Approche Avancée pour le Problème de Couverture et de Connectivité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

Maher REBAI[1], Farah AIT SALAHT[2], Nora IZRI[3]
[1,2,3]Léonard de Vinci Pôle Universitaire, Research Center,
92 916 Paris La Défense, France
{maher.rebai,farah.ait_salaht,nora.izri}@devinci.fr

Mots-clés : *Réseaux de capteurs sans fil, relaxation itérative, optimisation, complexité*

1 Introduction

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) jouent un rôle crucial dans les applications de surveillance modernes, couvrant des domaines aussi variés que la surveillance environnementale et la sécurité des infrastructures. Ces réseaux, autonomes et auto-organisables, se composent de capteurs interconnectés capables de collecter et traiter les données, telles que des informations climatiques ou sismiques, et de les transmettent efficacement de capteur en capteur jusqu'à une station de base ou un nœud réseau 'sink'. De plus, les RCSF sont essentiels dans l'Internet des objets (IoT), facilitant la collecte de données à grande échelle et leur intégration dans des systèmes d'analyse avancée. Leur efficacité énergétique et leur adaptabilité les rendent idéaux pour des environnements difficiles, ouvrant de nouvelles perspectives dans des secteurs tels que les villes intelligentes, la santé, et l'industrie.

Dans cet article, nous proposons d'aborder le problème de minimisation du nombre de capteurs nécessaires pour garantir une couverture complète d'une zone à surveiller, tout en assurant une connectivité fiable entre les capteurs déployés. Ce problème noté ici par PCC (Problème de Couverture et de Connectivité) est reconnu comme NP-complet [3]. Diverses méthodes, exactes ou approximatives, ont été proposées dans la littérature pour le résoudre [1, 2, 4]. Cependant, ces approches souffrent souvent de limitations en termes de complexité computationnelle ou de faisabilité pratique dans des environnements réels. Dans ce travail, nous présentons une nouvelle approche de résolution exacte basée sur la relaxation itérative. Cette approche vise à résoudre de manière optimale et plus rapide le problème PCC.

2 Description du problème

Pour résoudre le problème PCC, nous proposons de modéliser la zone à surveiller par une grille de dimensions $M \times N$ (largeur $\times$ longueur), où chaque position de la grille (i, j) peut potentiellement accueillir un capteur. Chaque capteur est caractérisé par une portée de couverture R_{cov} et une portée de communication R_{com}, où $R_{cov} \leq R_{com}$. Un capteur, opérant depuis la position (i, j), est capable de couvrir chaque position (k, t) de la grille qui satisfait l'équation $(i-k)^2+(j-t)^2 \leq R_{cov}^2$. De même, le capteur peut transmettre les informations collectées à un autre capteur situé à la position (p, q) de la grille si l'équation $(i-p)^2+(j-q)^2 \leq R_{com}^2$ est respectée. Cette chaîne de communication se poursuit jusqu'à ce que les informations atteignent la station de base, localisée à la position (l, w) sur la grille.

3 Approche de relaxation itérative développée

L'approche de relaxation itérative proposée ici repose sur un processus itératif dans lequel les contraintes complexes d'un problème sont initialement relâchées. Ainsi, le problème relaxé est résolu en prenant en compte uniquement les contraintes restantes. À une itération i, la solution obtenue est évaluée et les contraintes qui sont violées sont reintégrées dans le problème relaxé pour la résolution à l'itération suivante, $i+1$. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'une solution réalisable soit trouvée.

PCC relaxé : Basée sur la relaxation itérative, nous proposons de relaxer le PCC en relâchant les contraintes de connectivité entre les capteurs. Le PCC Relaxé (noté PCC-R) est alors formalisé en tant que problème de couverture totale d'une grille.

Pour résoudre le nouveau PCC-R, une modélisation sous forme de graphe de la grille est considérée. Dans ce cas, chaque position de la grille représente les sommets du graphe. Une arête (p, q) existe si la distance euclidienne entre les sommets p et q est inférieure ou égale à R_{com}. Le modèle linéaire permettant de résoudre le PCC-R, est décrit comme suit : $Minimiser\ \sum_{i=1}^{M \cdot N} x_i \quad S/C : \sum_{i \in \theta(j)} x_i \geq 1,\ \forall j = 1 \ldots M \cdot N$, où la variable binaire x_i, $\forall i = 1 \ldots M \cdot N$ est égale à 1 si un capteur est placé au sommet i. La fonction objective vise à minimiser le nombre de sommets (capteurs) sélectionnés. L'ensemble des contraintes (S/C) assure que chaque sommet j doit être couvert par au moins un capteur de l'ensemble de sommets $\theta(j)$, qui représente les sommets pouvant couvrir le sommet j.

Ajout de contraintes violées : La résolution du PCC-R à chaque itération conduit à l'une des deux solutions suivantes : (1) la première solution répond aux deux contraintes de couverture totale et de connectivité. Dans ce cas, la solution est optimale pour le problème d'origine. (2) La deuxième solution satisfait uniquement la contrainte de couverture et peut être considérée comme un graphe non connecté comprenant $P > 1$ composantes connexes. Pour cette solution, il est nécessaire d'ajouter les contraintes suivantes : $\sum_{k \in C_i} x_k \leq |C_i| + 1\ et\ \sum_{k \in \overline{C}_i} x_k \geq |\overline{C}_i| + 1,\ \forall i = 1 \ldots P$, afin de réduire le nombre de composantes connexes à la prochaine itération. Ici, C_i représente la composante connexe i, $\overline{C}_i$ sa composante connexe symétrique et $|C_i|$ le nombre total de sommets dans C_i.

Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau ci-dessous démontrent la pertinance de l'approche proposée en termes de temps de calcul, comparée au modèle linéaire [1].

(M, N, R_{cov}, R_{com}) / *Méthode*	(7 ;7 ;2 ;2)	(7 ;7 ;2 ;3)	(7 ;15 ;2 ;3)	(7 ;15 ;3 ;5)	(10 ;10 ;3,3)	(15 ;15 ;3 ;5)
Notre approche	16,45	0,08	17,11	0,00	3,44	10,25
Modèle linéaire [1]	128,13	9,48	1037,58	17,99	2490,35	>3600

TAB. 1 – Temps moyen de calcul en secondes.

Dans la continuité de ce travail et dans le but d'augmenter l'efficacité de notre modèle, nous envisageons d'intégrer un ensemble de contraintes valides, ou 'coupes', basées sur les propriétés spécifiques du problème. Nous projetons également d'appliquer notre approche au problème de la réplication de services dans les réseaux d'Edge computing. Cette extension nous permettrait de tester la robustesse et l'adaptabilité de notre méthode dans un contexte différent.

Références

[1] M. Rebai, M. Hasan and H. Snoussi. Exact methods for sensor deployment problem with connectivity constraint in wireless sensor networks. *IJSNET*, 21(3) :157–168, 2016.

[2] M. Rebai, M. Le Berre, H. Snoussi, F. Hnaien and L. Khoukhi Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks *Computers and Operations Research*, 59 : 11—21, 2015.

[3] Wei-Chieh, K., Bing-Hong, L., Ming-Jer, T. The critical-square-grid coverage problem in wireless sensor networks is NP-Complete. *Computer Networks*,55(9) :2209–2220, 2011

[4] M. Khoshrangbaf, V. Khalilpour and A.M. Challenger. Ant Colony based Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks *FedCSIS 2022*, 32 : 155–159, 2022