

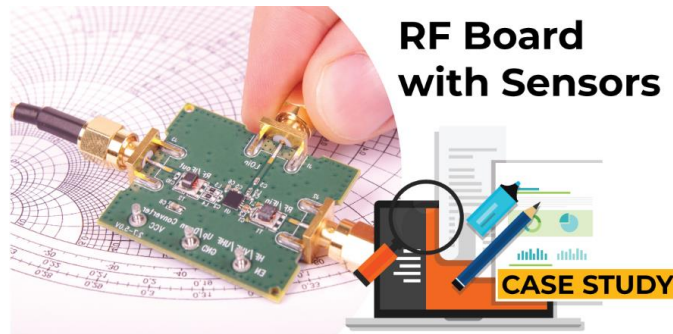
Cours : Capteurs et Mesures en Télécommunications

Conférence 8 : Capteurs Radiofréquence (RF)

Durée : 1 heure 30 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Introduction et Objectifs Pédagogiques



Les capteurs Radiofréquence (RF) constituent l'épine dorsale des télécommunications sans fil. Contrairement aux capteurs acoustiques ou image qui interagissent avec les sens humains, les capteurs RF fonctionnent dans le spectre électromagnétique pour permettre la communication sans fil, les systèmes radar et d'innombrables autres applications. Comprendre ces capteurs est crucial pour concevoir, déployer et entretenir les réseaux de télécommunications modernes.

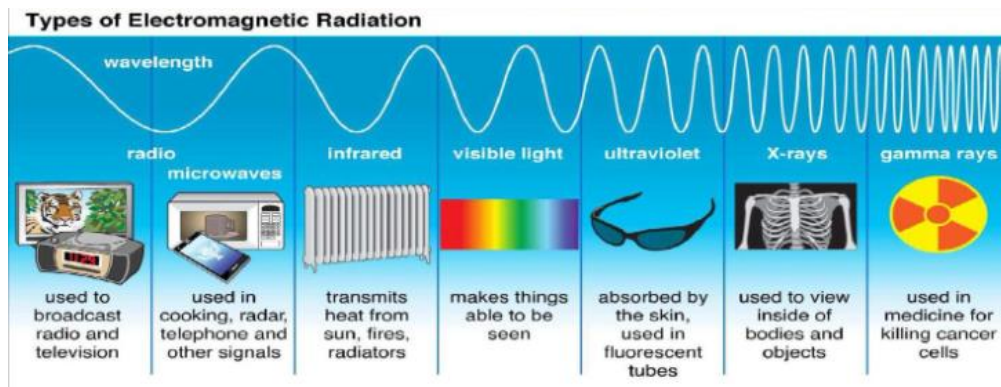
Objectifs Pédagogiques d'Aujourd'hui :

À la fin de cette session, vous serez capable de :

- Expliquer les principes fondamentaux de la détection RF et de la propagation des ondes électromagnétiques.
 - Classifier les différents types de capteurs RF et leurs principes de fonctionnement.
 - Analyser les spécifications clés des capteurs RF et leur impact sur les performances du système.
 - Sélectionner les capteurs RF appropriés pour des applications de télécommunication spécifiques.
 - Comprendre les techniques de mesure et les défis dans la détection RF.
-

2. Principes Fondamentaux de la Détection RF

a) Fondamentaux des Ondes Électromagnétiques



- **Spectre de Fréquences** : 3 kHz à 300 GHz
 - **HF/VHF/UHF** : 3 MHz - 3 GHz (Radio, TV, Mobile)
 - **Hyperfréquences (Micro-ondes)** : 3 GHz - 30 GHz (Radar, Satellite, 5G)
 - **Ondes Millimétriques** : 30 GHz - 300 GHz (5G, Radar Automobile)
- **Paramètres des Ondes** :
 - **Longueur d'onde (λ)** : $\lambda = c/f$ (c = vitesse de la lumière, f = fréquence)
 - **Densité de Puissance** : Watts par mètre carré (W/m^2)
 - **Polarisation** : Orientation du champ électrique (verticale, horizontale, circulaire)

b) Concepts RF Clés pour la Détection

- **Adaptation d'Impédance** : Transfert de puissance maximal quand $Z_{load} = Z_{source}^*$
- **Rapport d'Onde Stationnaire (ROS/VSWR)** : Mesure de la qualité de l'adaptation d'impédance
- **Paramètres S** : Paramètres de diffusion décrivant le comportement d'un réseau
- **Facteur de Bruit** : Dégradation du rapport signal sur bruit à travers un système

Approfondissement Technique : Affaiblissement de Propagation en Espace Libre

text

$$FSPL \text{ (dB)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(4\pi/c)$$

Où : d = distance (mètres), f = fréquence (Hz), c = vitesse de la lumière

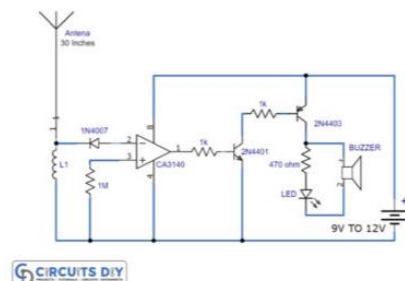
$$\text{Simplifié : } FSPL \text{ (dB)} = 32.44 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{MHz})$$

Cela explique pourquoi les fréquences plus élevées subissent plus d'atténuation sur la distance.

3. Types de Capteurs RF et Leurs Principes de Fonctionnement

a) Mesureurs de Champ et Capteurs de Puissance RF

Field Strength Meter



Type de Capteur

Principe de Fonctionnement

Caractéristiques Clés

Applications

Détecteur à Diode

Tension RF →
Tension CC via
redressement par
diode

Grande plage
dynamique,
réponse rapide

Mesure
générale de
l'intensité du
champ

Thermistance/Thermocouple

Puissance RF →
Chaleur →
Changement de
résistance/tension

Réponse RMS
vraie, précis

Étalonnage
des
wattmètres

Diode Tunnel

Effet d'effet
tunnel mécanique
quantique

Haute
sensibilité,
faible bruit

Détection de
signaux
faibles

Capteurs de Puissance MEMS

Éléments
thermiques
micro-usinés

Petite taille,
solutions
intégrées

Appareils
mobiles, IoT

b) Capteurs à Base d'Antenne



Type d'Antenne	Principe de Fonctionnement	Caractéristiques Clés	Applications
Dipôle	Élément résonant équilibré	Omnidirectionnelle, conception simple	Mesures de l'intensité du champ
Log-Périodique	Multiple éléments mis à l'échelle	Large bande passante, directionnelle	Surveillance du spectre
Corne	Évasement de guide d'onde	Gain élevé, diagramme précis	Mesures en hyperfréquences
Antenne Patch	Résonateur à microruban	Profil bas, intégrable	Appareils mobiles, GPS
Réseau Phasé	Multiple éléments avec contrôle de phase	Balayage électronique de faisceau	5G, systèmes radar

c) Capteurs RF Spécialisés



Type de Capteur	Principe de Fonctionnement	Caractéristiques Clés	Applications
Analyseurs de Spectre	Réception hétérodyne avec OLT balayant	Analyse dans le domaine fréquentiel	Analyse de signal, chasse aux interférences
Analyseurs de Réseaux Vectoriels	Mesure l'amplitude et la phase des paramètres S	Caractérisation complète du réseau	Test d'antennes, conception de filtres
Analyseurs d'Impédance	Mesure l'impédance complexe en fonction de la fréquence	Caractérisation des composants	Conception de circuits d'adaptation
Réfectomètres dans le Domaine Temporel	Analyse de la réflexion d'impulsions	Mesure de la distance jusqu'au défaut	Test de câbles

Approfondissement Technique : Fonctionnement des Analyseurs de Spectre

text

Architecture Superhétérodyne :

1. Signal d'Entrée → Atténuateur RF (protège l'entrée)
2. → Mélangeur (mélange avec l'Oscillateur Local)
3. → Filtre FI (sélectionne la plage de fréquence)
4. → Détecteur (convertit en signal vidéo)

5. → Affichage (montre l'amplitude en fonction de la fréquence)

Paramètres Clés : RBW (Bande Passante de Résolution), VBW (Bande Passante Vidéo), Span, Niveau de Référence

4. Spécifications Clés des Capteurs RF et Leur Importance

a) Spécifications dans le Domaine Fréquentiel

- **Plage de Fréquences** : Bande passante de fonctionnement du capteur
- **Précision en Fréquence** : Capacité du capteur à mesurer la fréquence absolue
- **Bande Passante de Résolution (RBW)** : Capacité à distinguer les signaux proches
- **Bruit de Phase** : Stabilité fréquentielle à court terme des oscillateurs

b) Spécifications dans le Domaine d'Amplitude

- **Plage Dynamique** : Rapport entre les signaux détectables max et min (typiquement 100-160 dB)
- **Sensibilité** : Niveau de signal minimal détectable (typiquement -110 à -170 dBm)
- **Précision** : Écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle (typiquement ± 0.5 à ± 3 dB)
- **Linéarité** : Fidélité de la sortie par rapport à l'entrée sur la plage dynamique

c) Spécifications dans le Domaine Temporel

- **Temps de Balayage** : Temps pour scanner la plage de fréquence
- **Temps de Montée/Descente** : Temps de réponse aux changements de signal
- **Capacités de Déclenchement** : Capacité à capturer des événements transitoires

d) Spécifications Système

- **Facteur de Bruit** : Dégradation du SNR (typiquement 3-15 dB pour les récepteurs)
 - **TOS d'Entrée** : Qualité de l'adaptation au port d'entrée (idéal : 1.0:1, bon : <1.5:1)
 - **Consommation Électrique** : Critique pour les capteurs portables/à batterie
 - **Interface** : USB, Ethernet, GPIB pour le contrôle à distance et l'acquisition de données
-

5. Applications en Télécommunications et Exigences

a) Applications pour Réseaux Cellulaires

Application	Exigences des Capteurs RF	Équipement Typique Utilisé
Installation de Station de Base	TOS < 1.5:1, précision de puissance ± 0.5 dB	AVR, wattmètre, analyseur d'antenne
Optimisation de Réseau	Portable, mesures en temps réel, synchronisation GPS	Scanners, analyseurs de spectre
Chasse aux Interférences	Haute sensibilité, antennes directionnelles	Analyseur de spectre portable, antenne Yagi
Test de Couverture (Drive Test)	Multi-bande, monté sur véhicule, automatisé	Systèmes scanner, GPS, enregistreurs de données

b) Test de Systèmes Sans Fil

Application	Exigences des Capteurs RF	Équipement Typique Utilisé
Performance Wi-Fi	Couverture 2.4/5/6 GHz, puissance de canal	Analyseur de spectre, outils d'étude de site
Test Bluetooth	Analyse de modulation, mesures TEB	Analyseur de signal vectoriel
Certification d'Appareils IoT	Faible puissance, test d'autonomie	Chambres blindées, wattmètres de précision
Systèmes Radar	Ondes millimétriques, mesures d'impulsions	AVR haute fréquence, analyseurs de signal

c) Applications Émergentes 5G et 6G

- **Gestion de Faisceaux mmWave** : Caractérisation de réseaux phasés
- **MIMO Massif** : Mesures simultanées multi-port

- **Test OTA (Over-the-Air)** : Chambres de champ proche et champ lointain
 - **Découpage de Réseau (Network Slicing)** : Vérification de la QoS au niveau RF
-

6. Techniques et Procédures de Mesure

a) Mesures RF de Base

- **Mesure de Puissance :**
 - Puissance Moyenne : Signaux continus
 - Puissance Crête : Signaux pulsés et modulés
 - CCDF (Fonction de Distribution Cumulative Complémentaire) : Distribution statistique de la puissance
- **Mesure de Fréquence :**
 - Méthode par Compteur : Comptage direct de fréquence
 - Méthode Hétérodyne : Conversion et comparaison de fréquence
 - Méthode FFT : Traitement numérique du signal
- **Mesure d'Impédance :**
 - Méthode du Pont : Comparaison d'impédance équilibrée
 - Coefficient de Réflexion : Mesure S_{11} basée sur AVR
 - Domaine Temporel : TDR pour le profilage d'impédance de câble

b) Techniques de Mesure Avancées

- **Analyse de Modulation** : EVM (Module d'Erreur Vectorielle), ACP (Puissance de Canal Adjacent)
- **Mesure du Facteur de Bruit** : Méthode du facteur Y, méthode de source froide
- **Mesure du Bruit de Phase** : Spectre direct, méthodes à détecteur de phase
- **Mesures d'Impulsions** : Profil d'impulsion, temps de montée/descente, fréquence de répétition d'impulsions

c) Étalonnage et Traçabilité

- **Étalonnage de Puissance** : Traçable aux standards nationaux (NIST, NPL)
 - **Étalonnage de Fréquence** : Oscillateurs asservis au Rubidium/GPS
 - **Étalonnage AVR** : SOLT (Short-Open-Load-Thru), TRL (Thru-Reflect-Line)
 - **Analyse d'Incertitude** : Prise en compte de toutes les sources d'erreur dans la chaîne de mesure
-

7. Traitement du Signal en Détection RF

a) Chaîne de Traitement Analogique

text

Antenne → Filtre → LNA → Mélangeur → Filtre FI → Détecteur → CAN

b) Techniques de Traitement Numérique du Signal (DSP)

- **Conversion Numérique Descendante (DDC)** : Translation de fréquence et filtrage
- **Transformée de Fourier Rapide (FFT)** : Analyse spectrale
- **Filtrage Numérique** : Filtres RIF/RII pour le conditionnement du signal
- **Démodulation** : Récupération des modulations AM, FM, numériques

c) Approche Moderne Radio Logicielle (SDR)

text

Antenne → CAN Large Bande → Traitement Numérique (FPGA/Logiciel)

- **Avantages** : Flexibilité, fonctionnement multi-standard, évolutivité logicielle
 - **Applications** : Radio cognitive, surveillance du spectre, recherche
-

8. Tendances Actuelles et Développements Futurs

a) Miniaturisation et Intégration

- **Capteurs RF CMOS** : Systèmes complets sur puce
- **Technologie MEMS** : Filtres accordables, antennes reconfigurables
- **System-in-Package (SiP)** : Puce multiple dans un seul boîtier

b) Détection RF Améliorée par l'IA

- **Radio Cognitive** : Détection du spectre et allocation dynamique
- **Détection d'Anomalies** : Algorithmes de ML pour l'identification des interférences
- **Prédiction de Faisceau** : IA pour la formation de faisceaux optimale en 5G

c) Capteurs RF Quantiques

- **Capteurs à Atomes de Rydberg** : Mesure de champ basée sur cellule à vapeur atomique
- **Amplificateurs à Limite Quantique** : Approche des limites de bruit fondamentales
- **Radar Quantique** : Capacités de détection de cibles améliorées

d) Détection TéraHertz

- **Applications 6G** : Plage de fréquence 100 GHz - 3 THz
 - **Caractérisation des Matériaux** : Contrôle non destructif
 - **Inspection de Sécurité** : Détection d'objets dissimulés
-

9. Étude de Cas : Déploiement et Optimisation d'une Station de Base 5G

Scénario de Déploiement : Déploiement de macrocellule urbaine pour 5G NR (New Radio)

Exigences des Capteurs RF :

1. Couverture Fréquentielle : 600 MHz (n71) à 39 GHz (n260)
2. Bande Passante : Jusqu'à 400 MHz instantanée
3. Plage Dynamique : > 120 dB pour le rapport de fuite en canal adjacent (ACLR)
4. Bruit de Phase : < -110 dBc/Hz à 100 kHz de décalage pour 28 GHz
5. Capacité MIMO : Mesure simultanée 4x4 ou 8x8

Procédure de Mesure :

1. **Étude de Site Pré-déploiement** :
 - Analyse du spectre pour les interférences
 - Vérification de la modélisation de la propagation
 - Évaluation du site candidat
2. **Installation et Mise en Service** :
 - Vérification du TOS de l'antenne (<1.5:1)
 - Mesures de puissance et de qualité de l'émetteur
 - Validation du diagramme de rayonnement
3. **Optimisation et Maintenance** :
 - Test de couverture (Drive Test) pour vérification
 - Surveillance des KPI (Indicateurs Clés de Performance)
 - Détection et atténuation des interférences

Outils et Équipements :

- **Portable de Terrain** : Analyseur de spectre, analyseur d'antenne, wattmètre
- **Grade Laboratoire** : Analyseur de signal vectoriel, AVR multi-port, chambre OTA
- **Logiciel** : Outils de planification, post-traitement, séquences de test automatisées

10. Résumé et Perspectives

Points Clés à Retenir :

- Les capteurs RF sont essentiels pour les télécommunications sans fil, couvrant les mesures de fréquence, de puissance et de qualité du signal.
- Comprendre des spécifications comme la plage dynamique, la sensibilité et la précision est crucial pour sélectionner les capteurs appropriés.
- La détection RF moderne est de plus en plus numérique et logicielle, permettant une plus grande flexibilité.
- Les technologies émergentes comme la détection améliorée par l'IA et les capteurs RF quantiques façonneront l'avenir des mesures sans fil.

Prochaine Étape :

Dans notre prochaine conférence, nous explorerons les **Capteurs à Fibre Optique et les Techniques de Mesure**, qui constituent l'épine dorsale de l'infrastructure moderne des télécommunications filaires.

11. Questions pour Auto-Étude

1. Comparez les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'un analyseur de spectre par rapport à une radio logicielle (SDR) pour surveiller les interférences d'un réseau cellulaire en environnement urbain.
 2. Un opérateur télécom doit déployer une station de base 5G à 28 GHz. Calculez l'affaiblissement de propagation en espace libre à 100 mètres et 1 kilomètre. Quelles implications cela a-t-il sur le placement des capteurs RF et les exigences de sensibilité ?
 3. Concevez une procédure de test pour caractériser une nouvelle antenne cellulaire multi-bandes pour un smartphone. Quelles mesures RF effectueriez-vous et de quel équipement auriez-vous besoin ?
 4. Expliquez comment le facteur de bruit d'un récepteur RF affecte sa capacité à détecter les signaux faibles dans un environnement spectral encombré. Donnez un exemple numérique montrant l'impact sur la sensibilité du système.
 5. Proposez un système de capteur RF amélioré par l'IA pour le partage dynamique du spectre dans un environnement urbain congestionné. Quelles fonctionnalités inclurait-il et comment l'apprentissage automatique améliorerait-il les approches traditionnelles de surveillance du spectre ?
-

« Dans le monde invisible des radiofréquences, les capteurs RF servent de nos yeux et de nos oreilles, transformant les ondes électromagnétiques en une intelligence actionnable qui alimente notre monde connecté. »