichen Forschungsprojektes „*TUB-Auralisierungsverfahren*“ sollen laut Projektantrag Hörversuche zur Ermittlung kritischer Parameter bei der binauralen Simulation mit mehreren Freiheitsgraden durchgeführt werden. (vgl. Weinzierl 2006). Zu diesem Zweck benötigt man eine schnelle Echtzeitfaltungssoftware sowie einen oder mehrere Sätze binauraler Raumimpulsantworten. Die Software wurde bereits im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „VEP-Virtual Electronic Poem“² erstellt. Zur Erfassung der binauralen Raumimpulsantworten wurde 2006 im Rahmen einer Magisterarbeit ein Messroboter nebst Steuerungssoftware entwickelt.

Binauraltechnik

Bei der Binauraltechnik wird der Eindruck der Wahrnehmung eines realen Schallfeldes kopfhörerbezogen hervorgerufen. Im Gegensatz zur Wellenfeldsynthese, bei der man ein tatsächliches im Raum befindliches physisches Schallfeld synthetisiert, existiert dieses bei der Binauraltechnik nicht. Vielmehr werden die akustischen Verhältnisse an den Orten der Sinnesorgane nachempfunden, wie sie sich bei tatsächlichem Vorhandensein eines solchen Schallfeldes darstellen würden.

Die Wiedergabesignale werden in Echtzeit, in Abhängigkeit von der Kopfposition und Kopfausrichtung des Hörers erzeugt, welche durch ein Headtracking-System ermittelt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von dynamischer Auralisation. Dabei bedient man sich der Aufmodellierung (Faltung) einer räumlichen Information auf ein nachhallfrei aufgenommenes Quellsignal. Diese räumlichen Informationen sind in Form von binauralen Raumimpulsantworten (BRIRs)³ vorhanden. Diese müssen zuvor je simuliertem Wiedergaberaum für ein diskretes Raster an möglichen Kopfpositionen für alle gewünschten Quellpositionen erstellt werden.

¹ 20 Hz - 21.2kHz bandpassgefilterte lineare Sweeps mit 20 dB Bassemphase

² Hier wurde eine historische Klanginstallation in Echtzeit akustisch rekonstruiert.

³ Engl. Abk. f. Binaural Room Impulse Response

Stand der Forschung

Messung von Raumimpulsantworten mit exponentiellen Sweeps

Zur elektroakustischen Vermessung von Raumimpulsantworten (RIRs)⁴ wendet man die Theorie der Signale und Systeme an⁵. Dabei wird eine bestimmte Übertragungsstrecke als lineares, zeitinvariantes System angesehen. Dies ist in der Raumakustik typischerweise der Weg vom Eingang einer Box zu dem Ausgang eines Mikrophons, wobei sich diese beiden Komponenten innerhalb des zu vermessenen Raumes befinden. Das System wird mittels eines bekannten zeitdiskreten Signals $x[n]$ angeregt und die Systemreaktion $y[n]$ digital aufgezeichnet. Die komplexe Übertragungsfunktion $H(\Omega)$ ergibt sich im Frequenzbereich aus $Y(\Omega)/X(\Omega)$, dem Quotienten der Spektren von Aus- und Eingangssignal⁶. Eine anschließende IFFT liefert die gewünschte Raumimpulsantwort $h[n]$.

Eine *binurale* Raumimpulsantwort besteht immer aus zwei Impulsantworten, da die Systemreaktion zweikanalig am linken und rechten Ohr eines Kunstkopfes bzw. HATS⁷-Systems aufgenommen wird. Die Signale beider Kanäle stehen in einem interauralen Kontext, d.h. zusätzlich zu den spektralen Verfärbungen, die durch die Richtwirkung des jeweiligen Außenohres bzw. durch Reflexions-, Absorptions- und Beugungseffekte des Torsos entstehen, treten durch das Hindernis Kunstkopf und durch den Abstand beider Mikrophone Pegel- und Phasendifferenzen auf. Dadurch wird in einer späteren Auralisation der reale Klangeindruck hervorgerufen.

Theoretisch können bei dem oben beschriebenen FFT-Entfaltungsverfahren beliebige Zeitsignale für die Anregung verwendet werden. Da ein Raum nur akustisch vermessen werden kann, muss das vorerst digital vorliegende Anregungssignal durch einen DA-Wandler und einen Lautsprecher in ein akustisches Signal gewandelt werden. Dabei treten vor Allem an der Lautsprechermembran Verzerrungen in Form von Obertönen auf. Diese gehen in die Systemantwort mit ein und können die später daraus gewonnene RIR unbrauchbar machen. Bei einer Anregung mittels stochastischen Rauschens beispielsweise, äußert sich ein entfalteter Oberton wiederum als Rauschen, welches sich gleichmäßig über die gesamte Länge der Impulsantwort verteilt. Farina (2000) zeigte, dass bei Verwendung exponentieller Sweeps⁸ die Möglichkeit existiert, die lineare Impulsantwort von derartigen Verzerrungsprodukten frei zu halten.

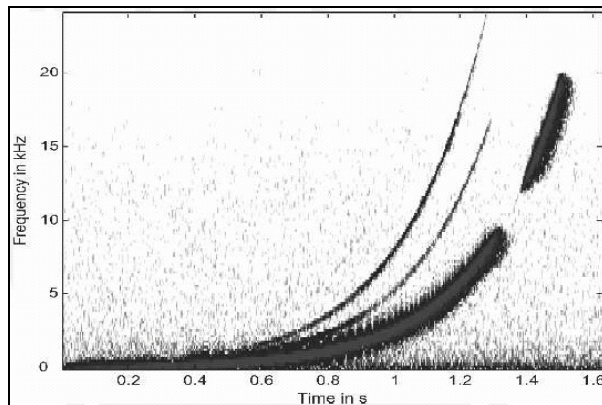


Abbildung 1 Spektrogramm eines verhalten, exponentiellen Sweeps mit Obertönen,
Nach Majdak et al. (2007)

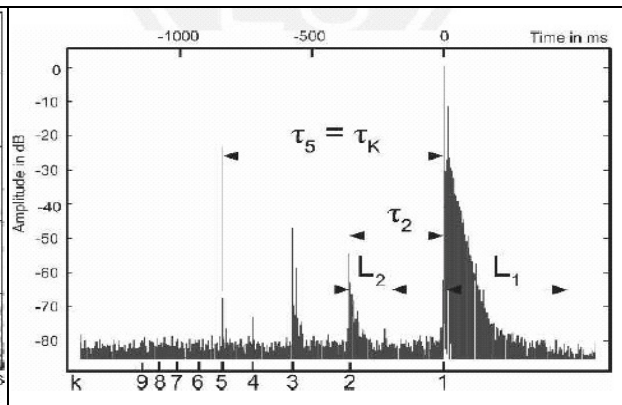


Abbildung 2 ETC der entfaltenen Systemantwort aus Abbildung 1,
 L_1 : Länge der LIR, links davon in aufsteigender Reihenfolge: HIRs,
Nach Majdak et al. (2007)

⁴ Engl. Abk. f. Room Impulse Response

⁵ Ausführliche Behandlung des Themas zu finden bei Oppenheim und Willsky (1992)

⁶ Beide Signale werden vorher mittels der Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich übertragen

⁷ Engl. Abk. f. Head and Torso Simulator

⁸ Kontinuierliches Sinussignal mit variabler Frequenz; die Frequenz ändert sich um einen festen Faktor je Zeitintervall

Hier bildet die Fundamentalschwingung und jeder Oberton in der entfalteten Systemantwort eine jeweils eigene Harmonische Impulsantwort (HIR⁹) aus, deren zeitliche Position zudem genau bestimmbar ist. Bei genügend großer Sweeplänge überlagern sich die einzelnen HIRs nicht, so dass die lineare Impulsantwort (LIR) durch einfache Fensterung gewonnen werden kann (vgl. Abbildungen 1 & 2).

Vorteile von spektral gefärbten Sweeps

Im Zusammenhang mit einem möglichst großen Dynamikumfang stellt der Signalrauschabstand (SNR) das wichtigste Qualitätskriterium bei der Gewinnung von BRIRs dar. Dieser gibt das Verhältnis von Maximalamplitude der Impulsantwort zu dem darin enthaltenen Rauschen an. Da der SNR frequenzunabhängig sein sollte, ist es notwendig, das Anregungssignal entsprechend spektral zu färben. Da das Grundgeräuschkennlinien in großen Räumen zu tiefen Frequenzen typischerweise um ca. 3 dB/Oktave steigt, sollten auch im Testsignal entsprechend große tieffrequente Signalamplituden enthalten sein. Vor diesem Hintergrund wurden exponentielle Sweeps lange Zeit als ideale Anregungssignale gehandelt, da sie von Natur aus ein rosa Spektrum besitzen. Alternativ können auch Sweepsignale weißen Spektrums eingesetzt, die eine zusätzliche Bassemphase enthalten (z.B. Low Shelving mit 20dB Anhebung ab 100Hz).

Durch Müller & Massarani (2001) wurde eine Methode entwickelt, um Sweepsignale mit beliebiger spektraler Färbung und konstanter Hüllkurve generieren zu können. Das Signal wird dabei im Frequenzbereich durch Vorgabe des gewünschten Betragsspektrums synthetisiert. Dadurch kann nicht nur eine Bassemphase sondern auch eine breitbandige Kompensation des Messlautsprecher-Frequenzganges realisiert werden.

FABIAN

Im Kontext der Weiterentwicklung des Messsystems FABIAN, welches 2006 an der TU Berlin im Rahmen einer Masterarbeit¹⁰ entwickelt wurde, wird eine Optimierung des Messverfahrens bezüglich seiner Zeiteffizienz angestrebt.

FABIAN wurde so konzipiert, dass die Akquise von binauralen Raumimpulsantworten für verschiedene Kopfpositionen unbeaufsichtigt durchgeführt werden kann. Dabei kommt ein Messroboter zum Einsatz dessen Aufbau im Wesentlichen dem eines klassischen HATS-System entspricht. Der Kunstkopf ist jedoch durch ein softwaregesteuertes Halsgelenk mit 2 rotatorischen Freiheitsgraden mit dem Torso verbunden, sodass sukzessive verschiedene Kopfpositionen angefahren und vermessen werden können. Sollen pro Kopfausrichtung mehrere Quellpositionen vermessen werden, kann dies bis dato nur nacheinander geschehen. Pro Quelle vergeht dabei eine Zeit, die der Länge des Stimulus zuzüglich einer ausreichenden Nachhallzeit entspricht. Obwohl dieser Prozess automatisch abläuft, sind die Gesamtmessdauern immer noch sehr hoch. Eine Zeitersparnis um den theoretisch erreichbaren Faktor 4 verspricht die MESM Technik.

MESM

Bei dieser Methode, deren Funktionsweise von Majdak et al. ausführlich in dem Aufsatz „*Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions*“ dargelegt wurde, wird ein exponentieller Sweep zeitlich versetzt, an verschiedenen Quellorten (Lautsprechern) in den Raum abgegeben. So entsteht nach der Entfaltung ein Zeitsignal, welches für jede Quelle eine LIR und mehrere voneinander getrennte HIRs enthält (siehe Abbildung 4). Die zeitlichen Positionen der einzelnen LIRs zueinander entsprechen dabei den Anregungsversatzzeiten für die einzelnen Quellen. Diese

⁹ Engl. Abk. f. Harmonic Impulse Response

¹⁰ Vgl. Lindau 2006

Zeitpunkte können so gewählt werden, dass beispielsweise die Vermessung der zweiten Quelle schon beginnt, während die erste Quelle noch angeregt wird (siehe Abbildung 3).

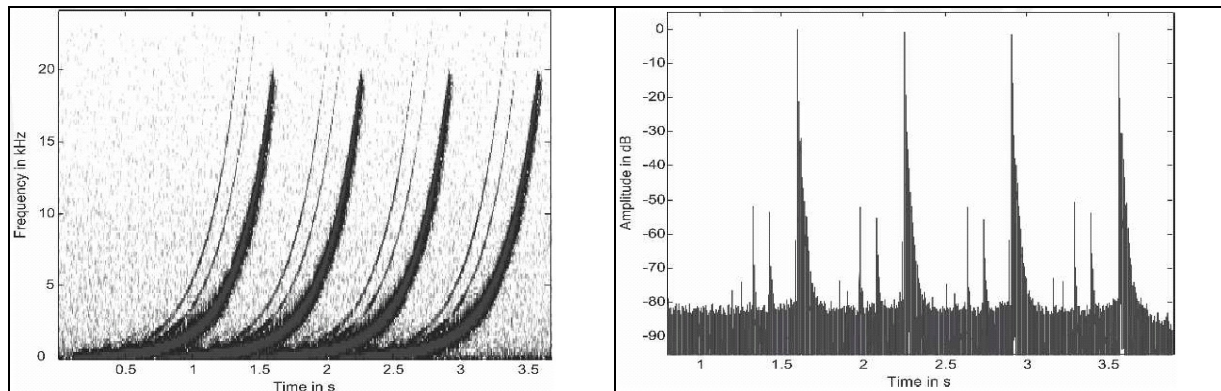


Abbildung 3 Spektrogramm von 4 überlagerten exponentiellen Sweeps,
Nach Majdak et al. (2007)

Abbildung 4 ETC der entfalteten Systemantwort aus
Abbildung 3,
Nach Majdak et al. (2007)

Zielsetzung und Fragestellung

Die MESM soll Eingang in die FABIAN-Messroutine finden. Eine mögliche Implementierung sollte in Form einer zusätzlichen Stand-Alone-Anwendung in MATLAB® erfolgen. Da die MESM Technik auf den von Farina (2000) geschilderten Eigenschaften rein exponentieller Sweeps aufbaut, ist die Frage zu klären, ob sie auch mit den derzeit am Institut favorisierten Anregungssignalen funktioniert. Hier kommen 20 Hz - 21.2kHz bandpassgefilterte lineare Sweeps mit einer 20 dB Bassemphase zum Einsatz. Diese werden bisher noch extern mit der kommerziellen Software Monkey Forest erzeugt und in einer für die Programmsteuerung verfügbaren Datenbank gespeichert. Um diesen relativ umständlichen Workaround künftig zu umgehen, wurde die Umsetzung der oben vorgestellten Algorithmen zur Synthese von Sweeps mit beliebigem Amplitudenspektrum in MATLAB® als zu bearbeitende Teilaufgabe vom Institut vorgegeben.

1 Methode

Ein Großteil der Arbeit wird sich mit programmiertechnischen Problemen befassen. Bei der Beantwortung der Frage, ob sich die MESM auch auf gefärbte Sweeps übertragen lässt, erschien es zunächst sinnvoll, sich als Ausgangspunkt die Implementierung der ursprünglichen Form (mit exponentiellen Sweeps) zur Aufgabe zu setzen. Auch hier stellen sich bezüglich des, in FABIAN zur Anwendung kommenden Entfaltungsverfahrens einige Kompatibilitätsfragen.¹¹

Die MESM beruht auf mathematischen Kenntnissen, an Hand derer Voraussagen über die zeitlichen Positionen von Verzerrungsprodukten innerhalb der entfalteten Systemantwort getroffen werden können. Hier ist zu prüfen, ob ähnliche Strategien für gefärbte Sweeps entwickelt werden können. In Abhängigkeit von den Ergebnissen dieser bisher dingbar gemachten Teilaufgaben, sollte der Einsatz gefärbter Sweeps dann empirisch getestet werden. Weiterführende Überlegungen sollten sich mit dem Problem der Quellverteilung beschäftigen, da die von Majdak et al. (2007) beschriebene MESM für ein HRTF-Messsystem mit konzentrischer Quellverteilung entwickelt wurde. Aufgrund von akustischen Laufzeitunterschieden bei nicht konzentrisch angeordneten Quellen sind zusätzliche Software-Anpassungen zu erwarten.

¹¹ Lineare Entfaltung durch Zeropadding & Multiplikation mit Referenzspektrum bei FABIAN (vgl. Lindau 2006) vs. Entfaltung mittels inversem Sweep bei MESM (vgl. Majdak et al. 2007, S.625)

2 zeitliche Planung

Juli 2008:

- Einarbeitung in FABIAN Messsoftware (Matlab®)
- Implementierung der Sweepsynthese nach Müller & Massarani (2001) zzgl. Shelving Filter Funktion und Anbindung an FABIAN-ini-file
- Implementierung der MESM nach Majdak et al. (2007) als Stand Alone Anwendung in Matlab®
 - o Durchführen mehrkanaliger Testmessungen
 - o Entfaltung durch Multiplikation mit Referenzspektrum nach Lindau (2006) testen

August 2008:

- Suchen einer Methode, um Obertonverhalten bei Entfaltung gefärbter Sweeps mathematisch beschreiben zu können
 - o Vorhersage über Gruppenlaufzeit möglich?
 - o Finden einer Methode zur Simulation eines leicht nicht linearen Systems in Matlab® (zu Testzwecken)
- Klärung der Frage, ob MESM mit gefärbten Sweeps funktioniert
 - o Theoretische Betrachtungen zum Overlapping-Verfahren
 - o Theoretische Betrachtungen zum Interleaving-Verfahren
 - o Umsetzung der MESM mit gefärbten Sweeps, wenn möglich
- Erweiterung der MESM auf nicht konzentrische Quellenordnung
 - o Kompensation verschiedener akustischer Laufzeiten
 - o Test und Dokumentation

September 2008:

- Programmierung einer Fensterungsroutine zum Ausschneiden der linearen Impulsantworten
- Realisierung einer Schnittstelle, zwischen FABIAN Software und der erstellten Stand-Alone-Anwendung
- Validierung der Zeitersparnis unter Beibehalten der Messqualität
 - o Testmessungen in Konzertsaal

3 Literaturverzeichnis

- [Farina 2000] Farina, A.:
“Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique,”
presented at the 108th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, Frankreich, Februar 2000.
- [Lindau 2006] Lindau, A.:
„Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden“, Magisterarbeit, Fachbereich Kommunikationswissenschaft der Technischen Universität Berlin, 2006
- [Müller & Massarani 2001] Müller, S.; Massarani, P.:
“Transfer-Function Measurement with Sweeps”
JAES, Ausgabe 49, pp. 443-471, Juni 2001
- [Majdak et al. 2007] Majdak, P.; Balazs, P.; Laback, B.:
“Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions”, Revision 2
Journal of the Acoustical Engineering Society, Vol. 55, No. 7/8, July/August 2007, Pages 623 - 637 (2007)
Acoustics Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Vienna, Austria
- [Oppenheim & Willsky 1992] Oppenheim, A.V.; Willsky, A.S.:
„Signale und Systeme“, Lehrbuch - 2., durchgesehene Auflage, D-6940 Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1992
- [Maempel & Weinzierl 2006] Maempel, H.-J.; Weinzierl, S.:
„Anleitung zum Verfassen eines Exposés für Abschlussarbeiten“
Fachbereich Kommunikationswissenschaft der Technischen Universität Berlin, 2006, Online im Internet unter:
http://www.ak.tu-berlin.de/fileadmin/a0135/Magisterarbeiten/Expose_Anleitung.pdf
(pdf-Dokument)
- [Weinzierl 2006] Weinzierl, S.: Forschungsprojekt „TUB Auralisierungsverfahren“, Erstantrag auf Sachmittelbeihilfe durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Entwurf. 2006