

ESTUDIO COMPARATIVO DE METODOS DE ESTIMACION DEL PULSO ULTRASONICO EN ANALISIS NO DESTRUCTIVOS DE MATERIALES

PACS: 43.35.Zc

J. Gosálbez¹; L. Vergara¹; R. Miralles¹; J.V. Fuente²

1 Departamento de Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera s/n. 46022 Valencia

Tel.: 963 877 930 Fax : 963 877 309

E-mail: jorgocas@com.upv.es; lvergara@com.upv.es; rmiralle@com.upv.es

2 AIDICO. Instituto Tecnológico de la Construcción

Avda. Benjamín Franklin, 17. 46980 Paterna. Valencia

Tel.: 961 318 278 Fax: 961 318 033

E-mail: jvfuelle@aidico.es

ABSTRACT

The microstructure of a material produces granular noise when it is illuminated with an ultrasonic pulse. Due to this microstructure, the pulse suffers deformations when it propagates. The estimate of the pulse starting from the registration of granular noise, is of interest to extract parameters linked to characteristic of the material. Three different alternatives are presented for the estimate of the pulse: parametric method, ARMA model, non parametric method, based on the cepstrum, and a third method that uses analysis of higher order (bispectrum and bicepstrum). The methods are applied on a granular noise simulator and real registrations of cement test tubes.

RESUMEN

La microestructura de un material produce ruido granular cuando es iluminado con un pulso ultrasónico. Debido a esta microestructura, el pulso sufre deformaciones conforme se propaga. La estimación del pulso a partir del registro de ruido granular, resulta de interés para extraer parámetros vinculados a características del material. Se presentan diferentes alternativas para la estimación del pulso: método paramétrico, modelo ARMA, método no paramétrico, basado en el cepstrum, y un tercer método que emplea análisis de orden superior (biespectro y bicepstrum). Los métodos se aplican sobre un simulador de ruido granular y sobre registros reales de probetas de cemento.

INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos con ultrasonidos mediante la técnica de pulso – eco basan su funcionamiento en inyectar una onda mecánica (pulso ultrasónico) a través de un material. Debido a los cambios de impedancia que se producen en el interior del material, parte de la energía se refleja y es detectada por el mismo transductor que la emitió. Si la microestructura del material presenta una cierta granularidad, provoca la superposición de múltiples ecos que se atenúan con el tiempo [10] . Esto se conoce como ruido granular y la señal registrada en este caso se puede modelar como una convolución 1-D (1) entre la forma del pulso ultrasónico $x_{pulso}(t,r)$ y la respuesta del material $h_{material}(t,r)$ [4] [6] [7] [9] .

$$(1) \quad y_{registrada}(t,r) = x_{pulso}(t,r) * h_{material}(t,r)$$

De este modo, la señal registrada es no estacionaria puesto que depende de la profundidad (relación directa con el tiempo), pero asumiendo que esta variación es lenta y cogiendo un segmento suficientemente pequeño se puede suponer estacionariedad (2):

$$(2) \quad y_{registrada}(t) = x_{pulso}(t) * h_{material}(t)$$

El objetivo es hacer una estimación del pulso a partir de la señal registrada y poder analizar como varían sus características con la profundidad. Estas variaciones están relacionadas con la atenuación que sufre cada frecuencia por separado, donde algunos autores modelan el parámetro de la atenuación como una función lineal con la frecuencia, como es en el caso de tejidos biológicos [5]. En otros trabajos esta dependencia pasa a ser cuadrática [3]. De todos modos, la naturaleza de estos cambios no se conoce muy bien [11] y depende de cada caso en particular, aunque hay un consenso en que las altas frecuencias sufren una atenuación mayor que las bajas. La respuesta del material solo variará con la profundidad si las características del mismo varían, sino será independiente de r .

Midiendo estas variaciones del pulso se podrá correlar con alguna de las características del material. La dificultad se presenta en que únicamente se tiene acceso a la señal $y_{registrada}(t)$, es decir, es un problema de deconvolución ciega. Los diferentes métodos que se comentan para la extracción del pulso asumen alguna condición que permite la extracción del pulso: fase mínima del pulso, conocimiento a priori del ruido y del material (filtros de WIENER) otros asumen no gaussianidad en la respuesta del material...

Este artículo se proponen dos tipos de métodos para la extracción del pulso ultrasónico: un método paramétrico basado en un modelo ARMA (autoregressive moving average) [4] [2], y métodos basados en el CEPSTRUM [6] [9] [7] [8]. A continuación se presentarán los resultados aplicando estos métodos sobre señales simuladas y sobre señales de pasta de cemento. Por último, se verán algunas conclusiones a las que se han llegado.

MÉTODO PARAMÉTRICO: EXTRACCIÓN DEL PULSO MEDIANTE MODELO ARMA

El primer método planteado basa su funcionamiento en modelar el pulso mediante un modelo ARMA (autoregressive moving average model). Este modelo proporciona gran versatilidad para ajustarse a diferentes formas del pulso además de existir métodos sencillos para estimar los parámetros. Otros autores han empleado otros modelos bien para estimar directamente parámetros referentes del pulso como la atenuación [5], o bien para estimar el propio pulso con modelos más sencillos como AR o MA [2] [4] [5] [12].

Para este caso, la expresión general (2), no es válida ya que estamos en un modelo paramétrico. Para ello, (2) se convierte en (3), donde la señal registrada se interpreta como el filtrado entre la respuesta del material, $h(k)$, y el filtro que modela la respuesta del pulso, $C(z)/A(z)$:

$$(3) \quad A(z)y_{registrada}(k) = C(z)h(k) \rightarrow \begin{cases} C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \\ A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \\ \mathbf{q}^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, c_1, c_2, \dots, c_{n_c}] \end{cases}$$

El algoritmo implementado se basa en estimar los coeficientes óptimos, C y A , por mínimos cuadrados basado en dos pasos:

- **Primer paso**, hace una primera estima de los parámetros, como si este fuera un filtro predictor que sigue un modelo AR (autoregressive) minimizando el valor cuadrático medio del error de predicción(5). Con los parámetros estimados (6) y aplicando (4), se genera la señal error de predicción (4) que servirá para el paso siguiente.
- **Segundo paso**, se aplica el mismo método minimizando la misma función de coste,(5), pero en este caso siguiendo un modelo ARMA. Para que la estima del pulso,(6), sea la correcta, la secuencia de reflexión del material tiene que ser blanca.

$$(4) \quad \begin{aligned} \hat{\varepsilon}(k, \mathbf{q}) &= y(k) - \hat{y}(k, \mathbf{q}) = \\ &= y(k) - \mathbf{j}_{AR \circ ARMA}^T(k) \hat{\mathbf{q}}_{AR \circ ARMA} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \mathbf{j}_{AR}^T(k) &= [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a)] \\ \mathbf{j}_{ARMA}^T(k) &= [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), \\ &\quad \hat{\varepsilon}(k-1), \dots, \hat{\varepsilon}(k-n_c)] \end{aligned} \right.$$

$$(5) \quad J(\mathbf{q}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} \hat{\varepsilon}^2(k, \mathbf{q}) \quad (\text{Función de coste})$$

$$(6) \quad \hat{\mathbf{q}}_{AR \circ ARMA} = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{j}_{AR \circ ARMA}(k) \mathbf{j}_{AR \circ ARMA}^T(k) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{j}_{AR \circ ARMA}(k) y(k)$$

Como conclusiones de este algoritmo podemos decir que presenta más libertades que otros modelos como pueden ser modelos AR o modelos MA [2], computacionalmente es un algoritmo sencillo y presenta una estimas nítidas en condiciones adecuadas Fig. 3. Como contrapartidas están la necesidad de ajustar el orden del modelo, N_a y N_c , que la respuesta del material sea de media cero y blanca y que se estima la versión de fase mínima del pulso.

MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS BASADOS EN EL CEPSTRUM

Tal y como se ha visto, en el punto anterior se ha empleado un método paramétrico para modelar el pulso de ultrasonidos. En la mayoría de los casos este modelo es más que suficiente, pero en este punto, se plantea la estima del pulso mediante modelos no paramétricos [6] [9], de modo que su forma no tenga que ceñirse a las limitaciones de un modelo. Dentro de este tipo de métodos, se explicará y se mostrará resultados sobre un método que extrae el CEPSTRUM del pulso directamente de la señal $y_{registrada}(t)$ (MÉTODO NO PARAMÉTRICO 1) y otro método, algo más complicado que extrae el CEPSTRUM del pulso a partir del análisis espectral de orden superior (biespectro y del bicepstrum) (MÉTODO NO PARAMÉTRICO 2).

Método No Paramétrico 1

La idea básica de este método se basa en eliminar el efecto del material de la expresión (1). Para ello se pasa la señal $y_{registrada}(t)$ al dominio CEPSTRAL donde es sencillo eliminar la señal no deseada y recuperar el pulso. Desarrollando brevemente el algoritmo vemos las limitaciones y suposiciones que hay que tomar. Partiendo de la expresión (2) podemos pasarla al dominio del cepstrum (7):

$$(7) \quad c_y(m) = FFT^{-1}\{\log(Y(f))\} = FFT^{-1}\{\log(X(f))\} + FFT^{-1}\{\log(H(f))\}$$

La señal $X(f)$ corresponde a la transformada del pulso de excitación. Esta transformada está centrada sobre una frecuencia central, con un cierto ancho de banda y además es suave. Mientras que a señal $H(f)$ es la transformada de la respuesta del material que por definición, está compuesta como sumatorio de dispersores con distribución Gaussiana y por tanto su transformada está distribuida por todo el espectro y nada suave.

Todo esto se traduce que en el dominio del cepstrum, las primeras muestras de la señal $c_y(m)$ contienen información referente al pulso, $x(k)$, mientras que el resto contienen información del material $h(k)$. De este modo, se puede recuperar el cepstrum complejo de la señal $x(k)$ a partir del cepstrum de la señal $y(k)$ sin más que eliminar las muestras que contienen información referente al material. Todo este proceso se refleja en la expresión (8). El número de muestras a eliminar es el único parámetro que necesita este algoritmo para recuperar la información del pulso [6].

$$(8) \quad y = x * h \Rightarrow \begin{aligned} Y_l = \log\{FFT\{y\}\} \\ c_y = FFT^{-1}\{Y\} \end{aligned} \Rightarrow \hat{c}_x = \begin{cases} c_y(n), & n = 0 \\ 2c_y(n), & 1 \leq n \leq N_c \\ 0, & N_c + 1 \leq n \leq N - 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} X_l = FFT\{\hat{c}_x\} \\ x_{recuperado} = FFT^{-1}\{\exp(X_l)\} \end{aligned}$$

Como conclusiones de este algoritmo se pueden indicar que no necesita que el pulso se adapte a ningún modelo, salvo que su FFT sea suave. Computacionalmente es un algoritmo sencillo (ya que solo se calculan FFTs) Como contrapartidas es necesario ajustar un parámetro de configuración, N_c . También es necesario que el material tenga una distribución gaussiana. Recupera la versión de fase mínima del pulso debido a que en el dominio del cepstrum podemos diferenciar el módulo correspondientes a la señal y al material, pero no podemos hacer lo mismo con las fases. Este es un aspecto a tener en cuenta si hubiese que procesar la fase.

Método No Paramétrico 2 (Biespectro Y Bicepstrum).

Los dos métodos vistos hasta ahora (Modelo ARMA y Método No Paramétrico 1) tienen limitaciones como son forma del pulso recuperado y versión de fase mínima. Este nuevo método emplea estadísticos de orden superior para el estimar el cepstrum complejo del pulso, [1], y exige menos restricciones al pulso que los anteriores [7] [8]. Para ello se ha de cumplir que los dispersores del material son estacionarios, independientes e idénticamente distribuidos. Bajo esta hipótesis y tomando como inicio la expresión (2), al desarrollarla en el dominio del biespectro (9), el biespectro de dicha respuesta (10) es constante y coincide con su skeness.

$$(9) \quad C_3^y(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = C_3^x(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) \cdot H(\mathbf{w}_1) \cdot H(\mathbf{w}_2) \cdot H^*(\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2) = C_3^x(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) \cdot C_3^h(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2)$$

$$(10) \quad C_3^h(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \mathbf{g}_3^h \Rightarrow C_3^y(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = C_3^x(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) \cdot \mathbf{g}_3^h$$

$$(11) \quad b_y(m_1, m_2) = FFT_2^{-1} \left\{ \log(C_3^y(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2)) \right\} = b_x(m_1, m_2) + b_h(m_1, m_2)$$

Si ahora calculamos el bicepstrum que no es más que pasar el biespectro al dominio del cepstrum, queda la expresión (11). Como C_3^h es constante, su bicepstrum será una delta en el origen, de modo que el bicepstrum de la señal $y(k)$ coincidirá con el bicepstrum de la señal $x(k)$ salvo en el origen. Según [1], el cepstrum complejo de una señal se puede obtener a partir del bicepstrum. Y una vez estimado el cepstrum del pulso es inmediato obtener la respuesta del pulso. Todo este proceso se presenta en la expresión (12):

$$(12) \quad \begin{cases} b_x(m_1, m_2) = b_y(m_1, m_2), & (m_1, m_2) \neq (0, 0) \\ c_x(m) = \begin{cases} b_x(m, 0) = b_x(0, m) = b_x(-m, -m), & m \neq 0 \\ 0, & m = 0 \end{cases} \\ \hat{x}(k) = FFT^{-1} \left\{ e^{FFT\{c_x(m)\}} \right\} \end{cases}$$

Como conclusiones hay que decir que no exige ninguna restricción para el pulso y puede tener cualquier forma y ser de fase no mínima, además la estima del pulso es una estima desplazada. Como restricciones, presenta que los dispersores del material tienen que ser estacionarios, independientes e idénticamente distribuidos además de necesitar mucho cálculo computacional.

APLICACIÓN DE LOS DISTINTOS MÉTODOS

Como último punto, se presentan unos resultados aplicando dos de estos métodos para estimar el pulso ultrasónico. Las primeras figuras corresponden a simulaciones, mientras que las últimas, corresponden a medidas tomadas sobre muestras de pasta de cemento, donde se pretende medir diferencias entre probetas con distintas concentraciones agua/cemento.

Simulación para la extracción simple del pulso: en este caso se ha convolucionado la respuesta del material, el cual sigue una distribución uniforme, con la respuesta conocida de un pulso. A partir de la señal resultado, se aplican los métodos vistos, en los cuales podemos ver como la estima se aproxima al pulso teórico. En este caso, no se ha simulado la naturaleza no estacionaria de las señales ultrasónicas y solo ha hecho la estima de un único pulso (Fig.1.). No se ha hecho promediado entre distintas estimas.

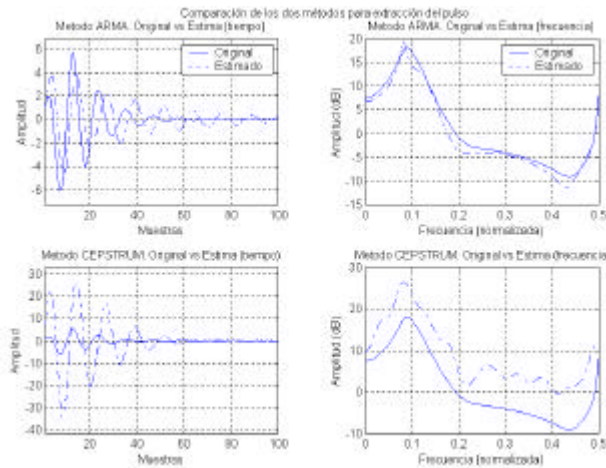


Fig. 1. Estima del pulso mediante simulaciones.

Estima del pulso sobre una señal ultrasónica simulada que contempla la variación del pulso con el tiempo (profundidad). Basándonos en un simulador de señal granular el simulador [3], se genera una señal de ruido granular, con una frecuencia central de 1MHz. En este caso, se aplica análisis no estacionario y los resultados se presentan como la evolución del módulo de la respuesta en frecuencia con el tiempo (Fig. 2). Se puede ver como las altas frecuencias sufren una atenuación mayor que las bajas.

Como último caso, tenemos la estima del pulso ultrasónico en probetas de pasta de cemento de relaciones agua – cemento diferentes. En concreto se han probado dos relaciones diferentes: 0.30 y 0.45. Podemos ver como en el primer caso, el pulso se propaga durante más tiempo que en el segundo caso (Fig. 3). También presenta una traza más fina y uniforme. Estas imágenes representarán la firma ultrasónica del material, de modo que comparándola con un patrón, se pueda discriminar características del material.

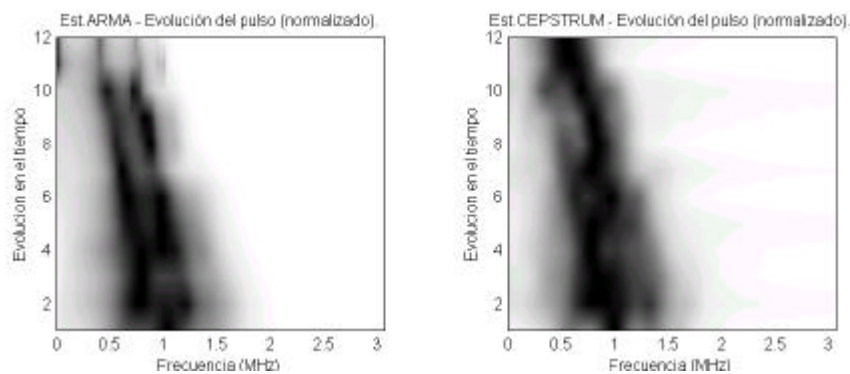


Fig. 2. Comparación entre la estima ARMA y CEPSTRUM en el caso de pulso no estacionario.

Como último caso, tenemos la **estima del pulso ultrasónico en probetas de pasta de cemento de relaciones agua – cemento diferentes.** En concreto se han probado dos relaciones diferentes: 0.30 y 0.45. Podemos ver como en el primer caso, el pulso se propaga durante más tiempo que en el segundo caso (Fig. 3). Estas imágenes representarán la firma ultrasónica del material, de modo que comparándola con un patrón, se pueda discriminar características del material.

CONCLUSIONES

Como conclusiones hay que decir que en todos los métodos que se han mostrado, tiene sus limitaciones y ventajas. En el modelo ARMA, si el pulso se puede ajustar bien al modelo, da unos resultados aceptables y más nítidos que el método segundo (Fig. 3)., pero por contrapartida tiene el problema que recupera la versión de fase mínima del pulso, es necesario elegir el orden adecuado y tiene el problema innato de la inversión de una matriz. El segundo método es sencillo. Podemos ver que en determinadas situaciones no difiere mucho respecto al modelo paramétrico (Fig. 2), pero es necesario seleccionar el número de muestras a eliminar y también recupera la versión de fase mínima del pulso. Respecto al análisis sobre cemento, vemos que con la evolución del pulso extraemos la firma del material, siendo más nítida para el estimador ARMA.

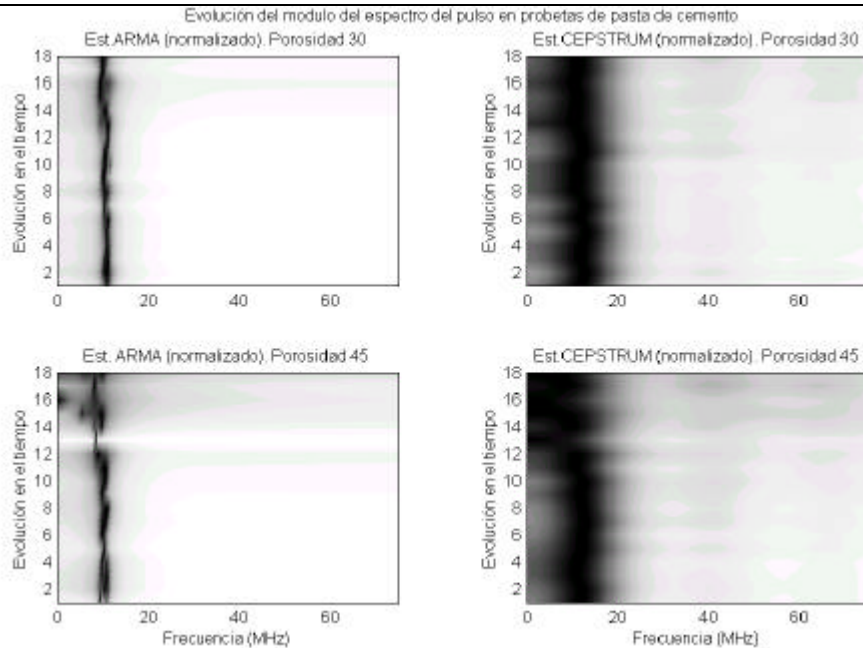


Fig. 3. Evolución del pulso en probetas de pasta cemento con relación agua cemento 0.30 y 0.45.

REFERENCIAS

- [1] Chrysostomos L.Nikias, Athina P.Petropulu. *"Higher – Order Spectra Analysis. A Nonlinear Signal Processing Framework"*. Prentice-Hall Signal Processing Series.
- [2] Steven M.Kay. *"Modern Spectral Estimation, Theory & Application"*. Prentice-Hall Signal Processing Series.
- [3] J.V. Fuente, L. Vergara, R. Miralles, J. Gosálbez. *"Análisis Tiempo-Frecuencia De Ruido Granular Ultrasonico Para Evaluación Nodestructiva De Materiales"*. XXXII Congreso Nacional de Acustica.
- [4] Jorgen Arendt Jensen. *"Estimation of Pulses in Ultrasound B-Scan Images"*. IEEE Transactions on biomedical engineering, vol. 10, no. 2, june 1991.
- [5] Jean-Marc Girault, Frédéric Ossant, Abdeljalil Ouahabi, Denis Kouamé, Frédéric Patat. *"Time-Varying Autoregressive Spectral Estiimation For Ultrasound Attenuation In Tissue Characterization"*.IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 45, no 3, may 1998.
- [6] Jorden Arendt Jensen, Sidney Leeman. *"Nonparametric Estimation of Ultrasound Pulses"*. IEEE Transactions on biomedical engineering, vol. 41, no. 10, october 1994.
- [7] Udantha R. Abeyratne, Athina P. Petropulu, John M. Reid. *"Higher Order Spectra Based Deconvolution Of Ultrasound Images"*.
- [8] Lahouari Ghouti, Chi Hau Chen. *"Deconvolution Of Ultrasonic Nondestructive Evaluation Signals Using Higher Order Statistics"*.
- [9] Jafar Saniee, Tao Wang, Nihat M.Bilgutay. *"Analysis of Homomorphic Processing for Ultrasonic Grain Signal Characterization"*. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 36, no 3, may 1989.
- [10] Saniee J., Bilgutay, N.M. Wang T. *"Signal Processing Backscattered Echoes for Evaluating the Microstructure of Materials, Signal Processing and Pattern Recognition in Nondestructive Evaluation of Materials"*, Ed. Chen CH., Sprenger-Verlag Berlin 1.988, pp 87-100.
- [11] Kjetil F. Kaarensen, Erik Bølviken. *"Blind deconvolution of Ultrasonic Traces Accounting for Pulse Variance"*.IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 46, no 3, may 1.999.
- [12] G.Salmonsson and B.Löfström. *"Analysis Of A System For Ultrasonic Imaging Of Attenuation And Texture In Soft Tissue"*. Ultrason. Imaging, vol. 7, pp225-243, 1985