

Sonar Passif : Formation Optique de Voies Fréquentielles

Guy Lebreton

GESSY Université de Toulon et du Var 639 Bd. des Armaris 83100 TOULON FRANCE

RESUME

Pour un réseau linéaire d'éléments espacés uniformément, la formation de voies fréquentielles équivaut à une Transformation de Fourier bidimensionnelle, qu'on sait réaliser optiquement. L'image d'entrée consiste alors en N lignes dont chacune représente le signal reçu par un capteur. Malheureusement l'imageur nécessite à une géométrie carrée, tandis que le traitement d'antenne porte habituellement sur 32 à 100 canaux avec 4096 échantillons temporels par canal. Cette inadaptation est résolue ici par un codage spatial approprié. Le processeur optique donne alors horizontalement le spectre du signal avec une résolution grossière; verticalement, NP lignes correspondent à N voies, chacune échantillonnée sur P lignes donnant une résolution fine pour chaque fréquence horizontale. Le traitement associe la technique du repliement de spectre avec la formation de voies par diffraction simulante optiquement l'antenne. Cette dernière permet le traitement d'un réseau linéaire quelconque, même avec espacement aléatoire des éléments.

SUMMARY

Frequency beam forming for a linear array with equally spaced elements is equivalent to a two-dimensional Fourier Transform, that can be performed optically. The input image then consists of N rows, each of them being the time signal received by an element of the antenna. Unfortunately, the spatial modulator required as input has a square geometry, while the array processing operates typically on 32 to 100 channels with 4096 signal samples per channel. This mismatching is overcome here by the use of an appropriate spatial encoding. The optical output yields horizontally the signal spectrum with a coarse resolution; vertically, NP lines correspond N formed directions, each of them sampled over P lines giving a fine resolution for each horizontal frequency. This processing combines the folded spectrum technique, with the beam forming by optical diffraction simulating the antenna array. The latter can operate on any linear array, even with randomly spaced elements.

I. Introduction: Formation optique de voies fréquentielles pour une antenne linéaire.

Avec un réseau linéaire à espacements uniformes, la formation des voies pour chaque fréquence est habituellement effectuée par une Transformation de Fourier bidimensionnelle (TF-2D) discrète, soit pour N canaux de M échantillons:

$$S(p, q) = \sum_{m, n} x(m, n) \exp \{-i2\pi (pm/M + qn/N)\} \quad (1)$$

Optiquement ceci équivaut à la TF-2D (par diffraction cohérente) réalisée par un balayage de type télévision en N lignes de M échantillons. La diffraction perpendiculaire aux lignes étant une reproduction physique de l'antenne acoustique, on peut reproduire entre ces lignes des espacements proportionnels à ceux des éléments du réseau s'ils sont aléatoires, ce qui numériquement demanderait un traitement beaucoup plus complexe. Déjà expérimentée pour des signaux Radar [1], cette technique n'a pu être utilisée jusqu'à présent en Sonar Passif, où la résolution fréquentielle cherchée demande un nombre d'échantillons temporels très supérieur à la résolution horizontale des imageurs. Ceci est d'autant plus regrettable que la dimension verticale de l'image est sous-employée, le nombre de lignes possible étant très supérieur à celui des éléments de l'antenne.

Pour résoudre cette difficulté, on a d'abord essayé de périodiser optiquement l'image d'entrée (en échantillonnant la TF par un réseau de traits parallèles), avec une légère rotation permettant de mettre bout-à-bout 5 lignes consécutives [2]. L'application au Sonar Passif s'est avérée peu satisfaisante, le nombre de 4096 échantillons par ligne dépassant la résolution d'un système optique non spécialement conçu [3]. La solution proposée ici est au contraire extrêmement facile à mettre en oeuvre et a donné d'excellents résultats sur des signaux réels. En effet, le codage spatial adopté pour l'image d'entrée permet non seulement d'utiliser la pleine capacité de l'imageur, mais aussi de répartir de façon égale l'information en sortie sur les axes horizontal et vertical, indépendamment du nombre d'éléments d'antenne et d'échantillons du signal à traiter.

2. Principe du traitement spatio-temporel

Le codage spatial annoncé fait appel à la technique du repliement de spectre (folded spectrum), déjà utilisée pour le traitement optique d'antenne en Sonar Actif [4] et qui convient particulièrement à l'analyse de raies spectrales fines recherchée en Sonar Passif [5,6]. Cette technique se résume à la visualisation du signal d'entrée en N lignes de M échantillons par un balayage de type télévision. Une TF-2D optique donne alors une expression identique à la relation (1), mais cette fois c'est la fréquence qui est codée à deux dimensions dans le plan de sortie. Horizontalement, la résolution spectrale est égale à la fréquence ligne f' du balayage, avec une bande passante de -Mf'/2 à Mf'/2. Verticalement, les lignes correspondent à un échantillonnage fin en N points de la fréquence horizontale. On obtient ainsi une résolution totale de MN points (fréquences positives et négatives).

Cette technique du spectre replié correspond, comme la formation de voies fréquentielles, à une sommation cohérente de lignes déphasées. Pour associer ces deux procédés, la difficulté résidait dans le codage sur un même axe vertical de deux paramètres physiques: la direction des voies et la valeur fine en fréquence. Ceci se résout simplement en codant l'image d'entrée de la manière suivante. En début d'image, on écrit les N lignes parallèles correspondant à une première tranche temporelle de M échantillons. La TF-2D de cette première tranche seule donnerait la relation (1), soit en explicitant la directivité des voies formées q :

$$S(p, q) = \sum_{m=1}^M s(m) \exp \{-i2\pi pm/M\} \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp \{i2\pi m(f \frac{d}{c} \sin \theta - q/N)\} \quad (2)$$

où p varie de -M/2 à M/2 et q de -N/2 à N/2 (nombre de voies N impair égal au nombre de canaux) et la ligne q correspond à une voie de direction

$$\sin \theta = \frac{c}{df} \frac{q}{n}, \text{ avec } c: \text{ célérité acoustique} \\ d: \text{ espacement des capteurs}$$

et f: fréquence du signal acoustique. Si on poursuit maintenant le balayage d'entrée sur l'imageur, les N lignes représenteront la tranche tem-



poirelle suivante de M échantillons. Multiplexant ainsi R tranches successives, la TF-2D optique donne alors:

$$S(p,q) = \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M s(m+rM) \exp\{-i2\pi(\frac{pm}{M} + \frac{qr}{R})\} \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{i2\pi m(f \frac{d}{c} \sin\theta - q/NR)\} \quad (3)$$

La sommation sur m et r correspond à l'analyse spectrale repliée (1), tandis que la sommation sur N correspond à la formation de voies (2) pour des valeurs successives de q multiples de R. Les R points d'échantillonnage fin en fréquence se retrouvent ainsi verticalement en convolution spatiale avec chaque voie, donnant en sortie NR lignes verticales pour N voies. La résolution horizontale est celle vue plus haut du spectre replié, égale à la fréquence du balayage ligne f' avec une bande passante de -MF'/2 à MF'/2.

On peut ainsi librement adapter la répartition de l'information entre les deux dimensions. La résolution globale, et donc le gain du traitement (taux de compression de l'information) sont inchangés par rapport au traitement numérique classique. Par contre, il est toujours possible de reproduire entre les N lignes correspondant à chaque tranche temporelle des espacements aléatoires proportionnels à ceux des capteurs d'une antenne linéaire quelconque.

3. Expérimentation de signaux réels en Sonar Passif.

Pour expérimenter le traitement proposé, on a utilisé des enregistrements réels fournis par la Marine (Brusc GERDSM), provenant d'une antenne linéaire de 32 éléments équidistants. Les signaux fournis correspondent à 7 tranches de 4096 échantillons temporels, prises à des intervalles non précisés. Le signal numérisé avait subi un filtrage passe-bande ne laissant passer qu'une octave (eg. 800-1500 Hz), avec une fréquence d'échantillonnage triple de la fréquence maximale. La résolution théorique dans la bande analysée est donc de 682 points. La dynamique du signal a été réduite à 23 db pour la rendre compatible avec celle de l'image optique. Faute de disposer d'un imageur cohérent, on a utilisé le système VIZIR de l'I.F.P. pour écrire les signaux numériques sur un film de grande dimension, puis photoréduit chaque enregistrement sur plaque photographique au format de 30x34 mm. Conformément au principe de codage décrit, chaque image comporte verticalement 5 tranches temporelles successives de 32 canaux, chacun formant une ligne de 820 échantillons. Comme la dimension choisie de l'image, la résolution utilisée est compatible avec les imageurs cohérents existants: lignes d'épaisseur 109µm espacées de 109 µm et pas d'échantillonnage horizontal 36,5µm, ce dernier volontairement lissé par la résolution de la plaque photographique (environ 50µm). La résolution théorique est de 136 points en fréquence horizontalement, et de 150 points verticalement (5 points en fréquence fine sur chacune des 30 voies), format parfaitement compatible avec une caméra CCD.

Plutôt qu'une analyse chiffrée fastidieuse des résultats, une comparaison visuelle globale entre les traitements optique et numérique est présentée en trois dimensions sur les Figures 1 à 7. La sortie du traitement optique a été lue par une barrette linéaire de 1024 photodiodes (translatée par moteur pas-à-pas) et numérisée sur 11 digits, avec une résolution spatiale de 266 photodiodes dans la bande spectrale analysée et de 384 lignes sur l'axe vertical. Le traitement numérique réalisé pour comparaison est une TF-2D discrète mais sans lissage, d'où un aspect plus bruité que les résultats du traitement optique. La présentation isométrique est la même pour toutes les images, avec un CAG basé sur le pic le plus élevé. L'axe presque horizontal est celui des fréquences, l'autre celui des voies formées (avec un échantillonnage de 5 lignes sur chaque voie pour le codage de la fréquence fine en traitement optique). Les 30 voies directionnelles, réalisées à partir de 31 canaux (le 32e était muet sur les enregistrements fournis), sont centrées de -15 à 14.

En raison du type de formation des voies (déphasage),

leur espacement n'est pas indépendant de la fréquence: c'est l'angle de rotation du spectre autour de l'origine qui est proportionnel à l'angle d'arrivée du signal sur l'antenne. Dans la géométrie du codage d'entrée pour le traitement optique effectué, cet angle entre deux voies est de 1,1 degré pour 6 degrés d'angle réel sur l'antenne. Si on avait écrit des lignes jointives sur l'image d'entrée, au lieu de les espacer pour remplir la pupille, on aurait aisément doublé l'espacement angulaire entre deux voies en sortie, mais ce n'était pas nécessaire avec la résolution du système de lecture utilisé (9µm).

Les 7 figures de la série A correspondent au traitement numérique classique sur 31 canaux de 4096 échantillons, pour les 7 enregistrements réels fournis par le GERDSM. Les 7 figures de la série B sont le résultat numérisé du traitement optique pour les mêmes enregistrements. Pour comparer de façon plus directe la qualité du traitement optique avec celle d'une TF-2D discrète sans lissage, et en même temps vérifier numériquement l'effet du codage spatial employé, les figures 1C et 2C représentent le résultat obtenu en traitant les enregistrements 1 et 2 numériquement en 155 lignes de 820 échantillons, conformément au codage de l'image d'entrée du traitement optique.

4. Conclusion.

Le principe du codage spatio-temporel proposé a été vérifié expérimentalement, par simulation numérique et dans un traitement optique effectif. Les résultats du traitement optique montrent un rapport signal/bruit très supérieur au traitement numérique simplifié réalisé pour comparaison, qui nécessitait déjà plus d'une heure de calcul par image sur un PDP 11/23. Sur les présentations isométriques illustrant ces résultats, (limitées à 128 niveaux), il aurait même fallu écrêter considérablement les échos les plus forts pour visualiser les plus faibles (tandis que la dynamique du traitement numérique apparaît inférieure à ces 128 niveaux).

Les paramètres du traitement optique effectué sont compatibles avec ceux d'imageurs cohérents commercialisés, comme le TITUS de la SODERN ou l'imageur à cristaux liquides de HUGHES. Surtout, la simplicité du processeur optique est extrême, puisqu'il se réduit à une simple lentille collée sur l'imageur et une caméra CCD. On pourrait envisager sa réalisation opérationnelle pour 50 canaux de 4096 échantillons, avec une antenne linéaire à capteurs équidistants ou non. Le codage spatial utilisé se prête au traitement en temps réel (écriture des canaux en parallèle), mais surtout il pourrait être beaucoup plus rapide, en utilisant des mémoires-tampons, de manière à permettre avec un seul processeur optique le traitement de plusieurs octaves en temps réel. Enfin, disposant optiquement des fréquences positives et négatives, on pourrait utiliser simultanément les unes pour l'acquisition numérique et les autres pour visualisation directe analogique.

Références

- 1- D.Casasent, F.Casasayas, 'Electro-optical processing of phased-array antenna data', IEEE Trans. AES 11/1, Jan. 1975, p.65-76
- 2- G.Lebreton, 'Coherent imaging devices: extended capability for 1-D multichannel processing', IEEE 10th Internat. Optical Computing Conf., Boston, 1983, IEEE Computer Soc. Proceed. CH1880, p.36-41
- 3- G.Lebreton, 'Analyse spectrale optique multicanaux. Application au Sonar Passif', Actes du 9e Colloque GRETSI, 1983, p.699-704
- 4- G.Lebreton, E.de Bazelaire, 'Holographic processing of wideband antenna data', Optical Engineering 19/5, Oct. 1980, p.739-747
- 5- G.Lebreton, 'Power spectrum of raster-scanned signals', Optica Acta 29/4, 1982, p.413-418
- 6- K.Wagner, D.Psaltis, 'Time and space integrating acousto-optic folded spectrum processing sor SETT', SPIE Conf. on Real Time Signal Processing VIII, San Diego, 1985, SPIE Proceed. Vol. 564, p.31.1-31.15

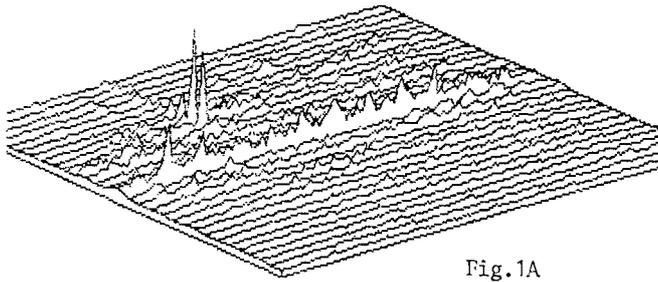


Fig.1A

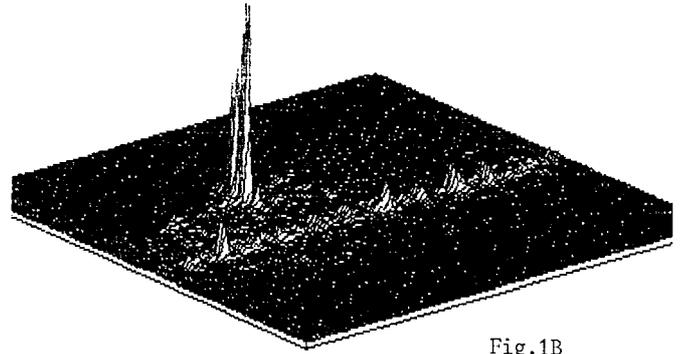


Fig.1B

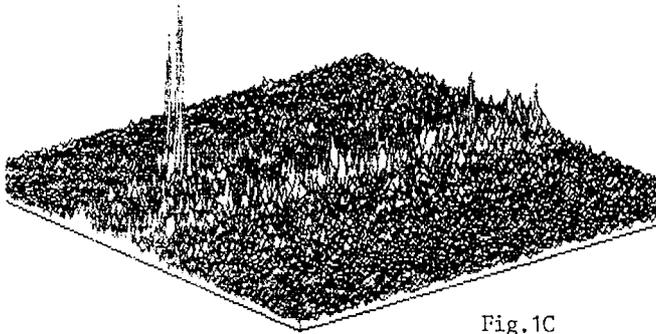


Fig.1C

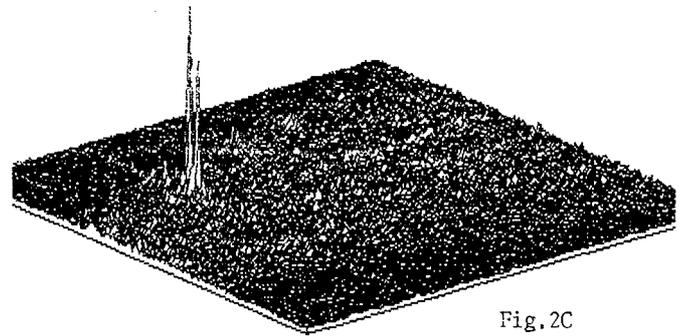


Fig.2C

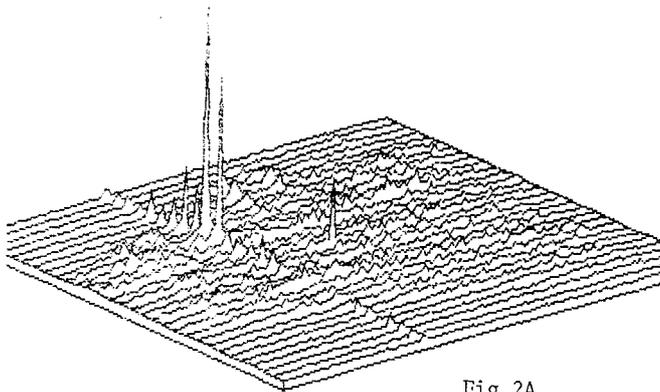


Fig.2A

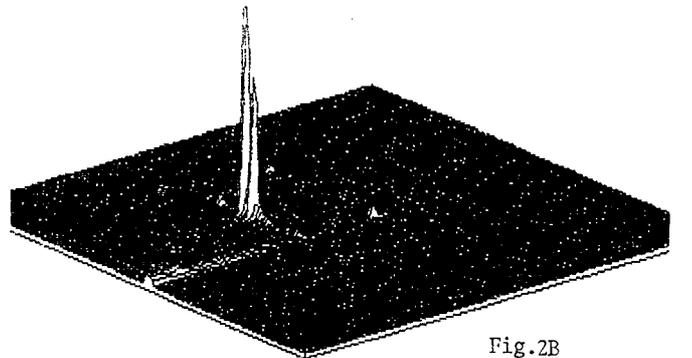


Fig.2B

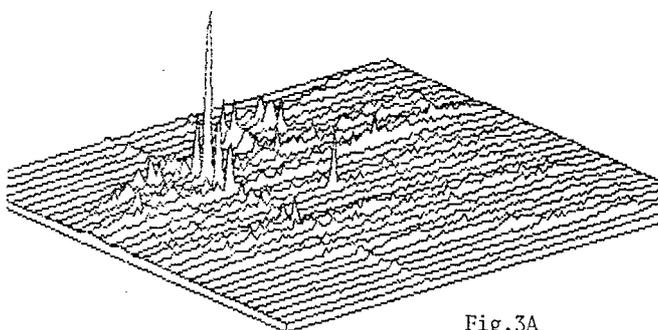


Fig.3A

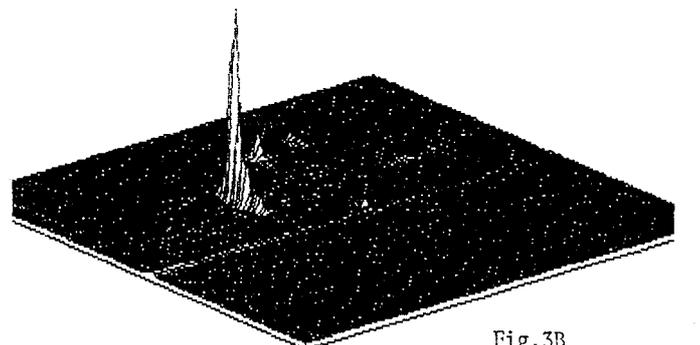


Fig.3B

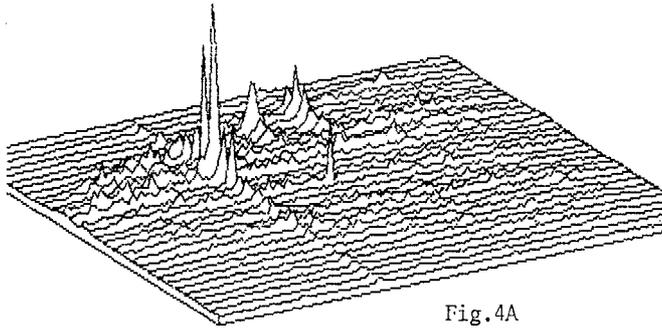


Fig.4A

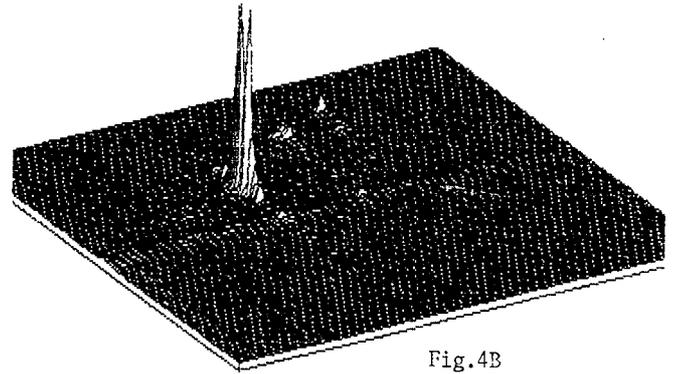


Fig.4B

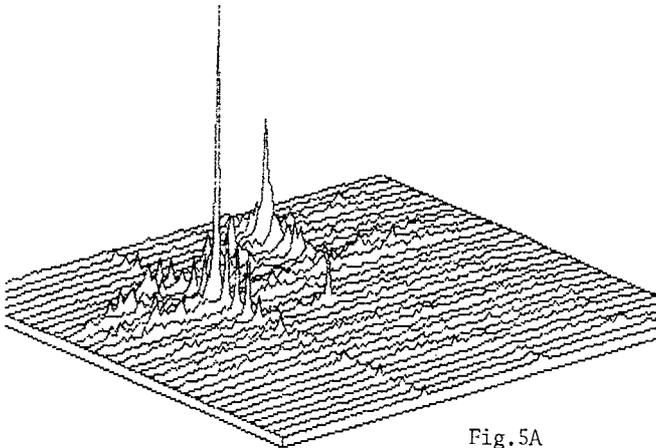


Fig.5A

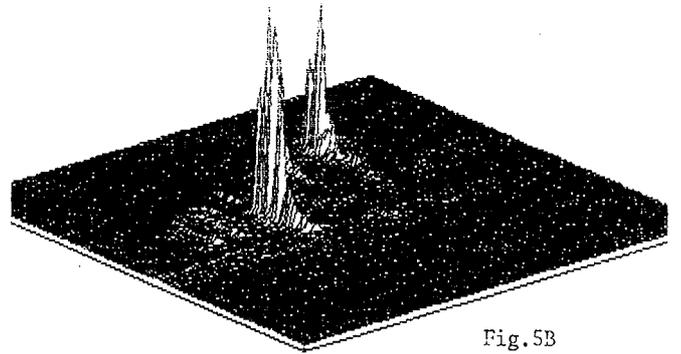


Fig.5B

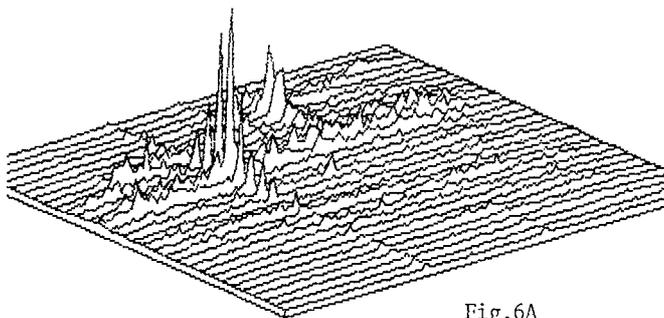


Fig.6A

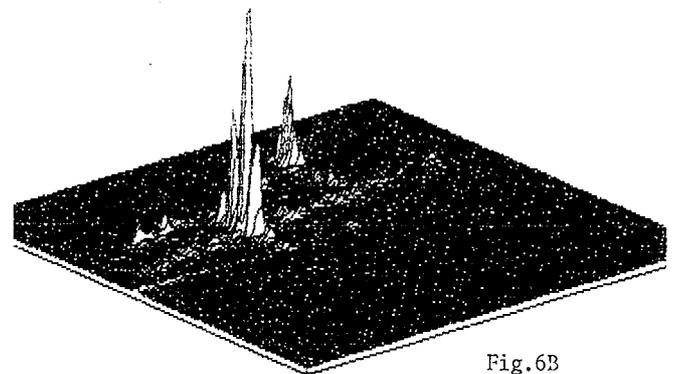


Fig.6B

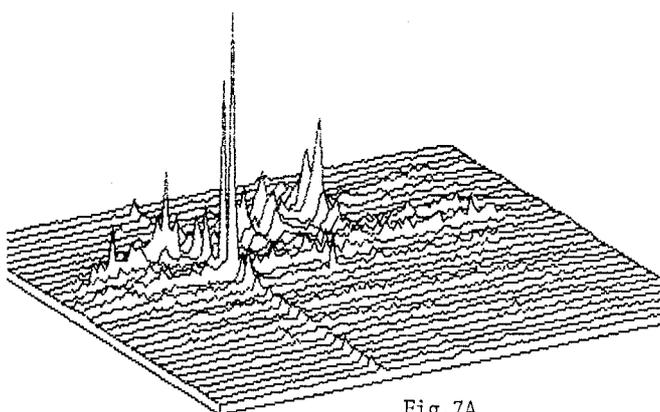


Fig.7A

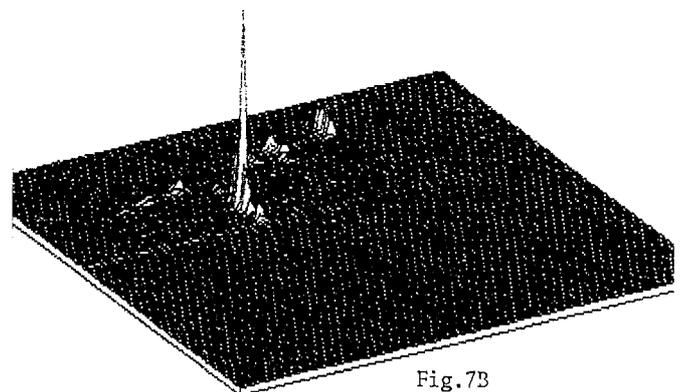


Fig.7B