

La couverture de cibles dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

Babacar DIOP – Dame DIONGUE – Ousmane THIARE

UFR Sciences Appliquées et de Technologies
Université Gaston Berger de Saint Louis, BP: 234 Sénégal
babacardiop96@yahoo.fr, dame.diongue@ugb.edu.sn, ousmane.thiare@ugb.edu.sn

RÉSUMÉ. Les récents progrès dans la conception des équipements électroniques embarqués à faibles coûts, ont permis le développement de beaucoup d'applications de Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) dans les domaines militaires, environnementaux et médicaux. Un important problème soulevé dans les RCSFs est celui de la couverture, qui se réfère à la manière dont les capteurs observent l'espace physique. Une issue importante soulevée par la question de la couverture est comment assurer la surveillance de cibles dans une zone d'intérêt, tout en tentant de maximiser la durée de vie du réseau. Ce problème connu sous la maximisation de la durée de vie de la couverture de cibles, est souvent posé lorsque le déploiement des capteurs est fait de manière aléatoire. Ce problème a reçu une attention particulière durant ces dernières années. Dans cet article, nous passons en revue l'ensemble des contributions ayant été apportées à ce problème, en nous focalisant sur les RCSFs statiques. Nous présentons différentes formulations du problème de la couverture de cibles dans les RCSFs, ainsi qu'une vue globale des solutions proposées.

ABSTRACT.

Recent improvements in affordable and efficient integrated electronic devices have enabled various applications in the state of Wireless Sensor Network related to military surveillance, environmental monitoring and health care. An important problem in Wireless Sensor Network is the sensor coverage problem, centered on a fundamental question: How well do the sensors observe the physical space? A major challenge in sensor coverage problem is how to maximize the lifetime of the network while maintaining coverage of a set of targets. This problem is known as the target coverage lifetime maximization problem, which is frequently addressed in the context of a random deployment. In this paper, we survey recent contributions addressing target coverage problems, focusing on static wireless sensor networks. We present various target coverage formulations, as well as an overview of the solutions proposed.

MOTS-CLÉS : réseaux de capteurs, couverture de cibles, durée de vie du réseau.

KEYWORDS: wireless sensor networks, target coverage, network lifetime.

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont des réseaux sans fil constitués de minuscules équipements appelés capteurs, souvent déployés en grand nombre dans une zone d'intérêt, pour surveiller un phénomène physique. Les capteurs sont équipés de modules de détection (ou détecteurs) grâce auxquels ils capturent des données, et les reportent vers une station de base via leurs interfaces de communication [1].

Bien que similaires aux systèmes distribués classiques, les RCSFs présentent néanmoins des contraintes spécifiques. La contrainte principale est l'énergie, due au fait que les capteurs fonctionnent le plus souvent sous batterie. Un capteur ayant épuisé sa réserve d'énergie est un capteur mort, et ne pourra plus participer au fonctionnement du réseau. Un RCSF arrête de fonctionner lorsque le nombre de capteurs restants est insuffisant. De ce point de vue, la gestion efficace de l'énergie et la maximisation de la durée de vie sont des problématiques fondamentales.

La couverture se réfère à la manière dont l'espace physique (environnement) est observé par les capteurs. La couverture de cibles trouve son écho dans divers domaines (militaire, médical, etc.), où l'objet d'étude (cibles militaires, patient, ...) peut être observé ou suivi par des capteurs environnants, embarqués ou attachés à la cible. Pour certaines applications de couverture de cibles (ex : la surveillance de patients dans un hôpital), des capteurs peuvent être déployés de manière déterministe, c'est-à-dire placés à des endroits précis dans la zone d'intérêt, proches des cibles, pour la surveillance. Dans ce cas, le problème posé est celui de l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt, afin de satisfaire certains objectifs tels que minimiser le nombre ou le coût des capteurs à déployer. Cependant lorsque la position exacte des cibles n'est pas connue à l'avance, ou que le milieu est inaccessible, disperser aléatoirement les capteurs dans la zone d'intérêt constitue la seule alternative connue à l'heure actuelle : on parle de déploiement aléatoire. Généralement, le nombre de capteurs déployés est supérieur à l'optimum nécessaire pour couvrir toutes les cibles, afin de combler les lacunes du positionnement aléatoire des capteurs dans la zone. Avec un tel scénario, certains capteurs peuvent se retrouver avec plus de cibles couvertes que d'autres après le déploiement, de même que certaines cibles peuvent être couvertes par plus de capteurs que d'autres. Une organisation de l'activité des capteurs s'avère nécessaire afin d'obtenir une certaine qualité de service dans la couverture des cibles, tout en garantissant une gestion efficace de l'énergie. Pour maximiser la durée de vie, les capteurs sont souvent partitionnés en plusieurs ensembles couvrants (ECs), qui seront activés l'un après l'autre. Un EC est un ensemble de capteurs tels qu'une fois activés, permettent de couvrir toutes les cibles¹. Dès lors que les ECs sont activés

¹ Dans certains cas, on peut choisir de ne couvrir qu'une partie des cibles.

successivement, la durée de vie du réseau est égale à la somme des durées de vie des ECs. Le problème de la maximisation de la durée de vie du réseau équivaut dans ce cas au problème de calculer le nombre optimal d'ECs, qui a été démontré Np-complet [2].

Plusieurs solutions sous-optimales ont été proposées dans la littérature notamment celles basées sur les algorithmes gloutonnes, la programmation linéaire, la programmation d'entier, ainsi que d'autres techniques d'optimisation. Les protocoles (solutions) peuvent être catégorisés en deux classes : centralisés ou distribués. Lorsque c'est centralisé, le protocole d'ordonnancement est exécuté à la station de base, en connaissance de la position des capteurs et le résultat est envoyé aux capteurs pour l'exécution. Pour les protocoles distribués, les capteurs coopèrent par diffusion de messages entre capteurs voisins, pour prendre la décision soit de s'activer ou d'entrer en veille.

Dans ce travail de recherche, nous présentons l'essentiel des problèmes associés à la couverture de cibles dans les RCSFs, ainsi qu'une vue globale sur les solutions proposées. Nous considérons le modèle de couverture binaire circulaire où la zone de couverture d'un capteur est délimitée par un disque de rayon R , représentant son rayon de détection. En outre, nous focalisons notre résumé sur la couverture aléatoire. Dans la section 2, nous présentons les solutions centralisées qui ont été proposées, et dans la section 3, les solutions distribuées. La section 5 conclut ce document.

2. Protocoles centralisés

Une approche commune aux protocoles centralisés c'est de représenter le problème comme un problème d'optimisation, et d'utiliser une technique d'approximation pour le résoudre. Les algorithmes d'approximation centralisée procèdent par une sélection itérative des capteurs pour former les ECs. La sélection est effectuée en plusieurs stages (ou rounds) et tient compte de la couverture des cibles dans la zone, en privilégiant les capteurs dont les profits sont meilleurs, et qui couvrent mieux les cibles critiques². Le profit d'un capteur peut être mesuré par rapport au nombre de cibles couvertes et de la quantité d'énergie restante pour ce capteur.

2.1. ECs disjoints et non disjoints

Les premières approches centralisées [2, 3, 6] se focalisaient sur le problème de trouver un nombre optimal d'ECs disjoints, étant chacun capable de couvrir toutes les cibles. Cardei et Du [2] et Zorbas[6] et ont proposé une solution au problème initialement posé dans [3], et pour maximiser le nombre d'ECs disjoints,

² Les cibles les moins couvertes en terme de nombre de capteurs.

le problème est transformé en un problème de flot maximal de graphe, résolu par une programmation d'entier mixte. Ensuite il a été démontré que les ECs non disjoints permettraient de mieux étendre la durée de vie [4, 7]. Un algorithme glouton de complexité $O(dk \cdot n)$ est proposé dans [4], construisant itérativement une partition d'ECs non disjoints en sélectionnant à chaque itération le capteur présentant le meilleur profil pour couvrir la cible critique³. Zorbas et al. se sont basés sur une classification des capteurs en quatre classes, afin d'affiner la stratégie de sélection. Et plus tard il a été démontré qu'avec l'ajustement dynamique de la portée des capteurs, l'énergie consommée par les capteurs lors de la surveillance des cibles est mieux contrôlée [5]. Le problème adressé consiste à trouver un nombre maximal d'ECs ainsi que la portée minimale associée à chaque capteur, tel que chaque EC garantisse une couverture complète des cibles.

2.2. ECs connectés

Zhao et Gurusamy [8] ont introduit la notion d'arbre couvrant pour calculer des ECs connectés. Un arbre couvrant est un EC connecté où chaque capteur est relié au puits. Après avoir démontré que le problème de trouver K (K étant défini) arbres couvrants est un problème Np-complet, ils ont proposé une heuristique gloutonne constituée de trois phases : connecter tous les capteurs au puits par un arbre de communication de poids minimal, ensuite sélectionner les capteurs, et extraire l'EC de l'arbre couvrant.

Cardei et al. [9] ont proposé deux algorithmes (centralisé et distribué) pour calculer des ECs connectés. Un algorithme de recherche en largeur de graphe est utilisé dans la version centralisée pour déterminer le chemin vers la station de base. Jaggi & Abouzeid ont tenté de maximiser dans [10] le nombre d'ECs disjoints connectés. Les capteurs relais (intermédiaires dans la transmission des données vers le puits) sont sélectionnés par l'algorithme du plus court chemin pour garantir la connectivité.

2.3. Brèche de couverture

Dans les applications où la surveillance des cibles doit être permanente, les données doivent être reportées à la station de base selon une fréquence prédéfinie. Dans beaucoup de cas, un nombre fixe de canaux sont disponibles pour transmettre les données vers la station de base. Certains protocoles tels que le TDMA divisent le canal en plusieurs créneaux représentant les sous-canaux disponibles [11]. Chaque sous-canal définit une quantité maximale de bits de données que chaque capteur actif peut transmettre vers la station de base, via ce sous-canal. La quantité de données transmise par chaque EC est donc limitée. Si chaque capteur génère une

³ La cible critique est définie comme la cible la moins couverte en termes de nombre de capteurs et de leurs résidus d'énergie.

quantité fixe de données, la contrainte de bande passante peut conduire à des cibles non couvertes dans les ECs. On parle de brèche de couverture. Les objectifs souvent adressés dans ce contexte sont : la minimisation du taux de brèche moyen⁴, la minimisation du nombre de cibles non couvertes [14] ou la minimisation du temps de brèche⁵ pour une cible particulière, sous contrainte de maximiser la durée de vie du réseau.

Cheng et al. [12] ont introduit le premier problème de la minimisation de la brèche de couverture dans un réseau et ont prouvé sa Np-complétude. Leurs travaux ont été étendus dans [13], où trois instances du problème ont été posées : la brèche minimale, le temps de brèche minimal et la minimisation de la brèche maximale. L'objectif de la première instance c'est de calculer un nombre prédéfini d'ECs de cardinalité W tout en minimisant la brèche totale. Les deux autres instances considèrent un temps de brèche maximal et un nombre maximal d'ECs comme données d'entrée de l'algorithme, qui doivent être calculés tout en maximisant la durée de vie du réseau.

Zorbas et al. ont introduit dans [11] le problème de la couverture partielle prenant en compte la connectivité. La décision de ne pas couvrir deux ou plusieurs cibles en même temps dans un EC, est prise en fonction du paramètre de leurs distances euclidiennes. Le nombre de cibles à couvrir dans chaque EC peut être spécifié au départ. Les résultats de simulations estiment une double augmentation dans la durée de vie, comparé avec [8], avec 90% des cibles couvertes.

3. Protocoles distribués

Les protocoles distribués s'exécutent en plusieurs stages (rounds) de durée de déterminée. Au début de chaque stage, chaque capteur négocie avec ses voisins (capteurs situés à un ou deux sauts de communication) pour décider soit de rester actif durant ce stage, ou d'entrer en mode veille. Si un capteur vérifie que toutes les cibles qu'il couvre sont couvertes par ses voisins, alors ce capteur peut entrer en veille pendant aussi longtemps que cette propriété est vérifiée. A chaque fois qu'une décision a été prise, le capteur en informe ses voisins en émettant un message de diffusion. Les capteurs en veille sont réveillés à des intervalles réguliers pour assurer une couverture continue.

Cardei et al. [5] ont présenté une solution distribuée au problème de la couverture de cibles associé à la gestion de l'énergie. La solution s'exécute en plusieurs stages (rounds) au début desquels, chaque capteur maintient un temps d'attente w_i , attendant de recevoir des messages. Dès qu'un message est reçu, le capteur met à jour la liste des cibles qu'il peut couvrir, ajuste son rayon à la valeur minimale nécessaire pour couvrir la liste des cibles, met à jour sa contribution avant d'ajuster

⁴ La proportion de brèche dans tout le réseau.

⁵ La durée pendant laquelle une cible reste non couverte.

son temps d'attente. A la fin de son temps d'attente, un message de diffusion est émis contenant les cibles couvertes, et le capteur entre en mode actif. Lorsque la liste des cibles qu'il peut couvrir est vide, alors il entre en veille.

Dans [15], Lu et al. adressent le problème du maintien de la connectivité et de la couverture de cibles par ajustement du rayon des capteurs. Le protocole est constitué de deux phases : d'abord une phase d'initialisation où chaque capteur applique une règle d'éligibilité pour déterminer son mode (actif ou veille). Un capteur s_i entre en mode veille si ses voisins⁶ sont connectés et que ses cibles⁹ sont couvertes par ses voisins. Ensuite, une seconde phase est entamée pour garantir la couverture où les capteurs ajustent itérativement leurs rayons de détection en se basant sur leurs contributions jusqu'à ce que toutes les cibles soient couvertes. Chaque capteur temporise durant un temps inversement proportionnel à sa contribution maximale. S'il reçoit un message de ses voisins avant l'épuisement de son temps, il recalcule sa contribution et ajuste son temps d'attente. Sinon il émet un message de diffusion contenant sa contribution et l'ensemble des cibles couvertes, et entre en mode actif.

Prasad et Dhawan [16] ont proposé un protocole procédant par construction d'ECLs non disjoints de manière distribuée. L'algorithme s'exécute en plusieurs stages incluant deux étapes. D'abord chaque capteur calcule ses ensembles couvrants locaux (ECLs). Un ECL $C_{i,k}$ pour un capteur s_i peut couvrir toutes les cibles couvertes par s_i sans inclure le capteur dans l'ECL. Ensuite le meilleur ECL est sélectionné à partir d'un graphe de dépendance, et les capteurs appartenant à un ECL sélectionné sont en mode actif durant ce stage, alors que les autres sont en veille.

Dhawan et Prasad [17] ont étendu les travaux dans [16] en adressant le problème d'un ordonnancement optimal des ECLs. Pour sélectionner l'ECL adéquat, chaque capteur peut se baser sur le niveau de connexité des ECLs dans le graphe de dépendance LD, sur la sélection des ECLs optimisant l'utilisation des capteurs couvrant les cibles critiques locaux¹¹ et favoriser les ECLs couvrant les cibles avec un même impact. L'impact est une fonction mesurant la diminution de la durée de vie d'une cible¹².

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons catégorisé l'essentiel des problèmes de couverture de cibles proposés dans la littérature, en tentant de donner leurs formulations, ainsi que les solutions proposées. Les RCSFs étant souvent déployés aléatoirement dans des zones hostiles, un contrôle de la couverture s'avère

⁶ Les capteurs avec qui il peut communiquer.

⁷ Le ratio du nombre de cibles non couvertes sur la quantité d'énergie pour un rayon de détection donné.

nécessaire lorsqu'on souhaite obtenir une durée de vie longue ainsi qu'une certaine qualité de service. Beaucoup de solutions intéressantes ont été proposés. Généralement, les algorithmes centralisés fournissent des résultats proches de la solution optimale, mais sont moins scalables que les algorithmes distribués.

3. Bibliographie

- [1] AKYILDIZ IAN F, SU WEILIAN, SANKARASUBRAMANIAM YOGESH, CAYIRCI, ERDAL, "Wireless sensor networks : a survey", Computer networks., vol. 38, no 4 , 2002.
- [2] CARDEI MIHAELA, DU DING-ZHU, "Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization", Wireless Networks, vol. 11, no 3, 2005.
- [3] SLIJEPCEVIC SASHA, POTKONJAK MIODRAG, "Power efficient organization of wireless sensor networks", IEEE International Conference on Communications, 2001. ICC, vol. 2, 2001.
- [4] CARDEI MIHAELA, THAI MY T, LI YINGSHU, WU WEILI, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks", INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE, vol. 3, 2005.
- [5] CARDEI MIHAELA, JIE WU, LU MINGMING, WU WEILI, PERVAIZ MOHAMMAD O, "Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges", (WiMob'2005), IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications., vol. 3, 2005.
- [6] ZORBAS DIMITRIOS, GLYNOS DIMITRIS, KOTZANIKOLAOU PANAYIOTIS, DOULIGERIS CHRISTOS, "An adaptive algorithm for coverage problems in wireless sensor networks", EW, 13th European Wireless Conference., vol. 3, 2007.
- [7] ZORBAS DIMITRIOS, GLYNOS DIMITRIS, KOTZANIKOLAOU PANAYIOTIS, DOULIGERIS CHRISTOS, "Solving coverage problems in wireless sensor networks using cover sets", Ad Hoc Networks, 2010., vol. 8, no 4, 2005.
- [8] ZHAO QUN, GURUSAMY MOHAN, "Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks", IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 16, no 6, 2008.
- [9] I. CARDEI, M. CARDEI, "Energy efficient connected coverage in wireless sensor networks", International Journal in Sensor Networks, vol. 3, no 3, 2008.

- [10] JAGGI NEERAJ, ABOUZEID ALHUSSEIN, "Energy-efficient connected coverage in wireless sensor networks", Proceedings of 4th Asian International Mobile Computing Conference, Kolkata, India, vol. 10, no 03, 2006.
- [11] ZORBAS DIMITRIOS, GLYNOS DIMITRIS, KOTZANIKOLAOU PANAYIOTIS, DOULIGERIS CHRISTOS, "Satisfying coverage and connectivity in bandwidth constrained sensor networks" , 9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. , 2009.
- [12] MAGGIE XIAOYAN CHENG, RUAN LU, WU WEILI, "Achieving minimum coverage breach under bandwidth constraints in wireless sensor networks", Proceedings IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol. 4, 2005.
- [13] MAGGIE XIAOYAN CHENG, RUAN LU, WU WEILI, "Coverage breach problems in bandwidth-constrained sensor networks", ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), vol. 3, no 2, 2007.
- [14] ABRAMS ZOË, GOEL ASHISH, PLOTKIN SERGE, "Set k-cover algorithms for energy efficient monitoring in wireless sensor networks", Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks., 2004.
- [15] LU MINGMING, WU JIE, MIHAELA CARDEI, MINGLU LI, "Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks" , Networking and Mobile Computing., 2005.
- [16] PRASAD SUSHIL K, DHAWAN AKSHAYE, "Distributed algorithms for lifetime of wireless sensor networks based on dependencies among cover sets", High Performance Computing–HiPC., 2007.
- [17] DHAWAN AKSHAYE, PRASAD SUSHIL K, "Energy efficient distributed algorithms for sensor target coverage based on properties of an optimal schedule", High Performance Computing–HiPC., 2007.