

Introduction à l'UWB par impulsions

Philippe Ciblat

École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France

Plan

1 Généralités

- Historique
- Cadre réglementaire
- Etalement de spectre
- Applications

2 Modulations

- Modulations linéaires
- Techniques d'accès multiple

3 Démodulateurs

- Canal de propagation
- Récepteur Rake
- Performances

Historique

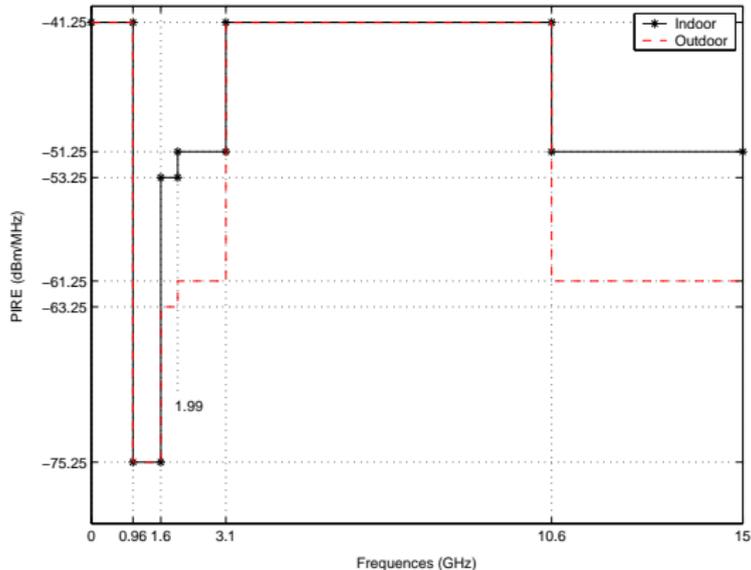
- Concept introduit dans les années 50 pour les militaires
 - Pierce & Hopper 1952
 - Impulsions très courtes ($< \text{ns}$), largeur de bande $> \text{GHz}$
 - Densité spectrale de puissance faible \Rightarrow LPI / LPD

- Etalement de spectre
 - Win & Scholtz 1993
 - Accès multiple à répartition par codes

- Terme UWB (*Ultra Wide Band*) pour la radio par impulsions
 - Withington & Fullerton 1992

Cadre réglementaire

- La FCC définit et autorise l'émission des signaux UWB en 2002
- Bande [3, 1 – 10, 6] GHz sans licence
- Contraintes sur les puissances d'émission
- Largeur de bande supérieure à 500 MHz



Etalement de spectre

Définition

Moyen de transmission pour lequel les données occupent une bande largement supérieure à la bande minimale requise.

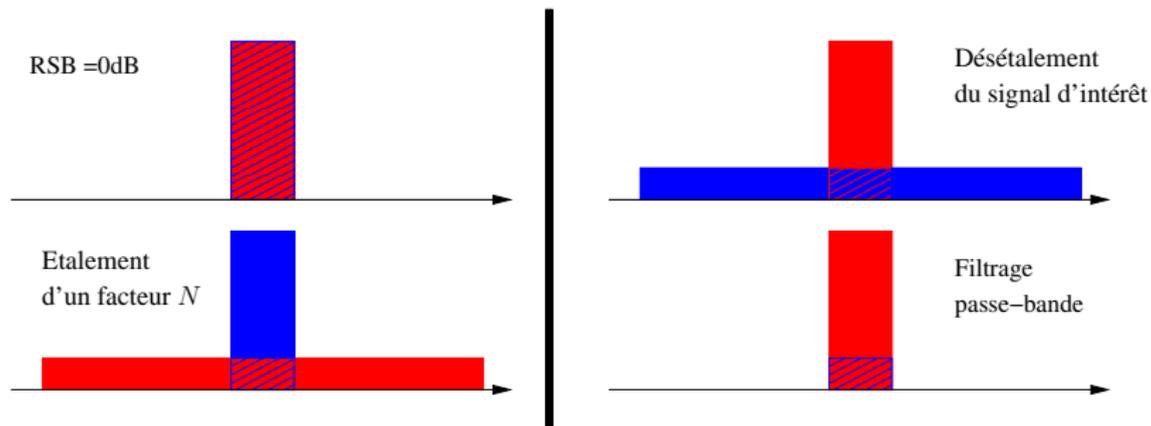
Avantages :

- Lutte contre les brouilleurs
- Camouflage l'information
 - ★ Interception délicate
 - ★ Décodage difficile si code $c(t)$ inconnu
- Bonne résistance aux brouilleurs du même type
 - ★ Faible intercorrélacion entre les codes $c_1(t)$ et $c_2(t)$
 - ★ Facile séparation d'un empilement de signaux étalés

Étalement de spectre : Exemple 1

- $s(t)$ le signal de données de bande $1/T_s$
- $b(t)$ un bruit à bande étroite de bande $1/T_s$
- $c(t)$ la fonction d'étalement de bande $1/T_c \gg 1/T_s$ ($c^2(t) = 1$)

Récepteur : Multiplier par $c(t)$ + Détecteur à seuil



Gain d'étalement (en Rapport Signal-à-Bruit) : $N = T_s/T_c$

Etalement de spectre : Exemple 2

- Utilisateur 1 : $s^{(1)} \rightarrow \mathbf{y}^{(1)} = [c_1^{(1)} s^{(1)}, c_2^{(1)} s^{(1)}]$
- Utilisateur 2 : $s^{(2)} \rightarrow \mathbf{y}^{(2)} = [c_1^{(2)} s^{(2)}, c_2^{(2)} s^{(2)}]$

⇒ Etalement de spectre d'un facteur 2

⇒ Séparation possible des utilisateurs (par projection)

- Soient $\mathbf{c}^{(1)} = [c_1^{(1)}, c_2^{(1)}]$ et $\mathbf{c}^{(2)} = [c_1^{(2)}, c_2^{(2)}]$ tels que

$$\langle \mathbf{c}^{(1)} | \mathbf{c}^{(2)} \rangle = 0$$

- Si la réception est synchrone, alors

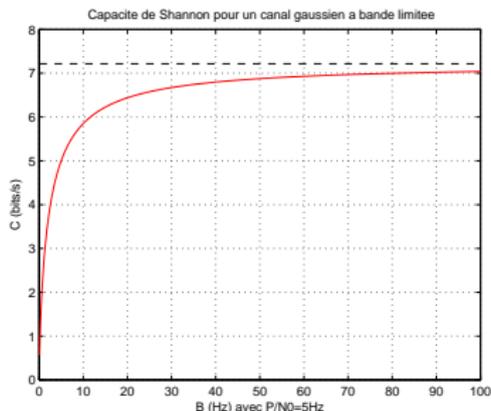
$$s^{(1)} = \langle \mathbf{c}^{(1)} | \mathbf{y}^{(1)} \rangle$$

Capacité de Shannon

La capacité pour un canal gaussien de largeur de bande B s'écrit

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{BN_0} \right)$$

avec P la puissance moyenne du signal et N_0 la variance du bruit



$$C_{\infty} = \lim_{B \rightarrow \infty} C(B) = \frac{P}{N_0} \log_2(e)$$

Applications

- Communication haut débit / faible portée
 - ★ IEEE 802.15.3a : DS-UWB / MB-OFDM
- Communication bas débit / "longue" portée
 - ★ IEEE 802.15.4a : DS-UWB / TH-UWB
- Réseau sans license
- Réseau « ad hoc »
- Communication militaire
 - ★ Origine de la technique par étalement de spectre
 - ★ Communications indétectables et non-brouillées
- Localisation
 - ★ Bonne résolution

Emission : Hypothèses

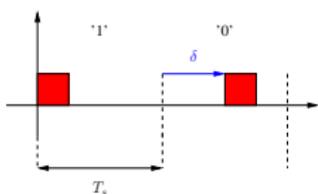
- Modulation
 - ★ PPM (*Pulse Position Modulation*)
 - ★ PAM (*Pulse Amplitude Modulation*)
 - ★ OOK (*On Off Keying*)

- Accès multiple :
 - ★ Saut temporel (*TH* pour *Time-Hopping*)
 - ★ Séquence directe (*DS* pour *Direct Sequence*)

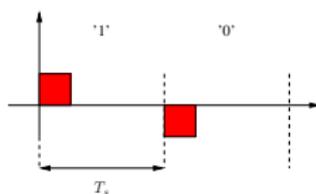
- Contexte multi-utilisateurs asynchrone

Description des modulations

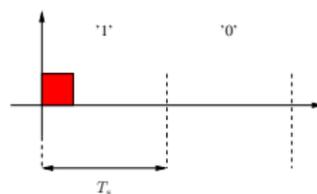
PPM



PAM



OOK



Non-cohérent

Cohérent

Non-cohérent

Non-orthogonal (fct. de δ)

Linéaire

Orthogonal (dégénéré)

$$P_{e\perp} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

Description de l'accès multiple

Principe

- faire cotoyer plusieurs utilisateurs dans le même tuyau
- en créant des signaux séparables entre eux \Rightarrow orthogonalité

- AMRT/TDMA : séparation temporelle
 - ★ système rigide
 - ★ synchronisation absolue requise

- AMRF/FDMA : séparation fréquentielle
 - ★ système rigide
 - ★ batterie de bancs de filtres

Problème

Liaison montante ou Canal multi-trajet (descendant ou montant)
 \Rightarrow Système « asynchrone »

Accès multiple à répartition par codes

AMRC/CDMA

Séparation par codes (\Rightarrow étalement de spectre (cf. pl. 6))

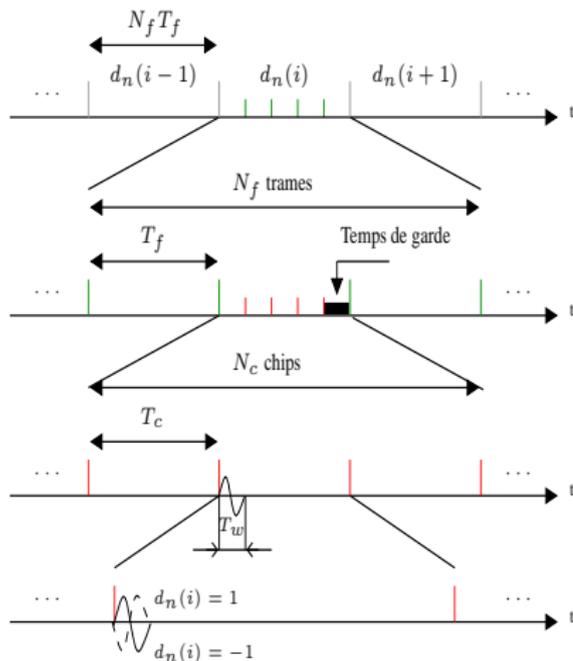
Avantages :

- ★ gestion simple (MAC : Multiple Access Layer)
- ★ diversité fréquentielle (signal sur large bande)
- ★ diversité temporelle (signal émis « redondant »)

Techniques :

- Saut de temps (*Time-Hopping*)
- Saut de fréquence (*Frequency-Hopping*)
- Séquence directe (*Direct Sequence*)

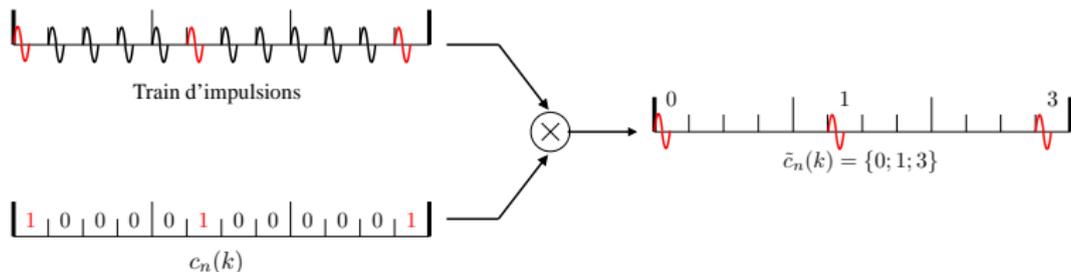
Signal émis : TH-UWB (PAM)



- $d_n(i)$ symboles émis
- N_f nb de trames de durée $T_f = N_c T_c$
- N_c nb de chips de durée T_c
- $w(t)$ impulsion de durée $T_w \ll T_c$
- $\{\tilde{c}_n(j)\}_j \in \{0, N_c - 1\}$ code de saut temporel de l'utilisateur n
- θ_n asynchronisme uniforme sur $[0, N_f T_f[$

$$s_n(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} d_n(i) \sum_{j=0}^{N_f-1} w(t - iN_f T_f - jT_f - \tilde{c}_n(j)T_c - \theta_n)$$

Code développé



Définition [Le Martret & Giannakis 2002]

$$c_n(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } k = \tilde{c}_n(j) + jN_c, 0 \leq j \leq N_f - 1 \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases}, k = 0, \dots, N_c N_f - 1$$

$$s_n(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} d_n(i) \sum_{j=0}^{N_c N_f - 1} c_n(j) w(t - iN_f T_f - jT_c - \theta_n)$$

↪ Linéarité en fonction des codes développés

Réception : Canal de propagation

Modèle de Molish 2003

$$h_n(t) = \sum_{\ell=1}^{N_p} A_n^\ell \cdot \delta(t - \tau_n^\ell)$$

avec

- A_n^ℓ et τ_n^ℓ l'amplitude et le retard du $\ell^{\text{ème}}$ trajet
- A_n^ℓ et τ_n^ℓ admettent un modèle stochastique

Signal reçu

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N_u} \sum_{\ell=1}^{N_p} A_n^\ell s_n(t - \tau_n^\ell) + n(t)$$

avec

- N_u le nombre d'utilisateurs
- $n(t)$ un bruit blanc gaussien

Filtre adapté

Soit une transmission par modulation linéaire

$$r(t) = \sum_i d(i)f(t - nT_s) + n(t)$$

avec

- $d(i)$ une constellation quelconque
- $f(t)$ un filtre (émission + canal)
- $n(t)$ un bruit blanc gaussien

Récepteur optimal

- 1 Filtre adapté $f^*(-t)$ + échantillonneur à la cadence $1/T_s$

$$z(n) = f^*(-t) \otimes r(t)|_{t=nT_s} = \int r(t)f^*(t - nT_s)dt = \langle r(t)|f(t - nT_s) \rangle$$

- 2 Organe de décision

Récepteur Rake : principe

$$r(t) = \sum_i d_1(i) f(t - iN_f T_f) + \text{contribution multi-utilisateurs} + \text{bruit}$$

avec

$$f(t) = \sum_{\ell=1}^{N_p} A_1^\ell \sum_{j=0}^{N_c N_f - 1} c_1(j) w(t - jT_c - \theta_1 - \tau_1^\ell)$$

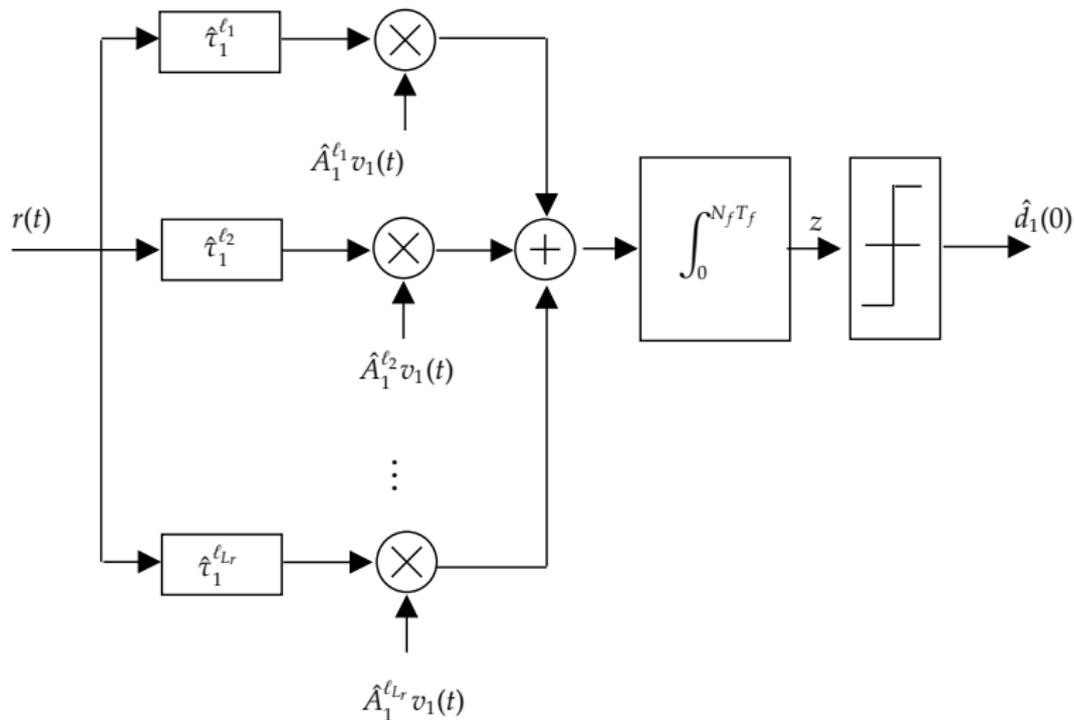
Variable de décision ($i = 0$)

$$z(0) = \sum_{\ell \in \mathcal{L}} A_1^\ell \int_0^{N_f T_f} r(t + \tau_1^\ell) \times \underbrace{\sum_{j=0}^{N_c N_f - 1} c_1(j) w(t - jT_c)}_{\text{signal de référence } v_1(t)} dt + \eta,$$

Récepteur Rake : commentaires

- Récepteur mono-utilisateur
 - ★ système synchrone : utilisateurs orthogonaux \Rightarrow optimalité
 - ★ système asynchrone : sous-optimalité \Rightarrow interférence multi-utilisateurs (*MUI*)
 - ★ détection multi-utilisateur (*MUD*) : techniquement difficile
- Complexité
 - ★ Rake complet, partiel ou sélectif
 - ★ $L_r \leq N_p$ corrélateurs (« doigts »)
 - ★ Connaissance de $\{A_1^\ell, \tau_1^\ell\}$ nécessaire
- Combinaison
 - ★ MRC (*Maximum Ratio Combining*)
 - ★ EGC (*Equal Gain Combining*)

Récepteur Rake : schéma



Récepteur Rake : performances

$$z(0) = z_1 + z_2 + z_3 + \eta$$

avec

- z_1 : signal utile (partie du signal en phase à chaque voie)
- z_2 : interférence entre symboles, entre trames et entre impulsion (ISI/IFI/IPI) \rightsquigarrow **nuisible**
- z_3 : interférence multi-utilisateur \rightsquigarrow **nuisible**

- 1 **Étude de la MUI** : calcul analytique de la variance

$$V_{\text{MUI}} = \mathbb{E}_{A,d,\tau,\theta}[(z_3)^2]$$

- 2 **Étude de l'ISI/IFI/IPI** : calcul analytique de la variance

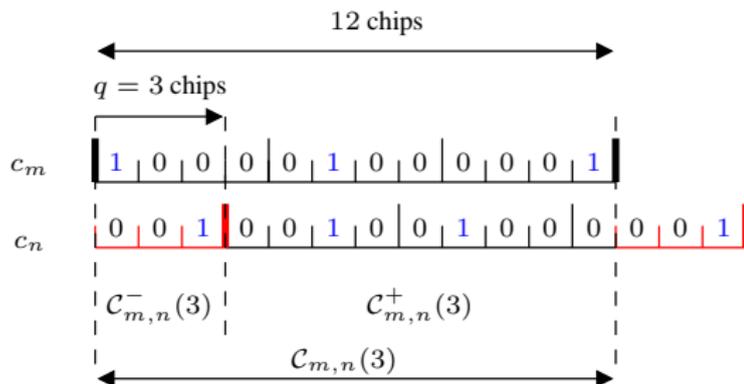
$$V_{\text{ISI}} = \mathbb{E}_{A,d,\tau}[(z_2)^2]$$

Variance de la MUI (I)

$$V_{\text{MUI}} \propto \sum_{n=2}^{N_u} \phi_n \cdot \underbrace{\sum_{q=0}^{N_c N_f - 1} [c_{1,n}^{+2}(q) + c_{1,n}^{-2}(q)]}_{\kappa_{1,n}}$$

avec

- ϕ_n une constante dépendant des statistiques du canal
- les termes d'intercorrélations suivants (p. ex., $N_f = 3$, $N_c = 4$)



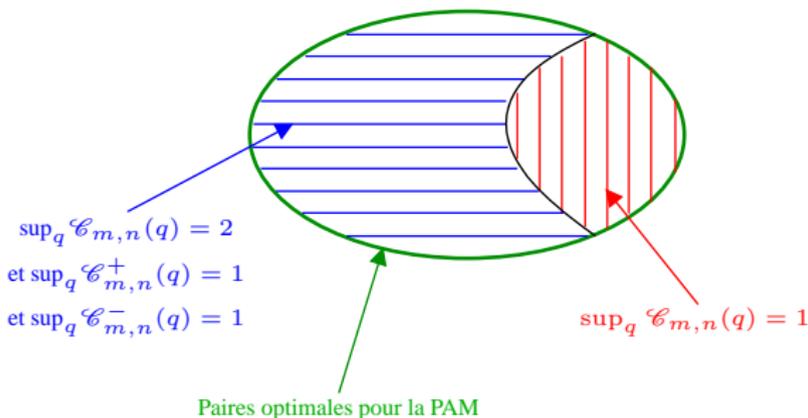
Variance de la MUI (II)

Codes optimaux

Les paires de codes $\{(c_1, c_n), n = 2, \dots, N_u\}$ minimisent la variance de la MUI si et seulement si

$$\kappa_{1,n} = \sum_{q=0}^{N_c N_f - 1} [C_{1,n}^{+2}(q) + C_{1,n}^{-2}(q)] = N_f^2$$

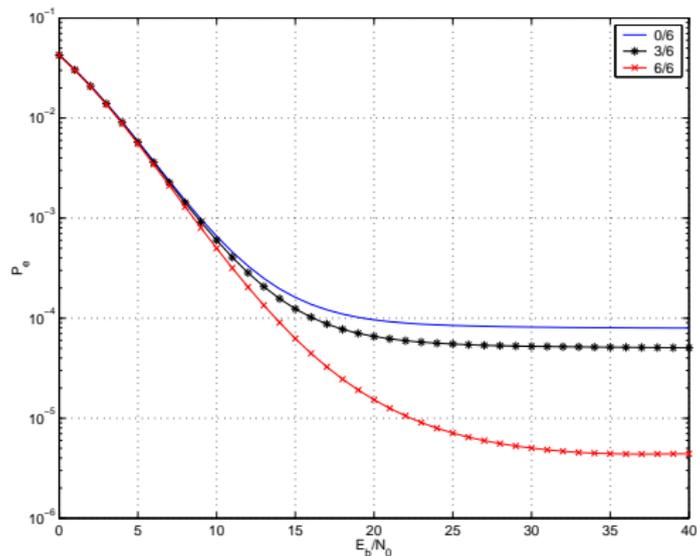
Les codes développés optimaux sont des codes optiques vérifiant :



Performances

Protocole

2-PAM, $N_U = 7$, $L_r = 3$, canal t.q. ISI faible



Probabilité d'erreur moyenne en fonction de E_b/N_0

Variance de l'ISI

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ISI}} &\propto \sum_{Q=0}^{+\infty} \sum_{q=0}^{N_c N_f - 1} [\mathcal{C}^{+2}(q) + \mathcal{C}^{-2}(q)] \cdot \Phi_{L_r}(Q, q) \\
 &+ [\mathcal{C}^{+2}(q+1) + \mathcal{C}^{-2}(q+1)] \cdot \Psi_{L_r}(Q, q) \\
 &+ 2[(\delta_{Q,0} + 1)\mathcal{C}^{+2}(q) + \mathcal{C}^{-2}(q)] \cdot \tilde{\Phi}_{L_r}(Q, q) \\
 &+ 2[(\delta_{Q,0} + 1)\mathcal{C}^{+2}(q+1) + \mathcal{C}^{-2}(q+1)] \cdot \tilde{\Psi}_{L_r}(Q, q)
 \end{aligned}$$

Questions

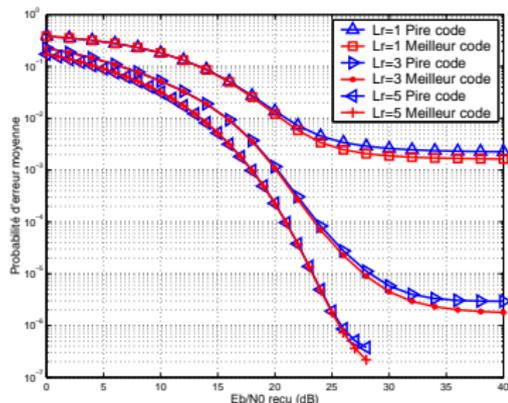
Comment dimensionner correctement le système en fonction

- du nombre de doigts du récepteur rake
- du temps de garde

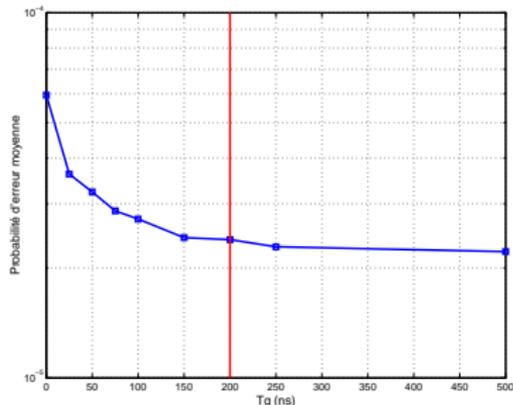
Performances

Protocole

- $N_c = 10$, $N_f = 3$, $T_s = 150$ ns, Etalement temporel = 200 ns



P_e en fonction de \bar{E}_b/N_0



P_e en fonction de T_g (ns)

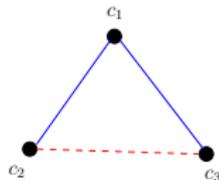
Commentaires

- L_r faible suffit
- $T_g = \gamma$ est suffisant mais $\lim_{T_g \rightarrow \infty} V_{ISI} \neq 0$

Conclusion

Thèmes non évoqués :

- Egalisation
- Synchronisation
- Estimation du canal
- Choix de la technique d'accès multiple
- Choix des codes d'accès multiple notamment en réseau



Bibliographie

- P. WITHINGTON, L. W. FULLERTON : « An impulse radio communications system », ICUWB, 1992.
- R. A. SCHOLTZ : « Multiple access with time-hopping impulse radio », MILCOM, 1993.
- M. Z. WIN, R. A. SCHOLTZ : « Impulse radio : how it works », IEEE Communications Letters, 1998.
- M.Z. WIN, R. A. SCHOLTZ : « Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications », IEEE Trans. on Communications, 2000.
- J. FOERSTER : « The Effects of Multipath Interference on the Performance of UWB Systems in an Indoor Wireless Channel », VTC, 2001.
- G. DURISI, S. BENEDETTO : « Performance evaluation of TH-PPM UWB systems in the presence of multiuser interference », IEEE Communications Letters, 2003.
- A.-L. DELEUZE, P. CIBLAT, C. LE MARTRET : « Inter-Symbol/Inter-Frame Interference in Time-Hopping Ultra Wideband Impulse Radio System », ICU, 2005.
- C. LE MARTRET, A.-L. DELEUZE, P. CIBLAT : « Optimal time-hopping code design for multi-user interference mitigation in ultra-wide bandwidth impulse radio », IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006.