

## Conditions d'équivalence des mesures ou simulations de NPR et d'EVM

Jacques SOMBRIN

CNES, DCT/RF, 18 Avenue Edouard BELIN, 31401 TOULOUSE Cedex 9  
jacques.sombrin@free.fr

### Résumé

Le NPR (noise power ratio) et l'EVM (error vector magnitude) sont deux méthodes de mesure des distorsions ou des dégradations, linéaires ou non, des modulateurs numériques et des chaînes de transmission de signaux modulés.

Chaque méthode mesure un bruit qui peut être ajouté au bruit thermique du système dans le bilan de liaison.

On montre dans quelles conditions ces deux mesures donnent la même valeur et comment on peut remplacer l'une par l'autre afin de simplifier les simulations ainsi que les bancs de mesure, en particulier pour des mesures en large bande.

### 1. Introduction

Le NPR (noise power ratio) et l'EVM (error vector magnitude) sont deux méthodes de mesure des distorsions et des dégradations, linéaires ou non, des modulateurs numériques et des chaînes de transmission de signaux modulés.

Le NPR est surtout utilisé pour mesurer les dégradations dues aux produits d'intermodulation ajoutés aux signaux par les amplificateurs non linéaires.

L'EVM est surtout utilisé pour mesurer les défauts des modulateurs et l'ensemble des distorsions ajoutées par les chaînes de transmission.

Chaque méthode mesure un bruit qui est la valeur moyenne quadratique d'une erreur par rapport au signal parfait. On ajoute ce bruit au bruit thermique dans le bilan de liaison pour obtenir le taux d'erreur de bit et pour optimiser la chaîne de transmission [4].

Si ces deux méthodes sont exactes et appliquées au même équipement, elles doivent bien entendu donner la même valeur pour ce bruit. Il faut toutefois que les conditions de mesure communes soient correctes pour les deux méthodes. On étudie dans ce papier quelles sont ces conditions et on démontre que les résultats sont effectivement identiques.

Dans quelques cas qui seront précisés, les deux méthodes commettent la même erreur et une correction sera proposée.

Enfin, on décrit quelques cas où le remplacement d'une mesure par l'autre permet de s'affranchir de

certaines difficultés de réalisation des bancs de mesure large bande.

### 2. Mesure d'EVM

La mesure d'EVM consiste à réaliser une partie de la démodulation d'un signal portant une modulation numérique (boucle de fréquence et de phase, filtrage adapté et échantillonnage optimal) afin de pouvoir présenter les échantillons dans le plan complexe [3].

On enlève l'offset ou décalage statique afin que la somme vectorielle des plots de phase soit nulle. On applique un gain moyen permettant d'amener la puissance moyenne des plots de phase à la puissance moyenne du signal parfait. De même, on applique un déphasage permettant de minimiser l'erreur de phase entre les plots réels et les plots théoriques.

L'ensemble des ces actions permet de minimiser l'amplitude (en moyenne quadratique) de l'erreur vectorielle résiduelle entre les plots réels et les plots théoriques. On obtient une constellation typique comme celle présentée sur la figure suivante.

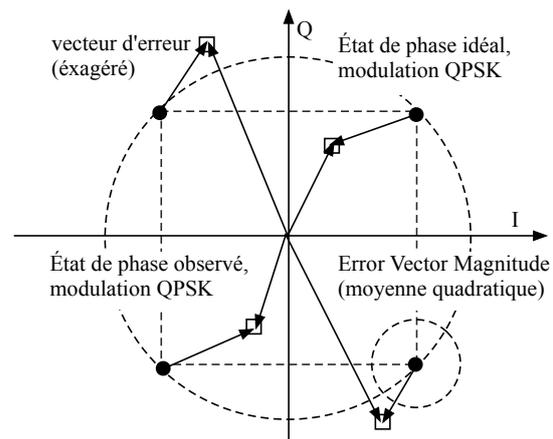


figure 1 : Constellation typique QPSK

L'EVM, exprimé en % est le rapport entre l'écart type de cette erreur vectorielle et l'amplitude moyenne des plots théoriques, donc le rapport entre l'amplitude moyenne du bruit équivalent et celle du signal. On a :

$$C/N = (1/EVM)^2$$

L'EVM permet de caractériser les déséquilibres d'amplitude et de phase en sortie d'un modulateur ou bien en sortie d'une chaîne de transmission. Cette mesure inclut le bruit propre du modulateur et le bruit additif de la chaîne de transmission. Un bon modulateur a un EVM de 1 à 2 % donnant un C/N équivalent de 34 à 40 dB.

Compte tenu de la définition de la méthode de mesure appliquée, l'EVM peut être utilisé en entrée et en sortie d'une chaîne non linéaire pour évaluer ses distorsions à condition que l'offset initial soit nul.

En effet, un offset non nul ne serait pas pris en compte par la mesure en entrée de la chaîne mais entraînerait une dégradation importante dans la chaîne non linéaire. Cette dégradation importante serait mesurée en sortie. Une cause possible de cet offset est la mauvaise isolation de l'oscillateur local. Le parasite doit être au moins à 40 dB sous le signal modulé.

### 3. Mesure de NPR

Plusieurs méthodes de mesure du NPR sont utilisées.

#### 3.a. Méthode analytique

Elle consiste à mesurer les produits d'intermodulation provenant de porteuses pures et à réaliser un calcul analytique du bruit qui serait provoqué par un grand nombre de porteuses équidistantes en fréquence, de puissances identiques et de phases incohérentes. Cette méthode est décrite dans [1].

#### 3.b. Méthode du notch (bande rejetée)

Une deuxième méthode est basée sur l'utilisation d'un signal formé d'une bande passante de bruit blanc gaussien dont une petite bande centrale a été éliminée par un filtre de réjection (notch). Après passage de ce signal dans une non linéarité, le NPR est le rapport entre la densité spectrale de puissance mesurée dans la bande du signal et la densité spectrale de puissance de bruit mesurée dans la bande rejetée, voir figure 2. La méthode du notch fait une mesure en un seul point de la bande, en général au centre (cas pire). La mesure est le rapport entre le signal observé (bruit inclus) et le bruit :

$$NPR_{mesuré} = (C + N) / N$$

Dans les bilans de liaison, on doit utiliser :

$$C / N = NPR_{vrai} = NPR_{mesuré} - 1$$

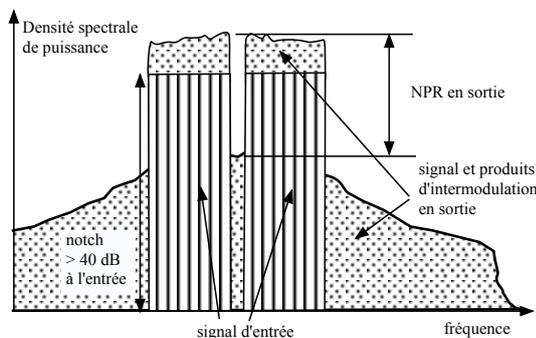


figure 2 : Mesure du NPR par la méthode du notch

La mesure est limitée par le bruit résiduel dans la bande coupée du filtre (le notch) qui est de l'ordre de 40 dB pour des équipements hyperfréquences analogiques.

#### 3.c. Méthode du gain équivalent

Une troisième méthode est basée sur le calcul du gain équivalent (complexe, amplitude et phase) par corrélation du signal en entrée et du signal en sortie de la non linéarité [2]. Le bruit d'intermodulation est la différence entre le signal total et la partie de ce signal qui est corrélée avec le signal d'entrée. Le NPR est le rapport entre ces deux parties (directement le C/N, ici).

#### 3.d. Définition commune aux 3 méthodes

Les trois méthodes de mesure répondent à cette définition : le bruit d'intermodulation est la partie du signal de sortie qui est non corrélée avec le signal d'entrée. Le NPR vrai (C/N) est le rapport entre la puissance de la partie du signal de sortie corrélée avec le signal d'entrée et la puissance de la partie non corrélée.

La méthode du gain équivalent est l'application directe de cette définition mais on voit que la méthode du notch et la méthode analytique y répondent aussi car le spectre du signal et le spectre dans lequel on mesure le bruit d'intermodulation sont disjoints, donnant une corrélation nulle (de plus elle est nulle quel que soit le retard entre le signal et le bruit).

Comme pour l'EVM, la définition du NPR inclut le bruit propre de la chaîne et les parasites s'il y en a.

### 4. Conditions d'identité

#### 4.a. Identité des valeurs obtenues

On démontre qu'après élimination de l'offset, la mesure d'EVM consiste à réaliser une corrélation avec la réponse temporelle renversée du filtre adapté (qui est celle du filtre d'émission) donc à calculer la corrélation avec un symbole filtré du signal d'entrée. La minimisation de l'erreur, par ajustement de l'amplitude et de la phase, revient à annuler la corrélation entre le bruit et le signal parfait comme dans la méthode du gain équivalent.

Le NPR défini à partir de la corrélation entrée-sortie donne le même résultat si le signal est composé d'un train de symboles aléatoires et si le bruit d'intermodulation est filtré par un filtre adapté au signal, identique à celui utilisé dans l'EVM.

#### 4.b. Nécessité d'un filtrage additionnel

Le bruit d'intermodulation est large bande, trois fois la bande du signal pour les produits d'ordre 3. De plus, il subit une variation de 1,8 dB dans la bande passante.

Dès lors que le signal modulé a un rythme symbole plus grand que 10% de la bande du canal, le bruit d'intermodulation ne peut plus être considéré comme blanc. Pour obtenir une valeur de NPR utilisable dans les bilans de liaison, la méthode la plus rigoureuse est de mesurer le bruit d'intermodulation après passage dans un filtre adapté, identique à celui qui sera utilisé dans le récepteur.

Nous proposons donc d'ajouter la condition d'utilisation d'un filtre adapté à la définition du NPR. Dans le cas où le signal comporte un petit nombre de porteuses (<8), cela améliore la cohérence entre la mesure du taux d'erreur de bit et la prévision faite à partir du bilan de liaison et du NPR. Dans le cas d'un

grand nombre de porteuses, on peut en général considérer le bruit mesuré comme blanc et utiliser la bande équivalente de bruit du filtre adapté, ce qui revient à ajouter la densité spectrale de puissance du bruit d'intermodulation à celle du bruit thermique.

L'utilisation d'un filtre adapté est indispensable pour la mesure de l'ACPR (adjacent channel power ratio) à cause de la pente des produits d'intermodulation à l'extérieur de la bande du signal.

#### 4.c. Application à un multiplex de porteuses

Lorsque plusieurs porteuses sont amplifiées dans le même amplificateur, la méthode du gain équivalent ne peut être appliquée rigoureusement qu'à une seule porteuse à la fois.

En effet, si les porteuses n'ont pas exactement la même amplitude, elles auront des gains différents dans l'amplificateur donc différents du gain équivalent qui sera une valeur moyenne sur l'ensemble du signal. Le signal provenant de la différence entre le gain sur chaque porteuse et le gain équivalent serait compté comme du bruit non corrélé au signal global.

Il faut donc appliquer la méthode à une seule porteuse à la fois, les autres étant considérées comme du bruit. A la sortie de l'amplificateur, ce bruit doit être filtré (dans un filtre adapté) afin de ne prendre en compte que la partie du NPR et des ACPR venant des autres porteuses qui contribueront effectivement au bruit dans le récepteur.

La mesure d'EVM s'applique toujours à une seule porteuse et filtre le bruit avant mesure donc est toujours correcte de ce point de vue.

#### 4.d. Interférences et raies parasites

La mesure de non linéarités par l'EVM est par contre moins robuste aux raies parasites :

Une raie d'OL sera négligée mais peut créer des produits d'intermodulation et augmenter fortement la valeur d'EVM mesurée après la non linéarité ;

Des raies d'interférences à des fréquences différentes peuvent au contraire faire tourner les points de la constellation et leur amplitude crête sera mesurée comme un écart type de bruit ou de distorsion dans l'EVM.

Il faut donc éliminer les raies du générateur et du modulateur avant la non linéarité et filtrer les interférences avant mesure.

#### 4.e. Ordre de grandeur des erreurs de mesure

Si le modulateur a un offset nul et un EVM inférieur à 1%, soit un rapport signal à bruit de 40 dB, il permettra d'évaluer correctement des chaînes amenant une dégradation supérieure soit des rapports signal à bruit inférieurs à 30 dB (EVM > 3%).

Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle que l'on obtient sur le NPR par la méthode du notch avec une réjection de 40 dB.

L'EVM et le NPR étant des mesures quadratiques du bruit, il n'est pas possible de soustraire la valeur mesurée en sortie du générateur de celle mesurée en sortie de la chaîne. Dans certain cas, la mesure peut même bénéficier

de la distorsion du générateur et donner une valeur en sortie de la chaîne meilleure que celle en entrée. Avec un banc limité par un plancher de bruit à 40 dB (EVM de 1%), une mesure de NPR de 40 dB (EVM de 1%) en sortie de la chaîne peut indiquer un effet de la chaîne compris entre 34 dB et l'infini.

Il faut donc améliorer au maximum le plancher de bruit, vraisemblablement en utilisant des générateurs et modulateurs numériques.

## 5. Cas d'erreurs communes

L'identité formelle de l'EVM et du NPR est telle que les deux méthodes donnent la même valeur systématiquement erronée (en ce sens qu'elle ne doit pas être utilisée telle quelle dans le bilan de liaison) dans quelques cas particuliers comme l'écrêtage de porteuses modulées en phase et bruitées.

La figure 3 montre un exemple de constellation obtenue en sortie d'un amplificateur fortement non linéaire comme un tube à onde progressive non linéarisé. Le signal d'entrée de la non linéarité est composé d'une porteuse modulée quadriphase et de bruit blanc gaussien additif (composantes non corrélées et de même écart-type dans les deux dimensions).

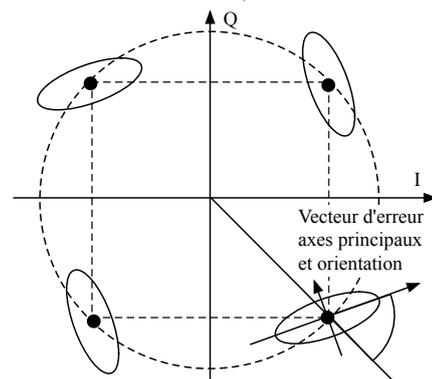


figure 3 : Distorsion du bruit additif

En sortie, les boules de bruit sont déformées. Elles se rapprochent d'ellipses ou de croissants qui ont des écarts-types différents suivant deux axes orthogonaux et l'axe principal fait un angle avec le rayon du signal. Pendant la durée d'un symbole, le vecteur de bruit est corrélé avec le signal. Toutefois le principe de mesure, tant du NPR que de l'EVM, revient à ajouter les 4 boules de bruit avant de calculer les écarts type. Ceci annule la corrélation totale. Ces erreurs ont été reproduites par simulation et par mesure. Elles atteignent 3 dB dans le cas d'un écrêteur parfait.

Une correction des méthodes de mesure est proposée pour éviter ces erreurs. On peut :

- Mesurer séparément les deux écarts type et l'angle entre le bruit et le signal en ramenant tous les signaux au même point par rotation et non en faisant directement la différence entre le signal réel et le signal théorique ;
- Mesurer séparément le bruit d'amplitude, le bruit de phase et éventuellement leur corrélation ;

- Ou bien placer un écrêteur parfait avant la mesure (de NPR ou d'EVM) afin de ne mesurer que la composante perpendiculaire au signal (le bruit de phase seul) et ajouter 3 dB au bruit mesuré pour obtenir le bruit blanc gaussien équivalent qu'il faut prendre en compte dans le bilan de liaison.

## 6. Nouvelles procédures de mesure

Les mesures de NPR comme d'EVM butent aujourd'hui sur la disponibilité d'équipements permettant de générer et de filtrer du bruit blanc gaussien très large bande (500 MHz à 2 GHz) ou de générer et mesurer des signaux modulés ayant des rythmes de symboles de 500 MBauds à 2 GBauds.

### 6.a. Mesure d'un multiplex

L'identité du NPR et de l'EVM permet d'évaluer le NPR au sein d'un multiplex large bande en réalisant une mesure d'EVM sur une porteuse au centre du multiplex.

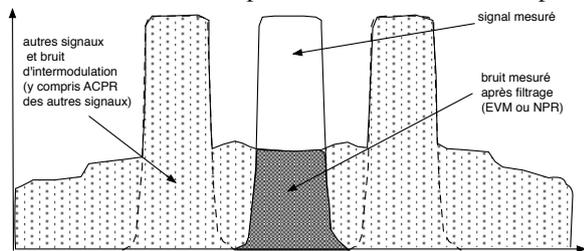


figure 4 : Mesure d'une porteuse d'un multiplex

L'utilisation de 8 à 10 porteuses permet d'être très proche de la valeur du NPR correspondant à un nombre infini de porteuses et de multiplier la bande passante du banc par 8 à 10. La modulation des porteuses qui ne sont pas mesurées doit être identique (symboles, rythme, forme du filtrage) mais le code correcteur d'erreurs n'est pas nécessaire. Par contre, les données de modulation doivent être non corrélées entre elles.

### 6.b. Mesure d'une porteuse modulée

Pour une porteuse unique modulée, la mesure de l'EVM permet d'avoir accès au NPR dans les conditions d'utilisation nominales en utilisant un équipement du commerce reproductible plutôt qu'un montage spécifique.

### 6.c. Modification des mesureurs d'EVM et de NPR

La méthode du gain équivalent et l'utilisation de la corrélation entrée-sortie permettrait d'ajuster efficacement le gain dans un mesureur d'EVM.

Par ailleurs il est nécessaire de modifier les équipements de mesure et les logiciels de simulation, EVM ou NPR, si on veut les utiliser correctement dans le cas d'une porteuse modulée en phase et de bruit additif passant dans un amplificateur non linéaire. Si ce n'est pas le cas, il faut tenir compte de la possibilité d'erreur due à la corrélation du bruit et du signal en sortie de la non linéarité.

### 6.d. Mesure de NPR très large bande

Enfin pour les mesures en très large bande, il semble intéressant de revenir à la méthode du NPR analytique. A partir de 8 porteuses pures décalées correctement en

fréquence, il est possible de mesurer le bruit dans une bande qui ne contient pas de signal sans avoir besoin de la filtrer.

La figure 5 donne un tel spectre obtenu par simulation. Tous les produits d'ordre 3 ont des fréquences différentes, ce qui permet d'en réaliser la somme en puissance sans avoir besoin de réaliser un grand nombre de mesures avec des phases aléatoires.

Ce spectre peut être réalisé simplement à partir de sources ou d'un AWG, les mesures seront réalisées au CNES sur un ATOP linéarisé.

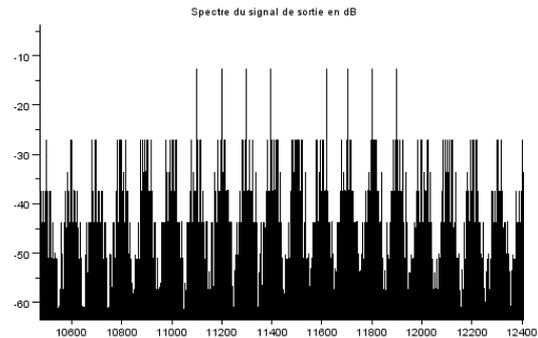


figure 5 : Spectre de NPR à 8 porteuses pures

## 7. Conclusion

L'étude détaillée des méthodes de mesure d'EVM et de NPR a permis de montrer leur identité formelle pour peu que des hypothèses assez peu contraignantes soient faites : pas d'offset, symboles aléatoires, filtrage du NPR.

Ces hypothèses se révèlent d'ailleurs nécessaires si l'on veut obtenir des valeurs de mesures non biaisées.

Cette étude a permis de mettre en évidence des cas où les deux types de mesure font une erreur systématique et de proposer des corrections.

Elle a permis aussi de définir de nouveaux bancs de mesure des non linéarités en large bande.

## 8. Bibliographie

- [1] R. J. Westcott, "Investigation of multiple FM+FDM carriers through satellite TWT operating near to saturation", proc. IEE, Vol. 114, No. 6, June 1967, pp. 726-740
- [2] S. W. Chen, W. Panton, and R. Gilmore: "Effects of nonlinear distortion on CDMA communication systems", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 44, no 12, December 1996, pp 2743-2749
- [3] A. Mashhour and A. Borjak: "A method for computing error vector magnitude in GSM EDGE systems-simulation results", IEEE COM Letters, vol. 5, No 3, March 2001, pp. 88-91
- [4] J. Sombrin: "Optimization criteria for power amplifiers", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Volume 3, Issue 01, pp 35 - 45, published on line February 3, 2011