

Une réflexion sur le traitement de signal

Par P. FUERXER, *Ingénieur en chef de l'Armement.* (*)

Quel est l'avenir du traitement de signal ?

Pourquoi se poser une telle question ? le traitement de signal est aujourd'hui une technique très largement utilisée et dont chacun voit bien la nécessité. Qui peut oublier que l'essor des sciences repose sur les validations expérimentales, donc sur des mesures, d'une précision toujours limitée, et dont le traitement apparaît bien nécessaire.

De nombreux travaux théoriques, faisant suite à la théorie de Fourier, permettent de disposer aujourd'hui de méthodes générales de traitement de signal que le progrès technologique rend de plus en plus faciles à mettre en œuvre. Alors qu'au début du siècle, l'électronique naissante ne permettait pratiquement d'effectuer que du filtrage linéaire, le calculateur numérique d'aujourd'hui met à la disposition de tout ingénieur des outils extrêmement puissants, dont l'emploi s'est largement répandu dans tous les domaines scientifiques et techniques.

Face à cet essor indiscutable, les recherches en traitement de signal pourraient-elles se limiter au perfectionnement d'algorithmes généraux, dont on assure qu'ils sont théoriquement « optimaux » ? N'y aurait-il plus rien à faire qu'attendre du progrès technologique que s'étende le domaine des applications pratiques de ces techniques ?

Ce n'est pas au moment où une nouvelle revue française consacrée entièrement au traitement de signal vient d'être créée, et où tous sentent le besoin d'un effort théorique accru, qu'il me serait possible de défendre un tel point de vue. Bien au contraire, il me semble que beaucoup reste à faire. Pour cela, en adoptant un point de vue pragmatique d'ingénieur, je voudrais vous montrer qu'il y a en fait, peu de problèmes pratiques complètement étudiés.

L'objectif du traitement de signal

Pour définir le rôle du traitement de signal dans un système, je pense nécessaire d'observer quelques cas concrets. Responsable de recherches en télécommunications et détection, j'emprunterai tout naturellement mes exemples à ces deux domaines. Dans un cas comme dans l'autre, il s'agit d'acquérir une information, message transmis ou position d'une cible, en analysant les signaux représentant l'état d'une onde en un ou plusieurs points de l'espace. Le traitement de signal consiste alors à dépouiller les résultats d'une expérience ayant pour objectif, soit de décoder à distance une information, soit de mesurer la position d'un objet. On ne jugera la méthode employée qu'en fonction des résultats de l'expérience; le taux d'erreurs du message ou l'écart-type des mesures de position de la cible observée.

A ce stade, une première remarque s'impose. Si on adopte cette définition, il faut admettre qu'il n'existe pas de chaîne de traitement de signal totalement linéaire. Par exemple, en télécommunications numériques, on ne peut juger les performances d'un récepteur qu'au vu du message binaire délivré en sortie, après démodulation et correction d'erreurs. Existe-t-il une chaîne de traitement de signal moins linéaire ? Pour présenter un intérêt pratique l'évaluation devra tenir compte de toutes les causes d'erreurs; perturbations apportées par le milieu sur la propagation des ondes, bruits et brouillages liés à l'environnement, imperfections liées aux composants électroniques... De même, un SONAR passif ne devra être jugé que sur sa probabilité de détection et sur l'écart-type des mesures de gisement associées aux cibles identifiées. La qualification du traitement ne sera acquise qu'en prenant en compte l'environnement réel : perturbations créées par la propagation des ondes acoustiques, réverbération, bruiteurs locaux, ...

Posé en ces termes, le problème du traitement de signal semble bien difficile à résoudre. Les hypothèses couramment admises ne représentent qu'imparfaitement les signaux à traiter. Le plus souvent, il ne s'agit, ni de fréquences pures, ni de bruits blancs aléatoires et gaussiens, ni même de bruits colorés modélisables par des processus autorégressifs. En outre, la plupart des traitements non linéaires mis en œuvre dans les extracteurs restent encore à étudier. Comment peut-on alors prétendre optimiser de façon théorique les algorithmes de

(*) Chef du Groupe Télécommunications et Détection — Direction des Recherches Etudes et Techniques, Service des Recherches groupe 2 — 26, boulevard Victor, 75996 Paris Armées.

traitement de signal? Ne vaut-il pas mieux ne se fier qu'aux résultats de simulations sur signaux réels? C'est une tentation qui n'est pas nouvelle. Certes, cette démarche est et doit rester celle du client final, exploitant un système et non-spécialiste en traitement de signal. Il devra vérifier que le produit réalise bien la fonction pour laquelle il a été conçu. Par contre, cette méthode de travail ne permet pas la conception de traitements nouveaux et de ce fait s'avère d'un intérêt limité pour les chercheurs.

Face à la complexité des traitements à évaluer, une autre attitude consiste à se limiter volontairement à l'étude de cas particuliers dans lesquels le calcul complet peut être effectué. Cette démarche, plus positive, permet de progresser car il est alors possible de définir des traitements optimaux et des limites théoriques. C'est ainsi que, dans les télécommunications, la théorie de l'information permet de fixer les performances limites d'un récepteur en présence de bruit thermodynamique. La comparaison des performances des chaînes de traitement face à ce bruit, toujours présent dans les récepteurs, donnera des indications précieuses, même si les conditions de mesure ne représentent pas parfaitement la réalité. Il est en effet assez rare qu'un récepteur de télécommunications très peu sensible en présence de bruit blanc s'avère excellent en liaison réelle! C'est donc cette deuxième voie qui est utilisée par les spécialistes du traitement de signal. Elle ne sera productive que si on se fixe bien les objectifs à atteindre et si, parallèlement, des mesures sur le terrain permettent de s'assurer que les hypothèses simplificatrices faites ne sont pas trop éloignées de la réalité. Cette démarche est préférable, cependant, elle peut habiller d'une rigueur théorique apparente des conclusions totalement erronées. La certitude mathématique ne s'appliquera en effet qu'aux résultats du traitement sur les signaux modélisés et non sur les signaux réels. Il sera alors facile d'affirmer de bonne foi des résultats totalement inexacts. Vous pensez sans doute que j'exagère? Je me propose donc de donner quelques exemples de pièges plus difficiles à éviter qu'il ne peut sembler.

Les pièges à éviter

Une première erreur consiste à étudier un signal avec un appareil de mesure inadapté. Supposons que nous décidions d'étudier une porteuse haute fréquence modulée en phase par un signal numérique aléatoire à l'aide d'un analyseur de spectre. Il y a de grandes chances pour que nous l'assimilions à un bruit large bande aléatoire et gaussien alors qu'il s'agit d'un message numérique et que par simple élévation au carré du signal nous puissions faire apparaître la fréquence double de la porteuse modulée.

Une autre méthode de mesure adaptée à ce type de signaux aurait permis de le représenter plus facilement. Cet exemple vous paraît sans doute trop simple? Êtes-vous sûr que vous parviendriez à identifier les paramètres d'un faisceau hertzien modulé en fréquence par un multiplex téléphonique analogique sans le démodulateur adapté? Pourriez-vous affirmer au vu de quelques résultats de mesure qu'un signal ne contient pas d'information? Ne faut-il pas alors chercher de nouvelles méthodes d'analyse des signaux capables de mettre en lumière d'autres caractéristiques que le spectre?

Une seconde erreur consiste à forcer les choses à devenir conformes aux modèles théoriques. Se ramener au problème précédemment résolu est une tendance naturelle, particulièrement bien illustrée par le problème du polytechnicien (*) que tout le monde connaît. Si dans ce cas, la solution finale du problème, faire chauffer une casserole d'eau, ne souffre pas de la méthode employée, dans d'autres, il en est autrement.

Supposons que l'on ait étudié très finement un code correcteur d'erreurs de transmissions et que l'on ait démontré que pour un taux d'erreurs aléatoire donné, et, compte tenu de la nature des messages échangés sur la voie, il soit optimal. Au cours des essais, on constate que le taux d'erreur de la liaison réelle est bien identique au taux spécifié dans l'étude du code correcteur, mais que les configurations d'erreurs sont différentes. Au lieu d'apparaître aléatoirement, celles-ci sont groupées par paquets, ce qui a pour effet de perturber le fonctionnement de l'appareil. Qu'il est tentant alors de corriger la nature et de rendre l'arrivée des erreurs aléatoires en entrelaçant les bits du code! Se ramener au problème précédent est une solution simple, sûre, efficace industriellement. Est-ce une raison pour oublier que dans ce cas le traitement n'est plus optimal?

Une autre erreur bien difficile à éviter consiste à vouloir appliquer à tout prix une théorie séduisante, et qui, par sa formulation claire et synthétique, fournit dans tout un domaine du savoir des repères d'une solidité à toute épreuve. Même si les données du problème sont compatibles avec les hypothèses faites par cette théorie, il se peut que le problème à résoudre ne soit pas identique. C'est, en particulier, le cas lorsque l'on applique les méthodes d'analyse spectrale haute résolution basées sur l'emploi de la matrice interspectrale à la localisation de bruiteurs sous-marins. Je ne souhaite pas m'engager dans le débat en cours et tenter de démontrer laquelle des variantes est réellement optimale, en particulier lorsque le temps d'observation est limité et l'estimation des interspectres entâchée de biais. Je voudrais seulement faire remarquer qu'elles cherchent à représenter de la meilleure façon possible l'énergie reçue sur l'antenne à l'aide d'un nombre minimal de sources. Pourquoi seraient-

(*) Le polytechnicien doit faire chauffer une casserole d'eau. Pour cela il prend la casserole pendue au clou, la remplit d'eau, la pose sur le feu. Cas particulier: la casserole est sur le feu pleine d'eau. Il suffit de se ramener au cas précédent en vidant la casserole et l'accrochant au clou.

ÉDITORIAL

elles alors optimales pour résoudre un autre problème; la mesure du gisement des bruiteurs? En fait, le contraire a été indirectement démontré par S. Bienvenu et L. Kopp ⁽¹⁾? En effet, l'application de cette méthode sur des macrocapteurs ou après formation de voies, représente moins bien les signaux reçus mais donne de meilleurs résultats en localisation de bruiteurs. C'est un point sur lequel je reviendrai.

Une dernière erreur, et sans doute la plus courante, consiste à appliquer une théorie sans s'assurer que les conditions dans lesquelles elle a été démontrée soient vérifiées. Pour vous en convaincre, je vais vous parler de la corrélation. Vous savez qu'affirmer que l'intercorrélation calculée sur une durée finie de deux signaux indépendants est nulle, est un abus de langage. Le fait que nous le comptions parfois n'y change rien, mais au fond, est-ce si grave puisque la corrélation permet de réaliser le filtre adapté? Il me semble au contraire nécessaire de réfléchir quelques instants sur son emploi dans le filtre adapté, puis traiter un problème plus général, correspondant au cas où la réplique est bruitée. Ce problème voisin apparaît notamment dans les soustracteurs de bruit ou dans les systèmes de séparation de sources auxquels on s'intéresse de plus en plus.

Mettons nous, dans un premier temps, dans le cas classique où la référence est non bruitée et supposons que l'on dispose de deux signaux :

$$\begin{aligned} E(t) &= k S(t) + B(t) \\ R(t) &= S(t). \end{aligned}$$

Le problème consiste à évaluer le rapport k . Pour cela on fait à chaque instant une mesure élémentaire :

$$k_i = \frac{E_i}{R_i} = k + \frac{B_i}{R_i},$$

E_i et R_i étant les valeurs prises par $E(t)$ et $R(t)$ à l'instant de la mesure. L'écart-type de chaque mesure est inversement proportionnel à R_i . Si le bruit est supposé blanc et gaussien, la combinaison optimale \hat{k} des résultats est alors :

$$\hat{k} = \frac{\sum E_i R_i}{\sum R_i^2}.$$

Que devient ce résultat classique lorsque la réplique n'est connue qu'imparfaitement?

Posons :

$$R'(t) = S(t) + B'(t).$$

Il est possible de procéder de la même façon et d'estimer pour chaque couple de valeurs R'_i et E_i la fonction de répartition de k , et l'écart-type σ de k_i . Dans le cas le plus simple où tous les signaux sont blancs, aléatoires et gaussiens, cet écart-type sera fonction de R'_i et E_i , mais aussi du rapport signal à bruit de la réplique et la mesure k_i devra être corrigée par un terme $\alpha(R'_i, E_i)$.

La combinaison optimale des mesures sera alors :

$$\hat{k} = \frac{\sum (1/\sigma^2(R'_i, E_i)) \alpha(R'_i, E_i) k_i}{\sum 1/\sigma^2(R'_i, E_i)}$$

avec :

$$k_i = \frac{E_i}{R'_i}.$$

L'écart-type σ sera d'autant plus grand que R'_i est petit. Que donnerait une application pratique? Supposons à titre d'exemple un biais négligeable et prenons pour σ une fonction paire très simple :

$$\sigma = \frac{1}{R'^2}.$$

Alors l'expression de la valeur optimale estimée de k devient :

$$\hat{k} = \frac{\sum R_i^3 E_i}{\sum R_i^4}.$$

Ce résultat est très voisin de la formule empirique proposée par J. Hérault ⁽²⁾ à laquelle il serait sans doute facile par ce biais de donner une base théorique sérieuse.

Je n'ai pas la prétention d'épuiser en quelques lignes ce vaste sujet que je laisse à votre méditation. Que se passe-t-il lorsque les bruits $B(t)$ et $B'(t)$ sont corrélés, quand ils ne sont pas gaussiens? Quelle est la limite de rapport signal à bruit sur la voie référence au-delà de laquelle aucune mesure n'est plus possible?

Je ne me suis livré à ce développement un peu long que pour vous démontrer que la corrélation n'est peut être pas un outil aussi puissant qu'on a tendance à le penser et qu'il faut bien réfléchir avant de l'employer. Pourquoi alors constitue-t-elle si souvent, associée à une transformation rapide de Fourier, une étape préliminaire au traitement effectuée presque machinalement?

Une méthode scientifique

Que dire alors de l'avenir du traitement de signal? J'espère qu'après avoir lu ces lignes vous ne le voyez pas trop en noir. Le traitement de signal est une technique nouvelle et il lui reste encore beaucoup de progrès à faire avant d'atteindre la perfection de sciences plus anciennes. Le fait qu'il existe encore bien des questions sans réponse doit être pour tous une raison d'être optimiste. Il reste beaucoup de choses à inventer! Encore faut-il savoir dans quelle direction aller.

Il me semble que la seule recommandation que l'on puisse faire aux chercheurs est de s'efforcer de comprendre la nature : structure des bruits parasites qui, contrairement aux signaux utiles, sont toujours présents à l'entrée des chaînes de traitement, origine des perturbations apportées par le milieu de propagation. C'est ainsi qu'ils apporteront au traitement de signal la base scientifique sans laquelle il ne pourra progresser.

Le premier objectif des recherches sera alors d'améliorer notre connaissance des signaux. Pour les télécommunications, le point clé est l'influence des fluctuations de propagation sur les ondes radioélectriques. En détection, il faudra y ajouter la connaissance des cibles; surfaces équivalentes en RADAR, bruits propres en SONAR passif. L'objectif sera d'identifier tout ce qui caractérise les signaux à traiter et en particulier ce qui les différencie des modèles théoriques actuels.

Cette tâche n'est certainement pas la plus facile. Elle s'apparente d'un certain point de vue au décryptement d'un message. Une suite d'informations numériques chiffrées ressemble à un signal aléatoire. Trouver le code qui a transformé le message en cette suite inintelligible n'est pas simple. C'est encore moins facile quand on ignore même si elle contient une information. L'étude des signaux n'est donc pas œuvre aisée mais elle me semble la condition même du progrès en traitement de signal.

Les connaissances accumulées permettront d'identifier progressivement les domaines dans lesquels les développements théoriques sont les plus nécessaires. Ceci sera d'autant plus important qu'il est toujours difficile de maintenir à long terme des recherches dans un domaine, aussi passionnant soit-il, si des besoins concrets, liés à des applications pratiques, ne les motivent pas. L'interprétation des signaux doit être le moteur des recherches de base. Il faut donc étudier les problèmes réels et non appliquer des théories mathématiques connues. Ceci me donne l'occasion de revenir, comme je vous l'ai promis sur les méthodes hautes résolutions appliquées à l'acoustique sous-marine. Quelles sont les orientations à retenir pour ces recherches? Faut-il faire des traitements bande étroite ou large bande? Je répondrai par une autre question: les signaux que vous voulez traiter sont-ils ou non à large bande? Pourquoi s'arrêter en chemin et ne pas continuer par une question plus fondamentale? Que cherchez-vous: mesurer la direction d'un bruiteur? Suivre sa piste au cours du temps? Mettons-nous dans ce dernier cas. Nous avons à identifier une courbe dans un espace à deux dimensions, l'angle de gisement et le temps. Le traitement de signal transformera les données d'entrée, appartenant à un espace initial ayant au moins deux dimensions, dont le temps, en courbes de cet espace final de représentation dans lequel sont exprimés les résultats. Cette transformation ne sera en général pas simple et jamais linéaire. Il faudra sans doute passer par des étapes intermédiaires dans des espaces judicieusement choisis. La transformation des données d'entrée pourra être constituée, soit de changements de représentation comme la transformée de Fourier, soit de véritables changements de variables. Cette dernière possibilité est très intéressante car elle offre une grande liberté de choix encore inexploitée. Elle permet notamment de réaliser des transformations ne conservant pas l'énergie. Parler d'énergie a-t-il encore un sens dans un espace transformé?

Au fur et à mesure que nous perfectionnerons le traitement de signal il sera de plus en plus difficile d'appliquer les résultats théoriques en étant sûr de leur validité. L'optimalité d'un traitement ne sera obtenue que si les signaux à traiter sont effectivement conformes aux modèles améliorés, adoptés dans les recherches théoriques. La validité des modèles devra donc être étudiée avec le plus grand soin.

Conclusion

Cette vision de l'avenir n'est-elle pas totalement utopique? L'utilisation effective des algorithmes modernes de traitement de signal n'en est qu'à ses débuts. Les processeurs numériques les plus performants commencent seulement à pouvoir les mettre en œuvre sur les signaux SONAR.

ÉDITORIAL

En RADAR, la formation de faisceau par le calcul, même en utilisant la seule FFT, n'est encore qu'un projet. En télécommunications il est encore bien difficile de réaliser des MODEMS numériques dès que le débit d'information dépasse quelques kilobits par seconde. Enfin, tout ceci est-il nécessaire ? Optimiser une liaison radioélectrique est un problème de tous les jours. Il peut se poser en termes très simples : quelle partie de la chaîne de transmission faut-il améliorer ? Que faut-il modifier : la puissance de l'émetteur, l'antenne, le récepteur et son traitement de signal ? Une unité de mesure simple est alors le prix du décibel, somme qu'il faut investir pour augmenter d'un décibel, toutes choses égales par ailleurs, la marge de champ reçu pour une liaison donnée. Il faut bien reconnaître que le calcul économique pour une liaison terrestre fixe conduit plutôt à augmenter la taille des antennes ou la hauteur du mât qu'à compliquer le traitement de signal.

Il est bien souvent préférable de réaliser un système sous-optimal mais simple à construire et fiable que de vouloir à tout prix approcher les limites théoriques. Encore faut-il les connaître avec certitude, et donc avoir fait les recherches nécessaires. Comment peut-on avoir réalisé un système proche de l'optimum sans connaître les limites théoriques ? Enfin, la technologie progresse très vite. Ce qui était impossible hier est réaliste aujourd'hui. Il faut être prêt à bénéficier de cette évolution et, pour cela, disposer par avance des meilleurs algorithmes.

Au moment de conclure, j'ai le sentiment d'avoir posé plus de questions que je n'ai apporté de réponses. Quel est l'avenir du traitement de signal ? Il me semble que la réponse appartient à la communauté scientifique. Il sera ce que les chercheurs en feront.

Pour ma part, je pense que le développement de cette discipline passe par trois points clés. Le premier est l'observation du monde dans lequel nous vivons. C'est lui qui traite, ou maltraite, en premier les signaux que nous avons à étudier. Le second est la recherche d'algorithmes optimaux, non plus pour des opérations de traitement de signal élémentaires, mais pour des fonctions complètes. On cherchera à optimiser une liaison de données et non un modem, un radar et non la compression d'implusions... Ceci nécessitera l'étude des traitements non linéaires qui seuls peuvent réduire les données d'entrée au petit nombre d'informations de sortie exploitables. Le dernier est le développement de nouvelles applications. Elles sont potentiellement très nombreuses. Je n'en citerai que quelques-unes déjà très importantes : la télédétection, le traitement d'image, le médical, etc...

Comme l'électronique l'a déjà fait, le traitement de signal est en train d'envahir tous les domaines scientifiques et industriels. Il y trouvera des problèmes nouveaux qui lui apporteront en retour de nouveaux champs d'investigation. Pour ma part, je ne peux m'empêcher de lui prédire un brillant avenir.

(¹) GRETI 85 – Méthodes haute résolution après formation de voies.

(²) GRETSI 85 – Détection de grandeurs primitives dans un message composite par une architecture de calcul neuromimétique à apprentissage non supervisé.