

ANALYSE DES CHEMINS DE PROPAGATION PAR TDS

Une application en acoustique du traitement de signal sur PC

D. DEGRYSE (1) , F. DRUILHE (1) , M. VILLOT (2)

(1) OROS Chemin des Prés - ZIRST - 38240 MEYLAN France
 (2) CSTB 24 rue J. Fourier - 38230 ST MARTIN D'HERES France

RESUME

La Time Delay Spectrometry (TDS) est une méthode récente permettant de mesurer la réponse d'un système acoustique dans un milieu bruyant et réverbérant. Les implantations actuelles sont basées sur des techniques analogiques complexes et présentent des limitations importantes. Ce papier décrit une nouvelle réalisation basée sur des techniques numériques de traitement de signal et implantée sur un micro-ordinateur type PC-AT équipé de cartes de traitement de signal (une carte analogique et une carte numérique). Cette réalisation se caractérise par sa précision, sa facilité d'emploi et son faible volume.

SUMMARY

Time Delay Spectrometry (TDS) is a relatively new method for measurement of acoustical system response under noisy and reverberant conditions. Actual implementation of TDS is based on complex analog processing and suffers of several limitations. This paper presents a new implementation based on digital signal processing and running on a general PC-AT computer. This computer is equipped with a general set of two boards (one digital board and one analog board) dedicated to digital signal processing. This implementation is very accurate, compact and easy to use.

INTRODUCTION

En général la réponse en fréquence d'un système acoustique peut être considérée comme la superposition de plusieurs réponses élémentaires affectées chacune d'un retard particulier correspondant à son chemin acoustique.

La TDS (Time Delay Spectrometry) permet d'obtenir la courbe d'arrivée de l'énergie sonore en fonction du temps (Energy Time Curve) pour déterminer les divers chemins et d'isoler par filtrage un chemin de propagation particulier et de connaître les caractéristiques d'amplitude et de phase des rayons ayant parcourus ce chemin.

Grâce à ces possibilités d'analyse, il est possible en particulier, de mesurer dans un environnement réverbérant certaines propriétés qui nécessitent normalement des conditions de champ libre (par exemple, la mesure in-situ de la réponse d'un haut-parleur en évitant l'emploi d'une chambre anéchoïque).

De plus, par son principe, cette technique présente un bon rapport signal sur bruit et permet d'effectuer dans de mauvaises conditions de bruit ambiant des mesures exploitables.

PRINCIPE DE LA MESURE TDS

Cette méthode de mesure TDS est basée sur une émission sonore dont la fréquence varie continuellement avec le temps pour permettre de différencier à la réception les signaux correspondant à des durées de parcours différents.

Considérons la configuration simple de la figure 1: le son émis par le haut-parleur atteint le microphone soit directement (chemin 1) soit après réflexion sur la paroi (chemin 2).

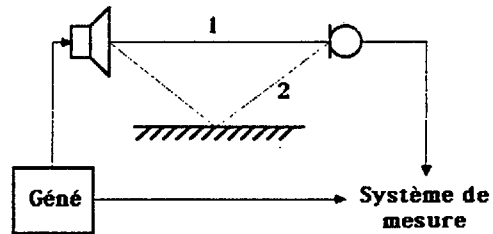


FIG. 1 Dispositif typique en TDS

Le générateur émet un signal $G(t)$ sinusoïdal d'amplitude constante dont la fréquence décroît linéairement en fonction du temps soit :

$$G(t) = A \cos\left(\frac{2\pi f_i(t) t}{T}\right)$$

pour $0 < t < T$
 avec T durée de l'excitation

$$f_i(t) = f_{max} - S.t$$

avec f_{max} fréquence maximum d'analyse
 et S vitesse de balayage en Hz/s.

Dans cette configuration, le microphone va recevoir à un instant donné deux signaux (correspondant aux 2 chemins) de fréquences



décalées par rapport à celle du générateur au même instant, chaque décalage étant proportionnel au retard de propagation du chemin considéré. Le spectre instantané du signal reçu est donné Figure 2:

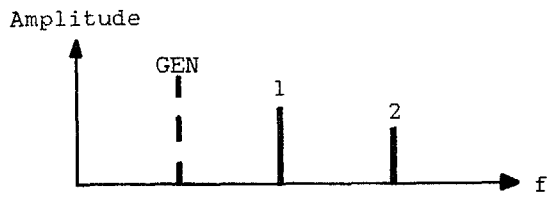


FIG. 2 Spectre instantané du signal reçu.

Lorsque t varie, ce spectre instantané se déplace sur l'axe des fréquences à la vitesse S , mais les positions relatives des composantes restent inchangées.

Le schéma de l'analyseur est présenté ci-dessous (figure 3).

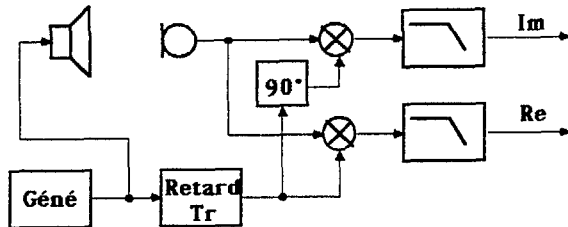


FIG. 3 Principe de l'analyseur TDS

Le signal capté par le microphone est multiplié, d'une part, par le signal d'excitation retardé de T_r et d'autre part par ce même signal déphasé de 90° , pour fournir après filtrage passe bas, sur les sorties Re et Im , la réponse complexe en fréquence du chemin en cours d'analyse, ces sorties, fonctions de la fréquence, étant devenues des variables du temps en TDS.

Le réglage de la bande passante équivalente des filtres passe-bas permettant d'éliminer les chemins de propagations indésirables. La réponse en fréquence obtenue est alors relative à une onde ayant parcouru un trajet sonore d'une durée égale à T_r .

La réponse impulsionnelle est obtenue à partir de la réponse en fréquence par transformée de Fourier inverse et la réponse temporelle en énergie du système acoustique par le module du signal analytique correspondant.

Pour les aspects théoriques détaillés liés à cette technique de mesure TDS on pourra se reporter à [1] et [2].

MISE EN ŒUVRE CLASSIQUE DE LA TDS

Cette technique a été proposée par HEYSER en 1967 [1], mais il a fallu attendre 1980 [3] pour voir un premier système apparaître sur le marché, système d'une mise en œuvre assez complexe.

Cette mise en œuvre, entièrement analogique, utilise pour le filtrage un analyseur classique hétérodyne dont la fréquence centrale est commandée par le générateur. Le retard entre le signal du générateur et celui de l'analyseur est simulé par un translation de fréquence ajustable par l'opérateur. La mesure des réponses en amplitude et en phase sont effectuées par un détecteur classique associé à un phasemètre. Cette implantation présente un certain nombre de limitations majeures:

- L'utilisation d'un analyseur classique hétérodyne oblige à effectuer pour la génération et l'analyse une translation de fréquence des signaux. Ces opérations de translation introduisent des rotations de phase pouvant être supprimées par étalonnage.
- Cette translation de fréquence limite le retard du chemin analysé à la durée du signal de balayage, hors pour obtenir une bonne résolution du retard, la durée de balayage doit être courte, ce qui va à l'encontre de cette limitation.
- Le choix des bandes passantes équivalentes des filtres d'analyse est limité à 6 valeurs. Cette limitation introduit des contraintes ne permettant pas de toujours obtenir les meilleures conditions de sélection des chemins analysés et du rapport signal sur bruit.
- Les filtres d'analyse du type passe-bande sont analogiques et ne présentent pas un retard de groupe constant en fonction des fréquences. Ce défaut introduit des distorsions mal contrôlées dans la réponse en fréquence.

MISE EN ŒUVRE NUMÉRIQUE DE LA TDS

Dans le cadre d'une collaboration entre le CSTB et la société OROS, une solution basée sur des techniques numériques de traitement de signal a été analysée et développée.

Compte tenu du type de mesure envisagé les contraintes suivantes étaient imposées:

- Une gamme de fréquence allant jusqu'à 20kHz.
- Un choix important de bandes passantes équivalentes des filtres d'analyse.
- Une taille de calcul des transformées de Fourier inverses de l'ordre de 8000 points afin d'obtenir la réponse temporelle en énergie sur une seconde de signal.
- Un matériel compact et pouvant facilement transporté.

Lors de cette analyse il est apparu intéressant de décomposer les mesures en 2 phases distinctes:

- Une première phase, dite de génération-acquisition, pendant laquelle une série d'émissions sonores est effectuée avec des vitesses de balayage différentes. Lors de ces émissions le signal reçu par le microphone est numérisé et stocké pour exploitation dans la seconde phase.



- Une seconde phase dite d'analyse visualisation détermine, à partir des signaux stockés lors de la phase 1, les divers chemins ainsi que leur réponse en fréquence.

Par rapport à l'implantation traditionnelle cette décomposition permet, pour un émission sonore, d'analyser plusieurs chemins de propagation et, de plus, offre l'avantage de bien dissocier la mesure immobilisant le système à caractériser, de la phase exploitation nécessitant une réflexion de la part de l'utilisateur.

L'utilisation de techniques numériques a permis d'éliminer les principales limitations introduites par la mise en œuvre habituelle:

- La génération du signal est effectuée sous forme numérique afin d'éliminer toutes les rotations de phase parasites. La phase instantanée du signal généré est calculée sur 32 bits et une conversion sous forme sinusoïdale est effectuée par lecture dans une table et interpolation. Cette implantation permet d'obtenir un signal calibré en phase et présentant un rapport signal sur bruit plus distorsion supérieur à 70 dB.

- Le retard d'analyse peut être quelconque par multiples de la période d'échantillonnage et supérieur à la durée du balayage initial.

- Un ensemble de 16 filtres avec des bandes passantes équivalentes allant de 1,7 Hz à 320 Hz par progression géométrique de 1,4 permet d'effectuer les analyses dans des conditions optimales.

- Les opérations de filtrage passe-bande sont réalisées par des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie. Ce type de filtre permet d'obtenir un retard de groupe constant pour toutes les fréquences. Deux types de filtres ont été implantés, des filtres plats destinés à la mesure de l'énergie sonore en fonction du temps et des filtres gaussiens présentant d'un point de vue théorique le plus faible produit temps de réponse par bande passante, ces filtres gaussiens étant destinés aux mesures des réponses en fréquence. Afin de diminuer le nombre de points en sortie des filtres d'analyse des techniques de sous-échantillonnage sont utilisées au fur et à mesure des calculs.

IMPLANTATION MATERIELLE ET LOGICIELLE

L'implantation a été réalisée à partir d'un ensemble standard de cartes de traitement de signal, OROS-AU20, connectée sur un micro-ordinateur IBM-AT équipé d'un adaptateur graphique EGA.

Le choix du micro-ordinateur IBM-AT a été guidé par les critères suivants:

- La présence d'un disque dur rapide, d'une capacité suffisante et permettant, avec un logiciel adéquat, d'obtenir un enregistrement en continu du signal reçu par le microphone à une fréquence d'échantillonnage de 51,2 kHz.

- Un adaptateur graphique avec une résolution de 640 par 350 points, résolution suffisante pour l'exploitation graphique des résultats.

- Une vitesse de calcul permettant lors de la phase analyse et exploitation d'obtenir des temps de réponse très courts.

L'ensemble OROS-AU20 de traitement de signal comprend une carte numérique et une carte d'entrée-sortie analogique, ces 2 cartes étant installées dans le micro-ordinateur IBM-AT. Cet ensemble a été retenu pour sa conception et sa structure qui permettent de réaliser des applications complètes de traitement de signal numérique intégrées dans un ordinateur type PC ou AT.

La puissance de calcul nécessaire, au traitement de signal lors des 2 phases, est fournie par la carte numérique. Celle-ci comprend (voir figure 4) :

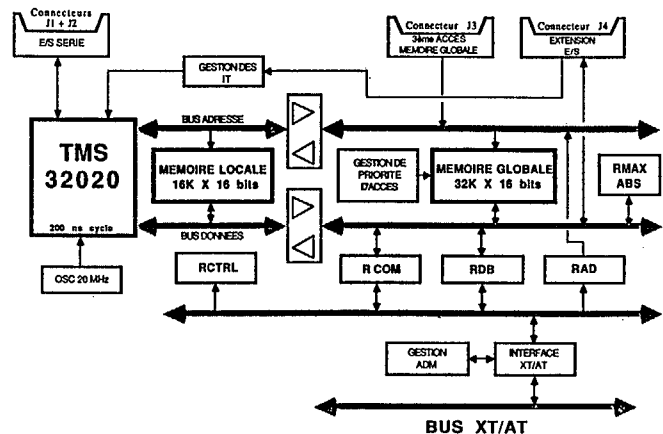


FIG. 4 Schéma de la carte numérique.

Un circuit intégré de traitement de signal, TMS 32020 de Texas-Instrument, fonctionnant avec un cycle instruction de 200 ns et associé à une mémoire locale de données et de programme de 16K mots de 16 bits. Ce circuit permet, par exemple, d'effectuer une multiplication 16 bits par 16 bits avec accumulation sur 32 bits en un cycle de base de 200 ns.

- Une mémoire globale de 32K mots de 16 bits dont l'utilisation est partagée entre le TMS 32020 et le micro-ordinateur IBM-AT. Un dispositif d'accès direct en mémoire permet d'accélérer le transfert des données entre l'AT et la mémoire globale (débit de l'ordre de 600K octets/s). Cette mémoire est utilisée comme tampon pour l'échange de données entre le processeur de traitement de signal et l'AT.

- Un interface permettant un contrôle complet de cette carte depuis l'AT et d'implanter par logiciel des protocoles performant de synchronisation.

La carte analogique d'entrée-sortie (voir figure 5), reliée à la carte numérique par un câble dédié, possède l'ensemble des éléments nécessaires pour la génération et l'acquisition des signaux analogiques, soit:

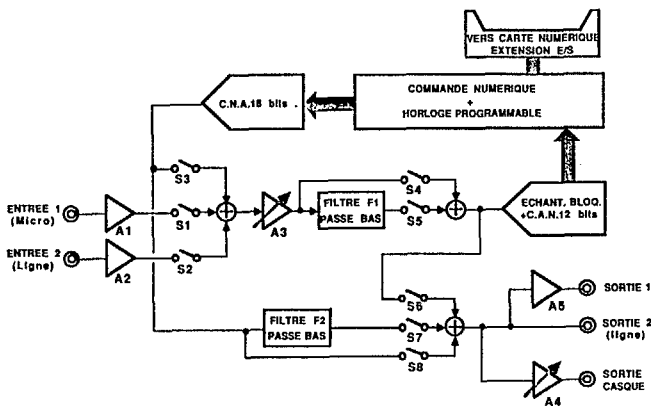


FIG. 5 Schéma de la carte analogique.

- Une chaîne d'acquisition avec des entrées ligne et micro, un amplificateur à gain programmable, un filtre anti-repliement, un échantillonneur bloqueur et un convertisseur analogique-numérique d'une résolution de 12 bits. Cette chaîne d'acquisition possède un rapport signal sur bruit plus distorsion de 70 dB.
- Une chaîne de génération de signal avec un convertisseur numérique-analogique sur 16 bits, un filtre anti-repliement et des amplificateurs de sortie.
- Une horloge et des interrupteurs de configuration programmables depuis la carte numérique et l'AT.

L'ensemble du logiciel associé au circuit de traitement de signal a été développé en langage assembleur afin d'obtenir la vitesse d'exécution la plus grande. Le logiciel d'application exécuté par l'AT est écrit en PASCAL, la synchronisation avec le système AU20 utilisant le logiciel standard livré avec cette carte.

PERFORMANCES

Afin de déterminer la précision de l'analyseur TDS, celle-ci a été mesurée dans le cas simple de deux ondes planes dans un tube: une onde incidente et une onde réfléchie par un bouchon métallique (voir figure 6).

La réflexion étant totale, le rapport entre les amplitudes des ondes incidente et réfléchie doit être égal à 1 et la phase relative de ces 2 ondes doit être nulle, cela quelle que soit la fréquence.

Le rapport d'amplitude obtenu est de $\pm 0,2$ dB et l'écart de phase évolue entre $-1,3$ et $0,1^\circ$. Une implantation analogique de la TDS permet d'obtenir ± 1 dB et $\pm 10^\circ$.

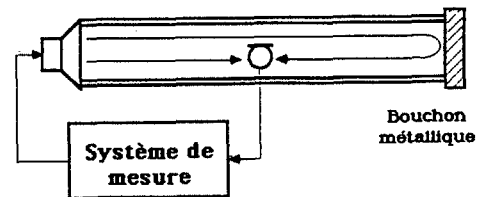


FIG. 6 Dispositif expérimental.

CONCLUSION

L'utilisation de techniques numériques de signal a permis de réaliser un appareillage de mesure du type TDS, facile d'emploi, compact et précis et, également de supprimer les limitations généralement introduites par les réalisations classiques du type analogiques. Cette réalisation numérique a été rendue possible grâce à l'existence de micro-ordinateurs puissants et rapides et de cartes associées de traitement de signal conçues pour la réalisation d'applications performantes.

REFERENCES

- [1] R. C. HEYSER Acoustical measurements by Time Delay Spectrometry J.A.E.S. , Volume 15 Number 4 , pp 370-382 (1967)
- [2] H. BIERING O.Z. PEDERSEN System analysis and TDS Technical Review BRÜEL & KJAER (1983)
- [3] Measurement set-ups for TDS and a few applications. Applications Notes BRÜEL & KJAER (1980)