

Traitement du Signal pour Réseaux de Capteurs : Échantillonnage et Communications

François INGELREST, Olivier ROY, Martin VETTERLI

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse
{Francois.Ingelrest, Olivier.Roy, Martin.Vetterli}@epfl.ch

Résumé – Nous discutons des aspects liés au traitement du signal et aux communications dans les réseaux de capteurs sans fil. Plus particulièrement, nous discutons des différents problèmes classiques liés à l'échantillonnage des signaux, à la compression distribuée, ainsi qu'à la manière de mettre en réseau ces capteurs. Nous présentons également des résultats issus d'un déploiement effectué dans les Alpes.

Abstract – We discuss issues related to signal processing and communications in wireless sensor networks. We particularly discuss the different problems linked to the sampling of the signals, the distributed compression, as well as the networking itself. We also present results obtained using a real-world deployment that took place in the Alps.

1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont une spécialisation de la classe des réseaux *ad hoc* [4]. Ils sont *multi-sauts* et *auto-organisés*, et composés de *notes*. Ces notes sont de petits objets, équipés d'un processeur et d'une radio, capables de relever des informations sur leur environnement par le biais de capteurs. Leur consommation énergétique est souvent une préoccupation majeure, étant donné le peu d'énergie dont ils disposent. Les contraintes qui en résultent expliquent la présence de *puits* au sein du réseau, disposant de plus de ressources, permettant l'envoi des données recueillies à un serveur distant.

Ces réseaux de capteurs sont le sujet de nombreuses investigations en raison de la maturité des technologies ainsi que des nombreuses applications qu'ils rendent possibles [8]. Dans cet article, nous abordons ces réseaux du point de vue du traitement du signal et de la communication pour trois raisons :

1. Un réseau de capteurs peut être vu comme un échantillonneur spatio-temporel.
2. Un réseau *ad hoc* est un système de communication multi-terminaux sans fil.
3. Les applications requièrent une reconstruction des signaux acquis, ou une estimation des paramètres.

Nous nous intéressons en particulier aux applications touchant le domaine de la surveillance environnementale [3]. Dans ce domaine, l'acquisition de données spatio-temporelles denses à large échelle, rendue possible grâce aux réseaux de capteurs, est une opportunité nouvelle permettant la conduite d'études complètement inédites jusqu'à présent [10].

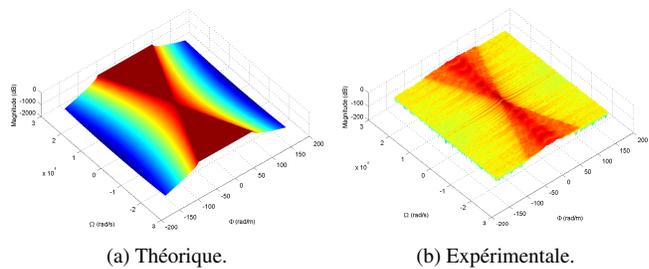


FIG. 1: Densité spectrale de puissance d'un champ acoustique spatio-temporel. Les variables Ω et Φ correspondent respectivement aux fréquences temporelles et spatiales.

2 Échantillonnage

Considérons l'acquisition d'un champ de données physiques, tel que la température, dans un domaine donné. Le réseau de capteurs permet d'obtenir un ensemble d'échantillons spatio-temporels de ce champ. Il correspond donc à un système d'échantillonnage spatio-temporel. La densité spatiale des mesures ainsi obtenues est limitée par le nombre de capteurs, et la densité temporelle est limitée par leur vitesse d'acquisition. Augmenter la fréquence d'échantillonnage spatiale nécessite donc le déploiement d'un plus grand nombre de capteurs par unité de surface ce qui, en général, est bien plus coûteux que d'augmenter la fréquence d'échantillonnage temporelle.

Il est à noter que les données ainsi acquises sont le résultat de processus physiques et sont donc corrélées de manière très particulière. Par exemple, la densité spectrale de puissance d'un champ acoustique spatio-temporel large bande possède une forme de papillon [1, 11], comme illustré par la figure 1.

La caractéristique clef de ce spectre est qu'il est non-séparable. Ceci signifie qu'un échantillonnage séparable est poten-

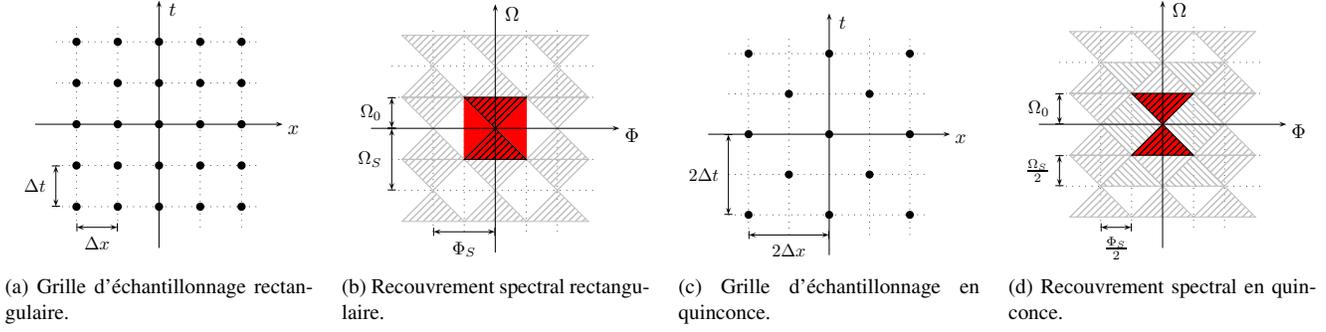


FIG. 2: Grilles d'échantillonnage spatio-temporelles et recouvrements spectraux correspondants. Les quantités Δt et Δx représentent respectivement la période d'échantillonnage temporelle et spatiale, Ω_S et Φ_S les fréquences d'échantillonnage correspondantes, et Ω_0 la fréquence temporelle maximale.

tiellement sous-optimal. En effet, un échantillonnage en quinconce (non-séparable) permet d'obtenir un recouvrement spectral bien plus efficace que celui obtenu par un échantillonnage rectangulaire (séparable), comme le montre la figure 2.

Ce fait sera d'une grande utilité dans le contexte de la compression distribuée abordée à la section suivante. Notons néanmoins que, dans la plupart des cas, le support des densités spectrales de puissance liés aux phénomènes physiques n'est pas fini. Une faible quantité d'aliasing au niveau spatial est donc inévitable. Cependant, il est parfois possible de compenser une densité spatiale moindre par une densité temporelle plus importante. Dans le cas de l'équation de la chaleur, par exemple, il est possible d'obtenir une super-résolution spatiale grâce à un sur-échantillonnage temporel [9].

3 Compression Distribuée

Une fois le phénomène physique spatio-temporel échantillonné à l'aide du réseau de capteurs, chaque capteur doit fournir une représentation binaire de ses échantillons de manière à pouvoir les transmettre au puits en utilisant le réseau de communication dont l'architecture est décrite à la section suivante.

La capacité des liens de communication est faible car la puissance de transmission des capteurs est limitée. Il faut donc représenter les échantillons obtenus de la manière la plus compacte possible. Ce processus est généralement appelé *compression*, ou codage de source. Plus précisément, le but de la compression est d'utiliser le débit de communication le plus faible possible tout en garantissant de pouvoir reconstruire les échantillons à la station de base avec une erreur n'excédant pas une distortion donnée. Le débit moyen est mesuré en bits par échantillon, et la distortion est généralement calculée comme l'erreur quadratique moyenne par échantillon. La détermination du débit minimal pour une distortion donnée (sans contrainte de complexité sur la méthode de codage) caractérise la *fonction de débit-distortion* [6]. La caractérisation de cette fonction est importante puisqu'elle fournit une borne inférieure au nombre de bits nécessaires à un algorithme de compression

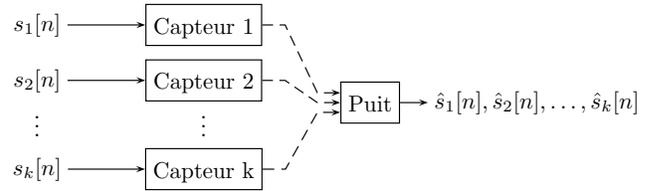


FIG. 3: Compression distribuée. Chaque capteur transmet une description compacte de ses échantillons au puits, en prenant en compte la corrélation entre les signaux échantillonnés aux autres capteurs.

de complexité finie désirant opérer avec une distortion donnée.

Dans un contexte de réseau de capteurs, le but est de caractériser la relation fondamentale qui existe entre la somme des débits utilisés par chaque capteur, et la distortion totale qui découle de la reconstruction de tous les échantillons à la station de base. On parle alors de *compression distribuée* ou de codage source distribué [6]. Ceci est illustré par la figure 3. Chaque capteur fournit une représentation binaire de ses échantillons en prenant en compte la corrélation qui existe avec les échantillons mesurés par les autres capteurs. La communication entre capteurs est interdite ce qui rend l'estimation de cette corrélation difficile en pratique. Cependant, comme observé à la section précédente, les lois de la physique induisent une dépendance connue entre les mesures spatio-temporelles obtenues à l'aide du réseau de capteurs. Ceci permet potentiellement de développer des méthodes de codage distribué plus performantes en termes de débits de communication.

À titre d'exemple, le recouvrement spectral obtenu avec un échantillonnage en quinconce permet, sous certaines hypothèses exposées dans [11], d'obtenir une décorrélation totale entre les signaux mesurés par les différents capteurs. Après échantillonnage, chaque capteur peut donc compresser ses données de manière indépendante, sans perte d'optimalité en termes de débit-distortion. Cette stratégie permet également de déterminer la fonction de débit-distortion distribuée, ce qui est, dans le cas général, un problème ouvert depuis plusieurs décennies.

4 Réseau

Si certaines caractéristiques des réseaux de capteurs sont génériques, il est très important de considérer les besoins spécifiques de l'application visée, surtout lorsqu'elle est aussi exigeante que la surveillance de l'environnement. Une campagne de ce type consiste généralement à déployer un certain nombre de capteurs dans une zone pour effectuer des mesures périodiques de paramètres météorologiques et hydrologiques, tels que la vitesse du vent et sa direction. La plupart d'entre elles changent lentement dans le temps, ce qui autorise un échantillonnage peu dense. Toutefois, les phénomènes intéressants, tels que les avalanches ou les glissements de terrain, arrivent rarement et sont difficiles à prédire : Il faut donc que les déploiements durent assez longtemps pour les observer.

Il est possible de traduire toutes ces caractéristiques dans les besoins suivants :

- **Autonomie.** Les batteries doivent alimenter les stations météo durant tout le déploiement. Parce que l'émetteur radio est très gourmand en énergie, le réseau doit être « malin » dans sa gestion des communications, et cela même si une source d'énergie renouvelable est utilisée (telle que l'énergie solaire). Les protocoles qui nécessitent de garder la radio allumée en permanence doivent donc être évités.
- **Fiabilité.** Le réseau doit effectuer des opérations simples et prévisibles, afin d'éviter des « crashes » inattendus. La maintenance humaine doit être évitée, car les utilisateurs n'ont pas forcément les connaissances nécessaires pour cela et les lieux de déploiements sont souvent éloignés. Atteindre un haut niveau de fiabilité est très difficile, car les pertes de paquets arrivent le plus souvent lorsque les conditions météo sont difficiles, alors que ces périodes sont dans le même temps les plus intéressantes pour l'analyse de données.
- **Robustesse.** Le réseau doit prendre en compte un grand nombre de problèmes, tels qu'une faible connectivité (en cas de chute de neige par exemple) ou des défaillances matérielles. Par exemple, l'humidité cause fréquemment des court-circuits menant à des redémarrages intempestifs des stations. L'utilisation d'un protocole nécessitant une phase d'initialisation effectuée de manière synchrone est donc inconcevable.
- **Flexibilité.** L'utilisateur doit pouvoir rapidement ajouter, déplacer ou enlever des stations à n'importe quel moment selon les besoins de l'application. Par exemple, l'emplacement des stations peut s'avérer inadéquat pour récupérer les données requises. De nouvelles zones d'intérêts peuvent également apparaître, rendant nécessaire l'installation de nouvelles stations. Les nœuds du réseau doivent donc automatiquement détecter leur voisinage pour prendre en compte de tels changements, et il n'est donc pas possible de s'appuyer sur une connaissance *a priori* de la topologie du réseau.

Tous ces pré-requis sont particulièrement importants lors de déploiements dans des lieux éloignés et difficiles d'accès. Par exemple, le déploiement du Génépi, décrit dans la section suivante, était localisé en haute montagne. Un hélicoptère a été requis pour installer le matériel, et il n'était pas envisageable de retourner sur place quelques jours plus tard à cause d'une batterie déchargée ou d'une station nécessitant un re-démarrage manuel.

Une manière d'obtenir ces résultats est de garder les choses aussi simples que possible [2]. TASK [5] est un ensemble d'outils pour les réseaux de capteurs, conçu à Berkeley, qui a été utilisé pour des déploiements extérieurs, par exemple durant l'expérience *Macroscopic* [12]. L'expérience des auteurs de TASK est extrêmement utile, et ils affirment qu'une approche simple et spécifique à l'application fournit les solutions les plus robustes pour des déploiements « réels ». Ceci est particulièrement vrai pour la surveillance de l'environnement, car assembler des composants existants et complexes demande beaucoup de temps et d'efforts pour obtenir une compréhension suffisante de leurs interactions. Tout ceci n'est pourtant souvent pas nécessaire à l'application visée. En gardant les choses simples, il est possible de créer un réseau robuste, adapté à l'application et à une utilisation extérieure.

5 Application à l'Environnement

Dans le cadre du projet SensorScope¹, nous avons effectué au cours de l'année 2007 six déploiements extérieurs, depuis le campus de l'EPFL jusqu'à des zones de haute montagne. Les deux plus importants ont été réalisés dans les Alpes, respectivement dans le col du Grand Saint Bernard (2 400 m) et au sommet de la montagne du Génépi (2 500 m).

Ce dernier déploiement a notamment été effectué avec la collaboration des autorités cantonales. Le site du Génépi a en effet été choisi car, lors de pluies intenses, il est la source de dangereuses coulées de boue inondant la route en contrebas. Les autorités cantonales en charge de la sécurité n'ayant à ce moment aucun modèle climatique du site, elles nous ont demandé d'y déployer un réseau afin de corréler les précipitations avec le vent et la température en fonction de la forme du terrain. Elle nous ont fourni toute l'aide technique pour cela, incluant un hélicoptère pour le transport du matériel et des personnes. Ce déploiement a duré plus de deux mois et a été un grand succès.

Une étude est actuellement menée à partir des données recueillies afin de mettre au point un modèle climatique du site, mais les résultats préliminaires ont déjà permis de mettre en évidence la présence d'un micro-climat, comme le montre la figure 4. Son existence s'explique par l'influence de l'épaisse couche de glace du permafrost, conservant la température à une valeur assez basse quelle que soit l'exposition au soleil. Ce micro-climat est actuellement considéré comme l'un des éléments clefs dans la prédiction des coulées de boue.

Ces résultats montrent l'importance de l'utilisation d'un ré-

¹<http://sensorscope.ch>

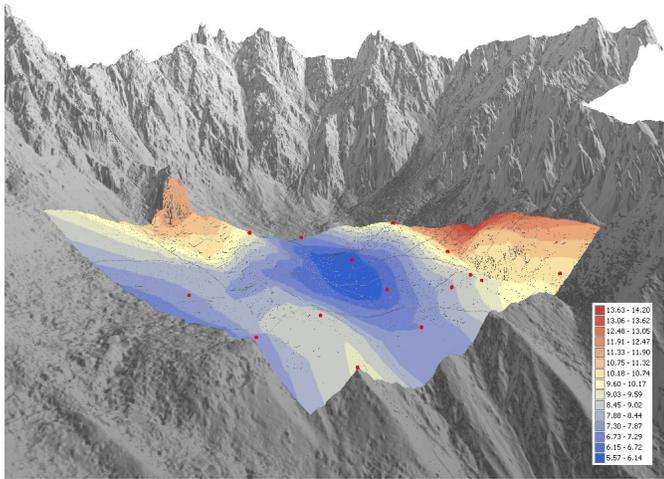


FIG. 4: Exemple d'interpolation spatiale des données de température de l'air du Génépi.

seau de capteurs, afin d'obtenir des données spatio-temporelles liées au phénomène observé. Dans le cas du Génépi, il n'aurait pas été possible de mettre en évidence l'existence d'un micro-climat avec de stations météo « classiques », car il n'aurait été possible, au mieux, que d'en installer une seule sur le site. Sans la dimension spatiale, la présence du micro-climat n'aurait pas été détectée. De plus, l'envoi des données s'est fait par une connection au réseau GSM, et le seul endroit sur le site avec une connectivité suffisante se trouvait au bord de la montagne, loin de la zone d'observation. Sans protocole de communication multi-sauts, il n'aurait pas non plus été possible d'atteindre cette zone, et donc de recueillir les données nécessaires.

6 Conclusion

Ce bref survol de questions liées au traitement du signal et à la communication dans les réseaux de capteurs a montré l'étroite imbrication des problèmes liés à la source des signaux et à la transmission des données. Il est bien connu que le principe de séparation du codage source et canal n'est pas vérifié dans le cas distribué [7], ce qui conduit à un nombre de questions ouvertes.

References

[1] T. Ajdler, L. Sbaiz, and M. Vetterli. The plenacoustic function and its sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54(10):3790–3804, October 2006.

[2] G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, and M. Vetterli. The hitchhiker's guide to successful wireless sensor network deployments. In *Proceedings of the ACM Interna-*

tional Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November 2008.

- [3] G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, M. Vetterli, O. Couach, and M. Parlange. Sensorscope: Out-of-the-box environmental monitoring. In *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, April 2008.
- [4] S. Basagni, S. Giordano, and I. Stojmenović. *Mobile Ad Hoc Networking*. IEEE Computer Society Press, 2004.
- [5] P. Buonadonna, D. Gay, J. M. Hellerstein, W. Hong, and S. Madden. TASK: Sensor network in a box. In *Proceedings of the European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, January 2005.
- [6] T. M. Cover and J. A. Thomas. *Elements of Information Theory*. Wiley, New-York, NY, 1991.
- [7] M. Gastpar, M. Vetterli, and P.L. Dragotti. Sensing reality and communicating bits: A dangerous liaison - Is digital communication sufficient for sensor networks? *IEEE Signal Processing Magazine*, 23(4):70–83, 2006.
- [8] Y. Kim, T. Schmid, Z. M. Charbiwala, J. Friedman, and M. B. Srivastava. NAWMS: Nonintrusive autonomous water monitoring system. In *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, November 2008.
- [9] Y. M. Lu and M. Vetterli. Spatial super-resolution of a diffusion field by temporal oversampling in sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pages 2249–2252, April 2009.
- [10] D. Nadeau, W. Brutsaert, M. Parlange, E. Bou-Zeid, G. Barrenetxea, O. Couach, M.-O. Boldi, J. Selker, and M. Vetterli. Estimation of urban sensible heat flux using a dense network of wireless observations. *Environmental Fluid Mechanics*, 2009. To appear.
- [11] O. Roy, T. Ajdler, R. L. Konsbruck, and M. Vetterli. Distributed compression in microphone array. In P. L. Dragotti and M. Gastpar, editors, *Distributed Source Coding: Theory, Algorithms and Applications*, chapter 7, pages 157–188. Elsevier, 2009.
- [12] G. Tolle, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, N. Turner, K. Tu, S. Burgess, T. Dawson, P. Buonadonna, D. Gay, and W. Hong. A macroscope in the redwoods. In *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, November 2005.