

Messverfahren für Zeilenlautsprecher mit optimalen Multitonsignalen und Schmalbandanalysen

Alexander Potchinkov¹, Stephan Herzog¹

¹ AG Digitale Signalverarbeitung TU Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, Email:potchinkov@eit.uni-kl.de

Einleitung

Wegen der mittlerweile in beträchtlicher Anzahl angebotener und installierter Zeilenlautsprecher mit digitaler Signalverarbeitung zur Einstellung einer gewünschten Richtcharakteristik ist eine Messtechnik zur Erfassung der frequenzabhängigen Richtcharakteristik notwendig. Da Zeilenlautsprecher üblicherweise auch zu Zeilen mit Längen mehrerer Meter gestapelt werden können, womit sowohl die Richtcharakteristik für niedrige Frequenzen als auch die erzielbare Schärfe der Bündelung verbessert werden können, sind Nahfeldmessungen mit Fernfeldextrapolation an auf dem Boden liegenden Lautsprechern die naheliegende Lösung.

Dabei wird der Lautsprecher so positioniert, dass er nach oben abstrahlt. Über dem Lautsprecher sind in geringem Abstand zum Lautsprecher an einem Galgen eines oder mehrere Mikrophone positioniert, die den Schall im Nahfeld aufnehmen. Dies ist auf Grund des sehr guten Signal-/Störverhältnisses vorteilhaft, da nicht nur externe Störgeräusche einen deutlich geringeren Pegel als der Direktschall aufweisen, sondern auch die Reflexionen von den Raum-Begrenzungsflächen. Somit ist kein spezieller Messraum notwendig. Zum Anfahren der Messpunkte kann das Mikrophon über einen Schrittmotor rechnergesteuert bewegt werden, was hohe Positioniergenauigkeit und automatisierte Messabläufe ermöglicht.

Mit diesem Beitrag werden zwei Messverfahren vorgeschlagen, ein iteratives Verfahren mit schrittweiser Fortbewegung einer Mikrophonzeile längs des Zeilenlautsprechers und ein gleitendes Verfahren mit einem Einzelmikrophon, ähnlich wie in [1]. Als Messsignale werden Multitonsignale mit wahlweise Terz-/Oktav-Skala oder dekadischer Skala der Frequenz verwendet, wie es in der Elektroakustik üblich ist. Da diese Skalen exponentiell und nicht linear sind, müssen die Phasen der Töne mit dem Ziel eines geringen Crestfaktors mit Hilfe spezieller nichtlinearer Optimierung gewonnen werden. Die bekannten Phasenformeln für lineare Skalen sind an dieser Stelle nicht zielführend [2]. Zur Berechnung der Fourierkoeffizienten auf dem dichten Messraster (Dichte in Abh. der oberen Grenzfrequenz) werden zwei hochselektive Schmalbandanalysetechniken vorgeschlagen. Bei der iterativen Messung mit nichtparametrischer Analyse wird ein gleitendes Görtzelverfahren mit FIR-Kammfilter und einer Resonatorbank, ein Resonator pro Ton des Multitontestsignals, gefolgt von komplexen Steady-State-Detektoren verwendet. Beim gleitenden Verfahren mit einer parametrischen Analyse wird eine überlappende gleitende Zeitfenstertechnik, ein Sinus-Modell mit fixen Frequenzen und va-

riablen Amplituden und Phasen in Verbindung mit einer geeigneten Parameterschätzungsmethode verwendet.

Die vorgeschlagenen Messverfahren lassen eine schnelle Messung der Abstrahlcharakteristik zu. Die erzielten Messergebnisse weisen dabei auch bei der Messung in einem akustisch unbedämpften Raum nur sehr geringe Abweichungen von den zu erwartenden Eigenschaften auf.

Nahfeldmessung und Fernfeldextrapolation

Zur Messung der Abstrahlcharakteristik von Lautsprechern sind oft aufwendige Aufbauten und Umgebungen mit kontrollierten Eigenschaften, wie z.B. akustische Messräume erforderlich. In letzter Zeit gibt es Versuche, den Messvorgang unter einfacheren Bedingungen durchzuführen [3], [4].

Der Schalldruck wird an vielen Punkten vor dem Lautsprecher aufgenommen, wobei das räumliche Abtasttheorem beachtet werden muss, um Aliasing zu vermeiden. Damit gilt für den Abstand Δx zweier Messpunkte $\Delta x < \lambda_{min}/2$ bzw. $\Delta x < c/(2f_{max})$, wobei f_{max} die höchste betrachtete Frequenz ist. Für eine obere Grenzfrequenz von 20 kHz ergibt sich somit ein Höchstabstand der Messpunkte von 8,5 mm bzw. ca. 118 Messpunkte pro Meter.

Die Extrapolation des Schallfelds aus den gemessenen komplexen Schalldrücken in der Messebene in das Fernfeld des Lautsprechers kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Ein naheliegender Ansatz ist es, die Messpunkte als Punktquellen zu betrachten und durch komplexe Überlagerung aller Quellsignale in beliebigen Raumpunkten den Schalldruck zu berechnen. Ein weiterer Ansatz aus der Wellenfeldsynthese ist die Lösung eines 2,5 D Rayleigh-Integrals [5]. Zur schnelleren Berechnung können auch Methoden aus der Fourierakustik angewendet werden.

Aufbau des Messsystems

Der hier vorgestellte Ansatz ist an die Messanordnung von Start angelehnt und in Abbildung 1 dargestellt. Der zu messende Lautsprecher liegt auf dem Boden und strahlt nach oben hin ab. Das Messmikrophon bzw. die Messmikrophone werden in geringem Abstand über den Lautsprecher bewegt. Die Mechanik des Messaufbaus besteht aus einer Lineareinheit, an der ein Galgen befestigt ist, der wiederum die Mikrophone trägt. Die Position des Galgens wird über einen rechnergesteuerten Schrittmotor verändert, was eine sehr genaue und schnelle Positionierung erlaubt.

Die Mikrofonkonfiguration ist beim betrachteten System in zwei Varianten vorgesehen. Zum einen können acht Mikrophone im Abstand von mindestens 19 mm montiert werden. Somit ist eine Messung an acht festen Punkten gleichzeitig möglich. In der zweiten Variante wird nur ein Mikrophon genutzt und die Messung wird typischerweise bei bewegtem Mikrophon durchgeführt.

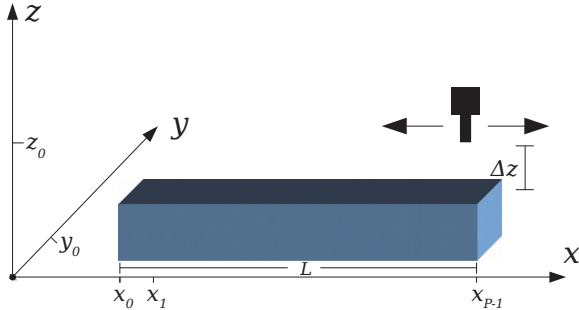


Abbildung 1: Evtl. nur das andere Bild drin lassen

Als Mikrophone kommen ICP-Mikrophone mit geringem Durchmesser zum Einsatz, um die freie Schallausbreitung so wenig wie möglich zu stören. Die Entzerrung des Frequenzgangs kann in einem speziellen Interface oder offline nach der Messung erfolgen.

Die Ansteuerung sowohl der Messmechanik und des Motors als auch die Erzeugung der Testsignale und Aufnahme der Messsignale sind zur Zeit in Matlab und Python implementiert.

Messvorgang

Unter Beachtung des räumlichen Abtasttheorems wird der Schalldruck des Lautsprechers an P äquidistanten Messpunkten $\Pi_p : (x_p, y_0, z_0)$, $p = 0, \dots, P-1$, aufgenommen. Beim iterativen Verfahren wird dazu jede Messposition von den Mikrophen angefahren und eine Messung durchgeführt. Durch die Verwendung eines Mikrophonarrays (in unserem Beispiel acht Mikrophone) kann der Messvorgang erheblich beschleunigt werden, allerdings dürfen die einzelnen Mikrophone hinsichtlich Übertragungsfaktor und Phase nur geringe Abweichung haben oder müssen entsprechend linear entzerrt werden. Beim gleitenden Verfahren wird die Messung durchgeführt, während sich ein einzelnes Mikrophon über den Lautsprecher bewegt. Dabei wird das Mikrophonensignal kontinuierlich aufgenommen und in einem späteren Verarbeitungsschritt in N_P Zeitfenster aufgeteilt. Dieser Ansatz bietet einige Vorteile. So wird die Messgeschwindigkeit weiter erhöht bzw. die Auflösung bei gleicher Messdauer gesteigert. Auch eine nachträgliche Veränderung der Auflösung ist möglich, was die Berechnung der Abstrahlcharakteristik für tiefe Frequenzen beschleunigen kann.

Zu beachten sind bei dieser Variante die Motor- und Getriebegeräusche, die während der Bewegung des mechanischen Aufbaus entstehen und bei sehr hohen Geschwindigkeiten der Dopplereffekt. Beide haben mit den von uns gewählten Parametern keinen merklichen Einfluss auf die

Messergebnisse.

Messsignale: Digitale Multitonsignale

Multitonsignale [7] dienen als Testsignale und haben daher wichtige Eigenschaften wie Kohärenz und Minimalcrestfaktoren aufzuweisen. Kohärenz wird mit harmonischer Beziehung zwischen den Frequenzen und auf Grundfrequenz bezogener Festlegung der Folgenlänge erreicht. Minimalcrestfaktoren werden durch optimale Wahl der Tonphasen gewonnen. Wir definieren ein Multitonsignal mit M Frequenzen und einer Blocklänge N zu

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cos \left(2\pi \frac{f_m}{f_T} n + \varphi_m \right), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

mit den reellwertigen Amplituden a_m , $a_m > 0$, den reellwertigen Phasen φ_m , $-\pi \leq \varphi_m < \pi$, den reellwertigen Frequenzen $f_m = k_m f_G$, der Grundfrequenz f_G , der Abtastfrequenz f_T und den Frequenzmultiplikatoren k_m , $m = 0, \dots, M-1$, $k_m \in \mathbb{N}$. Im weiteren werden einige Bedingungen erfüllt, wie die Sortierung der Frequenzmultiplikatoren

$$k_{m+1} > k_m, \quad m = 0, \dots, M-2, \quad (2)$$

die Erfüllung des Abtasttheorems

$$k_{M-1} f_G < \frac{f_T}{2} \quad \text{oder} \quad k_{M-1} < \frac{N}{2} \quad (3)$$

und schließlich die Kohärenzbedingung

$$f_G = \text{ggT}(f_T, f_m, m = 0, \dots, M-1), \quad N = \frac{f_T}{f_G}, \quad N \in \mathbb{N}. \quad (4)$$

Wie bereits erwähnt, spielt für das Messen von Systemeigenschaften der Crestfaktor des Testsignals eine wichtige Rolle

$$\text{cf}(x) = \frac{\max_{n=0, \dots, N-1} |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2}} = \sqrt{N} \frac{\|x\|_\infty}{\|x\|_2} = \frac{\|x\|_\infty}{\|a\|_2}. \quad (5)$$

Die Minimierung des Crestfaktors ist ein unrestringiertes nichtlineares diskretes Minimaxproblem mit der Form

$$\text{Minimiere} \left\{ \max_{n=0, \dots, N-1} \left| \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cos \left(2\pi \frac{f_m}{f_T} n + \varphi_m \right) \right| \right\} \quad (6)$$

über $\varphi \in \mathbb{R}^M$, das am besten als nichtlineares Optimierungsproblem

Minimiere $f(\varphi, \delta) := \delta$ u.d.B.

$$g_n(\varphi, \delta) := \left(\sum_{m=0}^{M-1} a_m \cos \left(2\pi \frac{f_m}{f_T} n + \varphi_m \right) \right)^2 - \delta \leq 0, \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (7)$$

gelöst wird. Nähere Angaben zu den Eigenschaften und Lösungsmethoden finden sich in [2], [6].

Signalverarbeitung der beiden Meßverfahren

Beide Meßverfahren haben das Ziel, die M gewünschten Lautsprecher-Übertragungsfaktoren H_k mit $k = k_m, m = 0, \dots, M - 1$, für jeden der P Meßpunkte $\Pi_p, p = 0, \dots, P - 1$, auf der Meßstrecke der Länge $L, [L] = m$, zu erfassen. Beide Meßverfahren nutzen dieselben Testsignale und unterscheiden sich in der Art und Weise der Signalerfassung und Berechnung der benötigten Fourierkoeffizienten.

Testsignalerzeugung

- Der Länge- N Testsignalblock eines der vorgestellten Multitonsignale $x(n), n = 0, \dots, N - 1$, liegt in einem Speicher, der mit $0, \dots, N - 1$ zyklisch adressiert wird. Die dazugehörigen DFT-Koeffizienten X_k liegen für die Testtonfrequenzen mit den Multiplikatoren $k = k_m, m = 0, \dots, M - 1$, für die Berechnungen der Lautsprecherübertragungsfaktoren H_k vor.

- Der Timer erzeugt mit Modulo- N Arithmetik eine Folge, die einerseits zum Adressieren des Testsignalspeichers und andererseits zur Berechnung der Drehfaktoren $W^{nk} = e^{-j2\pi nk/N}$ verwendet wird. Mit diesen Drehfaktoren wird später die "laufende Zeit" herausgerechnet. Der Timer kann mit $n_0 = -N_S$ initialisiert werden, womit die Laufzeit T_S des Schalls zwischen Lautsprecher und Mikrofon berücksichtigt werden kann. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn dieser Abstand in zeitlicher Hinsicht auf die Testsignaldauer vergleichsweise groß ist.

Signalverarbeitung im iterativen Meßverfahren

- Die Berechnung der DFT-Koeffizienten $Y_k(n)$ des Lautsprechersignals $y(n)$ an den Meßpunkten erfolgt mit dem gleitenden Görtzelverfahren für jede der M Frequenzen des gewählten Multitontestsignals.

- Die Übertragungsfaktoren H_k werden durch Quotientenbildung $H_k(n) = W^{-nk} Y_k(n) / X_k$ berechnet. Die komplexe Mittelwertbildung erfolgt durch exponentielle Glättung mit $\hat{H}_k(n) = \alpha_k H_k(n) + (1 - \alpha_k) \hat{H}_k(n - 1)$, deren Glättungsfaktoren α_k frequenzabhängig gewählt werden sollten. Die Mittelung wird beim erstmaligen Erreichen des Timerwerts $N - 1$ für den nächsten Abtastzeitpunkt mit dem Timerwert 0 gestartet.

- Der statistische Entscheider bricht das Mitteln ab, wenn die Varianz der aufgelaufenen Mittelwerte für eine vorgegebene Anzahl von Ereignissen unterhalb einer ebenfalls vorgegebenen Schranke liegt. Da dieser Vorgang nicht notwendigerweise terminieren muß, wird ein Maximalwert N_{max} herangezogen, der den Mittelungsvorgang ohne Beachtung der bis zu diesem Zeitpunkt erreichten Meßwertvarianzen abrechnen läßt. In diesen Fällen sollte ein Hinweis gegeben werden, da das Ergebnis ggf. nicht verlässlich ist und man möglicherweise seinen Meßaufbau verbessern sollte.

Abbildung 2 zeigt die Struktur der Signalverarbeitung des iterativen Meßverfahrens im Überblick und Abbildung 3 das gleitende Görtzelverfahren im Detail.

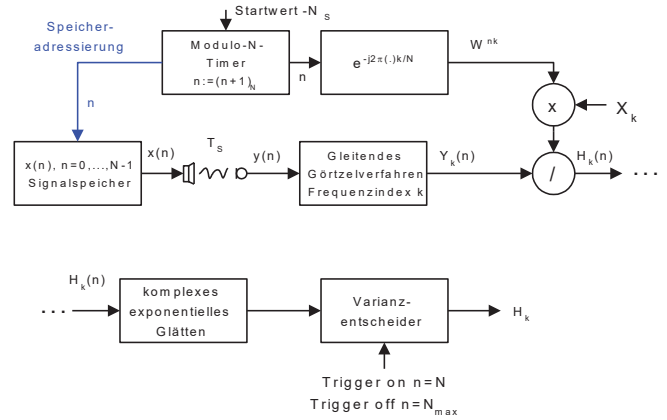


Abbildung 2: Blockschaubild der Signalverarbeitung des iterativen Messverfahrens

Signalverarbeitung im gleitenden Meßverfahren

- Die Gleitgeschwindigkeit des Meßmikrophons auf der Meßstrecke sei $v, [v] = m/s$ und ist im Interesse großer Analysezeitfenster möglichst gering zu wählen. Dem entgegen stehen eine unerwünschte lange Meßdauer und eine ggf. zu gering bemessene Speicherkapazität für das erfasste Mikrophonsignal.

- Das Zeitfenster der Datenerfassung hat die Länge $N_R = Lf_T/v$.

- Die jedem Meßpunkt zugeordneten zentrierten und überlappenden Zeitfenster haben die ungerade Länge N_p . Die Mittenindizes dieser Zeitfenster, bezogen auf die Indizierung des Zeitfensters der Datenerfassung, sind $n_p, p = 0, \dots, P - 1$.

- Zu jedem Meßpunkt Π_p wird für das korrespondierende Zeitfenster der Länge N_p mit dem Zentralindex n_p ein parametrischer Schätzer für $2M$ Parameter, je M für Amplituden und Phasen, mit einem der für solche Anwendungen gebräuchlichen Verfahren berechnet. Ein solches Verfahren ist beispielsweise die Matlab-Routine `arx` zur Anpassung eines diskreten linearen ARX-Modells auf der Basis kleinster Fehlerquadrate im Zeitbereich.

- Für die Berechnung der $P \times M$ Übertragungsfaktoren werden zu den Modellkoeffizienten die Fourierkoeffizienten des Testsignals x und Phasenkorrekturen entsprechend den Zeitfenster-Indices n_p benötigt.

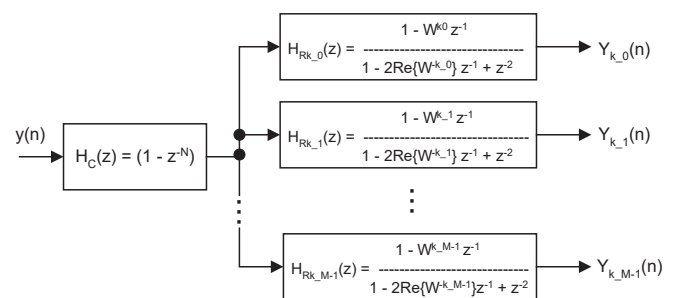


Abbildung 3: Gleitendes Görtzelverfahren

Auswertung

Zur Auswertung werden an P Punkten Π_p Pegel und Phasen des gemessenen Signals für alle Anregungsfrequenzen berechnet. Um den Schalldruck in einem Raumpunkt $\Pi_s = (x_s, y_s, z_s)$ mit der Überlagerung von Punktquellen zu berechnen, werden die Einzelschalldrücke unter Annahme kugelförmiger Ausbreitung addiert.

$$P(\Pi_s) = \sum_{p=0}^{P-1} \frac{1}{|\Pi_s - \Pi_p|} p_p \cdot e^{-jk|\Pi_s - \Pi_p|} \quad (8)$$

Der Rechenaufwand steigt dabei linear mit der Anzahl der betrachteten Raumpunkte. Mit Einbeziehung des räumlichen Abtasttheorems ist er proportional zur oberen Grenzfrequenz.

Alternative Methoden zur Auswertung sind die von Start vorgeschlagene 2,5D-Rayleigh-Methode oder ein FFT-basierter Ansatz.

Ergebnisse

Für die Lautsprechermessung wurden vier Multitontestsignale mit Einheitsamplituden $a_m = 1$, $m = 0, \dots, M - 1$, der Töne mit den nachstehenden Kenndaten bei einer Abtastfrequenz $f_T = 48\text{kHz}$ entworfen.

-**Terzmultiton**, $f_m \geq 80\text{Hz}$, $f_0 = 5\text{Hz}$, $N = 9600$, $M = 25$ Töne, $k_0 = 16$, $k_1 = 20$, $k_2 = 25$ etc.

-**Oktav125multiton**, $f_m \geq 125\text{Hz}$, $f_0 = 125\text{Hz}$, $N = 384$, $M = 8$ Töne, $k_0 = 1$, $k_1 = 2, \dots$, $k_m = 2^{m+1}$, $m = 0, \dots, 7$.

-**Oktav250multiton**, $f_m \geq 250\text{Hz}$, $f_0 = 250\text{Hz}$, $N = 192$, $M = 7$ Töne, $k_0 = 1$, $k_1 = 2, \dots$, $k_m = 2^{m+1}$, $m = 0, \dots, 6$.

-**Dekadenmultiton**, $f_m \geq 100\text{Hz}$, $f_0 = 100\text{Hz}$, $N = 480$, $M = 20$ Töne, $k_m = 1, 2, \dots, 10, 20, 30, \dots, 100, 200$

Tabelle 1 enthält die Crestfaktoren für die gewählten Multitonsignale. In der ersten Spalte *CFSQP* sind die Angaben zu den optimierten Signalen eingetragen. Zum Vergleich dienen die Spalten zwei und drei, in denen für *Schröder* eine bekannte konstruktive Phasenmethode und mit *Zeros* Einheitsphasen angegeben werden [2]. Aus dieser Tabelle kann der Gewinn an SNR einer Messung in Abhängigkeit einer Phasenoptimierung erkannt werden.

	<i>CFSQP</i>	<i>Schröder</i>	<i>Zeros</i>
Terz	2.59 (8.27)	3.81 (11.63)	7.07 (16.99)
Oktav125	2.17 (6.77)	3.34 (10.48)	4 (12.04)
Oktav250	1.97 (5.89)	3.23 (10.18)	3.74 (11.46)
Dekaden	1.77 (4.94)	2.99 (9.51)	6.32 (16.02)

Tabelle 1: Cresftfaktoren verschiedener Multitöne. Werte in Klammern in dB.

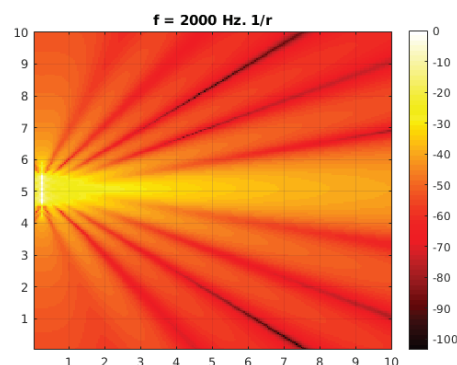


Abbildung 4: Abstrahlcharakteristik berechnet mit der Überlagerung von Punktquellen

Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir Multitöne als optimale Testsignale zur schnellen Erfassung der Abstrahlcharakteristik von Zeilenlautsprechern durch eine Nahfeldmessung vorgestellt. Durch die Optimierung der Phasen wurden die Crestfaktoren der Multitöne gegenüber Multitönen mit Nullphasen um bis zu Faktor 3 reduziert.

Abbildung 4 zeigt das aus den gemessenen Schalldrücken berechnete Schallfeld in der Ebene vor dem Zeilenlautsprecher mit der Länge 1 m für eine Frequenz von 2 kHz. Die Abstrahlcharakteristik lässt sich durch die lineare Messung in der Ebene, in der auch die Steuerung durch den Lautsprecher erfolgen kann gut erfassen und entspricht den erwarteten Ergebnissen.

Literatur

- [1] Michael Möser, “Ein Beitrag zur Schallquellenrekonstruktion durch akustische Kurzwellen-Holographie,” *Acoustica*, 1986.
- [2] Alexander Potchinkov, “Low-Crest-Factor Multitone Test Signals for Audio Testing,” *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 50, No. 9, 2002.
- [3] Wolfgang Klippel and Christian Bellmann, “Holographic nearfield measurement of loudspeaker directivity,” in *Audio Engineering Society Convention 141*, Sep 2016.
- [4] Evert Start, “Analysis of DDS-controlled loudspeaker arrays by near field acoustic holography,” in *Deutsche Jahrestagung für Akustik, DAGA 2002*, 2002.
- [5] Evert Start, *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*, Ph.D. thesis, 1997.
- [6] C. T. Lawrence, J. L. Zhou und A. L. Tits, “User’s Guide for CFSQP Version 2.5”, Institute for Systems Research, University of Maryland, Technical Report TR-94-16r1, College Park, MD 20742, 1997.
- [7] S. Boyd, “Multitone Signals with Low Crest Factor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. CAS-33, No. 10, October 1986, pp. 1018-1022