UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T J.133

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

(07/2002)

SÉRIE J: RÉSEAUX CÂBLÉS ET TRANSMISSION DES SIGNAUX RADIOPHONIQUES, TÉLÉVISUELS ET AUTRES SIGNAUX MULTIMÉDIAS

Transport des signaux MPEG-2 sur les réseaux par paquets

Mesure des flux de transport MPEG-2 dans les réseaux

Recommandation UIT-T J.133

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE J

RÉSEAUX CÂBLÉS ET TRANSMISSION DES SIGNAUX RADIOPHONIQUES, TÉLÉVISUELS ET AUTRES SIGNAUX MULTIMÉDIAS

Recommandations générales	J.1–J.9
Spécifications générales des transmissions radiophoniques analogiques	J.10–J.19
Caractéristiques de fonctionnement des circuits radiophoniques analogiques	J.20–J.29
Equipements et lignes utilisés pour les circuits radiophoniques analogiques	J.30–J.39
Codeurs numériques pour les signaux radiophoniques analogiques	J.40–J.49
Transmission numérique de signaux radiophoniques	J.50–J.59
Circuits de transmission télévisuelle analogique	J.60–J.69
Transmission télévisuelle analogique sur lignes métalliques et interconnexion avec les faisceaux hertziens	J.70–J.79
Transmission numérique des signaux de télévision	J.80–J.89
Services numériques auxiliaires propres aux transmissions télévisuelles	J.90–J.99
Prescriptions et méthodes opérationnelles de transmission télévisuelle	J.100–J.109
Services interactifs pour la distribution de télévision numérique	J.110–J.129
Transport des signaux MPEG-2 sur les réseaux par paquets	**J.130–J.139**
Mesure de la qualité de service	J.140–J.149
Distribution de la télévision numérique sur les réseaux locaux d'abonnés	J.150–J.159
IPCablecom	J.160–J.179
Divers	J.180–J.199
Application à la télévision numérique interactive	J.200–J.209

Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.

Recommandation UIT-T J.133

Mesure des flux de transport MPEG-2 dans les réseaux

Résumé

Les flux de transport MPEG-2 qui sont transmis sur des réseaux réels sont exposés à certains effets causés par les composantes de réseau qui ne sont pas parfaitement transparents. Un des effets prédominants est l'acquisition de gigue en fonction des valeurs de référence PCR et de leur position dans le flux TS. La présente Recommandation spécifie les mesures qui permettent la détermination de cette gigue.

Source

La Recommandation J.133 de l'UIT-T, élaborée par la Commission d'études 9 (2001-2004) de l'UIT-T, a été approuvée le 29 juillet 2002 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2002
Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références	1
2.1	Références normatives	1
2.2	Références informatives	1
3	Abréviations et acronymes	1
4	Mesures d'horloge du système et de référence PCR	1
4.1	Modèle de référence pour mesures d'horloge du système et de référence PCR	1
4.2	Description des mesures	3
4.3	Référence d'horloge de programme – Décalage de fréquence PCR_FO	4
4.4	Référence d'horloge de programme – Vitesse de dérive (PCR_DR)	4
4.5	Référence d'horloge de programme – Gigue globale (PCR_OJ)	5
4.6	Référence d'horloge de programme – Exactitude (PCR_AC)	5
Appendice I – Mesures relatives à la référence PCR		6
I.1	Introduction	6
I.2	Limites	6
I.3	Equations	7
I.4	Masque	8
I.5	Fréquences de coupure	9
I.6	Autres limitations implicites	11
I.7	Procédures de mesure	11
I.7.1	PCR_Accuracy (PCR_AC)	14
I.7.2	PCR_drift_rate (PCR_DR)	15
I.7.3	PCR_frequency_offset (PCR_FO)	15
I.7.4	Mesure de la gigue PCR_overall_jitter	16
I.8	Considérations sur l'exécution de mesurages de référence PCR	17
I.9	Choix de filtres en mesure de référence PCR	18
I.9.1	Pourquoi y a-t-il un choix?	18
I.9.2	Fréquences de démarcation très élevées	20
I.9.3	Fréquences de démarcation très basses	20

Recommandation UIT-T J.133

Mesure des flux de transport MPEG-2 dans les réseaux

1 Domaine d'application

Un flux de transport MPEG-2 qui est transmis sur un réseau réel est exposé à certains effets causés par les composantes de réseau qui ne sont pas parfaitement transparents. Un des effets prédominants est l'acquisition de gigue en fonction des valeurs de référence PCR et de leur position dans le flux TS. Les quatre paramètres de mesure définis ci-après décrivent les divers composants de gigue qui peuvent être différenciés par des fréquences de démarcation.

2 Références

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce documnet en tant que tel le statut d'une Recommandation.

2.1 Références normatives

[1] Recommandation UIT-T H.222.0 (2000) | ISO/CEI 13818-1: 2000, *Technologies de l'information – Codage générique des images animées et du son associé: systèmes*.

[2] ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001), *Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems*.

2.2 Références informatives

[3] ISO/CEI 13818-9:1996, *Technologies de l'information – Codage générique des images animées et des informations sonores associées – Partie 9: extension pour interface temps réel pour systèmes décodeurs*.

3 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise l'abréviation suivante:

PCR référence d'horloge de programme (*program clock reference*)

4 Mesures d'horloge du système et de référence PCR

4.1 Modèle de référence pour mesures d'horloge du système et de référence PCR

Ce paragraphe présente un modèle de référence (voir Figure 1) pour une source quelconque d'un flux de transport (TS, *transport stream*) concernant la production de valeurs PCR et temps d'acheminement à destination. Il modélise tous les effets de synchronisation visibles au point d'interface avec le flux TS. Il n'est pas prévu de représenter tous les mécanismes par lesquels ces effets de synchronisation pourraient se produire dans des systèmes réels.

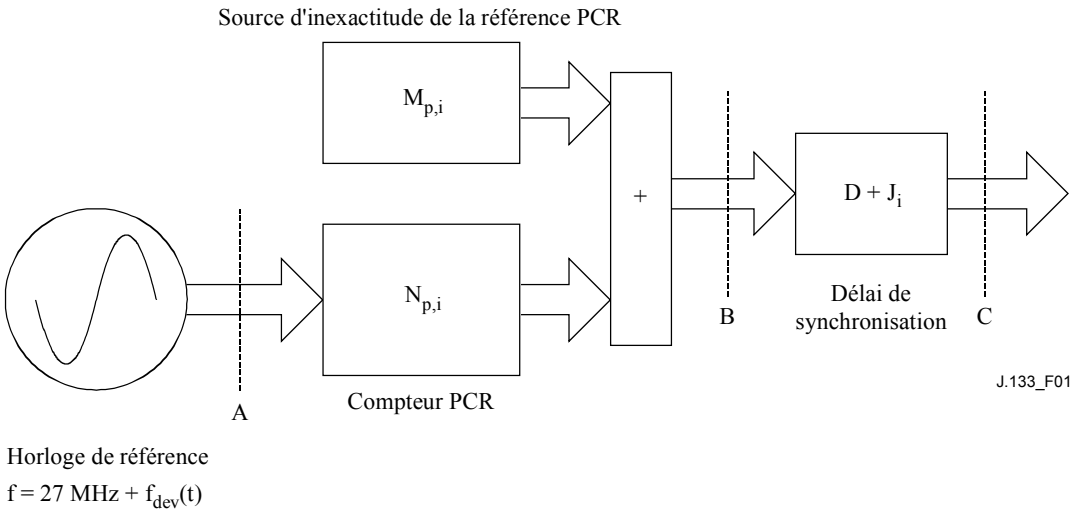


Figure 1/J.133 – Modèle de référence

Les points de référence sont indiqués par des pointillés. C'est un modèle de codeur/multiplexeur (jusqu'au point de référence B) et un mécanisme de remise physique ou un réseau de communications (entre les points de référence B et C). Les composants du modèle situés à gauche du point de référence B sont particuliers à chaque identificateur de paquet (PID, *packet identifier*) de référence PCR. Les composants du modèle situés à droite du point de référence B se rapportent à l'ensemble du flux de transport. L'appareillage de mesure ne peut habituellement accéder au flux TS qu'au point de référence C.

Le modèle se compose d'un oscillateur à une fréquence d'horloge du système ayant une fréquence nominale de 27 MHz, mais dont une fréquence réelle s'en écarte d'une fonction f_{dev} (p,t). Cette fonction dépend du temps (t) et est particulière à chaque identificateur PID de référence PCR (p). Le "décalage de fréquence PCR_FO" mesure la valeur de f_{dev} (p,t). La "vitesse de dérive PCR_DR" est la vitesse de variation avec le temps de f_{dev} (p,t).

L'oscillateur de fréquence d'horloge du système pilote un compteur PCR qui produit une décompte PCR théorique, $N_{p,i}$. Le symbole p désigne l'identificateur PID particulier à la référence PCR et le symbole i désigne la position du bit dans le flux de transport. L'on y ajoute une valeur provenant d'une source d'inexactitude de référence PCR, $M_{p,i}$ afin de créer la valeur de référence PCR vue dans le flux, $P_{p,i.}$

La relation simple entre ces valeurs est:

$$P_{p,i} = N_{p,i} + M_{p,i} \tag{1}$$

$M_{p,i}$ représente l'"exactitude PCR_AC".

Le mécanisme de remise physique ou le réseau de communications au-delà du point B introduit un retard variable entre le temps de départ T_i et le temps d'arrivée U_i de bits:

$$U_i - T_i = D + J_i \tag{2}$$

Dans le cas d'une référence PCR, U_i est le temps d'arrivée du dernier bit du dernier octet contenant la base de référence PCR (voir § 2.4.3.5 de la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1). D est une constante représentant le délai moyen dans le réseau de communication. J_i représente la gigue du temps de propagation dans le réseau et sa valeur moyenne dans le temps total est définie comme étant zéro. Le terme $J_i + M_{p,i}$ est mesuré en tant que "gigue globale PCR_OJ".

Dans le cas courant où le flux de transport est à débit constant, au point de référence B, le flux de transport est transmis au débit constant R_{nom}. Il est important de noter que dans ce modèle de

référence, ce débit binaire est exact et constant; il n'y a pas de contribution d'erreur par variation du débit binaire, ce qui donne une équation supplémentaire pour le temps de départ de paquets:

$$T_i = T_0 + \frac{i}{R_{nom}} \tag{3}$$

T_0 est une constante représentant le temps de départ du zéro^{ième} bit. Par combinaison des équations (2) et (3), l'on obtient pour le temps d'arrivée:

$$U_i = T_0 + \frac{i}{R_{nom}} + D + J_i \tag{4}$$

4.2 Description des mesures

Les mesures suivantes nécessitent une fréquence de démarcation pour délimiter l'étendue des vitesses de dérive et des fréquences de gigue lors de variations de rythme de références PCR et/ou de flux TS.

La fréquence de démarcation utilisée devrait être choisie dans le Tableau 1 et être indiquée avec les résultats de mesure.

Une description du calcul des fréquences de démarcation est incluse dans l'Appendice I.

Tableau 1/J.133

Profil	Fréquence de démarcation	Commentaires
MGF1	10 mHz	Ce profil vise à indiquer la couverture totale des composantes de fréquence inclus dans les dégradations de synchronisation de mesures relatives à la référence PCR. Ce profil donne les résultats les plus exacts, conformément aux limites spécifiées dans le § 2.4.2.1 de la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1. Si des mesures de gigue ou de vitesse de dérive sont constatées non conformes à la spécification lors de l'utilisation d'autres profils, il est suggéré d'utiliser celle-ci afin d'améliorer la précision.
MGF2	100 mHz	Ce profil offre des avantages intermédiaires entre les profils MGF1 et MGF3, en donnant une réponse métrologique raisonnable ainsi qu'une prise en compte raisonnable des composantes à basse fréquence des dégradations de synchronisation.
MGF3	1 Hz	Ce profil donne une réponse métrologique plus rapide en ne prenant en compte que les composantes de fréquence très élevée des dégradations de synchronisation. Ce profil est censé être suffisant dans un grand nombre d'applications.
MGF4	Constructeur défini	Ce profil offre tout avantage que le constructeur peut considérer comme utile lorsqu'il est conçu et implémenté dans un appareil de mesure. La fréquence de démarcation doit être fournie avec le résultat de mesure. En option, toutes autres données que le constructeur peut considérer comme pertinentes peuvent être fournies. Aux fins des essais en fonction de l'ISO/CEI 13818-9 (limite de gigue de ± 25 µs) une fréquence de démarcation de 2 mHz est requise. Un filtre pour une telle démarcation peut être implémenté conformément à ce profil MGF4.

4.3 Référence d'horloge de programme – Décalage de fréquence PCR_FO

Définition

Le décalage PCR_FO est défini comme étant la différence entre la fréquence d'horloge de programme et la fréquence nominale d'horloge (mesurée en fonction d'une référence qui n'est dérivée ni de la PCR ni du flux TS).

Les unités pour le paramètre PCR_FO devraient être en Hz selon:

$$\text{Fréquence mesurée} - \text{Fréquence nominale},$$

ou en 10^{-6} sous la forme:

$$\frac{\text{Fréquence mesurée (en Hz)} - \text{Fréquence nominale (en Hz)}}{\text{Fréquence nominale (en MHz)}}$$

Objet

La fréquence originale de l'horloge utilisée en format vidéonumérique avant compression (horloge de programme) est transmise au récepteur final sous forme de valeurs numériques dans les champs de référence PCR. La tolérance spécifiée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] est ±810 Hz ou $\pm 30{,}10^{-6}$.

Interface

Par exemple, à l'interface G dans la Figure I.8.

Méthode

Voir dans l'Appendice I la description d'une méthode de mesure.

4.4 Référence d'horloge de programme – Vitesse de dérive (PCR_DR)

Définition

La vitesse de dérive PCR_DR est définie comme étant la dérivée première de la fréquence. Elle est mesurée sur le composant de basse fréquence de la différence entre la fréquence d'horloge de programme et la fréquence nominale d'horloge (mesurée en fonction d'une référence qui n'est dérivée ni de la PCR ni du flux TS).

Le format du paramètre PCR_DR devrait être exprimé en mHz/s (@ 27 MHz) ou 10^{-6}/h.

Objet

Cette mesure est conçue afin de vérifier que l'éventuelle dérive de la fréquence d'horloge de programme est inférieure aux limites fixées par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1]. Cette limite n'est effective que pour les composantes de basse fréquence des variations indiquées par la fréquence de démarcation décrite dans l'Appendice I.

La tolérance spécifiée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] est de ±75 mHz/s @ 27 mHz ou $\pm 10{,}10^{-6}$/h.

Interface

Par exemple, à l'interface H dans la Figure I.8.

Méthode

Voir dans l'Appendice I la description d'une méthode de mesure.

4.5 Référence d'horloge de programme – Gigue globale (PCR_OJ)

Définition

La gigue PCR_OJ est définie comme la mesure instantanée des composantes à haute fréquence de la différence entre le moment où une référence PCR devrait être arrivée à un point de mesure (sur la base de précédentes valeurs de référence PCR, de sa propre valeur et d'une référence qui n'est pas calculée par PCR ou TS) et le moment où cette référence est effectivement arrivée.

Le format du paramètre PCR_OJ devrait être exprimé en nanosecondes.

Objet

La mesure PCR_OJ est conçue pour tenir compte de toutes les erreurs cumulatives affectant les valeurs de référence PCR pendant la production, le multiplexage, la transmission, etc., du flux de programme. Tous ces effets se manifestent par une gigue au récepteur mais ils sont une combinaison d'inexactitude de PCR et de gigue dans la transmission. Cette valeur peut être comparée à la spécification d'erreur maximale par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] pour une exactitude de PCR de ±500 ns seulement si la gigue dans la transmission est supposée égale à zéro.

Interface

Par exemple, à l'interface J dans la Figure I.8.

Méthode

Voir dans l'Appendice I la description d'une méthode de mesure.

4.6 Référence d'horloge de programme – Exactitude (PCR_AC)

Définition

L'exactitude des valeurs de référence PCR_AC est définie comme la différence entre la valeur réelle de référence PCR et la valeur que cette référence devrait avoir dans le flux TS représenté par l'indice d'octet pour sa position réelle. Cette valeur peut être calculée à débit constant TS car cette mesure ne peut PAS produire de résultats significatifs dans un flux TS à débit variable.

Les unités pour le paramètre PCR_AC devraient être exprimées en nanosecondes.

Objet

Cette mesure est conçue pour indiquer l'erreur totale incluse dans la valeur de référence PCR par rapport à sa position dans le flux TS.

La tolérance spécifiée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] est ±500 ns.

Cette mesure est considérée comme valide pour les mesures en temps réel comme en temps différé.

Interface

Par exemple, à l'interface E dans la Figure I.6.

Méthode

Voir dans l'Appendice I la description d'une méthode de mesure.

NOTE – L'exactitude de la référence PCR est définie comme suit par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1]: "La tolérance sur la référence PCR est définie comme l'inexactitude maximale admissible dans les références PCR reçues; cette inexactitude est sans doute imputable à l'imprécision des valeurs de PCR et au recalage de PCR en cours de multiplexage. Elle n'inclut pas les erreurs de temps d'arrivée de paquet en raison notamment d'une gigue du réseau".

Appendice I

Mesures relatives à la référence PCR

Cet appendice donne des informations de base sur le concept de mesures relatives à la référence PCR et sur le raisonnement qui sous-tend la définition des paramètres. L'objet est de recueillir les informations qui permettent à différentes implémentations de mesures relatives à la référence PCR de montrer des résultats cohérents et comparables pour le même flux de transport.

I.1 Introduction

Le recalage de l'horloge à 27 MHz du côté décodeur d'un système de transmission numérique de télévision est nécessaire afin de reconstituer le signal vidéo. Pour permettre le recalage de l'horloge, les valeurs de référence PCR sont envoyées à l'intérieur du flux de transport. Il est requis que les valeurs de référence PCR soient correctes au point d'origine et non distordues dans la chaîne de transmission au point de créer des problèmes dans le processus de décodage des signaux comprimés.

La mesure de l'exactitude des valeurs de référence PCR et de la gigue accumulée sur ces valeurs lors de leur transmission dans un flux de transport est nécessaire afin de sécuriser la possibilité de décoder un tel flux.

Etant donné que la gigue et la vitesse de dérive sont d'importants paramètres pour le processus global, une définition claire quant au terme de gigue de PCR et des directives sur sa méthode de mesure sont requises.

I.2 Limites

D'après les spécifications indiquées dans la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1], il est possible de définir un masque délimitant l'écart par rapport à la fréquence nominale de 27 MHz.

Décalage de fréquence: différence entre la valeur réelle et la fréquence nominale de l'horloge (27 MHz). La limite est fixée à ±810 Hz. La conversion de cette valeur en unités relatives ou normalisées donne $810/27 \times 10^6 = 30 \times 10^{-6}$. C'est-à-dire que la fréquence de l'horloge à un moment quelconque devrait être la valeur nominale ±0,003%, ou la valeur nominale ± $30{,}10^{-6}$. Le fait d'exprimer la limite du décalage de fréquence sous forme d'une valeur relative présente l'avantage de donner une limite valide pour toute valeur de fréquence de l'horloge de référence utilisée pour synthétiser le rythme nominal de 27 MHz. Par exemple, l'erreur de fréquence en Hz d'une horloge en série à 270 MHz, calée sur l'horloge à 27 MHz du système, peut être divisée, ou normalisée, par 270 MHz afin de déterminer si le décalage de fréquence est dans la limite de $30{,}10^{-6}$.

Vitesse de variation de fréquence, ou vitesse de dérive de fréquence: "vitesse" à laquelle la fréquence d'une horloge varie avec le temps. En d'autres termes, c'est la dérivée première de la fréquence par rapport au temps ou la dérivée seconde de la phase par rapport au temps.

La limite est fixée à 75 mHz par seconde pour l'horloge à 27 MHz. Cette valeur peut être convertie en limite relative par division par 27 MHz, ce qui produit un résultat de $75 \times 10^{-3}/27 \times 10^6 = 2{,}777... \times 10^{-9}$/s.

C'est-à-dire que la vitesse de variation maximale permise pour la fréquence d'horloge est ±0,000 000 2777...%/s de la valeur nominale, ou $\pm 0{,}00277...10^{-6}$/s de la valeur nominale, ou $\pm 2{,}77...10^{-9}$/s de la valeur nominale de la fréquence d'horloge du système. (Noter qu'ici le terme anglais "billion" vaut 10^9, alors que dans un grand nombre de pays le terme anglais "billion" vaut 10^{12}.)

Ce résultat peut également être exprimé par 0,001%/h ou par $10{,}10^{-6}$/h.

27 000 000 – 810 ≤ fréquence_d'horloge_du_système ≤ 27 000 000 + 810 @ 27 MHz

$$\text{Fréquence tolérance} = \pm 30 \times 10^{-6} \text{ @ 1 Hz} \quad \text{(I-1)}$$

Vitesse de variation de fréquence_d'horloge_du_système = 75×10^{-3} Hz/s @ 27 MHz

$$\text{Tolérance sur la dérive} = \pm 2{,}7778 \times 10^{-9}\text{/s @ 1 Hz} \quad \text{(I-2)}$$

$$\text{Tolérance sur la phase} = \pm 500 \times 10^{-9} \text{ s} \quad \text{(I-3)}$$

Cela représente l'erreur maximale d'une valeur de référence PCR par rapport à sa position dans le temps dans le flux de transport. La limite maximale pour la phase représentée dans une valeur de référence PCR est ±500 ns: cette valeur est une limite absolue à la production de références PCR et n'inclut pas de gigue induite par le réseau.

L'ISO/CEI 13818-9 [3] (Extension pour interface temps réel pour systèmes décodeurs) spécifie au § 2.5 (Interface temps réel pour applications à faible gigue) une limite de 50 µs pour la gigue-t.

$$\text{Tolérance des applications à faible gigue} = 25 \times 10^{-6} \text{ s} \quad \text{(I-3b)}$$

NOTE – Les limites de décalage de fréquence et de vitesse de dérive sont imposées à l'horloge du système comme représenté par les valeurs des champs de référence PCR correspondants. Ces valeurs comprennent les effets de l'horloge du système et toutes erreurs pouvant exister dans le calcul de la référence PCR. La limite de 500 ns n'est pas imposée à l'horloge du système, mais à l'exactitude représentant les valeurs de référence PCR par rapport à leur position dans le flux de transport. Cependant, les erreurs de référence PCR sont entièrement équivalentes aux erreurs de phase et de gigue lorsque les références PCR sont utilisées au point de décodage afin de reconstruire l'horloge du système.

I.3 Equations

La modulation de phase peut avoir toute forme d'onde pouvant être analysée comme une combinaison de formes d'onde sinusoïdales de diverses amplitudes et phases. L'horloge peut donc être un signal pulsé. Dans ce cas, les formules ci-dessous s'appliquent à la composante fondamentale d'un tel signal périodique.

Par exemple, l'équation d'une horloge sinusoïdale avec modulation de phase sinusoïdale peut être écrite comme suit:

$$F_{clk}(t) = A \times \sin[\omega_c t + \phi(t)] = A \times \sin[\omega_c t + \phi_p \times \sin(\omega_m t)]$$

où:

ω_c fréquence angulaire nominale de l'horloge de programme, $(\omega_c = 2\pi \times 27 \text{ MHz})$;

$\phi(t)$ fonction de modulation de phase;

ϕ_p déphasage crête en radians;

ω_m fréquence angulaire en modulation de phase en rad/s.

La phase **instantanée de l'horloge** a deux termes comme suit:

$$\phi i(t) = \omega_c t + \phi(t) = \omega_c t + \phi_p \times \sin(\omega_m t) \quad \text{(I-4)}$$

La fréquence angulaire de l'horloge instantanée est prise comme la dérivée première de la phase instantanée comme suit:

$$\omega_i(t) = d\phi_i(t)/d\,t = \omega_c + \phi_p \times \omega_m \times \cos(\omega_m t) \quad \text{(I-5)}$$

où:

ω_i fréquence angulaire instantanée de l'horloge, $\omega_i = \phi_i'$, en rad/s.

La **vitesse de variation** de la fréquence ou **vitesse de dérive**, est donnée par la dérivée première de la fréquence angulaire, ou par la dérivée seconde de la phase comme suit:

$$r_i(t) = d\omega_i(t)/d\,t = -\phi_p \times \omega_m{}^2 \times \sin(\omega_m t) \qquad \text{(I-6)}$$

où:

r_i vitesse instantanée de variation de l'horloge, $r_i = \phi_i''$, en rad/s^2.

I.4 Masque

Un masque délimiteur peut être calculé comme un groupe de fonctions représentant les spécifications de valeurs limites.

D'après l'équation de phase instantanée (I-4), il est possible de voir que la valeur de crête maximale de modulation de phase est ϕ_p qui peut être comparée à la limite fixée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1].

L'***équation de phase*** peut être trouvée comme suit:

$$\phi_p = \omega_c \times T_{max} = 2\pi \times 27\text{ MHz} \times 500 \times 10^{-9}\text{ seconds} = 84{,}823\text{ rad} \qquad \text{(I-7)}$$

où:

T_{max} erreur temporelle maximale d'une raie d'horloge = 500×10^{-9} s

D'après l'équation de fréquence angulaire instantanée (I-5) l'on peut constater que la valeur de crête maximale du décalage de fréquence angulaire est donnée par $\phi_p \times \omega_m$, ce qui peut être comparé à la limite fixée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] de 810 Hz.

L'écart maximal de fréquence angulaire par rapport à la valeur nominale est:

$$\phi_p \times \omega_m = 2\pi \times 810\text{ rad/s}$$

Par division par ω_m, l'***équation de fréquence*** pour l'erreur de phase crête en fonction de la fréquence de modulation peut être trouvée comme suit:

$$\phi_p = \frac{2\pi \times 810}{\omega_m} \qquad \text{(I-8)}$$

D'après l'équation de vitesse de dérive instantanée (I-6), l'on peut constater que la valeur de crête maximale de la vitesse de dérive de fréquence est $\phi_p \times \omega_m{}^2$, ce qui peut être comparé à la limite fixée par la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] de 75 mHz/s.

$$\phi_p \times \omega_m{}^2 = 2\pi \times 0{,}075\text{ rad/s}^2$$

Par division par $\omega_m{}^2$, l'***équation de vitesse de dérive*** pour l'erreur de phase crête en fonction de la fréquence de modulation peut être trouvée comme suit:

$$\phi_p = 2\pi \times 0{,}075 / \omega_m{}^2 \qquad \text{(I-9)}$$

Ces trois équations peuvent être normalisées par division par $2\pi \times 27$ MHz.

L'***équation de phase*** devient:

$$T_{max} = \frac{\phi_p}{2\pi \times 27 \times 10^6} = \frac{84{,}823}{2\pi \times 27 \times 10^6} = 500 \times 10^{-9}\text{(seconds)} \qquad \text{(I-7a)}$$

L'***équation de fréquence*** devient:

$$Tf(\omega_m) = \frac{\phi_p}{2\pi \times 27 \times 10^6} = \frac{2\pi \times 810}{2\pi \times 27 \times 10^6 \times \omega_m} = \left(\frac{30 \times 10^{-6}}{\omega_m}\right) s \qquad \text{(I-8a)}$$

L'***équation de vitesse de dérive*** devient:

$$Tr(\omega_m) = \frac{\phi_p}{2\pi \times 27 \times 10^6} = \frac{2\pi \times 0{,}075}{2\pi \times 27 \times 10^6 \times {\omega_m}^2} = \left(\frac{2{,}7778 \times 10^{-9}}{{\omega_m}^2}\right) s \qquad \text{(I-9a)}$$

Ces trois équations (I-7a, I-8a et I-9a) sont décrites dans le graphe de la Figure I.1.

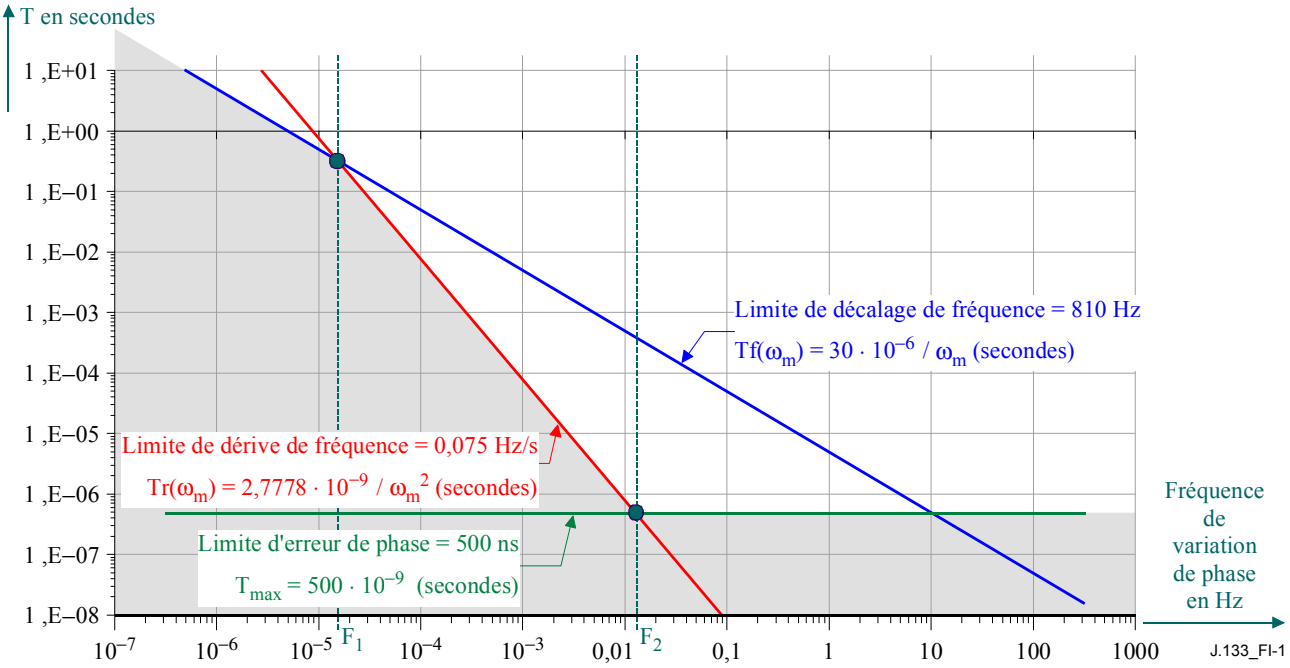


Figure I.1/J.133 – Composants de gigue de référence PCR

I.5 Fréquences de coupure

Valeurs des deux fréquences de coupure de la Figure I.1

La valeur de F1 peut être trouvée par remaniement des équations de fréquence et de vitesse de dérive (I-8 et I-9 respectivement) et résolution de la valeur de ω_m qui donne la même erreur de phase crête:

$$\phi_p = 2\pi \times 810 / \omega_m \text{ et } \phi_p = 2\pi \times 0{,}075 / {\omega_m}^2 \text{ rad}$$

$$\omega_m = (2\pi \times 0{,}075)/(2\pi \times 810) = 9{,}2592 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$F_l = \omega_m / 2\pi = 14{,}736 \times 10^{-6} \text{ Hz}$$

La fréquence de coupure F_1 est trop faible pour avoir une quelconque utilité pratique. Lorsque le décalage de fréquence doit être mesuré, il n'est pas nécessaire d'attendre environ 5 jours pour obtenir un résultat moyen approprié à la période d'un tel signal. L'on n'en tient pas compte ici en raison de sa portée à très long terme. L'on peut constater que la limite de dérive est suffisante pour les objectifs pratiques de l'analyse de gigue.

La valeur F_2 peut être trouvée par remaniement et résolution des équations de phase et de vitesse de dérive (I-7 et I-9 respectivement) pour la valeur de ω_m qui a la même erreur de phase crête:

$$\phi_p = 84{,}823 \text{ rad et } \phi_p = 2\pi \times 0{,}075 / \omega_m{}^2 \text{ rad}$$

$$\omega_m = \sqrt{0{,}4712/84{,}823} = 0{,}074535 \text{ rad/s}$$

$$F_2 = 0{,}074535/2\pi = 0{,}01186 \text{ Hz}$$

NOTE 1 – Les mêmes valeurs peuvent être obtenues au moyen des équations normalisées (I-7a), (I-8a) et (I-9a).

Cette fréquence de coupure (F_2 ~10 MHz) est celle qui est recommandée comme fréquence de démarcation pour séparer les mesures de gigue et de dérive. Elle a été définie comme filtre MGF1 dans le Tableau 1.

Cette valeur définit la fréquence de coupure à utiliser dans les filtres pour traiter les données de référence PCR. Un masque peut être calculé d'après les deux équations utilisées pour obtenir cette valeur (équation de phase I-7a et équation de dérive I-9a).

Le masque ainsi défini est représenté dans la Figure I.2.

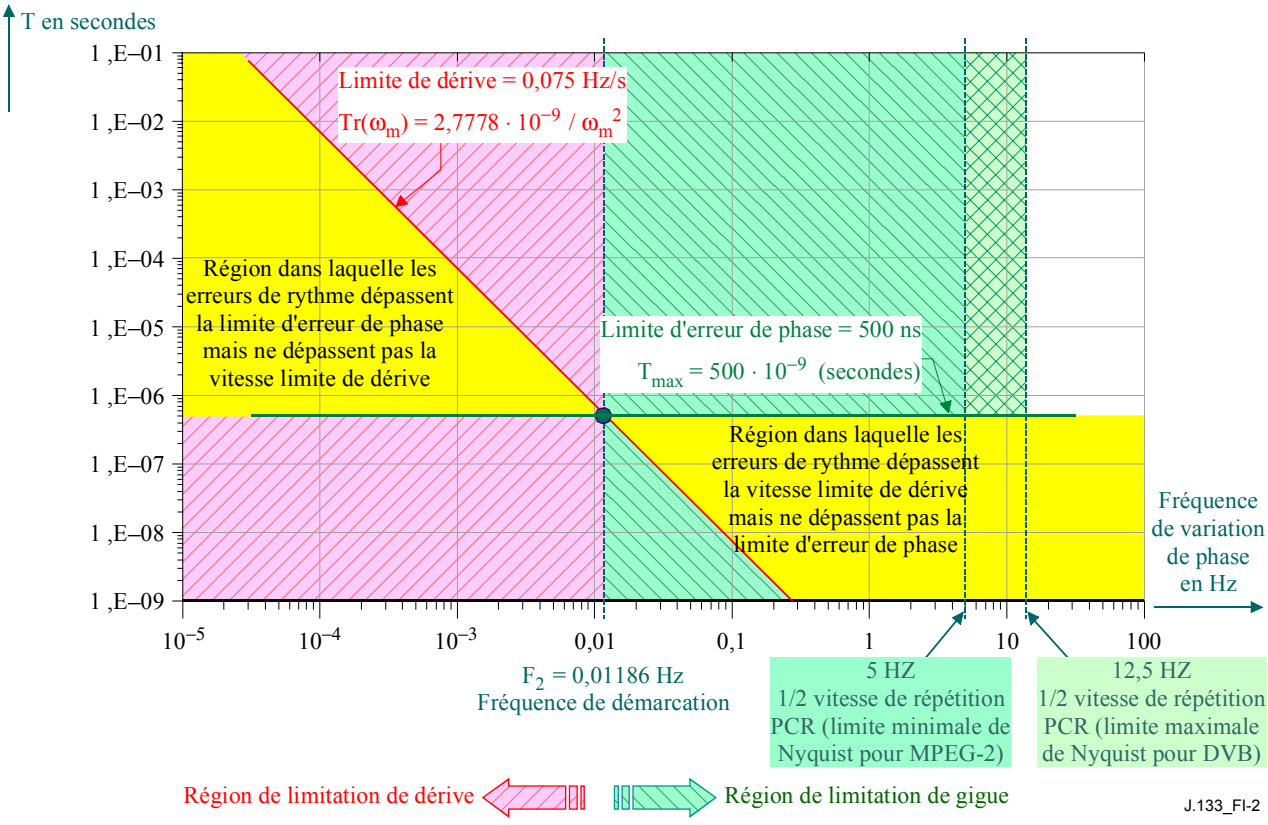


Figure I.2/J.133 – Masque pour PCR composants de gigue

L'on peut constater que la dérive maximale de 75 mHz/s ne peut être appliquée raisonnablement qu'aux fréquences de gigue inférieure à la fréquence de démarcation. Au-dessus d'une telle fréquence il est possible en pratique de trouver des dérives beaucoup plus rapides que la limite, lorsque les erreurs de référence PCR réelles sont considérées.

Au-dessus de la fréquence de démarcation, la limite qui s'applique est la valeur absolue de 500 ns pour toute valeur de référence PCR.

NOTE 2 – Pour les applications à faible gigue (ISO/CEI 13818-9 [3]), la limite de ±25 µs donne une fréquence de démarcation de 1,67 mHz, à utiliser au lieu de 10 mHz. Cela suggère l'emploi d'un filtre avec une fréquence de coupure d'environ 2 mHz lors de la vérification en fonction de cette limite. Ce filtre a été concentré dans le profil MGF4 en raison de la longue constante de temps en cause, qui lui fait avoir une réponse très lente pour une réalisation pratique.

I.6 Autres limitations implicites

D'après la Figure I.2, on peut constater qu'une limite pratique est également imposée à la capacité de mesurer les fréquences de gigue au-dessus d'une certaine fréquence.

Pour les valeurs de référence PCR insérées au rythme minimal de 100 ms conformément à la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1], les échantillons arrivent à l'appareil de mesure à une fréquence de 10 Hz. La valeur de Nyquist (moitié de la fréquence d'échantillonnage) est égale à 5 Hz.

Pour les valeurs de référence PCR insérées au rythme minimal de 40 ms conformément à TR 101 154, les échantillons arrivent à l'appareil de mesure à une fréquence de 25 Hz. La valeur de Nyquist est égale à 12,5 Hz.

Si des fréquences d'insertion de référence PCR plus élevées sont utilisées dans l'un quelconque des environnements ci-dessus, la fréquence de Nyquist correspondante augmente proportionnellement. Cela implique que d'éventuelles statistiques, effectuées par l'appareil de mesure sur la base d'une analyse spectrale de la gigue, devront mesurer la fréquence d'insertion PCR réelle.

Selon le type d'analyse, il est nécessaire de tenir compte du fait que les échantillons de référence PCR n'arrivent pas nécessairement à intervalles réguliers. Pour une implémentation pratique donnée, le concepteur peut choisir la meilleure façon de mettre en œuvre les filtres: techniques de traitement de signal numérique (DSP, *digital signal processing*) (filtres à réponse (IIR, *infinite impulse response*) ou réponse impulsionnelle finie (FIR, *finite impulse response*)), avec interpolation (linéaire, en sinx/x, etc.) ou sans interpolation, circuits analogiques ou technique hybride associant analyses analogique et numérique, etc.

Il est intéressant de noter, cependant, que dans la plupart des cas pratiques l'échantillonnage se produira à des fréquences très élevées (1000 fois plus) par rapport aux points de coupure de fréquence des filtres proposés (MGF1 à 10 mHz). Le rythme minimal des références PCR est de 10 Hz pour les flux de transport MPEG généraux (25 Hz dans les systèmes DVB). Avec ces valeurs de PCR suréchantillonnées, la forme de réponse transitoire des filtres à largeur de bande proche de 10 mHz n'est pas notablement affectée par la non-uniformité du rythme.

I.7 Procédures de mesure

Il est possible d'effectuer des mesures de gigue adaptant les données à une courbe du deuxième ordre (régression quadratique) limitée par la spécification de vitesse de dérive (voir Figure I.3). **Cependant, cela n'est pas nécessaire si l'on choisit d'effectuer des mesures de gigue et de décalage de fréquence/vitesse de dérive fondées sur la méthode plus familière du contenu spectral sinusoïdal des variations de rythme.**

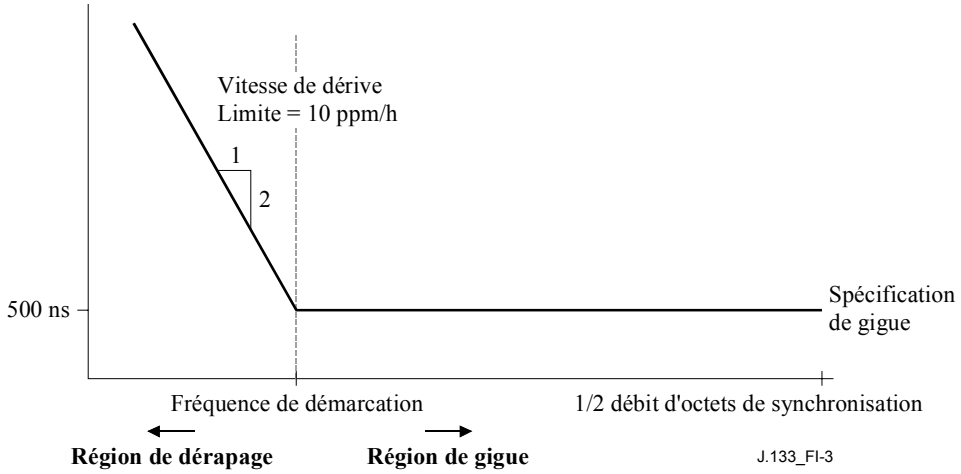


Figure I.3/J.133 – Masque spectral total des variations de rythme

Pour les composants spectraux de gigue inférieurs à la fréquence de démarcation, les composants sinusoïdaux de crête de l'erreur de rythme de PCR peuvent augmenter proportionnellement au carré de la période du composant spectral sans dépasser la limite de vitesse de dérive de $10{,}10^{-6}$/h (ce qui équivaut aussi à $2{,}8\ 10^{-9}$/s et 75 mHz/s @ 27 MHz). Comme la boucle à verrouillage de phase (PLL, *phase-locked loop*) du décodeur et tous les équipements subséquents de rythme vidéo recherchent cette erreur, ces composants peuvent dépasser largement la limite crête de 500 ns.

Par inversion du masque de spécification, une mesure ou un filtre de mesure à pondération spectrale apparaît comme suit dans la Figure I.4.

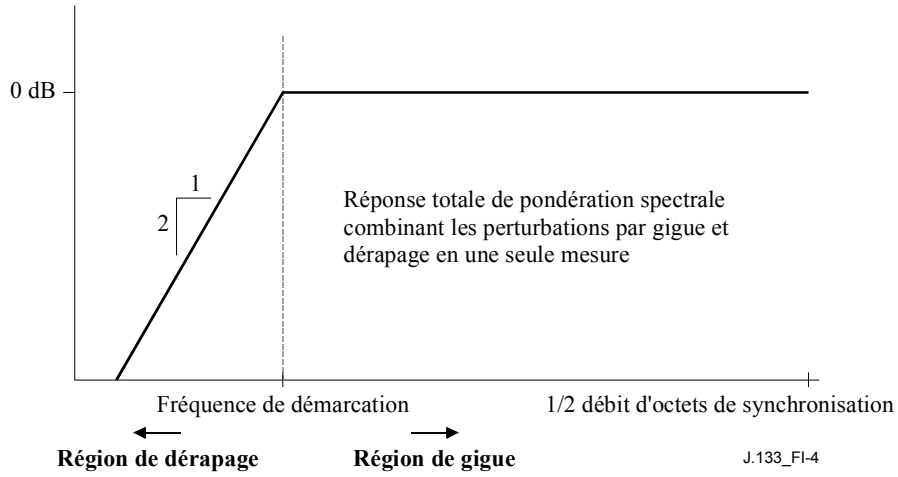


Figure I.4/J.133 – Filtrage par inversion du masque spectral de variations de rythme

Cela peut être décomposé en deux mesures distinctes telles que la somme des signaux de sortie de gigue et de vitesse de dérive mesurées soit pratiquement la même que la somme originale (voir Figure I.5).

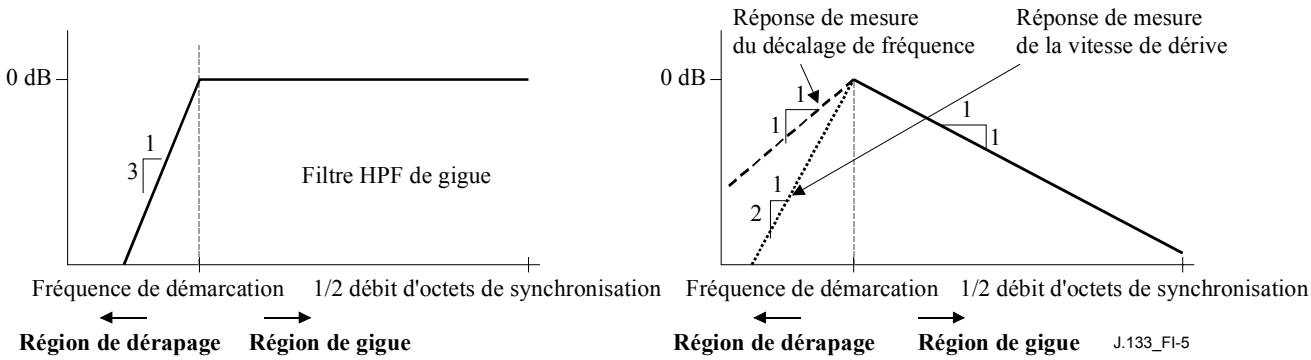


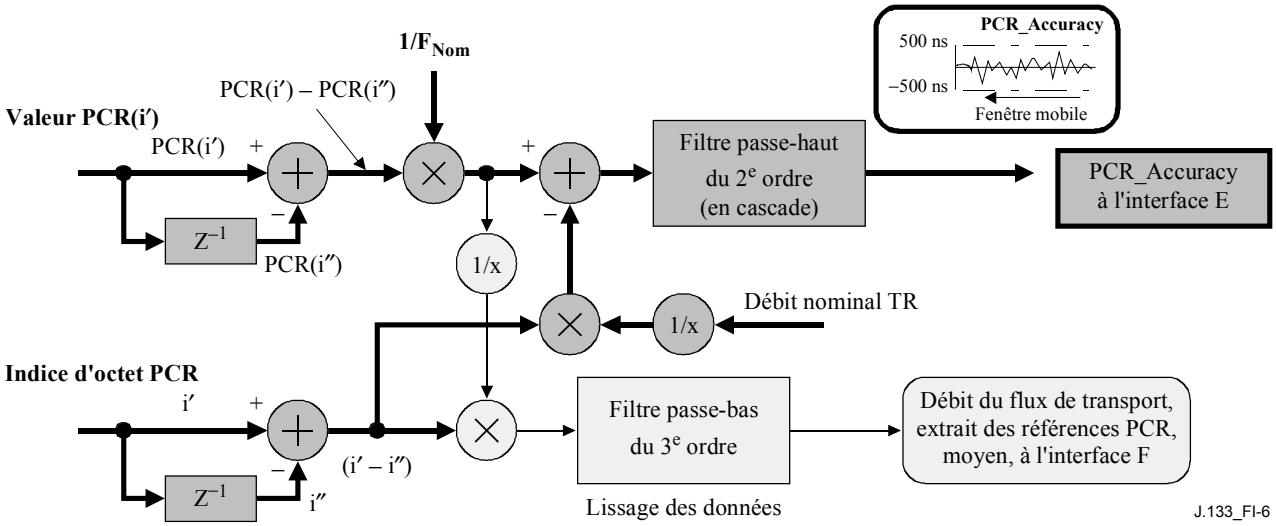
Figure I.5/J.133 – Filtre passe-haut (HPF) du 3^{e} ordre pour la gigue et affaiblissement du 1er ordre pour les mesures de dérive

La gigue peut être évaluée en fonction des limites de qualité de fonctionnement indiquées, de façon quelque peu indépendante des limites de qualité de fonctionnement en termes de vitesse de dérive de fréquence. Noter que, dans la Figure I.5, le filtre passe-haut (HPF, *high-pass filter*) de gigue a une réponse du troisième ordre afin de rejeter de la mesure les composantes de vitesse de dérive. De même, à droite de la Figure I.5, la réponse de mesure de vitesse de dérive a un affaiblissement du premier ordre afin de rejeter les composants de gigue de sa sortie. Est également indiquée la réponse de mesure de décalage de fréquence préférée qui rejette également les composants spectraux de gigue. Noter (voir la partie droite de la Figure I-5) qu'au-dessous de la fréquence de démarcation, le décalage de fréquence est une pente de dérivée première et la vitesse de dérive est une pente de dérivée seconde.

L'erreur de rythme n'a pas besoin d'être directement mesurée car sa dérivée temporelle ou son décalage de fréquence contient tout ce qui est nécessaire pour implémenter les filtres de mesure. C'est-à-dire qu'il ne faut que deux échantillons pour calculer la différence de temps ou la première différence constatée du temps d'arrivée d'octet. Cela revient à mesurer le décalage de fréquence instantané plutôt que l'erreur temporelle réelle du flux de transport; et cela simplifie la mesure sans perte d'informations.

I.7.1 PCR_Accuracy (PCR_AC)

Le résultat de PCR_AC est obtenu à l'interface E de la Figure I.6.



PCR(i′) PCR_base(i′) * 300 + PCR_ext(i′)
Indice d'octet PCR Indice de l'octet contenant le dernier bit du champ program_clock_reference_base qui suit immédiatement et qui est applicable au programme en cours de décodage.

Figure I.6/J.133 – Mesure de PCR_Accuracy

Les valeurs d'exactitude PCR_AC qui affectent le recalage d'horloge par boucle PLL pour programme spécifique peuvent être mesurées indépendamment du temps d'arrivée par extraction de la modification des valeurs de référence PCR adjacentes et du nombre d'octets entre références PCR comme suit:

$$K(i) = i' - i'', \text{ octets, } [PCR(i) - PCR(i-1)]/F_{Nom} - K(i)/TR = d(PCR_AC(i))/dt$$

où:

TR débit nominal du flux de transport, octets/s, F_{Nom} = 27 MHz;

K(i) nombre d'octets entre référence PCR(i) actuelle et références PCR(i–1) précédentes.

Tous les filtres passe-haut et passe-bas ont les largeurs de bande des profils MGF1, MGF2, MGF3 et MGF4.

Noter que cette méthode mesure l'exactitude PCR_AC indépendamment du temps d'arrivée. Cela ne peut être effectué que pour un flux TS à débit constant. La vitesse de dérive et le décalage de fréquence ne sont pas mesurés. Les erreurs d'intervalle entre références PCR ne sont pas non plus mesurées mais peuvent être déterminées indirectement d'après K(i)/TR. Noter également que l'exactitude PCR_AC est mesurée au-dessus de la fréquence de démarcation aux fins de cohérence avec les composants spectraux qui contribuent à la gigue de boucle PLL. Les composantes de dérive de PCR_AC sont probablement négligeables par rapport à la dérive d'horloge.

Le filtre passe-haut du deuxième ordre représente une réponse de filtre HPF du deuxième ordre à l'exactitude de PCR due à l'effet de dérivée première du calcul de la première différence constatée dans les références PCR représentées dans le diagramme. C'est ce qui est représenté au mieux dans la Figure I.7 par un système à temps discrets fonctionnant au débit PCR moyen.

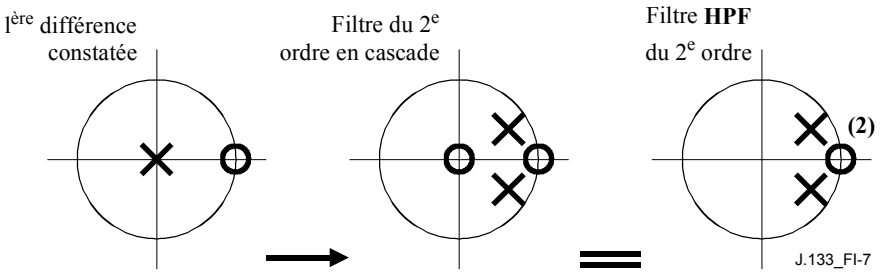


Figure I.7/J.133 – Filtre HPF du deuxième ordre

Dans les termes du modèle de référence présenté au §.4.1, la Figure I.6 mesure la différence entre deux inexactitudes de PCR: Mp,i' – Mp,I". Une série de ces mesures peut être retraitée afin de calculer les inexactitudes individuelles de PCR, Mp,I en supposant que l'inexactitude moyenne est égale à zéro.

I.7.2 PCR_drift_rate (PCR_DR)

Le résultat de PCR_DR est obtenu à l'interface H de la Figure I.8.

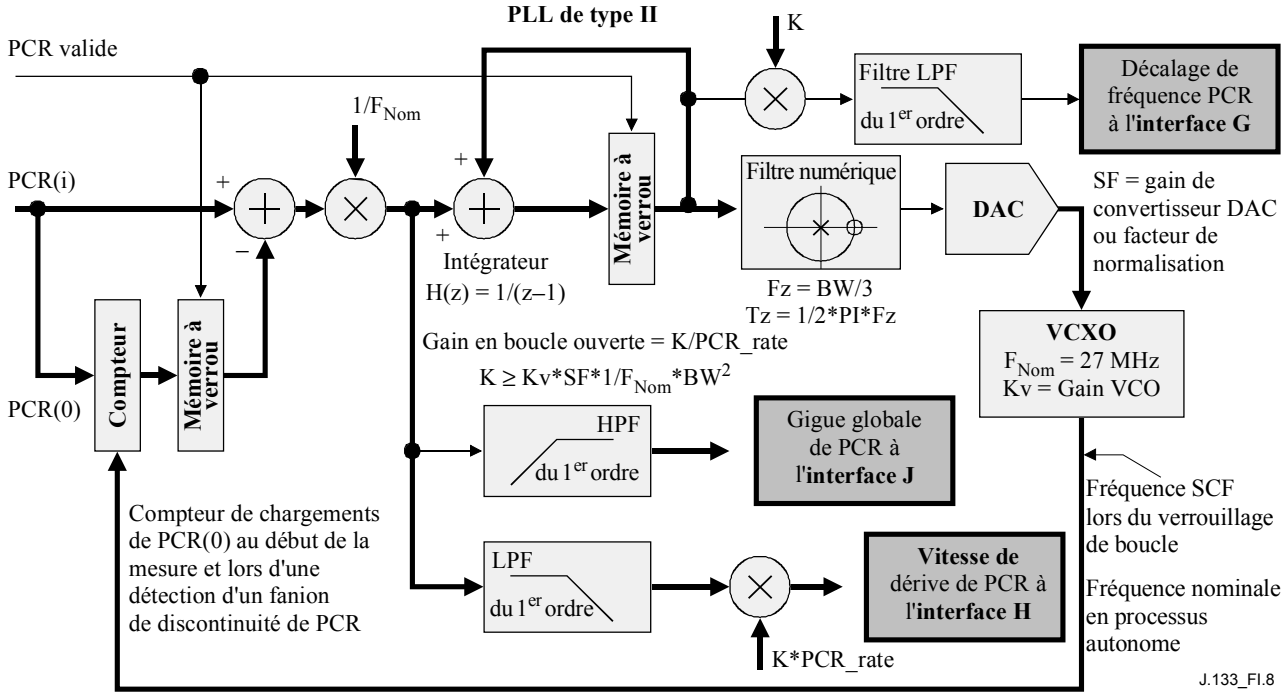


Figure I.8/J.133 – Mesure de la gigue globale de PCR combinant les effets de PCR_AC et de PCR_arrival_time_jitter

Ce résultat de mesure est obtenu après l'action combinée du filtre HPF du deuxième ordre représentée par la boucle (avant l'intégrateur représenté par l'additionneur et la mémoire à verrou), suivie par le filtre passe-bas (LPF, *low-pass filter*) du premier ordre. Cette action combinée donne la réponse indiquée dans la Figure I.5 pour la vitesse de dérive.

I.7.3 PCR_frequency_offset (PCR_FO)

Le résultat de PCR_FO est obtenu à l'interface G de la Figure I.8.

Cette mesure est obtenue après l'action combinée du filtre HPF du premier ordre représentée par la boucle et l'intégrateur (représenté par l'additionneur et la mémoire à verrou) suivie par le filtre LPF du premier ordre. Cette action combinée donne la réponse indiquée dans la Figure I.5 pour le décalage de fréquence.

I.7.4 Mesure de la gigue PCR_overall_jitter

Le résultat de PCR_OJ est obtenu à l'interface J de la Figure I.8.

Ce résultat de mesure est obtenu après l'action combinée du filtre HPF du deuxième ordre représentée par la boucle (avant l'intégrateur représenté par l'additionneur et la mémoire à verrou), suivie par le filtre HPF du premier ordre. Cette action combinée donne la réponse indiquée dans la Figure I.5 pour la gigue (dessin de gauche).

La gigue globale comprend l'effet composite des erreurs d'exactitude de référence PCR et de la gigue de temps d'arrivée de PCR. Elle est importante car elle se rapporte directement à l'effet sur la gigue et la dérive d'horloge recalée du programme. Cette méthode devrait également inclure une mesure de la vitesse de dérive et du décalage de fréquence de l'horloge. Donc, la méthode la plus pratique consiste à implémenter une boucle PLL de recalage de la fréquence SCF comme celle qui est contenue dans le décodeur de programme. Par un contrôle précis d'une largeur de bande et un étalonnage précis de l'oscillateur VCXO, il est possible de mesurer simultanément, avec les réponses en fréquence décrites ci-dessus, la gigue globale de PCR, le décalage de fréquence SCF et la vitesse de dérive de fréquence (SCF, *system clock frequency*).

Explication

Noter que la boucle PLL est un système de commande de type II avec deux intégrateurs idéaux (l'accumulateur numérique représenté et l'oscillateur VCXO, *voltage-controlled crystal oscillator*). Cela crée une réponse en boucle fermée passe-haut du 2^{e} ordre à la sortie de la soustraction de phase. Donc, au-dessous d'une largeur de bande de la boucle, la réponse est proportionnelle à la vitesse de dérive et proportionnelle à la gigue au-dessus d'une largeur de bande de la boucle. Il est nécessaire d'ajouter un autre filtre HPF du 1^{er} ordre à la mesure de gigue afin de supprimer les effets de vitesse de dérive. Inversement, il est nécessaire d'ajouter un filtre LPF du 1^{er} ordre à la sortie de vitesse de dérive afin de supprimer les effets de gigue de cette mesure.

NOTE 1 – Si les filtres sont implémentés au moyen de techniques de traitement DSP sur les données brutes, et comme la fréquence PCR_rate est la fréquence d'échantillonnage, la fréquence moyenne PCR_rate devrait être déterminée par mesure de l'intervalle PCR_interval et filtrage du résultat avec un filtre LPF à 10 mHz ou moins. La valeur de fréquence PCR_rate peut être utilisée pour les valeurs représentées dans la figure afin de sélectionner une largeur de bande de mesure, BW, telle qu'elle soit indépendante de la fréquence PCR_rate.

NOTE 2 – Le modèle représenté est un hybride numérique/analogique avec un convertisseur numérique-analogique (DAC, *digital-to-analogue converter*) pilotant le filtre analogique en boucle. Pour un convertisseur DAC sur 14 bits, le facteur SF serait de 2^{-14}. L'oscillateur VCXO avec gain Kv peut être construit à partir d'un sous-système composé d'un oscillateur OCXO, *oven-controlled crystal oscillator* et d'une boucle FLL, *frequency-locked loop* verrouillant un oscillateur VCXO. Ce montage peut au besoin servir à étalonner la sortie du décalage de fréquence selon l'exactitude recherchée. Sinon, l'oscillateur VCXO peut être utilisé seul. On peut vérifier son erreur ou son décalage de fréquence en lui appliquant un flux TS de fréquence connue et exacte puis en soustrayant l'erreur à partir des mesures suivantes.

NOTE 3 – En variante, un oscillateur OCXO autonome peut être utilisé afin de déterminer l'intervalle PCR_interval avec des méthodes connues. Puis un oscillateur VCO, *voltage-controlled oscillator* numérique peut être construit. Par cette méthode, une version complètement numérique ou seulement logicielle peut être construite sur la base de l'intervalle PCR_interval mesuré et des valeurs de référence PCR. L'on peut démontrer que cette méthode peut avoir une largeur de bande pratiquement indépendante de la fréquence PCR_rate moyenne avec des valeurs de gigue mesurées relativement indépendantes des variations de l'intervalle PCR_interval.

Bien que cette méthode décrive une réalisation de boucle PLL sous forme d'hybride entre traitement DSP et traitement de signal analogique, d'autres méthodes donnant les mêmes réponses filtrées sont possibles.

I.8 Considérations sur l'exécution de mesurages de référence PCR

La mesure et la validation des contributions à la gigue et à la vitesse de dérive d'une horloge STC, *system time clock* de programme, transportées par ses échantillons à temps discrets via les valeurs de référence PCR de chaque programme dans un flux TS, nécessitent une certaine analyse mathématique de tels échantillons afin de calculer les limites de qualité de fonctionnement pour comparaison directe aux limites fixées dans la présente Recommandation.

L'analyse normale d'un système échantillonné se fonde sur une fréquence d'échantillonnage normale des données à analyser. Cela n'est généralement pas le cas des échantillons à temps discrets acheminés par des valeurs de référence PCR qui, par construction, dépendent de critères et de priorités au moment du multiplexage.

La Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] établit un intervalle maximal de 100 ms entre valeurs consécutives de référence PCR. La norme de diffusion DVB recommande que tous les systèmes conformes à cette norme transmettent les valeurs de référence PCR avec un intervalle maximal de 40 ms, mais tous les récepteurs devraient fonctionner correctement avec des intervalles d'une longueur pouvant atteindre 100 ms.

Aucune des normes n'a imposé que l'intervalle, quelle que soit sa valeur, soit constant. Cela parce que, dans le processus de multiplexage, il est nécessaire de tenir compte de l'instant où le paquet contenant le champ PCR pour un programme donné doit être inséré dans le flux TS. Cependant, l'intention des concepteurs et des opérateurs de multiplexeurs est de fournir de telles valeurs au débit le plus régulier possible.

Dans le récepteur, le recalage de l'horloge à 27 MHz du système pour le programme en cours de décodage est commandé par un signal qui utilise chacune des valeurs de référence PCR qui correspond à un tel programme à l'instant d'arrivée, afin d'introduire des corrections lorsque nécessaire. Il est supposé que la stabilité du régénérateur d'horloge est telle que la phase ne dérive pas exagérément d'une valeur de référence PCR à la suivante sur des intervalles pouvant atteindre 100 ms.

Cependant, il appartient au flux TS de fournir les valeurs de PCR correctement avec une erreur non supérieure à 500 ns par rapport à la phase instantanée de l'horloge du système. La limite de 500 ns peut être dépassée par un cumul d'erreurs sur un grand nombre de valeurs de référence PCR. Cependant, lorsque l'erreur cumulée recouvre une durée suffisamment longue, cette erreur devrait être examinée sous l'angle de sa contribution à la dérive et être autorisée à dépasser la limite de 500 ns. La signification du terme "suffisamment longue" a été calculée au § I.5 et est représentée graphiquement par les points d'inflexion du graphe dans la Figure I.2. Dans le cas de fréquences sinusoïdales inférieures à 12 mHz, la limite est déterminée par la spécification de vitesse de dérive plutôt que par la limite de 500 ns.

Si des filtres appropriés sont intégrés à l'appareil de mesure afin de séparer les composantes spectrales de la valeur PCR reçue de part et d'autre d'une fréquence de démarcation entre gigue et dérive, il est possible de comparer les erreurs reçues aux limites appropriées qui ont été fixées par la présente Recommandation.

Si la conception de l'appareil de mesure implique qu'il est construit comme un appareil analogique avec des filtres matériels, le concepteur utilisera la fréquence de démarcation comme exigence de conception des filtres avec indépendance de la fréquence d'échantillonnage à laquelle les références PCR arrivent réellement. Cette fréquence de démarcation est calculée sur la base des limites fixées dans la présente Recommandation et ne dépend pas de la fréquence d'échantillonnage pour les valeurs de référence PCR.

Si la conception des filtres est effectuée par des techniques de traitement DSP, le concepteur doit tenir compte de la valeur moyenne de la fréquence d'échantillonnage des valeurs de référence PCR et doit adapter les filtres afin de conserver une largeur de bande relativement fixe pendant le mesure.

Cette méthode part du principe implicite que la fréquence d'échantillonnage (rythme d'arrivée moyen des valeurs de référence PCR) n'est pas seulement connue mais est relativement constante.

Une bonne recommandation consiste à faire en sorte que la valeur des coefficients soit déterminée de façon dynamique par mesure du rythme d'arrivée réel des valeurs de référence PCR. En d'autres termes, il convient d'utiliser un filtre adaptatif avec, comme paramètre variable, la fréquence PCR mesurée.

Cette méthode a été vérifiée en pratique au moyen d'une modulation très profonde des fréquences de valeurs de PCR. Les résultats obtenus en termes de gigue et de dérive mesurées montrent en effet une corrélation très étroite (dans les limites de précision de l'appareil de mesure) avec les erreurs de gigue et de dérive insérées par le générateur d'essai dans les valeurs de PCR contrôlées. Généralement, de petites différences entre les largeurs de bande des filtres de mesure n'ont pas d'incidence notable sur les résultats de mesure de la gigue car les composants spectraux de gigue sont le plus souvent à bande large. En fait, l'ordre du filtre est très important puisqu'il détermine la sensibilité de sortie du filtre aux composantes hors bande, qui peuvent avoir de faibles amplitudes mais de très élevées dérivées premières et secondes du temps.

Une autre considération à prendre en compte n'est pas liée à la vérification de la validité du flux mais concerne un outil de mise au point permettant de trouver l'origine de la gigue éventuelle et de localiser une certaine périodicité ou des fréquences de résonance. Cet outil consiste à appliquer une analyse de Fourier aux échantillons de données reçus.

De nouveau, pour que ce type d'analyse soit valide, l'on suppose que la fréquence d'échantillonnage est connue et régulière. Cette fréquence doit ensuite être mesurée afin de connaître les fréquences analysées dans chaque segment du spectre (la résolution en fonction du nombre d'échantillons du domaine temporel utilisés dans le calcul et la stabilité relative de la fréquence d'échantillonnage dans l'intervalle de mesure).

Le problème de la non-uniformité de la fréquence d'échantillonnage pourrait être résolu par une interpolation précise avant l'application de la technique de Fourier. En général, cette interpolation n'est pas nécessaire parce que, dans le cadre d'un outil de mise au point, l'on ne recherche pas la valeur "exacte" des fréquences et leur amplitude. Ce que l'on recherche est uniquement de savoir si la gigue est seulement aléatoire ou intègre quelques fréquences prédominantes.

Généralement, lorsqu'une analyse de Fourier est effectuée sur des signaux échantillonnés régulièrement et lorsque le signal contient une composante sinusoïdale stable, ses paramètres peuvent être obtenus avec une grande précision et une raie spectrale nette peut être affichée avec de telles données sur un analyseur de spectre. Si la composante sinusoïdale n'était pas stable, l'on s'attendrait à une raie spectrale élargie avec une amplitude moindre, cet élargissement et cette diminution étant d'autant plus marqués qu'il y a plus de modulation de fréquence (FM, *frequency modulation*) implicite dans une telle sinusoïde.

Si une sinusoïde stable est présente mais que la fréquence d'échantillonnage est modulée, comme c'est le cas de la fréquence d'arrivée des références PCR, l'on peut s'attendre à une raie spectrale large et très basse, tout à fait semblable au cas décrit ci-dessus. Lorsqu'il y a beaucoup de modulation de fréquence (aléatoire ou non) dans le signal d'échantillonnage, le spectre devient plus large avec moins d'amplitude dans chacun de ses segments. Cependant, en tant qu'outil de diagnostic, cette méthode peut rester valide.

I.9 Choix de filtres en mesure de référence PCR

I.9.1 Pourquoi y a-t-il un choix?

La mesure de référence PCR est une tâche difficile. Les valeurs de référence PCR n'apparaissent pas très souvent et lorsque c'est le cas, ce sont des nombres plutôt grands (42 bits). La référence d'horloge est prévue de façon à être très stable, et en tant que tel un appareil de mesure doit avoir au moins la même stabilité pour effectuer une mesure. C'est cette stabilité à long terme (excursion de

l'ordre de quelques millionièmes de la valeur de fréquence par heure) dans un compteur, qui va augmenter très rapidement (27 MHz) mais qui sera transmise peu fréquemment (toutes les 40 ms environ), qui provoque les problèmes.

On a défini une fréquence "de démarcation" (Figure I.2) qui permet de subdiviser les inexactitudes ajoutées à l'horloge de référence PCR en dérive (composante à basse fréquence) et en gigue (composante à haute fréquence). Elle est fondée sur les limites indiquées dans la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1] qui détermine une région au-dessous de 10 mHz (MGF1) où la limite de dérive (75 mHz/s) est prédominante et une région au-dessus de 10 mHz (MGF1) où les erreurs sont autorisées à dépasser la vitesse de dérive mais non la limite d'erreur de phase (500 ns): c'est pourquoi le profil MGF1 est la fréquence de démarcation qui est hautement recommandée afin d'assurer une conformité précise avec la Rec. UIT-T H.222.0 | ISO/CEI 13818-1 [1].

Pour les mesures pratiques, trois fréquences de démarcation fixes ont été spécifiées. La fréquence MGF1-3 et une fréquence définie par l'utilisateur ou par le constructeur est également permise dans le profil MGF4. La fréquence de démarcation **choisie** est un compromis entre la précision recherchée de l'horloge comme défini dans la spécification MPEG et les contraintes pratiques lors de l'exécution de la mesure.

Pour que deux appareils de mesure donnent les mêmes résultats pour un flux de transport donné, il faut qu'ils utilisent la **même** fréquence de démarcation lors de la mesure. Par ailleurs, d'éventuels effets secondaires dus à l'arrivée irrégulière des échantillons de référence PCR peuvent être supprimés de façon que les résultats puissent mieux correspondre. La méthode suivie à cette fin est hors du domaine d'application des présentes directives de mesure mais les modèles devraient donner des résultats similaires lorsque, par exemple, un flux de 10 minutes a des références PCR toutes les 20 ms pendant les premières 5 minutes puis toutes les 40 ms pendant les prochaines 5 minutes.

Lorsque les profils de filtrage MGF1 à MGF4 définis dans la présente Recommandation seront implémentés, il y aura des écarts entre la réponse réelle des filtres et la réponse souhaitée des filtres idéaux. Cela donnera quelques erreurs de mesure entre les appareils. En général, la précision du filtrage est un choix commercial du fabricant qui construit des équipements pour un marché spécifique.

Le choix

Les présentes directives sont destinées à créer un environnement dans lequel des appareils similaires donnent des résultats similaires et dans lequel les utilisateurs sont en mesure de comprendre les implications du choix de différents paramètres de mesure. Les erreurs entre différents appareils de mesure varieront en fonction d'un certain nombre de facteurs:

1) Les mêmes fréquences de démarcation sont-elles utilisées? C'est le principal facteur.

   Si différents appareils utilisent des fréquences de démarcation différentes, ils donneront des résultats différents. Ce sera une importante source d'erreur. Une analyse de la nature de l'erreur est présentée ci-dessous.

2) Les filtres de démarcation sont-ils du même ordre? C'est moins important.

   Si un appareil utilise un filtre du 2^{e} ordre et qu'un autre utilise un filtre du 5^{e} ordre, la nature de la réponse du filtre sera tout à fait différente. Il est probable qu'il y aura une petite différence entre les appareils de mesure, en particulier si d'importantes composantes fréquentielles des erreurs sont proches de la fréquence de démarcation choisie.

3) La mesure est-elle effectuée à proximité du point de transition des fréquences de décalage/dérive/gigue?

   Près de la fréquence de transition, l'ordre du filtre et sa réponse aux impulsions sont susceptibles d'avoir une incidence sur les composantes fréquentielles qui sont incluses ou rejetées des mesures. Cela a beaucoup moins de conséquences que le choix de la fréquence de démarcation.

I.9.2 Fréquences de démarcation très élevées

Le choix d'une fréquence de démarcation très élevée (par exemple, MGF3) a plusieurs conséquences:

1) La gigue se transforme en dérive ou en décalage de fréquence.

   Une fréquence de démarcation très élevée signifie que la composante fréquentielle qui aurait été classée comme une gigue sera maintenant classée comme un décalage de fréquence ou une dérive. Cela a pour conséquence de réduire l'ordre de grandeur de la composante fréquentielle de la gigue globale. Cela fait également paraître l'horloge du système moins stable qu'elle ne l'est en réalité.

2) La mesure s'établit plus rapidement.

   Le temps d'établissement est étroitement associé à l'inverse de la fréquence: si celle-ci est augmentée de deux ordres de grandeur, le temps d'établissement peut en être réduit d'autant. Il existe des techniques de traitement DSP qui peuvent servir à améliorer les temps d'établissement: leur utilisation est un choix commercial du vendeur d'équipement.

   A titre de méthode empirique **grossière**, une fréquence de démarcation très élevée s'établit plus rapidement mais donne un résultat moins précis. Les mesures de gigue apparaîtront comme plus petites et les mesures de dérive plus grandes.

I.9.3 Fréquences de démarcation très basses

Le choix d'une fréquence de démarcation très basse (par exemple, MGF1) a plusieurs conséquences:

1) La séparation de la dérive et de la gigue donne des groupes plus représentatifs.

   Une fréquence de démarcation très basse signifie que les composantes fréquentielles sont classées plus précisément comme gigue, décalage de fréquence ou dérive. Cela a pour conséquence de mesurer les composantes fréquentielles sur la base d'hypothèses plus proches des valeurs contenues dans la spécification MPEG2.

2) La mesure s'établit moins rapidement.

   Le temps d'établissement est étroitement associé à l'inverse de la fréquence: si celle-ci est diminuée de deux ordres de grandeur, le temps d'établissement peut en être augmenté d'autant. Il existe des techniques de traitement DSP qui peuvent servir à améliorer les temps d'établissement: leur utilisation est un choix commercial du vendeur d'équipement.

   A titre de méthode empirique **grossière**, une fréquence de démarcation très basse s'établit plus lentement mais donne un résultat plus précis. Les mesures de gigue apparaîtront comme plus grandes et les mesures de dérive plus petites.

   Le choix final de la fréquence de démarcation revient à l'utilisateur de l'appareillage et se réduit à un compromis entre vitesse et précision de mesure. Les présentes directives devraient permettre que différents appareils de mesure donnent des résultats comparables au centre de la région de mesure, avec une certaine incertitude au point de transition puis un accord dans la région suivante.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	**Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias**
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication

Genève, 2002