

RECOMMANDATION UIT-R SM.1754-0*

Techniques de mesure des émissions à bande ultralarge

(2006)

Domaine de compétence

Compte tenu de l'existence de deux méthodes générales de mesure (dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel), on trouvera dans la présente Recommandation les techniques appropriées de mesure des émissions à bande ultralarge (UWB, *ultralarge-wideband*).

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les émissions intentionnelles depuis des dispositifs utilisant des techniques à bande ultralarge (UWB, *ultralarge-wideband*) peuvent s'étendre sur une très large gamme de fréquences;
- b) que l'on développe actuellement des dispositifs utilisant des techniques UWB dont les émissions occupent de nombreuses attributions à des services de radiocommunication;
- c) que les techniques UWB peuvent être intégrées à de nombreuses applications hertziennes telles que les communications à courte portée en intérieur ou en extérieur, l'imagerie radar, l'imagerie médicale, le suivi des biens, la surveillance, les radars de véhicule ou le transport intelligent;
- d) qu'une émission UWB peut être une séquence d'impulsions de courte durée;
- e) que les émissions UWB peuvent ressembler à du bruit, ce qui risque d'en rendre la mesure encore plus difficile;
- f) que la mesure d'une émission UWB est différente de celle d'un signal émis par un système de radiocommunication classique;
- g) que la mesure et l'évaluation correctes de la densité spectrale de puissance sont des questions essentielles à considérer pour tout rayonnement,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R SM.1755 contient des termes et définitions associés aux techniques et aux dispositifs UWB;
- b) qu'il existe deux méthodes générales de mesure (dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel) ayant chacune leurs avantages et leurs inconvénients,

recommande

1 de prendre en considération les techniques décrites dans l'Annexe 1 de la présente Recommandation pour mesurer les émissions UWB.

* La Commission d'études 1 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2018 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

Annexe 1

Techniques de mesure des émissions à bande ultralarge

1 Introduction

Il existe plusieurs techniques permettant de générer des signaux UWB à l'aide de différents schémas de modulation et de randomisation de données. La présente Annexe décrit les techniques de mesure (dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel) de la densité spectrale de puissance des émissions UWB pour tous les types de signaux UWB.

Dans la présente Annexe, le terme «émission» est utilisé dans un sens général dans le contexte de la mesure et non dans le sens défini dans l'Article 1 du Règlement des radiocommunications.

1.1 Comparaison entre les méthodes de mesure dans le domaine fréquentiel et les méthodes de mesure dans le domaine temporel

Il existe deux méthodes générales permettant de mesurer les caractéristiques spectrales associées aux émissions UWB et elles ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients.

La première méthode consiste d'abord à mesurer les caractéristiques temporelles (domaine temporel) d'un signal UWB. Un traitement numérique du signal (par exemple la transformée de Fourier rapide (TFR)) est ensuite appliqué pour transformer les paramètres temporels mesurés en leur représentation dans le domaine fréquentiel. Une fois le signal UWB correctement représenté dans ce domaine, la conformité aux prescriptions en matière de largeur de bande, aux limites d'émission et à d'autres règles applicables peut être déterminée. On parle souvent, pour la méthode de mesure temporelle, de mesure «dans toute la largeur de bande», car elle permet théoriquement de caractériser le signal UWB dans la totalité de la largeur de bande. La seconde méthode consiste à mesurer directement les caractéristiques spectrales du signal UWB dans le domaine fréquentiel. Cette approche, appelée «mesure spectrale à balayage», est souvent désignée par l'expression «mesure à largeur de bande limitée» car la largeur de bande de la plupart des équipements de test existants est très nettement inférieure à la largeur de bande totale d'un signal UWB.

Pour la méthode de mesure temporelle, il faut un oscilloscope numérique à mémoire moderne contenant un numériseur à haut débit dont la largeur de bande en temps réel est supérieure à la fréquence UWB supérieure, avec un traitement TFR pour établir le spectre du signal. Un logiciel de post-traitement peut proposer de nombreuses mesures radioélectriques normalisées telles que celle de la puissance moyenne efficace (r.m.s.).

La méthode de mesure spectrale à balayage suppose l'utilisation d'un analyseur de spectre, d'un analyseur de signal vectoriel ou d'un instrument de mesure analogue pour détecter les caractéristiques d'un signal UWB dans le domaine fréquentiel. La sensibilité des équipements de test classiques risque d'être insuffisante pour permettre de détecter des signaux UWB de très faibles niveaux dans des bandes de fréquences spécifiques.

1.2 Signaux de test normaux

On applique ces signaux à l'équipement sous test (EUT, *equipment under test*) à l'aide d'un connecteur de modulation externe. Les données de test à utiliser en entrée de l'EUT pour mesurer les émissions UWB devraient être analogues aux données transmises en fonctionnement réel.

S'il s'agit de mesures concernant des dispositifs de communication UWB, des séquences de données réelles devraient être utilisées pour la partie fixe des structures de trame et des signaux de commande. Toutefois, des séquences de données pseudo-aléatoires peuvent être utilisées pour la

partie message du signal car on peut supposer que celle-ci est un flux aléatoire correspondant à une séquence aléatoire.

1.3 Caractéristiques générales d'un système de mesure des émissions UWB

Pour mesurer les émissions électromagnétiques rayonnées, il faut disposer d'un système de mesure comprenant une antenne de réception et un récepteur de mesure (par exemple un analyseur de spectre). Si les signaux sont de faible puissance, l'insertion d'un amplificateur à faible bruit (AFB) doté d'une largeur de bande suffisante peut être nécessaire entre l'antenne et le récepteur de mesure, ce qui permettra d'améliorer la sensibilité effective du système de mesure.

1.4 Environnement de mesure

Il est souhaitable, compte tenu des faibles niveaux d'émission des dispositifs UWB, d'effectuer les mesures dans une chambre anéchoïde ou semi-anéchoïde. Les mesures effectuées dans une chambre anéchoïde devraient être corrélées à des mesures effectuées dans une chambre semi-anéchoïde. Pour ce faire, on compense généralement l'effet de l'écran au sol dans un environnement semi-anéchoïde ou dans un site d'essai en espace libre (OATS, *open area test site*). La mesure de la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) d'un dispositif devrait être indépendante du type d'environnement de test utilisé.

Aux fréquences supérieures à 1 000 MHz, il est inutile d'appliquer un facteur de correction de propagation car la réflexion au sol n'est pas significative.

1.4.1 Procédure de mesure des rayonnements au-dessous de 1 000 MHz¹

Lorsque la réflexion due à l'écran au sol ne peut pas être éliminée, on peut appliquer la procédure suivante:

- L'examen des émissions UWB se fait par petits segments, de telle sorte que les réflexions, les gains et les affaiblissements ne varient pas de manière importante à l'intérieur d'un segment.
- Dans le cas d'un dispositif conçu pour être installé sur une table, poser l'unité sur une surface non conductrice à une hauteur de 0,8 m.
- Chercher par des moyens classiques de rotation et d'élévation du dispositif à rendre maximal le niveau de réception de l'émission.
- Effectuer une mesure.
- Prendre en compte les gains et les affaiblissements, ainsi que la contribution de l'écran au sol.
- Effectuer un nombre suffisant de mesures, tant en azimut qu'en élévation, pour s'assurer que la valeur d'émission maximale a été enregistrée.
- Répéter la procédure pour chacune des fréquences à considérer.

1.4.2 Procédure de mesure des rayonnements au-dessus de 1 000 MHz

Au-dessus de 1 000 MHz, dans une chambre semi-anéchoïde, on recouvre le sol entre le dispositif et l'antenne de réception d'un revêtement absorbant les ondes radioélectriques pour supprimer les effets de l'écran au sol. Un balayage par l'antenne de réception sur 1 à 4 m devrait indiquer une valeur maximale près de la hauteur à laquelle le dispositif a été positionné, si le sol a été

¹ Pour une administration, la limite de détection des mesures est de 960 MHz si l'on veut assurer la cohérence avec son gabarit d'émission pour lequel la limite d'émission doit coïncider avec la limite d'une bande attribuée dans le monde entier au service de radionavigation aéronautique.

correctement traité. On notera qu'en cas de mesure en espace libre, il n'est pas obligatoire de maintenir le dispositif à une hauteur de 0,8 m. Il peut être placé à une hauteur quelconque qui limite au maximum les réflexions dues au sol. L'utilisation d'une antenne de réception fortement directive contribue à réduire l'effet de la réflexion sur l'écran au sol. La mesure est enregistrée sans corriger l'effet de la réflexion due au sol.

Dans le cas d'un dispositif conçu pour être installé sur une table, la procédure suivante peut être appliquée:

- Placer l'unité sur une surface non conductrice à une hauteur appropriée.
- Le sol entre l'antenne de réception et le dispositif devrait être recouvert d'un matériau absorbant l'énergie radioélectrique dans la gamme de fréquences à mesurer.
- Faire varier la hauteur de l'antenne de réception pour vérifier que les réflexions dues au sol ont été réduites à leur valeur minimale et, le cas échéant, modifier la hauteur du dispositif à cette fin. L'antenne de réception ne devrait pas capter de réflexion due au sol dans son lobe principal. Sa hauteur devrait rester constante durant toute la procédure de mesure.
- Effectuer une mesure.
- Prendre en compte les gains et les affaiblissements. La contribution due à l'écran au sol a été éliminée grâce à l'adjonction d'un matériau absorbant sur le trajet indirect.
- Effectuer un nombre suffisant de mesures tant en azimut qu'en élévation pour faire en sorte que la valeur d'émission maximale soit enregistrée.
- Répéter la procédure pour chacune des fréquences à considérer.

1.5 Variations de mesure dans le cas d'un radar à pénétration dans le sol ou d'un radar d'imagerie à travers les murs

Les émissions d'un radar à pénétration dans le sol (GPR, *ground penetrating radar*) ou d'un radar d'imagerie à travers les murs (WIR, *wall imaging radar*) auxquelles on s'intéresse ici, ne sont pas celles rayonnées directement par l'antenne. Puisqu'elles pénètrent dans un substrat où elles sont rapidement affaiblies, les émissions directes risquent peu de brouiller des services de radiocommunication. Seules les émissions indirectes (par diffusion et/ou par fuite) sont donc à considérer. Pour les mesurer, il convient d'utiliser une méthode permettant d'isoler les émissions directes des émissions indirectes. Deux méthodes réalisant cette séparation sont décrites ci-après.

L'une consiste à placer le radar GPR/WIR directement au-dessus d'une couche de sable d'au moins 50 cm d'épaisseur et dont la surface soit de taille suffisante pour accueillir le transducteur GPR/WIR (l'antenne). Des mesures sont ensuite effectuées pour un nombre approprié de directions radiales et de hauteurs d'antenne afin de déterminer le niveau maximal d'émission rayonnée. Si cette méthode empêche l'utilisation d'un écran au sol, il faudrait modifier les données mesurées afin de prendre en compte la contribution de cet écran.

L'autre méthode consiste à placer le radar GPR à une hauteur de 80 cm sur un support non conducteur, l'émetteur étant dirigé vers le bas. Si les émissions GPR peuvent avoir des composantes au-dessous de 500 MHz, un carreau de ferrite devrait être placé directement sur le sol sous le radar. Des éléments d'absorption radioélectrique pyramidaux ou cunéiformes d'au moins 60 cm de hauteur sont placés directement sous le radar. Certains d'entre eux peuvent être retournés et posés sur d'autres éléments d'absorption pour former un bloc compact.

On veillera à ne pas placer d'élément absorbant entre le radar et l'antenne de réception, car cela empêcherait l'énergie qui n'est pas directement dirigée vers le bas d'être réfléchi par l'écran au sol. La disposition des éléments absorbants ne devrait pas être modifiée en cas de rotation du radar. La configuration décrite ici permet de ne pas prendre en compte dans les mesures l'énergie dirigée vers le bas.

Une recherche en azimut et en élévation des émissions indirectes peut alors être effectuée.

1.6 Orientation de l'EUT

L'EUT UWB devrait être orienté par rapport au système de mesure de manière à assurer le niveau de réception maximal du signal rayonné. La détermination de l'orientation induisant la réponse maximale dans le système de mesure peut être facilitée si l'on utilise un système non conducteur tournant ou un autre type de système de positionnement. Quelle que soit la façon dont l'orientation est déterminée, un nombre suffisant de directions radiales doivent être considérées pour déterminer celle qui donne la réponse maximale.

1.7 Distance de mesure

Une distance de séparation de 3 m est généralement utilisée. Dans certains cas, il peut être impossible de mesurer des émissions UWB sans amplification et/ou sans rapprocher à moins d'un mètre l'antenne de réception du dispositif UWB, tout en veillant à maintenir des conditions de champ lointain.

1.8 Antennes de mesure

Les antennes de mesure sont généralement conçues de manière à présenter un fonctionnement optimal dans des gammes de fréquences données. Pour couvrir l'ensemble du spectre des émissions UWB, il faut utiliser plusieurs antennes de mesure, présentant chacune un fonctionnement optimal dans une gamme de fréquences particulière.

1.9 Récepteurs et détecteurs de mesure

L'appareil de mesure utilisé peut être un analyseur de spectre, un récepteur de mesure du brouillage électromagnétique (EMI, *electromagnetic interference*), un analyseur de signal vectoriel ou un oscilloscope. Dans les paragraphes suivants, on utilise l'expression générique «récepteur de mesure».

Une émission UWB peut présenter des caractéristiques différentes suivant la largeur de bande du récepteur de référence. Dans le cas d'une émission UWB générée par impulsions par exemple, on peut observer un spectre de raies correspondant à des ondes entretenues si la largeur de bande du récepteur est supérieure à la fréquence de répétition des impulsions (FRI). Si elle est inférieure à la fréquence FRI, cette même émission peut être assimilable à du bruit. De plus, si des techniques de modulation en bande de base sont utilisées (par exemple, la modulation des impulsions en position), les raies spectrales risquent d'être «dégradées» dans la largeur de bande de référence, créant ainsi une réponse assimilable à du bruit. Dans le cas d'un spectre de raies, la densité spectrale de puissance quasi-crête ou crête présente un intérêt particulier. Le niveau moyen de densité spectrale de puissance permet de définir au mieux un spectre assimilable à du bruit. Du fait de variations possibles liées à la largeur de bande de réception, il faut utiliser plusieurs détecteurs de signaux pour mesurer un spectre UWB.

Trois détecteurs de signaux sont recommandés pour mesurer les émissions UWB. Pour mesurer les caractéristiques de signaux dans le spectre radioélectrique au-dessous de 1 000 MHz, l'utilisation du détecteur de valeur quasi-crête spécifié dans la norme CISPR-16-1-1 est recommandé. L'emploi d'un détecteur de valeur moyenne efficace est préconisé pour mesurer l'amplitude moyenne efficace d'un signal UWB rayonné dans le spectre au-dessus de 1 000 MHz. L'emploi d'un détecteur de valeur crête est conseillé pour déterminer la puissance crête associée aux émissions UWB dans le spectre au-dessus de 1 000 MHz.

1.10 Sensibilité du système de mesure

Les émissions rayonnées par un dispositif UWB sont souvent trop faibles pour couvrir le bruit produit dans un analyseur de spectre classique dont le niveau équivaut par exemple à une densité de p.i.r.e. de -47 dBm/MHz à 1 GHz et de -25 dBm/MHz à 26 GHz. Il devient donc nécessaire d'utiliser un amplificateur AFB à la sortie de l'antenne de mesure pour réduire le facteur de bruit effectif de l'ensemble du système de mesure.

Cette sensibilité accrue du système de mesure peut le rendre particulièrement vulnérable aux signaux ambiants dans l'environnement de mesure. Si ces signaux ambiants sont de forte intensité, il convient de placer un filtre RF approprié en amont de l'AFB pour empêcher la saturation de ce dernier, tout en permettant la propagation des signaux dans la gamme de fréquences considérée. L'affaiblissement d'insertion associé au filtre devrait être minimal et devrait également être pris en compte lors de la détermination de la sensibilité d'ensemble du système de mesure.

Lorsque la sensibilité de l'analyseur est insuffisante, l'une des méthodes efficaces de mesure radiométrique est celle décrite au § 2.6.

1.11 Exemple de séquence de test

La caractérisation spectrale d'un dispositif UWB devrait commencer par la mesure du rayonnement crête détecté dans une largeur de bande de résolution (RBW, *resolution bandwidth*) de 1 MHz, puisque les résultats ainsi obtenus pourraient supprimer la nécessité de mesures ultérieures de valeur quasi-crête ou moyenne efficace dans certains intervalles de fréquences². Par exemple, si les données recueillies pour cette mesure de puissance crête montrent que les niveaux des émissions rayonnées sont inférieurs ou égaux à la limite de valeur quasi-crête ou moyenne efficace applicable, on peut considérer que ces données sont acceptables. Cela repose sur le fait que le niveau quasi-crête et le niveau moyen efficace sont toujours inférieurs ou égaux au niveau du signal crête.

Après la mesure de la largeur de bande à -10 dB conformément au § 2.1, la puissance maximale et la fréquence associée observées dans chaque intervalle de fréquences devraient être comparées à la limite applicable. Lorsque la valeur crête d'émission est supérieure à la limite applicable pour la valeur quasi-crête et la valeur moyenne efficace, il faut procéder à d'autres tests de valeurs quasi-crête et moyenne efficace. Les données recueillies pour cette mesure devraient être ajustées comme on l'a vu précédemment pour supprimer tout effet du système de mesure sur les niveaux crête détectés. Une fois cet ajustement effectué, une courbe de l'enveloppe spectrale complète est obtenue en associant les jeux de données segmentés.

2 Mesures dans le domaine fréquentiel

Cette méthode consiste à mesurer directement les caractéristiques spectrales UWB dans le domaine fréquentiel. On parle souvent de mesure «à largeur de bande limitée», car la largeur de bande de la plupart des équipements de test existants est très nettement inférieure à la largeur de bande totale du signal UWB.

2.1 Détermination de la largeur de bande à -10 dB

On désigne par f_M la fréquence du niveau de puissance maximale mesuré dans un segment de 1 MHz à l'aide d'un détecteur de valeur crête. Les mesures de puissance crête devraient être effectuées au moyen d'un analyseur de spectre ayant une largeur de bande de résolution de 1 MHz

² Il ne faut pas confondre cette mesure de la puissance crête avec celle de la valeur crête de densité spectrale de puissance, décrite au § 2.7.

et une largeur de bande vidéo supérieure ou égale à 1 MHz. L'analyseur devrait être réglé de manière à détecter la valeur crête à l'aide du mode gel sur la valeur maximale. Les segments de 1 MHz, au-dessous et au-dessus de f_M , dans lesquels la puissance crête décroît de 10 dB, sont respectivement désignés par f_H et f_L .

Pour déterminer la limite de fréquence inférieure f_L , on part d'une fréquence inférieure à f_M associée, après examen, à une puissance crête très inférieure à la valeur de la puissance à la fréquence f_M moins 10 dB; on augmente ensuite la fréquence jusqu'à ce que la puissance indiquée ait la valeur de la puissance à la fréquence f_M moins 10 dB. La fréquence du segment ainsi déterminée est alors enregistrée.

Ce processus est répété pour la limite de fréquence supérieure f_H , en partant d'une fréquence supérieure à f_M associée, après examen, à une puissance crête très inférieure à la valeur de la puissance à la fréquence f_M moins 10 dB. La fréquence du segment ainsi déterminée est alors enregistrée.

Les deux fréquences enregistrées sont les limites supérieure f_H et inférieure f_L de l'émission UWB, la largeur de bande à -10 dB B_{-10} étant définie par $f_H - f_L$.

2.2 Méthode de mesure préliminaire dans une chambre réverbérante

On peut utiliser une chambre réverbérante (voir, concernant sa structure et son exploitation, les normes CISPR 16-1-4 et CEI61000-4-21) pour obtenir une mesure préliminaire de f_M et déterminer une enveloppe approximative du spectre d'une émission UWB. Une mesure précise devrait ensuite être réalisée pour cette fréquence dans un site OATS, une chambre semi-anéchoïde ou une chambre anéchoïde.

L'exploitation en mode accordé peut être préférée pour la chambre réverbérante. L'analyseur de spectre est réglé aux modes balayage de fréquence et détection de la valeur crête. Les valeurs de temps de balayage et de RBW sélectionnées sont celles décrites au § 2.1.

2.3 Mesures de la valeur quasi-crête conformément aux prescriptions de la norme CISPR 16-1-1

Les mesures de la valeur quasi-crête sont effectuées à l'aide d'un détecteur de valeur quasi-crête dans une RBW conformément aux prescriptions de la norme CISPR 16-1-1.

2.4 Mesure de la puissance moyenne à l'aide d'un analyseur de spectre

La valeur moyenne de la densité spectrale de puissance (PSD, *power spectral density*) d'une émission UWB est égale à la valeur de puissance moyenne efficace rapportée à la largeur de bande d'un filtre gaussien idéal. Pour assurer la vitesse, la précision et la reproductibilité des mesures, il convient de mesurer la PSD directement en utilisant une technique de balayage avec détecteur de valeur moyenne efficace et une RBW égale à la largeur de bande de référence. On notera que la RBW de la plupart des analyseurs de spectre modernes présente des caractéristiques très proches de celles du filtre gaussien idéal³. La valeur moyenne efficace de la PSD est souvent exprimée en dBm/MHz (c'est-à-dire dans une largeur de bande de 1 MHz).

³ Généralement, les résultats obtenus en utilisant la valeur efficace diffèrent de moins de 0,3 dB de ceux obtenus en utilisant un filtre gaussien idéal.

2.4.1 Valeur moyenne de la densité spectrale de puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.)

La densité spectrale de puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) d'une émission UWB est le produit de la densité spectrale de puissance fournie à l'antenne par son gain dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope. Il s'agit de la puissance de signal la plus élevée émise par le dispositif UWB et mesurée pour une direction et une fréquence quelconques, conformément aux procédures spécifiées aux § 2.4.2, 2.4.3 et 2.4.4 de la présente Recommandation.

2.4.2 Mesures de la valeur moyenne à l'aide d'un détecteur de r.m.s.

La procédure décrite ici n'est valable que dans le cas d'un analyseur de spectre doté d'un détecteur de valeur moyenne efficace. La configuration de mesure de la valeur moyenne efficace est identique à celle décrite précédemment en ce qui concerne l'orientation de l'EUT sous test et le système de mesure.

Configuration de la mesure

- Régler la RBW de l'analyseur de spectre sur 1 MHz.
- Régler la largeur de bande vidéo (VBW, *video bandwidth*) sur au moins 1 MHz (une VBW de 3 MHz serait souhaitable)⁴.
- Régler l'intervalle de fréquences de manière à examiner le spectre dans un segment de fréquences approprié (par exemple 600 MHz).
- Positionner le détecteur sur r.m.s.
- Choisir le temps de balayage de sorte que pour chaque intervalle de mesure, la période d'intégration ne soit pas supérieure à 1 ms.

Détail de la procédure

De nombreux analyseurs de spectre utilisent par défaut environ 600 intervalles par balayage. Dans ce cas, avec un temps de balayage de 600 ms, on obtient la valeur requise d'une ms pour la période d'interprétation dans chaque intervalle de mesure. De nombreux analyseurs de spectre modernes permettent de spécifier le nombre d'intervalles de mesure, ce qui permet de nombreuses autres associations du temps de balayage et du nombre d'intervalles de mesure respectant la prescription d'une période d'intégration maximale d'une ms.

La valeur moyenne efficace de la densité spectrale de puissance est la valeur de puissance intégrée la plus élevée détectée dans une largeur de bande de résolution de 1 MHz pendant une période d'intégration d'une ms.

Pour chaque segment de fréquences, l'amplitude de signal maximale observée devrait être ajustée (voir le § 1.4, au sujet de l'environnement de mesure) pour éliminer de la mesure toute influence du système de mesure et/ou contribution des signaux ambiants. Le résultat est ensuite comparé à la limite applicable.

2.4.3 Mesure de la valeur moyenne avec un intervalle de fréquences nul

Lorsque l'analyseur de spectre n'est pas équipé d'un détecteur de r.m.s., la valeur moyenne efficace peut être obtenue grâce à la mesure à intervalle de fréquences nul décrite ci-après.

Configuration de la mesure

- Régler la largeur de RBW de l'analyseur de spectre sur 1 MHz.

⁴ En effet, dans la plupart des analyseurs de spectre, le filtrage dans la largeur de bande vidéo est réalisé suivant une échelle de puissance logarithmique et non linéaire.

- Régler la largeur de VBW sur au moins 1 MHz (une VBW de 3 MHz serait souhaitable).
- Régler l'intervalle de fréquences sur zéro.
- Positionner le détecteur sur *échantillon*.
- Régler le temps de balayage sur 1 ms.
- Effectuer un seul balayage.

Détail de la procédure

Une mesure devrait être effectuée pour chaque segment de fréquences de 1 MHz. On peut obtenir la valeur moyenne efficace dans une RBW en appliquant la méthode équivalente ci-après.

Extraire tous les points de données de l'analyseur, puis déterminer la valeur moyenne efficace au moyen de la formule suivante:

$$PSD = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n 10^{\frac{P(i)}{10}} \right) \quad (1)$$

où:

PSD: valeur moyenne efficace de la densité spectrale de puissance (dBm/MHz)

n: nombre de points de données du balayage

P(i): valeur de puissance lue sur l'analyseur de spectre pour le point de données *i* dans un segment de 1 MHz (dBm).

2.4.4 Mesure de la valeur moyenne par intégration de puissance

Cette procédure n'est applicable que pour la mesure d'émissions assimilables à du bruit à l'aide d'un analyseur de spectre utilisant un détecteur d'échantillons. Voir le § 2.4.2 pour l'utilisation d'un analyseur de spectre avec détecteur de r.m.s.

Configuration de la mesure

- Régler la RBW de l'analyseur de spectre sur 10 kHz.
- Régler la VBW sur une valeur égale à trois fois celle de la largeur de bande de résolution ou 30 kHz.
- Régler l'intervalle de fréquences sur 1 MHz.
- Régler le mode d'affichage de façon à afficher la puissance (dBm).
- Positionner le détecteur sur *échantillon*.
- Positionner le temps de balayage en tant que fonction couplée.
- Effectuer un seul balayage.

Détail de la procédure

Pour chaque segment de 1 MHz, extraire les points de données de l'analyseur. Après avoir converti en unités linéaires les données de puissance exprimées en unités logarithmiques, déterminer la valeur moyenne efficace dans le segment de 1 MHz. Cette valeur est ajustée pour tenir compte de la largeur de bande de la puissance de bruit de l'analyseur. On la reporte ensuite sur un graphique ayant pour abscisse la fréquence centrale du segment et pour ordonner la densité spectrale de puissance du segment. La fréquence centrale est représentée par pas de 1 MHz dans l'intervalle de fréquences considéré et la valeur de puissance de chaque segment peut être indiquée.

Les points affichés sont extraits de l'instrument et post-traités en utilisant la formule suivante:

$$P = 10 \log_{10} \left(Sp \times \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n 10^{\frac{P(i)}{10}}}{RBW \times k} \right) \quad (2)$$

où:

- P*: puissance moyenne efficace dans l'intervalle de fréquences (dBm)
- Sp*: intervalle de fréquences (MHz)
- n*: nombre de points de données dans l'intervalle de fréquences
- P(i)*: valeur de puissance lue sur l'analyseur de spectre pour le point de données *i* (dBm)
- k*: facteur de correction indiqué par le fabricant de matériel pour passer de la RBW à la largeur de bande de bruit équivalente
- PSD*: *P/Sp* (dBm/MHz).

2.5 Mesure des émissions de faible niveau à l'aide d'un amplificateur à faible bruit (AFB)

La plus grande difficulté, dans le cas de dispositifs UWB, est de déterminer une procédure de test permettant de détecter les signaux de faible niveau, du fait de la limite associée aux émissions de faible niveau et à l'exigence d'une RBW de 1 MHz. Il est nécessaire de modifier le système de mesure pour en optimiser la sensibilité et, partant, faciliter les mesures.

Il existe des AFB ayant une largeur de bande d'une octave (par exemple 1-2 GHz) et un facteur de bruit d'émission de 1 dB. L'insertion d'un tel amplificateur améliore la sensibilité effective du système de mesure. Il peut être nécessaire d'insérer un filtre de présélection en amont du AFB à des fins de protection; l'affaiblissement d'insertion associé décroît cependant la sensibilité globale de la mesure.

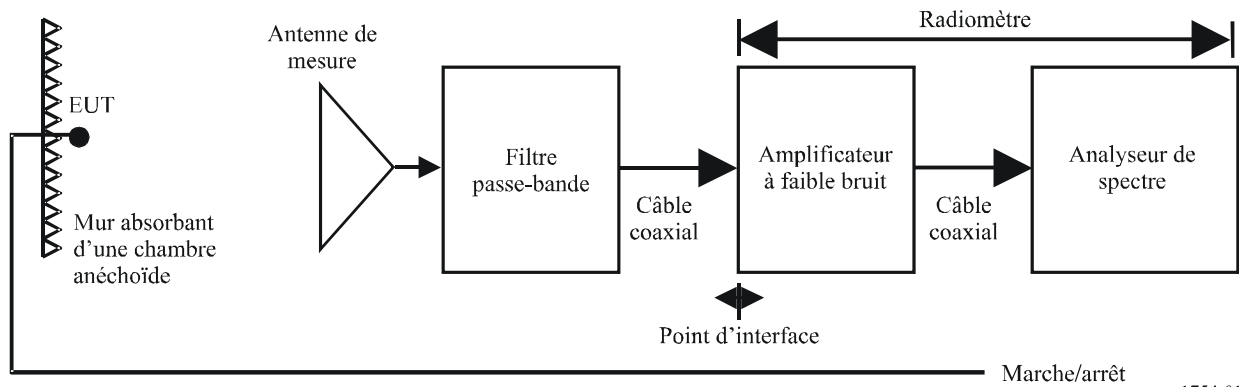
2.6 Mesures radiométriques associées à des émissions de faible niveau

Des méthodes radiométriques (correction au voisinage du bruit) peuvent être utilisées pour réaliser des mesures précises de signaux dont le niveau est inférieur à celui du bruit de fond d'un analyseur de spectre. Les techniques radiométriques permettent de mesurer la puissance lorsque l'EUT est activé est désactivé. La p.i.r.e. est obtenue en retranchant la seconde valeur de la première.

2.6.1 Configuration d'un radiomètre

Un radiomètre comprend un AFB et un analyseur de spectre (voir la Fig. 1). L'équipement sous test est généralement placé à 3 m d'une antenne de mesure et exploité à distance depuis une salle de mesure. Un filtre passe-bande est inséré entre l'antenne de mesure et l'AFB pour éviter la saturation de ce dernier. L'équipement sous test, l'antenne de mesure, le filtre passe-bande et l'AFB sont placés dans une chambre anéchoïde, tandis que l'analyseur de spectre est installé dans la salle de mesure. L'analyseur de spectre et l'AFB doivent être reliés par un câble coaxial à faible affaiblissement.

FIGURE 1
Exemple de radiomètre



1754-01

2.6.2 Principe et description des mesures

Le radiomètre mesure la puissance du signal à la sortie du BPF pendant une durée T_M . Le résultat est converti en une valeur de puissance rapportée au point d'interface. La distribution stochastique de cette valeur est approximativement gaussienne. Sa valeur moyenne est R et son écart type σ est donné par:

$$\sigma = \frac{0,815R}{\sqrt{RBW \cdot T_M}} \quad (3)$$

On peut en déduire que la marge d'erreur associée à une durée de mesure d'une seconde est de $\pm 0,1\%$. Un radiomètre, tel que celui de la Fig. 1 permet donc de mesurer la puissance avec une précision élevée.

Dans la largeur de bande de mesure, on suppose que le signal rayonné par l'EUT n'est pas corrélé au bruit thermique. On suppose également que le bruit est un processus stochastique faiblement stationnaire. On peut mesurer avec précision la puissance rayonnée par l'EUT en retranchant la valeur de la puissance qui traverse le point d'interface de cet équipement lorsqu'il est en marche et lorsqu'il est à l'arrêt.

2.6.3 Procédure de test

On mesure en premier lieu la puissance $P_0(f)$ (dBm) au point d'interface pendant une durée T_{M0} , l'équipement sous test étant désactivé.

La relation entre la p.i.r.e. $P_{p.i.r.e.}(f)$ (dBm) et la puissance $P_0(f)$ au point d'interface est donnée par:

$$P_{p.i.r.e.}(f) = 11,8 + K_A(f) + 20 \log_{10} \frac{d}{3} + P_0(f) \quad (4)$$

où:

- f : fréquence centrale de balayage de l'analyseur de spectre
- d : distance entre l'EUT et l'ouverture de l'antenne de mesure (m)
- $K_A(f)$: somme du facteur d'antenne et de l'affaiblissement de connexion de l'antenne de mesure.

L'équation (4) permet de passer de $P_0(f)$ à la p.i.r.e., dont la valeur en unités linéaires est notée *p.i.r.e.o.*

On mesure ensuite, lorsque l'équipement sous test est activé, la puissance P_1 au point d'interface pendant une durée T_{M1} , et on calcule la puissance P_1 (*p.i.r.e.1*) selon la même procédure. La *p.i.r.e.* de l'EUT est donnée par la différence (*p.i.r.e.1* – *p.i.r.e.0*). L'écart type de l'erreur relative de la mesure de *p.i.r.e.* de l'EUT est alors calculé comme suit:

$$0,815 \cdot RBW^{-0,5} \cdot \frac{P_{e1} \cdot T_{M1}^{-0,5} + P_{e0} \cdot T_{M0}^{-0,5}}{P_{e1} - P_{e0}} \quad (5)$$

2.6.4 Exemple pour la bande 1-2 GHz

Dans cet exemple, on utilise comme antenne de mesure une antenne cornet à guide d'ondes à deux moulures (DRGHA, *double ridged waveguide horn antenna*). L'entrée de l'AFB est le point d'interface du radiomètre. Les températures de bruit équivalentes des composantes du radiomètre au point d'interface sont énumérées dans le Tableau 1 d'où il ressort que la température de bruit, T , du radiomètre au point d'interface est de 385 K. La puissance de bruit, $k \cdot T \cdot RBW$, où k est la constante de Boltzmann, est de –112,7 dBm pour une RBW de 1 MHz. Lorsque l'EUT est désactivé, la PSD $P_0(f)$ au point d'interface est donc égale à –112,7 dBm/MHz. $P_0(f)$ n'est pas modifié si la distance entre l'antenne et l'EUT varie.

En utilisant l'équation (4), la valeur de *p.i.r.e.* associée est de –74,7 dBm/MHz pour $d = 3$ m et $K_A(1 \text{ GHz}) = 26,2$ dB.

TABLEAU 1

Exemple de températures de bruit équivalentes (rapportées à l'entrée de l'AFB) des composantes du radiomètre dans la bande 1-2 GHz

Composante	Température de bruit	Commentaires
DRGHA + BPF	290 K	K_A est égal à 26,2 dB
AFB	75 K	Largeur de bande 1-2 GHz, facteur de bruit de 1 dB, gain de 40 dB
Câble de 10 m	Environ 0 K	Affaiblissement de 2,5 dB
Analyseur de spectre	20 K	Facteur de bruit de 26 dB

Le Tableau 2 donne l'écart type de l'erreur relative obtenu grâce à l'équation (5), pour des valeurs de *p.i.r.e.* de l'équipement sous test de –70 dBm/MHz et –75 dBm/MHz.

TABLEAU 2

Ecart type de l'erreur relative de mesure du radiomètre

<i>p.i.r.e.</i> de l'EUT	Durée des mesures: $T_{M1} = 0,001$ s et $T_{M0} = 0,1$ s
–70 dBm/MHz	0,15 dB
–75 dBm/MHz	0,24 dB

2.6.5 Exemple pour la bande 22-24 GHz

Dans cet exemple, on utilise comme antenne de mesure une antenne cornet à gain normalisé (SGHA, *standard gain horn antenna*) ayant pour ouverture 0,028 m × 0,056 m. Pour minimiser l'affaiblissement de couplage, il faudrait connecter directement l'antenne, le filtre passe-bande et l'AFB.

L'entrée de l'AFB est le point d'interface du radiomètre. Les températures de bruit équivalentes des composantes du radiomètre au point d'interface sont énumérées dans le Tableau 3, d'où il ressort que la température de bruit, T_{sys} , du radiomètre au point d'interface est de 814 K. La puissance de bruit, $k \cdot T \cdot RBW$, est de $-109,5$ dBm pour une RBW de 1 MHz. Lorsque l'EUT est désactivé, la PSD $P_0(f)$ au point d'interface est donc égale à $-109,5$ dBm/MHz. $P_0(f)$ n'est pas modifié si la distance entre l'antenne et l'équipement sous test varie. $K_A(f)$ est égale à la somme du facteur d'antenne et de l'affaiblissement dans le BPF. La température de bruit du radiomètre convertie en p.i.r.e. grâce à l'équation (4) est de $-58,9$ dBm/MHz pour $d = 3$ m et $K_A(24 \text{ GHz}) = 38,8$ dB.

TABLEAU 3

Exemple de températures de bruit équivalentes (rapportées à l'entrée de l'AFB) des composantes du radiomètre dans la bande 22-24 GHz

Composante	Température de bruit	Commentaires
SGHA + BPF	290 K	K_A est égal à 38,8 dB
AFB	159 K	Largeur de bande 18-26 GHz, facteur de bruit de 1,9 dB, gain de 35 dB
Analyseur de spectre	365 K	Facteur de bruit de 36 dB
T_{sys}	814 K	Température de bruit du système radiomètre

Le Tableau 4 donne l'écart type de l'erreur relative mesuré à une distance de 3 m de l'EUT, pour des valeurs de p.i.r.e. de -60 dBm/MHz et -65 dBm/MHz. Le Tableau 5 donne à titre d'exemple l'écart type de l'erreur relative mesuré à une distance de 1 m de l'EUT, pour des valeurs de p.i.r.e. de -70 dBm/MHz et -75 dBm/MHz.

TABLEAU 4

Ecart type de l'erreur relative de mesure d'un radiomètre fonctionnant dans la bande 22-24 GHz, pour une distance de 3 m

p.i.r.e. de l'EUT ($d = 3$ m)	Durée des mesures: $T_{M1} = 0,001$ s et $T_{M0} = 0,1$ s
-60 dBm/MHz	0,26 dB
-65 dBm/MHz	0,57 dB

TABLEAU 5

Ecart type de l'erreur relative de mesure d'un radiomètre fonctionnant dans la bande 22-24 GHz, pour une distance de 1 m

p.i.r.e. de l'EUT ($d = 1$ m)	Durée des mesures: $T_{M1} = 0,001$ s et $T_{M0} = 0,1$ s
-70 dBm/MHz	0,28 dB
-75 dBm/MHz	0,63 dB

2.7 Mesure de la valeur crête de densité spectrale de puissance

La valeur crête de PSD d'une émission UWB correspond à la valeur crête de la puissance dans un filtre gaussien ayant une largeur de bande de 50 MHz. Sa mesure est effectuée avec un détecteur de valeur crête et la fonction «gel sur la valeur maximale».

Dans la plupart des analyseurs de spectre modernes, une largeur de bande de résolution d'au plus 3 MHz permet d'obtenir des caractéristiques très proches de celles d'un filtre gaussien idéal (les mesures présentent une différence de moins de 1 dB par rapport à celles obtenues avec un filtre gaussien idéal). Si un analyseur de spectre sert à mesurer la valeur crête, il n'est généralement pas possible d'utiliser une largeur de RBW supérieure à 3 MHz en raison de limites relatives à la largeur de bande vidéo et à la linéarité de phase.

2.7.1 Mesure de la valeur crête de la densité spectrale de puissance à l'aide d'un analyseur de spectre

Mise à l'échelle de la valeur limite crête pour d'autres largeurs de bande de résolution

La valeur limite crête de la PSD peut être rapportée à une largeur de bande différente en utilisant l'équation (6). On notera toutefois que cette méthode, qui permet de ramener la valeur limite crête de PSD exprimée dans une largeur de bande $BW = 50$ MHz à une largeur de bande plus étroite, conduit à une limite trop stricte, étant donné que l'équation donne une valeur prudente de cette limite (dans le cas d'un signal impulsionnel).

$$Limit_{RBW} = Limit_{BW} + 20 \log_{10}(RBW/BW) \quad (6)$$

Un signal UWB, altéré par la fonction de transfert passe-bande du récepteur, peut sembler être de type impulsionnel, assimilable à du bruit, sinusoïdal ou associer certains de ces types, suivant les caractéristiques temporelles et la largeur de bande du récepteur.

La relation réelle fait apparaître un facteur compris entre $10 \log_{10}$ et $20 \log_{10}$, comme on l'explique ci-après.

Étant donné que la phase de l'oscillation dépend de l'origine temporelle d'une impulsion, les phases des impulsions adjacentes à décalage aléatoire peuvent être asynchrones. Il peut en résulter une sommation constructive ou destructive de composantes de signaux dans le cas d'impulsions se chevauchant, ce qui donne l'apparence d'un bruit gaussien. Cette méthode est précise si le signal UWB semble être de type impulsionnel lorsqu'il traverse le récepteur, c'est-à-dire si la RBW est supérieure à la fréquence FRI de l'EUT (il n'y a alors pas de chevauchement des impulsions).

Lorsque la mesure est effectuée dans une RBW inférieure à la fréquence FRI de l'EUT, il y aura chevauchement des impulsions et le signal semblera être continu (distribution aléatoire de l'amplitude par rapport au temps) plutôt qu'impulsionnel lorsqu'il traverse le récepteur. La valeur crête effective de la puissance dans la largeur de bande de référence sera fonction de caractéristiques temporelles entre impulsions (voir ci-dessus). Dans de tels cas, la relation en $20 \log_{10}$ entre les deux largeurs de bande est une surestimation. Les caractéristiques temporelles, qui peuvent être celles d'une simple fréquence FRI, sont identifiables en analysant la fonction d'autocorrélation du signal. La puissance et l'intervalle de temps associés à une composante répétitive quelconque du signal UWB apparaissent sous forme de valeurs crêtes sur la courbe d'autocorrélation.

Dans le cas d'un signal UWB généré à partir d'un multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (MROF) et lorsque la RBW est inférieure à la largeur de bande totale du signal, le contenu (de modulation) des données et la commande d'émission (commutation radioélectrique) déterminent les caractéristiques du signal filtré. L'alignement précis des phases associées aux différentes composantes du signal détermine la réponse instantanée. Dans certains cas, la modulation peut être spécifiquement conçue pour donner l'apparence d'un bruit gaussien. Le facteur

d'échelle de $20 \log_{10}$ entre les largeurs de bande conduira à une bonne précision du résultat si le signal semble être de type «impulsionnel». Cela signifie qu'il existe une composante temporelle répétitive ayant une période de répétition supérieure à $1/RBW$ (autrement dit, la RBW est supérieure à la fréquence FRI).

Exemple de configuration de mesure pour une RBW de 3 MHz

- Régler la RBW de l'analyseur de spectre sur 3 MHz.
- Régler la VBW de manière qu'elle soit au moins égale à la largeur de bande de résolution (on recommande l'emploi d'une VBW au moins égale à trois fois la RBW ou la mise hors circuit du filtre vidéo).
- Régler l'intervalle de fréquences de manière à examiner le spectre dans un segment de fréquences approprié (généralement plusieurs GHz).
- Positionner le détecteur sur valeur crête.
- Activer la fonction «gel sur la valeur maximale».
- Positionner le temps de balayage sur autocouplage.

Exemple de procédure détaillée avec une RBW de 3 MHz

Plusieurs balayages sont utilisés (avec activation de la fonction «gel sur la valeur maximale») jusqu'à la stabilisation de l'amplitude observée. La mesure est centrée sur la fréquence de l'émission UWB maximale, f_M . Lorsque la mesure est effectuée dans une RBW de 3 MHz et non de 50 MHz, la mise à l'échelle de la limite est effectuée comme suit:

$$Limit_{3 \text{ MHz}} = Limit_{50 \text{ MHz}} + 20 \log_{10}(3 \text{ MHz}/50 \text{ MHz}) = Limit_{50 \text{ MHz}} - 24,4 \text{ dB} \quad (7)$$

2.7.2 Mesure de la valeur crête de la densité spectrale de puissance à l'aide d'un analyseur de spectre (autre méthode)

Si l'on sait que l'équation (6) surestime la puissance crête, l'utilisation d'une autre loi d'échelle peut être envisagée. Lorsque le signal ressemble à du bruit, la procédure de test suivante est appliquée:

- Régler la RBW de l'analyseur de spectre sur 3 MHz.
- Régler la VBW sur une valeur au moins égale à celle de la RBW (on recommande l'emploi d'une VBW au moins égale à trois fois la RBW ou la mise hors circuit du filtre vidéo).
- Positionner la fréquence centrale sur f_M et l'intervalle de fréquences sur zéro.
- Positionner le détecteur sur échantillon.
- Régler l'affichage sur le mode fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF, *complementary cumulative distribution function*).

Si la fonction CCDF obtenue présente une erreur inférieure à ± 2 dB par rapport à la fonction CCDF d'une distribution de Rayleigh dans l'intervalle 1% à 99%, on considère que le signal est assimilable à du bruit. La technique de mesure du § 2.7.1 est alors appliquée avec l'équation de mise à l'échelle suivante (8):

$$Limit_{RBW} = Limit_{BW} + 10 \log_{10}(RBW/BW) \quad (8)$$

2.8 Mesure des raies spectrales

La configuration de mesure permettant de déterminer la puissance moyenne efficace maximale dans les différentes raies spectrales présentes est semblable à celle utilisée dans le test précédent de mesure de la puissance moyenne efficace. On sélectionne le détecteur de valeur moyenne efficace et on règle le temps de balayage et le nombre d'intervalles de mesure de manière à obtenir un temps d'intégration de 1 ms. Dans ce test, la RBW peut être réduite à une valeur minimale de 1 kHz (on

recommande 30 kHz) pour améliorer la résolution des différentes raies spectrales. Un rapport VBW/RBW ≥ 3 devrait être conservé lorsque cela est possible.

2.9 Conduite des mesures

La valeur de p.i.r.e. peut être obtenue en utilisant l'équation suivante:

$$p.i.r.e. (f) = P(f) + G(f) \quad (9)$$

où:

- $p.i.r.e. (f)$: p.i.r.e. à la fréquence f (dBm)
- $P(f)$: puissance mesurée à la fréquence f au niveau des bornes de l'antenne reliées à une résistance de 50 Ω (dBm)
- $G(f)$: gain de l'antenne mesurée à la fréquence f dans une direction donnée (dBi).

3 Mesures dans le domaine temporel

3.1 Mesure de signaux à UBW dans le domaine temporel

Le spectre UWB peut être obtenu en appliquant la transformée TFR aux données échantillonnées dans le domaine temporel grâce à un oscilloscope numérique à large bande. Il peut être calculé en utilisant différents détecteurs et pour différentes largeurs de bande, en détectant par exemple la puissance moyenne efficace dans une largeur de bande gaussienne de 1 MHz ou la puissance crête dans une largeur de bande gaussienne de 50 MHz.

Certains oscilloscopes permettent de mesurer des signaux UWB en temps réel. Leurs spécifications types sont les suivantes:

- Fréquence maximale: 12 GHz (BW analogique à -3 dB).
- Fréquence d'échantillonnage: 40 Géchantillon/s.
- Valeurs maximale et minimale de la sensibilité verticale: 1 V/div et 1 mV/div.
- Bruit à 800 mV pleine échelle: 2,7 mV r.m.s.

Pour déterminer la qualité de la mesure dans le domaine temporel, il faut d'abord déterminer la tension crête de la forme d'onde dans le domaine temporel. On veillera à afficher la forme d'onde dans son intégralité.

L'utilisation d'un oscilloscope à échantillonnage peut permettre d'améliorer la qualité de mesure d'une forme d'onde périodique. La spécification type d'un oscilloscope d'échantillonnage moderne est la suivante:

- Fréquence maximale: 50 GHz.
- Niveau d'entrée maximal: 1 V_{p-p} (crête à crête).
- Niveau de bruit: 1,8 mV r.m.s.

3.2 Estimation de l'erreur de gigue à l'aide d'un oscilloscope à échantillonnage

Si l'EUT peut émettre des signaux de déclenchement, une forme d'onde périodique provenant de l'équipement peut être observée à l'aide d'un oscilloscope à échantillonnage. Il est possible d'améliorer son rapport signal sur bruit (S/N), lorsque celui-ci est faible, à l'aide de la fonction de moyennage proposée par l'oscilloscope. La forme d'onde observée fait toutefois l'objet d'un filtrage passe-bas, en raison de la gigue du signal de déclenchement.

La valeur crête de l'onde observée est atténuée, car elle correspond au produit de convolution de la fonction de densité de probabilité de la gigue par la forme d'onde d'entrée issue de l'EUT. Dans le cas d'un signal de déclenchement ayant une gigue gaussienne de valeur efficace σ_s (r.m.s.), la forme d'onde observée fait l'objet d'un LPF gaussien dont la fréquence de coupure à 3 dB est de $0,13/\sigma$ Hz.

3.3 Post-traitement des données temporelles

Le post-traitement des données temporelles est nécessaire. Un logiciel de post-traitement peut faire intervenir de nombreuses mesures radioélectriques normalisées.

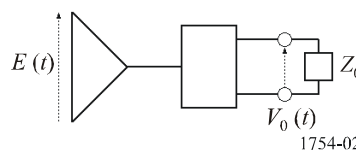
3.3.1 Facteur d'antenne complexe

On définit comme suit le facteur d'antenne complexe (CAF, *complex antenna factor*) $F_c(f)$ d'une antenne recevant une onde plane de fréquence f :

$$F_c(f) = \frac{E(f)}{V_0(f)} \tag{10}$$

où $E(f)$ est le champ électrique complexe en un point spécifique d'un élément d'antenne et $V_0(f)$ est la tension adaptée complexe du terminal d'antenne d'impédance adaptée Z_0 (voir la Fig. 2). Ce CAF contient l'information de phase permettant de reconstruire la forme d'onde du champ électrique. Il devrait être mesuré pour chaque antenne.

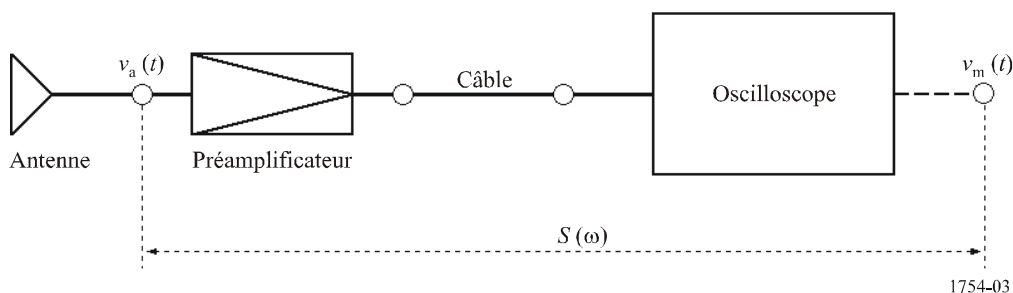
FIGURE 2
Définition du CAF



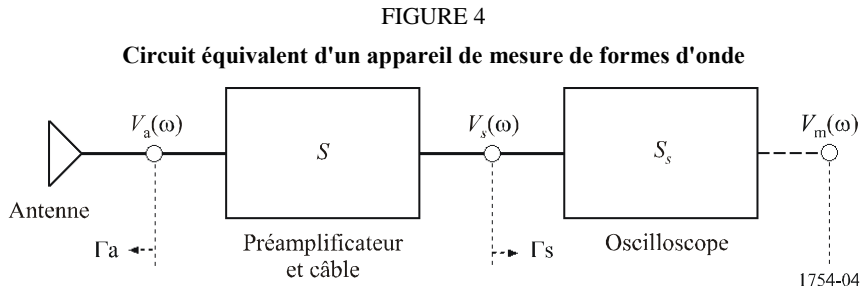
3.3.2 Reconstruction du champ électrique à partir des données temporelles mesurées

La Fig. 3 donne l'exemple d'un dispositif de mesure de la forme d'onde du champ électrique rayonné par l'EUT. La forme d'onde observée sur un oscilloscope, $v_m(t)$, est obtenue par la convolution entre la réponse impulsionnelle du dispositif de mesure (entre la sortie de l'antenne et la sortie de l'oscilloscope) et le signal en sortie de l'antenne, $v_a(t)$. La p.i.r.e. peut être obtenue à partir de l'intensité du champ électrique pour une distance arbitraire entre les antennes d'émission et de réception en conditions de champ lointain.

FIGURE 3
Dispositif de mesure de formes d'onde



La Fig. 4 présente le circuit équivalent du dispositif de mesure de formes d'onde décrit sur la Fig. 3. S désigne la matrice S associée au préamplificateur et au câble, S_S étant la matrice S de l'oscilloscope. Γ_a et Γ_s sont respectivement les coefficients de réflexion de l'antenne de réception et du port d'entrée de l'oscilloscope. Le paramètre S_{12} du préamplificateur (paramètre S du port de sortie vers le port d'entrée du préamplificateur) est supposé nul. Les paramètres S_{22S} et S_{12S} de l'oscilloscope peuvent également être supposés nuls, car V_m n'est pas un signal réel mais correspond à des données numérisées par l'oscilloscope.



L'analyse des paramètres S du circuit équivalent dans les conditions susmentionnées permet d'exprimer comme suit le champ électrique dans le domaine fréquentiel $E(f)$:

$$\begin{aligned} E(f) &= \frac{(1 - S_{11}\Gamma_a)(1 - S_{22}S_{11S})}{S_{21}S_{21S}} F_c(f) \mathfrak{F}[v_m(t)] \\ &= \frac{F_c(f)}{K} \mathfrak{F}[v_m(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

où $\mathfrak{F}[\]$ désigne la transformée de Fourier.

La forme d'onde du champ électrique est «reconstruite» en appliquant la transformée de Fourier inverse ($\mathfrak{F}^{-1}[\]$) à l'équation (11):

$$E(t) = \mathfrak{F}^{-1} \left[\frac{F_c(f)}{K} \mathfrak{F}[v_m(t)] \right] \quad (12)$$

3.3.3 Analyse spectrale dans une largeur de bande de résolution arbitraire

La puissance crête équivalente peut être calculée en utilisant la méthode suivante pour une RBW arbitraire. La forme d'onde à la sortie du BPF est obtenue comme suit:

$$E_f(t) = \mathfrak{F}^{-1} \left[\frac{F_c(f)G(f)}{K} \mathfrak{F}[v_m(t)] \right] \quad (13)$$

où $G(f)$ est la fonction de transfert du filtre gaussien (ayant par exemple une largeur de bande à -3 dB de 50 MHz).

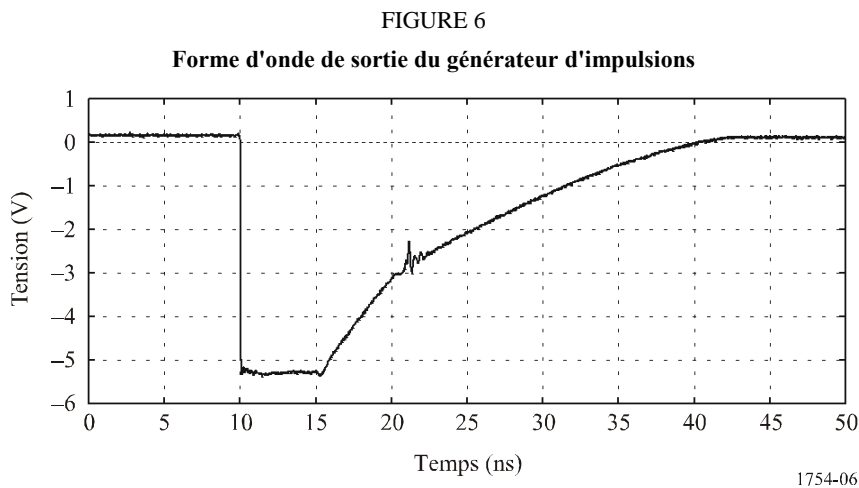
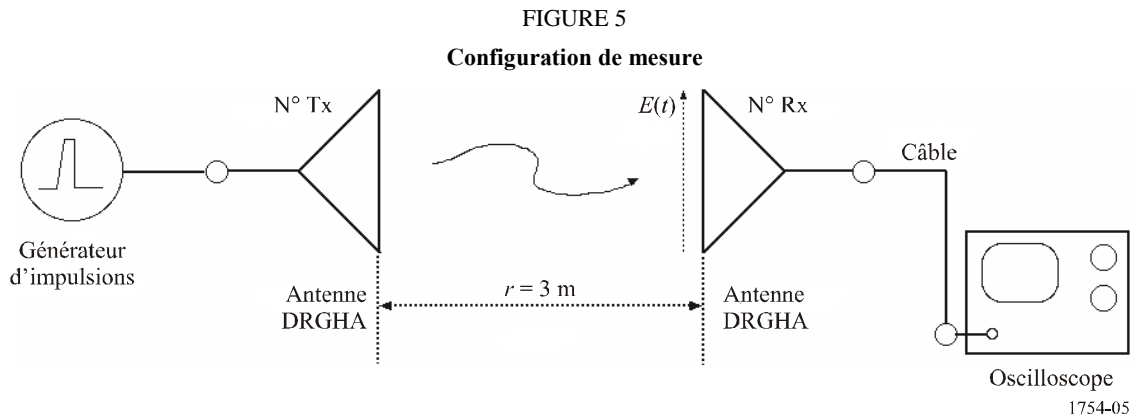
La p.i.r.e., $P_{PIRE}(t)$, s'exprime comme suit en fonction du champ électrique:

$$P_{PIRE}(t) = \frac{(E_f(t)r)^2}{30} \quad (14)$$

La valeur crête de la densité spectrale de puissance, $P_{p(50\text{ MHz})}$, s'obtient à partir de la valeur crête de $P_{PIRE}(t)$.

3.3.4 Exemple de mesure de la puissance crête dans le domaine temporel

On décrit dans le présent paragraphe un exemple de mesure du champ électrique. Le dispositif utilisé comprend un générateur d'impulsions UWB, des antennes, des câbles et un oscilloscope numérique à échantillonnage avec une tête échantillonnage à 20 GHz (voir la Fig. 5). La forme d'onde de sortie du générateur d'impulsions UWB est mesurée par un oscilloscope (voir la Fig. 6).

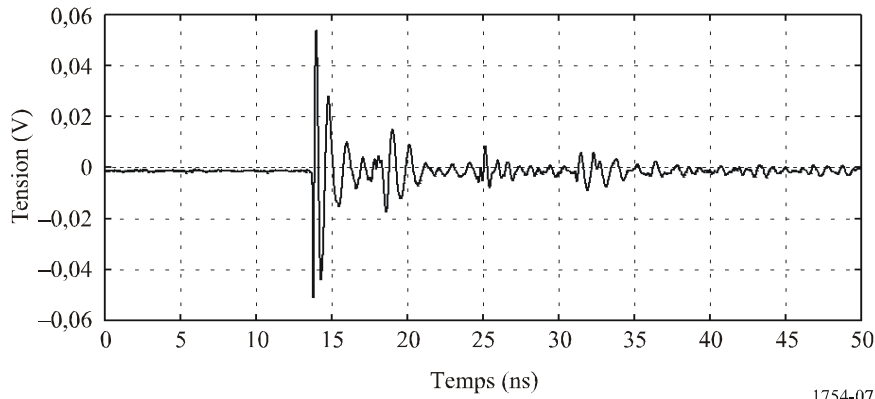


La distance entre les antennes d'émission et de réception est de 3 m et leur hauteur est de 1,5 m. La fréquence FRI du générateur est égale à 500 kHz. Les mesures sont effectuées dans une pièce ayant les dimensions suivantes: $6 \times 5 \times 2,5$ m.

La forme d'onde de sortie affichée par l'oscilloscope est reproduite sur la Fig. 7.

FIGURE 7

Forme d'onde affichée par l'oscilloscope

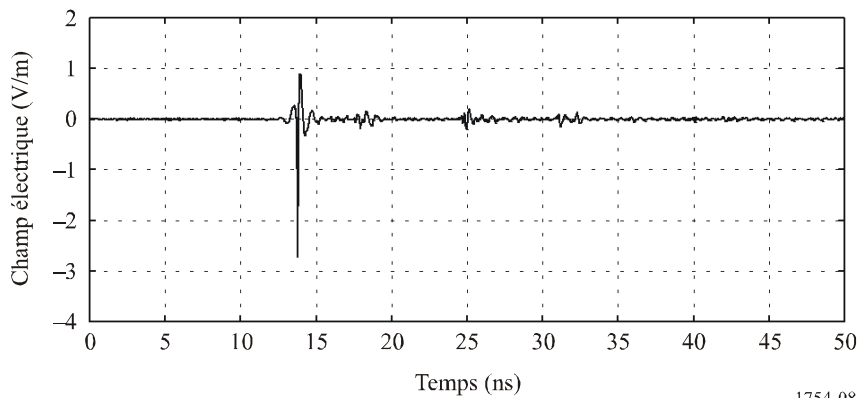


1754-07

On reconstruit ensuite la forme d'onde du champ électrique au point de réception en utilisant l'équation (12), à partir de la sortie de l'antenne de réception (voir la Fig. 8).

FIGURE 8

Forme d'onde du champ électrique reconstruit

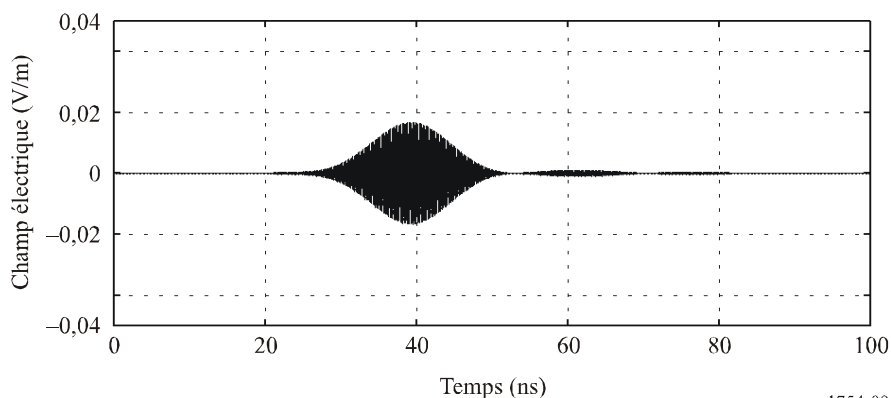


1754-08

La Fig. 9 montre la forme d'onde à la sortie d'un BPF de 50 MHz de largeur de bande, obtenue à partir de l'équation (13), en prenant l'exemple d'une fréquence centrale positionnée sur 5,8 GHz.

FIGURE 9

Forme d'onde à la sortie d'un BPF de 50 MHz pour une fréquence centrale de 5,8 GHz



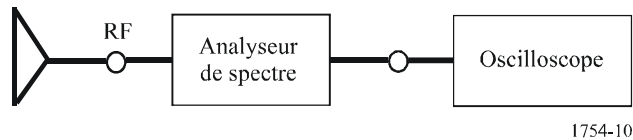
1754-09

On voit sur la Fig. 9 que la valeur crête est égale à 0,01683 V/m. La puissance crête calculée à partir de l'équation (14) est égale à 85,0 μ W (-10,7 dBm).

3.4 Association d'un analyseur de spectre et d'un oscilloscope pour des mesures dans le domaine temporel

La Fig. 10 représente un dispositif de mesure de la puissance crête, qui associe un analyseur de spectre et un oscilloscope. L'analyseur de spectre est utilisé comme convertisseur abaisseur de fréquence avec un filtre FI. La sortie FI de l'analyseur de spectre constitue l'entrée de l'oscilloscope.

FIGURE 10
Exemple d'association d'un analyseur de spectre et d'un oscilloscope



Les données numérisées en sortie de l'oscilloscope font l'objet d'un post-traitement logiciel, de façon analogue à ce qui a été décrit au § 3.3. Les étapes du processus sont les suivantes:

- Filtrage gaussien.
- Calcul de la puissance pour chaque échantillon.
- Recherche de la puissance maximale.
- Modification de la fréquence centrale de l'analyseur de spectre, puis retour à l'étape 1.

Dans cette configuration, la largeur de bande du dispositif de mesure est importante et le filtrage gaussien est réalisé au moyen d'un traitement numérique du signal. Le filtrage dans la RBW est mis en œuvre dans le domaine numérique sans distorsion de phase, contrairement à ce qui se passerait si on utilisait un filtre analogique.

L'analyseur de spectre et l'oscilloscope devraient satisfaire aux prescriptions techniques suivantes:

- l'amplitude dans la bande passante de l'analyseur de spectre devrait être constante;
- la phase dans la bande passante devrait être linéaire;
- le gain de conversion de l'entrée RF vers la sortie FI devrait être étalonné;
- la largeur de bande d'entrée de l'oscilloscope devrait être d'au moins 500 MHz;
- un étalonnage est nécessaire pour chaque fréquence de mesure.

Appendice 1

Abréviations utilisées dans la présente Recommandation

ADC	convertisseur analogique-numérique (<i>analogue-to-digital converter</i>)
AFB	amplificateur à faible bruit (LNA, <i>low-noise amplifier</i>)
BPF	filtre passe-bande (<i>band-pass filter</i>)
BW	largeur de bande (<i>bandwidth</i>)

CAF	facteur d'antenne complexe (<i>complex antenna factor</i>)
CCDF	fonction de distribution cumulative complémentaire (<i>complementary cumulative distribution function</i>)
CEI	Commission électrotechnique internationale
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques
DRGHA	antenne cornet à guide d'ondes à deux moulures (<i>double ridged waveguide horn antenna</i>)
EMI	brouillage électromagnétique (<i>electromagnetic interference</i>)
EUT	équipement sous test (<i>equipment under test</i>)
FI	fréquence intermédiaire
FRI	fréquence de répétition des impulsions (PRF, <i>pulse repetition frequency</i>)
GPR	radar à pénétration dans le sol (<i>ground penetrating radar</i>)
LPF	filtre passe-bas (<i>low pass filter</i>)
MA	antenne de mesure (<i>measurement antenna</i>)
MROF	multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM, <i>orthogonal frequency division multiplexing</i>)
NF	facteur de bruit (<i>noise figure</i>)
OATS	site d'essai en espace libre (<i>open area test site</i>)
p.i.r.e.	puissance isotrope rayonnée équivalente effective
PSD	densité spectrale de puissance (<i>power spectral density</i>)
RBW	largeur de bande de résolution (<i>resolution bandwidth</i>)
RF	fréquence radioélectrique (<i>radio frequency</i>)
r.m.s.	valeur efficace (<i>root-mean-square</i>)
SA	analyseur de spectre (<i>spectrum analyser</i>)
SGHA	antenne cornet à gain normalisé (<i>standard gain horn antenna</i>)
S/N	rapport signal sur bruit (<i>signal-to-noise ratio</i>)
TFR	transformée de Fourier rapide
UWB	bande ultralarge (<i>ultra-wideband</i>)
VBW	largeur de bande vidéo (<i>video bandwidth</i>)
WIR	radar d'imagerie à travers les murs (<i>wall imaging radar</i>)
