

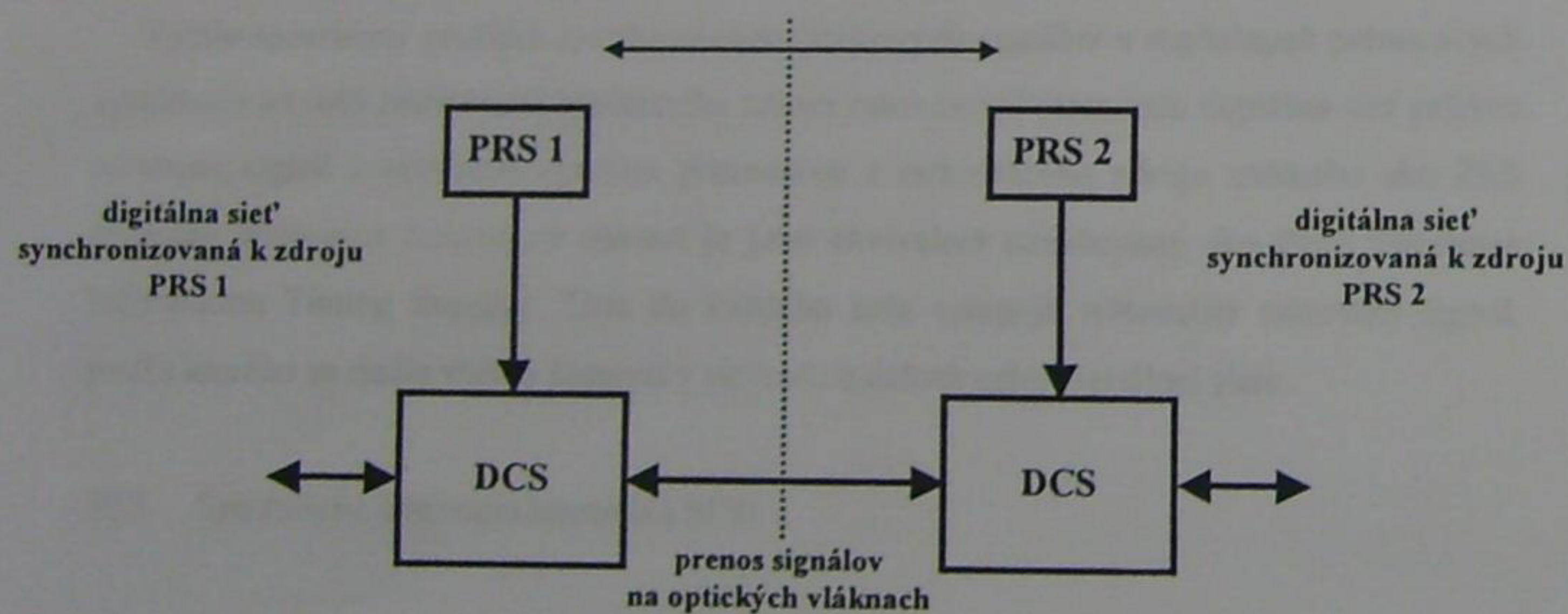
V. 5/5

10. SYNCHRONIZÁCIA A ČASOVANIE SDH

10.1 Typy časovania v digitálnych sieťach

Systémy, ktoré existovali v 50-tych a začiatkom 60-tych rokov 20. storočia, neboli synchronizované na žiadny spoločný zdroj taktovacieho signálu, pretože pozostávali z analógových obvodov a presné nastavenie časovania pre svoju činnosť nepotrebovali. Táto situácia sa zmenila rozvojom digitálnych sietí, v ktorých význam časovania stúpol.

Staršie digitálne siete ešte neboli synchronizované na spoločné časovanie zariadení a nazývali sa teda *asynchrónne siete*. Každé zariadenie v takejto sieti pracovalo so svojim vlastným taktovacím signálom, preto sa medzi dvomi rôznymi sieťovými zariadeniami mohli ich taktovacie signály značne líšiť v množstve jednotkových intervalov.



Obr. 10.1 Synchronne siete

Dnešné digitálne siete založené na prenose signálov v optickom prostredí sa nazývajú *synchronne siete*, pretože spoločné časovanie zariadení je pevne riadené (obr. 10.1). Táto technika spoločného časovania je z hľadiska vyššej výkonnosti zariadení a nízkych nákladov efektívnym spôsobom, ktorý umožňuje zlepšiť celkovú výkonnosť digitálnej siete. V skutočnosti sa synchronne siete rozdeľujú na *pleziochrónne siete*, kde predpona „plezio“

znamená „takmer“, a na *plne synchronne siete*. V pleziochrónnej sieti je každá jej časť synchronizovaná pomocou vysokopresného taktovacieho signálu z vlastného primárneho referenčného zdroja. V plne synchronnej sieti sa namiesto viacerých referenčných zdrojov pre jednotlivé časti siete používa iba jeden hlavný referenčný zdroj taktovacieho signálu.

10.1.1 Synchronizácia sietí PDH

Každý prvok siete PDH má vlastný zdroj taktovacieho signálu. Z tohto dôvodu sa v štruktúre rámca signálov PDH vysielajú špecifické bity, ktoré pomáhajú riešiť rozdiely medzi taktovacími signálmi prítokov a vlastnými taktovacími signálmi multiplexovacích zariadení. Rámce signálov PDH majú vždy vyhradenú kapacitu pre techniku vyrovnávania prenosových rýchlostí prítokov - stuffing. Riadiace bity stuffingu alebo samotné stuffingové bity sa vysielajú na príslušných miestach, čím sa umožňuje prvkom siete PDH v rámci špecifikovaných hraníc pracovať na základe vlastného referenčného zdroja taktovacieho signálu.

Keď sa uskutoční spojenie medzi dvomi zariadeniami, v prijímacej časti multiplexného zariadenia sa prehľadáva prijatý rámec signálu PCM 1. rádu hierarchie PDH bit po bite kvôli nájdeniu vopred stanoveného vzoru siedmich bitov 0011011 v štruktúre FAS (Frame Alignment Sequence). Po nájdení vzoru sa zoberie ďalších 256 bitov (teda celý rámec PCM 1. rádu) a skontroluje sa, či druhý bit nasledujúceho rámca v štruktúre NFAS (Non FAS) zodpovedá logickému stavu 1. Ak je to splnené, po prijatí ďalších 256 bitov sa v prijatom rámci PCM 1. rádu opäť hľadá štruktúra FAS. Ak je správne detekovaná, predpokladá sa úspešná synchronizácia FAS a začne sa vykonávať procedúra CRC-4. Skupiny bitov FAS a NFAS sa sledujú nepretržite počas celého prenosu signálov PCM 1. rádu hierarchie PDH.

Resynchronizácia multiplexného zariadenia sa uskutočňuje vtedy, ak skupina bitov FAS nie je správne rozpoznaná trikrát za sebou, prípadne jej chybovosť prekročí určitú vopred stanovenú hranicu. Ak chybovosť štruktúry FAS prekročí hodnotu 10^{-3} , vysielá sa naliehavý alarmový signál do multiplexného zariadenia na opačnom, vzdialenom konci prenosovej trasy. Rovnaké procedúry na zabezpečenie synchronizácie siete PDH sa uskutočňujú v multiplexných zariadeniach, sieťových zakončeníach a v jednotke zabezpečujúcej referenčnú frekvenciu 2,048 MHz.

Uvažujme sieť, ktorá pozostáva z uzlov prepojených optickým vláknom. Ľubovoľný sieťový uzol môže prijímať signály z rozličných uzlov v jeho blízkosti alebo zo vzdialených uzlov. Navyše, niektoré uzly môžu byť lokalizované v tej istej sieti a niektoré môžu pochádzať z iných sietí. Z pohľadu prijímacieho sieťového uzla sú všetky prijímané signály v rozdielnej fáze vzhľadom na jeho referenčný taktovací signál a rámcovú synchronizáciu. Ak sa tento fázový rozdiel medzi taktovacími signálmi nemení, môže byť jednoducho minimalizovaný, resp. úplne odstránený. Pevné oneskorenie pri vstupe do prijímacieho uzla môže potom zarovnať všetky prijímané signály. Avšak pevný fázový rozdiel je možný len vtedy, ak všetky sieťové uzly pracujú s presne rovnakým taktovacím signálom. V praxi sa vždy vyskytne malý fázový rozdiel medzi taktovacími signálmi jednotlivých sieťových uzlov, ktorý môže pri prechode informačného signálu cez väčšie množstvo uzlov vplývať na vznik podstatných frekvenčných odchýliek. Okrem fázových a frekvenčných rozdielov medzi taktovacími signálmi komplikujú synchronizáciu číslicových signálov v sieťových uzloch aj problémy jittera a wandera.

Vyššie spomínaný problém synchronizácie číslicových signálov v digitálnych prenosových systémoch sa rieši zostavením spoločného zdroja časovania. Potom celá digitálna sieť prijíma taktovací signál s extrémne vysokou presnosťou z referenčného zdroja známeho ako PRS (Primary Reference Source), v zámorí je jeho ekvivalent označovaný ako BITS (Building Information Timing Supply). Teda do každého uzla vstupuje referenčný taktovací signál, podľa ktorého sa riadia všetky činnosti v sieťových uzloch celej digitálnej siete.

10.3 Synchronná časovacia hierarchia SDH

Architektúra časovania a prenosu taktovacieho signálu v synchronných digitálnych komunikačných sieťach je hierarchická. Každý sieťový uzol je nútený udržiavať taktovací signál s požadovanou frekvenčnou presnosťou, ktorá závisí na jeho hlavnej sieťovej funkcii, t.j. či sú na ňom z dôvodu presnosti časovania ostatné sieťové uzly závislé.

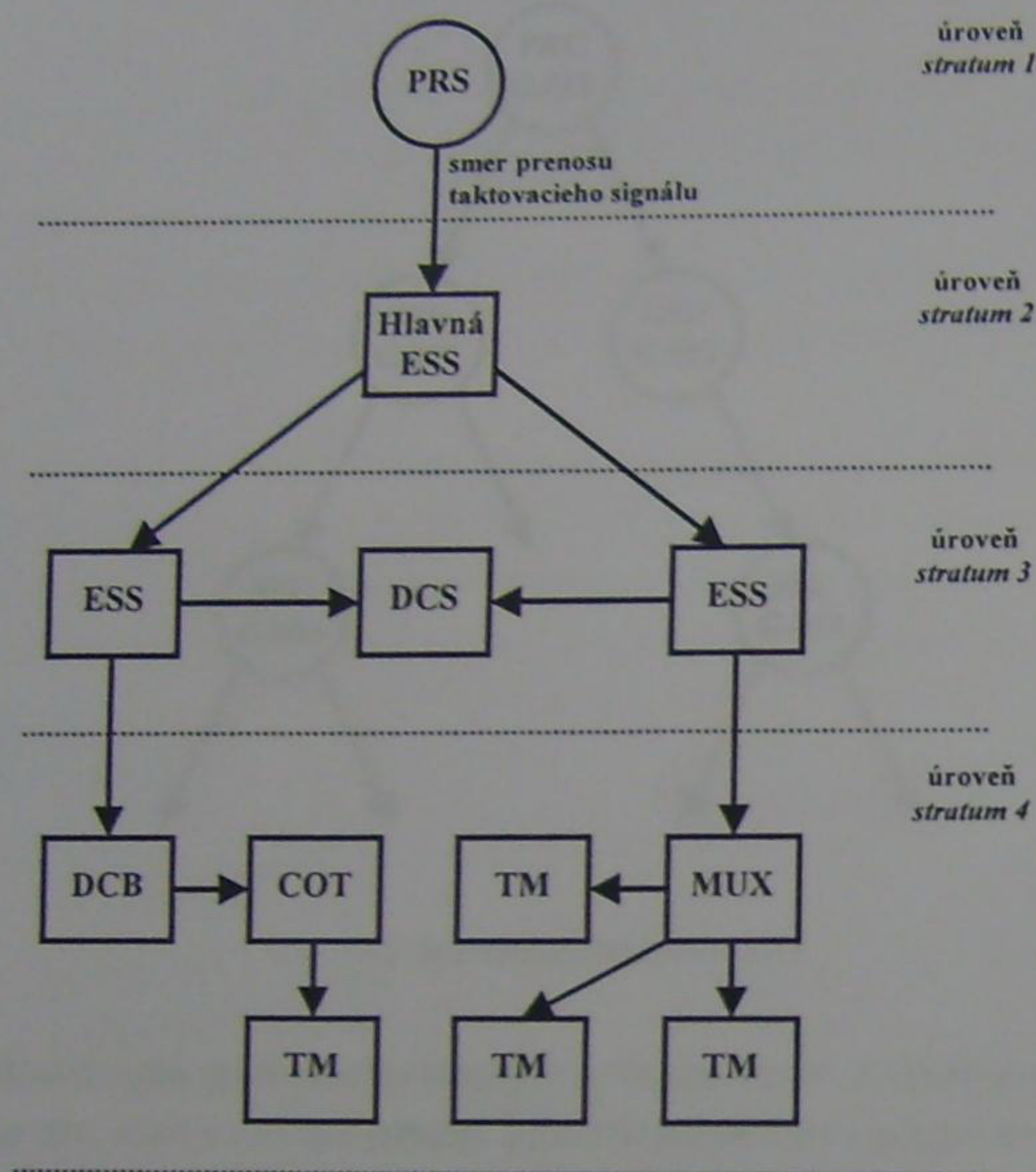
Najvyššia možná presnosť taktovacieho signálu je $1 \cdot 10^{-11}$ a je dosiahnutá s vysokopresnými atómovými hodinami, napr. GPS (Global Positioning System). Tieto hodiny sa nazývajú zdroj PRS a úroveň presnosti sa označuje ako *stratum 1*. Vygenerovaný taktovací signál je distribuovaný v celej synchronnej digitálnej sieti a prípadne regenerovaný ďalšími sieťovými prvkami s definovanými nižšími úrovňami presnosti. Konkrétne, úroveň *stratum 2* má presnosť $1,6 \cdot 10^{-8}$, úroveň *stratum 3* má presnosť $4,6 \cdot 10^{-6}$ a úroveň *stratum 4* má presnosť $3,2 \cdot 10^{-5}$ (tab. 10.1).

Tab. 10.1 Úrovne presnosti synchronnej časovacej hierarchie

Úroveň STRATUM	Minimálna presnosť	Sieťové zariadenie	Výskyt preskokov
1	$\pm 1,0 \times 10^{-11}$ *	PRS	2.523/rok
2	$\pm 1,6 \times 10^{-8}$	Hlavný ESS	11.06/deň
3	$\pm 4,6 \times 10^{-6}$	ESS, DCS	132.48/hod
4	$\pm 3,2 \times 10^{-5}$	MUX, PBX, DCB, COT	15.36/min

* 0,00001 ppm

Obr. 10.2 znázorňuje rozvinutie synchronnej časovacej hierarchie siete SDH. V ideálnom prípade používa jedna synchronná digitálna sieť iba jeden spoločný hlavný zdroj PRS, ktorý je tiež známy ako *master* hodiny. Podľa obr. 10.2 si sieťové elementy na nižších úrovniach synchronnej časovacej hierarchie odvodzujú svoje taktovacie signály od tohoto referenčného zdroja taktovacieho signálu. Taktovacie signály sú teda distribuované po kaskáde od zdroja PRS smerom dolu k ostatným sieťovým zariadeniam. Medzi sieťové elementy patriace do najnižšej úrovne *stratum 4* patria multiplexory MUX, digitálne pobočkové ústredne PBX, digitálne kanálové banky DCB a terminály lokálnych digitálnych ústrední COT.



Obr. 10.2 Synchronná časovacia hierachia siete SDH

10.4 Synchronizácia sieťových elementov

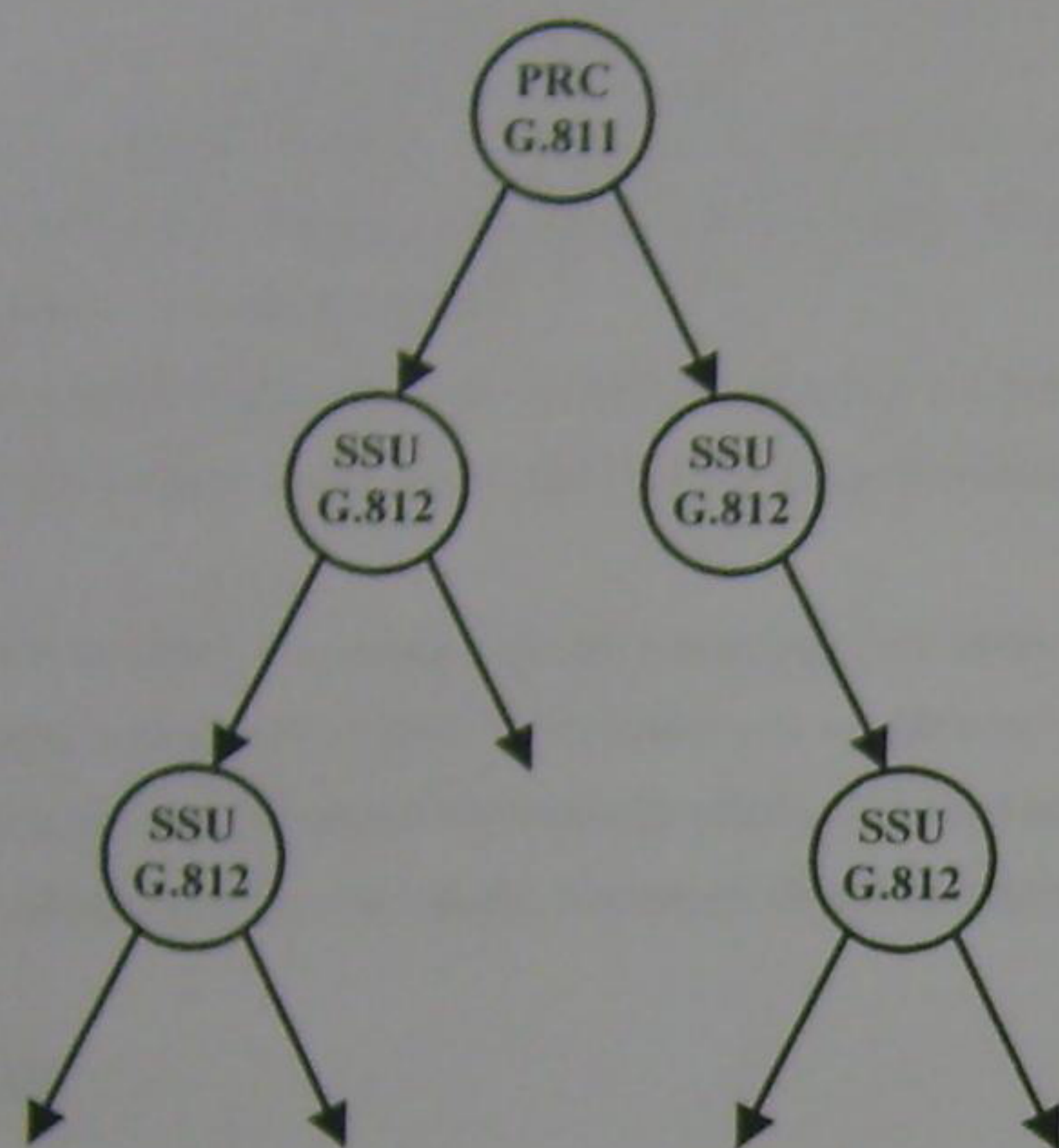
V plne synchronnej digitálnej sieti je každý sieťový element NE zosynchronizovaný so spoločným taktovacím signálom. Synchronizačná stratégia sa môže uskutočniť pomocou niekoľkých modelov. Napríklad referenčný taktovací signál môže byť dodávaný externým zdrojom časovania (napr. PRS) alebo môže byť doručený priamo zo sieťového elementu prostredníctvom zakončenia optického signálu hierarchie SDH. V druhom prípade je taktovací signál odvodený z prítokového signálu 2,048 Mbit/s, ktorý je za týmto účelom vložený do signálu OC-N.

Všeobecné pravidlo je také, že v prípade prístupu k taktovaciemu signálu z referenčného zdroja PRS sú sieťové elementy časované externe taktovacím signálom z primárnych referenčných hodín prostredníctvom synchronnej časovacej hierarchie siete SDH od úrovne stratum 3 a vyššej. Ak taktovací signál z referenčného zdroja PRS nie je prístupný, sú sieťové elementy časované prostredníctvom taktovacieho signálu získaného z prítokového signálu 2,048 Mbit/s vybraného z prijatého signálu OC-N.

V sieťach SDH sú zdroje taktovacieho signálu jednotlivých sieťových zariadení zoradené v hierarchickej štruktúre. Zdroj PRS sa označuje ako primárne referenčné hodiny PRC (Primary Reference Clock). Taktovací signál hodín PRC je distribuovaný prostredníctvom synchronnej časovacej hierarchie a môže byť regenerovaný v ďalších hodinových zdrojoch SSU (Synchronization Supply Unit) alebo SEC (Synchronous Equipment Clock) s nižšou úrovňou presnosti taktovacieho signálu.

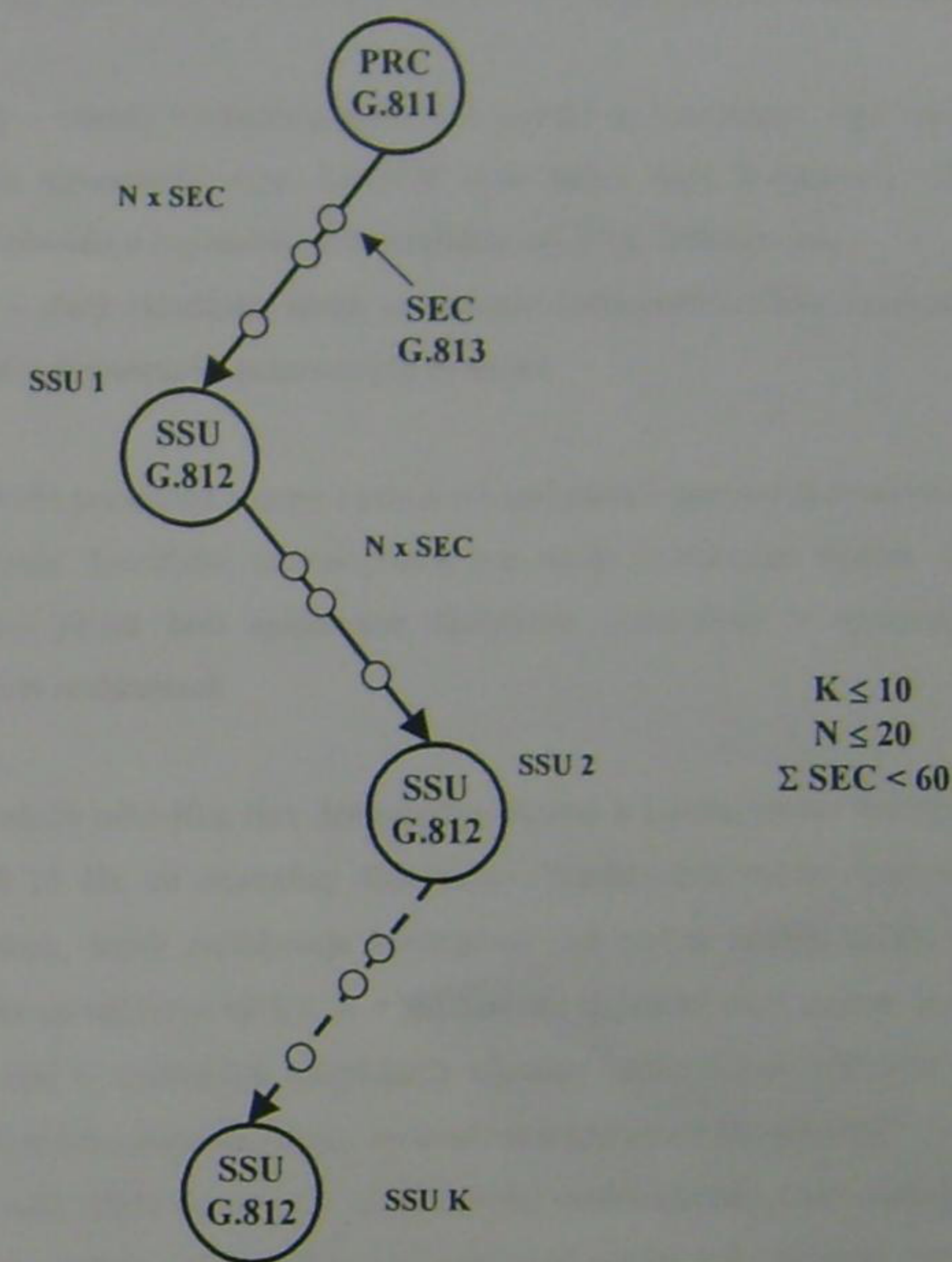
Každý sieťový uzol dodržiava istú úroveň presnosti taktovacieho signálu, ktorá závisí od jeho funkcie v sieti. Vnútorne hodiny každého sieťového prvku musia spätne viesť k hlavnému zdroju taktovacieho signálu PRC, ktorý je špecifikovaný ITU-T Odporúčaním G.811. Ak sa dodržia pravidlá platné pre synchronnú časovaciu hierarchiu a nevzniknú slučky taktovacieho signálu, dá sa týmto spôsobom zabezpečiť vysokokvalitná synchronizácia individuálnych sieťových prvkov. Na kvalitu prenosu taktovacieho signálu samozrejme vplyva kvalita prenosových ciest. Odporúčaná je distribúcia taktovacieho signálu prostredníctvom signálov STM-N (resp. ich optickej formy OC-N), pretože v tomto prípade nie je potreba vkladania ďalších bitov navyše do príslušných rámcov. Distribúcia taktovacieho signálu 2,048 Mbit/s, ktorá využíva existujúce linky siete PDH, je nepriaznivo ovplyvňovaná multiplexovaním signálov PCM. 1. rádu do vyšších stupňov hierarchie PDH.

Synchronizačná napájacia jednotka SSU je špecifikovaná ITU-T Odporúčaním G.812, pričom zvyčajne ide o nezávislý prvok, ktorý je tiež známy ako *slave* hodiny. V synchronnej časovacej hierarchii je taktovací signál odvodzovaný najprv z master hodín a potom zo slave hodín. Ak je hlavný zdroj taktovacieho signálu PRC neprístupný (porucha hodín alebo prenosových trás), je jednotka SSU schopná zabezpečiť veľmi kvalitnú synchronizáciu sieťových zariadení aspoň na dobu 24 hodín (obr. 10.3).



Obr. 10.3 Synchronizácia master - slave

Najnižšou úrovňou synchronizácie zdrojov taktovacieho signálu je synchronne taktovacie zariadenie SEC, ktoré je zvyčajne súčasťou sieťových prvkov SDH a je špecifikované ITU-T Odporúčaním G.813. Jeho úlohou je minimalizácia fázových a frekvenčných zmien prijímacieho taktovacieho signálu. Ak zlyhajú všetky ostatné zdroje taktovacieho signálu, teda PRC aj SSU, sieťové elementy SDH sú prostredníctvom zariadenia SEC schopné udržať vzájomnú synchronizáciu sieťových zariadení na dobu asi len 15 sekúnd. Obr. 10.4 ukazuje maximálny dovolený počet sieťových zariadení SSU a SEC zoradených za sebou v synchronizačnej reťazi synchronnej časovacej hierarchie.



Obr. 10.4 Sieťové časovanie SSU a SEC

Regenerácia taktovacieho signálu je v elementoch SSU a SEC dosiahnutá použitím obvodov fázového závesu PLL (Phase-Locked Loop). Ak je taktovací signál z primárnych referenčných hodín PRC neprístupný, ostatné sieťové hodiny sa prepnú do režimu zachovania synchronizácie. Na zabezpečenie požadovanej úrovne presnosti taktovacieho signálu sa uskutočňuje jeho korekcia podľa teploty oscilátora a korekčných hodnôt uchovaných v príslušných sieťových prvkoch za posledných pár hodín. Tento režim je aktívny počas daného maximálneho času podľa konkrétneho prípadu. V sieťach SDH sú implementované rôzne metódy distribúcie a obnovenia taktovacieho signálu:

- externý štandardný primárny referenčný zdroj taktovacieho signálu (normálna situácia),
- časovanie zo signálu STM-N – príslušný sieťový prvok získa synchronizáciu 2,048 MHz z prijatého signálu STM-N (resp. OC-N) a sprostredkuje ju nasledujúcim sieťovým prvkom na prenosovej trase,
- časovanie z prítokového signálu 2,048 Mbit/s prenášaného v sieti SDH,
- obnovenie taktovacieho signálu pomocou vnútorných hodín sieťového prvku SEC.

Súkromní sieťoví operátori sú niekedy nútení synchronizovať svoje digitálne prenosové systémy na primárne referenčné hodiny iných sieťových operátorov cez prenajaté linky. V rámci liberalizácie európskeho telekomunikačného sektoru si stále viac operátorov vytvára vlastné referenčné zdroje taktovacieho signálu, aby neboli závislí na svojich konkurentoch.

10.5 Jitter a wander

Fázové variácie číslicového signálu sú štandardovými organizáciami definované ako odchýlky významných okamihov jeho fázy od ich ideálnych pozícií v čase. Odchýlka fázy obsahuje určitú frekvenčnú osciláciu (kmitanie), ktorá môže byť väčšia alebo menšia ako príslušné frekvenčné ohraničenie. Fázové odchýlky sa zvyčajne rozdeľujú na tzv. *jitter* a *wander*. Definované frekvenčné ohraničenie medzi jitterom a wanderom je 10 Hz od centrálnej frekvencie. Jitter a wander majú aditívnu povahu, t.j. akýkoľvek zdroj, ktorý zapríčiňuje ich vznik, pridáva svoj príspevok ku konečnému výsledku príslušnej fázovej odchýlky.

Jitter je definovaný ako krátkodobá odchýlka fázy číslicového signálu od jeho optimálnej pozície v čase, ktorá zahŕňa všetky odchýlky s frekvenciou nad 10 Hz od centrálnej frekvencie. Zdrojmi jittera sú bežný šum, procesy bitového stuffingu a spracovania signálov v multiplexoroch alebo regenerátoroch, ktoré môžu spôsobiť vznik viacerých druhov jittera, medzi ktoré patria jitter oneskorenia, fázový jitter, interferenčný jitter, jitter vzorky, jitter stuffingu a čakacieho času, mapovací jitter a smerníkový jitter. Jitter sa rozdeľuje na tri základné typy :

- nesystematický – stochastické kolísanie fázy nezávislé od prenášanej postupnosti bitov (bez korelácie), jeho zdrojom je šum, elektronické komponenty, presluchy na jednom kábli;
- systematický – závislý od pseudonáhodného signálu (s koreláciou), jeho zdrojom je nedostatočná regenerácia, resp. konečná šírka pulzu daná fluktuáciou vybudenia oscilačného obvodu v regenerátoroch, a medzisymbolová interferencia;
- stuffingový – daný vkladáním alebo vyberaním stuffingových bitov, ktoré sú určené systémovým vyrovnávaním prenosových rýchlostí.

Optické a elektrické prenosové vstupy a prítokové rozhrania v sieťových elementoch musia byť schopné tolerovať špecifické úrovne jittera bez straty číslicového signálu. S cieľom obmedzenia vplyvu jittera boli aplikované špecifické požiadavky v optických OC-N a elektrických STS-N rozhraniach.

Wander je dlhodobá odchýlka fázy číslicového signálu a zahŕňa všetky fázové odchýlky s frekvenciou pod 10 Hz od centrálnej frekvencie. Wander tiež môže obsahovať efekty frekvenčného posunu, ktorý predstavuje konštantný frekvenčný rozdiel medzi sieťovými elementmi. Wander sa väčšinou vyskytuje v akejkoľvek digitálnej sieti, pričom je spôsobený jemnými odchýlkami v rozdieloch taktovacích signálov jednotlivých sieťových zariadení, prenosovým oneskorením alebo operáciou vyrovnávania prenosových rýchlostí.

Frekvenčný wander môže vzniknúť pri hranici medzi dvomi sieťami, ktoré majú samostatné zdroje taktovacieho signálu PRC. Môže tiež vzniknúť medzi referenčnými (master) PRC a sekundárnymi (slave) SSU hodinami ako zdrojmi taktovacieho signálu v rámci jednej siete. Wander sa pri prechode synchronizačným reťazcom akumuluje a teda digitálne prenosové systémy SDH musia vedieť eliminovať aj negatívne vplyvy nízkofrekvenčného wandera.