

Construction d'images ISAR par Décomposition Modale Empirique et Représentation Temps-Fréquence

BAY AHMED HADJ AHMED^{1,2}, JEAN-CHRISTOPHE CEXUS¹, ABDELMALEK TOUMI¹, ABDEL-OUAHAB BOUDRAA²

¹ Lab-STICC, UMR CNRS 6285,
ENSTA Bretagne, 2, rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

² IRENav, EA3634,
Ecole Navale, BCRM Brest, CC 600, 29240 Brest Cedex 9, France

¹{cexusje, toumiab}@ensta-bretagne.fr, ²{hadj_ahmed.bay_ahmed, boudra}@ecole-navale.fr

Résumé - Dans cet article, une méthode de construction d'images ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) basée sur la Décomposition Modale Empirique Complexe (CEMD) est proposée. Elle est basée sur la Décomposition Modale Empirique appliquée à des signaux complexes associée à une Représentation Temps-Fréquence (RTF) estimée pour chaque « mode » extrait par CEMD. Il s'agit de réduire les interférences inhérentes à l'utilisation des distributions quadratiques et, in fine, améliorer la résolution des image ISAR 2-D (Distance-Doppler) extraites du cube 3-D (Distance-Temps-Doppler) de données constitué par l'ensemble des RTF des différentes cellules distances. Le potentiel de la méthode est validé sur des données synthétiques et comparé avec des approches classiques basées sur la Transformée de Fourier 2-D (TF 2-D) ou encore des RTF telles que le Spectrogramme ou la Distribution Wigner-Ville (DWV). Les résultats montrent que cette méthode permet d'obtenir des images ISAR avec une bonne résolution et offre de bonnes perspectives d'amélioration.

Abstract - In this paper, a method for Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) image formation based on the Complex Empirical Mode Decomposition (CEMD) is proposed. The CEMD is used in conjunction with a Time-Frequency Transform (TFR) to estimate a 3-D Range-Time-Doppler Cubic image, which we can use to effectively extract a sequence of ISAR 2-D Range-Doppler images. The potential of the proposed method to construct ISAR image is illustrated on simulated results performed on synthetic data and compared to those obtained using 2-D Fourier Transform and TFR methods such as Spectrogram or the Wigner-Ville Distribution. The obtained results show that this method can provide ISAR images with a good resolution. These results demonstrate the potential application of the proposed method for ISAR image formation.

Mots clés : Radars à synthèse d'ouverture inverse (ISAR), Décomposition Modale Empirique Complexe (CEMD), Représentations Temps-Fréquence (RTF).

1 Introduction

En traitement du signal Radar, l'analyse spectrale joue un rôle clé pour la caractérisation et la compréhension des phénomènes physiques et particulièrement dans le cas des systèmes ISAR. Le processus de construction de l'image ISAR repose sur l'exploitation des mouvements de rotations de la cible par rapport au Radar [1, 2]. Habituellement, les images ISAR sont obtenus par TF 2-D. Cependant, les mouvements complexes des cibles aériennes, génèrent des spectres Doppler dont les contenus fréquentiels varient au cours du temps rendant ainsi floues les images ISAR reconstruites (Figure 5(a)). Pour améliorer la résolution des images et tenir compte de la non-stationnarité des signaux, une solution est de faire appel aux RTF [1-6]. En général le spectrogramme est conditionné par la taille de la fenêtre d'analyse, la transformée en ondelettes nécessite le choix de l'ondelette mère, et l'approche quadratique telle que la distribution de Wigner-Ville (DWV) est limitée par les termes d'interférences [1, 3, 7]. Afin de s'affranchir de ces limitations, nous nous intéressons aux approches pilotées par des données.

Plus précisément, nous avons choisi comme approche la Décomposition Modale Empirique (EMD) proposée par Huang *et al.* [8]. Cette méthode locale et auto-adaptative permet d'analyser des données issues de processus non-stationnaires et/ou non-linéaires [8-10].

Le principe repose sur l'extraction séquentielle de différentes contributions « modes » mono-composantes AM-FM appelées Fonctions Modales Empiriques (ou IMF).

L'EMD donne lieu à de nombreux travaux aussi bien sur le plan applicatif que théoriques [9-14]. On peut citer comme applications le débruitage/filtrage [15-16], l'analyse Temps-Fréquence [17-19], le domaine Radar [20-22] et tout particulièrement l'étude des effets micro-Doppler en Radar [23-25].

De par la nature des signaux Radar, nous nous intéressons à la version Complexe de l'EMD (CEMD). Nous associons à cette décomposition, une RTF pour la construction des séquences d'images ISAR. Cette méthode est appelée, CEMD-RTF. Nous illustrons cette approche sur des données simulées et comparons les résultats à celle basée sur la DWV et sa version lissée, et le spectrogramme.

2 EMD Complexe

S'appuyant essentiellement sur les extrema locaux des signaux, l'EMD classique est confinée à l'analyse des signaux scalaires car la notion d'extrema n'existe pas pour des signaux à valeurs vectorielles. Ainsi, cette décomposition n'est pas applicable directement aux signaux à valeurs dans \mathbb{C} . Différentes versions complexes de l'EMD ont été proposées comme la Décomposition Modale Empirique à Rotation Invariante (RIEMD) [26], la Décomposition Modale Empirique Bivariée (BEMD) [12], Décomposition Modale Empirique Complexe (CEMD) [27]. Des extensions aux signaux multivariés ont également été proposées [13, 14, 28].

Dans ce travail, le CEMD est privilégiée d'une part pour sa simplicité d'implémentation et sa complexité calculatoire réduite et, d'autre part pour sa bonne estimation des composantes du signal. Elle permet aussi de réduire les « interférences » au niveau des différentes RTF quadratiques estimées entre la partie positive et négative du spectre du signal. A noter aussi que cette approche permet de préserver la propriété du banc de filtres dyadiques [27]. Le CEMD utilise la relation intrinsèque qui existe entre les composantes fréquentielles positives et négatives du spectre d'un signal complexe et la Transformée de Hilbert (TH) [27].

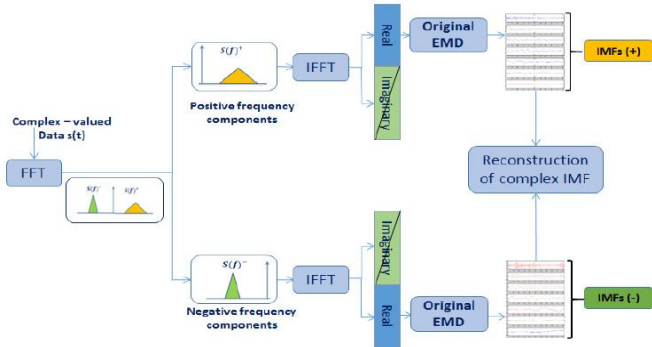


Figure 1 : Schéma blocs de l'algorithme CEMD.

Si on note $s(t)$ un signal dans \mathbb{C} et $S(j\omega)$ sa TF, il est possible de définir le signal $s(t)$ comme la combinaison de deux signaux analytiques :

$$S_+(j\omega) = H(j\omega) S(j\omega), \quad (1)$$

$$S_-(j\omega) = H(-j\omega) S^*(j\omega), \quad (2)$$

avec $S^*(j\omega)$ la version conjuguée complexe du spectre de $S(j\omega)$ et, $H(j\omega)$ la fonction échelon (en fréquence normalisées) :

$$H(j\omega) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \omega < \pi \\ 0, & -\pi \leq \omega < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

En passant à la TF inverse, deux signaux analytiques portant respectivement l'information positive et négative du spectre du signal $s(t)$ peuvent être exprimés (Figure 1). De cette écriture, il est alors possible de conserver uniquement les parties réelles des signaux analytiques ainsi estimés sans perte d'information vis à vis de $s(t)$:

$$s_+(t) = \Re\{F^{-1}[S_+(j\omega)]\}, \quad (4)$$

$$s_-(t) = \Re\{F^{-1}[S_-(j\omega)]\}, \quad (5)$$

avec \Re la partie Réelle et F^{-1} la TF inverse. A noter que par construction, les signaux $s_+(t)$ et $s_-(t)$ sont réels. Il est alors possible d'y appliquer l'EMD standard :

$$s_+(t) = \sum_{i=1}^M IMF_i^+(t) + r_+(t), \quad (6)$$

$$s_-(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i^-(t) + r_-(t). \quad (7)$$

Il est alors possible d'exprimer les IMF complexes sous la forme :

$$IMFC_k(t) = \begin{cases} IMF_k^+(t) + j \mathcal{H}(IMF_k^+(t)), & k = 1, \dots, M \\ IMF_k^-(t) - j \mathcal{H}(IMF_k^-(t)), & k = 1, \dots, N \end{cases}, \quad (8)$$

avec \mathcal{H} la TH. Finalement, le signal $s(t)$ peut s'exprimer comme une combinaison linéaire d'IMF complexes :

$$s(t) = \sum_{k=1}^{M+N} IMFC_k(t) + r(t). \quad (9)$$

3 Représentations Temps-Fréquence

L'approche la plus commune en imagerie ISAR est basée sur la TF 2-D et repose sur l'hypothèse que les décalages Doppler restent constants [1-2]. Ainsi si les mesures complexes contiennent M séries temporelles, chacune de longueur N, alors la méthode basée sur la TF 2-D permet d'obtenir une unique image ISAR de dimension $M \times N$. Toutefois, lorsque le spectre Doppler varie au court du temps, causé avant tout par le mouvement de rotation de la cible, alors l'image ISAR obtenue par la TF 2-D devient floue (Figure 4(a)). Dans ce cas, les RTF peuvent être une solution afin d'améliorer la qualité de l'image ISAR [1-6].

3.1 Imagerie ISAR par RTF

La Figure 2 permet d'illustrer le principe général permettant d'obtenir une séquence d'images ISAR en utilisant une RTF [2]. Il est à noter que la formation d'image ISAR par RTF se base sur l'estimation d'un plan « Temps-Fréquence » pour chaque profil distance et permet ainsi de générer une représentation Temps-Doppler de dimensions $N \times N$.

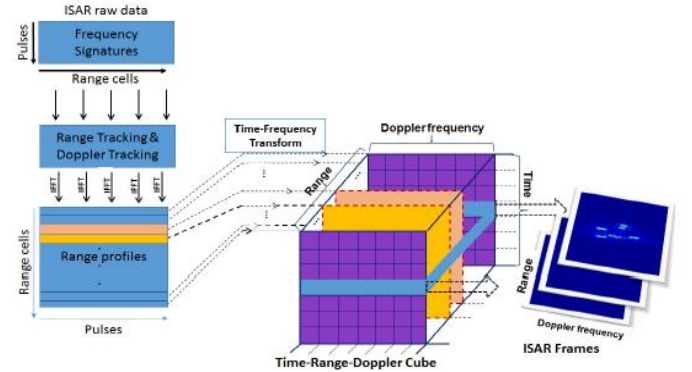


Figure 3 : Schéma bloc pour l'imagerie ISAR basé sur une RTF.

Par la suite, la combinaison des M représentations Temps-Doppler permet d'obtenir un cube Distance-Temps-Doppler de dimensions $M \times N \times N$. De ce cube, il est alors possible d'extraire N images ISAR, soit N positions différentes de la cible. Chaque image ISAR (Distance-Doppler) présente alors une meilleure résolution et offre des informations complémentaires sur les mouvements de la cible au cours du temps. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont déjà été proposées pour estimer cette séquence d'images ISAR en utilisant des RTF comme par exemple celles utilisant des distributions de la classe de Cohen [1, 2, 4], ou celles

exploitant la Transformation en S [3, 5], ou encore les ondelettes harmoniques [6].

3.2 Imagerie ISAR par CEMD-RTF

L'originalité du présent travail consiste à combiner la décomposition par CEMD avec une RTF comme le Spectrogramme, ou la WVD, ou la Pseudo Wigner-Ville Lissée (SPWVD). Schématiquement, l'approche CEMD-RTF peut être divisée en deux grandes parties. La première partie consiste à décomposer le signal complexe en un ensemble d'IMFs en utilisant l'algorithme CEMD. La deuxième partie consiste à appliquer une RTF à chacune des IMFs extraites à l'étape précédente (Figure 3).

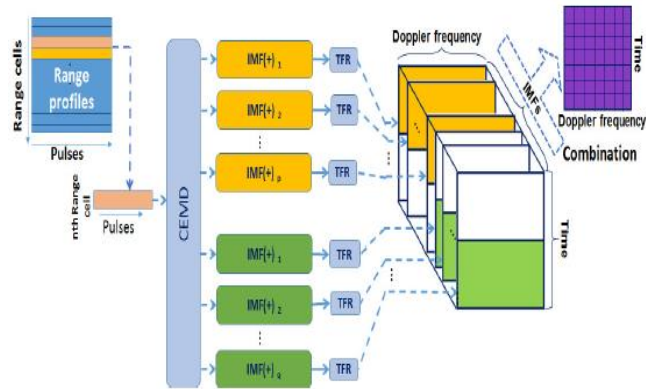


Figure 3 : Schéma bloc pour l'estimation du plan Temps-Doppler pour un profil distance basé sur CEMD-RTF.

Ainsi, l'algorithme CEMD est utilisé comme un filtre multi-bandes permettant de séparer les différentes composantes fréquentielles présentes dans la cellule distance considérée. Les différentes IMFs sont alors utilisées pour construire un ensemble de RTFs représentant les concentrations d'énergie dans le plan Temps-Fréquence. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de réduire les termes d'interférences dans le plan Temps-Fréquence que l'on rencontre naturellement lorsque l'on utilise une RTF quadratique. Une fois les RTF associées aux différentes IMF obtenues, il est alors possible d'en déduire, par une simple combinaison des différents plans, un unique plan Temps-Doppler pour la cellule distance initialement considérée (Figure 3). Le résultat final est une estimation du plan Temps-Doppler pour chaque cellule distance du sinogramme. L'itération de l'ensemble du processus pour chaque profil distance permet alors de constituer le cube Distance-Temps-Doppler. Enfin, l'obtention des différentes séquences d'images ISAR repose sur le même principe que les approches basées sur une simple RTF.

4 Résultats

Nous avons testé notre approche sur des données synthétiques d'un MIG25 décrites dans [1, 2]. L'avion simulé est composé de 120 points brillants à réflectivités identiques. Le modèle est constitué de 512 directions différentes (angles de visé) et utilise un signal à saut de fréquence de 64 impulsions. La figure 4(a) montre l'image ISAR estimée par la TF 2-D. L'effet de flou est dû aux non-stationnarités des signaux causées par les mouvements de la cible. La Figure 5(a) montre l'image

ISAR obtenue par une approche classique à base de WVD. Dans ce cas, l'effet de flou est essentiellement dû aux interférences inhérentes à la WVD. L'utilisation de la SPWVD permet certes de réduire les termes d'interférences mais au détriment d'une perte au niveau de la résolution (Figure 5(b)). En comparant l'ensemble des résultats de la Figure 6 aux autres résultats donnés dans les Figures 4 et 5, il ressort que les approches CEMD-RTF permettent d'améliorer sensiblement les résolutions des images ISAR.

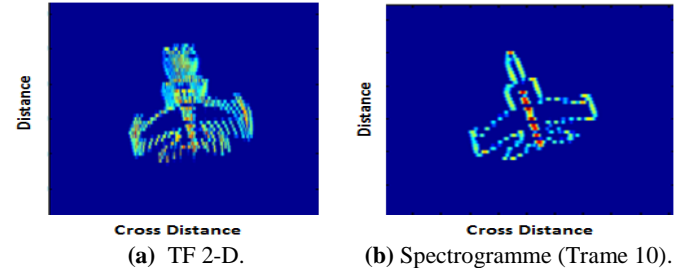


Figure 4 : Comparaison des images ISAR via la TF 2-D et le Spectrogramme.

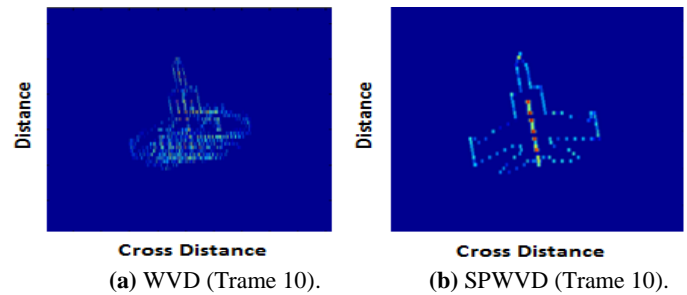


Figure 5 : Comparaison des images ISAR via la WVD et la SPWVD.

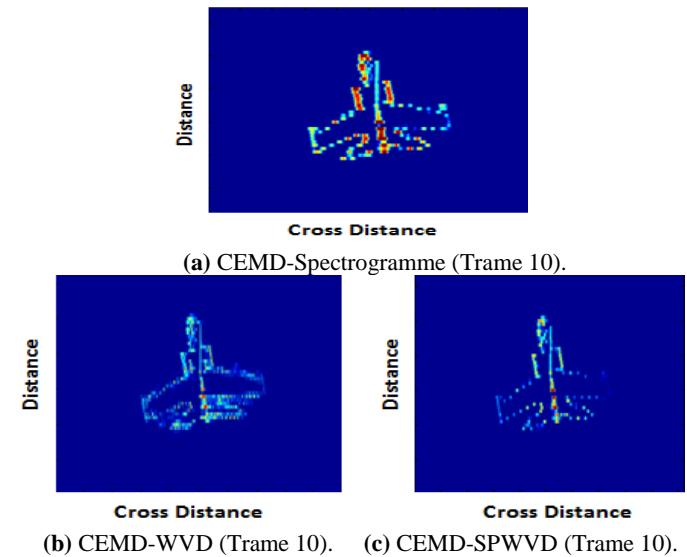


Figure 6 : Comparaison des images ISAR via les approches basées sur CEMD-RTF.

Ainsi par exemple, la combinaison de CEMD avec WVD (Figure 6(b)) permet de réduire les interférences tout en conservant une bonne résolution de l'image ISAR. L'approche CEMD-SPWVD offre une solution intéressante car elle permet de réduire les interférences « résiduelles » tout en conservant une bonne résolution (Figure 6(c)). L'adjonction du processus de décomposition du profil distance par CEMD permet de réduire les interférences qu'il est possible de rencontrer lorsque l'on utilise une simple distribution quadratique

pour la construction de la séquence d'images ISAR (figure 5).

5 Conclusions

Dans cet article, une nouvelle méthode de construction d'images ISAR basée sur la combinaison de la CEMD avec une RTF a été proposée. Il s'agit d'améliorer la résolution des images ISAR en réduisant les interférences naturellement présentes lorsque l'on utilise une distribution quadratique. Les performances de l'approche sont comparées avec la TF 2-D et des approches Temps-Fréquence conventionnelles. L'efficacité de la méthode a été vérifiée sur des données synthétiques d'une cible non coopérative. Les résultats montrent que la méthode est prometteuse dans le cadre de la formation d'images ISAR. Basée sur une méthode empirique, la CEMD, il est nécessaire de réaliser une validation sur une plus large classe de données. D'autre part, il serait aussi nécessaire d'étudier la robustesse de l'approche CEMD-RTF sur des données bruitées, mais aussi de tester d'autres RTFs comme par exemple la Transformation de Huang-Hilbert (THH) [7] ou encore la Transformation de Huang-Teager (THT) [16]. Enfin, il serait intéressant d'intégrer cette approche dans le cadre d'un processus d'aide à la reconnaissance et d'identification de cibles Radar.

6 Références

[1] V.C. Chen, et H. Ling, "Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis," Artech House, 232 pages, 2002.

[2] V.C. Chen, et M. Martorella, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging; Principles, Algorithms and Applications," SciTech Publishing, 289 pages, 2014.

[3] I. Djurovic, *et al.*, "Time-Frequency Analysis for SAR and ISAR Imaging," GeoSpatial Visual Analytics, Springer, pp. 113-127, 2009.

[4] V. Corretja, *et al.*, "Enhanced Cohen class time frequency methods based on a structure tensor analysis: Applications to ISAR processing," Signal Processing, vol. 93(7), pp. 1813-1830, 2013.

[5] L.J. Stankovic, *et al.*, "S-method in radar imaging," EUSIPCO'06, 5 pages, 2006.

[6] B.K. Kumar, *et al.*, "Target identification using harmonic wavelet based ISAR imaging," Journal on Applied Signal Processing, vol. 2006(1), pp. 1-13, 2006.

[7] L. Cohen, "Time-frequency analysis: theory and applications," Prentice-Hall, 299 pages, 1995.

[8] N.E. Huang, *et al.*, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proceedings of the Royal Society, A, vol. 454, pp. 903-995, 1998.

[9] P. Flandrin, *et al.*, "Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank," IEEE Signal Processing Letters, vol. 11(2), pp. 112-114, 2004.

[10] N.E. Huang, *et al.*, "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis," Proceedings of the Royal Society, A, vol. 459, pp. 2317-2345, 2003.

[11] G. Rilling, *et al.*, "On Empirical Mode Decomposition and its algorithms," EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing, pp.8-11, 2003.

[12] G. Rilling, *et al.*, "Bivariate Empirical Mode Decomposition," IEEE Signal Processing Letters, vol. 14(12), pp. 936-939, 2007.

[13] N. Rehman, et D.P. Mandic, "Multivariate Empirical Mode Decomposition," Proceedings of the Royal Society, A, vol. 466, pp. 1291-1302, 2010.

[14] M.H. Yeh, "The complex Bidimensional Empirical Mode Decomposition," Signal Processing, vol. 92(2), pp. 523-541, 2012.

[15] A.O. Boudraa, et J.C. Cexus, "EMD-Based Signal Filtering," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 56(6), pp.2196-2202, 2007.

[16] P. Flandrin, *et al.*, "Detrending and denoising with Empirical Mode Decomposition," EUSIPCO'04, 2004.

[17] J.C. Cexus, et A.O. Boudraa, "Non-stationary signals analysis by Teager-Huang Transform (THT)," EUSIPCO'06, 5 pages, 2006.

[18] A. Bouchikhi, *et al.*, "Analysis of multi-component LFM signals by Teager Huang-Hough Transform," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 50(2), pp. 1222-1233, 2014.

[19] N.J. Stevenson, *et al.*, "Multiple-view time-frequency distribution based on the empirical mode decomposition," IET signal processing, vol. 4(4), pp. 447-456, 2010.

[20] H. Chunming, *et al.*, "A novel method to reduce speckle in SAR images," International Journal Remote Sensing, vol. 23(23), pp. 5095-5101, 2002.

[21] Y. Yuani, *et al.*, "Empiric and dynamic detection of the sea bottom topography from synthetic aperture radar image," Advances in Adaptive Data Analysis, vol. 1(2), pp. 243-263, 2009.

[22] B. Bjelica, *et al.*, "Complex Empirical Decomposition method in radar signal processing," Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on, pp.88-91, 2012.

[23] L. Du, *et al.*, "Robust classification scheme for airplane targets with low resolution radar based on EMDCLEAN feature extraction method," IEEE Sensors Journal, vol. 13(12), pp. 4648-4662, 2013.

[24] J.H. Park, *et al.*, "Extended high resolution range profile-jet engine modulation analysis with signal eccentricity," Progress In Electromagnetics Research, vol.142, pp. 505-521, 2013.

[25] C.J. Cai, *et al.*, "Radar micro-Doppler signature analysis with HHT," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. vol.46 (2), pp. 929-938, 2010.

[26] M. Umair Bin Altaf, *et al.*, "Rotation Invariant Complex Empirical Mode Decomposition," ICASSP07, vol.3, pp. 1009-1012, 2007.

[27] T. Tanaka, et D.P. Mandic, "Complex Empirical Mode Decomposition," IEEE Signal Processing Letters, vol. 14(2), pp. 101-104, 2006.

[28] N. Rehman, et D.P. Mandic, "Empirical Mode Decomposition for trivariate signals," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58 (3), pp. 1059-1068, 20