

В. А. ГАЙДАМАНЧУК, А. В. САВЧУК

ОСОБЕННОСТИ синхронизации сетей следующего поколения: НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

В статье дан обзор современных проблем синхронизации сетей электросвязи, которые обсуждались на международных форумах по синхронизации в электросвязи (International Telecommunications Synchronization Forum) ITSF-2004, ITSF-2005, проведенных в Лондоне Институтом инженеров по электронике и электротехнике США (Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE).

В развитии международной нормативной базы по сетям синхронизации можно выделить три этапа.

Первые международные стандарты по синхронизации цифровых центров коммутации в транспортной среде PDH телефонных сетей общего пользования были опубликованы в 1988 году как Рекомендации G.810, G.811 [1] и G.812 в Синей книге Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии (МККТТ). Их основой послужили два фактора: достижения США в области разработки и применения цезиевых стандартов частоты и опыт развертывания сети синхронизации, накопленный компанией AT&T к 1984 году. Однако уже к 1989 году эти нормативные документы устарели настолько, что AT&T полностью изменила структуру своей сети синхронизации [2], а широкое внедрение систем передачи SDH стимулировало существенный пересмотр Рекомендаций G.810–G.812 и интенсивную разработку новых стандартов.

Второй этап завершился к 2000 году созданием серии Рекомендаций сектора телекоммуникаций МСЭ ИТУ-Т G.703, G.704, G.781, G.783, G.803, G.810–G.813, G.822–G.825, на основе которых разработаны стандарты Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI серии EN 300 462.

Суть этих рекомендаций и стандартов отображена на рис. 1, на котором показаны графики предельных значений блужданий фазы на стыках синхронизации. Основная цель указанных документов — не допустить, чтобы блуждания фазы на транспортных стыках 2048 кбит/с (этот график также представлен на рис. 1) превысили 18 мкс. Очевидно наличие некоторых противоречий между приведенными нормативными требованиями. Так, требования EN 300 462–3 к стыку PRC несколько жестче, чем требования G.823, — скорее всего, по той причине, что ETSI сочла слишком сложной зависимость MTIE от интервала наблюдения, предложенную в ИТУ-Т, и аппроксимировали ее ломаной линией. Если

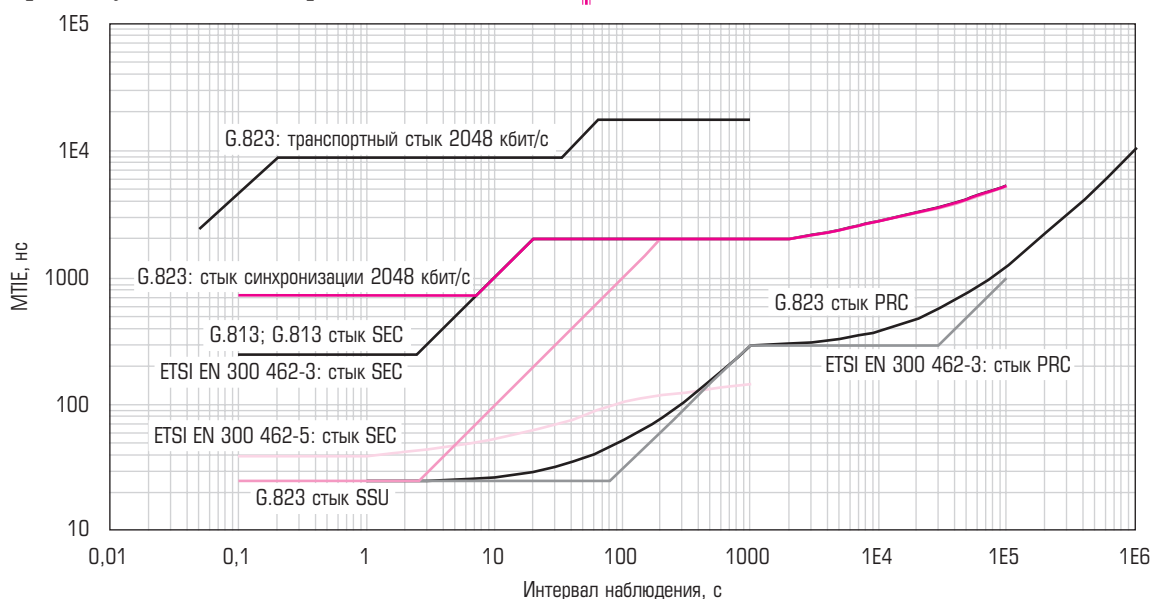


Рис. 1. Требования к сетевым стыкам синхронизации:

MTIE — Maximal Time Interval Error (максимальная погрешность временного интервала);

PRC — Primary Reference Clock (первичное устройство синхронизации);

SEC — SDH Equipment Clock (устройство синхронизации оборудования SDH);

SSU — Synchronization Supply Unit (устройство обработки, распределения и оценки качества опорного сигнала синхронизации)

требования ITU-T к оборудованию SDH (G.813) и к сетевому стыку синхронизации (G.823) совпадают, то нормы стандартов ETSI (соответственно EN 300 462-5 и EN 300 462-3) существенно расходятся между собой. Эти противоречия могут сказаться в практике измерений стабильности опорных сигналов.

Построенные по указанным рекомендациям сети синхронизации еще не успели утвердиться в статусе «классических», как уже появились явные предпосылки перехода к *третьему этапу* развития нормативной базы, связанному с «сетями следующего поколения» — NGN. Пока что это своего рода маркетинговый лозунг, под которым понимают сети, основой которых станет коммутация пакетов в сочетании с техническими средствами регулирования информационных потоков. Переход к NGN, вероятнее всего, не будет резким, однако в перспективе отказ от синхронных систем передачи в пользу сетей с коммутацией пакетов станет, как полагают, столь же переломным моментом, как переход от черно-белого телевидения к цветному.

Различными органами стандартизации принят ряд нормативных документов, имеющих отношение к синхронизации в сетях с коммутацией пакетов [3; 4].

На международном уровне их разработкой занимается ITU-T, где сейчас ведется подготовка Рекомендации G.pactiming «Timing and Synchronization aspects in packet networks», для которой обязательна гармонизация с родственными рекомендациями (G.8110 «Connection-oriented MPLS», Y.1413 «TDM-MPLS network interworking — user plane interworking», Y.tdmip «TDM-IP interworking — user plane interworking»).

Многие органы стандартизации работают в том же направлении на региональном уровне:

- ✦ в Европе — *ETSI*, которым подготовлен технический отчет TR 101 685 «Timing and Synchronization aspects of ATM Networks» (1999 г.);
- ✦ в Северной Америке — *ANSI* (Национальный институт стандартизации США);
- ✦ в Китае — *SAC* (Администрация стандартов Китая);
- ✦ в Японии — *TTC* (Комиссия по технике связи).

Кроме того, большое количество стандартов разрабатывают органы стандартизации промышленного уровня:

- ✦ *ATIS* (Alliance for Telecommunication Industry Solutions — Тройственный союз по вопросам стандартизации в промышленности средств связи между США, Великобританией и Канадой) — технический отчет «Synchronization of Packet Networks» («Синхронизация в сетях с коммутацией пакетов»);

- ✦ *Telcordia*, бывший Bellcore (Bell Communication Research — Координационный исследовательский центр по нормативной базе для семи региональных операторов США, сформированных после реструктуризации сети AT&T в 1984 г.; первоначально Bell Laboratories — Исследовательский центр компании «Белл телефон»);

- ✦ *TIA* (Telecommunications Industry Association — Ассоциация телекоммуникационной промышленности средств связи США);

- ✦ *3GPP* (Third Generation Partnership Project — Партнерство по проекту 3-го поколения);

- ✦ *3GPP2* (Third Generation Partnership Project 2 — 2-е Партнерство по проекту 3-го поколения);

- ✦ *IEEE* — IEEE 802.1 «Multipoint (bridged) Ethernet», 802.3 «Point-to-point Ethernet», 802.16 (WiMAX), IEEE 1588;

- ✦ *IETF* — PWE3-CESoPSN, PWE3-SAToP, PWE3-TDM-REQ, PWE3-Timing-PW-REQ, NTP V.4, RFC 3031 «Connection-oriented MPLS», RFC 768 и RFC 791 «Connectionless IP».

Особенности синхронизации сетей следующего поколения

Сети следующего поколения, о которых идет речь в Рекомендациях ITU-T Y.2001 и Y.2011, привлекают пристальное внимание специалистов по синхронизации по нескольким причинам.

Во-первых, основой NGN служит конвергентная транспортная среда на основе коммутации пакетов, которая разрушает синхронизацию.

Во-вторых, многие традиционные услуги требуют доставки сигналов синхронизации к окончному и абонентскому оборудованию, а поскольку сеть с коммутацией пакетов разрушает синхронизацию, оператору такой сети нужно знать, правильно ли она работает при предоставлении услуг, чувствительных к качеству синхронизации (передача речи в пакетах, эмуляция каналов с временным уплотнением — т. е. все, что реализуется в реальном времени). При таком подходе должно быть проведено четкое разграничение между *планированием транспорта сообщений и планированием услуг*.

В-третьих, если синхронизация не является частью технологического процесса [8, подразд. 6.1], ее придется вводить в виде услуги, а значит, нужно решить: должна ли такая услуга предоставляться всем (как общеобязательная) или только по требованию абонента? Актуальность дилеммы становится очевидной, если учесть, что придется затрачивать ощутимые средства не на транспортировку сообщений, а на обеспечение качества обслуживания.

В проекті Рекомендації ІТU-Т G.pactiming [8] розглядаються три основні способи відновлення синхронізації на границях транспортної середовища з комутацією пакетів при передачі в ній групового сигналу ТDМ в формі послуги емуляції каналів СЕС (Channel Emulation Service). В остаточному стаціонарному обладнанні для цього повинні бути передбачені функції взаємодії ІWФ (InterWorking Function).

Варіант, при якому всі абоненти транспортної середовища з комутацією пакетів отримують тактову частоту від мережі синхронізації в звичайному «централізованому» порядку, представлений на рис. 2, а. Якщо абонентське обладнання працює на власній тактовій частоті (рис. 2, б),

то на границі мережі з комутацією пакетів її відновлюють відносними способами, наприклад з допомогою алгоритму узгодження швидкостей SRTS. В обох випадках в вузлі з ІWФ повинен бути доступ до стику синхронізації PRC. Виходячи з економічних міркувань оператор мережі з комутацією пакетів звичайно або орендує такий стик у оператора транспортної мережі SDH, або будує власну мережу синхронізації.

В ситуації, коли неможливо побудувати свою мережу синхронізації, ні використати стики синхронізації, вдаються до найпростішого — адаптивного — способу узгодження швидкостей прийому і передачі (рис. 2, в), який, однак, допустимо використати лише за умови, що

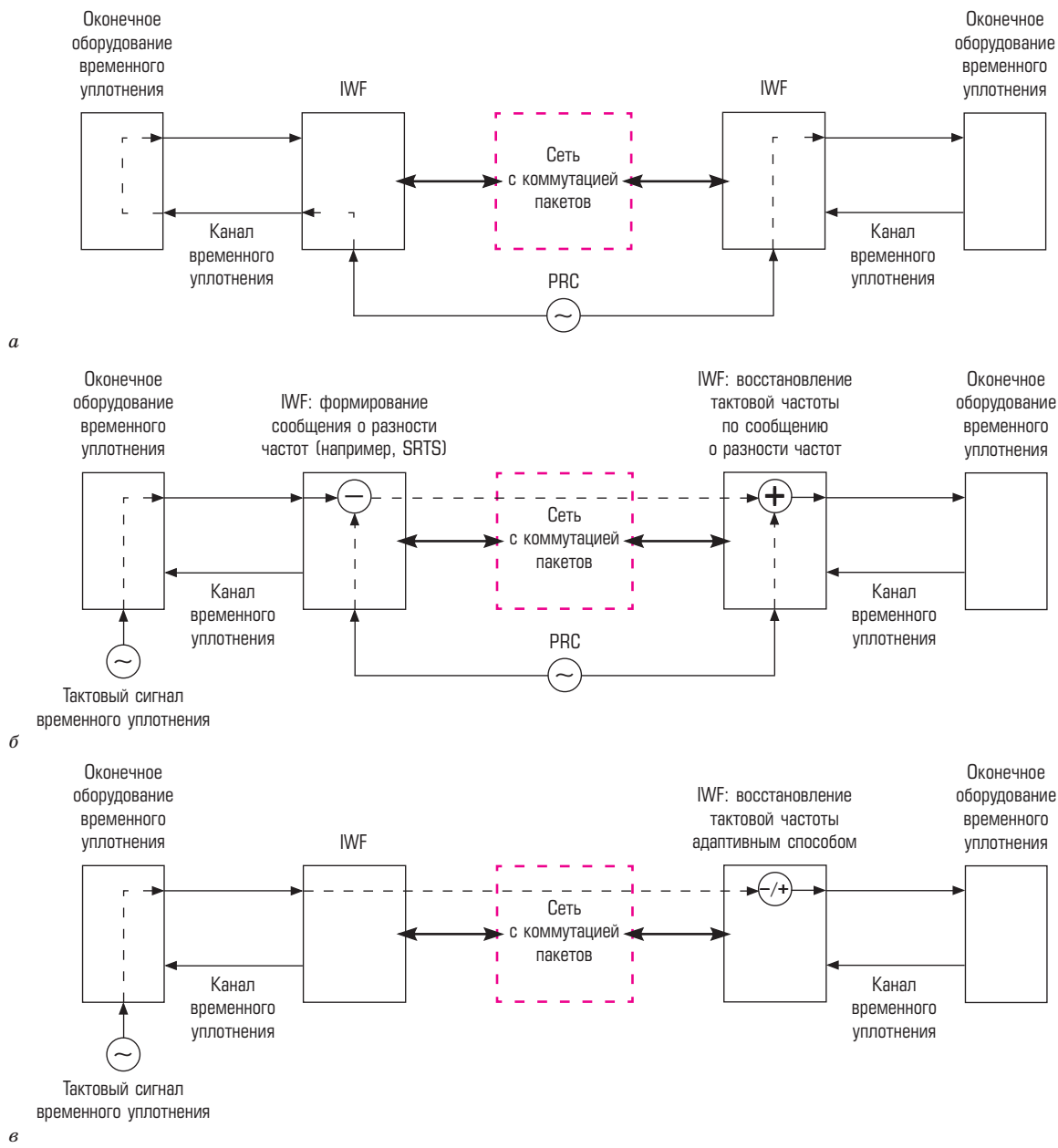


Рис. 2. Способы синхронизации каналов временного уплотнения в сети с коммутацией пакетов по проекту Рекомендации ІТU-Т G.pactiming: сеть синхронізації (а); відновлення тактової частоти відносними (б) і адаптивними (в) способами

абонент не предъявляет строгих требований к стабильности своей тактовой частоты [10].

Возможно ли в обозримом будущем использовать «синхронный» Ethernet для распределения опорных сигналов синхронизации? Если да, то физический уровень транспортной среды с коммутацией пакетов должен быть синхронным, однако такой ответ не будет окончательным, поскольку сразу же возникают еще как минимум два вопроса:

✦ Можно ли существенно повысить точность тактовой частоты, которая для традиционного Ethernet составляет всего $100 \cdot 10^{-6}$?

✦ Какого уровня должна достигать точность тактовой частоты, чтобы стало возможным обеспечивать с помощью синхронного Ethernet поддержку услуг самого высокого качества?

На секции «Синхронизация в сетях следующего поколения: техника и производители» ITSF-2005 прозвучал вопрос: «Нужна ли вообще синхронизация в сетях следующего поколения?». На это представитель американской компании Symmetricom ответил так: «Не нужна, если вы не хотите обеспечить приемлемое качество обслуживания».

В результате дискуссий стало ясно: пора осмыслить вопросы синхронизации (в аспектах как частоты, так и времени) в отношении к NGN, уделив особое внимание практическим моментам. В противном случае мы в дальнейшем столкнемся с серьезными проблемами, решая задачу обеспечения надлежащего качества обслуживания наиболее важных приложений.

Синхронизация в сетях мобильной связи

Чтобы пояснить проблемы синхронизации в сети UMTS, ее структуру можно представить в виде, отображенном на рис. 3.

Магистральную транспортную сеть, которая объединяет центры коммутации и контроллеры радиосети, строят на основе техники SDH, а в будущем она будет реализовываться в виде NGN (и, следовательно, предстоит решать все присущие NGN проблемы синхронизации). Специфика синхронизации мобильной связи проявляется при построении местной транспортной сети, объединяющей контроллеры радиосети и базовые станции (БС).

Основная цель, которой руководствуются при разработке технических требований к стабильности частоты, — обеспечение надлежащего качества обслуживания мобильных абонентов. Стабильность кварцевых генераторов в современном мобильном телефоне не может быть лучше, чем $\sim 10^{-7}$. На этом основании допустимый сдвиг

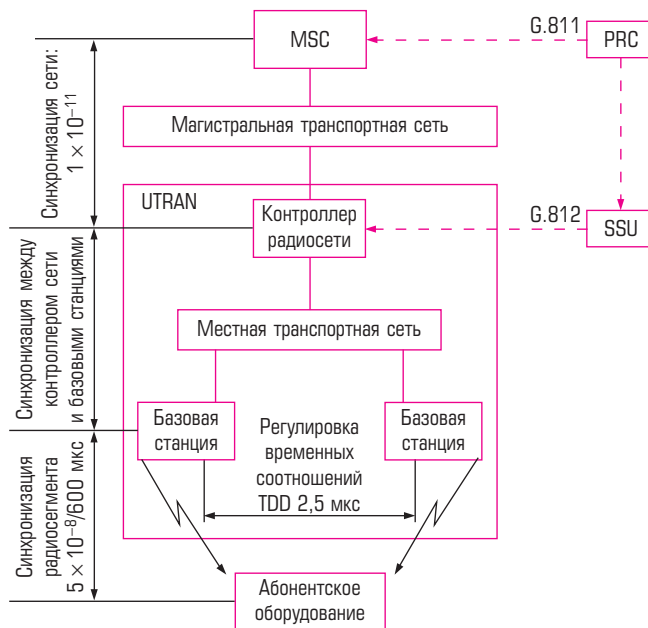


Рис. 3. Структура сети UMTS: MSC — Mobile Switch Center (центр коммутации мобильной связи); TDD — Time Division Duplex (дуплекс с разделением во времени); UTRAN — UMTS Terrestrial Radio Access Network (наземная сеть радиодоступа UMTS)

частоты в мобильном телефоне стандарта WCDMA 2100 МГц ограничен уровнем 591 Гц. Львиная доля этого допуска приходится на доплеровский сдвиг, который равен 486 Гц при обслуживании абонента, движущегося со скоростью 250 км/ч между двумя БС, отстоящими друг от друга не более чем на 35 км. Остаток составляет 105 Гц, что соответствует относительной частоте $105/2100000000 = 5 \cdot 10^{-8}$. Отсюда и техническое требование к точности частоты несущего колебания сигнала БС: она должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ на интервале наблюдения, равном длительности временного окна (576,923 мкс), предоставляемого абоненту в цикле временного уплотнения. Выбор этого интервала объясняют тем, что с абонентом работают одновременно обе БС, чтобы обеспечить «мягкую эстафетную передачу» (Handover) его от одной станции к другой. По той же причине в режиме TDD выдвигается дополнительное требование к точности фазирования циклов длительностью 256 с на соседних БС, согласно которому она должна быть не хуже 2,5 мкс, что дает относительную величину $2,5/256000000 \cong 9,8 \cdot 10^{-9}$.

Наиболее жесткое требование к стабильности опорных сигналов синхронизации — не хуже $1 \cdot 10^{-10}$ — предъявляют в случае, если ставится задача определить местоположение абонента в сети мобильной связи. Считают, впрочем, что такой подход необходим и для предоставления других перспективных услуг. Более того, согласно общим положениям документов ETSI [11; 12], опорный сигнал по всей сети WCDMA от MSC

до контроллера радіосеті і БС належить відслідковувати від джерела синхронізації, якість якого повинно відповідати Рекомендації G.811, т. е. «якості PRC».

Аналіз всіх перерахованих вимог дає підстави запропонувати шаблон для граничних значень вандера тактового сигналу базової станції UTRAN в вигляді, показаному на рис. 4 [13].

В розвитку синхронізації в техніці мереж мобільної зв'язі стандарту GSM виділяють три основних етапи.

✦ На *першому етапі* (уже пройденому) опорні сигнали для MSC розповсюджували в «класическій» мережі синхронізації магістральної транспортної мережі SDH, а через її регіональні і міські ділянки — до контролерів БС. На місцевій транспортній мережі використовували виключно канали E1, по яких і доставляли сигнали синхронізації до БС.

✦ В існуючих мережах (*другий етап*) відбувається впровадження магістральних транспортних мереж з комутацією пакетів — на рис. 3 це виглядає як руйнування синхронізації на фізичному рівні між MSC і контролером радіосеті. В результаті виникають відмічені «особливості синхронізації мереж NGN».

✦ На *третьому етапі* в мобільних мережах майбутнього передбачається впровадження на UTRAN транспортної мережі на основі протоколу IP. Потрібна продуктивність місцевих транспортних мереж UMTS (3G), за деякими оцінками, може бути в 3–6 разів вище показувачів, на які орієнтується проєкт 3GPP. Якщо такі

прогнози виправдаються, то на ринку техніки місцевих транспортних мереж слід очікувати жорсткої конкуренції між постачальниками, в якій отримують перевагу ті, чье обладнання зможе забезпечити належну якість обслуговування, в тому числі передачу сигналів синхронізації в транспортній середі з комутацією пакетів.

«Класическіє» мережі синхронізації

Небагато численні доповіді по «класическіє» мережі синхронізації, представлені на ITSF, були присвячені в першу чергу надійності синхронізації як одному з найважливіших факторів якості обслуговування. Згідно даним Федеральної комісії зв'язу США (FCC), яка в 2000 році провела 20 аналітичних досліджень відмов (складено 203 звіти), а в 2001-м — 16 (181 звіт), з усього числа відмов з незадовільною синхронізацією пов'язані 9,4%, причому причиною було викликане 33% всіх відмов систем сигналізації CCS7 [14].

В звіті керівної комісії по надійності мереж ATIS, де наведені ті ж дані, зроблено висновок, що аварії в CCS7 можуть служити крім того не найнадійнішим індикатором виходу з ладу систем станційної синхронізації. О ті ж свідчать і 33% аварій більш загального характеру (відносяться до категорії «інше обладнання»), локалізація яких без глибокого аналізу мережі синхронізації не тільки складно, але і вимагає значеских витрат.

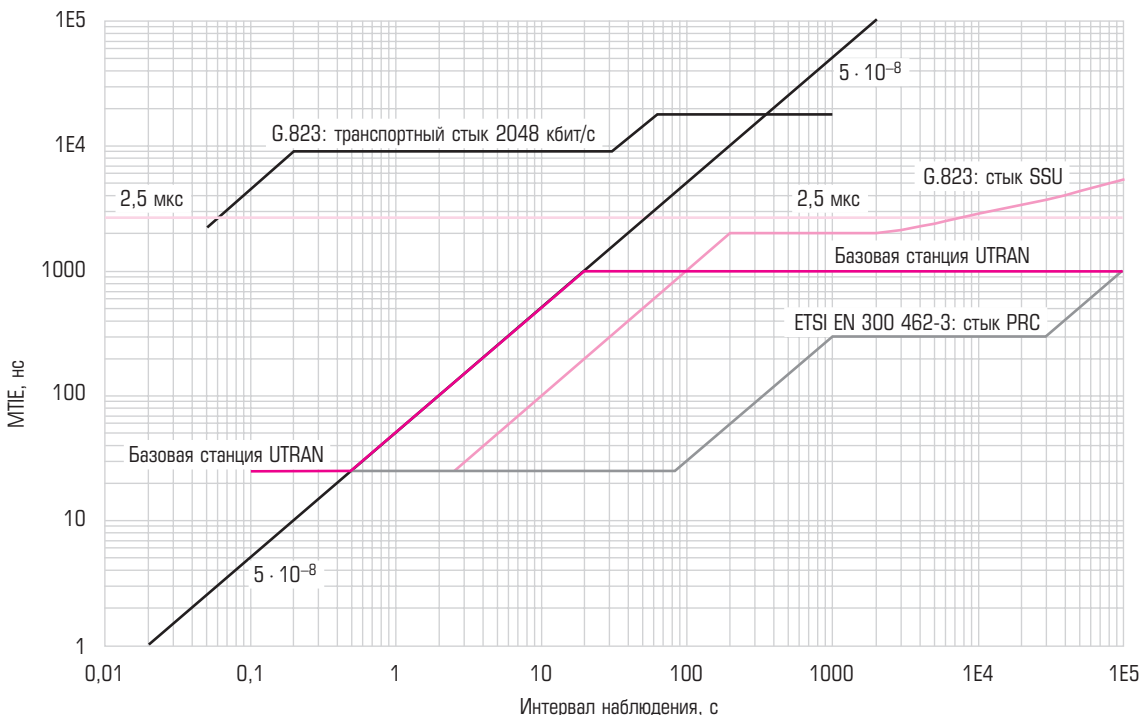


Рис. 4. Графіки граничних значень вандера тактового сигналу базової станції UTRAN

Обнаружено, что неудовлетворительной синхронизацией обусловлены 28% всех неисправностей категории «активность пульта управления». **В общем количестве отказов, так или иначе связанных с выделенным оборудованием станционной синхронизации, около 28% трудно обнаружить, поскольку они не сопровождаются аварийной сигнализацией и для их локализации персоналу требуется специальная подготовка.**

В отчетах об отказах не всегда указывается причина аварии (особенно если ее подробности остались невыясненными); в них часто встречается сообщение о том, что «отказы синхронизации и аварии выделенного оборудования синхронизации не сопровождаются аварийной сигнализацией».

Для аварий синхронизации типичен лавинообразный характер. Как показывает анализ отчетов, до 50% всего оборудования синхронизации эксплуатируется более девяти лет. Поскольку за такой период произошло много перемен, очевидно необходимость тщательного мониторинга в рамках технического обслуживания. Формулу управления сетью (без чего трудно получить представление о проблеме) можно представить в следующем виде: «обнаружил–проконтролировал–устранил».

Затраты на оборудование синхронизации незначительны на фоне общих затрат на развитие современных сетей электросвязи. Поначалу операторы сетей попросту не обращали внимания на состояние сети синхронизации, пока **на опыте не убедились в том, что она прямо влияет на качество обслуживания — фактор, от которого непосредственно зависит прибыльность сети в целом.** В результате техническое руководство компаний, работающих в условиях жесткой конкуренции, теперь не только не стремится

«сэкономить» на оборудовании синхронизации, но и практикует разработку своих корпоративных технических требований, более жестких по сравнению с предусмотренными в международной нормативной базе. Например, схему синхронизации кольца SDH/SONET первичной транспортной сети компании Sprint (США) [15], с которой ознакомил участников ITSF-2004 представитель этой компании, иначе как «глухой защитой» не назовешь (рис. 5).

Здесь каждый мультиплексор ввода-вывода MBB помимо встроенного SEC снабжен собственным SSU со значительно лучшими фильтрующими свойствами и характеристикой удержания частоты. Цифры возле входов и выходов синхронизации (см. рис. 5) соответствуют тому PRC, сигнал которого отслеживается в конкретном мультиплексоре.

Сеть синхронизации Sprint отличается простотой проекта на основе краткого набора основных правил. При ее развертывании не возникает необходимости в «высоком искусстве системного проектирования» и удается свести к минимуму потенциальные проблемы синхронизации. В качестве «стратегического резерва» используют два цезиевых PRC с взаимным резервированием, а в каждом кольце SONET (Synchronous Optical Network — синхронная оптическая сеть) размещают как минимум два PRC так, чтобы количество их в цепочке синхронизации не превышало пяти.

Заметим, что «образцовая цепочка синхронизации» согласно Рекомендации G.803 может содержать до 10 SSU, между каждой парой которых допустимо размещать до 20 SEC. Специалисты компании Sprint исключили из своей сети устройства SEC как элементы сети синхронизации. Если в целом по США с отказами синхронизации связывают 10% всех серьезных 30-минутных зафиксированных аварий, в результате которых

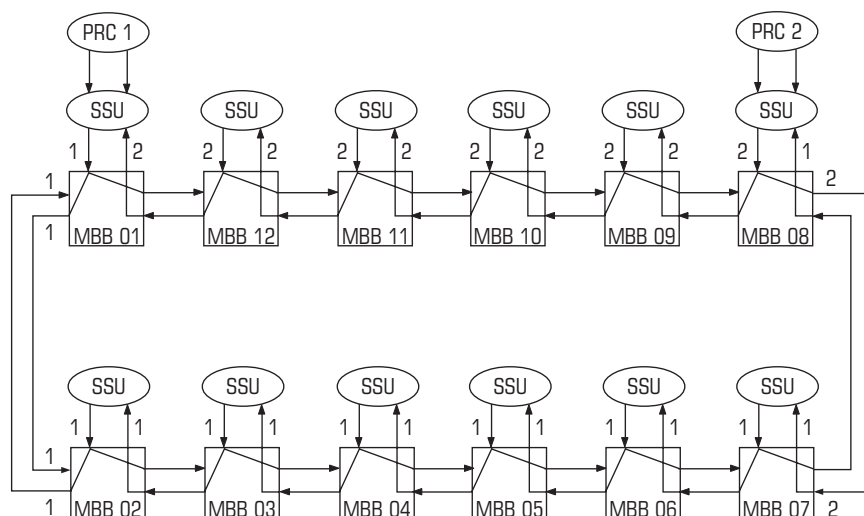


Рис. 5. Синхронизация кольца SDH/SONET первичной транспортной сети Sprint

постраждали более чем 30 тыс. абонентов, то на сети Sprint серьезных аварий из-за сети синхронизации не отмечено.

В компании T-Com (подразделении фиксированной связи Deutsche Telekom) ответственность за утверждение технических условий для сети синхронизации лежит на системном отделе. Данная сеть предназначена для внутреннего и внешнего пользования на единой основе. Внутреннее пользование распространяется на синхронизацию оборудования собственных телефонных сетей, сетей SDH и всего оборудования, которое может быть подключено через стыки SDH. Внешние пользователи (другие операторы, в том числе и мобильной связи) обслуживаются по программе «Carrier Normaltact» (стыки опорных сигналов синхронизации для предприятий связи). Здесь, как и на сети Sprint, уделяют много внимания надежности, однако в своем стремлении достичь ее прибегают, напротив, к помощи «высокого искусства системного проектирования» [16]. На сети T-Com (как показано на рис. 6) вместо резервирования за счет аппаратной избыточности резервируют каналы синхронизации на основе тщательного планирования и мониторинга в процессе эксплуатации.

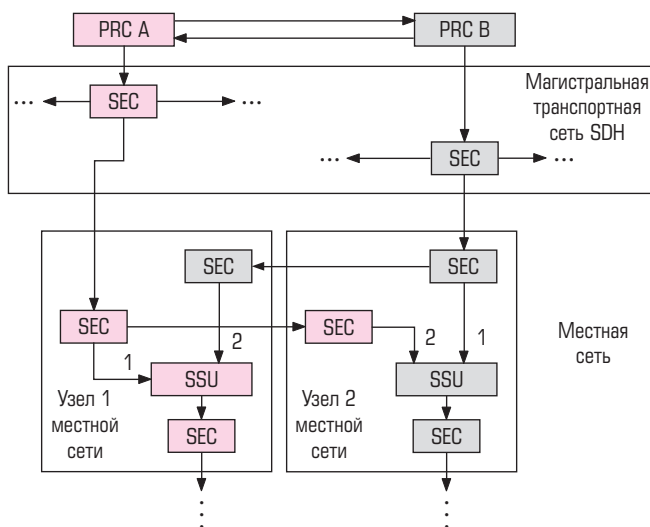


Рис. 6. Резервирование каналов синхронизации на сети T-Com

Синхронизация текущего времени

Согласно определению, сформулированному в Рекомендации G.810, синхронизация сети (network synchronization) — обобщенное понятие, которое относится к распределению каким-либо способом общего времени и/или частоты по всем элементам сети. Однако второй этап развития международной нормативной базы по сетям синхронизации охватывает только тактовую синхронизацию, поскольку фазовые и временные соотношения тактовых сигналов не имеют значения для работы буферных устройств в элементах сети.

На третьем этапе, как ожидается, получат широкое применение протоколы сличения текущего времени не только на прикладном уровне в виде NTP (Network Time Protocol — протокол сетевого времени) RFC 1305, но и на втором уровне в виде PTP (Precise Time Protocol — протокол точного времени) IEEE 1588. Предполагается, что эти и подобные протоколы будут использоваться как для сличения текущего времени, так и для передачи тактовой частоты в транспортной среде с коммутацией пакетов. Более того, в выступлении George Zampetti [17] в процессе работы ITSF-2004 сообщалось о разработанном в компании Symmetricom алгоритме двустороннего обмена информацией о времени и частоте между SSU и элементами сети на физическом уровне. Такая информация вызвала большой интерес в контексте сетей синхронизации следующего поколения. Однако это — тема для отдельной статьи.

* * *

Участники ITSF-2005 подвели итоги своих дискуссий в виде трех обобщенных выводов:

- ✦ необходимо довести до сведения технического руководства предприятий электросвязи убедительную информацию, свидетельствующую о важной роли качественной синхронизации сетей;
- ✦ доставка синхронизации на местный участок сети необходима для обеспечения требуемого качества обслуживания абонентов традиционных услуг и приложений;
- ✦ международные стандарты требуют соответствующей доработки, которая позволит использовать их не только для обеспечения технологического процесса электросвязи, но и в качестве нормативной основы для заключения договоров между операторами и абонентами на предоставление им синхронизации как услуги.

Остается сослаться на впечатляющее предсказание организаторов форума, которые, говоря об ITSF-2006 (намеченном на осень текущего года), заявили: «К этому времени сообщество синхронизации в электросвязи перевернется вверх дном: влияние сетей с коммутацией пакетов на синхронизацию сети, особенно в отношении мобильной связи, будет переосмыслено». Представьте себе, что мобильные телефоны оборудованы цезиевыми генераторами, выполненными в виде корпуса микросхемы, с долговременной стабильностью не хуже 10^{-10} [18]...

Литература

1. Рекомендация G.811. Требования к хронированию на выходах первичных эталонных задающих генераторов, пригодных для обеспечения плезियोхронной работы международных цифровых трактов.— Мельбурн, 1988 г. // Синяя книга МККТТ: Пер. на русск. яз. / М.: ЦНИИС.— Вып. III. 5.
2. Abate I. E. et al. AT&T New Approach to the Synchronization of Telecommunication Networks // IEEE Communication Magazine.— 1989.— April.— P. 35–45.

3. Schneuwly D. (Oscilloquartz, Швейцарія). Введение, теоретические основы и стандарты // Секция обзорных докладов ITSF-2005, 17 окт. 2005 г.
4. Ruffini S. (Ericsson Lab, Италия). Актуальное направление: синхронизация в сетях с коммутацией пакетов и разработка стандартов // Пленарное заседание ITSF-2005, 18 окт. 2005 г.
5. Захаров Г. П. Эволюция цифровых сетей интегрального обслуживания // Сети.— 1990.— С. 3–8.
6. Рыжков А. В. Анализ устойчивости системы синхронизации Магистральной цифровой сети связи ОАО «РЖД» в реальных условиях окружающей среды: Доклад на междунар. науч.-техн. семинаре «Синхронизация сетей связи: достижения и перспективы», Киев, 15 февр. 2006 г.
7. Dutton H. J. R., Lenhard P. Asynchronous Transfer Mode ATM (Technical Overview).— Prentice Hall, New Jersey, 1995.
8. Latest draft of the Recommendation G.pac timing. Timing and Synchronization aspects in packet networks. SG15/13, Southampton, 29.11–01.12.2005.
9. Rodrigues S. (Zarlink Semiconductor, Канада). Пути развития техники доставки синхронизации в сетях следующего поколения // Секция ITSF-2005 «Синхронизация в сетях следующего поколения: техника и производители», 18 окт. 2005 г.
10. ETSI TR 101 685. Timing and Synchronization aspects of ATM Networks (1999).
11. ETSI TS 125 411. UTRAN in Interface Layer 1.
12. ETSI TS 125 402. UMTS: Synchronisation in UTRAN Stage 2.
13. Curry Ch. (Chronos Technology, Великобритания). Качество синхронизации базовых станций GSM и 3G // Секция ITSF-2004 «Синхронизация приложений мобильной и беспроводной связи», 3 нояб. 2004 г.
14. Dhanda D. (Symmetricom Inc., США). Синхронизация времени в усовершенствованной системе управления // Секция ITSF-2005 «Синхронизация и проблемы функционирования сетей», 19 окт. 2005 г.
15. Norman Ch. (Sprint, США). Синхронизация в глобальной сети электро-связи // Секция ITSF-2004 «Синхронизация и транспортные сети», 3 нояб. 2004 г.
16. Imlau H. (Symmetricom Inc., США). Новая сеть синхронизации T-Com // Секция ITSF-2004 «Синхронизация и транспортные сети», 3 нояб. 2004 г.
17. Zampetti G. (Symmetricom Inc., США). Эволюция к сетям синхронизации нового поколения // Секция обзорных докладов ITSF-2004, 2 нояб. 2004 г.
18. A microfabricated atomic clock / S. Knappe, L. Liew, V. Shah et al. // Appl. Phys. Lett.— 2004.— № 85.— P. 1460.