

Codes optimaux

Dans le but de fournir un service GNSS (Global Navigation Satellite System) de localisation continu et disponible partout, les systèmes utilisant des pseudolites et des répéteurs semblent être des solutions pertinentes pour la localisation en indoor. Le système à répélites, inspiré de ces deux méthodes (répéteurs et pseudolites), est aussi proposé pour résoudre cette problématique. Les répélites sont des transmetteurs locaux qui, installés en intérieur, formeront une constellation locale. Ils émettent tous un signal GNSS unique mais déphasé par un délai spécifique à chacun d'eux. Ces délais sont nécessaires pour distinguer les différents signaux reçus au niveau du récepteur.

Les travaux de cette thèse sont réalisés dans le cadre du système à répélites et dans l'objectif d'améliorer son architecture et de réduire ses interférences inter-système. En effet, l'architecture du système (un peu encombrante) et les interférences éventuelles avec les signaux satellitaires reçus par un récepteur placé à l'extérieur font partie des inconvénients de ce système. On cherche donc à traiter ces deux difficultés de façon à minimiser leurs effets.

Dans une première partie, on étudie les différents codes GNSS existants dans la littérature ainsi que les techniques de modulation employées. Ceci nous mène à proposer des codes ayant un niveau d'interférence équivalent à la référence GPS (obtenue entre deux codes GPS) pour les bandes L1 de GPS et G1 de Glonass. Dans une seconde étape, on développe la modulation IMBOC (Indoor Modified Binary Offset Carrier) pour générer de nouveaux codes caractérisés par des niveaux d'interférence réduits (comparés à la référence GPS). Parmi ces codes il y a deux catégories : ceux qui sont adaptés aux systèmes à répélites (émettant un code unique) et ceux qui sont adaptés aux systèmes pseudolites. Une étude théorique et des simulations des niveaux d'interférences pour les codes émis dans la bande GPS et Glonass sont réalisées pour déterminer les gains en termes de niveaux de bruit. Ce gain (par rapport à la référence GPS) en puissance d'interférence s'élève à 16 dB pour Glonass et 20 dB pour GPS. Pour valider les performances de ces codes, on génère les signaux IMBOC et on observe les interférences réelles qu'ils induisent sur un récepteur GPS recevant un signal satellitaire.

Dans la deuxième partie, on utilise la fibre optique pour transmettre le signal du générateur jusqu'aux répélites et pour créer les délais initiaux par propagation du signal dans des bobines de fibre. Ainsi on remplace les câbles coaxiaux et les montages électroniques (de déphasage) par des bobines de fibres plus légères, facile à installer et à faible perte de puissance. Il reste

cependant à évaluer avec une précision centimétrique les délais réels induits sur chaque signal dans le but de garantir une précision de localisation inférieure au mètre. Cette précision semble en effet représenter un bon compromis entre complexité globale du système de localisation et réponse à un ensemble suffisant de besoins des utilisateurs potentiels. On développe alors une technique d'estimation des délais basée sur la mesure de déphasage (entre deux signaux sinusoïdaux) et une analyse statistique des séries de mesures.

Pour finir, on présente quelques résultats de localisation obtenus avec notre système à répélites déployé dans un environnement indoor typique.

Mots clés : GNSS, indoor, pseudolites, répéteurs, répélites, théorie des codes, code de Gold, séquence maximale, modulation BPSK, BOC, BCS, corrélation, interférence, radio sur fibre, mesure de délais, résolution d'ambiguïté, régression linéaire.

Summary

In order to make the GNSS positioning service continuous and available when going from an outdoor to an indoor environment, pseudolite and repeater based systems have been developed. A new system called repealite is a combination of both pseudolites and repeaters. It is based on transmitting a single signal through a set of transmitters (thus creating the local constellation). In order to avoid interference between the repealite signals and to distinguish between them at the receiver's end, each signal is shifted with a specific delay.

The research carried out in this PhD aims at optimizing two aspects of the repealite based system. Firstly, we need to mitigate the effect of the interference caused on the satellite signals received outdoors. So we decided to design new codes characterized by low interference levels with outdoor signals. Secondly, we worked on the infrastructure part in order to simplify it and to make it easier to install: this is mainly achieved through the use of optical fibers

In the first part, we study the codes and the modulation techniques currently used in the GNSS systems. Then, we propose a few codes having an interference level equivalent to that of the GPS (obtained when computing two GPS codes). These new codes are compatible with the GPS L1 or the Glonass G1 bands. In a second step, we focus on the modulation techniques and create the so-called IMBOC (Indoor Modified Binary Offset Carrier) that aims at minimizing the interference levels with outdoor signals. With this modulation, we propose new IMBOC codes capable of much lower interference levels than the GPS reference. In order to evaluate the performance of the proposed codes, we carried out a theoretical study, simulations and experimental tests. The interference gain reached about 20 dB on the GPS band and 16 dB on the Glonass one. The proposed codes are divided into two categories: those reserved to the repealite system (using a single code) and families of codes suited to pseudolite-based systems. Finally, we generated the IMBOC signals modulated by the new codes and tested the real interference induced on an outdoor receiver tracking the satellite signals.

In the second part, we use optical fibers in order to replace the coaxial cables used to transmit signals from the GNSS-like signal generator to the repealites. In addition, the initial delay needed for each repealite is added by propagating the signals through rolls of fibers. Indeed, optical fiber offers advantages such as lightness, flexibility and low power loss that make it

suitable to simplify the infrastructure of the system. In order to evaluate the real delays of these various fibers, we develop an estimating method based on phase shift measurements (between two sinusoidal signals) and statistical analysis of the series of measurements. This method should have uncertainties lower than one centimeter in order to insure a sub-meter precision (in absolute positioning with the repealite positioning system). In order to validate this method, we compare it to a GNSS based calibration approach.

Finally, we carry out a few positioning tests with the repealite positioning system deployed in a typical indoor environment. These tests deal with absolute and relative positioning and give an idea about the system's performance.

Key words: GNSS, indoor, pseudolites, repeaters, repealites, code theory, Gold code, maximal sequence, BPSK modulation, BOC modulation, BCS modulation, correlation, interference, radio over fiber (RoF), delay measurement, ambiguity resolution, linear regression.

Introduction

I. Contexte scientifique

Les systèmes de localisation GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tels que GPS (Global Positioning System), Glonass¹, Beidou² et Galileo³ ont beaucoup évolué au cours de ces dernières années. Cependant, de nombreuses problématiques relevées au sujet de ce type de techniques restent non résolues. Parmi celles-ci, la localisation en « indoor » qui constitue une limitation frappante des systèmes actuels. En effet les signaux émis par les satellites des différentes constellations sont captés à très faible puissance à l'intérieur des bâtiments ou dans les sous-sols. Ceci rend l'acquisition des signaux et le calcul de la position en question difficiles, imprécis et quelques fois erronés. D'autre part, le besoin de définir sa position en temps réel et dans tous les types d'environnements se renforce avec l'expansion de l'utilisation des systèmes de positionnement dans les téléphones mobiles (smartphone), l'automobile, les transports en commun. Il est donc nécessaire de trouver une solution pour la localisation en intérieur dans le but de garantir la continuité de la fonction de localisation de l'extérieur vers l'intérieur.

Depuis quelques années, les systèmes de localisation en « indoor » se sont multipliés et les travaux de recherche concernant cette thématique attirent de plus en plus la communauté scientifique de plusieurs domaines. Ainsi une multitude de solutions se basant sur différentes techniques ont été proposées. Il y a parmi celles-ci celles qui utilisent les signaux GNSS et d'autres qui ont mis en œuvre des approches se basant sur :

- Les réseaux de capteurs (infrarouge, ultrason, capteur de son, capteur de champs magnétique) (*Samama 2008; Haverinen & Kemppainen 2009; Bird & Arden 2011*).
- Les réseaux locaux sans fil (WLAN, RFID et Radar) (*Hui Liu et al. 2007; Bouet & dos Santos 2008*).
- Les réseaux mobiles de télécommunications (GSM, UMTS) (*Samama 2008*).
- Les systèmes additionnels, de type capteurs inertiels (accéléromètres, odomètres, magnétomètres) (*Hui Liu et al. 2007; Mautz 2009*) et systèmes hybrides (capteurs inertiels intégrés aux systèmes GNSS).

¹ Système de positionnement Russe

² Système de positionnement Chinois appelé aussi « Compass »

³ Système de positionnement Européen

- Les systèmes UWB (Ultra Wide Band) (*Gigl et al. 2007; Cemin Zhang et al. 2006; Fujii et al. 2007*).
- Les systèmes optiques (basés sur les traitements d'image) (*Mautz & Tilch 2011*).
- Les approches de type SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) (*Mourikis and Roumeliotis 2004*).

Ces diverses approches proposent un très large éventail de solutions techniques et de performances, parfois de très bon niveau. Cependant, cette diversité cache un manque de clarté dans les spécifications du besoin de départ, laissant ainsi l'imagination des « techniciens » en première ligne. Pour notre part, nous allons nous fonder sur un point de départ que nous pensons solide : la disponibilité, déjà très importante et en constante progression, d'un récepteur GNSS dans les divers terminaux communicants (actuels et à venir). Ainsi, le type de solutions sur lesquelles nous allons travailler repose sur l'utilisation de signaux de type GNSS, c'est-à-dire qu'un récepteur GNSS actuel est en mesure de traiter sans changement de hardware.

Dans les solutions basées sur les signaux GNSS, il y a deux catégories : celles dites sans infrastructure comme par exemple l'Assisted-GNSS (A-GPS) (*Dedes & Dempster 2005*) ou encore les HSGNSS (pour « High Sensitivity GNSS ») (*Samama 2008*) et celles qui nécessitent le déploiement d'une infrastructure locale. Pour la première catégorie, les améliorations en termes de capacité à fournir une position dans des environnements auparavant non couverts par les satellites sont réelles. Cependant, la précision obtenue est dégradée par rapport à l'extérieur, alors qu'il faudrait l'améliorer légèrement et le temps nécessaire à l'obtention d'une position est parfois de plusieurs secondes. Dans le but de développer les performances de ces systèmes, plusieurs études ont été menées (*Schon & Bielenberg 2008*). Reste maintenant à citer l'ensemble des techniques où se situe le contexte de ce travail, à savoir les approches de localisation GNSS en indoor utilisant une infrastructure locale.

Les deux principales techniques en question sont les pseudolites (pseudo-satellites) et les répéteurs. Une nouvelle idée de système consiste à combiner ces deux techniques pour en faire une autre appelée répélites. Dans cette technique, un seul signal GNSS est émis par tous les transmetteurs. Pour permettre au récepteur de distinguer les signaux, on décale chacun par un délai spécifique.

Le principe commun à toutes ces techniques est de déployer une constellation locale qui permet de rendre accessible le signal GNSS en intérieur. Ce principe répond à la nécessité d'augmenter le niveau des signaux GNSS pour pouvoir l'acquérir en intérieur et promet une amélioration de la précision de localisation.

En contrepartie, on est confronté à plusieurs problématiques. Les plus importantes sont les suivantes :

- Le besoin d'améliorer la précision du positionnement par rapport à celui en extérieur puisque en intérieur les dimensions de l'environnement étudié sont réduites.
- Le problème des trajets indirects qui est amplifié par rapport au cas du GNSS à l'extérieur. Dans le cas de la localisation en indoor, les trajets multiples accumulés peuvent être du même ordre de grandeur que celui du trajet direct. Ainsi le signal reçu est fortement déformé et l'erreur induite sur la distance mesurée est plus élevée.
- L'effet de l'éblouissement (ou le problème du Near-Far) dû à la différence entre les puissances des signaux reçus au niveau du récepteur. La puissance reçue peut être très élevée quand on est très proche de l'un des émetteurs de signaux. Dans ce cas le récepteur a du mal à acquérir les autres signaux dont la puissance est masquée par celles des plus proches des émetteurs.
- La synchronisation des émetteurs qui devrait être analogue à celle des satellites des constellations GNSS.

Dans la suite on présentera chacune de ces techniques, leurs avantages et leurs inconvénients par rapport à ces problématiques.

1. Les pseudolites

Un pseudolite (*Vervisch-Picois 2010*) est un émetteur terrestre transmettant des signaux ayant la même structure que les signaux envoyés par satellites, d'où la contraction du terme « pseudo-satellites ». Le principe de l'utilisation des pseudolites pour la localisation en indoor est de déployer une constellation locale composée d'au moins quatre transmetteurs dans un milieu intérieur. Dans un bâtiment par exemple, on fixe ces transmetteurs au plafond, sur les murs ou même sur le toit (à l'extérieur) et le récepteur calcule sa position de la même façon qu'un récepteur GNSS (*D.Kaplan & J. Hegarty 2006*). Il reçoit donc les signaux des différents pseudolites, calcule le retard résultant du trajet parcouru par ces signaux et en déduit la pseudodistance le séparant de chaque émetteur. On parle de pseudodistance car

celle-ci inclut, en plus de la distance en question, le biais d'horloge représentant la désynchronisation entre le récepteur et les émetteurs. Lorsque le récepteur a acquis un nombre suffisant de signaux il calcule sa position en 2D ou 3D de la même façon qu'un récepteur GNSS classique.

La nécessité de synchroniser les pseudolites constitue l'étape la plus coûteuse et la plus complexe de cette approche. En contrepartie, en émettant en continu les signaux on peut suivre l'évolution de la porteuse pour faire des mesures de phase qui améliorent la résistance aux trajets indirects et permettent une meilleure précision.

Plusieurs équipes à travers le monde travaillent sur la localisation avec les pseudolites. On peut citer les travaux des Coréens de l'université de Séoul (*Kee et al. 2001*), l'Institut de Technologies avancées de Localisation par Satellites au Japon (*Petrovski et al. 2003*) et le group « Locata » de l'université de Nouvelles Galles du Sud en Australie (*Barnes et al. 2006; Barnes et al. 2003*).

Les dernières publications (*Rizos et al. 2010*) du SNAP group affirment qu'ils ont abouti à une solution commercialisable d'un système de localisation indoor basé sur les pseudolites avec une précision inférieure au mètre. Celui-ci utilise une constellation de pseudolites intelligents qui s'auto-synchronisent entre eux. L'idée est que chacun de ces pseudolites installés sur le toit du bâtiment émette un signal pulsé de façon cyclique. Ce signal contient un code C/A semblable à celui du GPS. L'émission du signal sous forme de pulse cyclique permet de réduire l'effet du Near-Far.

2. Les répéteurs

La localisation à base de répéteurs ressemble à celui à base de pseudolites dans la mesure où il est toujours question de déployer une constellation d'émetteurs en intérieur et d'utiliser la même approche de calcul pour obtenir la position en 2D ou 3D. L'idée de cette méthode est de récupérer les signaux GNSS par une antenne placée à l'extérieur (sur le toit par exemple), de les amplifier puis les retransmettre en intérieur par différents répéteurs. En plus de ça, il est nécessaire de répartir les émissions de ces transmetteurs de façon séquentielle : chacune des antennes intérieures retransmet le signal reçu durant une période limitée dans un cycle répétitif repart sur toutes les antennes. Dans le cas contraire (c'est à dire tous les transmetteurs émettent en même temps et de façon continue), on crée artificiellement des trajets multiples et le récepteur n'est plus capable de calculer la bonne position.

Pour évaluer la valeur de la pseudodistance correspondant à la propagation entre le transmetteur intérieur et le récepteur, ce dernier suit l'évolution de la variation de la pseudodistance de chaque satellite (dont le code se trouve dans le signal retransmis). La différence de phase induite sur cette pseudodistance entre deux émissions consécutives de deux transmetteurs différents est mesurée à chaque transition. Cette mesure correspond à la différence entre les distances séparant le récepteur des deux transmetteurs en question. Une fois que le récepteur a pu mesurer un nombre suffisant de ces transitions, il est capable de calculer sa position. Les deux inconvénients majeurs des répéteurs sont la nécessité de déployer un câblage entre l'antenne extérieure et les transmetteurs intérieurs et l'impossibilité de mener des mesures de phase de porteuse pour le calcul des pseudodistances. En contrepartie, on n'a plus besoin de synchroniser les répéteurs puisqu'ils sont reliés tous au même boîtier responsable de l'amplification et de la distribution du signal. De plus, le problème de l'éblouissement ne se pose plus puisque à tout instant, il n'y a qu'un seul émetteur qui fonctionne.

Cette approche a été développée dans de nombreux travaux au sein du groupe Navigation de Telecom SudParis (TSP) (*Caratori et al., 2004; Fluerașu & Samama, 2011; Vervich-Picois et al., 2006*) et aussi par un autre groupe de recherche basé en Corée, à l'université de Konkuk (*Jee et al. 2005*).

3. Les répélites

L'objectif de cette approche est de pouvoir faire une mesure de phase de la porteuse en continu avec un signal répété. Il est donc nécessaire que tous les transmetteurs émettent le signal de façon continue. On est donc amené à transmettre le même signal par tous les émetteurs simultanément. Afin d'éviter qu'au niveau du récepteur les signaux provenant des différentes antennes n'interfèrent les uns avec les autres, le signal originel est retardé différemment sur chacune des antennes avant l'émission. On aboutit à un système utilisant des émissions décalées d'un même signal. Ces décalages introduits sur le signal en question doivent être rigoureusement choisis de façon à éviter toute interférence ou déformation (par les pics secondaires) des signaux reçus au niveau du récepteur. Le signal émis dans ce cas peut être celui d'un seul satellite. Durant les tests, on utilisera un générateur de signaux GNSS à la place de l'antenne externe.

La Figure 0-1 représente le schéma du système à base de répélites avec les différents décalages introduits sur chacune des antennes Δ_{12} , Δ_{23} , Δ_{34} .

Dans la Figure 0-2, on représente la forme des fonctions d'autocorrélation résultant d'un tel système à émissions décalées utilisant le signal du code PRN1 du GPS.

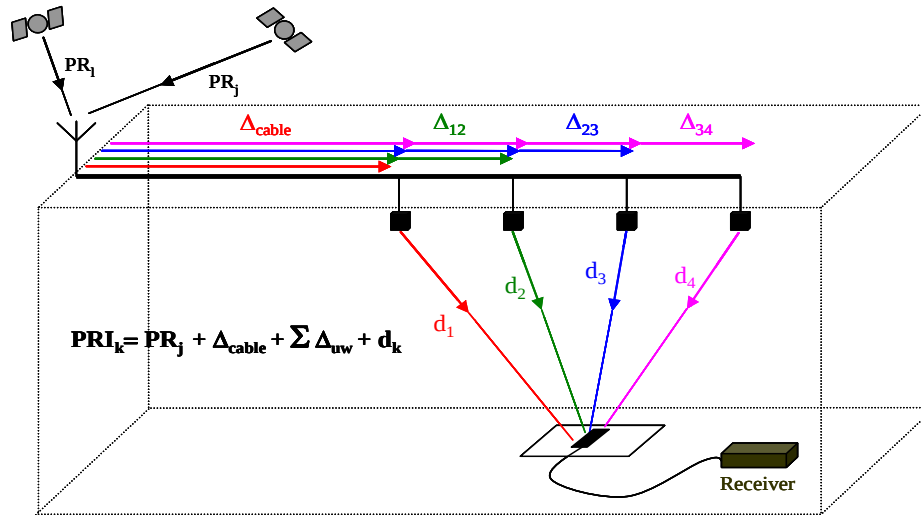


Figure 0-1 : schéma du système de localisation à base de Répélites

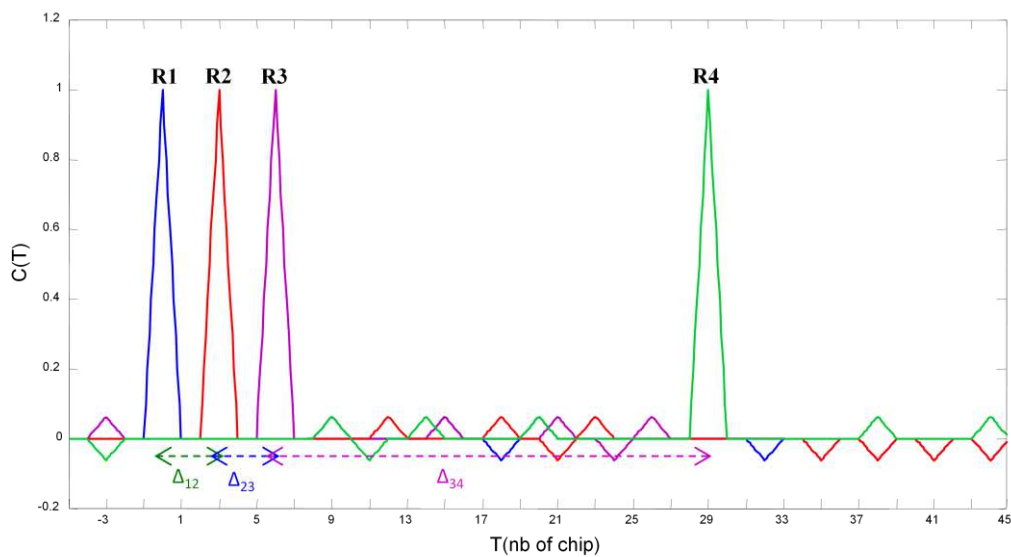


Figure 0-2 : distribution des fonctions d'autocorrélation dans le cas d'une émission décalée

Les recherches effectuées dans le cadre de ces travaux concernent en particulier l'architecture du système et la forme du code émis par ces transmetteurs. L'idée ici est de proposer de nouveaux codes susceptibles d'améliorer les performances du système en réduisant les interférences avec les autres systèmes GNSS.

Dans une seconde partie, nous cherchons à alléger la structure du système en remplaçant les câbles coaxiaux par de la fibre optique qui sera à la fois le support de transmission et la ligne

à retard (pour créer les différents délais). Il est alors nécessaire de pouvoir définir avec précision les délais induits sur chaque signal au moyen de la fibre dans le but de faire un premier calibrage du système.

4. Les Inconvénients des systèmes à Transmetteurs GNSS

Quand on étudie les systèmes à transmetteurs GNSS pour la localisation indoor, on est confronté à trois inconvénients majeurs. Il s'agit des multi-trajets, de l'effet de l'éblouissement et de la désynchronisation entre les émetteurs. Il est nécessaire de prendre en considération ces problèmes pour comprendre les difficultés du localisation indoor. Dans le cas du système à répélices, le problème de désynchronisation ne se pose pas étant donné la connexion filaire entre les antennes et le générateur de signaux. Par conséquent dans notre système seuls les problèmes des trajets indirects et de l'éblouissement sont présents. Ces deux inconvénients sont décrits dans les paragraphes suivants.

a. Effet des multi-trajets

Les trajets indirects sont une limitation forte et présente dans les trois systèmes à transmetteurs GNSS. Ce phénomène résulte de la réflexion du signal direct par un obstacle ou de sa diffraction. Les signaux réfléchis ou diffractés atteignent le récepteur GNSS avec un retard supplémentaire comparé au trajet direct. Puisque la mesure de pseudodistance entre l'antenne émettrice et le récepteur est basée sur la mesure de temps de propagation, les trajets indirects sont source d'erreur de positionnement. En effet, ces multi-trajets se superposent au trajet direct lors du calcul de la fonction de corrélation. Il en résulte une déformation du pic d'autocorrélation telle que celles représentées dans la Figure 0-3. Ainsi la mesure de pseudodistance est erronée. L'ampleur de cette erreur dépend de la puissance, de la phase et du délai supplémentaire du trajet indirect.

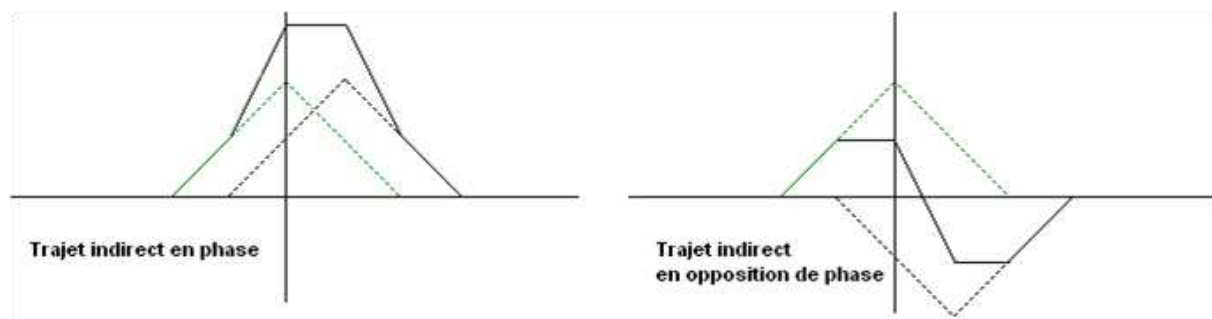


Figure 0-3 : effet d'un trajet indirect sur la fonction d'autocorrélation.

L'effet des trajets indirects apparaît aussi à l'extérieur mais il est beaucoup plus gênant et important en indoor. En effet, en intérieur, il y a plus d'obstacles réflecteurs et l'espace de

propagation des signaux est réduit. Par conséquent, les trajets indirects sont plus nombreux, de puissances plus élevées, et de courts délais supplémentaires (étant donné les courtes distances de propagation). Leur effet sur la mesure de pseudodistance est ainsi encore plus conséquent.

b. Effet de l'éblouissement

Le phénomène d'éblouissement, nommé aussi "Near-Far", est observé en particulier dans les systèmes CDMA. Dans certain cas, quand l'écart en puissance entre deux signaux, émis à la même fréquence, est très grand, le signal le plus faible est noyé dans le bruit. Donc, le récepteur GNSS ne détecte plus que le signal fort en puissance tandis que les pics d'autocorrélation du signal à faible puissance sont perçus comme un signal parasite.

Un tel phénomène a pour cause l'écart important en puissance (supérieur à 20dB) entre deux signaux du même système. Ceci peut résulter de trois situations liées à la différence d'atténuation des deux signaux. En premier lieu, si le récepteur GNSS est très proche de l'un des émetteurs, le signal de cet émetteur est beaucoup moins atténué par la propagation en espace libre que les autres. Cette situation est très fréquente en indoor et elle est la cause principale de ce phénomène d'éblouissement. En deuxième lieu, la présence d'obstacle dans l'environnement peut atténuer notablement le signal qui le traverse (comparé aux autres). Dans ce cas, il y a un risque d'éblouissement de ce signal par les autres au niveau du récepteur. En dernier lieu, la superposition des trajets multiples (constructive ou destructive) peut creuser l'écart en puissance et donc induire le phénomène d'éblouissement.

II. Objectif de la thèse

Ce travail de thèse a un objectif principal qui se résume à l'optimisation d'un système de localisation à base de transmetteurs locaux pour les environnements difficiles (où les signaux GNSS sont difficiles à détecter). Deux points essentiels seront traités : la génération de nouveaux codes caractérisés par un faible niveau d'interférence avec les signaux satellitaire. Et la simplification de l'infrastructure du système au moyen de la fibre optique. Pour le premier point, l'objectif est de proposer de nouveaux codes pour l'indoor capables de réduire le niveau d'interférence avec les signaux GNSS émis à l'extérieur. Ces codes devront aussi satisfaire d'autres conditions liées à leurs propriétés d'autocorrélation. Ces conditions seront détaillées par la suite. Le second point concerne l'utilisation de la fibre optique pour alléger le montage du système. De plus la fibre sera aussi employée dans la création des déphasages nécessaires au fonctionnement du système.

Chacun de ces points sera traité dans deux parties distinctes. Chaque partie commence par un état de l'art décrivant les études menées dans la littérature à propos du sujet traité. Dans la première partie, on s'intéresse aux codes GNSS déjà utilisés. La deuxième partie débute par une étude des techniques de transmission des signaux radio sur fibre. Les études théoriques développées autour de ces deux points nous mènent aux évaluations expérimentales réalisées, dont l'objectif est de tester les solutions proposées. Durant ces travaux, des simulations (d'interférence entre codes), des séries de mesures (de délais) et des tests de localisation ont été menés pour atteindre les objectifs fixés. Des analyses et des comparaisons (avec les références choisies) des résultats obtenus nous permettent de conclure sur ces travaux.

III. Contribution scientifique

Les principales contributions scientifiques apportées au cours de cette thèse sont :

- La mise en œuvre du système de localisation à répélites avec un montage (transmission des signaux avec les décalages temporels) basé sur la fibre optique. Ceci nous a permis d'alléger et de simplifier l'architecture du système.
- Le développement d'une méthode de calibration du système à répélites. L'objectif de cette méthode est de fournir une mesure précise (incertitude inférieure au centimètre) des délais ajoutés aux signaux des répélites. Cette donnée est nécessaire pour assurer une précision de localisation inférieure au mètre.
- L'étude des codes GNSS dans l'objectif de proposer les codes optimaux pour l'indoor. Ces codes devraient garantir le plus bas niveau d'interférence avec les signaux satellitaires reçus à l'extérieur.
- La création de nouveaux codes IMBOC (Indoor Modified BOC) caractérisés par un niveau réduit d'interférence avec les signaux satellitaires. Ces codes sont optimaux en ce qui concerne la réduction du seuil d'intercorrélation avec les signaux GNSS outdoor et la netteté de la fonction d'autocorrélation.
- La simulation du déploiement du système à répélites dans un environnement indoor typique utilisant les nouveaux codes et l'évaluation de leurs performances en termes d'interférence inter-système et intra-système.
- La génération des signaux RF modulés en IMBOC et l'évaluation des interférences réels induites sur un récepteur placé à l'extérieur.
- Le déploiement du système à répélites à base de fibre optique dans un environnement indoor et la réalisation des premiers tests de localisation (absolus et relatifs).

IV. Organisation du manuscrit

Le présent document est organisé en deux parties séparées plus une introduction. La première partie concerne l'optimisation des codes pour les systèmes de localisation indoor. Elle est organisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit l'état de l'art des codes existants dans la littérature des GNSS. Ces codes sont séparés en deux générations. La première génération concerne les codes de Gold GPS et la séquence maximale de Glonass. Dans la deuxième génération apparaissent les codes de Weil et les codes aléatoires. Etant donné que les propriétés de ces codes dépendent aussi des types de modulations utilisées, l'état de l'art comprend une étude de ces modulations. Il s'agit de la BPSK (Binary Phase Shift keying), de la BOC (Binary Offset Carrier) et de la BCSS (Binary Codes Spreading Symbol).

Le deuxième chapitre propose des nouveaux codes dont les propriétés d'interférence sont équivalentes à celles des codes GPS. Le choix de ces codes est fait selon des critères liés aux propriétés d'autocorrélation, notamment la durée du chip et l'absence de pic secondaire.

Le troisième chapitre définit des familles de nouveaux codes dont le niveau d'interférence avec ceux des satellites est inférieur au niveau GPS. Une étude théorique des intercorrélations et des simulations des niveaux d'interférence permet de prouver les améliorations apportées par ces codes.

Le quatrième chapitre concerne la génération des nouveaux signaux modulés par les codes présentés au troisième chapitre. Ces signaux nous permettent de faire des tests d'interférence sur des récepteurs GNSS standards.

Quant à la deuxième partie, elle est organisée en cinq chapitres :

Le cinquième chapitre décrit la liaison optique permettant de transmettre le signal GNSS sur la fibre optique. Les différentes techniques de modulation et démodulation Electronique/Optique sont présentées.

Le sixième chapitre concerne les techniques de mesure des délais introduits avec la propagation dans la fibre et les montages utilisés. On choisit à la fin de ce chapitre la méthode la plus adaptée (simple et facile à intégrer) à notre système.

Le septième chapitre présente les étapes de calibration des délais optiques et les méthodes d'estimation de la valeur réelle du délai et de son incertitude. Dans ce chapitre, on s'intéresse

à la théorie de l'analyse statistique pour évaluer les délais du système à répélites et leurs incertitudes.

Le huitième chapitre expose les résultats des mesures des délais et de leurs incertitudes pour notre système à répélites.

Le neuvième chapitre décrit une méthode fondée sur des mesures de calibration GNSS des délais et compare ces résultats à ceux obtenus par la méthode « optique » des chapitres précédents. Ensuite, on présente les premiers résultats de calcul de position du système à répélites pour des points fixes (positionnement absolu) et pour des déplacements du récepteur (positionnement relatif).

Dans la conclusion de ce document, on résume les travaux réalisés dans les deux parties et on suggère quelques perspectives pour de futures recherches.

Partie I : Codes optimaux pour le système de positionnement à base de répélites

Durant les travaux et les tests expérimentaux précédemment réalisés par le groupe Navigation de Telecom SudParis, le signal transmis par les émetteurs du système de positionnement porte l'un des 36 codes GPS. Dans le cadre des plus récentes réglementations concernant les niveaux de puissance d'émission autorisés en intérieur sur les bandes de fréquences allouées aux systèmes GNSS actuels, on est limité à un certain seuil de puissance (de l'ordre de -50dBm). Celles-ci ont pour objectif d'éviter toutes interférences possibles avec les systèmes GNSS fonctionnant à l'extérieur. Ces réglementations limitent notre niveau d'émission et par conséquent, les performances attendues de notre système en termes de précision et de couverture. On cherche alors un moyen de réduire le niveau de puissance des interférences possibles entre les signaux GNSS émis à l'extérieur et celui émis par le système de localisation en indoor. On est donc amené à étudier les interférences entre les codes portés par les signaux GNSS actuels et celui qui sera utilisé par notre système. L'objectif de cette étude est de proposer de nouveaux codes dont le niveau d'interférence avec ceux émis à l'extérieur est au pire des cas égal à celui entre deux codes GPS (parmi les 36 codes). Le seuil d'interférence entre deux codes GPS parmi les 36 codes sera en effet considéré comme étant la référence à laquelle on compare les propriétés d'intercorrélation des nouveaux codes.

Il faut aussi prendre en considération les autres aspects du système dont par exemple les performances des techniques utilisées pour solutionner le problème de l'éblouissement et réduire l'effet des multitrajets. En effet des travaux précédents réalisés au sein du groupe Navigation ont étudié ces deux problématiques pour aboutir à deux méthodes : la SMICL (Short Multipath Insensitive Code Loop) (*Jardak & Samama 2010*) et la DTT (Double Transmission Technique) (*Vervisch-Picois & Samama 2011*) capables de réduire l'effet des trajets indirects et de l'éblouissement respectivement. L'idée est donc de proposer de nouveaux codes tout en veillant à ce que les performances de ces techniques ne soient pas détériorées.

La SMICL est conçue dans le but d'éliminer l'effet des trajets indirects courts (d'une longueur inférieure à 0.5 chip), qui sont majoritaires en indoor, sur le calcul de position. En effet quand le signal reçu est perturbé par la présence des multitrajets, la fonction d'autocorrélation du code est déformée ce qui induit une erreur dans la mesure du décalage (dans le code) et par conséquent une position calculée non précise. La SMICL propose un nouveau discriminateur⁴ (Early-Late) qui a pour caractéristique principale d'être insensible aux trajets indirects de

⁴ Le discriminateur Early-Late est la différence entre la fonction d'auto-corrélation retardée d'un chip (Late) et celle en avance d'un chip (early).

longueur inférieure à 0.5 chip. Ainsi pour une gamme de multitrajets de longueur inférieure à 0.5 chip, les résultats de simulation de la SMICL montrent une forte amélioration des précisions obtenues. Par contre la SMICL n'est pas capable d'éliminer l'effet des trajets indirects de longueur supérieure à 0.5 chip. Ainsi s'il existe dans notre environnement des trajets réfléchis de longueur supérieure au seuil de 0.5 chip, on retrouve leur impact sur le calcul de la position du récepteur. Dans le but de rendre plus performante la SMICL et de profiter au maximum de ses avantages, l'idée initiale est de proposer un code dont la durée chip est plus élevée (de sorte que 0.5 chip représente une longueur plus grande de trajet indirect). Dans ce cas, des trajets indirects plus longs peuvent être pris en compte par le discriminateur de la SMICL, ce qui permettra d'améliorer la précision du positionnement.

La DTT consiste à émettre deux signaux décalés d'un retard ϕ , en phase pour le cas du premier émetteur et en opposition de phase pour le deuxième comme le montre la Figure 0-4. Le retard ϕ correspond à un demi-code dans un système à base de pseudolites. Quand on corrèle les signaux reçus par le récepteur venant de chacun des émetteurs à une première réplique du code non décalée puis à une deuxième décalée de ϕ , on retrouve les formes des fonctions d'autocorrélation représentées sur la Figure 0-4. Si le récepteur veut suivre les émissions du premier émetteur, il suffit de faire la somme des deux fonctions d'autocorrélation obtenues pour éliminer le deuxième signal et renforcer le pic du premier. Ainsi on supprime les termes de corrélations croisées de l'autre émetteur sans affecter le signal de celui que l'on cherche à suivre. Cette méthode peut fonctionner avec plus que deux émetteurs si la forme de la fonction d'autocorrélation de code utilisée ne présente pas de pics secondaires susceptibles de perturber le pic principal du deuxième signal. Il est donc préférable d'avoir un code dont la fonction d'autocorrélation n'a que deux valeurs possibles (comme par exemple une séquence maximale) : celle du pic et celle en dehors de celui-ci toujours constante.

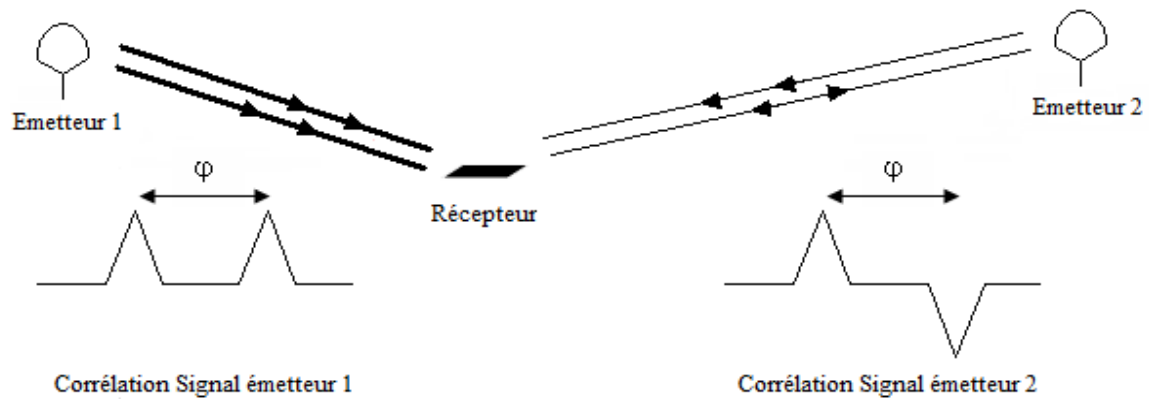


Figure 0-4 : le fonctionnement de la DTT avec deux émetteurs

En résumé, il est question dans cette partie de proposer des nouveaux codes permettant de satisfaire principalement les trois points suivants :

- Réduire des interférences avec les systèmes GNSS en outdoor (et aussi en indoor).
- Augmenter la durée du chip pour profiter des avantages de la SMICL
- Avoir une fonction d'autocorrélation à deux valeurs permettant d'étendre l'utilisation de la DTT à plus que deux émetteurs.

Dans la suite, on commence par étudier les codes utilisés dans les systèmes GNSS actuels pour la localisation à l'extérieur dans le but d'évaluer leurs performances selon les points précédemment exposés et proposer des exemples de codes susceptibles de mieux convenir à notre système.