

EIN IBM-PC-GESTÜTZTES MEßSYSTEM FÜR RAUMIMPULSANTWORTEN
MITTELS SCHNELLER MAXIMALFOLGEN-TRANSFORMATION

Ning Xiang

Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik
Ruhr-Universität Bochum, D-4630 Bochum 1

Einleitung

Binaurale Raumimpulsantworten(BRIA) enthalten umfassende gehörbezogene akustische Informationen über einen Raum, insbesondere lassen sich objektive Auswertung und subjektive Beurteilung der raumakustischen Eigenschaften aus den binauralen RIA durch weitere Signalverarbeitung ableiten. In Zukunft wird die Messung von BRIA bei der raumakustischen Untersuchung und Planung zu einem obligatorischen Hilfsmittel werden. Ein mobiles Meßsystem ist deswegen von praktischer Bedeutung. Die Schallübertragung in einem Raum, z.B. einem Konzertsaal, stellt ein sehr kompliziertes Übertragungssystem mit langen Raumimpulsantworten dar. Im Interesse eines hohen Störabstandes lassen sich binäre Maximalfolgen(kurz: M-Folgen) zur Anregung des Raumes bei der Messung optimal einsetzen, da deren Energieeffizienz selten von anderen Binärfolgen überschritten wird¹. Darüber hinaus lassen sich Maximalfolgen mit unbegrenzt großer Länge einfach konstruieren. Insbesondere kann die Auswertung von Impulsantworten für solche Anregungssignale direkt im Zeitbereich erfolgen², wobei sich ein schneller Algorithmus(Fast M-Sequence Transform "FMT"²⁻⁶) ausnutzen läßt.

Prinzip der schnellen M-Folgen Transformation

Ein n -stufiger Schieberegistergenerator kann eine binäre periodische M-Folge $\{a_i\}$, $a_i \in \{0, 1\}$ einer Länge von $T = 2^n - 1$ erzeugen, wenn das charakteristische Polynom $f(x) = 1 + \sum_{k=1}^n c_k x^k$; $c_n = 1$ primitiv ist. Zur Messung eines linearen zeitinvarianten Systems betrachtet man eine Periode der M-Folge $\{x_i\}$; $\{x_i = 1 - 2a_i \in \{-1, +1\}\}$ als Anregungssignal, deren Autokorrelationsfunktion(AKF) näherungsweise delta-förmig ist:

$$\phi(k) = \frac{T+1}{T} \delta(k) - \frac{1}{T}. \tag{1}$$

Die Impulsantwort des Systems läßt sich dann auswerten durch (siehe auch ³):

$$\mathbf{h} = \frac{1}{T+1} [\mathbf{X}\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}], \tag{2}$$

wobei \mathbf{h} , \mathbf{Y} und $\bar{\mathbf{Y}}$ Spaltenvektoren von T Elementen sind, und zwar: $\mathbf{Y} = (y(0), y(1), y(2), \dots, y(T-1))^T$; $\bar{\mathbf{Y}} = (\bar{y}, \bar{y}, \dots, \bar{y})^T$ und $\bar{y} = \sum_{j=0}^{T-1} y(j)$ sowie $\mathbf{h} = (h(0), h(1), h(2), \dots, h(T-1))^T$. $h(k)$ ist die Impulsantwort und $y(k)$ die Systemantwort auf die M-Folge. Die Matrix $\mathbf{X} = (X_{ij}) = (x_{j-i \pmod T})$ besteht aus rechts verschobenen M-Folgen.

Zunächst wird der erste Teil in (2) als die Impulsantwort betrachtet, also:

$$\mathbf{h} = \frac{1}{T+1} \mathbf{X}\mathbf{Y}. \quad (3)$$

Nach Lempel⁴ bestehen zwei Permutationsmatrizen \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 , so daß \mathbf{h} in der Form

$$\mathbf{h} = \frac{1}{T+1} \mathbf{P}_2 \mathbf{H} \mathbf{P}_1 \mathbf{Y} \quad (4)$$

geschrieben werden kann (siehe auch Xiang^{5,6}). Die Matrix \mathbf{H} ist eine Hadamard-Matrix vom Sylvester-Typ. Für diese Operation steht ein schneller Algorithmus namens "Fast Hadamard Transform" (FHT) zur Verfügung.

Zur Bestimmung der Permutationsmatrizen \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 existieren mehrere Verfahren. Ausgehend von diesen haben wir ein Verfahren⁶ abgeleitet, das besonders bei der Messung von sehr langen Impulsantworten vorteilhaft ist. Aus (4) werden ausschließlich folgende Schritte bei der Auswertung einer Impulsantwort mit FMT benötigt: (a) Permutation der aufgenommenen Systemantwort; (b) Durchführung der Fast Hadamard Transformation (FHT); (c) Zurück-Permutation. Bild 1 dient zur Veranschaulichung.

Implementierung auf einem IBM-PC Rechner

Das oben beschriebene Verfahren ist auf einem IBM-AT (oder kompatiblen) Rechner realisiert worden. Dafür wurde ein 14 bit Transit-Rekorder (auf 16 bit erweiterbar) entwickelt. Zur Abdeckung vielfältiger Anforderungen bei raumakustischer Untersuchung und Planung ist der Rekorder mit zwei 1Mbyte großen Pufferspeichern (FIFO) für Ein- und Ausgabe ausgerüstet. Mit einer einstellbaren Summenabtastrate bis 1MHz für vierkanalige parallele Ein- und Ausgabe kann das Meßsystem auch im Ultraschallbereich für die raumakustische Modelltechnik angewendet werden. Die vierkanalige Korrelationsmessung, die eine räumliche und zeitliche Verteilung der den frühen Reflexionen entsprechenden Spiegelschallquellen liefert⁷, ist damit ebenfalls durchführbar.

Unter dem durch den jetzigen Stand des DOS-Betriebssystems gegebenen Hauptspeicher ist das Verfahren für M-Folgen mit einer Länge bis zu $2^{16} - 1$ implementiert. Für verschiedene Anwendungen wird eine Periode der M-Folge von verschiedener Länge mit beliebig eingegebenem primitiven Polynom softwaremäßig generiert und in den Ausgabenpuffer abgespeichert, die dann zur Messung über einem D/A-Wandler im Rekorder periodisch die Meßstrecke anregt. Nach Einschwingen des Systems wird eine Periode der Systemantwort über einem A/D-Wandler im Rekorder aufgenommen. Die zum Algorithmus gehörigen Permutationsmatrizen \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 in (5) können vor der Auswertung einmalig berechnet und in Indexform auf der Festplatte gespeichert werden. Der Zeitaufwand der Auswertung einer Raumimpulsantwort mit einer Länge von $2^{16} - 1$ beträgt auf einem PC-Rechner mit der Taktfrequenz von 12 MHz ca. 4.5 Minuten, für eine Länge von 1023 aber nur 1.3 Sekunden.

Diskussion der praktischen Messungen

Aufgrund des Gleichanteils in der AKF von M-Folgen (siehe (1)) liefert die Auswertung anhand der Kreuzkorrelation in (3) einen DC-Fehler, dessen Korrektur bei manchen Anwendungen wünschenswert ist. Aus (2) geht hervor, daß diese Korrektur die Kenntnis von \bar{y} , also die Summe der Systemantwort, voraussetzt. Nun betrachten wir den Punkt *B* in Bild 1, aus welchem sich die Summe \bar{y} genau ablesen läßt. Durch Ausnutzen dieses Wertes kann die Korrektur somit während der Rück-Permutation erfolgen, ohne die Summe \bar{y} berechnen zu müssen. Mit dem Ausgabenpufferspeicher im Transit-Rekorder besteht auch die Möglichkeit, die Impulsantwort mit (3) fehlerfrei auszuwerten, indem man eine perfekte M-Folge im Ausgabenpuffer speichert, die von einer symmetrischen M-Folge durch Ersetzen aller -1 durch den Wert $q = -1/(1 + 2\sqrt{T+1})$ abgeleitet wird¹.

Bild 2 zeigt einen Meßaufbau für Raumimpulsantworten. Zur Bestimmung der eigentlichen Raumimpulsantwort zwischen Schallsender und -empfänger müssen Übertragungseigenschaften aller sonstigen Geräte (Lautsprecher, Mikrofon und Tiefpaßfilter sowie Verstärker) aus der gesamten Impulsantwort herausgefiltert werden:

$$h_{Raum}(k) = h_{ges}(k) * r_{Ger}(k), \quad (5)$$

wobei $r_{Ger}(k)$ die inverse Impulsantwort von $h_{Ger}(k)$ ist, die die folgende Beziehung erfüllt:

$$r_{Ger}(k) * h_{Ger}(k) = \delta(k). \quad (6)$$

Faltet man r_{Ger} mit der vorbereiteten M-Folge im voraus, so läßt sich die Raumimpulsantwort nach der Messung unmittelbar auswerten. Dies bringt Vorteile mit sich, solange die Faltung von r_{Ger} mit der M-Folge die Energieeffizienz der resultierenden Folge nicht wesentlich beeinträchtigt, was für viele Anwendungen der Fall ist.

Als Beispiel gibt Bild 3 zwei binaurale Raumimpulsantworten graphisch wieder, die in einem Studiomodell mit dem Maßstab 1:10 gemessen wurden. Die Abtastrate betrug 444.4 kHz je Kanal, die Länge der M-Folge $2^{15} - 1$, das primitive Polynom ist $1 + x^1 + x^2 + x^7 + x^8 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{15}$. Als Schallsender, der in den Ultraschallbereich hinein wirkt, wurde eine Minibox mit einem Hochtonlautsprecher aus PVDF-Folien⁸ verwendet. Ein Miniaturkunstkopf mit maßstabgerecht nachgebildeten Ohrmuscheln wurde als Empfänger benutzt.

Literatur

/1/ Lüke, H.D. (1986): Folgen mit perfekten periodischen Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen, FREQUENZ, 40 (1986), 8, S.215-220. /2/ Alrutz, H. (1981): Ein neuer Algorithmus zur Auswertung von Messungen mit Pseudo rauschsignalen, DAGA '81, VDE-Verlag, S.525-528. /3/ Borish, J. and Angell, J.B. (1983): An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise J.A.E.S., Vol. 31, No.7 July/August 1983, S.478-488. /4/ Lempel, A.: Hadamard and *m*-Sequence transforms are permutationally similar, Applied Optics, Vol.18, No.24, 1979, S.4061-4065. /5/ Xiang, N. (1988): Messung von Impulsantworten mit Maximalfolgen. Fortschritte der Akustik DAGA '88, S. 893-896. /6/ Xiang, N. (1988): Improved Approach to Measuring Impulse Response Based on the Fast *M*-Sequence Transform. In der Vorbereitung für Signal Processing. /7/ Yamasaki, Y.; Yamasuda, S.; Saito, H.; Yasukawa, K.; Itow, T. (1979): An Application of digital technique to obtain the spatial information of a room, Soc. Am. - Acoust. Jpn Joint Meeting, BBB6. /8/ Xiang, N.; Kopatz, D. (1989): Leistungsfähige Lautsprecherboxen für den Ultraschallbereich, in diesem Tagungsband.

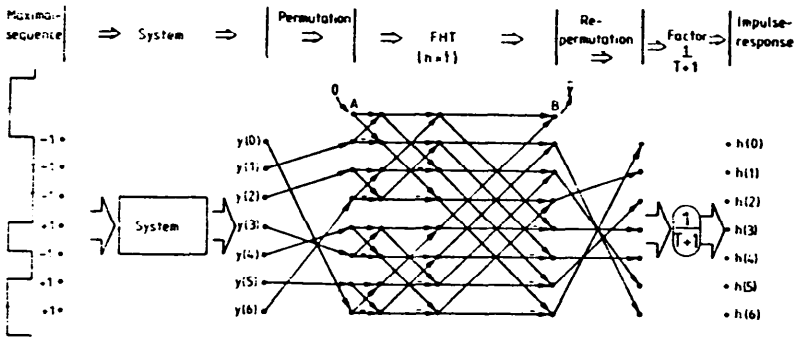


Bild 1. Flußdiagramm der FMT für die Messung einer Impulsantwort mit dem Beispiel: $n = 3$, $T = 7$, das primitive Polynom $1 + x + x^3$.

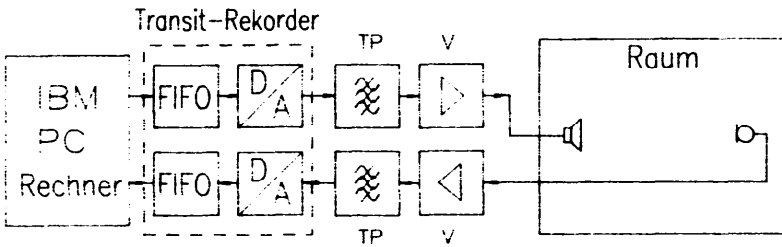


Bild 2. Meßaufbau für Raumimpulsantworten, (TP: Tiefpaßfilter; V: Verstärker).

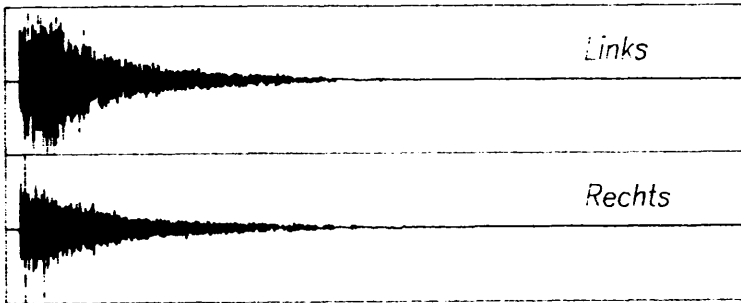


Bild 3. Binaurale Raumimpulsantworten eines Studiomodells (Maßstab 1:10),

Länge der M-Folge: 32767, Abtastrate: 444.4 kHz.