Un modèle de canal indoor par cluster pour systèmes MIMO polarisés

A Cluster-Based Channel Model for Indoor Polarized MIMO Systems

François Quitin* **, Claude Oestges**, François Horlin* et Philippe De Doncker*

* OPERA Department, Université Libre de Bruxelles, {fquitin, fhorlin, pdedonck}@ulb.ac.be ** Microwave Laboratory, Université catholique de Louvain, claude.oestges@uclouvain.be

Résumé

Un modèle de canal par cluster pour milieu indoor, qui inclut la caractérisation de la polarisation, est présenté dans ce travail. Une campagne de mesures a été faite dans un environnement indoor à 3.6 GHz, avec un émetteur bipolarisé et un récepteur tripolaire. Les rayons sont détectés avec l'algorithme SAGE, et une discrimination cross-polaire (XPD) par rayon est définie. Des clusters sont identifiés dans les domaines azimut – élévation – retard, avec un algorithme de clustering automatique. Les propriétés des clusters sont investiguées et des caractéristiques de polarisation par cluster sont extraites. Finalement, le modèle obtenu est simulé et des paramètres indépendants sont comparés avec les mesures pour validation.

Mots-clés : MIMO, polarisation, SAGE, cluster

Abstract

A cluster-based channel model for indoor environments that includes polarization characteristics is presented. A measurement campaign was performed at 3.6 GHz, using a polarized transmitter and receiver. The individual rays are detected with the well-known SAGE algorithm, and a cross-polar discrimination (XPD) per ray is defined. Clusters are identified with an automatic clustering algorithm in the azimuth – elevation – delay domain. Cluster properties are extracted from the measurements and polarization is investigated on a per-cluster basis. Finally, the obtained model is simulated and extraction-independent parameters are compared with the measurements for validation.

Keywords: MIMO, polarization, SAGE, cluster

Introduction

La diversité de polarisation a été proposée comme une solution pour réduire la taille des terminaux multi-antennes (MIMO). En utilisant des antennes, co-localisées, polarisées de façon perpendiculaire, il est possible de réduire la corrélation inter-antennes tout en gardant une taille d'équipement raisonnable [1-5].

Un certain nombre de modèles géométriques ont été développés récemment afin de décrire le comportement du canal de communications sans fil (COST273, 3GPP/3GPP2 etc.). La plupart de ces modèles décrivent le canal comme une somme de rayons, qui sont regroupés en *clusters* [6-8]. Dans ce cas, un cluster est défini comme un groupe de rayons avec des caractéristiques de propagation identiques.

Plusieurs articles ont investigués les propriétés de polarisation pour des modèles géométriques. Il est relativement facile d'introduire la polarisation dans ce type de modèle en considérant la polarisation de chaque rayon : en sommant tous les rayons à l'émetteur et au récepteur, les mécanismes globaux de polarisation sont implicitement recréés [9-11]. Dans [9], une campagne de mesures outdoor a été menée et les caractéristiques de polarisation des rayons sont investiguées. Dans [12], la polarisation est définie par cluster et les propriétés de ces clusters sont présentées.

Le but de cet article est d'examiner les propriétés de polarisation par cluster dans un environnement indoor. Les rayons sont détectés avec un algorithme à haute résolution et sont regroupés en clusters avec un algorithme de clustering automatique. Les caractéristiques des clusters sont alors extraites des mesures.

L'article est organisé comme suit : dans le paragraphe 1, le dispositif expérimental est présenté ainsi que le traitement des données et le clustering automatique. Les propriétés de ces clusters sont extraites et présentées dans le paragraphe 2. Finalement, paragraphe 3 compare le modèle simulé et les mesures pour validation du modèle.

1. Dispositif expérimental et extraction des données

1.1. Dispositif expérimental

La campagne de mesures a été menée dans un environnement de bureaux indoor, illustrée dans la Figure 1. Les pièces contiennent du mobilier et des équipements, les murs sont faits de béton et de panneaux, et il y a des fenêtres le long du laboratoire et des bureaux. Des mesures ont été prises à 16 emplacements différents dans le laboratoire et dans les bureaux. L'émetteur et le récepteur n'étaient jamais en ligne de vue directe.



Figure 1 : Plan de l'environnement de mesures.

A chaque emplacement, un réseau d'antennes virtuel cubique uniforme (RVCU) était réalisé en bougeant l'antenne réceptrice à l'aide d'un positionneur automatique. Tous les éléments du réseau virtuel étaient séparés d'une demi-longueur d'onde. L'antenne réceptrice était un tripôle, composé de trois antennes courtes polarisées perpendiculairement. L'émetteur était une antenne log-périodique avec une ouverture angulaire de 70°. Des panneaux anéchoiques étaient placés derrière l'émetteur afin de réduire les effets des lobes secondaires. A chaque position du RVCU, les réponses fréquentielles des trois antennes réceptrices étaient mesurées simultanément avec un analyseur vectoriel de réseau Rhode&Schwarz ZVA-24. Après avoir mesuré tout le RVCU pour une polarisation émettrice, la polarisation de l'émetteur était changée afin de créer virtuellement un émetteur bipolarisé. La fréquence centrale de travail était 3.6 GHz avec une bande de 200 MHz. Toutes les mesures étaient faites de nuit, donc l'environnement peut être considéré comme parfaitement statique entre deux mesures. Pour plus de détails à propos du dispositif expérimental, le lecteur est renvoyé vers [13].

1.2. Analyse des données et extraction des rayons

Les mesures ont été traitées afin de retrouver les directions d'arrivée des différents rayons au récepteur. Une version légèrement modifiée de l'algorithme SAGE (Space Alternating Generalized Expectation-Maximization) [14] a été utilisée afin de détecter les directions d'arrivée des rayons, ainsi que la puissance de chaque combinaison de polarisations émetteur – récepteur. La modification de l'algorithme SAGE permet de détecter les trois polarisations au récepteur. Le modèle de signal qui a été utilisé pour SAGE est le suivant : pour un réseau d'antennes tripolaires réceptrices et un émetteur bipolarisé, la contribution à la réponse fréquentielle du l-ème rayon au n-ème élément du réseau est donné par (1).

$$\begin{bmatrix} s_{H_{l}V}(f) & s_{H_{1}H}(f) \\ s_{H_{2}V}(f) & s_{H_{2}H}(f) \\ s_{VV}(f) & s_{VH}(f) \end{bmatrix}_{n,l} = \begin{bmatrix} f_{\theta H_{1}}(\theta_{l},\phi_{l}) & f_{\phi H_{1}}(\theta_{l},\phi_{l}) \\ f_{\theta H_{2}}(\theta_{l},\phi_{l}) & f_{\phi H_{2}}(\theta_{l},\phi_{l}) \\ f_{\theta V}(\theta_{l},\phi_{l}) & f_{\phi V}(\theta_{l},\phi_{l}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{\theta V} & \alpha_{\theta H} \\ \alpha_{\phi V} & \alpha_{\phi H} \end{bmatrix}_{l} e^{-j2\pi\tau_{l}f} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\mathbf{r_{n}}\cdot\mathbf{u_{r}}(\theta_{l},\phi_{l})}$$
(1)

Dans l'équation (1), les différents symboles représentent:

- s_{XY} : signal reçu sur l'antenne avec polarisation X pour un émetteur avec polarisation Y ,
- *V*,*H*,*H*₁,*H*₂ : respectivement : la polarisation émettrice/réceptrice verticale, la polarisation émettrice horizontale, première polarisation réceptrice horizontale, seconde polarisation réceptrice horizontale,
- $f_{\theta X}$: composante θ du diagramme de rayonnement de l'antenne avec polarisation réceptrice X ,
- $f_{\phi X}$: composante ϕ du diagramme de rayonnement de l'antenne avec polarisation réceptrice X ,
- τ_i, θ_i, ϕ_i : respectivement le retard, la co-élévation et l'azimut du rayon l,
- $\alpha_{\theta X}$: amplitude de la composante θ du rayon avec polarisation émettrice X ,
- $\alpha_{_{\phi X}}$: amplitude de la composante ϕ du rayon avec polarisation émettrice X ,
- λ : longueur d'onde,
- **r**_n : vecteur de position de l'élément *n* du réseau,
- $\mathbf{u}_{\mathbf{r}}(\theta_{l}, \phi_{l})$: vecteur unité pointant dans la direction (θ_{l}, ϕ_{l}) .

Comme les diagrammes de rayonnement des antennes émettrices ne sont pas compris dans (1), les termes $\alpha_{_{\theta X}}$ et $\alpha_{_{\phi X}}$ contiennent aussi les effets des antennes émettrices. Pour que l'algorithme SAGE

fournisse des résultats fiables, une calibration précise des antennes et du réseau sont nécessaires. Dans ce cas précis, le réseau est un réseau virtuel. Il n'y a donc pas de problème de couplage d'antennes et l'expression théorique de gain de réseau peut être utilisée. Les diagrammes de rayonnement des antennes réceptrices ont été mesurés en chambre anéchoique et sont donnés dans la Figure 2. Pour chaque emplacement de mesures, 100 rayons ont été détectés avec l'algorithme SAGE. Un exemple des rayons détectés est donné dans la Figure 3. Pour chaque rayon, le retard, la co-élévation, l'azimut et la matrice de polarisation α ont été détectés. Seuls les rayons qui avaient une puissance 10 dB plus élevée que le seuil de bruit ont été sélectionnés pour traitement ultérieur. Il est important de remarquer que lorsque l'on détecte des rayons avec des algorithmes à haute résolution, une partie de la puissance n'est pas prise en compte lors de la détection. Cette puissance « résiduelle » est souvent appelée la puissance diffuse [15], comme illustré dans la Figure 4. L'analyse qui suit se concentre sur les rayons cohérents et ne modélise pas cette composante diffuse. La caractérisation polarimétrique de la composante diffuse sera investiguée dans des travaux futurs.



Figure 2 : Composantes θ et ϕ des diagrammes de rayonnement des 3 antennes du tripôle récepteur.



Figure 3 : Rayons détectés avec SAGE dans les domaines azimut - co-élévation - retard.



Figure 4 : PDP mesurée, PDP reconstruite avec SAGE et puissance diffuse.

1.3. Identification des clusters

Le problème du clustering de rayons est un problème qui a reçu beaucoup d'attention récemment. Le clustering visuel a été utilisé pendant un certain temps, mais puisque l'inspection visuelle de données contient un taux de subjectivité, il est difficile d'interpréter et de comparer des résultats. Plusieurs techniques de clustering automatique ont été proposées, parmi lesquelles des algorithmes de clustering hiérarchiques [16], le clustering Gaussien [17], et l'algorithme *K-power means* [16,18]. Puisque la définition d'un cluster va dépendre en grande partie de l'algorithme de clustering utilisé, il est important de spécifier comment on définit un cluster. Selon notre opinion, et en concordance avec les résultats récent du COST 273 [6], un cluster est défini comme *un groupe de rayons avec des caractéristiques de propagation identiques*, ce qui justifie l'utilisation de l'algorithme *K-power means*. L'algorithme *K-power means* va, pour un nombre de clusters donnés, grouper les rayons de façon à minimiser la somme totale des distances carrées (pondérées par leur puissance) des rayons aux centroïdes de leur cluster. Ainsi, l'étalement global des clusters est minimisé. Des détails sur l'implémentation exacte du *K-power means* peuvent être trouvés dans [18]. Dans notre cas, les rayons sont groupés en cluster dans les domaines azimut - co-élévation – retard.

Le second problème des algorithmes de clustering automatique est la détermination du nombre exact de clusters. Comme mentionné plus haut, l'algorithme K-power means va minimiser l'étalement alobal des clusters, mais ne va donner aucune information sur le nombre exact de clusters. Il existe plusieurs indices pour déterminer le nombre optimal de clusters. L'indice le plus populaire est l'indice de Davies - Bouldin [19]. Cet indice est une mesure du rapport entre l'étalement intra-cluster global et la distance inter-cluster minimum. Le minimum de cet indice nous donne donc le nombre de clusters optimal. Cette définition correspond également bien à notre idée de ce que doit être un cluster. Malheureusement, à cause de la différence d'échelle entre l'étalement intra-cluster global et la distance inter-cluster minimum, cet indice a tendance à croître ou à décroître de façon monotone en fonction du nombre de clusters. Pour éviter cette tendance, une version normalisée de l'indice de Davies - Bouldin a été utilisée : l'indice de Kim - Parks [20]. Cet indice normalise l'étalement intracluster global et la distance inter-cluster minimum par rapport à leurs valeurs obtenues pour le nombre minimum et maximum de clusters. La Figure 5 montre un exemple de l'évolution de l'indice de Kim – Parks pour un nombre de clusters allant de 2 à 10. On voit que à 4 clusters, l'indice diminue de façon significative. Pour toutes les mesures, un minimum clair est observé pour déterminer le nombre optimal de clusters.



Figure 5 : Evolution de l'indice de Kim – Parks pour un nombre de clusters allant de 2 à 10.

Cet algorithme de clustering automatique a été appliqué pour tous les emplacements de mesures. La Figure 6 montre un exemple de clustering des rayons. Dans la plupart des cas, entre 4 et 6 clusters ont été identifiés. Des clusters avec une puissance inférieure à 1% de la puissance totale de l'emplacement de mesures ont été rejetés de l'ensemble de données.



Figure 6 : Clustering des rayons en 4 clusters.

2. Résultats expérimentaux

Les caractéristiques de polarisation de chaque rayon l sont entièrement définies par les trois valeurs de discrimination cross-polaires suivantes :

$$\operatorname{XPD}_{V,l} = \frac{\left|\alpha_{\theta V,l}\right|^2}{\left|\alpha_{\phi V,l}\right|^2}$$
(2)

$$\operatorname{XPD}_{H,l} = \frac{\left|\alpha_{\phi H,l}\right|^{2}}{\left|\alpha_{\theta H,l}\right|^{2}}$$
(3)

$$CPR_{I} = \frac{\left|\alpha_{\theta V,I}\right|^{2}}{\left|\alpha_{\phi H,I}\right|^{2}}$$
(4)

Après l'identification des différents clusters, le nombre de clusters par emplacement de mesures peut être caractérisé et chaque cluster k est décrit par un certain nombre de paramètres : les angles d'arrivée moyen des clusters ϕ_k et θ_k , le retard du cluster τ_k , l'étalement des retards du cluster $\sigma_{\tau,k}$, les étalements angulaires du cluster $\sigma_{\phi,k}$ et $\sigma_{\theta,k}$, et la puissance du cluster γ_k^2 . Les caractéristiques de polarisation du cluster sont décrites par la moyenne et l'écart-type des XPDs des différent rayons du cluster : $\mu(\text{XPD}_{V,k})$, $\sigma(\text{XPD}_{V,k})$, $\mu(\text{XPD}_{H,k})$, $\sigma(\text{XPD}_{H,k})$, $\mu(\text{CPR}_k)$ et $\sigma(\text{CPR}_k)$. La puissance du cluster est définie par $\gamma_k^2 = \sum_{i,j} |\alpha_{i,j}|^2$. L'azimut d'arrivée ϕ_k , le retard τ_k et la puissance γ_k^2 de chaque cluster sont normalisés par rapport à ϕ_0 , τ_0 et γ_0^2 du cluster le plus puissant. Ceci veut dire que pour chaque emplacement de mesures, le cluster le plus puissant \mathbf{C}_0 est

tel que $\phi_0 = 0^\circ$, $\tau_0 = 0$ ns et $\gamma_0^2 = 0$ dB.

Les différents paramètres des clusters ont été extraits des mesures, et les propriétés suivantes ont été observées :

• *Nombre de clusters* : la distribution du nombre de clusters par emplacement de mesures est décrite par un minimum de 3 plus une variable aléatoire avec une distribution de Poisson. La moyenne de la distribution de Poisson est $n_c = 1.69$.

- *Azimut d'arrivée et retard des clusters* : l'azimut ϕ_k et le retard τ_k de tous les clusters (exceptés les clusters les plus puissants) par rapport aux clusters les plus puissants sont décrits par 3 percentiles (10%, 50% et 90%) qui sont déterminés à partir des mesures.
- *Co-élévation d'arrivée des clusters* : la co-élévation θ_k des clusters est définie par 3 percentiles (10%, 50% et 90%) qui sont déterminés à partir des mesures.
- Etalement des retard et étalement angulaires des clusters : les étalements $\sigma_{\tau,k}$, $\sigma_{\phi,k}$ et $\sigma_{\theta,k}$ ont une distribution log-normale, avec des valeurs allant de 2 à 15 ns pour $\sigma_{\tau,k}$, de

5 à 20° pour $\sigma_{_{\phi,k}}$ et de 5 à 15° pour $\sigma_{_{\theta,k}}$.

- *Puissance des clusters* : comme on pouvait imaginer, la puissance des clusters diminue avec le retard de façon exponentielle. La puissance des clusters a une distribution lognormale autour de cette décroissance moyenne.
- *Ratios cross-polaires* : les différentes moyennes et écarts-types des XPDs ont une distribution log-normale. Remarquons que $\mu(\text{XPD}_{H,k})$ est plus faible que $\mu(\text{XPD}_{V,k})$. Ceci est dû au fait que les ratios cross-polaires sont définis en coordonnées sphériques au récepteur. Un émetteur vertical n'émet que des ondes polarisées selon θ , alors qu'un émetteur horizontal émettra des ondes qui ont une composante ϕ mais également une composante θ dans certaines directions, comme le montre la Figure 2. Le $\mu(\text{XPD}_{H,k})$ est donc déjà diminué du coté de l'émetteur.

Paramètre du cluster	moyenne	Ecart-type	10%	50%	90%
$\pmb{\phi}_k$ [°]	-	-	63.22	221.48	346.45
$\log(\sigma_{\scriptscriptstyle{\phi,k}})$ [log(ns)]	2.19	0.82	-	-	-
$ heta_k$ [°]	-	-	88.00	92.11	97.00
$\log(\sigma_{\scriptscriptstyle{ heta,k}})$ [log(ns)]	2.04	0.41	-	-	-
$ au_k$ [ns]	-	-	-5.55	9.73	44.06
$\sigma_{_{\tau,k}}$	1.40	0.59	-	-	-
γ_k^2	$-12 - (0.06 \times \tau \text{ [ns]})$	5.10	-	-	-
$\mu\left(\mathrm{XPD}_{_{V,k}} ight)$	6.98	4.88	-	-	-
$\sigma(\mathrm{XPD}_{_{V,k}})$	8.20	2.97	-	-	-
$\mu(\mathrm{XPD}_{H,k})$	0.77	4.09	-	-	-
$\sigmaig(\mathrm{XPD}_{{}_{H,k}}ig)$	5.93	2.46	-	-	-
$\mu(\operatorname{CPR}_k)$	-2.80	5.39	-	-	-
$\sigma({\rm CPR}_{\scriptscriptstyle k})$	8.89	2.48	-	-	-

Les valeurs numériques pour tous les paramètres sont indiques dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs mesurées pour les paramètres des clusters.

Les distributions des rayons à l'intérieur des clusters ont également été examinées, avec les conclusions suivantes :

 La dispersion angulaire des rayons dans les clusters ont une distribution de Laplace, comme l'illustre la Figure 7 (a-b),

- La dispersion des délais à l'intérieur des clusters est approximée par une distribution normale, comme l'illustre la Figure 7 (c),
- Les XPDs des rayons ont une distribution log-normale à l'intérieur des clusters, avec des paramètres de distribution donnés par $\mu(\text{XPD}_k)$ et $\sigma(\text{XPD}_k)$. La Figure 7 (d) illustre la distribution de XPD_{ν} à l'intérieur des clusters.



Figure 7 : Distribution des rayons à l'intérieur des clusters.

3. Validation du modèle

L'étape finale est la validation du modèle présenté en comparant des paramètres du modèle simulé avec des paramètres mesurés. Il est important de choisir comme paramètres de comparaison des paramètres qui n'ont pas été utilisé pour construire le modèle. L'étalement des retards, l'étalement des co-élévations et l'étalement des azimut total (et non par cluster) des mesures ont été comparés avec ceux du modèle simulé dans la Figure 8 (a-c). Ces métriques n'ont pas été utilisées pour construire le modèle, et peuvent donc être considérées comme relativement indépendantes. On peut voir que l'étalement des retards est sensiblement surestimé. Une meilleure description de la distribution des retards des rayons dans un cluster pourrait encore améliorer cette comparaison. L'étalement des co-élévations est légèrement surestimé, et l'étalement des azimuts simulés correspond bien à celui mesuré. Finalement, les caractéristiques de polarisation sont comparées. Il a été montré dans [21] que les variations locales du XPD inter-antennes ont une distribution en F doublement non-centrée. Ceci est également le cas dans notre modèle, comme le montre la Figure 8 (d). La concordance entre la distribution du XPD inter-antennes et le modèle théorique en F est parfaite.



Figure 8 : Comparaison entre les mesures et le modèle simulé pour (a) l'étalement des retards (b) l'étalement des co-élévations (c) l'étalement des azimut (d) Comparaison entre le modèle théorique en F et le XPD inter-antennes simulé.

4. Conclusion

Dans cet article, des résultats expérimentaux pour la caractérisation d'un modèle MIMO, polarisé et par cluster, ont été présentés. L'algorithme SAGE a été utilisé afin de détecter les rayons et l'algorithme *K-power means* a été appliqué afin de regrouper les rayons en clusters. Les paramètres des clusters ont été extraits, et une polarisation par rayon a été définie. Les résultats indiquent que les XPDs des rayons ont une distribution log-normale par cluster. Le modèle simulé est comparé avec les mesures par des métriques indépendantes, et une concordance satisfaisante est obtenue entre les métriques et le modèle simulé. Le comportement de la polarisation du modèle présenté et la distribution en F théorique. Le travail futur comportera l'amélioration du modèle présenté et la caractérisation polarimétrique de la composante diffuse.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action COST *2100 Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications*. Les auteurs voudraient remercier Vincent Bracke, Stéphane Van Roy et Lingfeng Liu pour leur aide lors des séances de mesures. François Quitin et Claude Oestges remercient également le *Fonds de la Recherche Scientifique – FNRS* belge pour son support financier.

Références bibliographiques

[1] R. Vaughan, "Polarization diversity in mobile communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 39, no. 3, pp. 177–186, 1990.

[2] B. Lindmark and M. Nilsson, "On the available diversity gain from different dual-polarized antennas," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 19, no. 2, pp. 287–294, 2001.

[3] P. Kyritsi, D. Cox, R. Valenzuela, and P. Wolniansky, "Effect of antenna polarization on the capacity of a multiple element systems in an indoor environment," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 20, no. 6, pp. 1227–1239, 2002.

[4] V. Erceg, P. Soma, D. Baum, and S. Catreux, "Multiple-input multiple-output fixed wireless radio channel measurements and modeling using dual-polarized antennas at 2.5 ghz," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, pp. 2288–2298, 2004.

[5] C. Oestges and B. Clerckx, "MIMO Wireless Communications: From Real-World Propagation to Space-Time Code Design." Oxford, UK: Academic Press (Elsevier), 2007.

[6] L. Correia, "Mobile Broadband Multimedia Networks: Techniques, Models and Tools for 4G." Academic Press, 2006.

[7] G. Calcev, D. Chizhik, B. G"oransson, S. Howard, H. Huang, A. Kogiantis, A. Molisch, A. Moustakas, D. Reed, and H. Xu, "A wideband spatial channel model for system-wide simulations," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, pp. 389–403, 2007.

[8] N. Czink and C. Oestges, "The COST 273 channel model: Three kinds of clusters," in Proc. ISSSTA 2008 - International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2008.

[9] M. Landmann, K. Sivasondhivat, J. Takada, I. Ida, and R. Thomä, "Polarization behavior of discrete multipath and diffuse scattering in rban environments at 4.5 GHz," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007.

[10] K. Kalliola, H. Laitinen, L. Vaskelainen, and P. Vainikainen, "Real-time 3D spatial-temporal dual-polarized measurements of wideband radio channel at mobile station," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 49, no.2, pp. 439–448, 2000.

[11] T. Kaiser, A. Bourdoux, H. Boche, J. Fonollosa, J. Andersen, and W. Utschick, "Smart Antennas - State of the art", Hindawi, New York, NY, USA, Ed. EURASIP Book Series on Signal Processing and Communications, 2005.

[12] L. Materum, J. Takada, I. Ida, and Y. Oishi, "Mobile Station Spatio-Temporal Multipath Clustering of an Estimated Wideband MIMO Double-Directional Channel of a Small Urban 4.5 GHz Macrocell," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on APMWS, 2009.

[13] F. Quitin, C. Oestges, F. Horlin, and P. D. Doncker, "Directional Measurements for Indoor Polarized MIMO Systems.," submitted to Transactions on Wireless Communications, 2009.

[14] X. Yin, B. Fleury, P. Jourdan, and A. Stucki, "Polarization estimation of individual propagation paths using the SAGE algorithm," in Proc. Of the PIMRC 2003 - Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003.

[15] N. Czink, A. Richter, E. Bonek, J.-P. Nuutinen, and J. Ylitalo, "Including Diffuse Multipath Parameters in MIMO Channel Models," Proc. VTC-F 2007 - IEEE Vehicular Technology Conf. Fall, 2007.

[16] J. Han and M. Kamber, "Data Mining, Concepts, and Techniques." Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[17] D.-C. Park, O.-H. Kwon, and M. Suk, "Clustering of Gaussian probability density functions using centroid neural network," IET Elec. Lett. , vol. 39, Issue 4, pp. 381–382, 2003.

[18] N. Czink, P. Cera, J. Salo, E. Bonek, J.-P. Nuutinen, and J. Ylitalo, "Improving clustering performance by using the multipath component distance," IET Elec. Lett., vol. 42, no. 1, pp. 44–45, 2006.

[19] U. Maulik and S. Bandyopadhyay, "Performance evaluation of some clustering algorithms and validity indices," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 24, no. 12, pp. 1650–1654, 2002.

[20] D.-J. Kim, Y.-W. Park, and D.-C. D.-J. Park, "A Novel Validity Index for Determination of the Optimal Number of Clusters," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol. E84-D, No. 2, pp. 281–285, 2001.

[21] F. Quitin, C. Oestges, F. Horlin, and P. D. Doncker, "Small-Scale Variations of Cross Polar Discrimination in Ricean Fading Channels," IET Elec. Lett., vol. 45, no. 4, pp. 213–214, 2009.