

BER, SNR,  $\frac{Eb}{N0}$  et autres joyeusetés

Mehdi Khairy

2019-01-01

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Définition</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Puissance du signal</b>	<b>2</b>
3.1	Puissance d'un échantillon . . . . .	2
3.2	Puissance moyenne . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Ajout de bruit</b>	<b>5</b>
4.1	Génération du bruit . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Energie par bit</b>	<b>6</b>

## 1 Introduction

Ce document à pour but de regrouper les informations nécessaires à la compréhension du calcul de BER d'une modulation numérique.

## 2 Définition

**k** : constante de Boltzmann  $13.8064852 \cdot 10^{-24} \text{J/K}$

**N0** : densité de bruit par Hz dans la bande en W/Hz

**Eb** : energie du signal par bit transmis en W

**Db** : débit binaire de l'information transmise en *bits/s*

**Es** : energie du signal par symbole transmis en W

**Ds** : débit symbole en *symbole/s*

### 3 Puissance du signal

#### 3.1 Puissance d'un échantillon

Le signal modulé en bande de base peut-être représenté sous la forme d'un produit de convolution entre la séquence de symboles à envoyer et le filtre de mise en forme:

$$st(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \mathbb{S}_k \cdot h(n - k.Ne)$$

Un signal numérique peut être considéré comme une suite de valeurs représentant des tensions (pour des courants il faudra adapter le facteur de correction), la puissance d'un tel signal peut donc être calculer avec la loi d'ohm  $P = U.I = \frac{|U|^2}{R}$  avec  $U = st(n) * \beta$  ou  $\beta$  est le facteur de multiplication de l'ADC. On défini donc la puissance du signal par:

$$P(n) = \frac{|st(n) * \beta|^2}{R} = |st(n)|^2 * \frac{|\beta|^2}{R}$$

On défini donc la constante  $\alpha = \frac{|\beta|^2}{R}$

$$P(n) = \left| \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \mathbb{S}_k \cdot h(n - k.Ne) \right|^2 * \alpha$$

Avec pour chaque  $k$ ,  $\mathbb{S}_k$  une variable aléatoire complexe représentant les valeurs possibles de la suite de symboles.  $Ne$  le nombre d'échantillons séparant l'émission de deux symboles et  $h(n)$  le filtre de mise en forme.

Les variables  $\mathbb{S}_k$  sont décorréliées. On a donc  $\mathbb{E}(\mathbb{S}_k \cdot \mathbb{S}_j^*) = 0$ . On peut donc calculer une espérance de la puissance du signal pour tous les échantillons:

$$\mathbb{E}(|st(n)|^2) = \mathbb{E} \left( \left| \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \mathbb{S}_k \cdot h(n - k.Ne) \right|^2 \right)$$

On peut simplifier le module au carré en le transformant en multiplication complexe, en effet:  $|a|^2 = a \cdot a^*$

$$\mathbb{E}(|st(n)|^2) = \mathbb{E} \left( \left( \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \mathbb{S}_k \cdot h(n - k.Ne) \right) \cdot \left( \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \mathbb{S}_j \cdot h(n - j.Ne) \right)^* \right)$$

Définissons  $\mathbb{S}_{kn} = \mathbb{S}_k.h(n-k.Ne)$  et  $\mathbb{S}_{jn}^* = \mathbb{S}_j^*.h(n-j.Ne)^*$ . On peut développer l'équation précédente.

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(|st(n)|^2) &= \mathbb{E} \left( \left( \sum_{k=j} \left( \mathbb{S}_{kn} \cdot \mathbb{S}_{jn}^* \right) \right) + \left( \sum_{k!=j} \left( \mathbb{S}_{kn} \cdot \mathbb{S}_{jn}^* \right) \right) \right) \\ &= \left( \sum_{k=j} \mathbb{E}(\mathbb{S}_{kn} \cdot \mathbb{S}_{jn}^*) \right) + \left( \sum_{k!=j} \mathbb{E}(\mathbb{S}_{kn} \cdot \mathbb{S}_{jn}^*) \right)\end{aligned}$$

Le deuxième terme peut s'écrire  $\sum_{k!=j} (\mathbb{E}(\mathbb{S}_{kn} \cdot \mathbb{S}_{jn}^*) \cdot h(n-k.Ne) \cdot h(n-j.Ne)^*)$  le deuxième terme est donc nul.

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(|st(n)|^2) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (\mathbb{E}(\mathbb{S}_k \cdot \mathbb{S}_k^*) \cdot (h(n-k.Ne) \cdot h(n-k.Ne)^*)) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (\mathbb{E}(|\mathbb{S}_k|^2) \cdot |h(n-k.Ne)|^2)\end{aligned}$$

Puisque  $\mathbb{E}(|\mathbb{S}_k|^2)$  ne dépend pas de  $k$  nous la renommons  $\mathbb{S}^2$ .

### 3.2 Puissance moyenne

Rappelons l'équation précédente:

$$\mathbb{E}(|st(n)|^2) = \mathbb{S}^2 \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2)$$

Définissons  $f(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2)$ . Pour calculer la puissance moyenne du signal il faut trouver une période sur laquelle baser la moyenne. Si  $f(n)$  est périodique de période  $Ne$  alors  $f(n) = f(n + Ne)$

$$\begin{aligned} f(n) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2) \\ f(n + Ne) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n + Ne - kNe)|^2) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n + (1 - k)Ne)|^2) \\ &= \sum_{k=-\infty+1}^{+\infty+1} (|h(n - kNe)|^2) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2) \\ f(n) &= f(n + Ne) \end{aligned}$$

On en déduit donc que  $Pst$ , la puissance moyenne du signal  $st$  est définie de la façon suivante:

$$\begin{aligned} Pst &= \frac{1}{Ne} \cdot \sum_{n=0}^{Ne-1} \mathbb{E}(|st(n)|^2) \\ &= \frac{1}{Ne} \cdot \sum_{n=0}^{Ne-1} \left( \mathbb{S}^2 \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2) \right) \\ &= \mathbb{S}^2 \cdot \frac{\sum_{n=0}^{Ne-1} \left( \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2) \right)}{Ne} \end{aligned}$$

On peut simplifier  $\sum_{n=0}^{Ne-1} \left( \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(n - kNe)|^2) \right)$  en  $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(k)|^2)$  on a donc:

$$Pst = \mathbb{S}^2 \cdot \frac{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} (|h(k)|^2)}{Ne}$$

## 4 Ajout de bruit

Le bruit ajouté par le canal n'est pas filtré par le filtre de mise en forme des données il occupe donc toute la bande d'échantillonnage complexe (la moitié en réel). On considère qu'il s'agit d'un bruit blanc additif. Le bruit  $Nk$  peut-être modélisé comme une variable aléatoire de variance 1 et d'espérance 0 additionnée au signal.

INSERER ICI JOLI GRAPH POURRI

La puissance du bruit  $Pn = \mathbb{E}(|Nk|^2)$ , sa densité  $N0 = \frac{Pn}{Fe}$  ou  $Fe$  est la fréquence d'échantillonnage, cependant cela n'est vrai qu'en complexe. En effet, la bande du signal échantillonné de manière complexe va de  $-\frac{Fe}{2}$  à  $\frac{Fe}{2}$ , en réel cette bande va de 0 à  $\frac{Fe}{2}$

### 4.1 Génération du bruit

Rappelons Variance de  $Nk$ :

$$\sigma^2(Nk) = \mathbb{E}(|Nk|^2) - |\mathbb{E}(Nk)|^2$$

A compléter plus tard sur la génération du bruit.

## 5 Energie par bit

Rappelons tout d'abord l'équation complète utilisée pour calculer le BER d'une modulation:

$$\frac{Eb.Db}{N0.BW}$$

Avec  $Eb$  qui est l'énergie par bit en Joules,  $Db$  le débit binaire en  $bits.s^{-1}$ ,  $N0$  la densité de bruit en  $watt.s^{-1}$ . Définissons l'énergie par bit  $Eb$  comme étant l'énergie d'un symbole  $Es = Pst * Ne$  (énergie totale d'un symbole), divisée par le nombre de bit d'un symbole  $Nb$ .