

La compression embarquée d'images pour les systèmes optiques d'observation spatiale

Catherine LAMBERT-NEBOUT, Christophe LATRY, Gilles MOURY

CNES

Bpi 1421, 18 avenue Edouard Belin, 31401 TOULOUSE Cedex 4

catherine.lambert@cnes.fr, christophe.latry@cnes.fr, gilles.moury@cnes.fr

Résumé – La compression embarquée est devenue une étape indispensable pour optimiser les ressources nécessaires à l'enregistrement et à la transmission des images vers les stations de réception. Les performances, en amélioration constante, des algorithmes de compression et les progrès rapides des technologies micro-électroniques embarquables permettent de disposer à bord de techniques de compression très efficaces. Nous décrivons dans cet article les différents algorithmes de compression, utilisés ou en cours d'étude pour des missions spatiales ainsi que les résultats obtenus.

Abstract – *On board Image compression is a very powerful tool to optimize the on board resources needed to store and transmit image data to ground. This is due to the steady performance improvements of the compression algorithms and to the availability, for spaceborne applications, of highly integrated circuits (ASIC technology) that made it possible to implement very sophisticated real-time schemes. We propose in this paper a survey of on-board image compression and present the future prospects.*

1. Introduction

La quantité de données générées à bord des satellites d'observation optique haute résolution est de plus en plus importante en raison de la diminution du pas d'échantillonnage des images et du maintien d'une fauchée importante. Il est nécessaire d'une part d'enregistrer ces données à bord (pendant les périodes de non-visibilité des stations de réception), et d'autre part de les transmettre au sol en vue de leur exploitation. Du fait des fortes limitations (masse, volume, consommation) qui s'appliquent aux équipements embarqués, du coût récurrent et de développement de ces mêmes équipements, on cherche à réduire au maximum les besoins en stockage et transmission induits par la mission. La compression s'impose alors comme une étape indispensable. Les méthodes de compression d'image ont en effet pour but de réduire le nombre moyen de bits de codage par pixel de l'image. Le taux de compression est alors défini par le rapport entre le nombre de bits par pixel de l'image originale et le nombre moyen de bits par pixel nécessaires à son codage.

La compression d'image embarquée apparaît ainsi depuis environ 15 ans comme une solution très avantageuse :

- les performances des algorithmes de compression sont en amélioration constante
- les technologies micro-électroniques embarquables en « spatial » font des progrès rapides en ce qui concerne l'intégration (nombre de portes logiques par circuit) et donc la consommation.

Le choix de l'algorithme et des taux de compression d'une mission résultent d'un compromis entre la satisfaction des utilisateurs (qualité des images) et les contraintes de la mission (limites des ressources embarquées).

Nous proposons dans cet article un panorama des algorithmes de compression étudiés par le CNES et mis en

œuvre dans les missions spatiales d'observation optique. Au préalable, nous aurons présenté le principe général de tout algorithme de compression.

2. Présentation générale de la compression image

Tout système de compression peut se décomposer en trois modules distincts : la décorrélation des données images source, la quantification des valeurs décorréliées et l'affectation de codes binaires.

Le module de décorrélation de l'image réduit la redondance contenue dans les données ou encore, permet de dissocier la redondance de l'information pertinente. Dans une image naturelle, la valeur d'un pixel est fortement corrélée à celle de ses voisins. On notera que l'instrument renforce lui-même cette redondance naturelle car il agit comme un filtre passe-bas caractérisé par sa Fonction de Transfert de Modulation (FTM), transformée de Fourier de sa réponse impulsionnelle. Ceci est particulièrement vrai pour les instruments bien échantillonnés, c'est-à-dire satisfaisant au moins de façon approchée la condition de Shannon : la FTM est alors faible dans les hautes fréquences spatiales visibles par l'échantillonnage et l'image en sortie d'instrument est floue, donc facilement compressible. Les méthodes les plus simples de décorrélation sont basées sur des techniques prédictives telles que le DPCM. Les autres méthodes mettent en œuvre des transformées afin de représenter les données dans un autre domaine, comme par exemple la DCT (Discrete Cosine Transform) et la transformée en Ondelettes [2].

Cette étape de traitement, parfaitement réversible, produisant des coefficients décorréliés et concentrant l'énergie sur peu de coefficients, permet d'optimiser les étapes ultérieures de quantification et de codage.

Le quantificateur est l'organe essentiel du système de compression. Il permet de diminuer effectivement la quantité d'information transmise en éliminant le bruit issu du capteur et toute l'information non pertinente (dans le meilleur des cas !) vis à vis de l'utilisation qui est faite des images après compression à bord et décompression au sol. Cette étape est la seule qui introduise une non-réversibilité dans l'algorithme de compression. Elle peut jouer le rôle d'organe de commande du système de compression car elle détermine la quantité d'information à transmettre et ainsi le taux de compression. Deux types de quantification peuvent être appliqués : la quantification scalaire et la quantification vectorielle. Cette dernière est beaucoup plus efficace mais plus difficile à mettre en œuvre et de fait beaucoup moins utilisée dans la pratique [2]. En outre la quantification peut être uniforme ou adaptée spécifiquement à la statistique des données à quantifier : on parle alors de quantification non uniforme.

L'affectation de codes (ou codage) constitue la dernière étape de la chaîne de compression. Elle a pour rôle de produire le train binaire, représentatif des valeurs quantifiées, qui sera effectivement transmis ou stocké pour une transmission ultérieure. Son rôle est d'affecter à chaque valeur quantifiée un code binaire qui pourra être déchiffré sans ambiguïté par le décodeur au sol. Cette étape peut être considérée comme une technique de compression à part entière. Les codes les plus efficaces (si une quantification uniforme a été appliquée) sont les codes à longueur variable dont le principe de réalisation est simple : il s'agit d'affecter les codes les plus courts aux valeurs les plus probables. Le défaut des codes à longueur variable réside dans la création en sortie du compresseur d'un débit dynamiquement variable, en fonction du contenu informationnel local de l'image. L'exigence d'un débit fixe peut alors être satisfaite moyennant l'adjonction d'un **système d'allocation dynamique de débit**, qui vient adapter la quantification à la complexité locale : on quantifie plus sévèrement les zones complexes que les zones quasi-uniformes. Si par contre le quantificateur a été adapté à la statistique des données (quantification non uniforme), un codage à longueur fixe peut être utilisé.

3. Codage prédictif

Dans une image naturelle la valeur d'un pixel est fortement corrélée à celle de ses voisins et la valeur d'un pixel peut ainsi être prédite à partir des valeurs de pixels voisins. Le DPCM (Differential Pulse Code Modulation) met en œuvre une telle approche et seule la différence (le résidu) entre la valeur du pixel et la valeur prédite est quantifiée et codée. La méthode de compression utilisée sur les satellites d'observation de la Terre SPOT1 à 4 est de type DPCM à débit fixe avec une quantification non uniforme, adaptée à la statistique des données (avec une hypothèse de distribution Laplacienne des résidus). Le taux de compression est de 1,33.

Cet algorithme a été sélectionné du fait de sa simplicité de mise en œuvre (environ 3 opérations par pixel), adaptée aux performances très limitées des électroniques embarquées à l'époque où SPOT1 a été conçu (fin des années 70). Un autre intérêt de ce type d'algorithme est sa capacité à concentrer les

erreurs dans les zones de fortes transitions radiométriques dans lesquelles la valeur absolue de la radiométrie importe peu pour les applications de télédétection. Son désavantage est la faible performance en taux de compression.

4. Codage par DCT

Le principe de base du codage par transformée par blocs est de découper l'image en blocs de taille 8x8 ou 16x16 et de réaliser une transformée sur chacun des blocs. La transformée optimale au sens de la décorrélation est telle que la matrice de covariance des pixels transformés est diagonale : il s'agit de la transformée de Karhunen-Loeve (KLT), peu utilisée dans la pratique car elle nécessite de calculer les vecteurs propres de la matrice de covariance des données. La DCT (Discrete Cosinus Transform) est la transformée par blocs la plus couramment utilisée en compression d'images et constitue la base de nombreux standards de compression (ISO/JPEG pour les images fixes [4], ISO/MPEG pour la compression vidéo).

Dans la deuxième phase de l'algorithme, on réduit l'entropie (quantité d'information) par une quantification linéaire des coefficients transformés. Chaque coefficient est quantifié avec un pas différent suivant sa position dans le bloc. On utilise pour cela :

- une matrice de quantification de taille 8x8 (ou 16x16), dont les valeurs sont tirées d'expériences en général psychovisuelles, mais cette matrice peut aussi prendre en compte les caractéristiques du capteur (FTM) et/ou les post-traitements (tels que la déconvolution);
- un facteur d'échelle identique pour tous les coefficients. Ce facteur est une constante fixée par l'utilisateur, il permet de contrôler le taux de compression.

Le volume de données est enfin réduit par un codage à longueur variable (codage de Huffman associé à des événements Run-Length) à l'aide d'une table de codage.

La DCT a été utilisée pour de nombreuses missions spatiales :

- Pour la mission d'exploration soviétique d'un des satellites de Mars, Phobos, un algorithme de compression a été développé par l'INSA Lyon [6]. Il était basé sur la DCT avec un quantificateur scalaire et un codage à longueur fixe autorisant des taux de compression pré-définis de 4, 8 ou 12. La compression ne s'effectuait pas en temps réel mais en temps différé (plus d'une heure pour comprimer une image 208x144) à cause des performances très limitées du microprocesseur utilisé.
- Pour le programme d'exploration russe Mars 94/96, un Module de Compression d'Images (MCI) temps réel très compact basé sur la technologie des circuits intégrés spécifiques (ASIC) a été réalisé par Matra Marconi Space en 1990, sous contrat CNES. Le MCI [8] permet de couvrir une gamme de taux de compression comprise environ entre 4 et 16. Le MCI est d'utilisation très flexible grâce à une mémoire de paramètres qui autorise différents modes de compression et de formatage. Ses excellentes performances ont incité de nombreuses missions spatiales à l'utiliser, notamment la mission Clementine (CNES/BMDO) mais aussi Cassini (NASA), LunarA / Planet B (ISAS), ETS7 (NASDA), ...

- Pour la mission d'observation de la terre SPOT5, le CNES a développé [10] un algorithme proche de la norme JPEG mais comportant quelques différences : les facteurs de quantification sont ajustables par petits pas (pour un réglage fin du débit et de la qualité image), la précision des coefficients DCT est supérieure afin d'atteindre éventuellement un codage sans perte et le formatage du flux de sortie est spécifique afin de protéger au mieux le train binaire contre les erreurs de transmission. En outre, afin d'obtenir un débit fixe en sortie du compresseur malgré un codage à longueur variable, un algorithme de régulation de débit a été développé par le CNES [9]. La réalisation de cet équipement de compression embarquée a été confiée à Matra Marconi Space en 1995. Les évaluations de qualité image ont démontré qu'avec un tel algorithme, le taux de compression maximum acceptable était de 3 pour les missions d'observation haute résolution et d'environ 15 pour les missions scientifiques, qui acceptent une qualité image moindre. Au-delà de ces taux de compression, l'apparition d'effets de blocs ou de damiers dans des zones faiblement texturées et la perte de détails dans les zones haute fréquence ne sont plus acceptables.

5. Codage par Transformée en Ondelettes

Afin de préparer au mieux les futures missions spatiales, notamment le projet PLEIADES-HR d'observation optique submétrique, et en outre de s'affranchir des artéfacts induits par la DCT [12] ou les transformées orthogonales à recouvrement [1], nous avons étudié des algorithmes de compression basés sur la transformée en ondelettes (souvent notée DWT pour « Discrete Wavelet Transform»). Nous avons imposé de nombreuses exigences à cet algorithme : traitement « au fil de l'eau » (au fur et à mesure que l'image est acquise), complexité calculatoire (en nombre d'opérations par pixel) inférieure à 8 fois celle de SPOT 5 ; débit **fixe** en sortie du compresseur, taux de compression au minimum de 4 pour les missions d'observation de la terre avec une qualité image satisfaisant les besoins utilisateurs.

La transformée en ondelettes apparaît comme une technique d'avenir pour la compression d'images quel que soit le type d'applications. C'est une transformée spatio-fréquentielle qui permet de réorganiser l'information contenue dans l'espace d'origine sur différentes plages spatiales et fréquentielles. La décomposition de l'image originale en sous-bandes est réalisée en se basant sur la théorie de l'analyse multirésolution bi-orthogonale introduite par Stéphane Mallat [5,11] : des filtres calculés à partir de bases d'ondelettes sont appliqués sur l'image. La décomposition sur un niveau s'effectue par application de filtres passe-bas h et passe-haut g sur l'image source. Pour nos applications :

- Les filtres utilisés sont les filtres bi-orthogonaux 9-7 ;
- Une implémentation en lifting est préférable à une implémentation par convolution ;
- Le nombre de niveaux est fixé à 3 : en effet, pour les taux de compression souhaités, les décompositions sur plus

de niveaux n'améliorent pas la qualité de l'image restituée et en outre augmentent le coût de calcul. A la fin de la décomposition sur trois niveaux, on obtient dix sous-bandes.

- Le traitement peut être réalisé « au fil de l'eau », au fur et à mesure que les lignes sont acquises et l'image est ainsi comprimée par blocs de lignes. Cela nécessite seulement l'introduction de buffers dont la taille est imposée par celle des filtres utilisés mais n'introduit aucun artéfact.

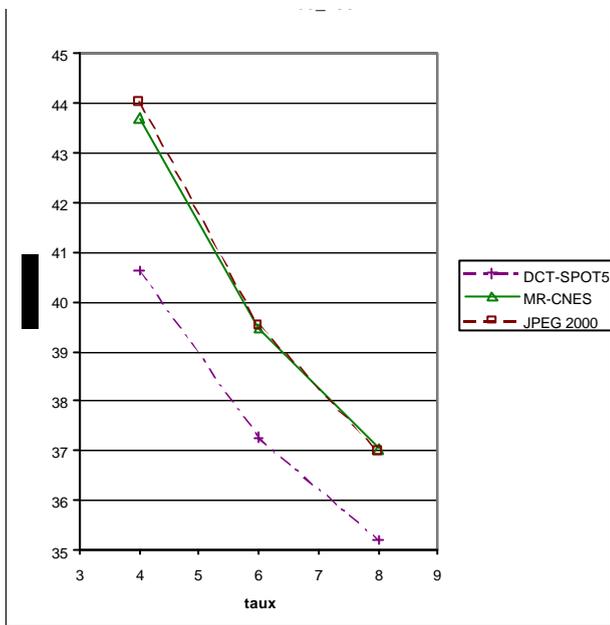
Une fois les données décorréliées, plusieurs approches de quantification et codage sont envisageables. Deux algorithmes basés sur la transformée en ondelettes sont à l'étude actuellement au CNES :

- un algorithme Multi-Résolution CNES/I3S (MR-CNES) « au fil de l'eau » : développé conjointement par le CNES, I3S et CRIL Technology [12,13,14], mettant en oeuvre : une quantification scalaire uniforme sur les coefficients décorréliés, un codage de Huffman associé à des événements Run-Length, de manière similaire à la DCT-SPOT 5, une procédure d'allocation de débit pour optimiser les différents pas de quantification dans les sous-bandes ; une régulation de débit semblable à celle de SPOT 5.
- une version « au fil de l'eau » de l'algorithme JPEG2000 [16] (www.jpeg.org), proposée par le CNES et SAIC au comité de normalisation ISO. Il met en oeuvre une quantification scalaire uniforme, une création de code-blocs de taille rectangulaire dans les sous-bandes de l'image, un codage arithmétique contextuel par plans de bits de chaque code-bloc (nommé EBCOT) et une allocation de débit.

Nous avons réalisé une évaluation comparative des algorithmes DCT-SPOT5, multirésolution CNES / I3S (MR-CNES) et JPEG 2000 sur un ensemble d'images caractéristiques de missions spatiales (cf. fig.1). D'un point de vue qualité image : MR-CNES et JPEG2000 ont des performances équivalentes et supérieures à la DCT-SPOT 5. Ils permettent d'atteindre des taux de compression plus importants à même niveau de qualité image. D'un point de vue complexité de calcul, la DCT-SPOT 5 reste la méthode la plus simple à implanter. MR-CNES est toutefois de complexité nettement inférieure à JPEG2000.

En conclusion, pour les futures missions d'observation de la terre, seul MR-CNES est adapté aux besoins en performances et aux contraintes embarquées. Pour des missions dont les exigences de traitement temps réel embarqué sont moins contraignantes, comme par exemple des missions scientifiques, l'algorithme JPEG 2000 est un bon candidat, d'autant plus que nous bénéficierons alors de tous les développements grands publics réalisés pour la norme.

FIG.1 : Comparaison en terme de PSNR entre les algorithmes de compression DCT-SPOT5, MR-CNES et JPEG2000 sur une image caractéristique



6. Perspectives

Les perspectives en compression d'images embarquée pour les futures missions spatiales sont encore nombreuses et de nouvelles approches sont déjà en cours d'étude :

- La compression sélective ou par régions d'intérêt : il s'agit de détecter à bord, dans l'image, des zones ou objets d'intérêt ou de non-intérêt afin d'appliquer sur ces zones une compression qui préserve la qualité. A l'inverse, les autres zones de l'image seraient comprimées à fort taux. Une telle approche peut permettre d'augmenter le taux de compression global sur l'image sur certaines missions comme les missions d'observation de la terre avec détection de nuages à bord.
- La compression d'images multispectrales ou hyperspectrales : la corrélation entre les différentes bandes spectrales n'a pas été prise en compte dans les algorithmes précédemment décrits (seule la corrélation spatiale a été traitée). Des premières études ont démontré l'apport d'un compresseur multispectral qui sera cependant très sensible à la déregression géométrique entre bandes spectrales.
- Le codage source-canal combiné [15] : historiquement la théorie de l'information (et notamment Shannon) a établi que, sous certaines hypothèses, l'optimisation des schémas de codage source-canal combiné était atteinte en "séparant" le codage source (compression) et le codage canal (codes correcteurs d'erreurs de transmission). Cependant les systèmes sous fortes contraintes de temps réel et de faible complexité tels que les systèmes spatiaux ne vérifient pas les hypothèses de séparation. Des exemples triviaux ont montré qu'il était alors possible avec des schémas de codage source-canal combiné de réduire la complexité du système global tout en perdant très peu en performances. Un tel codage conjoint devrait ainsi nous permettre d'optimiser les ressources embarquées.

Références

- [1] H.S. Malvar and D.H. Staelin., *The LOT : Transform Coding without Blocking effects*, IEEE Transactions on ASSP, vol. 37, n°4, avril 1989..

- [2] M. Rabbani, P. Jones, *Digital image compression techniques*, Tutorial Texts in Optical Engineering, vol. TT7, SPIE, 1991
- [3] A. Gersho, R.M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*, Kluwer Academic Publishers, 1992
- [4] ISO/IEC DIS 10918-1, *Compression numérique et codage des images fixes de nature photographique*, 1992 (standard JPEG).
- [5] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu and I. Daubechies, *Image Coding using wavelet transform.*, IEEE Trans. on Image Processing, vol.1, n°2, pp.205-220, 1992.
- [6] A.Baskurt, C.Odet, R. Goutte, *Image Coding on the Phobos space probe*, Signal processing : Image communication, vol.6, n°5, oct. 1994
- [7] C. Lambert-Nebout, G. Moury, J.L. Carayon, P. Lier, *La compression de données à bord : un moyen d'optimisation des missions sur petits satellites*, Symposium International Systèmes et Services à Petits Satellites, Biarritz, juin 1994
- [8] G. Moury, *La compression d'images embarquée pour les missions spatiales*, Nouvelle revue Aeronautique Astronautique, n°5, 1995
- [9] G. Moury, Brevet européen "dispositif pour la transmission d'images relevées par un satellite", EP 0 631 443 A1
- [10] P. Lier, G. Moury, C. Latry and F. Cabot, *Selection of the SPOT-5 Image Compression algorithm*, Proceedings of . SPIE 98(San Diego), vol.3439-70, juillet 1998
- [11] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, 1998
- [12] C. Lambert-Nebout, G. Moury and J.E. Blamont, *Status of on-board image compression for CNES space missions*, Proceedings of SPIE 1999 (Denver), Vol 3808
- [13] C. Parisot, M. Antonini, M. Barlaud, C. Lambert-Nebout, C. Latry, G. Moury, *On board strip-based wavelet image coding for future space remote sensing missions*, IGARSS, juillet 2000.
- [14] C. Parisot, M. Antonini, M. Barlaud, *EBWIC : A low complexity and efficient rate constrained wavelet image coder*, ICIP, Août 2000
- [15] A. Gabay, P.Duhamel, O. Rioul, *Real BCH codes as joint source channel code for satellite images coding*, GLOBCOM, Nov. 2000.
- [16] ISO/IEC JTC / SC 29/ WG1, 1.29.15444, *Coding of Still Pictures « JPEG 2000 »*, janvier 2001.