

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75

ANNULEUR D'ECHO AUTOADAPTATIF POUR TRANSMISSION TELEPHONIQUE
A GRANDE DISTANCE

AUTO-ADAPTATIVE ECHO CANCELLER FOR LONG DISTANCE TELEPHONE CIRCUITS

Alain CASTANET

CIT-Alcatel Nozay 91310 Montlhéry

CIT-Alcatel Nozay 91310 Montlhéry

RESUME

L'apparition d'échos dans le réseau téléphonique à grande distance est un phénomène indésirable bien connu. Selon la technique conventionnelle, des organes appelés supprimeurs d'écho sont utilisés pour supprimer cet effet ; mais ces organes ont des performances limitées.

Une nouvelle méthode pour l'annulation de l'écho est présentée ici. Une copie de l'écho synthétisée est soustraite du signal de retour. Cette copie est synthétisée au moyen d'un filtre qui s'adapte aux caractéristiques du chemin d'écho et aux variations susceptibles d'advenir aux caractéristiques de ce chemin pendant une conversation, ceci grâce à une boucle de contre réaction. Le système annule l'écho sans interrompre le circuit de retour.

L'article ci-dessous décrit la structure d'un annuleur d'écho expérimental réalisé à la Compagnie Industrielle des Télécommunications et présente des résultats de mesures effectuées en laboratoire.

SUMMARY

Echo in the long-distance telephone plant is a well-known undesirable phenomenon. The conventional technique of preventing echo uses devices called echo suppressors, which are limited in performance.

A novel method is presented for echo cancellation. A replica of the echo is synthesized by means of a filter which, under the control of a feedback loop, adapts to the transmission characteristics of the echo path and tracks variations of the path that may occur during a conversation. The device achieves echo cancellation without interrupting the return path.

In this paper, the structure of an experimental echo canceller, which has been manufactured at the Compagnie Industrielle des Télécommunications, is described and results obtained from measurements in the laboratory are reported.



ANNULEUR D'ECHO AUTOADAPTATIF POUR TRANSMISSION TELEPHONIQUE
A GRANDE DISTANCE
AUTO-ADAPTATIVE ECHO CANCELLER FOR LONG DISTANCE TELEPHONE CIRCUITS

Deux techniques différentes sont utilisées pour les transmissions téléphoniques :

- Circuits 2 fils pour les réseaux locaux ; les 2 sens transitent par le même canal.
- Circuits 4 fils pour les liaisons à grande distance ; chacun des sens transite par un canal 2 fils différent.

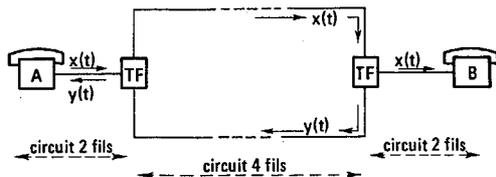


Fig. 1. — Phénomène de l'écho.

La connexion entre le circuit 2 fils et le circuit 4 fils se fait par l'intermédiaire d'un transformateur différentiel. Le transformateur différentiel ne peut jamais être parfaitement équilibré et produit un écho. Ce phénomène est représenté sur la figure 1 : l'abonné A est en communication avec l'abonné B, il lui envoie un signal $x(t)$; au passage dans le transformateur différentiel situé côté B, $x(t)$ produit un écho $y(t)$ qui est renvoyé à l'abonné A.

La gêne produite par cet écho devient d'autant plus importante que la distance réelle parcourue par le signal est plus grande. Pour les liaisons par satellite le temps écoulé entre l'émission d'une syllabe par l'abonné A et le retour de l'écho de cette même syllabe peut dépasser une demi-seconde. Dans ces conditions, toute conversation téléphonique entre A et B devient impossible.

Depuis plusieurs années, des recherches ont été menées pour essayer d'imaginer un système capable d'engendrer un signal $\hat{y}(t)$ aussi voisin que possible du signal d'écho $y(t)$; il suffit alors de mettre $y(t)$ et $\hat{y}(t)$ en opposition pour interrompre la retransmission de l'écho vers l'abonné émetteur. Evidemment si $y(t)$ n'est pas exactement égal à $\hat{y}(t)$, il restera un signal erreur $e(t)$; le but n'est pas de supprimer totalement l'écho, mais de l'affaiblir suffisamment pour qu'il ne produise aucune gêne.

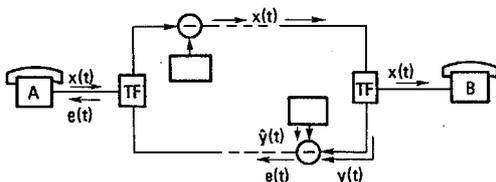


Fig. 2. — Annuleur d'écho.

Un tel dispositif ne bloque pas la transmission de B vers A et permet donc à l'abonné B d'interrompre A sans aucun problème. Le système est d'autre part autoadaptatif, c'est à dire que le signal synthétisé $\hat{y}(t)$ suit les variations de l'écho $y(t)$.

Si le phénomène de l'écho est supposé linéaire, $y(t)$ peut être considéré comme le résultat de la convolution de $x(t)$ et d'une fonction $h(t)$, réponse impulsionnelle du filtre d'écho.

Si h_m sont les échantillons représentatifs de $h(t)$ prélevés à des intervalles de temps τ

$$y(t) = \sum_m h_m x(t - m\tau)$$

Il apparaît donc indiqué de synthétiser $\hat{y}(t)$ avec un filtre transversal à coefficient c_j . $\hat{y}(t) = \sum_j c_j x(t - j\tau)$.

Ces coefficients C_j sont asservis de façon à ce que la quantité

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} [\hat{y}(t) - y(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\sum_j C_j x(t - j\tau) - y(t) \right]^2 dt$$

soit minimale.

On démontre que E ne possède qu'un minimum, lequel se produit lorsque les dérivées partielles $\partial E / \partial C_j$ sont toutes nulles :

$$\frac{\partial E}{\partial C_j} = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} [\sum_j C_j x(t - j\tau) - y(t)] x(t - j\tau) dt = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} e(t) x(t - j\tau) dt$$

Soit $\mathcal{G}_j(t)$ la fonction de corrélation entre le signal erreur $e(t)$ et la sortie de la j^e ligne à retard du filtre transversal :

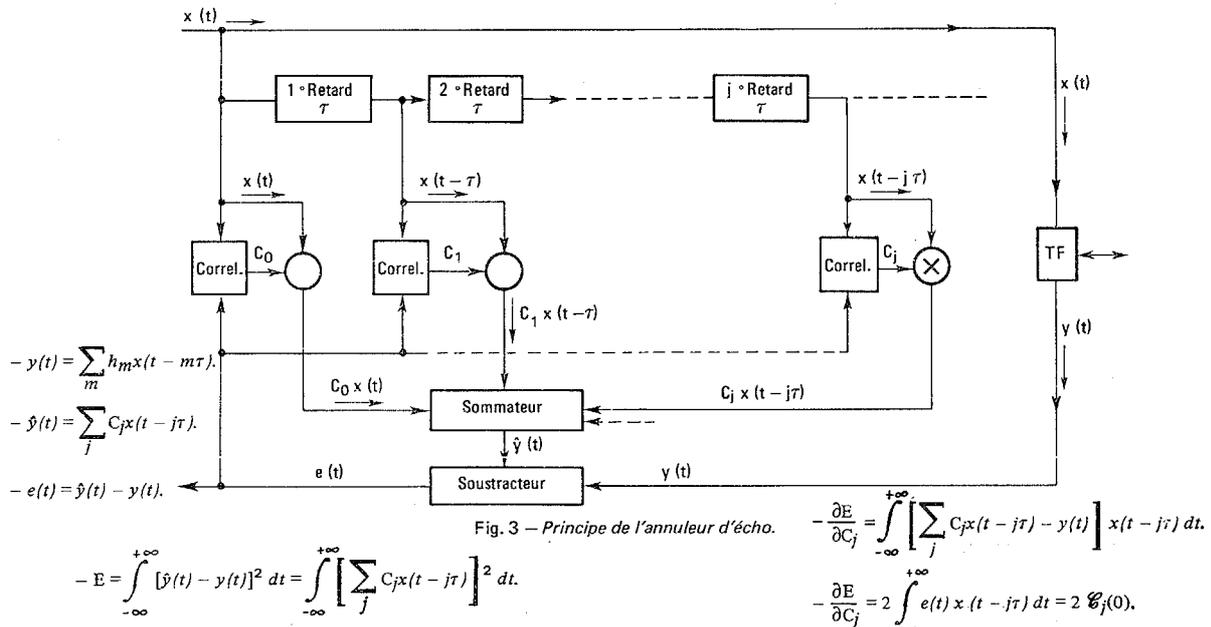
$$\frac{\partial E}{\partial C_j} = 2 \mathcal{G}_j(0)$$

Le système d'équations :

$$\mathcal{G}_j(0) = 0$$

permet de calculer les valeurs à affecter aux différents coefficients C_j pour que le signal erreur $e(t)$ soit minimal au sens des moindres carrés.

Si des valeurs arbitraires ont été données à ces coefficients C_j , les $\partial E / \partial C_j$ définissent les variations à faire subir aux C_j pour réduire l'erreur quadratique. Le gradient $\partial E / \partial C_j$ est directement donné par la valeur prise par la fonction de corrélation entre le signal erreur $e(t)$ et la sortie de la ligne à retard de rang j du filtre transversal. Le corrélateur étant un dispositif connu, on peut alors concevoir l'organisation générale d'un annuleur d'écho rendant minimale l'erreur quadratique moyenne, comme il est représenté sur la figure 3 : pour chacun des coefficients C_j à déterminer, un corrélateur calcule le gradient $\partial E / \partial C_j$; la valeur fournie par le corrélateur est ensuite interprétée dans un organe de décision qui détermine la variation à apporter à la valeur précédente du coefficient et donne l'ordre d'exécuter cette variation.



Au bout d'un temps T, appelé temps de convergence, tous les Cj atteignent leur valeur limite et l'erreur E est minimale. Si la fonction de transfert du filtre d'écho subit une variation, le système d'asservissement se remet en marche et les coefficients Cj prennent de nouvelles valeurs qui rendent à nouveau l'erreur E minimale.

La définition d'un annuleur d'écho basé sur les principes exposés ci-dessus pose toutefois un certain nombre de problèmes qui ne peuvent être résolus sans une connaissance précise du phénomène d'écho lui-même.

Tout d'abord quelle est la différence de niveau entre x(t) et y(t) ? C'est à dire l'affaiblissement naturel de transfert d'écho (ATE). Sur les circuits rencontrés en pratique, cet affaiblissement est en moyenne de 12 dB, avec un minimum à 6 dB, et un écart type de l'ordre de 3 ou 4 dB.

Le phénomène d'écho est caractérisé par la réponse impulsionnelle du chemin d'écho. Un exemple de réponse impulsionnelle mesurée sur un circuit réel est représenté sur la figure 4

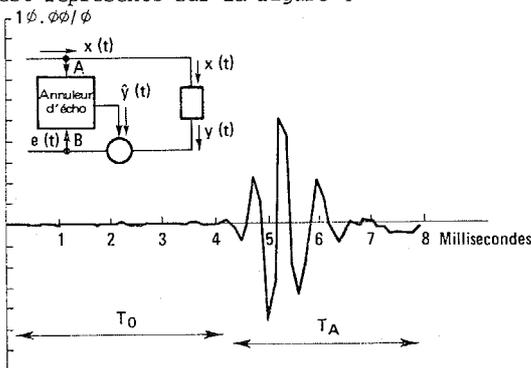


Fig. 4 - Réponse impulsionnelle de chemin d'écho.

Cette fonction peut prendre des allures très différentes les unes des autres, en fonction des circuits rencontrés et des caractéristiques de la ligne bifilaire reliant l'abonné au transformateur différentiel. Pour déterminer combien de coefficients Cj il faut prévoir dans un annuleur d'écho, il est surtout nécessaire de connaître la durée de cette réponse impulsionnelle. Cette durée est caractérisée par deux grandeurs successives. T0 retard initial à l'apparition de l'écho et TA durée d'activité, comme le montre la figure 4.

Si x(t) est une impulsion de Dirac appliquée à l'instant 0 au point A, y(t) sera la réponse impulsionnelle de chemin d'écho et apparaîtra à l'entrée B de l'annuleur d'écho au bout du temps T0 nécessaire pour le parcours du trajet A-transformateur différentiel-B. Ce trajet peut être assez long, si l'annuleur est inséré sur le circuit lointain du transformateur différentiel. Sur le réseau français ce temps T0 peut atteindre jusqu'à une quinzaine de millisecondes, dans le cas par exemple où l'annuleur est installé au centre de transit international à Paris et le transformateur différentiel est à Nice.

La durée d'activité TA est de l'ordre de quelques millisecondes. D'après les mesures faites sur le réseau français, il apparaît que cette durée TA est toujours inférieure à 8 ms, 95 % de l'énergie de la réponse impulsionnelle étant contenue dans les 6 premières millisecondes.

Il ressort des chiffres ci-dessus que, si le nombre de coefficients Cj est suffisant pour couvrir une durée totale de l'ordre d'une trentaine de



millisecondes, l'annuleur d'écho réalisé pourra fonctionner dans la totalité des cas rencontrés en pratique.

La bande de fréquences utilisée en téléphonie est la bande 300-3 400 Hz. Une fréquence d'échantillonnage de 8 000/s (soit un échantillon toutes les 125 μ s) est donc suffisante. Pour représenter une durée d'une trentaine de millisecondes, il faut prévoir un nombre de coefficients de l'ordre de 250, ce qui exige théoriquement, pour un annuleur d'écho, 250 cellules élémentaires suivant le schéma de la figure 3. Cela représenterait un ensemble très lourd, et d'un coût probablement prohibitif.

Mais en numérique, on peut travailler en temps partagé : une seule cellule élémentaire travaillant successivement pour chacun des coefficients C_j . Le schéma d'un appareil fonctionnant suivant ce principe est représenté sur la figure 5. Le signal $x(t)$ émis par l'abonné lointain et l'écho $y(t)$ sont échantillonnés et codés à la cadence de 8 000 par seconde. Toutes les opérations sont effectuées en numérique, le signal erreur $e(t)$ est décodé avant d'être renvoyé sur la ligne vers le même abonné lointain. Les échantillons du signal $x(t)$ circulent dans un registre à décalage de N cellules, N représentant le nombre total de coefficients à utiliser. Ce registre est rebouclé sur lui-même, de fa-

çon à ce qu'un tour complet soit effectué en 125 μ s, chacun des échantillons emmagasinés se présente à la sortie du registre une fois au cours de chaque période de 125 μ s. A la fin de chaque période, un nouvel échantillon de $x(t)$ entre dans le registre et l'échantillon le plus ancien disparaît. Les N coefficients C_j circulent eux aussi dans un registre à décalage à N cellules rebouclé sur lui-même à travers l'additionneur du corrélateur ; un tour complet est effectué en 125 μ s. Les valeurs des coefficients C_j sont remises à jour à chaque période d'échantillonnage : un multiplicateur fait N fois par période d'échantillonnage le produit $e_k x_k^j$ et en déduit la correction à apporter par l'additionneur à chacun des coefficients C_j . Un autre multiplicateur fait à chaque période d'échantillonnage successivement les N produits $C_j x_k^j$ ces N produits sont additionnés les uns aux autres dans un additionneur accumulateur qui engendre l'échantillon d'écho synthétisé $\hat{y}_k = \sum C_j x_k^j$. Il ne reste plus alors au soustracteur qu'à effectuer l'opération $e_k = \hat{y}_k - y_k$.

Une maquette d'un tel système a été réalisée et mesurée dans les laboratoires de la CIT ; les échantillons avaient 8 eb plus le signe. La figure 6 représente les performances obtenues, en ce qui concerne l'amélioration apportée par l'annuleur sur l'affaiblissement de transfert d'écho.

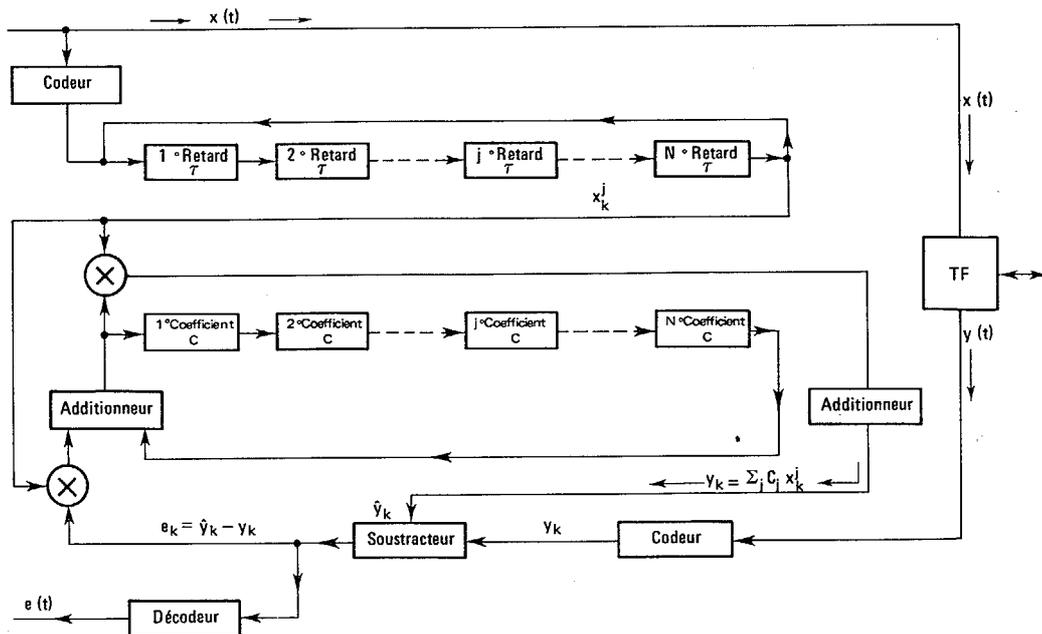


Fig. 5 - Structure d'un annuleur d'écho numérique.



Pour caractériser les performances d'un annuleur d'écho, il faut aussi tenir compte du temps de convergence, temps écoulé entre l'apparition du signal $x(t)$ et le moment où l'affaiblissement apporté par l'annuleur a atteint 90 % de sa valeur limite, les coefficients C_j étant initialement à zéro. Sur la maquette réalisée à la CIT, ce temps de convergence est de l'ordre d'une demi-seconde, si $x(t)$ est un signal téléphonique conventionnel. Dans le cas où $x(t)$ est un signal de parole normal les choses ne sont pas si simples ; en effet, il y a des périodes de silence entre les syllabes dans un signal de parole, et le processus de convergence de l'annuleur s'arrête à chaque silence. On ne peut donc plus parler de temps de convergence sans définir d'abord un signal de parole étalon. Disons, tout de même, pour fixer les idées que sur la maquette réalisée à la CIT, l'affaiblissement apporté par l'annuleur atteint 90 % de sa valeur limite après 5 ou 6 syllabes.

Pour accélérer la convergence il suffit d'accroître pour un niveau donné du signal d'erreur $e(t)$ les valeurs des corrections à apporter aux coefficients C_j à chaque période d'échantillonnage. Mais, si ces valeurs de correction sont trop importantes, les coefficients vont se mettre à osciller quand ils s'approcheront de leur valeur théorique limite, ce qui

se traduit par la permanence d'une erreur $e(t)$ importante ; d'où un affaiblissement d'écho non satisfaisant. Il n'est pas possible d'améliorer à la fois le temps de convergence et l'affaiblissement ; et, pour un appareil opérationnel, il faut rechercher le meilleur compromis entre temps de convergence et affaiblissement.

Il semble donc que l'annuleur d'écho, tel qu'il a été décrit ici, soit l'appareil idéal pour résoudre les problèmes d'écho rencontrés sur le réseau téléphonique. Il avait toutefois été considéré jusqu'à maintenant comme une curiosité de laboratoire ; et il faisait même un peu peur à cause de son coût probable. Mais les progrès actuels en technologie des circuits intégrés à grande échelle permettent de considérer l'avenir sous un jour tout différent. Dès maintenant il est possible de réaliser des LSI en technologie MOS représentant chacun l'équivalent d'un bon millier de transistors ; dans ces conditions, l'ensemble de la partie numérique d'un annuleur pourrait tenir en 25 à 30 boîtiers de circuits intégrés, ce qui ferait un encombrement ne dépassant pas celui d'une carte de circuit imprimé de dimensions 125 / 185 ; il faudrait compter une deuxième carte pour loger les codeurs, décodeur et dispositifs de liaisons aux circuits téléphoniques. Un annuleur représenterait donc deux car-

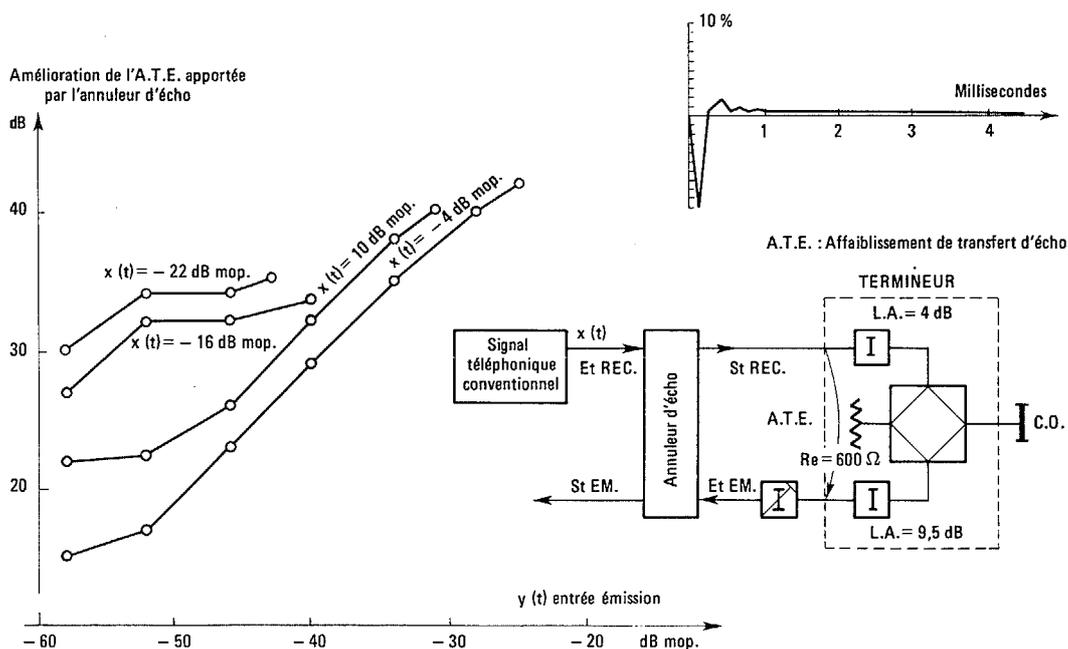


Fig. 6 — Amélioration apportée par l'annuleur sur l'affaiblissement de transfert d'écho

tes, ce qui serait d'ores et déjà très acceptable et permet d'envisager l'avenir avec optimisme. Mais on commence à prévoir des circuits beaucoup plus intégrés, par exemple l'équivalent de 30 000 transistors dans un seul boîtier, dans un délai de l'ordre de 4 ou 5 ans ; dans de telles conditions un annuleur d'écho entier contiendrait sur une seule carte de circuit imprimé, ce qui serait particulièrement intéressant. D'un autre côté, les télécommunications par satellite de développent de plus en plus et se satisfont de moins en moins des classiques supresseurs d'écho dont il a été question au début de cet exposé. Le besoin d'annuleurs se fait donc sentir de façon de plus en plus pressante, au moment même où les progrès technologiques les rendent plus faciles et moins coûteux à réaliser.