

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 60 (1982)

Heft: 2

Artikel: Synchronisierung digitaler Netze : Plesiochroner Betrieb. 1. Teil = Synchronisation des réseaux numériques : exploitation plésiochrone. 1re partie

Autor: Probst, Pierre-André / Vörös, Paul

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876148>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 12.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Synchronisation des réseaux numériques: Exploitation plésiochrone (1^{re} partie)

Pierre-André PROBST und Paul VÖRÖS, Bern

621.3.018.5:621.373.1:621.376.5:621.395.491:681.327.8

Zusammenfassung. Digitale Übertragungssysteme und Vermittlungsstellen erlauben heute, ganze Netze aufzubauen, in denen die Durchschaltung und die Vermittlung bei 64 kbit/s stattfinden. Damit diese zwei Funktionen fehlerfrei ausgeführt werden können, müssen die beteiligten Takte der hierarchischen Multiplexstufen von 2048 kbit/s eine starre Phasenbeziehung aufweisen. Es besteht die Möglichkeit, diese Forderung durch sehr stabile Oszillatoren oder durch die Einführung von Synchronisationsverfahren zu erfüllen. Die Grenzen und die Eigenschaften beider Lösungen — plesiochroner und synchroner Betrieb — sind beschrieben. Für das schweizerische digitale Netz ist ein Synchronisationssystem nach dem vorgewählten Master-Slave-Verfahren geplant. Eine kurze Beschreibung der Struktur des Taktverteilnetzes und der benötigten Ausrüstungen bildet den Schluss des Beitrags.

Résumé. Les systèmes de transmission et de commutation permettent aujourd'hui la réalisation de réseaux complets dans lesquels le transfert et la commutation s'effectuent à 64 kbit/s. Ces deux fonctions ne peuvent s'opérer sans erreur que si la relation de phase des signaux de rythme concernés au niveau hiérarchique 2048 kbit/s est fixe. Cette exigence peut être remplie soit par l'utilisation d'oscillateurs à haute stabilité ou par l'introduction de procédés de synchronisation. Les limites et propriétés de ces deux solutions — fonctionnement plésiochrone et synchrone — sont décrites. La réalisation d'un système de synchronisation basé sur la méthode maître-esclave avec réseau de distribution présélectionné est envisagée pour le réseau numérique suisse. Une description succincte de la structure du réseau de distribution de rythme et des équipements nécessaires compose la fin de la présente contribution.

Sincronizzazione delle reti digitali: Funzionamento sincrono (1^a parte)

Riassunto. Sistemi di trasmissione e posti di commutazione digitali permettono oggi di costituire reti intere in cui il collegamento e la commutazione si svolgono a 64 kbit/s. Le cadenze del livello gerarchico multiplex di 2048 kbit/s in questione devono presentare un rapporto di fase molto rigido affinché le due funzioni possano essere eseguite senza errori. Per soddisfare a questa esigenza esiste la possibilità di usare oscillatori molto stabili oppure di introdurre un sistema di sincronizzazione. Si descrivono i limiti e le caratteristiche delle due soluzioni «esercizio plésiochrone o sincrono». Per la rete a sistema digitale svizzera è progettato un sistema di sincronizzazione secondo il procedimento prescelto Master-Slave. A conclusione dell'articolo sono descritti brevemente la struttura della rete di distribuzione delle cadenze come pure gli equipaggiamenti necessari.

1 Einleitung

Die digitale Übertragungstechnik in der Telefonie fand ihre erste wichtige Anwendung im Bezirksnetz. In ihm werden seit mehr als 10 Jahren PCM-Übertragungssysteme zur Mehrfachausnutzung der vorhandenen paarsymmetrischen Kabel eingesetzt. In dieser Zeitspanne wurden aber digitale Vermittlungsstellen und digitale Übertragungssysteme höherer Kapazität entwickelt, die die Verwirklichung ganzer Netze erlauben. Die Integration von Vermittlung und Übertragung für die Telefonie stellt einen ersten Schritt in Richtung des digitalen dienstintegrierten Netzes dar. Die Digitaltechnik erlaubt in solchen Netzen — auch ISDN (Integrated Services Digital Network) genannt — verschiedene Dienste, wie Telefonie, Daten, usw., zu übertragen und zu vermitteln. Zurzeit werden die Probleme der Realisierung und Einführung des ISDN international intensiv studiert; im CCITT wurde eine erste Empfehlung G.705 ausgearbeitet [3].

Der 64-kbit/s-Kanal (einem PCM-codierten Telefonkanal entsprechend) ist die Basis des ISDN. Bei dieser Bitrate (oder Vielfachen) findet die Vermittlung statt. Die Primärmultiplexer bündeln 30 64-kbit/s-Kanäle zu einem 2048-kbit/s-Digitalsignal der Hierarchiestufe 1. Um fehlerfrei zu arbeiten, stellt die Multiplexierung beziehungsweise Demultiplexierung, die übrigens auch in einer digitalen Vermittlungsstelle stattfindet, gewisse Anforderungen an die beteiligten Taktquellen (Synchronismus oder Plesiochronismus mit hoher Stabilität). Im folgenden Beitrag sollen diese Anforderungen in Zusammenhang mit der Übertragungsqualität näher unter-

1 Introduction

C'est dans le réseau rural que la transmission numérique trouva sa première application importante en téléphonie. En effet, depuis plus de 10 ans, des systèmes de transmission MIC sont utilisés pour que la capacité en voies téléphoniques des câbles à paires symétriques existants soit augmentée. Dans cette même période, des systèmes de transmission et de commutation numériques à grande capacité permettant la réalisation de réseaux entièrement numériques ont été développés. L'intégration de la commutation et de la transmission pour la téléphonie représente un premier pas en direction du Réseau Numérique à Intégration des Services (RNIS). La technique numérique permet, dans de tels réseaux, de commuter et de transmettre différents services (téléphonie, données, etc.). Les problèmes de la réalisation et l'introduction du RNIS font l'objet d'études intensives sur le plan international. Dans ce contexte, le CCITT a élaboré une première recommandation G.705 [3].

Le canal à 64 kbit/s (correspondant à une voie téléphonique codée en MIC) constitue l'élément de base du RNIS. C'est à ce débit (ou à des multiples de celui-ci) que s'effectue la commutation. Les multiplexeurs primaires concentrent 30 canaux à 64 kbit/s en un signal numérique composite à 2048 kbit/s du 1^{er} niveau hiérarchique. Le multiplexage et le démultiplexage respectivement (ces deux fonctions sont également exécutées dans un autocommutateur numérique), pour s'effectuer sans erreurs, posent certaines conditions aux sources de rythme concernées (synchronisme ou plésiochronisme à haute stabilité). L'objet de la présente publica-

sucht werden. Ferner werden die heute bekanntesten Synchronisierungsmethoden und deren wichtigste Eigenschaften analysiert. Für das schweizerische digitale Netz wird zurzeit an den Spezifikationen eines nationalen Synchronisierungssystems gearbeitet, das im letzten Kapitel kurz beschrieben ist.

2 Eigenschaften des plesiochronen¹ Betriebes

21 Durchschaltung und Vermittlung von 64-kbit/s-Kanälen

Der Basiskanal für die Vermittlung in digitalen Netzen ist das in PCM codierte Sprachsignal mit einer Bitrate von 64 kbit/s (gemäss CCITT-Empfehlung G.711 [1]). Für die Übertragung sind vom CCITT unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Übertragungsmedien sowie aus betrieblichen Gründen folgende Bitraten normiert²: 2048 kbit/s, 8448 kbit/s, 34 368 kbit/s, 139 264 kbit/s, 564 992 kbit/s. Der Übergang von einer Bitrate auf die nächsthöhere geschieht in Multiplexausrüstungen, deren Spezifikationen ebenfalls vom CCITT festgelegt worden sind. Die Multiplexierung von 2048 kbit/s auf die höheren Hierarchiestufen ist mit der positiven Stopftechnik verwirklicht. Dieses Multiplexverfahren erfordert keine starre Phasenbeziehung der Zuflusstakte mit der internen Zeitbasis des Multiplexers [2]. Vom 64-kbit/s-Basiskanal zur ersten hierarchischen Bitrate 2048 kbit/s müssen hingegen die Bitströme der Zuflüsse mit dem Multiplexertakt synchronisiert werden, um eine fehlerfreie Multiplexierung zu gewährleisten. *Figur 1* zeigt schematisch eine mögliche Realisierung eines synchronen Multiplexers (gemäss CCITT-Empfehlung G.738 [3]³), wobei die 30 (31) 64-kbit/s-Kanäle zu einem 2048-kbit/s-Signal gebündelt werden. Jeder Zuflusseingang ist mit einem Speicher M ausgerüstet, in dem die ankommenden 64-kbit/s-Daten mit ihrem eigenen Taktsignal H_S (Frequenz f_S) geschrieben werden. Zu einem für die Multiplexierung geeigneten Zeitpunkt werden sie mit dem von der internen Zeitbasis TBM erzeugten Taktsignal H_L (Frequenz f_L) wieder ausgelesen.

Besteht zwischen diesen Takten keine starre Phasenbeziehung, so können entweder zweimal nacheinander die gleichen Daten aus dem Speicher M gelesen werden ($f_L > f_S$) oder neue Daten werden geschrieben, bevor der vorherige Speicherinhalt gelesen wird ($f_S > f_L$, Speicherüberlauf). Folglich entsteht im Datenfluss eine Verdopplung oder ein Verlust einer bestimmten Anzahl Bits, also ein sogenannter *Schlupf*. Seine Grösse (Anzahl Bits) hängt von der Speichergösse ab. Die Ausrüstungen, die im schweizerischen Netz eingesetzt werden (synchrone Multiplexer, digitale Vermittlungsstellen), sind so ausgeführt, dass bei einem Schlupf 8 bit des durchgeschalteten Datenflusses (Oktett) weggelassen oder wiederholt werden.

In einem digitalen Netz können solche Schlupfe bei der Durchschaltung von 64-kbit/s-Kanälen (zum Beispiel 64-kbit/s-Mietleitungen oder 64-kbit/s-Verbindungslei-

tion est l'examen de ces exigences en fonction de la qualité de transmission. De plus, on trouvera une analyse des méthodes de synchronisation les plus connues à l'heure actuelle. L'élaboration des spécifications d'un système de synchronisation national pour le réseau numérique suisse est en cours. Une courte description de ce système se trouve dans le dernier chapitre.

2 Propriétés du fonctionnement plésiochrone¹

21 Transfert et commutation de canaux à 64 kbit/s

Pour la commutation, le canal de base dans les réseaux numériques est le signal vocal codé en MIC avec un débit de 64 kbit/s (selon l'Avis CCITT G.711 [1]). En ce qui concerne la transmission, les débits suivants sont normalisés au CCITT, en fonction des propriétés des milieux de transmission et des impératifs d'exploitation: 2048 kbit/s, 8448 kbit/s, 34 368 kbit/s, 139 264 kbit/s, 564 992 kbit/s². La transition d'un débit à un autre est effectuée dans des équipements de multiplexage, dont les spécifications sont également fixées par le CCITT. Le multiplexage de 2048 kbit/s aux autres débits supérieurs est réalisé avec la technique de justification positive. Ce procédé de multiplexage n'exige pas de relation fixe entre les rythmes des affluents et la base de temps interne du multiplexeur [2]. Par contre, du canal de base à 64 kbit/s au premier niveau hiérarchique à 2048 kbit/s, les trains numériques des affluents doivent être synchronisés avec le rythme du multiplexeur, pour réaliser un multiplexage exempt d'erreurs. La *figure 1* représente schématiquement une réalisation possible d'un multiplexeur synchrone (selon l'Avis CCITT G.738 [3])³, dans lequel 30 (31) canaux à 64 kbit/s sont combinés en un signal composite à 2048 kbit/s. Chaque entrée d'affluent est équipée d'une mémoire M, dans laquelle les données à 64 kbit/s sont inscrites avec leur propre signal de rythme H_S (fréquence f_S). A un instant propice au multiplexage, elles sont lues avec un signal de rythme H_L (fréquence f_L) généré par la base de temps interne TBM.

S'il n'existe pas de relation de phase fixe entre ces deux signaux de rythme, il se peut que les mêmes données soient lues deux fois de suite de la mémoire M ($f_L > f_S$) ou que de nouvelles données soient inscrites avant que le contenu précédent de la mémoire ait pu être lu ($f_S > f_L$, débordement de la mémoire). Par conséquent, une répétition ou une perte d'un certain nombre de bits, un *glissement*, apparaît dans le flux de données. La grandeur du glissement (nombre de bits) dépend de la capacité de la mémoire M. Les équipements installés dans le réseau suisse (multiplexeurs synchrones, auto-commutateurs numériques) sont réalisés de façon qu'un glissement provoque la perte ou la répétition de 8 bit (octet) dans le flux de données transféré.

Dans un réseau numérique, de tels glissements peuvent se produire lors du transfert de canaux à 64 kbit/s

¹ Zwei Taktquellen sind plesiochron, wenn sie die gleiche Nominalfrequenz haben und sich die momentanen Frequenzen innerhalb eines gegebenen Toleranzfeldes unabhängig voneinander befinden.

² Wir beschränken uns auf die 2048-kbit/s-Hierarchie, die von den europäischen Ländern, darunter der Schweiz, verwendet wird.

³ Im schweizerischen PTT-Netz als Multiplexer A (MXA) bezeichnet.

¹ Deux sources de rythme sont plésiochrones, lorsque leur fréquence nominale est identique et que leurs fréquences momentanées peuvent se trouver à l'intérieur d'une plage de tolérance définie, indépendamment l'une de l'autre.

² On se limite ici à la hiérarchie basée sur 2048 kbit/s, utilisée par la plupart des pays européens, dont la Suisse.

³ Désigné par multiplexeur A (MXA) dans le réseau suisse des PTT.

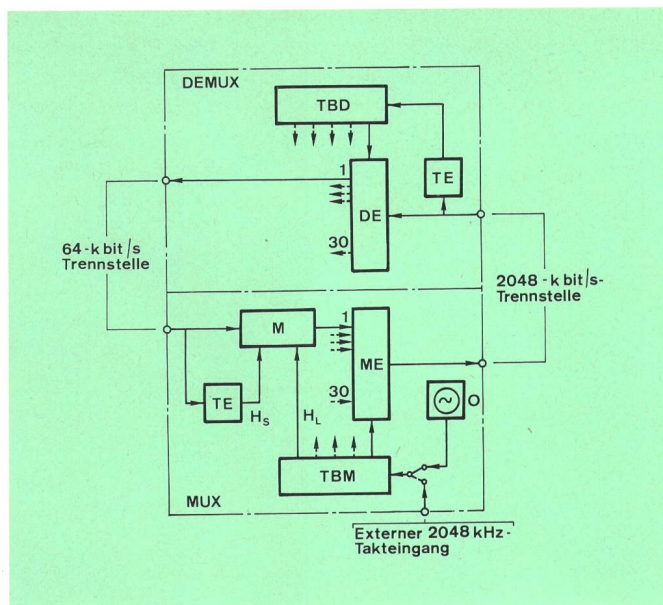


Fig. 1
Blockschema eines 2048-kbit/s-synchronen Multiplexers — Schéma de principe d'un multiplexeur synchrone à 2048 kbit/s

M	Speicher — Mémoire
TE	Taktextraktion — Extraction de rythme
ME	Multiplexierungseinheit — Unité de multiplexage
DE	Demultiplexierungseinheit — Unité de démultiplexage
O	Interner Oszillator — Oscillateur interne
H _S	Schreibtakt — Rythme d'inscription
H _L	Lesetakt — Rythme de lecture
DEMUX	Demultiplexerteil — Démultiplexeur
MUX	Multiplexerteil — Multiplexeur
TBM	Zeitbasis im Multiplexerteil — Base de temps du multiplexeur
TBD	Zeitbasis im Demultiplexerteil — Base de temps du démultiplexeur
Trennstelle	Jonction
Externer 2048-kHz-Takteingang	Entrée du rythme 2048 kHz externe

tungen zwischen Datenvermittlungsstellen) und bei der digitalen Vermittlung auftreten. Da die 2048-kbit/s-Vermittlungsstellen im digitalen Telefonienetz im Prinzip die Funktionen Demultiplexierung (2048 kbit/s → 64 kbit/s), Durchschaltung (64 kbit/s) und Multiplexierung (64 kbit/s → 2048 kbit/s) ausführen, verhält sich der vermittelte Kanal in Bezug auf Schlupfgrösse und -häufigkeit ähnlich wie bei einer 64-kbit/s-Durchschaltung.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass ein digitales Netz über ein entsprechendes Synchronisierungssystem verfügen muss, um 64-kbit/s-Verbindungen ohne Schlüpf durchschalten oder vermitteln zu können. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass sich bei geeigneter Wahl des Oszillators als Taktquelle im plésiochronen Betrieb eine sehr kleine Schlupfhäufigkeit erreichen lässt.

22 Bestimmung der Schlupfrate im plésiochronen Betrieb

Als Beispiel betrachten wir einen Ausschnitt aus einem digitalen Netz, bestehend aus drei Knoten (Nrn. 1, 2 und 3) mit einer 64-kbit/s-Durchschaltung im Knoten 2 (Fig. 2). Drei Oszillatoren (O_1 , O_2 und O_3) bestimmen die Sendetakte der synchronen Multiplexer MUX 1/1...MUX 3/1. Die Netzknoten sind mit digitalen Übertragungssystemen verbunden, die sich je nach Netzebene aus 2048-kbit/s-, 8448-kbit/s-, 34 368-kbit/s- (im Bezirksnetz) oder 139 264-kbit/s-, 564 992-kbit/s-Leitungsausrüstungen (im Fernnetz) und entsprechenden Multiplexerausrüstungen zusammensetzen.

(par exemple circuits loués à 64 kbit/s ou liaisons à 64 kbit/s entre centres de commutation de données) ou de la commutation numérique. Comme les autocommutateurs à 2048 kbit/s du réseau numérique téléphonique assurent en principe les fonctions de démultiplexage (2048 kbit/s → 64 kbit/s), transfert (64 kbit/s) et multiplexage (64 kbit/s → 2048 kbit/s), le comportement du canal commuté est semblable à celui d'un transfert à 64 kbit/s, en ce qui concerne la grandeur et le taux des glissements.

Il découle de ces considérations qu'un réseau numérique doit disposer d'un système de synchronisation correspondant pour transférer ou commuter des liaisons à 64 kbit/s sans glissement. Cependant, nous verrons au paragraphe suivant que, par un choix judicieux du type d'oscillateur de la source de rythme, il est possible d'arriver en fonctionnement plésiochrone à un taux de glissement très bas.

22 Calcul du taux de glissement en fonctionnement plésiochrone

Considérons, comme exemple, une partie d'un réseau numérique composé de trois nœuds N^{os} 1, 2, 3 et comportant un transfert à 64 kbit/s au nœud N^o 2 (fig. 2). Trois oscillateurs O_1 , O_2 et O_3 déterminent les rythmes d'émission des multiplexeurs synchrones MUX 1/1...MUX 3/1. Les nœuds du réseau sont reliés entre eux par des systèmes de transmission numérique, qui, selon la partie du réseau, se composent d'équipements de ligne opérant à 2048 kbit/s, 8448 kbit/s, 34 368 kbit/s (dans le réseau rural) ou à 139 264 kbit/s, 564 992 kbit/s (dans le réseau interurbain) et des multiplexeurs correspondants.

Les données sont inscrites dans la mémoire M du multiplexeur MUX 2/2 avec leur propre signal de rythme (issu de la source de rythme O_1), tandis que l'oscillateur O_2 détermine le rythme de lecture. Ces oscillateurs sont, soit incorporés au multiplexeur, soit font partie d'un système centralisé de génération de rythme, comme indiqué dans la figure 2. Le comportement de phase entre les rythmes de lecture et d'inscription n'est pas déterminé uniquement par leurs caractéristiques. Dans un réseau numérique, les paramètres suivants sont susceptibles d'influencer les phases relatives des rythmes dans le multiplexeur MUX 2/2 et d'introduire des glissements:

- *Caractéristiques des oscillateurs O_1 et O_2*
 - offset de fréquence
 - vieillissement
 - comportement à court terme
- *Fluctuations du temps de propagation des systèmes de transmission*
 - gigue de phase
 - dérapage
 - saut de phase lors de la commutation sur système de réserve
- *Perturbations*
 - influences externes (par exemple foudre)
 - intervention humaine (par exemple erreur de manipulation dans les procédures de maintenance et de localisation de défauts)
 - défectuosité dans les unités des systèmes

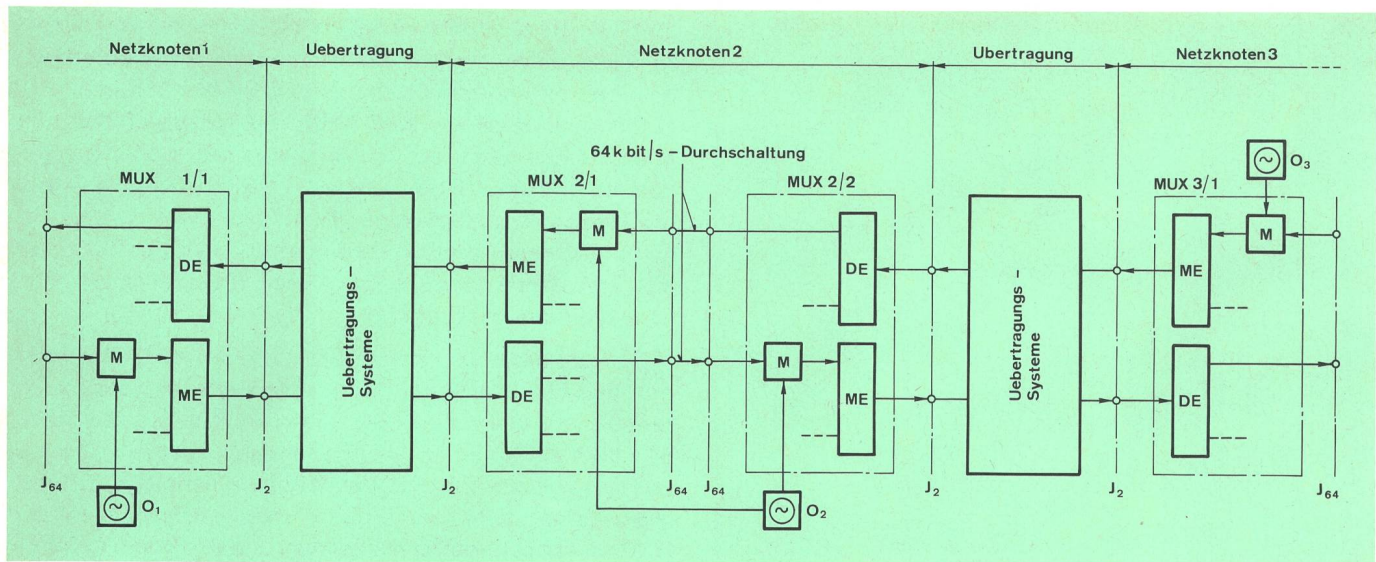


Fig. 2
Beispiel einer 64-kbit/s-Durchschaltung — Exemple d'un transfert à 64 kbit/s

J₂ 2048-kbit/s-Trennstelle — Jonction 2048 kbit/s

J₆₄ 64-kbit/s-Trennstelle — Jonction 64 kbit/s

O₁ } Zentralisierte Taktquellen — Sources de rythme centralisées

O₂ }

O₃ }

M Speicher — Mémoire

ME Multiplexierungseinheit — Unité de multiplexage

DE Demultiplexierungseinheit — Unité de démultiplexage

MUX 1/1 } Synchrone Multiplexer 64...2048 kbit/s — Multiplexeurs syn-

MUX 2/1 } chronos 64...2048 kbit/s

MUX 2/2 }

MUX 3/1 }

Netzknoten — Nœud

Übertragung — Transmission

64-kbit/s-Durchschaltung — Transfert à 64 kbit/s

Übertragungssysteme — Systèmes de transmission

Die Daten werden mit ihrem eigenen Takt (er stammt aus der Taktquelle O₁) in den Speicher M des Multiplexers MUX 2/2 geschrieben, während der Oszillator O₂ den Lesetakt bestimmt. Diese Oszillatoren sind entweder im Multiplexer eingebaut oder, wie Figur 2 zeigt, Bestandteil eines zentralen Taktversorgungssystems. Ihre Eigenschaften bestimmen nicht allein das Phasenverhalten zwischen Schreib- und Lesetakt. Gesamthaft gesehen können in einem digitalen Netz folgende Parameter die gegenseitige Phasenlage der Takte im Multiplexer MUX 2/2 beeinflussen und zu einem Schlupf führen:

● Eigenschaften der Oszillatoren O₁ und O₂

- Frequenzoffset
- Alterung
- kurzzeitiges Verhalten

● Laufzeitschwankungen der Übertragungssysteme

- Phasenjitter
- Wander
- Phasensprünge bei der Umschaltung auf ein Ersatzsystem

● Störungen

- äussere Einflüsse (zum Beispiel Blitzeinwirkung)
- menschliche Einwirkung (zum Beispiel Fehlmanipulation beim Unterhalt und der Fehlereingrenzung)
- defekte Systemeinheiten

In den folgenden Ausführungen wird der Einfluss der Störungen auf die Schlupfrate vernachlässigt. Das soll aber nicht heissen, dass Übertragung und Vermittlung im digitalen Netz von Störungen verschont bleiben; es ist jedoch sehr schwierig zu beurteilen, in welchen Fällen sich eine Störung nur durch einen oder mehrere Schlüpfe auswirkt. Bei den erwähnten Störquellen tritt in den meisten Fällen eine Unterbrechung des übertragenen Signals auf.

L'influence des perturbations sur le taux de glissement est négligée dans les considérations qui suivent. Cela ne signifie pas que la transmission et la commutation du réseau numérique soient épargnées par les perturbations. Il est cependant difficile de déterminer dans quels cas une perturbation provoque un ou plusieurs glissements. Pour les sources de perturbations mentionnées plus haut, il apparaît dans la plupart des cas une interruption du signal transmis.

221 Influence des propriétés des sources de rythme

La déviation de fréquence normalisée momentanée $y(t)$, rapportée à la fréquence nominale f_0 , se compose, en première approximation, de trois parties [4]

$$y(t) = \frac{f_v - f_0}{f_0} = y_r(t) + a \cdot t + y_0 \quad (1)$$

- $y(t)$ Déviation de fréquence normalisée momentanée
- f_v, f_0 Fréquence momentanée et fréquence nominale
- $y_r(t)$ Partie stochastique
- a Taux de vieillissement
- y_0 Déviation de fréquence constante (ajustage de la fréquence à l'instant $t=0$)

Le comportement en phase peut être mieux caractérisé à l'aide de ce qu'on appelle la déviation du temps de phase (phasetime):

$$x(t) = \int_0^t y(t) dt = x_r(t) + \frac{a t^2}{2} + y_0 t \quad (2)$$

Dans ces deux relations, $y_r(t)$ et $x_r(t)$ représentent les déviations stochastiques de fréquence et de phase respectivement. Alors que $y(t)$ n'est pas directement mesurable, $x(t)$ se détermine par des mesures périodi-

221 Einfluss der Eigenschaften der Taktquellen

Die normierte momentane Frequenzabweichung $y(t)$ eines Oszillators, bezogen auf die Nominalfrequenz f_0 , setzt sich angenähert aus drei Anteilen zusammen [4]

$$y(t) = \frac{f_v - f_0}{f_0} = y_r(t) + a \cdot t + y_0 \quad (1)$$

mit

- $y(t)$ normierte momentane Frequenzabweichung
- f_v, f_0 momentane beziehungsweise nominale Frequenz
- $y_r(t)$ stochastischer Anteil
- a Alterungsrate
- y_0 konstante Frequenzabweichung (Frequenzabgleich bei $t=0$)

Das Phasenverhalten lässt sich am besten mit Hilfe der Phasenzeitabweichung (phasetime) beschreiben

$$x(t) = \int_0^t y(t) dt = x_r(t) + \frac{a t^2}{2} + y_0 t \quad (2)$$

In beiden Gleichungen stellen $y_r(t)$ und $x_r(t)$ die stochastischen Frequenz- beziehungsweise Zeitabweichungen des Oszillators dar. Während $y(t)$ nicht direkt messbar ist, lässt sich $x(t)$ durch periodische Messungen während einer Dauer τ mit einem Zähler ermitteln. Aus einer solchen Messreihe – unter gewissen Voraussetzungen [4] – kann die sogenannte Allan-Varianz $\sigma_y^2(\tau)$ berechnet werden. Diese Grösse ist vom Oszillatortyp, insbesondere von seinen Geräuscheigenschaften und vom Betrachtungsintervall τ , abhängig.

Aus Gleichung (2) lässt sich die während der Zeit t akkumulierte wahrscheinliche Phasenzeitabweichung zwischen Schreib- und Lesetak im Multiplexer MUX 2/2, herrührend von den Oszillatoren O_1 und O_2 , berechnen [8, 9]:

$$x(t) = a t^2 + t \cdot 3,3 \cdot \sqrt{2 [\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau=t)]} \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass a in 99,9 % der Fälle eingehalten wird und $y_r(t)$ normal verteilt ist ($3 \cdot \sigma$ -Regel), wird dieser Wert mit 0,1 % Wahrscheinlichkeit überschritten. Für die Oszillatoren O_1 und O_2 sind gleiche statistische Eigenschaften vorausgesetzt ($\sigma_{y_1} = \sigma_{y_2}$), die resultierende Varianz beträgt somit $2 \cdot \sigma_y^2$. σ_{y_0} ist die Standardabweichung des Frequenzabgleiches bei $t=0$. Bei grösseren Werten von t ist die Phasenzeitabweichung $x(t)$ hauptsächlich durch die Alterung bestimmt.

In der folgenden Berechnung setzt man voraus, dass die Betrachtungszeit t in einem Bereich liegt, in dem die Alterung noch wenig Einfluss auf $x(t)$ ausübt ($t < \tau_a$)⁴. Diese Grenze τ_a ist in einem typischen $\sigma_y(\tau)$ -Diagramm (Fig. 3) eines Quarzoszillators angegeben.

Zur Bestimmung der Schlupfhäufigkeit nimmt man an, dass die Grösse des Speichers M und die dazugehörige Steuerung so ausgelegt sind, dass ein Schlupf erst auf-

ques pendant une durée τ à l'aide d'un compteur. A partir de telles séries de mesures, sous certaines conditions [4], la variance d'Allan $\sigma_y^2(\tau)$ peut être calculée. Cette grandeur dépend du type d'oscillateur, en particulier de ses caractéristiques de bruit et de l'intervalle d'observation τ .

La valeur probable du temps de phase accumulée pendant un intervalle de temps τ entre les rythmes de lecture et d'inscription dans le multiplexeur MUX 2/2, provenant des oscillateurs O_1 et O_2 , se calcule à partir de la relation (2) [8, 9]

$$x(t) = a t^2 + t \cdot 3,3 \cdot \sqrt{2 [\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau=t)]} \quad (3)$$

Si l'on admet que a est respecté dans 99,9 % des cas et que $y_r(t)$ est distribué normalement (règle des $3 \cdot \sigma$), alors cette valeur est dépassée avec une probabilité de 0,1 %. Pour les oscillateurs O_1 et O_2 , des propriétés statistiques identiques sont supposées ($\sigma_{y_1} = \sigma_{y_2}$), la variance résultante est donc égale à $2 \cdot \sigma_y^2$. σ_{y_0} est la déviation standard de l'ajustement de fréquence au temps $t=0$. Pour des valeurs t très grandes, la déviation des temps de phase $x(t)$ est déterminée, en premier lieu, par le vieillissement.

Dans les calculs qui suivent, on suppose que le temps d'observation t se trouve dans un domaine où le vieillissement n'a pas encore d'influence sur $x(t)$ ($t < \tau_a$)⁴. Cette limite τ_a est indiquée dans un diagramme $\sigma_y(\tau)$ typique pour un oscillateur à quartz à la figure 3.

Pour déterminer le taux de glissement, on suppose que la grandeur de la mémoire M et les circuits de commande associés sont conçus de manière qu'un glissement se produise seulement lorsque la différence de phase entre les rythmes d'inscription et de lecture dépasse la limite de $\pm m$ bit du signal à 64 kbit/s et que, immédiatement après un glissement, le rythme de lecture soit initialisé au milieu⁵.

Si au temps $t=0$, un glissement vient de se produire et si la phase du rythme de lecture se trouve de nouveau au milieu (position optimale de la phase), le prochain glissement se produira alors lorsque la déviation du temps de phase $x(t)$ aura atteint la valeur limite

$$x_g(t) = \pm \frac{m}{64 \cdot 10^3} [s]$$

Dans le domaine $t < \tau_a$, la condition suivante entre $\sigma_y(\tau)$, t et la déviation du temps de phase $x_g(t)$ avec une probabilité de dépassement de 0,1 %, peut être dérivée, en première approximation:

$$x_g(t) = \frac{m}{64 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot \sqrt{2} \cdot t \cdot \sqrt{\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau=t)} \quad (4)$$

La valeur de σ_{y_0} ne peut pas être réduite indéfiniment et, dans le cas idéal, $\sigma_{y_0}(\tau)$ est du même ordre de grandeur que $\sigma_y(\tau)$ dans la partie horizontale du diagramme

⁴ Pour $t < \tau_a$, les grandeurs $y(t)$ et $x(t)$ sont distribuées normalement (par exemple la probabilité que la valeur $x(t) = 3,3 \cdot \sigma_x(\tau=t)$ soit dépassée est égale à 0,1 %), tandis que pour $t > \tau_a$, $x(t)$ et $y(t)$ sont déterminés par les propriétés de vieillissement des oscillateurs qui sont fonction de caractéristiques systématiques. Dans ce cas, la distribution de $x(t)$ et $y(t)$ n'est plus normale.

⁵ Les multiplexeurs 64 kbit/s $\leftrightarrow$ 2048 kbit/s (MXA) du réseau des PTT suisses sont réalisés selon ce principe.

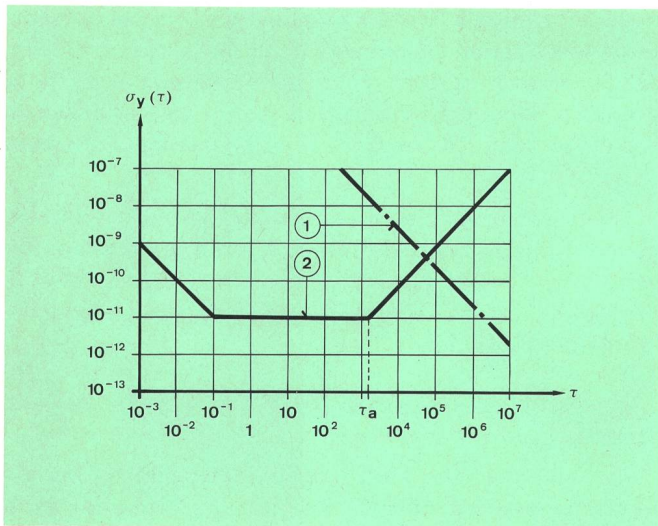


Fig. 3
Stabilitätsdiagramm $\sigma_y(\tau)$ eines Quarzoscillators — Diagramme de stabilité $\sigma_y(\tau)$ d'un oscillateur à quartz
 ① Bedingung — Condition $\sigma_y(\tau=t) \cdot t = 1,9 \cdot 10^{-5}$
 ② Quarzoscillator — Oscillateur à quartz
 $\sigma_y(\tau)$ Allan-Varianz der relativen Frequenzabweichung $y(t)$ — Variance d'Allan de la déviation relative de fréquence $y(t)$
 τ Betrachtungsintervall — Intervalle d'observation
 τ_a Grenze oberhalb welcher $\sigma_y(\tau)$ durch Alterung bestimmt ist — Limite au-dessus de laquelle $\sigma_y(\tau)$ est déterminée par le vieillissement

tritt, wenn die Phasendifferenz zwischen Schreib- und Lesetakt mehr als $\pm m$ bit des 64-kbit/s-Signals beträgt und dass der Lesetakt unmittelbar nach einem Schlupf wieder in der Mitte initialisiert wird⁵.

Wenn bei $t=0$ gerade ein Schlupf stattgefunden hat und die Phase des Lesetaktes wieder in der Mitte liegt (optimale Phasenlage), so tritt der nächste Schlupf auf, wenn die Phasenzeitabweichung $x(t)$ den Grenzwert

$$x_g(t) = \pm \frac{m}{64 \cdot 10^3} \text{ [s]}$$

erreicht hat.

Im Bereich $t < \tau_a$ ergibt sich in erster Näherung folgende Bedingung zwischen $\sigma_y(\tau)$, t und der Phasenzeitabweichung $x_g(t)$, die mit 0,1 % Wahrscheinlichkeit überschritten wird:

$$x_g(t) = \frac{m}{64 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot \sqrt{2} \cdot t \cdot \sqrt{\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau=t)} \quad (4)$$

σ_{y_0} kann nicht beliebig klein gemacht werden und liegt im Idealfall in der gleichen Größenordnung von $\sigma_y(\tau)$ im horizontalen Teil des Diagramms in Figur 3 (flicker floor). Somit gilt $\sigma_y(\tau) = \sigma_{y_0}$, und die Gleichung (4) wird wie folgt vereinfacht:

$$\frac{m}{64 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot 2 \cdot t \cdot \sigma_y(\tau=t) \quad (5)$$

und mit $m=8$ bit

$$\sigma_y(\tau=t) \cdot t = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ für } t < \tau_a \quad (6)$$

Diese Bedingung für das Auftreten eines Schlupfes ist in der Figur 3 durch eine Gerade dargestellt. Der Schnittpunkt dieser mit dem Verlauf $\sigma_y(\tau=t)$ sollte die Schlupfperiode T_s , die mit 0,1 % unterschritten wird, er-

de la figure 3 (seuil de scintillation). Dans ce cas $\sigma_y(\tau) = \sigma_{y_0}$ et la relation (4) se simplifie comme il suit:

$$\frac{m}{64 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot 2 \cdot t \cdot \sigma_y(\tau=t) \quad (5)$$

et avec $m=8$ bit

$$\sigma_y(\tau=t) \cdot t = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ für } t < \tau_a \quad (6)$$

Cette condition pour l'apparition d'un glissement est représentée par une droite dans la figure 3. L'intersection de cette droite avec la fonction $\sigma_y(\tau=t)$ devrait donner la limite inférieure T_s de la période des glissements, respectée avec une probabilité de 99,9 %. Mais on constate que, pour une mémoire avec $m=8$ bit ($x_g = \pm 125 \mu\text{s}$) et pour le type d'oscillateur à quartz représenté à la figure 3, ce sont les caractéristiques de vieillissement qui sont déterminantes pour les taux de glissement, car T_s est plus grand que τ_a ⁶. Si au temps $t=0$, les oscillateurs sont ajustés à leur fréquence nominale, la période des glissements T_s en fonction du temps t pour $t \geq \tau_a$ et $x(t) = a \cdot t^2$ est donnée par l'expression suivante:

$$T_s(t) = t \left(\sqrt{1 + \frac{x_g}{a t^2}} - 1 \right) \approx \frac{x_g}{2 a t} \text{ pour } t^2 \gg \frac{x_g}{a} \quad (7)$$

Cette fonction est représentée à la figure 4 pour différentes valeurs du taux de vieillissement. Pour l'oscillateur dont les caractéristiques sont celles de la figure 3 ($a = 5 \cdot 10^{-10}$ /jour), la période de glissement est de 1,16 heure, un mois après le dernier ajustage.

Si l'on suppose que les sources de rythme O_1 et O_2 sont équipées d'oscillateurs au césium, la période des glissements doit alors être calculée à partir de la relation (3), car ce sont aussi bien les propriétés statistiques que le vieillissement qui contribuent à la déviation du temps de phase $x(t)$ accumulée. T_s est d'environ 1,5 année avec $a = 5 \cdot 10^{-13}$ /année et $\sigma_y(\tau) = 3 \cdot 10^{-13}$ [8]. La probabilité que T_s soit inférieure à cette valeur est de 0,1 %. On constate qu'un nœud de réseau équipé d'un oscillateur au césium offre une très bonne qualité en ce qui concerne le taux de glissement avec les hypothèses faites sur le dimensionnement des mémoires.

Les valeurs calculées jusqu'ici sont valables pour une liaison à 64 kbit/s et un transfert. Si l'on admet que les parties nationales du réseau sont synchronisées (du réseau interurbain jusqu'au réseau local), on peut trouver jusqu'à sept transferts dans une liaison intercontinentale à 64 kbit/s d'une longueur de 25 000 km (Avis CCITT G.104 [1]). Dans ce cas, la valeur de T_s doit être divisée par 7 (valeur moyenne). Même dans ces conditions, le fonctionnement plésiochrone avec des oscillateurs au césium offre encore une très bonne qualité ($T_s \geq 76$ jours), alors que, pour l'oscillateur à quartz mentionné plus haut, un glissement se produit en moyenne toutes les 10 minutes, un mois après le dernier ajustage. Si la liaison n'est pas établie de manière permanente pendant T_s , comme par exemple dans une liaison de données à durée limitée, la probabilité de glissement

⁵ Die im Schweizerischen PTT-Netz eingesetzten Multiplexer (MXA) 64 kbit/s $\leftrightarrow$ 2048 kbit/s sind nach diesem Prinzip aufgebaut.

⁶ Cette constatation est également valable pour les types d'oscillateur à quartz susceptibles d'être utilisés comme source de rythme centralisée dans un nœud du réseau.

geben. Man stellt aber fest, dass bei einem Speicher mit $m=8$ bit ($x_g = \pm 125 \mu s$) und für den Quarzoszillator der Figur 3 die Alterungseigenschaften massgebend für die Schlupfhäufigkeit sind, da $T_s > \tau_a^6$. Unter der Voraussetzung, dass die Oszillatoren zur Zeit $t=0$ auf ihre Nennfrequenz eingestellt werden, so ergibt sich die Schlupfperiode T_s in Funktion von t , mit $t \gg \tau_a$ und $x(t) = a \cdot t^2$, aus folgender Beziehung:

$$T_s(t) = t \left(\sqrt{1 + \frac{x_g}{a t^2}} - 1 \right) \approx \frac{x_g}{2 a t} \text{ für } t^2 \gg \frac{x_g}{a} \quad (7)$$

Der Verlauf dieser Funktion für verschiedene Alterungsraten a ist in Figur 4 dargestellt. Für den Oszillator der Figur 3 mit $a = 5 \cdot 10^{-10}/\text{Tag}$ beträgt die Schlupfperiode ein Monat nach dem letzten Abgleich 1,16 Stunden.

Setzt man voraus, dass die Taktquellen O_1 und O_2 mit Cäsium-Oszillatoren ausgerüstet sind, so muss die Schlupfperiode aus Gleichung (3) berechnet werden, da sowohl die Alterung als auch die statistischen Eigenschaften einen Beitrag zur akkumulierten Phasenabweichung $x(t)$ liefern. Mit $a = 5 \cdot 10^{-13}/\text{Jahr}$ und $\sigma_y(\tau) = 3 \cdot 10^{-13}$ [8] beträgt T_s etwa 1,5 Jahre. Dieser Wert wird nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,1 % unterschritten. Man sieht, dass unter der getroffenen Annahme über der Dimensionierung der Speicher ein mit einem Cäsium-Oszillator ausgerüsteter Netzknoten eine sehr gute Qualität bezüglich Schlupfhäufigkeit bietet.

Die bis jetzt gerechneten Werte gelten für eine 64-kbit/s-Verbindung mit einer Durchschaltung. In der Annahme, dass die nationalen Abschnitte synchronisiert sind (von der Fernnetzebene bis zum Ortsnetz), können in einer weltweiten 64-kbit/s-Verbindung mit 25 000 km Länge bis zu sieben Durchschaltungen auftreten (CCITT-Empfehlung G.104 [1]). In diesem Fall muss der 0,1%-Wert von T_s durch sieben geteilt werden (Mittelwert). Selbst unter diesen Voraussetzungen bietet der plesiochrone Betrieb mit Cäsium-Oszillatoren eine sehr gute Qualität ($T_s \geq 76$ Tage), während für den bereits erwähnten Quarzoszillator ein Monat nach dessen Abgleich Schlüpf im Durchschnitt alle 10 Minuten auftreten. Ist die Verbindung nicht während T_s dauernd durchgeschaltet, so wird die Schlupfwahrscheinlichkeit einer Verbindung noch um den Faktor T_s/T_c (T_c = Verbindungsdauer) kleiner.

222 Einfluss der Übertragungssysteme

Die Umschaltung einer 2048-kbit/s-Verbindung von einem defekten auf ein Ersatzsystem verursacht in der Regel einen Phasensprung, dessen Grösse nicht kontrollierbar ist. Man muss damit rechnen, dass bei einer automatischen Umschaltung Schlüpf entstehen, während bei manueller Ersatzschaltung eine Signalunterbrechung auftritt, die die Verbindung für eine kurze Zeit un verfügbar macht. Solche Ereignisse sind aber selten und werden deshalb hier vernachlässigt.

Der Phasenjitter entsteht hauptsächlich in digitalen Multiplexern, die mit Stopfverfahren arbeiten, und in di-

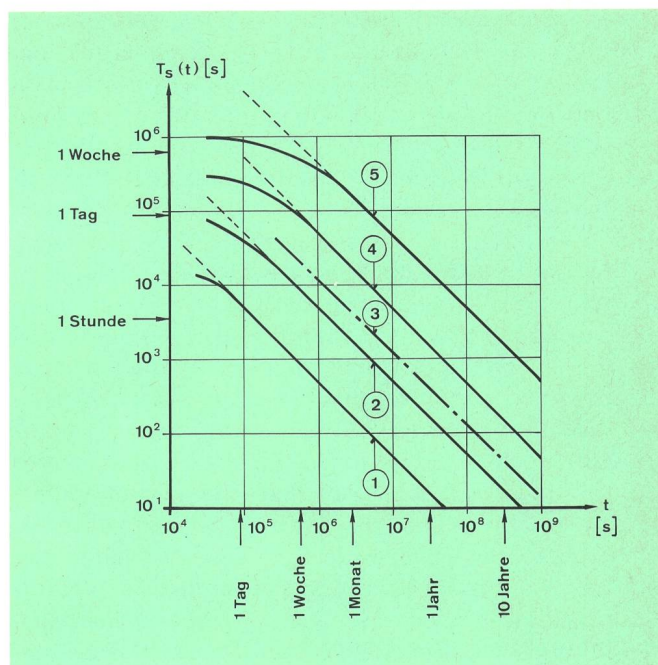


Fig. 4

Wahrscheinliche Schlupfperiode $T_s(t)$ bei Quarzoszillatoren verschiedener Alterungsraten in Funktion der seit dem letzten Abgleich abgelaufenen Zeit t für eine 64-kbit/s-Durchschaltung mit $m=8$ bit im plesiochrone Betrieb — Période probable de glissement $T_s(t)$ en fonction du temps t écoulé depuis le dernier réglage, pour un transfert à 64 kbit/s avec $m=8$ bit, et du vieillissement des oscillateurs à quartz en fonctionnement plésiochrone

- ① $a = 10^{-8}/\text{Tag} - \text{Jour}$
- ② $a = 10^{-9}/\text{Tag} - \text{Jour}$
- ③ $a = 5 \cdot 10^{-10}/\text{Tag} - \text{Jour}$
- ④ $a = 10^{-10}/\text{Tag} - \text{Jour}$
- ⑤ $a = 10^{-11}/\text{Tag} - \text{Jour}$
- T_s Schlupfperiode — Période de glissement
- Stunde — Heure
- Tag — Jour
- Woche — Semaine
- Jahre — Années

pendant la communication diminue alors encore d'un facteur T_s/T_c (T_c : durée de la communication).

222 Influence des systèmes de transmission

La commutation d'une liaison à 2048 kbit/s d'un système défectueux sur un système de secours provoque, en règle générale, un saut de phase dont l'amplitude peut être quelconque. Il faut s'attendre à des glissements lors d'une commutation automatique, alors que, dans le cas où la commutation est manuelle, une interruption du signal se produit et la liaison n'est pas disponible pendant une courte période. De tels événements se produisent rarement et sont négligés ici.

La gigue de phase apparaît principalement dans les multiplexeurs numériques qui fonctionnent avec des procédés de justification et dans les systèmes de ligne numériques. Les spécifications de gigue de la recommandation G.703 [5] s'appliquent aux jonctions à 2048 kbit/s (J_2) du multiplexeur MUX 2/1. A l'entrée 2048 kbit/s, la gigue de phase ne doit pas dépasser 488 ns_{cc} (crête-crête), mesurée avec un filtre passe-haut (fréquence de coupure 20 Hz) et une séquence d'impulsions pseudo-aléatoire de longueur $2^{15}-1$ bit. En dessous de 20 Hz, les spécifications sont encore incomplètes, bien que les lignes transmettant des séquences particulières et les multiplexeurs numériques avec justification produisent des composantes significatives [6, 7]. A

⁶ Diese Feststellung gilt auch für die Quarzoszillatoren, die als zentrale Taktquellen in einem Netzknoten in Frage kommen.

gitalen Leitungssystemen. Für die 2048-kbit/s-Trennstelle (J_2) des Multiplexers MUX 2/1 gelten die in der CCITT-Empfehlung G.703 [5] angegebenen Jitterspezifikationen. Am 2048-kbit/s-Eingang darf der Phasenjitter nicht grösser sein als 488 ns_{ss} (Spitze—Spitze), gemessen mit einem Hochpass (Grenzfrequenz 20 Hz) und einer Pseudo-Zufallsimpulsfolge der Länge $2^{15}-1$ bit. Unterhalb von 20 Hz sind die Spezifikationen noch nicht vollständig, obwohl Leitungen bei speziellen Impulsfolgen und digitale Multiplexer mit Stopfverfahren einen bedeutenden Jitterbeitrag liefern [6, 7]. Bei einer Grenzfrequenz f_g , die nicht genau definiert ist (zum Beispiel 10^{-5} Hz, Abschnitt 4), werden diese Laufzeitschwankungen «Wander» genannt. Nehmen wir an, dass der Jitterbeitrag zwischen 10^{-5} Hz und 20 Hz gleich gross ist wie oberhalb von 20 Hz, so ergibt sich eine gesamte Jitteramplitude von $\sim 1 \mu s_{ss}$. Es ist aber bekannt, dass die Pseudozufallsfolgen in gewissen Fällen weniger Jitter erzeugen, als dies beim reellen Verkehr der Fall ist. Aus diesem Grund rechnet man noch 50 % als Sicherheitsmarge dazu und erhält schliesslich $1,5 \mu s_{ss}$ Phasenjitter ($f > 10^{-5}$ Hz) am 2048-kbit/s-Eingang. Ist der Multiplexer MUX 2/1 (Fig. 2) gleich wie in Figur 1, so wird dieser Phasenjitter ohne Unterdrückung auf den 64-kbit/s-Ausgang übertragen⁷. Diese Jitteramplitude ($1,5 \mu s_{ss}$) entspricht aber nur 0,6 % der zulässigen Phasenzeitabweichung ($\pm 125 \mu s$) zwischen Schreib- und Lesetakt im folgenden Multiplexer MUX 2/2 bei $m=8$ bit. Der Einfluss des Jitters auf die Schlupfrate ist somit bei einer solchen Speicherdimensionierung am 64-kbit/s-Eingang nicht von Bedeutung.

Langsame Laufzeitschwankungen, «Wander», entstehen durch das temperaturabhängige Phasenverhalten der Übertragungsmedien und der zugehörigen Ausrüstungen. Zur Abschätzung dieses Einflusses betrachten wir digitale internationale Verbindungen für die Telefonie gemäss CCITT-Empfehlung G.104 [1]. Die Distanz zwischen internationalen Transitzentralen beträgt 1000...7500 km. Für diese Strecken werden unter anderem Koaxialkabel eingesetzt, die bei jährlichen Betriebstemperaturschwankungen von etwa $14^\circ C$ Laufzeitänderungen von $1 \cdot 10^{-9}$ s/km aufweisen (Tab. II, Schluss). Wenn die Netzknoten der Figur 2 zu einer internationalen Verbindung gehören, so entstehen vom «Wander» her im Laufe eines jährlichen Zyklus Laufzeitschwankungen des Schreibtaktes im Multiplexer MUX 2/2 von 1...7,5 μs . Diese Werte entsprechen 0,8...6 % der tolerierbaren Phasenzeitabweichung ($\pm 125 \mu s$), bevor ein Schlupf auftritt ($m=8$ bit).

Berücksichtigt man die Tatsache, dass in einer Verbindung nicht alle Abschnitte die maximale Länge aufweisen, so kann man auch hier feststellen, dass der «Wander» die Schlupfrate auf einer internationalen Verbindung von Teilnehmer zu Teilnehmer nur um einen geringen Beitrag beeinflussen kann.

Paarsymmetrische Kabel, wie sie im Bezirksnetz eingesetzt sind, weisen temperaturabhängige Laufzeitänderungen auf, die 10...70mal grösser sind als jene im Koaxialkabel, wobei die überbrückten Distanzen viel kleiner sind. Der Einfluss des «Wanders» im nationalen Netzabschnitt ist im Abschnitt 42 behandelt.

partir d'une fréquence limite f_g , qui n'est pas définie exactement (par exemple 10^{-5} Hz, paragraphe 4), ces variations de phase sont appelées «dérage». Si l'on admet, en première approximation, que la contribution de la gigue entre 10^{-5} et 20 Hz est égale à celle en dessus de 20 Hz, l'amplitude totale est d'environ $1 \mu s_{cc}$. Il est cependant connu que, dans certains cas, les séquences de mesures pseudo-aléatoires produisent moins de gigue que le trafic réel. Pour cette raison, il est judicieux d'inclure une marge de sécurité de 50 % et l'on obtient finalement $1,5 \mu s_{cc}$ ($f > 10^{-5}$ Hz) à l'entrée 2048 kbit/s. Si le multiplexeur MUX 2/1 (fig. 2) est conçu comme celui représenté à la figure 1, alors cette gigue de phase est transmise sans suppression à la sortie 64 kbit/s⁷.

Cette amplitude de gigue ($1,5 \mu s_{cc}$) correspond seulement à 0,6 % de la déviation de phase admissible ($\pm 125 \mu s$) entre les rythmes de lecture et d'inscription du multiplexeur suivant (MUX 2/2) avec $m=8$ bit. L'influence de la gigue sur le taux de glissement n'est donc pas importante avec un tel dimensionnement des mémoires à l'entrée 64 kbit/s.

Les fluctuations lentes du temps de propagation, appelées dérage, proviennent du comportement de phase des milieux de transmission et des équipements correspondants en fonction de la température. Pour évaluer ces influences, on considère des communications numériques internationales pour la téléphonie, selon la recommandation CCITT G.104 [1]. Les distances entre les centres de transit internationaux sont comprises entre 1000 et 7500 km. Pour de telles longueurs, on utilise, par exemple, des systèmes à câble coaxial qui présentent une variation du temps de propagation de $1 \cdot 10^{-9}$ s/km (tab. II, fin), pour des fluctuations annuelles de la température d'exploitation d'environ $14^\circ C$. Si les nœuds du réseau de la figure 2 appartiennent au réseau international, les variations du temps de propagation du rythme d'inscription dans le multiplexeur MUX 2/2 dues au dérage, et pendant un cycle annuel, sont de 1...7,5 μs . Ces valeurs correspondent à 0,8...6 % de la déviation de phase admissible ($\pm 125 \mu s$) avant l'apparition d'un glissement ($m=8$ bit).

Si l'on tient compte du fait que toutes les parties d'une liaison n'ont pas la longueur maximale, on peut également constater ici que le dérage n'influence que très peu le taux de glissement d'une liaison internationale d'abonné à abonné. Les câbles à paires symétriques, tels qu'ils sont utilisés dans le réseau rural, présentent des fluctuations du temps de propagation en fonction de la température qui sont 10...70 fois plus élevées que les câbles coaxiaux, les distances sont cependant bien plus petites. L'influence de dérage dans la partie nationale du réseau est examinée au paragraphe 42.

23 Taux de glissement admissible

Peu d'indications sont disponibles actuellement sur les limites du taux de glissement tolérées par les différents services. La nouvelle recommandation du CCITT G.822 [3] contient des premières valeurs provisoires. Pour une liaison intercontinentale à 64 kbit/s d'abonné à

⁷ Im CCITT existieren noch keine Jitterspezifikationen an der 64-kbit/s-Trennstelle.

⁷ Il n'existe pas encore de spécifications de la gigue à la jonction 64 kbit/s au CCITT.

23 Zulässige Schlupfrate

Zurzeit sind noch wenige Angaben über die zulässige Schlupfrate der verschiedenen Dienste vorhanden. Erste provisorische Werte befinden sich in der neuen CCITT-Empfehlung G.822 [3]. Für eine weltweite 64-kbit/s-Verbindung von Teilnehmer zu Teilnehmer (Länge 25 000 km) wird während 99 oder mehr Prozenten eines Jahres eine Schlupfhäufigkeit von weniger als einem Schlupf in fünf Stunden (über eine Beobachtungszeit von 24 Stunden) verlangt.

24 Internationale Normen zum plesiochronen Betrieb

Dass sich sehr stabile Frequenzquellen für einen plesiochronen Betrieb eignen und die resultierende Schlupfrate toleriert werden kann, wurde bereits vor einigen Jahren erkannt und führte zur CCITT-Empfehlung G.811 [1, 5]. Diese enthält Spezifikationen für die Referenztaktquellen und für die Schlupfrate einer internationalen Durchschaltung (weniger als ein Schlupf in 70 Tagen). Diese Anforderung entspricht einer Genauigkeit von $\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \leq 10^{-11}$, die zum Beispiel mit einem Cäsium-Frequenznormal erreichbar ist.

Setzt man voraus, dass jedes Land ein von einem solchen Cäsium-Oszillator geregeltes Netz besitzt, so lässt sich mit Hilfe der Gleichung (3) die akkumulierte Phasenzeitabweichung (in G.811 als *Time Interval Error*, TIE, definiert) während 70 Tagen berechnen. Wenn die zwei Netzknoten mit Oszillatoren gleichen Typs ausgerüstet sind ($a = 5 \cdot 10^{-13}$ /Jahr und $\sigma_y(\tau) = 3 \cdot 10^{-13}$ für $\tau > 10^5$ s [8]), beträgt die Überschreitungswahrscheinlichkeit 0,1 % bei einer Phasenzeitabweichung von $\pm 12,5 \mu\text{s}$.

Während der Nutzlebensdauer des Cäsium-Oszillators bleibt der alterungsbedingte TIE-Beitrag kleiner als der nichtsystematische (im obigen Beispiel beträgt der TIE-Beitrag wegen Alterung für $t = 70$ Tage nur $0,58 \mu\text{s}$).

Unter Berücksichtigung des Jitter- und des Wanderbeitrages während einer Periode von 70 Tagen (etwa $5 \mu\text{s}$ nach Abschnitt 222 und Fig. 8 im Schluss), genügt im Prinzip für die Erfüllung der Schlupfforderung der Empfehlung G.811 ein Speicher, der so bemessen ist, dass er eine Phasenzeitabweichung von $x_g(t) = \pm(12,5 + 0,75 + 5) = \pm 18,25 \mu\text{s}$ ($m = 1,17$ bit) verarbeiten kann. Wegen des verhältnismässig bescheidenen Mehraufwandes und der Forderung nach einem 8-bit-Schlupf sind die Spezifikationen der im schweizerischen Netz eingesetzten 2048-kbit/s-Multiplexer auf $m = 7$ bit festgelegt (das heisst $x_g(t) = \pm 109,3 \mu\text{s}$).

Dass in einem nationalen Netz mehrere Knoten mit einer Cäsium-Quelle ausgerüstet sind, ist vom Aufwand her, und aus anderen Gründen (Abschnitt 5), tragbar. Es ist aber nicht sinnvoll, jede Vermittlungsstelle bis ins Ortsnetz mit einem solchen Oszillator auszurüsten. Aus diesem Grund rechtfertigt sich der Einsatz von Synchronisierungssystemen, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben werden, die die Synchronisierung von Netzteilen oder Netzen untereinander erlauben. *(Schluss folgt)*

abonné (Länge 25 000 km) le taux de glissement doit être inférieur à un glissement par cinq heures pendant > 99 % d'une année (sur une période d'observation de 24 heures).

24 Normes internationales relatives à l'exploitation en mode plésiochrone

Le fait que des sources de fréquence très stables se prêtent bien au fonctionnement plésiochrone, et que le taux de glissement résultant peut être toléré, a été reconnu il y a quelques années déjà. Cette constatation a conduit à l'élaboration de la recommandation G.811 [1, 5]. Cette dernière contient des spécifications pour les sources de rythme de référence et pour le taux de glissement d'une interconnexion numérique internationale (moins d'un glissement en 70 jours). Cette exigence correspond à une précision $\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \leq 10^{-11}$, qui peut être remplie par un étalon de fréquence au césium, par exemple.

Si l'on suppose que chaque pays possède un réseau numérique piloté par un tel oscillateur, la déviation du temps de phase accumulée (définie dans G.811 comme erreur sur la durée, TIE = *Time Interval Error*) pendant 70 jours peut alors être calculée à l'aide de l'équation (3). Si les deux nœuds du réseau sont équipés d'oscillateurs du même type ($a = 5 \cdot 10^{-13}$ /année et $\sigma_y(\tau) = 3 \cdot 10^{-13}$ pour $\tau > 10^5$ s [8]), la probabilité de dépassement est alors de 0,1 % pour une déviation du temps de phase de $\pm 12,5 \mu\text{s}$.

Pendant la durée de vie utile d'un oscillateur au césium, la partie de l'erreur sur la durée (TIE) due au vieillissement reste inférieure à celle qui provient des caractéristiques statistiques (dans l'exemple précédent, la contribution à l'erreur sur la durée, due au vieillissement, pour $t = 70$ jours, est de seulement $0,58 \mu\text{s}$).

Si l'on tient compte de la contribution due à la gigue et au dérapage, pendant une période de 70 jours, (environ $5 \mu\text{s}$ selon le paragraphe 222 et la fig. 8, fin), il suffit, en principe, pour remplir la condition se rapportant au taux de glissement de l'Avis G.811, d'une mémoire dimensionnée de manière à pouvoir absorber une déviation du temps de phase de $x_g(t) = \pm(12,5 + 0,75 + 5) = \pm 18,25 \mu\text{s}$ ($m = 1,17$ bit). Les spécifications des multiplexeurs synchrones du réseau suisse ont été fixées à $m = 7$ bit ($x_g(t) = \pm 109,3 \mu\text{s}$), d'une part, parce que la complexité supplémentaire qui en résulte est relativement modeste et, d'autre part, à cause de l'exigence relative à la grandeur des glissements (8 bit).

Du point de vue des investissements et pour d'autres raisons (paragraphe 5), on peut envisager d'équiper quelques nœuds d'un réseau avec une source de fréquence au césium. En revanche, il n'est pas judicieux d'équiper chaque central jusqu'au réseau local de tels oscillateurs. C'est pourquoi il est justifié d'introduire des systèmes de synchronisation, tels que ceux décrits au prochain paragraphe, qui permettent la synchronisation de parties de réseau ou de réseaux entre eux. *(à suivre)*