

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

523



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

LOGICIEL DE TRAITEMENT DU SIGNAL POUR UN MICRO ORDINATEUR

SIGNAL PROCESSING SOFTWARE FOR MICROPROCESSOR

N. MOREAU

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES TELECOMMUNICATIONS DEPARTEMENT SYSTEMES ET COMMUNICATIONS
46 RUE BARRAULT 75634 PARIS CEDEX 13

RESUME

Dans cet article on présente un logiciel spécifique du traitement numérique de signal permettant d'introduire de façon didactique les différents algorithmes d'estimation spectrale non paramétrique (FFT, méthode du périodogramme), d'identification paramétrique globale (prédiction linéaire) d'identification récursive (gradient, moindres carrés). Ce logiciel est implanté sur de petits calculateurs hybrides construits autour du microprocesseur TMS 9900 de Texas Instruments. Une attention particulière a été apportée à la visualisation des résultats.

SUMMARY

This communication describes a specialised software for digital signal processing including several algorithms developed in modern analysis : non parametric spectral estimation (FFT, periodograms) global parametric identification (linear prediction) and recursive identification (stochastic gradient, recursive mean square). This software is implemented on small hybrid computers built around a TMS 9900 microprocessor. The attention is also focused on the visualisation of the results which is included in this package.



INTRODUCTION

Les techniques modernes en Traitement du Signal sont fortement tributaires des progrès de la technologie. Il est donc préférable qu'un exposé didactique de cette discipline dans une école d'ingénieurs soit prolongé par des séances de travaux pratiques sur du matériel adapté. A cet effet le logiciel présenté, développé pour des microcalculateurs construits autour du TMS 9900 de Texas Instruments, propose un ensemble de modules, chaque module étant spécifique d'une méthode particulière de traitement du signal. Ce logiciel permet à l'utilisateur de choisir les outils théoriques qu'il désire analyser, le type des signaux qu'il désire traiter, les procédures expérimentales.

I. ACQUISITION DU SIGNAL

Le premier module disponible est un module permettant de remplir une table en mémoire avec les échantillons d'un signal. Deux éventualités sont possibles :

- soit engendrer un signal synthétique, c'est-à-dire définir un filtre par ses pôles et par ses zéros et le soumettre à une séquence pseudo-aléatoire ayant de bonnes propriétés de blancheur ou à une entrée en impulsion.
- soit échantillonner un signal analogique à une fréquence réglable entre une fraction d'Hertz et une vingtaine de KHz. L'utilisateur détermine le nombre d'échantillons qu'il désire analyser. Etant donné le matériel utilisé, on peut stocker jusqu'à 7 000 échantillons.

II. TRAITEMENT DU SIGNAL

Le logiciel spécifique du traitement de signal peut se décomposer en trois blocs :

- le premier regroupe les méthodes classiques d'estimation de densité spectrale énergétique (méthode du périodogramme, pondération par une fenêtre temporelle, par une fenêtre spectrale).
- le second rassemble quelques algorithmes d'estimation globale (prédiction linéaire, algorithme de corrélation, de covariance, maximum d'entropie : algorithme de Burg).
- le troisième regroupe des algorithmes d'estimation récursive (algorithme du gradient, des moindres carrés, des moindres carrés rapides).

1. ESTIMATION D'UNE DENSITE SPECTRALE ENERGETIQUE PAR LA METHODE DU PERIODOGRAMME

On sait /1/ qu'une estimée naturelle est le carré du module de la transformée en z , évaluée sur le cercle unité, de l'ensemble des échantillons disponibles, normalisé par la longueur de l'enregistrement. Connaissant les N échantillons $x(0), \dots, x(N-1)$ on calcule

$$S(n) = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi nk/N} \right|^2 \text{ pour } n=0, \dots, N-1.$$

Mais on sait également que ce périodogramme donne une estimée biaisée et de variance élevée. Pour atténuer ces fluctuations, différentes méthodes

sont possibles. La première consiste à découper l'ensemble des échantillons disponibles en petites sections éventuellement chevauchantes, à pondérer les échantillons de chaque section par une fenêtre adéquate, à calculer les différents périodogrammes puis à en prendre la moyenne arithmétique. La seconde méthode consiste à lisser le périodogramme calculé sur l'ensemble des échantillons disponibles en le convoluant avec une fenêtre spectrale convenable, c'est-à-dire, en fait, à pondérer les estimées des coefficients de corrélation avant d'en calculer la transformée de Fourier.

Les différents sous programmes ont été écrits (FFT directe ou inverse d'un signal complexe ou réel, logarithme du spectre d'amplitude, pondération des échantillons par une fenêtre de type Hanning, par un "cosinus étendu", par une fenêtre triangulaire). On notera, qu'avec le microprocesseur employé le temps de calcul pour effectuer une FFT sur 256 points d'un signal réel est d'environ 3 secondes.

L'utilisateur peut fixer les différents paramètres comme il le désire et comparer les résultats obtenus au spectre de la fonction de transfert lorsque le signal traité est issu d'un modèle ARMA excité par un bruit blanc. Ainsi il peut constater et apprécier que, pour chaque méthode, un compromis doit être réalisé entre la résolution fréquentielle de l'estimateur et sa variance.

2. ALGORITHMES D'ESTIMATION GLOBALE

En traitement du signal les techniques de modélisation par identification paramétrique ont acquis, depuis une dizaine d'années, un regain d'intérêt /2/ à cause de la mise au point de nouveaux modes de calcul robustes et rapides et de l'arrivée de nouveaux circuits intégrés peu chers et très performants. On utilise volontiers des modèles linéaires à temps discret soumis à un bruit blanc inconnu ce qui peut conduire à réaliser une prédiction optimale du signal à l'instant t en fonction des échantillons précédents. Si on utilise le critère des moindres carrés pour minimiser l'erreur de prédiction on trouve différentes variantes suivant l'horizon considéré /3/. Classiquement on distingue la méthode de corrélation (Algorithme de Levinson) si les mesures sont disponibles sur un horizon suffisant ou la méthode de covariance /4/ si la fenêtre d'analyse est assez courte. Ces deux algorithmes ont été programmés. A partir d'une estimation des coefficients de corrélation (une fenêtre de pondération de type Hanning peut être utilisée sur les échantillons) ces sous programmes calculent les coefficients de corrélation partielle qui ont des propriétés intéressantes, les coefficients de l'équation de prédiction, les énergies résiduelles pour chaque ordre. A partir de ces informations l'utilisateur peut faire calculer les pôles du filtre inverse (existence d'un programme de calcul des racines d'un polynôme) et visualiser leur position relativement au cercle unité ou déterminer une estimation du spectre du signal étant donnée l'hypothèse de bruit blanc d'excitation (simple FFT appliquée sur les coefficients de l'équation de prédiction). En visualisant les énergies résiduelles successives, l'utilisateur dispose d'une méthode pour déterminer l'ordre "optimal" du filtre. On notera qu'il existe un algorithme dérivé de celui de Levinson réalisant le calcul à l'aide d'une arithmétique en virgule fixe /5/ ce qui semble bien adapté à l'implantation sur microprocesseur. Cet algorithme est rapide, le calcul des coefficients de corrélation partielle à l'ordre 10 demandant environ 12 ms sur le microprocesseur employé. Ceci permet



d'envisager un calcul temps réel pour des signaux de largeur de bande voisine de celle du signal de parole.

Les deux méthodes précédentes, de corrélation et de covariance, supposent implicitement des données nulles à l'extérieur de l'intervalle d'analyse. L'algorithme de BURG /6/ /7/ consiste à maximiser l'entropie et donne des résultats que les étudiants peuvent comparer à ceux fournis par les méthodes précédentes, en visualisant les pôles du modèle relativement au cercle unité, en traçant les spectres correspondants et en mesurant les temps de calcul.

3. ALGORITHMES D'ESTIMATION RECURSIVE

Si le nombre d'échantillons est élevé ou si le traitement doit être réalisé en temps réel l'estimation du vecteur des paramètres \underline{a}_t à l'instant t est actualisée en fonction de l'estimation à l'instant $t-1$ compte tenu de l'erreur de prédiction constatée :

$$\underline{a}_t = \underline{a}_{t-1} - K_t (y_t + \underline{x}_t^T \underline{a}_{t-1}) \text{ avec } \underline{x}_t^T = [y_{t-1}, \dots, y_{t-p}]$$

Plusieurs algorithmes ont été programmés :

- l'algorithme du gradient consiste à poser $K_t = \frac{y_t \underline{x}_t}{t}$
- l'algorithme des moindres carrés récursifs calcule le gain K_t à l'aide d'une estimée de l'inverse de la matrice d'autocorrélation $K_t = P_t \underline{x}_t$ solution de l'équation : $P_t = P_{t-1} - P_{t-1} \underline{x}_t (\underline{x}_t^T P_{t-1} \underline{x}_t + 1)^{-1} \underline{x}_t^T P_{t-1}$
- une version légèrement différente permet "d'oublier" progressivement les échantillons les plus anciens ce qui permet de rendre l'estimation adaptative dans le cas de signaux "localement stationnaires".
- ces calculs sont assez lourds du fait de l'actualisation de K_t par l'intermédiaire de la matrice P_t . L'algorithme de LJUNG, MORF, FALCONER /8/ réalise le calcul du gain à l'aide d'un vecteur ce qui réalise un gain en occupation mémoire et surtout une réduction importante du temps de calcul.

Possédant l'ensemble des échantillons en mémoire, l'utilisateur peut simuler le traitement récursif en visualisant à chaque pas les pôles du modèle estimé et ainsi apprécier les performances des différents algorithmes.

III. OUTILS UTILISES

1. MATERIEL

Ce logiciel a été écrit pour des mini-calculateurs hybrides dont la partie numérique a été développée dans notre Département autour du microprocesseur TMS 9900 de Texas Instruments. Les principales caractéristiques de ce microprocesseur sont les suivantes : mots de 16 bits, jeu d'instructions performant adapté au traitement scientifique (multiplication et division câblées), 16 registres banalisés en mémoire offrant une grande souplesse d'utilisation, système d'interruption hiérarchisé et vectorisé. Ces microcalculateurs, comportant une mémoire de 6 K mots de REPRM et 16 K mots de RAM, ont été conçus pour dialoguer avec des calculateurs analogiques du type

EAI 180. Le dialogue est essentiellement réalisé à l'aide d'un multiplexeur 8 voies analogiques et d'un convertisseur A/N sur 12 bits (temps de conversion et rangement en mémoire $\approx 40 \mu s$), de deux convertisseurs N/A sur 12 bits, d'un certain nombre de lignes de commande ou d'état compatibles TTL, d'interruptions externes, d'une horloge temps réel programmable.

Ces mini-calculateurs hybrides forment un ensemble équilibré ; ils sont des outils privilégiés pour faire manipuler des signaux de type varié par des étudiants.

2. LOGICIEL DE BASE

Ce logiciel est essentiellement constitué d'une librairie permettant le calcul d'expressions arithmétiques en virgule flottante et d'un petit système de visualisation graphique utilisant un oscilloscope.

Cette librairie "virgule flottante" permet de manipuler des nombres en format réel avec 24 bits pour la mantisse et 8 bits pour l'exposant. Elle réalise les quatre opérations ainsi que les conversions réels-entiers et le calcul de quelques fonctions classiques (fonctions trigonométriques, logarithmes, racine carrée ...). Elle permet de définir à l'aide d'un télétype ou d'imprimer la valeur de nombre en format réel, fractionnaire ou entier. Plus généralement elle autorise la lecture d'une expression arithmétique de type FORTRAN. Cette librairie est indispensable car les différents algorithmes en traitement du signal exigent une dynamique importante pour coder les différentes variables et réclament une grande précision lors des calculs.

Les résultats doivent être présentés de façon synthétique de sorte que l'utilisateur puisse apprécier directement les performances des estimateurs. Si certains résultats peuvent être visualisés sans difficulté (par exemple sortie synchrone de deux spectres sur deux convertisseurs N/A connectés à deux traces d'oscilloscope) d'autres sont plus délicats (visualisation des pôles et zéros d'une fonction de transfert relativement au cercle unité). A cet effet un petit système graphique a été développé. Une image doit d'abord être construite sous forme d'une liste graphique implantée en mémoire RAM à l'aide de sous-programmes de positionnement, de tracé de vecteurs ... Une fois cette liste construite progressivement lorsque les résultats nécessaires apparaissent dans le corps du programme un sous-programme particulier décode constamment cette liste et charge les deux convertisseurs N/A connectés sur un oscilloscope fonctionnant en mode X,Y. Tout se passe donc comme si l'écran de l'oscilloscope était une grille de $2^n \times 2^n$ états possibles où n représente le nombre de bits utilisés lors de la conversion. Pour éviter le scintillement du tracé, il est nécessaire que la liste complète soit décrite en une vingtaine de ms maximum. L'expérience montre que la visualisation des axes, du cercle unité et de symboles caractéristiques pour une dizaine de pôles et zéros, aussi bien pour le système que pour le modèle estimé, n'entraîne pas une image trop chargée.

CONCLUSION

Ce logiciel est utilisé depuis plus de un an par certains étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications qui ont un ensemble d'exposés sur les méthodes récentes de traitement numérique du signal. Le contact avec le réel, la possibilité d'apprécier concrètement l'intérêt et les



LOGICIEL DE TRAITEMENT DU SIGNAL POUR UN MICRO ORDINATEUR

SIGNAL PROCESSING SOFTWARE FOR MICROPROCESSOR

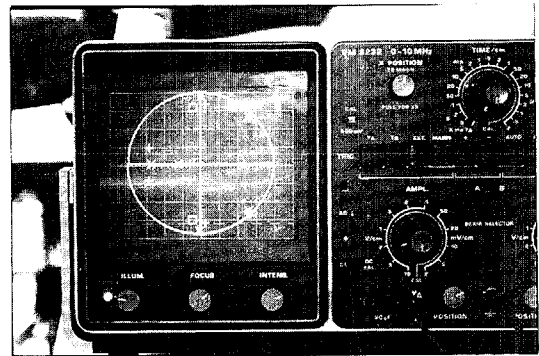
limites de chaque algorithme, le fait de comparer directement chaque méthode entre elles, facilite l'assimilation de cette discipline.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ S.A. TRETTER "Introduction to discrete-time signal Processing" Wiley 1976.
- /2/ C. GUEGUEN "Apport de la modélisation au traitement du signal" présenté au 7^{ème} Colloque sur le traitement du signal et ses applications 28 Mai au 2 Juin 1979.
- /3/ J. MAKHOUL "Linear Prediction : a tutorial review" Proceedings of the IEEE, Vol. 63, N° 4, April 1975.
- /4/ M. MORF, B. DICKINSON, T. KAILATH, A. VIEIRA "Efficient solution of covariance equations for linear prediction" IEEE Trans. on ASSP. Vol. 25, Oct. 1977.
- /5/ J. LE ROUX, C. GUEGUEN "A fixed point computation of partial correlation coefficients" IEEE Trans. on ASSP, June 1977.
- /6/ J.P. BURG "A New Analysis technique for time series data" Nato Advanced study Institute on signal Processing Aug. 1968.
- /7/ N. ANDERSEN "On the calculation of filter coefficients for maximum entropy spectral analysis" geophys Feb. 1974.
- /8/ L. LJUNG, M. MORF, D. FALCONER "Fast calculation of gain matrices for recursive estimation schemes" Int. J. control, Vol. 27, Janv. 1978.



Minicalcateur hybride. Une position de T.P.



Visualisation des résultats sur oscilloscope.