



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.810

(08/96)

**SÉRIE G: SYSTÈMES ET SUPPORTS DE
TRANSMISSION**

Systemes de transmission numériques – Réseaux
numériques – Objectifs de conception pour les réseaux
numériques

**Définitions et terminologie des réseaux de
synchronisation**

Recommandation UIT-T G.810

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE G
SYSTÈMES ET SUPPORTS DE TRANSMISSION

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
SYSTÈMES INTERNATIONAUX ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIODÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	
SYSTÈMES DE TRANSMISSION NUMÉRIQUES	
EQUIPEMENTS TERMINAUX	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
Généralités	G.800–G.809
Objectifs de conception pour les réseaux numériques	G.810–G.819
Objectifs de qualité et de disponibilité	G.820–G.829
Fonctions et capacités du réseau	G.830–G.839
Caractéristiques des réseaux à hiérarchie numérique synchrone	G.840–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999

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

RECOMMANDATION UIT-T G.810

DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE DES RESEAUX DE SYNCHRONISATION

Résumé

La présente Recommandation définit les termes et les abréviations utilisés dans les Recommandations relatives à la synchronisation et à la détermination des rythmes.

Source

La Recommandation UIT-T G.810, révisée par la Commission d'études 13 de l'UIT-T (1993-1996), a été approuvée le 27 août 1996 selon la procédure définie dans la Résolution n° 1 de la CMNT.

Mots clés

Caractéristiques de dérapage, caractéristiques de gigue, caractéristiques d'horloge, hiérarchie numérique synchrone, réseau de synchronisation.

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.

La Conférence mondiale de normalisation des télécommunications (CMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'études 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 n° 1 de la CMNT (Helsinki, 1^{er}-12 mars 1993).

Dans certains secteurs de la technologie 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.

© UIT 1997

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application.....	1
2	Références.....	1
3	Abréviations.....	2
4	Définitions	3
4.1	Définitions générales	3
4.2	Définitions relatives aux horloges	4
4.3	Définitions relatives aux réseaux de synchronisation.....	4
4.4	Définitions relatives aux modes de fonctionnement des horloges (horloges asservies).....	5
4.5	Définitions relatives à la caractérisation des horloges.....	6
4.6	Définitions propres à la hiérarchie numérique synchrone (SDH).....	9
5	Description des composantes de la variation de phase	9
6	Dégradations causées par la variation de phase.....	9
6.1	Types de dégradations.....	9
6.1.1	Erreurs	9
6.1.2	Dégradation des informations analogiques à codage numérique.....	9
6.1.3	Glissements.....	9
6.2	Contrôle des dégradations.....	9
6.2.1	Erreurs	9
6.2.2	Dégradation des signaux analogiques à codage numérique.....	10
6.2.3	Glissements.....	10
7	Objet des spécifications de variation de phase	10
7.1	Gigue.....	10
7.2	Dérapiage	11
8	Structure des réseaux de synchronisation	11
8.1	Modes de synchronisation.....	11
8.2	Réseaux de synchronisation.....	11
9	Configurations de mesure	12
9.1	Configuration de mesure à horloges synchronisées.....	12
9.2	Configuration de mesure à horloges indépendantes	12
	Appendice I – Modèles mathématiques des signaux de rythme	14
I.1	Modèle de phase instantanée totale d'un signal de rythme parfait.....	14
I.2	Modèle de phase instantanée totale des signaux de rythme réels	14
I.3	Modèle d'erreur de temps.....	15

	Page
Appendice II – Définition et propriétés des mesures de stabilité fréquentielle et temporelle..	15
II.1 Ecart d'Allan (ADEV).....	16
II.2 Ecart d'Allan modifié (MDEV).....	17
II.3 Ecart temporel (TDEV).....	19
II.4 Erreur quadratique moyenne d'intervalle temporel (TIErms).....	20
II.5 Erreur maximale d'intervalle temporel (MTIE).....	22

Recommandation G.810

DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE DES RESEAUX DE SYNCRHONISATION

(Melbourne, 1980; révisée en 1996)

1 Domaine d'application

La présente recommandation définit les termes et les abréviations utilisés dans les Recommandations relatives à la synchronisation et à la détermination des rythmes. Elle fournit également des informations de base sur la nécessité de limiter les défauts et variations de phase dans les systèmes numériques.

2 Références

Les Recommandations et autres références suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Recommandation. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute Recommandation ou autre référence est sujette à révision; tous les utilisateurs de la présente Recommandation sont donc invités à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des Recommandations et autres références indiquées ci-après. Une liste des Recommandations UIT-T en vigueur est publiée régulièrement.

- [1] Recommandation UIT-T G.707 (1996), *Interface de noeud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone.*
- [2] Recommandation G.811 du CCITT (1988), *Conditions sur le rythme de sortie des horloges de référence primaires destinées à l'exploitation en mode plésiochrone de liaisons numériques internationales.*
- [3] Recommandation G.812 du CCITT (1988), *Conditions sur le rythme de sortie des horloges asservies destinées à l'exploitation en mode plésiochrone de liaisons numériques internationales.*
- [4] Recommandation UIT-T G.813 (1996), *Caractéristiques de rythme des horloges asservies utilisées dans les équipements SDH.*
- [5] Recommandation G.822 du CCITT (1988), *Objectifs de limitation du taux de glissement commandé dans une communication numérique internationale.*
- [6] Recommandation UIT-T G.823 (1993), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques fondés sur la hiérarchie à 2048 kbit/s.*
- [7] Recommandation UIT-T G.824 (1993), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques fondés sur la hiérarchie à 1544 kbit/s.*
- [8] Recommandation UIT-T G.825 (1993), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques à hiérarchie numérique synchrone.*

3 Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées pour les besoins des Recommandations sur la synchronisation et de la détermination des rythmes:

ADEV	écart d'Allan (<i>allan deviation</i>)
AIS	signal d'indication d'alarme (<i>alarm indication signal</i>)
AP	point d'accès (<i>access point</i>)
CUT	horloge sous test (<i>clock under test</i>)
FFM	scintillation de fréquence (<i>flicker frequency modulation</i>)
FPM	scintillation de phase (<i>flicker phase modulation</i>)
MC	horloge principale (<i>master clock</i>)
MDEV	écart d'Allan modifiée (<i>modified allan deviation</i>)
MRTIE	erreur relative maximale d'intervalle temporel (<i>maximum relative time interval error</i>)
MST	terminal de section multiplex (<i>multiplex section terminal</i>)
MTIE	erreur maximale d'intervalle temporel (<i>maximum time interval error</i>)
NE	élément de réseau (<i>network element</i>)
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PRC	horloge de référence primaire (<i>primary reference clock</i>)
RTPC	réseau téléphonique public commuté
RWFM	modulation de fréquence par processus à marche aléatoire; marche aléatoire fréquentielle (<i>random walk frequency modulation</i>)
SASE	équipement autonome de synchronisation (<i>stand alone synchronisation equipment</i>)
SC	horloge asservie (<i>slave clock</i>)
SDH	hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SE	élément de synchronisation (<i>synchronisation element</i>)
SEC	horloge d'équipement SDH (<i>SDH equipment clock</i>)
SETS	source de base de temps d'équipement SDH (<i>SDH equipment timing source</i>)
STM	module de transport synchrone (<i>synchronous transport module</i>)
SSU	unité de synchronisation (<i>synchronisation supply unit</i>)
TDEV	écart temporel (<i>time deviation</i>)
TIE	erreur d'intervalle temporel (<i>time interval error</i>)
TIErms	erreur quadratique moyenne d'intervalle temporel (<i>root mean square time interval error</i>)
TVAR	variance de temps (<i>time variance</i>)
UI	intervalle unitaire (<i>unit interval</i>)
UIp-p	intervalle unitaire de crête à crête (<i>unit interval peak-to-peak</i>)
UTC	temps universel coordonné (<i>coordinated universal time</i>)

WFM bruit blanc de fréquence (*white frequency modulation*)

WPM bruit blanc de phase (*white phase modulation*)

4 Définitions

Les termes suivants sont utilisés pour les besoins des Recommandations sur la synchronisation et de la détermination des rythmes.

4.1 Définitions générales

4.1.1 gigue d'alignement: variations à court terme entre les instants d'échantillonnage optimaux d'un signal numérique et les signaux d'une horloge d'échantillonnage reconstituée à partir de ce signal.

4.1.2 bilatéral: liaison de synchronisation sur laquelle une action corrective de verrouillage est activée aux deux extrémités.

4.1.3 décalage fréquentiel: décalage de la fréquence à long terme d'un signal de rythme par rapport à sa valeur nominale.

4.1.4 synchronisation de réseau: concept générique qui traduit la manière de distribuer un signal horaire ou fréquentiel commun à tous les éléments du réseau.

4.1.5 synchronisation unilatérale: méthode pour synchroniser un noeud de synchronisation donné par rapport à un autre noeud de synchronisation, qui consiste à dériver l'information de synchronisation au niveau du noeud donné à partir du déphasage entre l'horloge locale et le signal numérique parvenant de l'autre noeud.

4.1.6 chaîne de synchronisation: interconnexion active des noeuds et liaisons de synchronisation.

4.1.7 chaîne de référence de synchronisation: chaîne de synchronisation particulière qui sert de base à la simulation des phénomènes de gigue et de dérapage dans le réseau de synchronisation.

4.1.8 glissement: duplication ou suppression d'un bloc de bits dans un flux binaire synchrone ou plésiochrone en raison d'un écart entre les cadences de lecture et d'écriture en mémoire tampon.

4.1.9 fréquence standard: fréquence liée par une relation donnée à une fréquence étalon.

4.1.10 temps: instant spécifié (heure) ou durée d'un intervalle de temps

NOTE – Dans le cadre de la synchronisation des réseaux, les mots "temps", "base de temps" et "rythme" font généralement référence aux signaux de fréquence utilisés pour la synchronisation ou les mesures.

4.1.11 échelle de temps: système non ambigu d'ordonnement des événements.

NOTE – Il pourra s'agir d'une suite d'intervalles de temps égaux et aux limites précises, se succédant sans interruption depuis un point origine parfaitement défini. Une échelle de temps permet de dater tout événement. Les calendriers sont un exemple d'échelles de temps. Un signal fréquentiel ne constitue pas une échelle de temps (les différentes périodes n'en sont ni marquées ni datées). Pour cette raison, il faut parler de "fréquence UTC" plutôt que de "temps UTC".

4.1.12 gigue (de rythme): variations à court terme des instants significatifs d'un signal numérique par rapport aux valeurs nominales correspondantes (le court terme signifiant ici des variations à une fréquence supérieure ou égale à 10 Hz).

4.1.13 unilatéral: liaison de synchronisation sur laquelle une action corrective de verrouillage n'est activée qu'à une extrémité.

4.1.14 UTC: échelle de temps conservée par le Bureau international des Poids et Mesures (BIPM) et par le "International Earth Rotation Service" (IERS), et servant de base à la diffusion coordonnée des fréquences standard et des signaux horaires.

NOTE – La fréquence de référence pour la synchronisation des réseaux est la fréquence qui sert à la génération de l'échelle de temps UTC. Il est donc préférable de parler de "fréquence UTC" plutôt que de "temps UTC".

4.1.15 dérapage: variations à long terme des instants significatifs d'un signal numérique par rapport aux valeurs nominales correspondantes (le long terme désignant ici des variations de fréquence inférieures à 10 Hz).

NOTE – Dans le cadre de la présente Recommandation et des Recommandations connexes, cette définition ne recouvre pas les dérapages dus aux biais et aux dérives de fréquence.

4.2 Définitions relatives aux horloges

4.2.1 horloge: équipement fournissant un signal de rythme.

NOTE – Dans le cadre des réseaux de synchronisation, le mot "horloge" désigne généralement le générateur fréquentiel servant à synchroniser le réseau.

4.2.2 fréquence étalon: générateur dont la sortie est utilisée comme référence fréquentielle.

4.2.3 horloge principale: générateur fournissant un signal fréquentiel précis utilisé pour l'asservissement d'autres générateurs.

4.2.4 horloge nodale: horloge fournissant le signal de synchronisation d'un ou plusieurs équipements.

4.2.5 horloge de référence primaire (PRC, *primary reference clock*): fréquence étalon de référence qui fournit un signal fréquentiel de référence conforme à la Recommandation G.811.

4.2.6 horloge asservie: horloge dont le signal de rythme en sortie est verrouillé en phase sur un signal de rythme de référence émis par une horloge de meilleure qualité.

4.2.7 équipement autonome de synchronisation (SASE, *stand alone synchronization equipment*): réalisation de la fonction SSU logique sous forme d'élément autonome incorporant ses propres fonctions de gestion.

4.2.8 unité de synchronisation (SSU, *synchronization supply unit*): fonction logique de sélection, de traitement et de distribution d'un signal fréquentiel de référence, répondant aux caractéristiques fréquentielles données dans la Recommandation G.812.

4.3 Définitions relatives aux réseaux de synchronisation

4.3.1 mode asynchrone: mode de fonctionnement dans lequel il est prévu que les horloges fonctionnent de manière indépendante.

4.3.2 noeud local: noeud de réseau synchrone directement interfacé avec l'équipement de l'utilisateur.

4.3.3 mode maître-esclave: mode dans lequel le signal d'une horloge principale sert de fréquence étalon distribuée à toutes les horloges qui lui sont asservies.

4.3.4 mode de synchronisation mutuelle: mode de fonctionnement dans lequel les horloges se pilotent toutes les unes les autres à un degré ou à un autre.

4.3.5 mode plésiochrone: mode de fonctionnement dans lequel les caractéristiques essentielles des échelles de temps et des signaux horaires sont telles que leurs instants caractéristiques

correspondants se produisent nominalement à la même cadence, toute variation de rythme restant dans des limites spécifiées.

4.3.6 mode pseudo-synchrone: mode de fonctionnement dans lequel la précision fréquentielle à long terme de toutes les horloges répond en conditions d'exploitation normales aux caractéristiques des horloges de référence primaires spécifiées dans la Recommandation G.811. Mais les horloges du réseau ne seront pas toutes alignées sur une même horloge de référence primaire.

4.3.7 élément de synchronisation: horloge fournissant des services de rythme aux éléments de réseau qui lui sont raccordés. Ce terme englobe les horloges conformes aux Recommandations G.811, G.812 et G.813.

4.3.8 liaison de synchronisation: liaison entre deux noeuds de synchronisation sur laquelle est transmis un signal de synchronisation.

4.3.9 réseau synchrone: réseau dans lequel les horloges ont toutes la même précision à long terme en conditions d'exploitation normales.

4.3.10 réseau de synchronisation: réseau utilisé pour fournir les signaux de rythme de référence. Un réseau de synchronisation se compose en général de noeuds de réseau de synchronisation raccordés par des liaisons de synchronisation.

4.3.11 noeud de réseau de synchronisation: ensemble d'équipements groupés sur un même site et directement synchronisés par une même horloge nodale.

NOTE – Un même site peut comporter plusieurs noeuds de réseau de synchronisation.

4.3.12 puits de synchronisation: extrémité destinataire d'un signal de rythme sur un chemin de synchronisation.

4.3.13 source de synchronisation: source d'un signal de base de temps sur un chemin de synchronisation.

4.3.14 alignement de synchronisation: ensemble d'éléments de synchronisation et de chemins de synchronisation appartenant normalement à un même domaine d'équipements de la hiérarchie numérique synchrone ou plésiochrone.

4.3.15 chemin de synchronisation: ensemble des éléments de la ligne de connexion assurant le raccordement d'un élément de synchronisation à un élément de réseau ou de deux éléments de synchronisation entre eux.

4.3.16 noeud de transit: noeud de réseau de synchronisation s'interfaçant avec d'autres noeuds de ce réseau mais ne s'interfaçant pas directement avec les équipements de l'utilisateur.

4.4 Définitions relatives aux modes de fonctionnement des horloges (horloges asservies)

4.4.1 mode de fonctionnement libre: mode de fonctionnement d'une horloge dans lequel le signal de sortie dépend fortement de l'oscillateur et n'est pas régulé par des techniques d'autoverrouillage en phase. Lorsque l'horloge est dans ce mode, c'est qu'elle n'a pas encore reçu de signal de référence du réseau, ou alors qu'elle a perdu sa référence externe et n'a pas accès à des données stockées acquises auprès d'une référence précédemment connectée. Le fonctionnement libre débute lorsque la sortie d'horloge ne reflète plus l'influence de la référence externe connectée ou la transition à partir de cette référence; il se termine lorsque le signal de sortie d'horloge s'est verrouillé sur une référence externe.

4.4.2 mode conservatoire: mode de fonctionnement d'une horloge ayant perdu sa référence de pilotage et qui utilise des données stockées acquises pendant une phase précédente de fonctionnement en mode verrouillé. Les données stockées sont utilisées pour contrôler les variations de phase et de fréquence, et permettre ainsi de reproduire le mode de fonctionnement verrouillé dans

des limites spécifiées. Le mode conservatoire débute lorsque le signal de sortie d'horloge ne reflète plus l'influence de la référence externe connectée ou la transition à partir de cette référence; il se termine lorsque le signal de sortie passe à nouveau en mode verrouillé.

4.4.3 fonctionnement idéal: ce type de fonctionnement correspond aux performances d'une horloge lorsque le signal de base de temps de référence en entrée n'est affecté par des anomalies.

4.4.4 mode verrouillé: mode de fonctionnement d'une horloge asservie dans lequel le signal de sortie est régulé par une référence externe en entrée de telle manière que le signal de sortie de l'horloge ait la même fréquence moyenne à long terme que la référence d'entrée, et que la fonction d'erreur entre l'entrée et la sortie soit bornée. Le mode verrouillé est le mode de fonctionnement normal d'une horloge asservie.

4.4.5 fonctionnement sous charge: mode de fonctionnement correspondant aux performances effectives d'une horloge sous l'effet des conditions d'exploitation réelles. Ces conditions de charge englobent les effets de la protection de gigue, les actions de commutation et la perte du signal de rythme de référence en entrée.

4.5 Définitions relatives à la caractérisation des horloges

4.5.1 vieillissement: modification permanente de la fréquence d'un oscillateur avec le temps.

NOTE – Il s'agit de la dérive fréquentielle de l'oscillateur à facteurs externes constants (environnement, alimentation, température, etc.). La spécification d'une valeur de vieillissement doit toujours être accompagnée de l'indication de la durée correspondante.

4.5.2 écart fréquentiel relatif: différence entre la fréquence effective du signal et sa fréquence nominale, rapportée à sa fréquence nominale. L'écart fréquentiel relatif $y(t)$ est donné par l'expression:

$$y(t) = \frac{v(t) - v_{\text{nom}}}{v_{\text{nom}}}$$

4.5.3 précision de fréquence: valeur maximale de l'écart fréquentiel relatif dans un intervalle de temps donné.

NOTE – La précision de fréquence englobe le décalage fréquentiel initial ainsi que les effets du vieillissement et des conditions ambiantes.

4.5.4 dérive de fréquence: vitesse de variation de l'écart fréquentiel relatif à partir d'une valeur donnée sous l'effet du vieillissement et des conditions externes (rayonnement, pression, température, humidité, alimentation, charge, etc.).

NOTES

1 Les facteurs externes doivent toujours être précisés.

2 La dérive de fréquence ne désigne pas la seule vitesse de dérive linéaire, mais englobe aussi toutes les composantes d'ordre supérieur de la variation de l'écart fréquentiel relatif.

4.5.5 stabilité en fréquence: variations fréquentielles spontanées ou induites par les conditions ambiantes pendant un intervalle de temps donné.

NOTE – On distingue généralement les effets systématiques comme les effets de dérive de fréquence (induits par les rayonnements, la pression, la température, l'humidité, l'alimentation, la charge, le vieillissement, etc.) des fluctuations fréquentielles aléatoires qui sont généralement décrites par leurs caractéristiques temporelles (des mesures spéciales ont été développées pour caractériser ces fluctuations comme la variance d'Allan, la variance d'Allan modifiée et la variance temporelle) et fréquentielles (densités spectrales unilatérales).

4.5.6 intervalle de maintien: écart maximal entre la fréquence de référence d'une horloge asservie et une fréquence nominale spécifiée, tel que si la fréquence de référence varie à une vitesse arbitrairement lente dans les limites de cette valeur, l'horloge asservie reste verrouillée dessus.

4.5.7 domaine d'accrochage: écart maximal entre la fréquence de référence d'une horloge asservie et une fréquence nominale donnée, pour lequel l'horloge parviendra à converger vers le mode verrouillé.

4.5.8 domaine de décrochage: écart entre la fréquence de référence d'une horloge asservie et une fréquence nominale donnée, à l'intérieur duquel l'horloge reste en mode verrouillé et à l'extérieur duquel l'horloge ne parvient pas à rester en mode verrouillé, indépendamment de la vitesse de variation de la fréquence de référence.

4.5.9 base de temps: signal nominalelement périodique, généré par une horloge, servant à régler la temporisation et la synchronisation des opérations dans les équipements et réseaux numériques. En raison des perturbations inévitables – les fluctuations de phase de l'oscillateur par exemple –, les signaux de base de temps réels sont en fait pseudo-périodiques, c'est-à-dire que les intervalles de temps séparant deux instants successifs de phase égale sont affectés de faibles variations. Mathématiquement, le signal de rythme $s(t)$ peut être représenté par:

$$s(t) = A \cdot \sin[\Phi(t)]$$

avec:

A coefficient d'amplitude constant;

$\Phi(t)$ phase instantanée totale (un modèle est donné dans l'Appendice I).

4.5.10 base de temps de référence: base de temps de caractéristiques spécifiées pouvant servir de source de rythme à une horloge asservie.

4.5.11 base de temps de référence de mesure: signal de temps de caractéristiques spécifiées servant aux mesures de caractérisation des horloges. Les caractéristiques d'un tel signal sont donc supposées significativement meilleures que celles de l'horloge sous test pour ce qui est du paramètre à tester, afin de ne pas affecter les résultats du test. Les caractéristiques de la fréquence standard doivent être indiquées avec les résultats du test.

4.5.12 fonction heure ou fonction temps: l'heure ou le temps d'une horloge est la mesure du temps idéal t fournie par cette horloge. Mathématiquement, la fonction heure $T(t)$ générée par l'horloge est définie par l'équation:

$$T(t) = \frac{\Phi(t)}{2\pi\nu_{\text{nom}}}$$

avec:

$\Phi(t)$ phase instantanée totale du signal horaire en sortie d'horloge;

ν_{nom} fréquence nominale de l'horloge.

4.5.13 fonction d'erreur de temps: l'erreur de temps d'une horloge par rapport à une fréquence étalon est la différence entre l'heure donnée par cette horloge et celle de la fréquence étalon. Mathématiquement, l'erreur de temps $x(t)$ entre une horloge générant un temps $T(t)$ et une horloge de référence générant un temps $T_{\text{ref}}(t)$ est donnée par l'équation:

$$x(t) = T(t) - T_{\text{ref}}(t)$$

Sur le plan abstrait, il est possible d'imaginer que la fréquence étalon est idéale (c'est-à-dire que $T_{\text{ref}}(t) = t$); mais comme on ne dispose pas de référence de temps idéale pour les mesures, l'erreur de temps idéale n'a pas d'intérêt pratique.

L'erreur de temps est la fonction de base par rapport à laquelle sont calculés de nombreux paramètres de stabilité (MTIE, TIErms, variance d'Allan, etc.). Comme il n'est pas possible en pratique de disposer des valeurs continues de la fonction $x(t)$, on utilise à cette fin des échantillons régulièrement espacés de cette fonction $x_i = x(t_0 + i\tau_0)$.

Comme le montre l'Appendice I, il est possible, à partir d'un modèle approprié de signal de base de temps, de dériver le modèle correspondant d'erreur de temps.

4.5.14 erreur d'intervalle temporel (TIE, *time interval error*): différence entre la mesure d'un intervalle de temps par une horloge donnée et la mesure de cet intervalle par une horloge de référence. Mathématiquement, la fonction TIE($t;\tau$) est donnée par l'expression:

$$\text{TIE}(t;\tau) = [T(t + \tau) - T(t)] - [T_{\text{ref}}(t + \tau) - T_{\text{ref}}(t)] = x(t + \tau) - x(t),$$

avec τ = intervalle temporel, généralement appelé *intervalle d'observation*.

4.5.15 erreur maximale d'intervalle temporel (MTIE, *maximum time interval error*): variation maximale de l'intervalle de temps crête à crête d'un signal de rythme donné par rapport à une base de temps idéale sur un temps d'observation ($\tau = n\tau_0$) pour tous les instants d'observation de cette longueur pendant la durée d'observation (T). Cette valeur est donnée par l'expression suivante:

$$\text{MTIE}(n\tau_0) \cong \max_{1 \leq k \leq N-n} \left[\max_{k \leq i \leq k+n} x_i - \min_{k \leq i \leq k+n} x_i \right] \text{ avec } n = 1, 2, \dots, N-1$$

4.5.16 erreur relative maximale d'intervalle temporel (MRTIE, *maximum relative time interval error*): variation maximale de l'intervalle de temps crête à crête d'un signal de rythme sortant par rapport à un signal de rythme entrant sur un temps d'observation ($\tau = n\tau_0$), pour tous les instants d'observation de cette durée pendant la durée d'observation (T).

4.5.17 écart temporel ou écart de temps (TDEV, *time deviation* ou σ_x): mesure de l'espérance de la variation horaire d'un signal en fonction du temps. TDEV peut également fournir des informations sur le contenu spectral du bruit de phase (ou temporel) d'un signal. TDEV, qui s'exprime en unités de temps, peut être évalué à partir de la séquence d'échantillons d'erreurs de temps $x(t)$ par la formule suivante:

$$\text{TDEV}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \text{ avec } n = 1, 2, \dots, \text{partie entière} \left(\frac{N}{3} \right)$$

avec:

x_i échantillons d'erreur de temps;

N nombre total d'échantillons;

τ_0 intervalle d'échantillonnage;

τ temps d'intégration, variable indépendante de TDEV;

n nombre d'intervalles d'échantillonnage avec un temps d'intégration τ .

Le temps d'intégration vaut donc $\tau = n\tau_0$. L'Appendice II fournit des informations techniques sur les paramètres de TDEV.

NOTE – Dans certains cas, des erreurs systématiques comme la quantification de phase ou de fréquence peuvent masquer les composantes de bruit. Pour la discussion de ce point, voir II.3.

4.5.18 variance horaire ou variance de temps (TVAR, *time variance* ou σ_x^2): carré de l'écart horaire.

4.5.19 transitoire de phase: perturbations de phase de durée limitée.

4.6 Définitions propres à la hiérarchie numérique synchrone (SDH)

4.6.1 horloge d'équipement SDH (SEC, *SDH equipment clock*): fonction logique représentant l'horloge d'équipement d'un élément de réseau SDH, caractérisée par les propriétés de rythme indiquées dans la Recommandation G.813.

4.6.2 source de base de temps d'équipement SDH (SETS, *SDH equipment timing source*): fonction logique représentant toutes les fonctions intervenant dans la synchronisation dans un élément de réseau SDH.

4.6.3 noeud de synchronisation: ensemble constitué d'une unité de synchronisation SSU et de toutes les horloges d'équipement SEC directement synchronisées par cette unité.

4.6.4 message d'état de synchronisation: code du niveau de référence de la source de rythme conformément aux spécifications de la Recommandation G.707.

5 Description des composantes de la variation de phase

Les variations de phase sont généralement décomposées en trois composantes: la gigue, le dérapage et les effets de biais et de dérives fréquentiels. De plus, les discontinuités de phase dues à des perturbations transitoires telles que les réacheminements dans le réseau, les commutations automatiques de protection, etc. peuvent également être sources de variation de phase.

6 Dégradations causées par la variation de phase

6.1 Types de dégradations

6.1.1 Erreurs

Des erreurs peuvent se produire aux points de régénération du signal par suite du déplacement des signaux de rythme par rapport à leur position temporelle idéale.

6.1.2 Dégradation des informations analogiques à codage numérique

Les informations analogiques codées numériquement peuvent être dégradées par des variations de phase au moment de la reconstitution des échantillons dans le convertisseur N/A en bout de connexion. Ce phénomène peut avoir un effet significatif sur les signaux vidéo à codage numérique.

6.1.3 Glissements

Les glissements résultent de l'incapacité de la mémoire tampon de l'équipement (ou d'un autre mécanisme) à gérer les différences de phase ou de fréquence entre les signaux entrants et sortants lorsque le rythme du signal sortant ne dérive pas de celui du signal entrant. Les glissements peuvent être contrôlés ou incontrôlés selon la stratégie de contrôle adoptée.

6.2 Contrôle des dégradations

6.2.1 Erreurs

Tant pour le réseau que pour les équipements, les spécifications de gigue ont pour but de garantir que ce phénomène n'affectera pas les caractéristiques d'erreur du réseau.

6.2.2 Dégradation des signaux analogiques à codage numérique

Les spécifications de gigue ont pour but de fournir aux fabricants les informations nécessaires pour que leurs équipements puissent fonctionner avec les niveaux prévus de variation de phase sans dégradation inacceptable.

6.2.3 Glissements

Des phénomènes de glissement peuvent apparaître dans les multiplexes asynchrones et dans divers équipements synchrones. Une fois spécifiés les niveaux de variation de phase, il est possible de minimiser les glissements dans les multiplexeurs/démultiplexeurs asynchrones par un choix approprié des valeurs de justification et de capacité de mémoire tampon. Dans les équipements synchrones, les phénomènes de glissement peuvent être minimisés par un choix approprié de la capacité de la mémoire tampon ainsi que par la spécification rigoureuse des caractéristiques d'horloge.

Il est à noter qu'il est impossible d'éliminer les glissements lorsqu'il existe une différence de fréquence entre les rythmes des signaux d'entrée et de sortie. La Recommandation G.822 fixe les objectifs en matière de caractéristiques de glissement contrôlé pour une connexion internationale.

Il est possible d'utiliser divers équipements d'alignement pour minimiser l'effet des glissements. Les deux types suivants d'équipements d'alignement conviennent aux terminaisons de signaux numériques:

- aligneur de trame;
- aligneur d'intervalle de temps.

6.2.3.1 Aligneurs de trame

Lorsqu'on utilise un aligneur de trame, un glissement correspondra à l'insertion ou à la suppression d'un ensemble de symboles consécutifs représentant une trame complète. Dans le cas des structures de trames définies dans la Recommandation G.704, le glissement peut consister en une trame complète. Il est important que les retards maximal et moyen introduits par l'aligneur de trame soient aussi petits que possible afin de minimiser le temps de propagation. Une fois un glissement introduit par l'aligneur, il est également important que celui-ci soit capable d'absorber des modifications supplémentaires importantes dans les temps d'arrivée des signaux de verrouillage de trame avant que l'introduction d'un nouveau glissement ne s'avère nécessaire.

6.2.3.2 Aligneurs d'intervalle de temps

Lorsqu'on utilise un aligneur d'intervalle de temps, un glissement correspondra à l'insertion ou à la suppression de huit positions binaires consécutives d'un intervalle de temps sur une ou plusieurs voies à 64 kbit/s. Comme les glissements peuvent survenir sur différentes voies à différents moments, il est nécessaire de prévoir des dispositions de contrôle spéciales dans les commutateurs s'il faut maintenir l'intégrité de séquence des octets sur des services à intervalles de temps multiples.

7 Objet des spécifications de variation de phase

7.1 Gigue

Les prescriptions relatives à la gigue au niveau des interfaces de noeuds de réseau telles qu'elles sont données dans les Recommandations G.823, G.824 et G.825 relèvent de deux catégories principales:

- spécification de la gigue maximale permise à la sortie des interfaces hiérarchiques;
- spécification des tests en présence d'une gigue sinusoïdale pour garantir que les accès d'entrée peuvent admettre les niveaux de gigue prévus sur le réseau.

Des prescriptions supplémentaires relatives à la gigue pour différents équipements se trouvent dans les Recommandations traitant de ces équipements.

7.2 Dérapage

Les prescriptions en matière de dérapage peuvent être catégorisées de la manière suivantes:

- i) dérapage maximal admissible à la sortie des noeuds de réseau de synchronisation;
- ii) essais sous charge pour s'assurer que les accès d'entrée des équipements synchrones peuvent admettre les niveaux prévus de dérapage du réseau;
- iii) prescriptions de dérapage des horloges de référence primaire et des horloges asservies, et notamment:
 - a) dérapage de sortie intrinsèque en fonctionnement verrouillé;
 - b) dérapage de sortie intrinsèque en fonctionnement libre;
 - c) dérapage de sortie en test sous charge;
 - d) caractéristique de transfert de dérapage.

Les prescriptions existantes relatives aux horloges primaires et asservies sont données dans les Recommandations G.811, G.812 et G.813.

L'objet de ces Recommandations est de spécifier des limites non seulement pour les dérapages s'accumulant le long des trajets de transmission, mais aussi pour les dérapages s'accumulant le long des liaisons de distribution de la synchronisation et résultant du montage des horloges en cascade.

8 Structure des réseaux de synchronisation

8.1 Modes de synchronisation

Les réseaux internationaux fonctionnent généralement en mode plésiochrone les uns par rapport aux autres.

La synchronisation des réseaux nationaux peut appartenir à l'un des types suivants:

- réseaux totalement synchronisés, pilotés par une ou plusieurs horloges de référence primaires;
- réseaux totalement plésiochrones;
- réseaux mixtes, c'est-à-dire avec des sous-réseaux synchronisés pilotés par une ou plusieurs horloges de référence primaires fonctionnant en mode plésiochrone les unes par rapport aux autres.

8.2 Réseaux de synchronisation

Il existe deux méthodes fondamentales de synchronisation des horloges nodales:

- la synchronisation maître-esclave;
- la synchronisation mutuelle.

La synchronisation maître-esclave utilise une horloge de référence primaire unique sur laquelle toutes les autres horloges sont verrouillées en phase. La synchronisation s'obtient en acheminant le signal de rythme d'une horloge à la suivante. Il est alors possible d'établir une hiérarchie entre les horloges, certaines d'entre elles, asservies par des horloges d'ordre plus élevé, agissant à leur tour en tant que maîtres vis-à-vis d'horloges d'ordre inférieur.

Dans un système de synchronisation mutuelle, toutes les horloges sont interconnectées; il n'y a pas de structure hiérarchique sous-jacente, ni d'horloge de référence primaire unique.

Certaines méthodes de synchronisation utilisées en pratique combinent la technique maître-esclave et la technique de synchronisation mutuelle.

9 Configurations de mesure

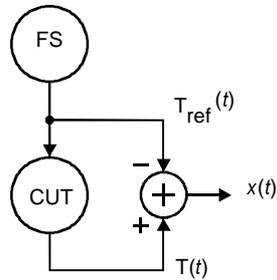
Lors de la mesure des performances d'horloge, la configuration de mesure affectera les résultats de test. Par conséquent, les Recommandations relatives à la synchronisation et aux bases de temps devront toutes spécifier l'une des configurations de mesure suivantes.

9.1 Configuration de mesure à horloges synchronisées

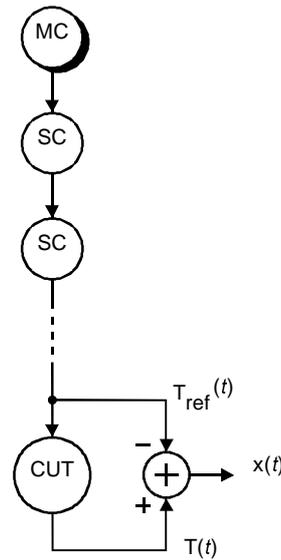
Lorsque deux signaux de base de temps intervenant dans la mesure de l'erreur temporelle se rapportent à une horloge primaire commune, la configuration de mesure est dite configuration d'horloges synchronisées. La Figure 1 représente deux cas intéressants en pratique et relevant de cette configuration. L'erreur de temps mesurée dans une configuration d'horloges synchronisées n'est pas affectée par le biais et la dérive fréquentielle de l'horloge primaire commune, comme l'explique l'Appendice I. Les paramètres de stabilité calculés à partir des valeurs d'erreurs temporelles ne reflètent que le bruit de phase interne des horloges intervenant dans la mesure.

9.2 Configuration de mesure à horloges indépendantes

Toute configuration de mesure qui ne fait pas intervenir d'horloge principale commune pour contrôler les signaux de rythme entre lesquels l'erreur de temps est mesurée est dite configuration à horloges indépendantes. La Figure 2 représente certaines configurations relevant de ce principe. En plus du fait qu'elle dépend du bruit interne des horloges, l'erreur de temps mesurée dans une configuration à horloges indépendantes est affectée de surcroît par tout biais ou dérive fréquentiels des horloges intervenant dans la mesure.



a) caractérisation d'une horloge en mode verrouillé en laboratoire



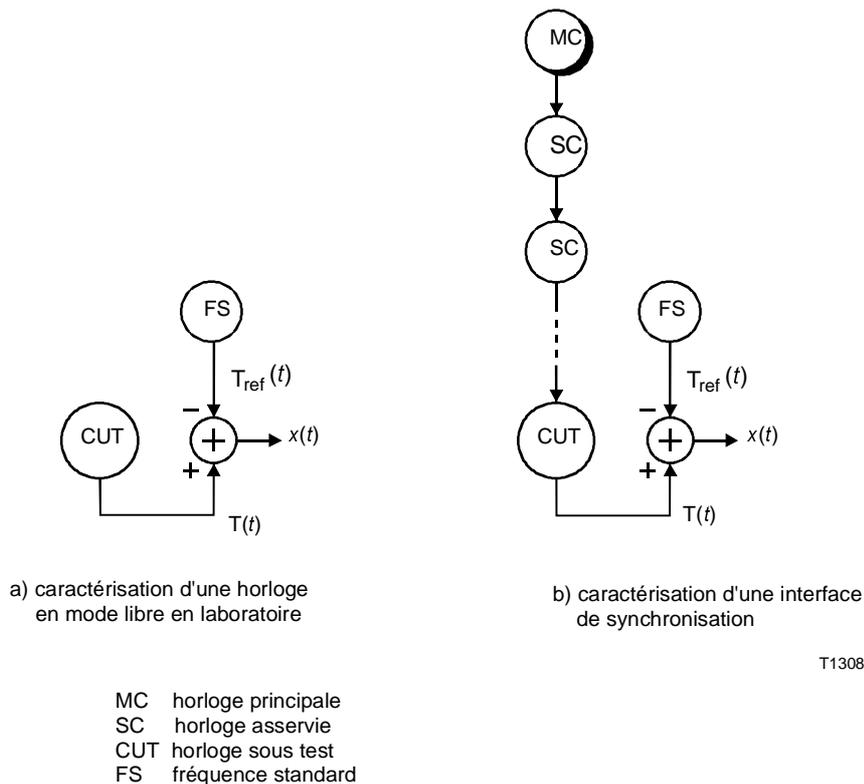
b) caractérisation d'une horloge en mode verrouillé sur site

MC horloge principale
 SC horloge asservie
 CUT horloge sous test
 FS fréquence standard

T1308780-96

FIGURE 1/G.810

Mesure de l'erreur de temps d'horloges en configuration synchronisée



T1308790-96

FIGURE 2/G.810

Mesure de l'erreur de temps d'horloges en configuration indépendante

Appendice I

Modèles mathématiques des signaux de rythme

I.1 Modèle de phase instantanée totale d'un signal de rythme parfait

La phase totale $\Phi_{id}(t)$ d'un signal de rythme parfait est modélisée par l'expression suivante:

$$\Phi_{id}(t) = 2\pi\nu_{nom}t$$

avec:

ν_{nom} fréquence nominale.

I.2 Modèle de phase instantanée totale des signaux de rythme réels

Un signal de rythme réel $\Phi(t)$ sera modélisé par l'équation suivante:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + 2\pi\nu_{nom}(1 + y_0)t + \pi D\nu_{nom}t^2 + \varphi(t)$$

avec:

Φ_0 déphasage initial;

y_0 écart fréquentiel relatif par rapport à la valeur nominale ν_{nom} (essentiellement dû aux limites de possibilité de réglage de la fréquence de l'horloge);

- D dérive fréquentielle linéaire relative (représentant essentiellement les effets de vieillissement de l'oscillateur);
- $\varphi(t)$ composante aléatoire du déphasage.

I.3 Modèle d'erreur de temps

A partir des définitions de l'erreur de temps et du modèle de phase $\Phi(t)$ donné ci-dessus, on obtient le modèle suivant de l'erreur de temps $x(t)$:

$$x(t) = x_0 + (y_0 - y_{0,\text{ref}})t + \frac{D - D_{\text{ref}}}{2}t^2 + \frac{\varphi(t) - \varphi_{\text{ref}}(t)}{2\pi\nu_{\text{nom}}}$$

NOTE – Certains auteurs désignent par $x(t)$ la seule composante aléatoire de bruit (c'est-à-dire le dernier terme de l'expression ci-dessus), alors que dans le présent document, $x(t)$ représente l'erreur de temps totale (c'est-à-dire y compris les éventuelles composantes déterministes comme le montre le modèle ci-dessus).

En supposant que l'erreur $x(t)$ est mesurée avec une configuration à horloges indépendantes, et que l'horloge de référence est convenablement choisie (c'est-à-dire que les imperfections de la source – $y_{0,\text{ref}}$, D_{ref} et $\varphi_{\text{ref}}(t)$ – sont toutes négligeables comparées à celles de l'horloge sous test), le modèle de $x(t)$ se réduit aux termes suivants:

$$x(t) = x_0 + y_0t + \frac{D}{2}t^2 + \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_{\text{nom}}}$$

En configuration à horloges synchronisées, toutes les horloges asservies intervenant dans la distribution du rythme (y compris l'horloge sous test) fonctionnent en mode verrouillé. On peut alors supposer $y_{0,\text{ref}} = y_0$ et $D_{\text{ref}} = D$. Le modèle de $x(t)$ est alors ramené aux termes suivants:

$$x(t) = x_0 + \frac{\varphi(t) - \varphi_{\text{ref}}(t)}{2\pi\nu_{\text{nom}}}$$

Appendice II

Définition et propriétés des mesures de stabilité fréquentielle et temporelle

A l'heure actuelle, cinq grandeurs ont été jugées intéressantes par les organismes de normalisation pour caractériser la stabilité temporelle:

- écart d'Allan (ADEV);
- écart d'Allan modifié (MDEV);
- écart temporel (TDEV);
- erreur quadratique moyenne d'intervalle temporel (TIErms);
- erreur maximale d'intervalle temporel (MTIE).

Les paragraphes II.1 à II.5 caractérisent ces différentes grandeurs selon le schéma suivant:

- définition formelle exprimée en fonction de l'erreur temporelle $x(t)$;
- expression de l'estimée de la grandeur en fonction d'un échantillonnage de $x(t)$, c'est-à-dire en fonction d'une suite de N valeurs $x_i = x(i\tau_0)$, τ_0 étant la période d'échantillonnage et $i=1, 2, \dots, N$ étant le numéro d'intervalle;
- relation entre intégrales fréquentielles/temporelles de la densité de puissance spectrale $S_\varphi(f)$ du déphasage aléatoire $\varphi(t)$ affectant le signal de rythme et la grandeur considérée;

- comportement de la grandeur lorsque le signal de rythme est affecté par les types les plus courants de bruit, à savoir bruit blanc de phase (WPM), scintillation de phase (FPM), bruit blanc fréquentiel (WFM), scintillation fréquentielle (FFM) et marche aléatoire fréquentielle (RWFm);
- comportement quantitatif lorsque le signal de rythme est affecté par un biais ou une dérive fréquentiel;
- avantages et inconvénients, ainsi que des informations techniques sur la méthode de mesure et sur l'utilité de la conception des réseaux synchronisés.

En ce qui concerne les définitions formelles des écarts ADEV et MDEV en fonction de $x(t)$, il est important de noter que la fonction $x(t)$ ne tient compte que des effets du seul bruit aléatoire, alors qu'ici, pour des raisons pratiques et sans réduire la généralité du problème, on suppose que $x(t)$ comporte également les éventuelles composantes déterministes.

II.1 Ecart d'Allan (ADEV)

Dans ce qui suit, $x(t)$ est la fonction d'erreur de temps, $\{x_i = x(i\tau_0), i = 1, 2, \dots, N\}$ est une séquence de N échantillons régulièrement espacés de la fonction $x(t)$. τ_0 est la période d'échantillonnage, et $\tau = n\tau_0$ est l'intervalle d'observation.

Définition

L'écart d'Allan ADEV(τ) est défini par l'expression:

$$\text{ADEV}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2} \langle [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]^2 \rangle}$$

dans laquelle les parenthèses angulaires symbolisent une moyenne sur un ensemble. Pour les types de bruit à distribution polynomiale, le résultat est le même si on remplace la moyenne sur l'ensemble par l'intégrale infinie moyenne sur le temps, à condition d'effectuer le calcul du carré de la différence seconde avant celui de la moyenne sur le temps infini.

Expression de l'estimateur

Une estimée de l'écart ADEV($n\tau_0$) est donnée par l'expression:

$$\text{ADEV}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2} \quad \text{avec } n = 1, 2, \dots, \text{partie entière} \left(\frac{N-1}{2} \right)$$

Relation intégrale fréquentielle/temporelle

L'écart d'Allan d'un signal de rythme est lié à la densité spectrale de puissance $S_\varphi(f)$ de son déphasage aléatoire $\varphi(t)$ par la relation intégrale suivante:

$$\text{ADEV}(\tau) = \sqrt{\frac{2}{(\pi v_{\text{nom}} \tau)^2} \int_0^{f_h} S_\varphi(f) \sin^4(\pi \tau f) df}$$

dans laquelle v_{nom} est la fréquence nominale du signal de rythme et f_h la largeur de bande du dispositif de mesure. La relation ci-dessus est valide dans l'hypothèse où aucune composante déterministe n'affecte les données d'erreur de temps utilisées pour calculer ADEV(τ).

Caractéristiques de bruit

L'écart ADEV(τ) converge pour les principaux types de bruit qui affectent les signaux de rythme en pratique. Le Tableau II.1 indique les pentes caractéristiques des fonctions ADEV(τ) selon le type de bruit. La fonction ADEV(τ) ne permet pas de distinguer le bruit de modulation de phase par scintillation (FPM) du bruit de modulation de phase par bruit blanc (WPM).

TABLEAU II.1/G.810

Type de processus de bruit	Pente d' ADEV(τ)
bruit blanc de phase (WPM)	τ^{-1}
scintillation de phase (FPM)	τ^{-1}
bruit blanc de fréquence (WFM)	$\tau^{-1/2}$
scintillation de fréquence (FFM)	τ^0
marche aléatoire fréquentielle (RWFM)	$\tau^{1/2}$

Biais et dérive fréquentiels

Un biais fréquentiel constant de signal de rythme par rapport à l'horloge de référence n'a aucun effet sur ADEV(τ).

Dans les intervalles d'observation τ où domine une dérive fréquentielle linéaire, ADEV(τ) se comporte comme τ .

Avantages et inconvénients

Le comportement d' ADEV(τ) est assez nettement indépendant de la période d'échantillonnage τ_0 .

La fonction ADEV fournit plus d'informations sur le bruit d'horloge que la fonction MTIE, mais ne convient pas à la caractérisation de la mémoire tampon.

La fonction ADEV est sensible aux effets systématiques, qui pourraient masquer les composantes de bruit. Le signal mesuré devra donc subir un filtrage adéquat avant de calculer ADEV. Le dérapage diurne est un exemple d'effet systématique.

Les valeurs résultantes de la fonction ADEV peuvent être fortement influencées par les effets systématiques.

II.2 Ecart d'Allan modifié (MDEV)

Dans ce qui suit, $x(t)$ est la fonction d'erreur de temps; $\{x_i=x(i\tau_0), i=1,2,\dots,N\}$ est une séquence de N échantillons régulièrement espacés de la fonction $x(t)$. τ_0 est la période d'échantillonnage, et $\tau=n\tau_0$ est l'intervalle d'observation.

Définition

L'écart d'Allan modifié MDEV($n\tau_0$) est défini par l'expression:

$$\text{MDEV}(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{2(n\tau_0)^2} \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle}$$

dans laquelle les parenthèses angulaires symbolisent une moyenne sur un ensemble. Pour les types de bruit à loi de distribution polynomiale, le résultat est le même si on remplace la moyenne sur l'ensemble par l'intégrale infinie moyenne sur le temps, à condition d'effectuer le calcul de la moyenne sur $n\tau_0$ du carré de la différence seconde avant celui de la moyenne sur le temps infini.

Expression de l'estimateur

Une estimée de l'écart $MDEV(n\tau_0)$ est donnée par l'expression:

$$MDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \quad \text{avec } n = 1, 2, \dots, \text{ partie entière } \left(\frac{N}{3} \right)$$

Relation intégrale fréquentielle/temporelle

L'écart d'Allan modifié d'un signal de rythme est lié à la densité spectrale de puissance $S_\varphi(f)$ de son déphasage aléatoire $\varphi(t)$ par la relation intégrale suivante:

$$MDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{2}{(\pi v_{\text{nom}} n^2 \tau_0)^2} \int_0^{f_h} S_\varphi(f) \frac{\sin^6(\pi n \tau_0 f)}{\sin^2(\pi \tau_0 f)} df}$$

dans laquelle v_{nom} est la fréquence nominale du signal de rythme et f_h la largeur de bande du dispositif de mesure. La relation ci-dessus est valide dans l'hypothèse où aucune composante déterministe n'affecte les données d'erreur de temps utilisées pour calculer $MDEV(n\tau_0)$.

Caractéristiques de bruit

La fonction $MDEV(\tau)$ converge pour les principaux types de bruit qui affectent les signaux de rythme en pratique. Le Tableau II.2 indique les pentes caractéristiques des fonctions $MDEV(\tau)$ selon le type de bruit; il en résulte que la fonction $MDEV(\tau)$ permet de distinguer les cinq types de bruit.

TABLEAU II.2/G.810

Type de processus de bruit	Pente de $MDEV(\tau)$
bruit blanc de phase (WPM)	$\tau^{-3/2}$
scintillation de phase (FPM)	τ^{-1}
bruit blanc de fréquence (WFM)	$\tau^{-1/2}$
scintillation de fréquence (FFM)	τ^0
marche aléatoire fréquentielle (RWFM)	$\tau^{1/2}$

Biais et dérive fréquents

Un biais de fréquence constant de signal de rythme par rapport à l'horloge de référence n'a aucun effet sur $MDEV(\tau)$.

Dans les intervalles d'observation τ où domine une dérive fréquentielle linéaire, $MDEV(\tau)$ se comporte comme τ .

Avantages et inconvénients

Dans les intervalles d'observation τ où domine un bruit blanc de phase WPM, le comportement de $MDEV(\tau)$ dépend significativement de la période d'échantillonnage τ_0 .

La fonction MDEV fournit plus d'informations sur le bruit d'horloge que la fonction MTIE, mais elle ne convient pas à la caractérisation de la mémoire tampon.

La fonction MDEV est sensible aux effets systématiques, qui pourraient masquer les composantes de bruit. Le signal mesuré devra donc subir un filtrage adéquat avant de calculer MDEV. Le dérapage diurne est un exemple d'effet systématique.

Les valeurs résultantes de la fonction MDEV peuvent être fortement influencées par les effets systématiques.

II.3 Ecart temporel (TDEV)

Dans ce qui suit, $x(t)$ est la fonction d'erreur de temps; $\{x_i=x(i\tau_0), i=1,2,\dots, N\}$ est une séquence de N échantillons régulièrement espacés de la fonction $x(t)$, τ_0 est la période d'échantillonnage, et $\tau=n\tau_0$ est l'intervalle d'observation.

Définition

L'écart temporel TDEV($n\tau_0$) est défini par l'expression:

$$\text{TDEV}(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{6n^2} \left\langle \left[\sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle} = \frac{n\tau_0}{\sqrt{3}} \text{MDEV}(n\tau_0)$$

dans laquelle les parenthèses angulaires symbolisent une moyenne sur un ensemble. Pour les types de bruit à loi de distribution polynomiale, le résultat est le même si on remplace la moyenne sur l'ensemble par l'intégrale infinie moyenne sur le temps, à condition de prendre la moyenne sur $n\tau_0$ du carré de la différence seconde avant de calculer la moyenne sur le temps infini.

Expression de l'estimateur

Une estimée de l'écart TDEV($n\tau_0$) est donnée par l'expression:

$$\text{TDEV}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \quad \text{avec } n = 1, 2, \dots, \text{partie entière} \left(\frac{N}{3} \right)$$

Relation intégrale fréquentielle/temporelle

L'écart temporel d'un signal de rythme est lié à la densité spectrale de puissance $S_\phi(f)$ de son déphasage aléatoire $\phi(t)$ par la relation intégrale suivante:

$$\text{TDEV}(\tau) = \sqrt{\frac{2}{3(\pi v_{\text{nom}} n)^2} \int_0^{f_h} S_\phi(f) \frac{\sin^6(\pi n \tau_0 f)}{\sin^2(\pi \tau_0 f)} df}$$

dans laquelle v_{nom} est la fréquence nominale du signal de rythme et f_h la largeur de bande du dispositif de mesure. La relation ci-dessus est valide dans l'hypothèse où aucune composante déterministe n'affecte les données d'erreur temporelle utilisées pour calculer TDEV($n\tau_0$).

Caractéristiques de bruit

La fonction TDEV(τ) converge pour les principaux types de bruit qui affectent les signaux de rythme en pratique. Le Tableau II.3 indique les pentes caractéristiques des fonctions TDEV(τ) selon le type de bruit; on peut y voir que la fonction TDEV(τ) permet de distinguer les modulations de phase par bruit blanc (WPM) et par scintillation (FPM).

TABLEAU II.3/G.810

Type de processus de bruit	Pente de TDEV(τ)
bruit blanc de phase (WPM)	$\tau^{-1/2}$
scintillation de phase (FPM)	τ^0
bruit blanc de fréquence (WFM)	$\tau^{1/2}$
scintillation de fréquence (FFM)	τ
marche aléatoire fréquentielle (RWFM)	$\tau^{3/2}$

Biais et dérive fréquentiels

Un biais de fréquence constant de signal de rythme par rapport à l'horloge de référence n'a aucun effet sur TDEV(τ).

Dans les intervalles d'observation τ où domine une dérive fréquentielle linéaire, TDEV(τ) se comporte comme τ^2 .

Avantages et inconvénients

Dans les intervalles d'observation τ où domine un bruit blanc de phase WPM, le comportement de TDEV(τ) dépend significativement de la période d'échantillonnage τ_0 .

La fonction TDEV fournit plus d'informations sur le bruit d'horloge que la fonction MTIE, mais elle ne convient pas à la caractérisation de la mémoire tampon.

La fonction TDEV est sensible aux effets systématiques, qui pourraient masquer les composantes de bruit. Le signal mesuré devra donc subir un filtrage adéquat avant de calculer TDEV. Le dérapage diurne est un exemple d'effet systématique.

Les valeurs observées de la fonction TDEV peuvent être fortement influencées par les effets systématiques.

II.4 Erreur quadratique moyenne d'intervalle temporel (TIErms)

Dans ce qui suit, $x(t)$ est la fonction d'erreur de temps; $\{x_i = x(i\tau_0), i = 1, 2, \dots, N\}$ est une séquence de N échantillons régulièrement espacés de la fonction $x(t)$, τ_0 est la période d'échantillonnage, et $\tau = n\tau_0$ est l'intervalle d'observation.

Définition

L'erreur quadratique moyenne d'intervalle temporel TIErms(τ) est définie par l'expression:

$$\text{TIErms}(\tau) = \sqrt{\langle [x(t+\tau) - x(t)]^2 \rangle}$$

dans laquelle les parenthèses angulaires symbolisent une moyenne sur un ensemble. Lorsque le type de bruit obéit à une loi de distribution polynomiale à une puissance supérieure ou égale à -1 , le remplacement de la moyenne sur l'ensemble par l'intégrale infinie moyenne sur le temps provoque une divergence des calculs.

Expression de l'estimateur

Une estimée de l'écart $\text{TIErms}(n\tau_0)$ est donnée par l'expression:

$$\text{TIErms}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2} \quad \text{avec } n = 1, 2, \dots, N-1$$

Lorsque le type de bruit obéit à une loi de distribution polynomiale à une puissance supérieure ou égale à -1 , le calcul de l'estimateur diverge.

Relation intégrale fréquentielle/temporelle

L'erreur quadratique moyenne d'intervalle de temps d'un signal de rythme est liée à la densité spectrale de puissance $S_\varphi(f)$ de son déphasage aléatoire $\varphi(t)$ par la relation intégrale suivante:

$$\text{TIErms}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{(v_{\text{nom}}\pi)^2} \int_0^{f_h} S_\varphi(f) \sin^2(\pi\tau f) df}$$

dans laquelle v_{nom} est la fréquence nominale du signal de rythme et f_h la largeur de bande du dispositif de mesure. La relation ci-dessus est valide dans l'hypothèse où aucune composante déterministe n'affecte les données d'erreur de temps utilisées pour calculer $\text{TIErms}(\tau)$.

Caractéristiques de bruit

La fonction $\text{TIErms}(\tau)$ ne converge théoriquement pas en présence de bruit de modulation de fréquence par scintillation (FFM) ou par marche aléatoire. Le Tableau II.4 indique les pentes caractéristiques des fonctions $\text{TIErms}(\tau)$ selon le type de bruit.

TABLEAU II.4/G.810

Type de processus de bruit	Pente de $\text{TIErms}(\tau)$
bruit blanc de phase (WPM)	τ^0
scintillation de phase (FPM)	τ^0
bruit blanc de fréquence (WFM)	$\tau^{1/2}$

Biais et dérive fréquentiels

Dans les intervalles d'observation τ où domine un biais fréquentiel constant, $\text{TIErms}(\tau)$ se comporte comme τ .

Dans les intervalles d'observation τ où domine une dérive fréquentielle linéaire, $\text{TIErms}(\tau)$ ne converge théoriquement pas vers une valeur finie. Du point de vue de la mesure, une telle perturbation devrait entraîner la croissance de la valeur $\text{TIErms}(\tau)$ parallèlement au nombre N d'échantillons x_i , et donc au temps d'intégration total.

Avantages et inconvénients

Le comportement de $\text{TIErms}(\tau)$ est sensiblement indépendant de la période d'échantillonnage τ_0 .

II.5 Erreur maximale d'intervalle temporel (MTIE)

Dans ce qui suit, $x(t)$ est la fonction d'erreur de temps; $\{x_i = x(i\tau_0), i = 1, 2, \dots, N\}$ est une séquence de N échantillons régulièrement espacés de la fonction $x(t)$, τ_0 est la période d'échantillonnage, et $\tau = n\tau_0$ est l'intervalle d'observation.

Définition

L'erreur maximale d'intervalle temporel $MTIE(\tau)$ est définie sous la forme d'un quantile β donné de la variable aléatoire X définie par l'équation suivante:

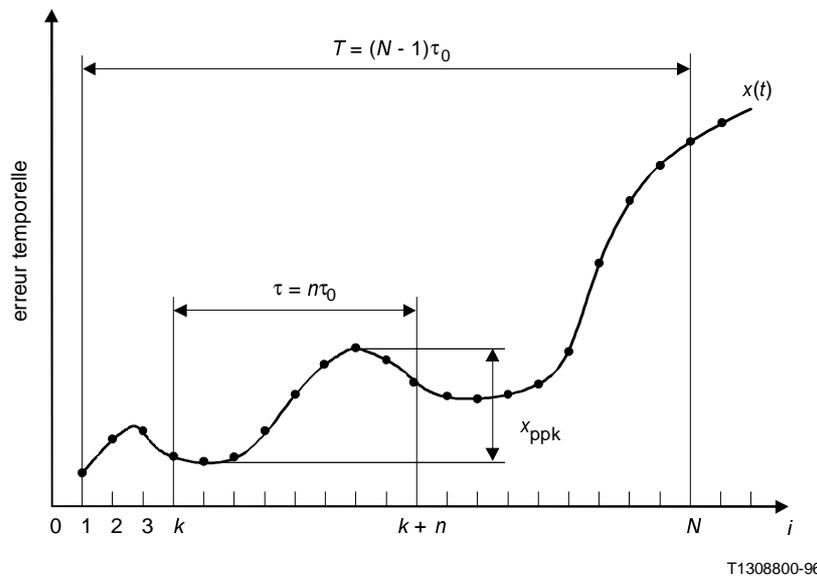
$$X = \max_{0 \leq t_0 \leq T - \tau} \left(\max_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] - \min_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] \right)$$

Expression de l'estimateur

Une estimée de l'écart $MTIE(n\tau_0)$ est donnée par l'expression:

$$MTIE(n\tau_0) \cong \max_{1 \leq k \leq N-n} \left(\max_{k \leq i \leq k+n} x(i) - \min_{k \leq i \leq k+n} x(i) \right), \quad n = 1, 2, \dots, N-1$$

L'expression ci-dessus est une estimée ponctuelle obtenue à partir de mesures effectuées sur une seule période (voir Figure II.1).



avec:

- τ_0 période d'échantillonnage;
- τ période d'observation;
- T période de mesure;
- x_i échantillon d'erreur de temps de rang i ;
- x_{ppk} variation de crête à crête de x_i au cours de la k ème observation;
- $MTIE(\tau)$ maximum de x_{ppk} pour toutes les observations de durée τ pendant la période de mesure T .

FIGURE II.1/G.810

Des estimées de MTIE (pour des valeurs T , τ et β données) et les intervalles de confiance correspondants peuvent être calculés à partir de mesures effectuées sur plusieurs périodes. Soit X_1, X_2, \dots, X_M un ensemble d'échantillons de mesures de l'erreur d'intervalle de temps MTIE observées sur intervalle de longueur τ , avec M périodes d'observation chacune de longueur T . Supposons ces échantillons classés par ordre croissant, c'est-à-dire que $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_M$. Soit x_β le $\beta^{\text{ème}}$ centile de la variable aléatoire X . Une expression d'intervalle de confiance de x_β , donnée sous la forme de la probabilité pour que x_β soit compris dans l'intervalle $[X_r, X_s]$ (avec $r < s$) est alors donné par:

$$P\{X_r \leq x_\beta \leq X_s\} = \sum_{k=r}^{s-1} \frac{M!}{k!(M-k)!} \beta^k (1-\beta)^{M-k}$$

où $P\{\cdot\}$ est l'opérateur probabilité.

Biais et dérive fréquentiels

Dans les intervalles d'observation τ où domine un biais fréquentiel constant, $MTIE(\tau)$ se comporte comme τ .

Dans les intervalles d'observation τ où domine une dérive fréquentielle linéaire, $MTIE(\tau)$ n'est théoriquement pas bornée. Du point de vue de la mesure, une telle perturbation devrait entraîner la croissance de l'estimée $MTIE(\tau)$ parallèlement au temps d'observation total (c'est-à-dire au nombre N de données x_j).

Avantages et inconvénients

Le comportement de $MTIE(\tau)$ est sensiblement indépendant de la période d'échantillonnage τ_0 .

L'erreur maximale d'intervalle de temps MTIE (et l'erreur relative MRTIE) convient bien à la caractérisation de la taille de la mémoire tampon.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

- Série A Organisation du travail de l'UIT-T
- Série B Moyens d'expression
- Série C Statistiques générales des télécommunications
- Série D Principes généraux de tarification
- Série E Réseau téléphonique et RNIS
- Série F Services de télécommunication non téléphoniques
- Série G Systèmes et supports de transmission**
- Série H Transmission des signaux autres que téléphoniques
- Série I Réseau numérique à intégration de services
- Série J Transmission des signaux radiophoniques et télévisuels
- Série K Protection contre les perturbations
- Série L Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
- Série M Maintenance: systèmes de transmission, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques, et circuits loués internationaux
- Série N Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophoniques et télévisuels
- Série O Spécifications des appareils de mesure
- Série P Qualité de transmission téléphonique
- Série Q Commutation et signalisation
- Série R Transmission télégraphique
- Série S Equipements terminaux de télégraphie
- Série T Equipements terminaux et protocoles des services télématiques
- Série U Commutation télégraphique
- Série V Communications de données sur le réseau téléphonique
- Série X Réseaux pour données et communication entre systèmes ouverts
- Série Z Langages de programmation