

Sondage de canal

Philippe Ciblat

Télécom ParisTech & Université Paris-Saclay

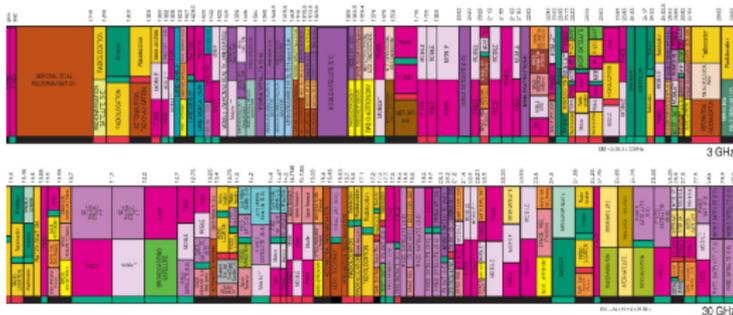
Plan

- Section 1 : Mono-capteur
- Section 2 : Multi-capteurs
 - ▷ avec centre de fusion
 - ▷ sans centre de fusion
- Section 3 : Coordination partielle entre capteurs

Section 1 : Mono-capteur

Applications

- Radio cognitive



- ▷ **trou spectral** (*white space*) : sous-bande allouée parfois vide
- ▷ **utilisateurs secondaires** : autorisés à utiliser un trou spectral

- Détection d'intrus ou d'un brouilleur
- Ecoute

Besoin croissant de sondage de canal (*spectrum sensing*)

Techniques principales

- Energie
- Recherche de certaines propriétés sur le signal (*pattern/feature*)
 - ▷ cyclostationnarité,
 - ▷ matrice de covariance (en environnement multi-antennes),
 - ▷ corrélation interne au signal (préfixe cyclique en OFDM),
 - ▷ etc.

Problématique du test d'hypothèse

Deux hypothèses :

- \mathcal{H}_0 (absence de signal)
- \mathcal{H}_1 (présence de signal)

Probabilité de détection : $P_D = \Pr(\mathcal{H}_1|\mathcal{H}_1)$

Probabilité de fausse alarme : $P_{FA} = \Pr(\mathcal{H}_1|\mathcal{H}_0)$

Objectif : minimiser P_{FA} tel que $P_D \geq P_D^{\text{target}}$

Test de Neyman-Pearson

Résultat

$$\Lambda(\mathbf{y}) = \log \left(\frac{p(\mathbf{y}|\mathcal{H}_1)}{p(\mathbf{y}|\mathcal{H}_0)} \right) \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\gtrless}} \mu,$$

avec

- Λ le *Log Likelihood Ratio* (LLR)
- \mathbf{y} le vecteur des observations
- μ le seuil/*threshold* permettant de satisfaire P_D^{target}

Application :

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 & : y(n) = w(n) \\ \mathcal{H}_1 & : y(n) = x(n) + w(n) \end{cases}, n = 1, \dots, N_s$$

avec

- $w(n)$ gaussien blanc de variance connue σ_w^2 ,
- $x(n)$ signal de l'utilisateur primaire inconnu donc gaussien blanc de variance connue σ_x^2 .

Test d'énergie

Test d'énergie

$$t(\mathbf{y}) = \frac{1}{\sigma_x^2 + \sigma_w^2} \sum_{n=1}^{N_s} |y(n)|^2 \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\gtrless}} \eta$$

avec $\mathbf{y} = [y(1), \dots, y(N_s)]^T$ et $(.)^T =$ la transposition.

Calcul du seuil

$t(\mathbf{y})$ suit une loi du χ_2 à $2N_s$ degrés de liberté, d'où,

$$\Pr(t(\mathbf{y}) > \eta | \mathcal{H}_1) = P_D^{\text{target}} \Leftrightarrow \Gamma_{\text{inc}}(\eta, N_s) = \Gamma_c(N_s) P_D^{\text{target}}$$

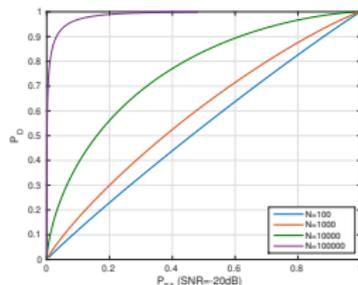
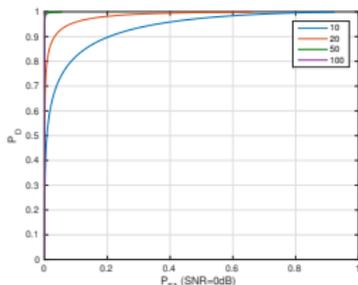
avec des fonctions Gamma complète et incomplète suivantes

$$\Gamma_c(N_s) = \int_0^\infty t^{N_s-1} e^{-t} dt \text{ et } \Gamma_{\text{inc}}(\eta, N_s) = \int_\eta^\infty t^{N_s-1} e^{-t} dt.$$

Performances

$$\begin{aligned}
 P_{FA} &= \frac{\Gamma_{\text{inc}}\left(\eta \frac{\sigma_x^2 + \sigma_w^2}{\sigma_w^2}, N_S\right)}{\Gamma_c(N_S)} \\
 &= \frac{\Gamma_{\text{inc}}\left(\Gamma_{\text{inc}}^{(-1)}(\Gamma_c(N_S) P_D^{\text{target}}, N_S) \frac{\sigma_x^2 + \sigma_w^2}{\sigma_w^2}, N_S\right)}{\Gamma_c(N_S)}
 \end{aligned}$$

avec $\Gamma_{\text{inc}}^{(-1)}$ la fonction réciproque de Γ_{inc} .



Courbe "Receiver Operating Characteristic" (ROC)

Variantes

- Il existe de nombreuses variantes dont l'approche séquentielle

Soit T_N un test avec N échantillons, alors

$$\left\{ \begin{array}{ll} T_N < \mu_1 & \text{alors } \mathcal{H}_0 \\ T_N > \mu_2 & \text{alors } \mathcal{H}_1 \\ \text{sinon} & \text{on continue} \end{array} \right.$$

Test de cyclostationnarité

- Soit $y(n)$ une suite cyclostationnaire de fréquence cyclique $\{\alpha_q\}_{q=0, \dots, Q-1}$

$$\mathbb{E}[y(n + \tau)\overline{y(n)}] = \sum_{q=0}^{Q-1} r^{(q)}(\tau) e^{2i\pi\alpha_q n}$$

Exemple : signal de télécommunications avec $\alpha_q \in \{0, 1/2\}$.

Soit T_N le test à N échantillons associé

$$T_N = \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{\tau} \left| \hat{r}_N^{(\alpha_q)}(\tau) \right|^2 = \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{\tau} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n + \tau)\overline{y(n)} e^{-2i\pi\alpha_q n} \right|^2$$

et donc

$$\begin{cases} T_N < \mu_1 & \text{alors } \mathcal{H}_0 \\ T_N > \mu_2 & \text{alors } \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

Test de matrice de covariance

- Soit $\mathbf{y}(n)$ des données multi-antennes (modèle SIMO)

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{h}s(n) + \mathbf{w}(n)$$

La matrice de covariance vaut

$$\mathbf{R} = \mathbb{E}[\mathbf{y}(n)\mathbf{y}(n)^H] = \sigma_s^2 \mathbf{h}\mathbf{h}^H + \sigma_w^2 \mathbf{Id}$$

- ▷ Une valeur propre vaut $\sigma_s^2 \|\mathbf{h}\|^2 + \sigma_w^2$
- ▷ Les autres valent σ_w^2

Soit T_N le test à N échantillons associé

$$T_N = \text{vap la plus grande} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{y}(n)\mathbf{y}(n)^H \right)$$

et donc

$$\begin{cases} T_N < \mu_1 & \text{alors } \mathcal{H}_0 \\ T_N > \mu_2 & \text{alors } \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

Test de GLRT

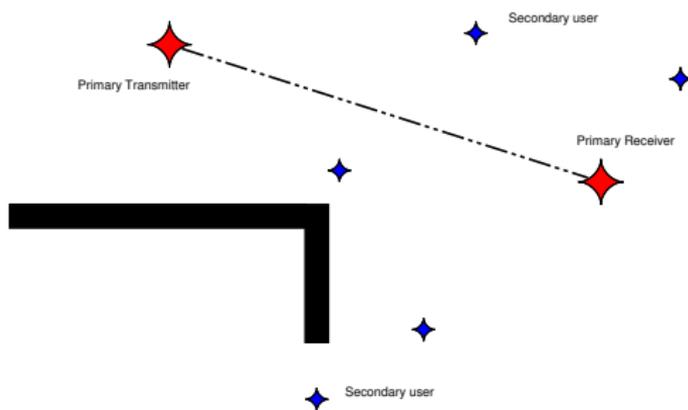
Dans le test d'énergie (notamment), les variances pas bien connues.

- Test robuste à l'incertitude des paramètres : *Generalized LRT* (GLRT)

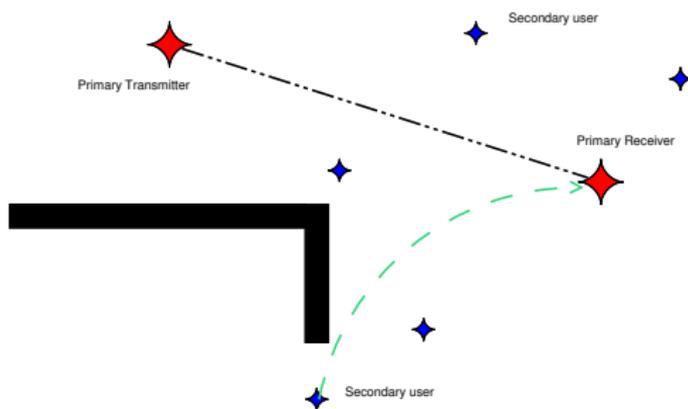
$$T = \frac{\max_{\theta} p(\mathbf{y}|\theta, \mathcal{H}_1)}{\max_{\theta} p(\mathbf{y}|\theta, \mathcal{H}_0)} \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\gtrless}} \mu,$$

- ▶ Parfois grande difficulté de calcul de ce test

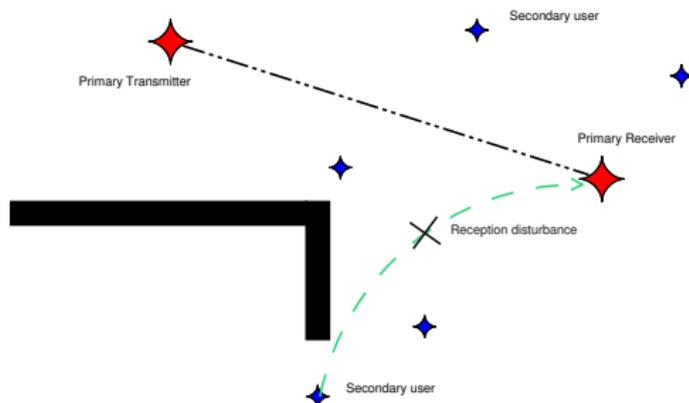
Problème du terminal caché



Problème du terminal caché



Problème du terminal caché

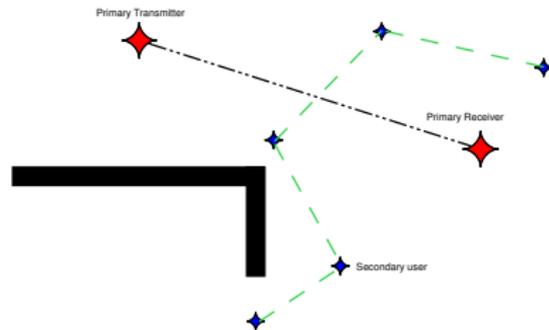
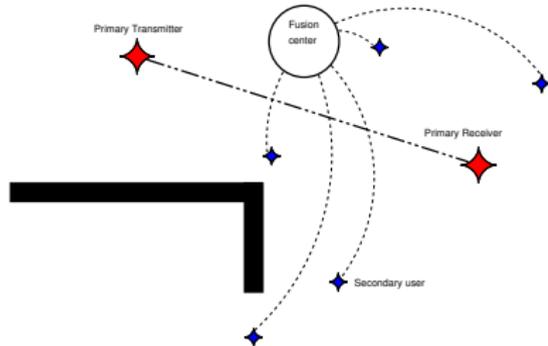


Problème : un utilisateur secondaire perturbe un utilisateur primaire

Solution : les utilisateurs secondaires doivent coopérer pour détecter l'utilisateur primaire

Section 2 : Multi-capteurs

Sondage de canal coopératif



Détection avec plus d'un capteur

- Si centre de fusion, détection coopérative ou distribuée
 - approche par décision dure (*hard*) : vote (AND, OR, majorité)
 - approche par décision souple (*soft*) : barycentre
- Si pas de centre de fusion, détection décentralisée ou **complètement**-distribuée
 - robuste à des attaques de nœuds
 - gestion simple du réseau
 - mais plus lent

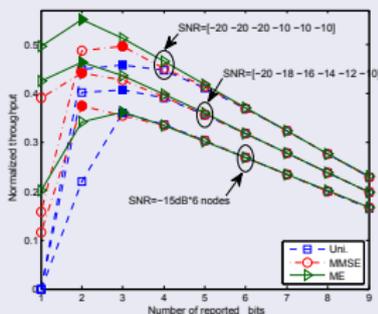
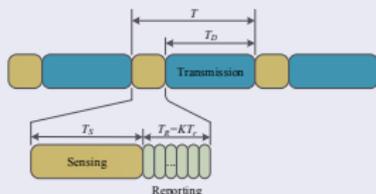
Approche coopérative (souple) centralisée (1)

$$T(\mathbf{y}) = \sum_{k=1}^K t_k(\mathbf{y}_k) \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \eta$$

Problème

Remonter de l'information "continue" entre les capteurs et le centre de fusion

$$\text{Throughput} = \frac{T - T_{\text{sensing}} - T_{\text{reporting}}}{T} \pi_0 \text{Capacité} (1 - P_{FA})$$



Approche coopérative (souple) centralisée (2)

Economiser de l'énergie de transfert d'information en limitant les échanges

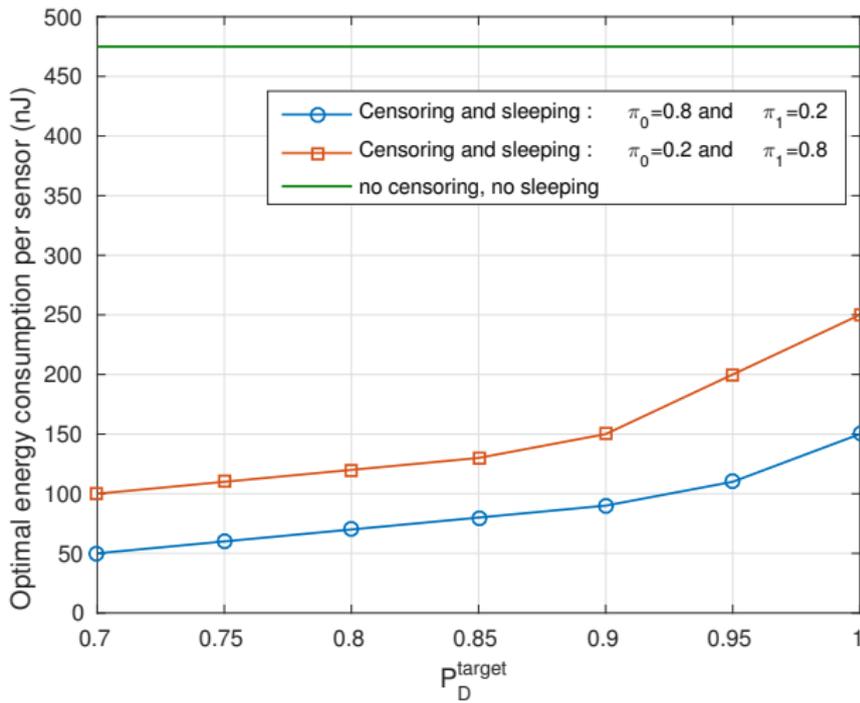
- ▷ en se censurant (test séquentiel)
- ▷ en dormant (pas de “sensing” car cela a un coût)

$$C = \sum_{k=1}^K (1 - p_s) (C_{s,k} + (1 - p_{c,k}) C_{t,k})$$

avec

- p_s probabilité de dormir
- $p_{c,k}$ probabilité de se censurer
- $C_{s,k}$ coût de “sensing” par test
- $C_{t,k}$ coût de “transmission” du test

Approche coopérative (souple) centralisée (2bis)



source : thèse S. Maleki

Approche décentralisée (1)

Sensing step of duration N_s

$$t_k \propto \sum_{n=1}^{N_s} |y_k(n)|^2$$

Gossiping step of duration N_g

$$T_\ell \approx \text{average}_k(t_k)$$

Question : Comment calculer la moyenne de t_k de manière distribuée

⇒ Algorithmes de consensus ou bavardage/*gossiping*

Un exemple d'algorithme (par paire)

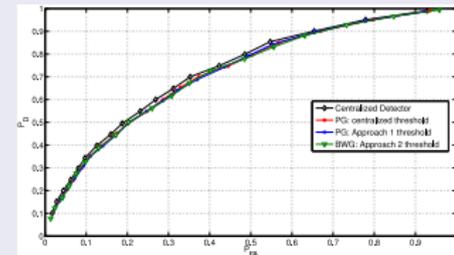
$\mathbf{t}(0) = [t_1, \dots, t_K]^T$: valeurs initiales

A l'instant m , un nœud k se réveille et appelle un de ses voisins k' . Alors

$$t_k(m+1) = (t_k(m) + t_{k'}(m))/2$$

$$t_{k'}(m+1) = (t_k(m) + t_{k'}(m))/2$$

$$\Rightarrow \mathbf{t}(m+1) = \mathbf{W}(m)\mathbf{t}(m) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} t_{\text{average}} \mathbf{1}$$



$$(N_s = N_g = 64, K = 10)$$

Approche décentralisée (2)

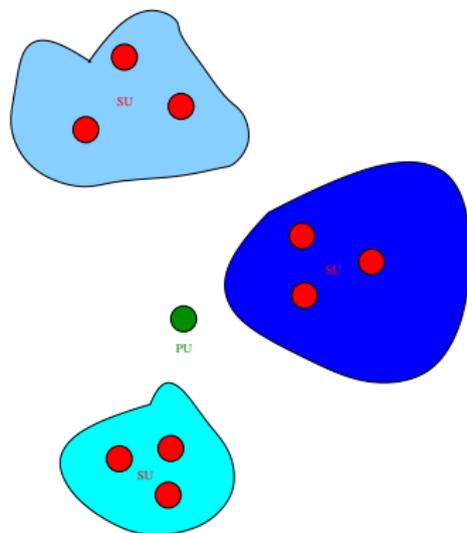
sans coopération

avec coopération

- Problème du terminal caché résolu

Section 3 : Coordination partielle entre capteurs

Formation de coalition d'utilisateurs secondaires



Comment doivent coopérer les utilisateurs secondaires

- ▶ si trop grande : problème de remontée d'information (car grande distance) et même de pertinence de l'information
- ▶ si trop petite, performances de détection faibles et terminal caché

Jeux de coalition

Problème centralisé :

$$\min_{\mathcal{P}} \frac{1}{N} \sum_{S \in \mathcal{P}} |S| P_{e,S} \quad \text{s.t.} \quad P_{FA,S} \leq P_{FA}^{\text{target}}$$

avec

- $P_{e,S}$ probabilité de mauvaise détection de la coalition S
- $P_{FA,S}$ probabilité de fausse alarme de la coalition S

Problème

- ▷ Combinatoire énorme
- ▷ Pas de point de centralisation !

Approche distribuée : jeux de coalition

Théorie des jeux de formation de coalition

- Chaque coalition (et donc chaque joueur j) a une valeur $v(S)$ ($= \phi_j(S)$ si $j \in S$)
- Comparaison de partitions : relation d'ordre $\mathcal{R} \triangleright \mathcal{S}$
 - Exemple 1 : $\mathcal{R} \triangleright \mathcal{S} \Leftrightarrow \sum_l v(R_l) > \sum_l v(S_l)$
 - Exemple 2 : $\mathcal{R} \triangleright \mathcal{S} \Leftrightarrow \phi_j(\mathcal{R}) > \phi_j(\mathcal{S})$ pour tout joueur j
- **Merge rule** : réunir l'ensemble de coalitions S_1, \dots, S_L ssi

$$\{\cup_{l=1}^L S_l\} \triangleright \{S_1, \dots, S_L\}$$

- **Split rule** : casser la coalition $\cup_{l=1}^L S_l$ ssi

$$\{S_1, \dots, S_L\} \triangleright \{\cup_{l=1}^L S_l\}$$

Algorithme = manière de dérouler ces opérations

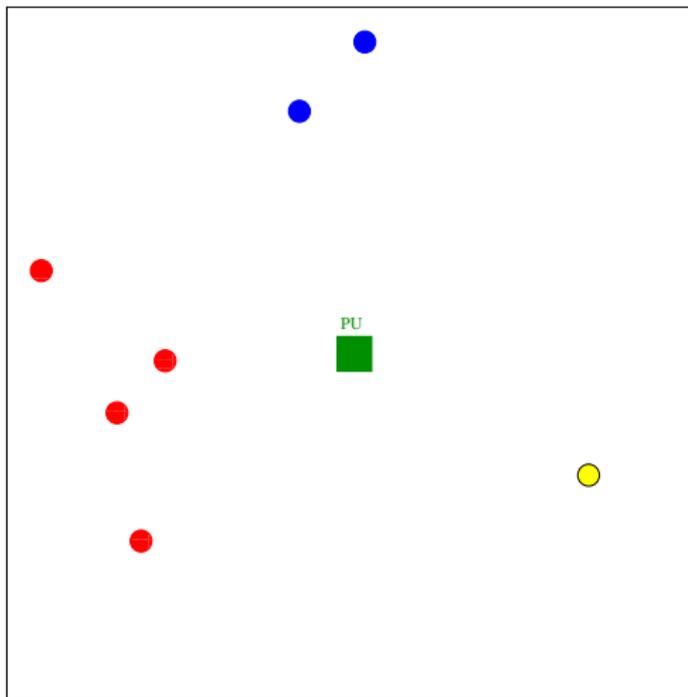
Coûts

$$v(S) = (1 - P_{e,S}) - C(P_{FA,S})$$

avec

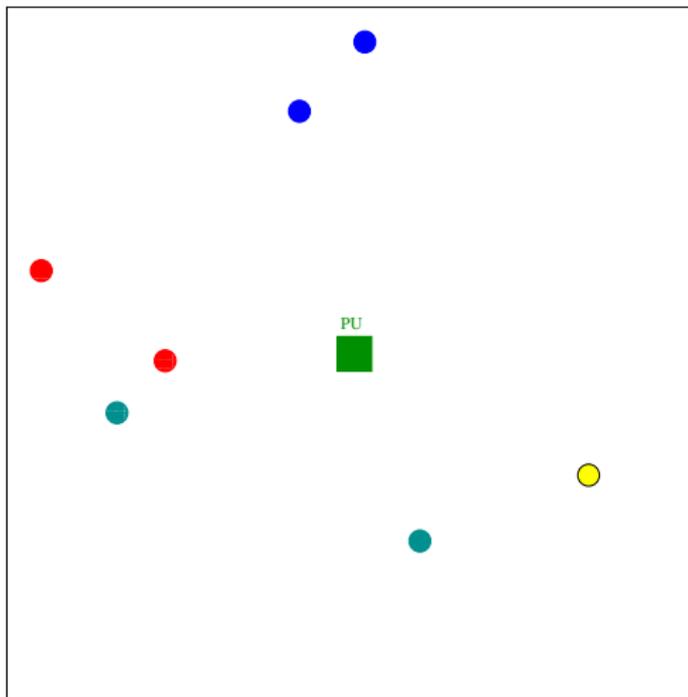
$$C(P_{FA,S}) = \begin{cases} -P_{FA}^{\text{target}^2} \log(1 - (P_{FA,S}/P_{FA}^{\text{target}})^2) & \text{si } P_{FA,S} \leq P_{FA}^{\text{target}} \\ +\infty & \text{si } P_{FA,S} > P_{FA}^{\text{target}} \end{cases}$$

Simulations



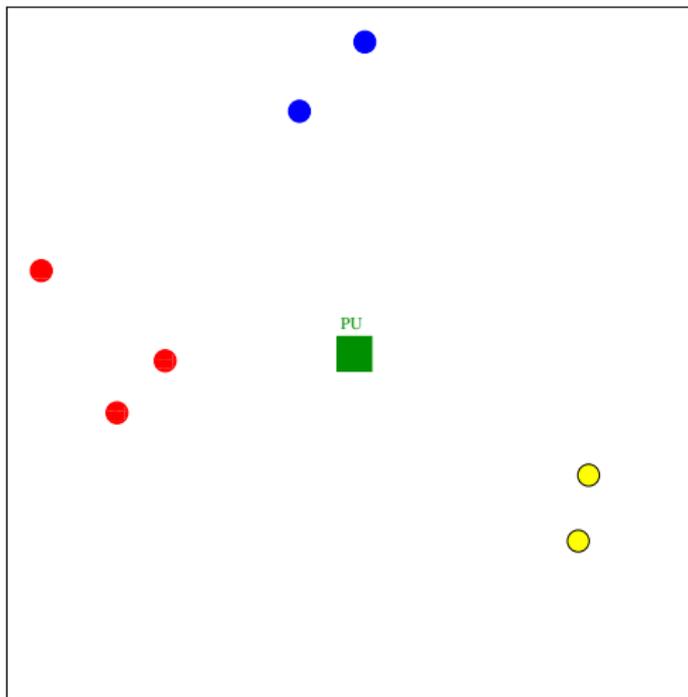
source : W. Saad

Simulations



source : W. Saad

Simulations



source : W. Saad

Bibliographie

- E. Axell, E. Larsson, V. Poor, “Spectrum sensing for cognitive radio“, IEEE Signal Processing Magazine, 2012.
- F. Iutzeler, P. Ciblat, “Fully distributed signal detection : application to cognitive radio“, Conf. Eusipco, 2013.
- S. Maleki, “Energy efficient spectrum sensing for cognitive radio“, Thèse de doctorat, TU Delft, 2013.
- N. Nguyen-Thanh, P. Ciblat, S. Maleki, V.-T. Nguyen, “How many bits to report in quantized cooperative spectrum sensing“, IEEE Wireless Communications Letters, 2015.
- W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, T. Başar, “Coalitional games for distributed collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks“, Conf. Infocom, 2009.