الوحدة السادسة

تجميع وتوزيع الإشارات الرقمية

Digital Signals Multiplexing and Switching

أ. د. جمال محمد خليفة

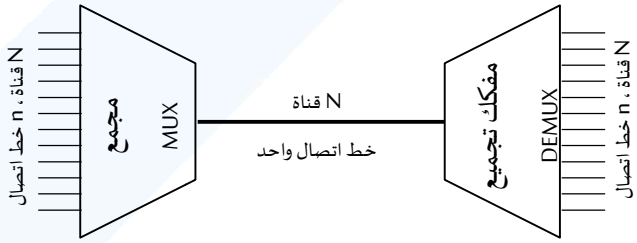
1- مقدمة:

1-1 تمهيد

قاد التطور الهائل في مختلف مجالات الحياة إلى زيادة حجم تبادل الرسائل والمعطيات data , voice, and information في قنوات الاتصال بين الأفراد والجماعات والمؤسسات والهيئات المختلفة في كافة أنحاء العالم. وقد أدى ذلك إلى البحث عن زيادة عدد قنوات الاتصال وزيادة فاعلية استخدام المجال الترددي لهذه القنوات.

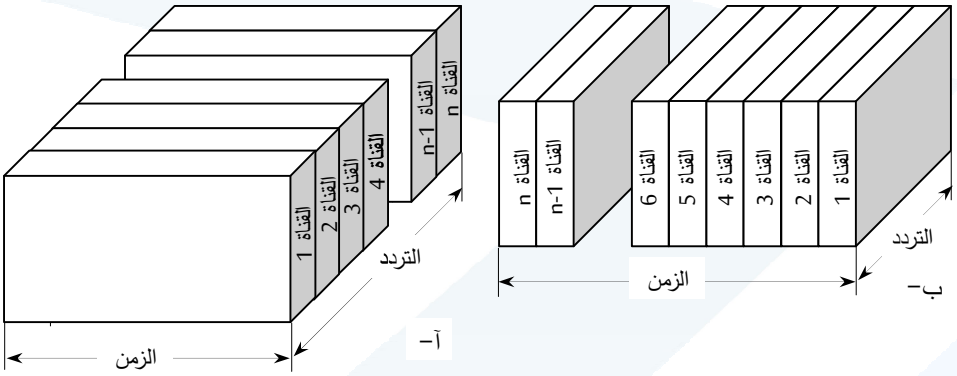
ومن المعروف أن أكثر أجزاء شبكات الاتصالات كلفة هي قناة الاتصال (كبلات مزدوجة twisted pair، كبلات محورية coaxial cable، وصلات ميكروية microwave link، ألياف زجاجية optical fiber، قنوات الاتصال عبر التوابع الصنعية satellite communication channel) وحيث أن بناء قناة اتصال بين كل زوج من المتصلين (المرسل والمستقبل) غير ممكن من الناحية العملية والاقتصادية، فلا بد من استخدام قناة واحدة كوسط اتصال بين عدد كبير من أزواج المستخدمين،أي إرسال عدد كبير من الإشارات باستخدام نفس الوسط، بما يؤدي إلى إنقاص كلفة الاتصال، وهذا ما يسمى الإرسال متعدد القنوات multi channel transmission، أو تجميع القنوات channels multiplexing.

وهكذا يمكننا تعريف التجميع على أنه إرسال المعلومات (صوت، معطيات،...) من أكثر من مرسل إلى أكثر من مستقبل باستخدام نفس وسط الاتصال (قناة الاتصال) وذلك كما هو مبين في الشكل



الشكل (1): شكل تمثيلي لتجميع الإشارات بشكل عام

(1). وهناك مجموعة من التقنيات والطرق التي تستخدم في ذلك، نذكر منها التجميع بتقسيم التردد Frequency Division Multiplexing (FDM) ويعني تقسيم المجال الترددي المخصص للقناة المشتركة بين القنوات الجزئية ولكن في نفس الزمن كما في الشكل (2-آ). والتجميع بتقسيم الزمن Time Division Multiplexing (TDM) ويعني أن القنوات الجزئية تشغل فترات زمنية متناوبة ضمن فترة زمنية كلية، وتتشارك القنوات في شغل



الشكل (2): شكل تمثيلي لتجميع الإشارات آ– FDM، ب–TDM

نفس المجال الترددي كما في الشكل (2–ب) . وسنقتصر على التجميع بتقسيم الزمن لاستخدامه الواسع في شبكات تراسل المعطيات.

1–2 أهداف الوحدة:

نتوقع منك عزيزي الدارس بعد الانتهاء من دراسة هذه الوحدة أن تكون قادراً على أن:

1. تفهم كيفية تجميع الاشارات الرقمية بشكل عام.
2. تحدد خصائص نظم التجميع المختلفة ومعدلات إرسالها.
3. تبين طرق التزامن المتبعة في أنظمة التجميع المختلفة.
4. توضح كيفية عمل نظم التجميع المتبعة عالميا.
5. تعرف كيفية عمل أنظمة التجميع المستخدمة للتراسل عبر الألياف الضوئية
6. تتعرف على بنية وتقنيات التجميع المستخدمة في الاتصالات عبر التوابع الصنعية.
7. تتعرف على تقنيات التبديل والتوزيع.

1–3 أقسام الوحدة

تنقسم هذه الوحدة إلى ستة أقسام رئيسية. يتضمن القسم الأول مدخلاً إلى تجميع الإشارات بشكل عام وتوضيح كيفية إجراء التجميع بتقسيم الزمن (TDM)، وضبط عملية توزيع الأقنية والعينات

والبيتات، وكذلك كيفية تأمين ملائمة معدلات الإرسال Transmission rate justification، وتزامن الأطر Frame Synchronization، وهذا مايحقق الأهداف الثلاثة الأولة من أهداف هذه الوحدة.

كما يتضمن القسم الثاني والثالث شرحاً لأنظمة تجميع القنوات الهاتفية زمنياً، والبنية الهرمية لهذه الأنظمة، بما في ذلك أنظمة الحامل T1، T2، T31، T4، T5. إضافة إلى البنية الهرمية لنظم تجميع الإشارات الرقمية وفق معايير CCITT بما في ذلك الأنظمة PCM-30، PCM-120، PCM-480، PCM-1920 . وكذلك تقنيات التجميع الإحصائي. وذلك بما يحقق الهدف الرابع.

بينما يحتوي القسم الثالث على شرح لتجميع الإشارات بهدف نقلها عبر الألياف الضوئية ، وبنية أطر التجميع وهرمية نظم التجميع هذه، بما يحقق الحدف الخامس

أما القسم الرابع فقد تم تخصيصه للتجميع الزمني بالدخول المتعدد TDMA، والتقنيات المستخدمة وبنية أطر التجميع هذه تحقيقاً للهدف السادس. في حين أن القسم الخامس والأخير قد خصص لشرح تقنيات التبديل Switching بما في ذلك التبديل باستخدام الدارة، والتبديل باستخدام الدارة Circuit Switching التبديل باستخدام الرسالة Message Switching ، والتبديل باستخدام الرزمة Packet Switching . وذلك بما يؤمن تحقيقاً كافياً للهدف السابع والأخير.

1-5 ماتحتاج إليه في دراسة الوحدة

تحتاج في دراسة هذه الوحدة إلى الأدوات التي تستخدمها عادة في تسجيل ملاحظاتك (دفتر ملاحظات وقلم). قم عزيزي الدارس بقراءة الوحدة بتمعن ولا تتردد بالرجوع إلى مشرفك الأكاديمي إذا احتاج الأمر لتوضيح بعض المفاهيم والأمور التي قد تواجه صعوبة في فهمها.

قم عزيزي الدارس أثناء دراستك لهذه الوحدة بالإجابة على كافة أسئلة التقويم الذاتي، والتدريبات، وذلك من أجل تأكدك من الحصول على المعلومات المطلوبة، وتحقيقك للهدف المرجو من دراستك لهذه الوحدة.

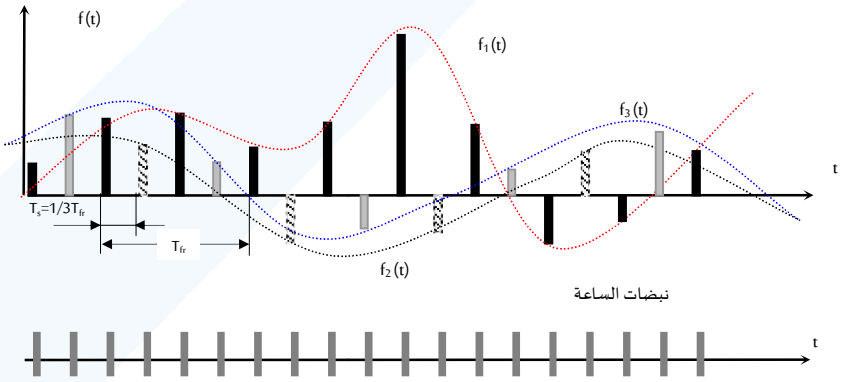
2- التجميع بتقسيم الزمن (TDM)

تمتاز الإشارات المتقطعة بشكل عام والإشارات الرقمية بشكل خاص بأن الإشارة لاتكون متواجدة إلا في فترات زمنية معينة ترتبط بوجود الرمز أو العينة، أما في باقي الفترات الزمنية التي تتخلل هذه الرموز فإنه لاوجود لأي إشارة. وهذا يعني أن قناة الاتصال لن تكون مشغولة بشكل دائم زمنياً بالإشارة

المراد إرسالها وإنما بشكل متقطع زمنياً، وهذا يفسح المجال أمامنا لاستخدام الفترة الزمنية التي تكون فيها القناة غير مشغولة لإرسال رموز أو عينات من إشارة (إشارات) أخرى. ويتم أخذ هذه العينات أو الرموز بشكل دوري ومتناوب بانتظام معين بما يؤمن تمثيل كافة الإشارات المراد إرسالها تمثيلاً يسمح باستعادتها في طرف الاستقبال (أي وفق معدل يحقق شرط نايكويست لكل الإشارات التناظرية. ويتناسب مع معدل الإرسال بالنسبة للإشارات الرقمية بشكل عاما).

إن أبسط أنظمة التجميع بتقسيم الزمن هي الأنظمة التي تقوم بتجميع الإشارات المعدلة بطريقة التعديل النبضي المطالي Pulse Amplitude Modulation تجميعاً زمنياً (PAM/TDM). وعلى الرغم من أن هذه التقنية قلما تستخدم خصوصاً في التطبيقات العامة، إلا أننا سنقوم بداية بتوضيح هذه التقنية مما سيساعدنا لاحقاً على فهم تجميع الإشارات الرقمية أو الإشارات الهاتفية المعدلة تعديلاً نبضياً مرمزاً (PCM/TDM)، أو بأية طريقة أخرى.

فلو كان لدينا على سبيل المثال ثلاث إشارات $f_1(t)$ و $f_2(t)$ و $f_3(t)$، ترددتها العظمى على التوالي هو 6KHz و3KHz و 3KHz على التوالي فإننا نأخذ عينات من هذه الإشارات بما يتناسب مع معدل نايكويست لكل منها، وهذا يضمن التوزيع المنتظم لعينات الإشارات المجمعة. فلو أخذنا عينتين من الإشارة الأولى فإننا نأخذ عينة واحدة من كل من الإشارتين الثانية والثالثة كما هو مبين في الشكل (3). وسيتشكل لدينا إشارة مجمعة فيها وسيزداد معدل ورود العينات في الإشارة المجمعة. وهو هنا مساوٍ لضعف تردد التقطيع للإشارتين الثانية والثالثة.



الشكل (3): الإشارة المجمعةPAM/TDM

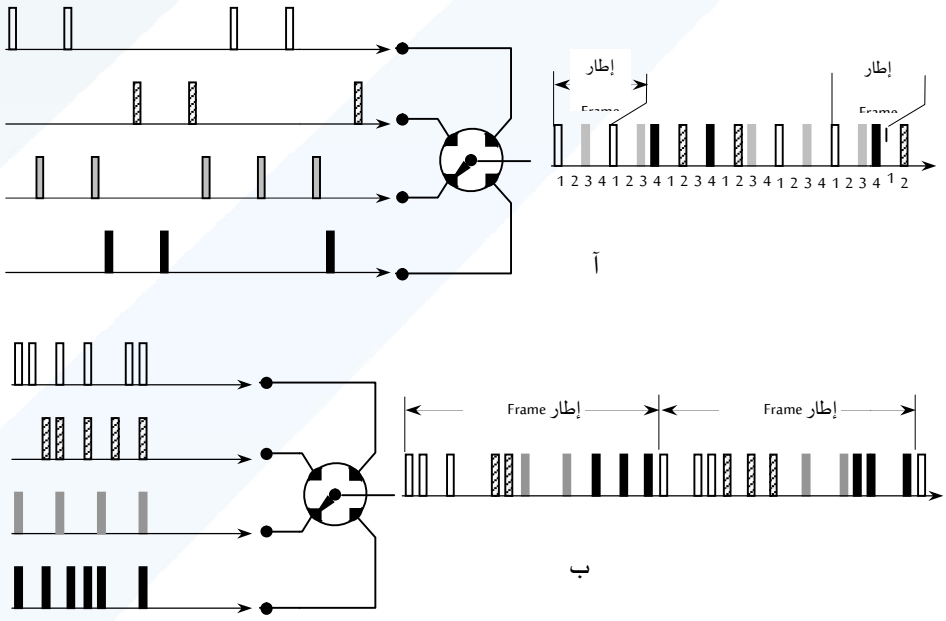
في حال اختلاف معدلات التقطيع

نعرف إطار التجميع Multiplexing frame بأنه الحيز الزمني الذي يحوي عينة واحدة على الأقل من كل إشارة من الإشارات المجمعة، وبحيث يتناسب عدد العينات التابعة للإشارة الواحدة مع معدل تقطيعها.

2-1 تجميع الإشارات الرقمية

يمكننا أن نعمم ما عرفناه سابقاً من مبادئ وقواعد تجميع الإشارات المقطعة على حالة الإشارات الرقمية، حيث أن الإشارات الرقمية قد تكون بأي شكل متاح ومن أي طبيعة رقمية. فقد تكون منبع معطيات، أو حاسب يعمل كطرفية أو مخدم، أو قد تكون إشارة هاتفية مرمزة(مجموعة من الإشارات الهاتفية المرمزة)، وربما كانت إشارات فاكس أو إشارات تلفزيونية رقمية، أو إشارات قياس عن بعد.

يقوم المجمع بتجميع هذه الإشارات، التي قد تكون ذات معدلات إرسال مختلفة، وإرسالها ضمن قناة واحدة ذات معدل إرسال أعلى وعرض حزمة أكبر. وكمثال على ذلك يمكن تجميع إشارتين رقميتين معدل إرسال كل منها 1200 bit/sec. وثلاث إشارات معدل كل منها 2400bit/sec. لتشكل إشارة مجمعة ذات معدل إرسال 9600bit/sec.



الشكل (4): تجميع الإشارات الرقمية آ- bit by bit ب- character by character أما

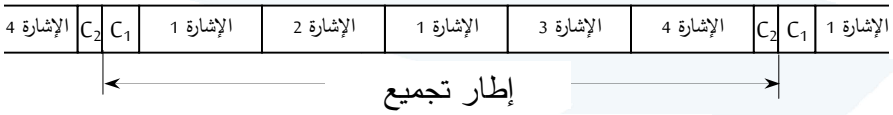
ويتم تجميع الإشارات بطريقتين: الطريقة الأولى التجميع خانة بعد خانة بالتتالي bit by bit interleaving كما هو موضح في الشكل (4–آ)، حيث يتم أخذ خانة ثنائية واحدة أو اكثر من كل إشارة حسب معدلها ضمن الإطار الواحد، فلو عدنا إلى مثالنا السابق فإننا نأخذ خانة واحدة من كل من الإشارتين ذات المعدل 1200bit/sec. وخانتين من كل من الإشارات ذات المعدل 2400bit/sec. ضمن الإطار الواحد.

الطريقة الثانية فهي بتجميع محرف بعد محرف character by character حيث تختلف إمكانية استخدام هذه التقنية أو تلك حسب نوع الإشارات التي يتم تجميعها. كما هو موضح في الشكل (4–ب)، حيث يتم أخذ محرف واحد أو اكثر من كل إشارة حسب معدلها ضمن الإطار الواحد، ولو عدنا أيضاً إلى مثالنا السابق فإننا سنأخذ محرف واحد من كل من الإشارتين ذات المعدل 1200bit/sec. ومحرفين من كل من الإشارات ذات المعدل 2400bit/sec. ضمن الإطار الواحد.

يتم استخدام الطريقة الثانية في تجميع الإشارات ذات معدلات الإرسال أخفض من 1200bit/sec.، أما إشارات الـ PCM فيتم تجميعها وفق الطريقة الأولى غالباً (في جميع مستويات التجميع في الأنظمة القياسية العالمية لتجميع الإشارات الهاتفية ماعدا المستوى الأول)، وكذلك المعطيات الرقمية ذات معدلات الإرسال الأعلى من 1200bit/sec. وبغض النظر عن الطريقة التي يتم بها التجميع فيجب مراعاة مجموعة من القواعد:

1- يتم التجميع وفق بنية إطار معينة، والإطار هو أصغر حيز زمني يحوي بيت واحدة على الأقل من كل إشارة مجمعة.
2- يتم تقسيم الإطار الواحد إلى حيزات زمنية متساوية يتم توزيع خانات الإشارات عليها بما يتناسب مع معدلات إرسالها.
3- يتم إضافة خانات للتزامن Synchronization Bit وخانات لتمييز الأطر Framing Bit من أجل التحديد الدقيق للأطر والمعلومات في طرف الاستقبال وتسمى هذه الخانات بخانات التحكم Control bits، وكذلك خانات للتنبيه عن الأعطال وغيرها من خدمات خط الاتصال).
4- يجب أن تكون هناك إمكانية لمعالجة التغيرات الزمنية التي تحدث عرضاً لمعدلات الإرسال للإشارات المستقبلة.

وعلى الرغم من ظهور تقنيات متعددة لبناء الإطار فإننا سنركز دراستنا على الأطر ذات الحجم الثابت fixed - frame size. يبين الشكل (5)الشكل العام للإطار.



الشكل (5) مثال على بنية إطار التجميع

بفرض أن الإشارة الأولى ذات معدل 2400 bit/sec. والثانية والثالثة والرابعة 1200 bit/sec.، وأن كل حيز زمني ضمن الإطار يحوي 10 bits على الأقل من كل إشارة وأن C_1 مكونة من 3 bits و C_2 من 2bits، فإننا نستطيع حساب سرعة إرسال خط التجميع Line speed بحساب سرعة إرسال الأطر، ثم عدد الخانات في الإطار الواحد، لنتمكن من حساب سرعة إرسال الخط على الشكل التالي:

إذا أخذنا الإشارة 2 مثلاً فإن الإطار الواحد يحوي منها 10 bits وبما أن سرعة إرسالها 1200 bits/sec. فإنها تحتاج إلى 120 إطار في الثانية. وتكون سرعة إرسال الخط:

$$Line\,speed = \left(\frac{10\,bits}{Time\,slot} \times \frac{5\,Time\,slots}{frame} + \frac{5\,Control\,bits}{Frame}\right) \times \frac{120\,Frames}{\sec} =$$
$$= 6600\,bit/\sec.$$

ولولا وجود خانات التحكم (خانات التزامن والأطر) لكان معدل الإرسال النهائي (سرعة إرسال الخط) 6000 bits/sec.

يوجد بشكل عام صنفين من المجمعات: الصنف الأول ويصمم لتجميع الإشارات ذات السرعة حتى 4800 bit/sec. كحد أعظمي ليصار إلى نقلها بسرعة 9600 bits/sec. حيث تستخدم هذه التقنية من أجل إرسال المعطيات الرقمية في الخطوط الهاتفية وذلك باستخدام موديمات مناسبة. يتم تصميم المجمعات من هذا الصنف لتعمل عند معدلات إرسال 1200,2400,3600,4800,7200,9600 bits/sec. وذلك حسب الحالة والتطبيق وطبيعة قناة الاتصال المستخدمة وغير ذلك.

يقوم الصنف الثاني بتجميع إشارات ذات معدلات أعلى من 9600bits/sec. كأنظمة التجميع الزمني القياسية للإشارات الهاتفية.

2-2 ضبط عملية توزيع الأقنية والخانات

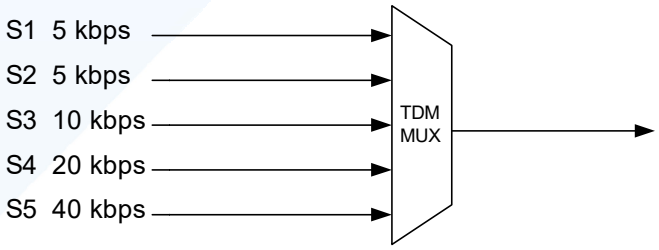
تتعرض المعطيات الرقمية أثناء نقلها في قنوات الاتصال إلى تغير في معدل إرسالها، تبعاً للظروف والشروط التي تحكم هذه القنوات. فإذا رغبنا بتجميع أربع قنوات معدل إرسال كل منها 2400

bits/sec. لنشكل قناة مجمعة بمعدل 9600 bits/sec. ولكن لسبب أو لآخر فإننا قد نستقبل واحدة أو أكثر من هذه القنوات على دخل المجمع (الذي يبعد مسافة معتبرة عن منابع المعلومات) بمعدل مختلف عن المعدل الاسمي زيادة أو نقصاناً فقد يكون مثلاً 2410 bits/sec. أو 2390 bits/sec. تؤدي هذه التغيرات في طرف استقبال القناة المجمعة إلى فقدان التوقيت الصحيح لورود الخانات وبالتالي فقدان تزامن الخانات وفقدان تزامن الأطر وبالتالي الحصول على معلومات مشوهة.

لاوجود لهذه المشكلة في الأنظمة ذات الإرسال المتزامن حيث تعمل موقتات المجمعات ذات المستوى الأخفض بشكل مترابط مع موقتات المجمعات ذات المستوى الأعلى، وبالتالي فإن تغيرات التسجيل والقراءة في المستويين تكون متزامنة. ونقول عند ذلك بأن **نظام التجميع متزامن أو أن المجمعات متزامنة** Synchronous Multiplexers. يتم ضبط الموقتات جميعها باستخدام موقت واحد مركزي ذو دقة جيدة ومناسبة لعمل النظام. ونقول في الحالة الأخرى عندما تعمل موقتات كل مستوى بشكل منفصل عن موقتات المستوى الآخر بأن **النظام غير متزامن** وأن المجمعات غير متزامنة Asynchronous Multiplexers. وفي هذه الحالة فإن ضبط التزامن تتم باستخلاص نبضات التزامن من الإشارة المستقبلة كما مر معنا سابقاً. وطالما أن معدلات الإرسال تتعرض لتغيرات زمنية نتيجة لاختلاف أوساط النقل والظروف المحيطة من حرارة ومقامة الأوساط الناقلة وغير ذلك، فإننا قد نستقبل الأطر وبالتالي محتويات هذه الأطر من البيتات مزاحة بشكل ما عن زمنها المفترض. وهنا أيضاً لابد من اتخاذ الإجراءات المناسبة لمنع القراءة الخاطئة لهذه الأطر ويتم ذلك بطرق متعددة.

تدريب (1)

ارسم إطار التجميع للمجمع المبين في الشكل



أسئلة التقويم الذاتي (1)

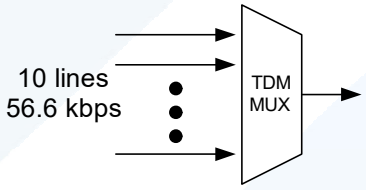
1. لماذا نلجأ إلى عملية تجميع الإشارات؟
2. حدد مفهوم إطار التجميع.
3. بماذا يختلف التجميع بالخانات عن التجميع بالمحارف؟

4. ماهي الشروط التي يجب توافرها لكي تكون عملية التجميع صحيحة؟
5. ماهي سرعة إرسال الخط؟

تدريب (2)

ماهو معدل معدل الإرسال على خرج المجمع المبين في الشكل إذا لم يتم استخدام أي بيتات إضافية في أي إطار؟

كم يصبح هذا المعدل إذا تمت إضافة 2b لكل إطار من أجل تزامن الأطر؟(التجميع يتم بطريقة كلمة بعد كلمة)

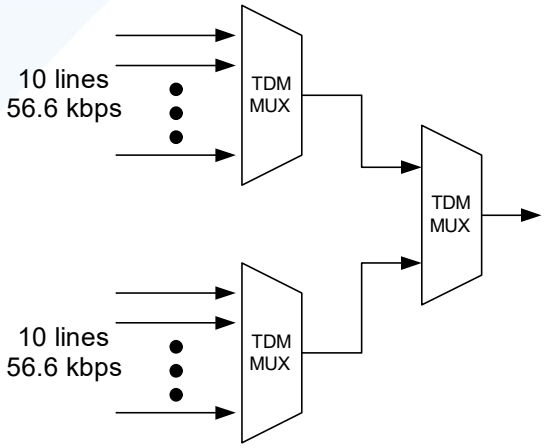


تدريب (3)

كم يصبح المعدل في المثال السابق لو كان التجميع يتم بطريقة خانة بعد خانة مع بقاء نفس الشروط السابقة؟

تدريب (4)

ماهو معدل الإرسال على خرج المجمع النهائي إذا تم إضافة 2b لكل لإطار في المستوى الأول و 1b لكل إطار في المستوى الثاني وكان زمن الإطار في المستوى الثاني مساو لزمن الإطار في المستوى الأول؟(التجميع يتم بطريقة كلمة بعد كلمة)

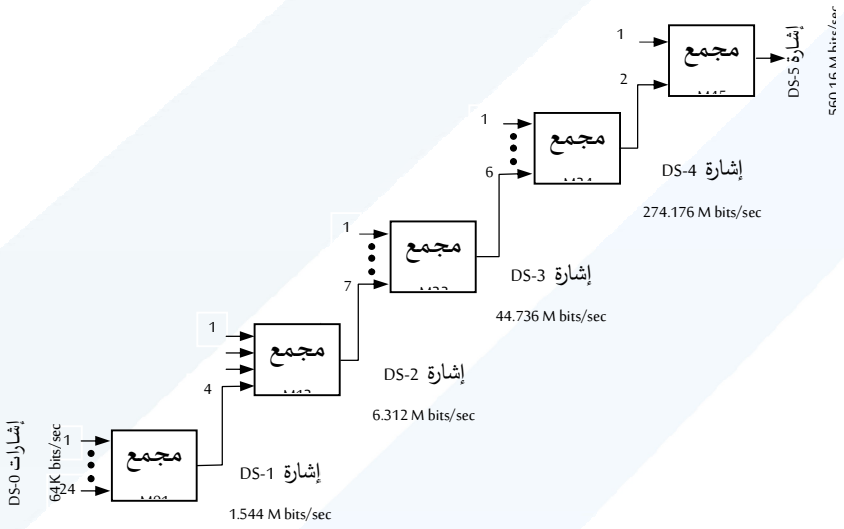


3- أنظمة تجميع القنوات الهاتفية زمنياً

1-31.1.1 البنية الرقمية الهرمية في شمال أمريكا واليابان

DIGITAL HIERARCHY FOR NORTH AMERICA & JAPAN

يبين الشكل (12) هذه البنية الهرمية وهي تعتمد على تجميع 24 قناة هاتفية (أو مايكافئها) ضمن

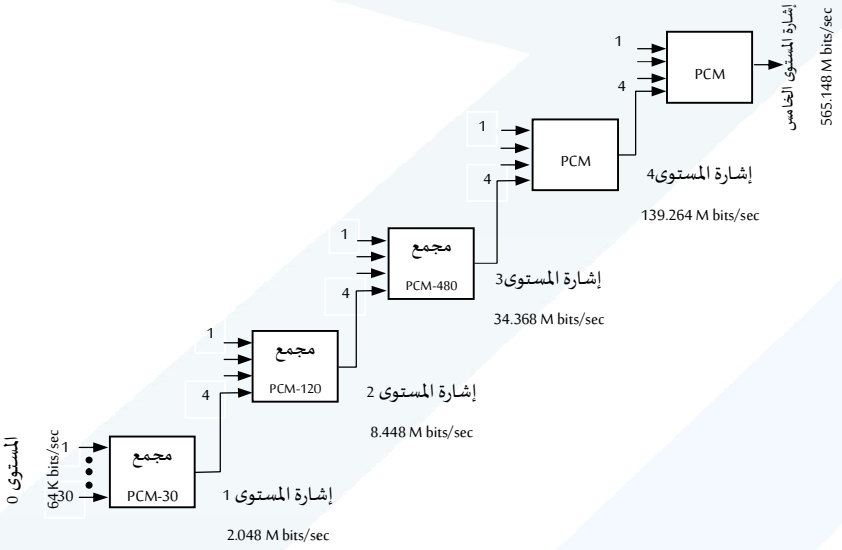


الشكل(12): البنية الهرمية الرقمية لشمال أمريكا واليابان

إطار واحد في المستوى الأول الذي يسمى نظام T1، ثم تجميع أربعة مخارج أنظمة T1 في مجمع المستوى الثاني، أي نظام T2 وكذلك سبعة مخارج T2 في مستوى التجميع الثالث لتشكل نظام T3، وبعدها تجميع ستة مخارج T3 لتشكل نظام T4، ويمكن المتابعة بعدها لتشكيل T5 من تجميع مخرجي نظامين T4. وسنقوم بشرح هذه الأنظمة وطرق تشكيل إطاراتها الزمنية الكلية وحساب معدلات الإرسال على خرجها.

2-3 البنية الهرمية لنظم تجميع الإشارات الرقمية وفق معايير CCITT

لقد قامت الهيئة العالمية للمقاييس المتعلقة بالهاتف والبرق CCITT بوضع مواصفات ومتطلبات لنظام عالمي آخر غير النظام المطبق في شمال أمريكا واليابان. يعتمد أيضاً على هيكلية تبنى انطلاقاً من القنوات الهاتفية المرمزة بطريقة PCM بمعدل 64 Kbit/sec. ولكنه يقوم في المستوى الأول منه بتجميع 30 قناة هاتفية (مهما كانت طبيعة المعلومات التي تنقل فيها). ويقوم المستوى الثاني بتجميع أربعة قنوات كل منها تمثل خرجاً لنظام يعمل وفق معايير المستوى الأول.



الشكل(22): البنية الهرمية وفق توصيات CCITT

أما المستوى الثالث فيقوم بتجميع أربع قنوات كل منها تمثل خرجاً لنظام يعمل وفقاً لمعايير المستوى الثاني. وهكذا أيضاً فإن المستوى الرابع يقوم بتجميع مخارج أربعة أنظمة تعمل وفق معايير المستوى الثالث. ويبين الشكل (22) المخطط الصندوقي للبنية الهرمية المذكورة.

أسئلة التقويم الذاتي (2)

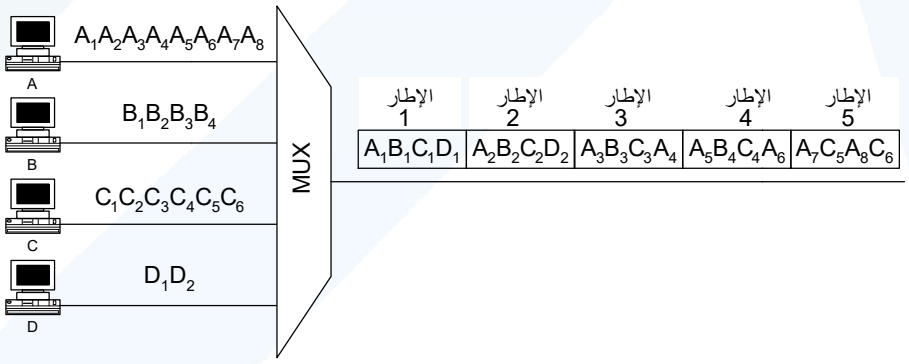
1. لماذا تختلف معدلات الإرسال على خرج المجمعات عن مجموع معدلات القنوات المجمعة؟
2. ماهي سرعة إرسال الخط (معدل الإرسال) على خرج كل مستوى تجميع في النظامين المتبعين عالمياً؟
3. اشرح بنية إطار التجميع لنظام الحامل T1.
4. ماهي الإجراءات المتبعة في كل مستوى تجميع في النظام المتبع في شمال أمريكا للمحافظة على إمكانية توليد إشارة التزامن في طرف الاستقبال؟
5. كم قناة هاتفية يمكن تجميعها في كل مستوى تجميع من مستويات النظامين العالميين؟
6. كيف يتم تأمين العمل المشترك والمتبادل بين أجهزة النظامين العالميين؟
7. لماذا يتم اختيار إطار التجميع في المستوى الأول بطول زمني $125\mu s$؟
8. هل يمكن استخدام المجمعات المذكورة لتجميع إشارات هاتفية رقمية مع إشارات معطيات أخرى؟

4- التجميع زمنياً بالطريقة الاحصائية Statistical time division multiplexing (STDM)

كما تبين معنا سابقاً فإن تجميع الاشارات الرقمية باستخدام TDM يتم بتخصيص حيز زمني ثابت ضمن إطار على الأقل لكل إشارة على دخل المجمع. وهذا يؤدي في كثير من الأحيان إلى عدم إشغال هذا الحيز وذلك عند عدم توفر إشارة دخل. مما ينقص كفاءة استخدام هذا النوع من المجمعات.

يتم التغلب على هذا الأمر باستخدام كل حيز زمني لايتم شغله من أجل إرسال أجزاء من إشارات أخرى. حيث تتضمن المجمعات إمكانات معالجة ذكية تجعل من الممكن تمييز المداخل الشاغرة واستخدامها لنقل إشارات أخرى.

يتم تشكيل إطار التجميع في مثل هذا النوع بفحص المداخل بشكل متكرر، لمعرفة وجود أو عدم وجود إشارات على المدخل، وذلك باستخدام خوارزميات تستطيع تحديد المداخل الأكثر مشغولية لتخصيصها بإمكانية استخدام المداخل الشاغرة. ويبين الشكل(31) كيفية تشكيل الأطر في هذه الطريقة.



الشكل (31)

مخطط يبين كيفية تشكيل الأطر في STDM

أسئلة التقويم الذاتي (3)

1. لماذا نستخدم التجميع الاحصائي؟
2. هل يمكن استخدام هذا النوع من التجميع لتجميع إشارات الزمن الحقيقي؟
3. كيف يتم تشكيل الأطر في هذا النوع من التجميع؟

تدريب(6)

كم طرفية يمكن أن يتم وصلها إلى مجمع خرجه متوافق مع T1 إذا كان معدل الإرسال للطرفية الواحدة 16kbps؟