Fonctions Optiques pour les Technologies de l'informatiON
http://foton.cnrs.fr
Enssat
6, rue de Kerampont
CS 80518
22305 Lannion cedex
T. 02 96 46 91 41
F. 02 96 37 01 99
UMR 6082

Séminaire de Communications Numériques

Modulations Codées

Michel JOINDOT

Jusqu'à la fin des années 90, les systèmes de télécommunications sur fibre optique ne faisaient pas appel aux techniques de communications numériques déjà employées dans le domaine de la radio, comme les modulations d'amplitude et de phase, la réception cohérente, le codage correcteur ou les techniques d'égalisation. L'optique en restait à la modulation d'amplitude par tout ou rien et à la détection directe. Deux facteurs peuvent expliquer cette situation.

Le premier tient à l'état de la technologie électronique qui ne permettait de développer à des débits de plusieurs Gbit/s des circuits qui étaient réalisables dans le domaine de la radio mobile à des débits mille fois inférieurs.

Mais le second facteur est encore certainement plus fondamental et est lié au milieu de transmission lui-même. Le canal radio est extrêmement sévère avec de évanouissements, des trajets multiples variant dans le temps et des décalages Doppler dans le cas des mobiles. Transmettre de l'information requiert de savoir lutter efficacement contre ces effets. De plus la ressource spectrale est limitée, l'utilisateur se voit allouer une bande de fréquences qu'il doit utiliser au mieux, d'où l'importance du rendement spectral que les modulations de type QAM à grand nombre d'états permettant de l'augmenter par rapport aux modulations binaires.

La fibre optique au contraire apparaissait à l'époque comme un milieu de transmission quasi idéal, présentant une bande de fréquence infinie, ne déformant pas les signaux transmis, et absolument invariant dans le temps. Mais ces caractéristiques n'étaient dues qu'au fait que la largeur de bande des signaux transmis était très faible par rapport à la fenêtre de transmission de la fibre. Les derniers systèmes en exploitation avant l'arrivée du WDM transmettaient 2.5 Gbit/s par fibre avec régénération tous les 100 km : cette distance imposée par les pertes maximales tolérables était trop faible pour que la dispersion affecte les signaux transmis, et la puissance émise insuffisante pour que des effets non-linéaires se manifestent.

L'arrivée des systèmes WDM va introduire une rupture : le remplacement des répéteurs-régénérateurs par des amplificateurs, donc le retour à la transmission analogique, entraîne une accumulation le long de la liaison du bruit des amplificateurs qui va finalement limiter la longueur maximale entre deux régénérateurs et de la dispersion de la fibre. Toutefois les premiers systèmes WDM à 2.5 Gbit/s par canal n'étaient pas encore sensibles à la dispersion qui ne se manifeste, pour des signaux à ce débit, qu'au-delà de 1000 km, valeur supérieure à la portée optique de ces systèmes à l'époque. Le passage (rapide) à 10 Gbit/s va exiger l'introduction du codage correcteur pour garantir les bilans de liaison et la compensation de la dispersion, au moyen de fibres compensatrices. Au-delà la montée à 40 Gbit/s par canal exigera de prendre encore plus en compte les effets du milieu tandis que la dispersion modale de

polarisation (PMD) montrera que le canal optique peut dans certains cas ne pas être stationnaire. Pour compenser tous ces effets, les opticiens rechercheront des solutions optiques qui permettront de réaliser des systèmes à 40 Gbit/s.
En 2005, le retour de la réception cohérente, qui avait fait l'objet de beaucoup de recherches dans les années 1980-1990, sans trouver d'application, marque une rupture dans le monde de la transmission optique. Les progrès de l'électronique permettant désormais la réalisation de circuits de traitement du signal pour les signaux à haut débit transportés dans les réseaux cœur, les systèmes se transforment, la partie optique du récepteur est réduite à la conversion optique-électrique, suivie par un convertisseur analogique-numérique (qui reste un composant délicat) derrière lequel le traitement du signal électronique permet de compenser la dispersion la dispersion, récupérer la polarisation et la phase et enfin extraire les composantes en phase et en quadrature. Qui plus est, la linéarité du récepteur hétérodyne qui conserve donc l'information de phase permet de compenser les défauts beaucoup mieux que dans le cas de la détection directe par nature non-linéaire. Enfin la possibilité de récupérer la polarisation permet de transmettre en même temps sur deux polarisations orthogonales, doublant ainsi le débit transmis.
A partir de 2005/2006, les recherches vont avancer rapidement sur les systèmes cohérents et aboutir vers 2010 à la mise sur le marché des premiers systèmes WDM à 100 Gbit/s par canal. La technique cohérente permet d'envisager, sous condition de réalisabilité, tout un champ de possibilités et, par ailleurs la croissance continue du trafic dans les réseaux cœur impose des capacités de plus en plus élevées, tandis que le remplissage maximal des câbles est évidemment une nécessité. Une recherche active est conduite dans les laboratoires pour imaginer les schémas de modulation permettant de réaliser des canaux à 200 Gbit/s, 400 Gbit/s ou au-delà, maximiser le rendement spectral pour utiliser au mieux les fibres. La limite ultime de débit théoriquement transmissible sur une fibre est évidemment une valeur importante, et des chercheurs vont revisiter le travail de C. E. Shannon sur la capacité du canal gaussien à bruit additif pour l'adapter à la fibre. Et désormais, la proximité de la limite de Shannon devient un critère essentiel, on est donc très loin de la fibre considérée comme un milieu de transmission à bande infinie.
Ce séminaire se propose de donner un éclairage sur les nouveaux schémas de modulation.

- La première partie sera consacrée au schéma « conventionnel » d'un système de transmission dans lequel « codage » et « modulation » sont deux fonctions séparées. Après une présentation du système étudié, nous donnerons un panorama des codes correcteurs d'erreurs (codes en bloc, codes convolutifs), des mécanismes de décodage (décision dure, décision douce) et des critères de performance en présence de codage. La notion de capacité d'un canal sera introduite dans le canal du canal binaire symétrique et du canal à bruit blanc gaussien additif. Puis la modulation sera abordée, avec les différents types de constellations usuelles (PSK, QAM), le critère de performance (distance minimale) et enfin l'optimisation de la forme des constellations qui permet d'introduire les notions de mise en forme géométrique (GS) et probabiliste (PS).

• La deuxième partie sera consacrée aux modulations codées, c'est-à-dire à des schémas de modulation dans lesquels les deux fonctions de codage et modulation ne sont plus bien séparées comme précédemment, mais complétement imbriquées. Nous commencerons par les modulations codées en treillis (TCM), introduites en 1982 par G. Ungerböck et utilisées depuis, nous étendrons ce concept aux modulations codées multidimensionnelles, puis continuerons par les modulations codées en bloc (BCM) avant de terminer par les modulations de type SP qui ont fait l'objet d'études assez nombreuses et permettraient de réaliser des transpondeurs adaptables en débit. Une notion sous-jacente à ces questions est le partage d'une constellation en sous-constellations de distance minimale croissante qui sera largement développé et les performances de ces différents schémas de modulation seront données. Nous examinerons notamment le partage de la constellation à quatre dimensions qui apparaît dans la transmission de signaux QAM sur deux polarisations orthogonales, qui a fait l'objet de recherches ces dernières années.