DATA TRANSMISSION

Lecture Notes

Dr. Professor, J.M. Khalifeh

قسم المعلوماتية

الوحدة الرابعة

تحويل الإشارات من تناظرية إلى رقمية والعكس

Analog-To-Digital and Digital-To- Analog Conversion

المحاضرة معتمدة على: تراسل المعطيات، جمال محمد خليفة، كتاب جامعي، جامعة القدس المفتوحة 2008

1. مقدمة:

ومن المعروف لدينا أن شبكات تراسل المعطيات تعنى بنقل المعلومات بشكلها الرقمي سواءً أكانت بطبيعتها الأصلية رقمية أو تناظرية. العالم من حولنا تناظري بطبيعته فالصوت الذي نسمعه، والصورة التي نراها، والقيم التي نقيسها لتقدير كميتها أو للتحكم بها، كلها تناظرية بطبيعتها، ويعبر عنها بإشارات كهربائية تناظرها في الزمن. وكي تستطيع شبكات تراسل المعطيات نقل المعلومات الممثلة بإشارات تناظرية لابد من تحويل هذه الإشارات من تناظرية إلى رقمية، باستخدام ما نسميه رقمنة Digitizing الإشارات التناظرية، بحيث تستطيع الأجهزة الرقمية التعامل معها ومعالجتها بهدف نقلها بالشكل الأمثل، ومن ثم إعادتها في طرف الاستقبال إلى شكلها التناظري الأصلي، أو إلى شكل قريب منه يعبر عنه ضمن حدود مقبولة من الخطأ، تحدده طبيعة الأجهزة المستقبلة وحساسيتها وغير ذلك من المحددات التي تحدثنا عنها في الوحدة السابقة.

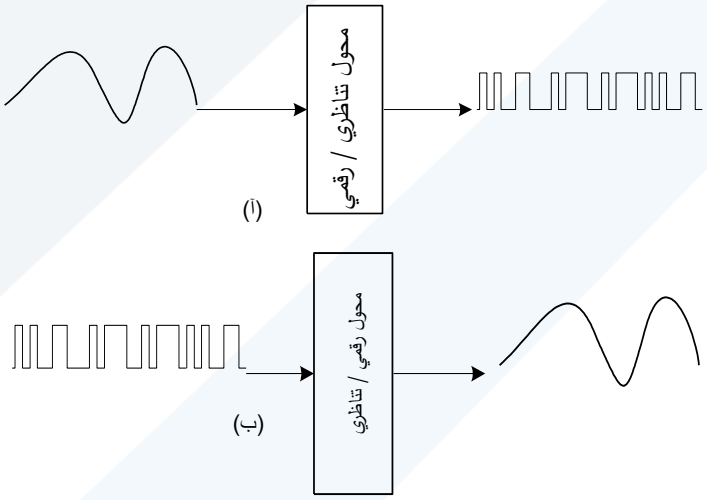
تعتمد عملية الرقمنة هذه في جوهرها على تحويل قيم معينة للإشارة التناظرية يتم أخذها ضمن شروط تجعلها تعبر عن هذه الإشارة بشكل كاف، إلى أرقام ثنائية bits. وتسمى هذه القيم بعينات Samples الإشارة، وتسمى عملية تحديد هذه العينات وعددها وشروط أخذها – بحيث تعبر عن الإشارة – بعملية أخذ العينات Sampling process.

وسنهتم في هذه الوحدة بعملية أخذ العينات للإشارة التناظرية، واسترجاع هذه الإشارة، والخطأ الذي يمكن أن ينجم عن ذلك، والدارات الكهربائية التي يمكن أن تستخدم في ذلك، هذا إضافة إلى الأسس الرياضية لعملية أخذ العينات واسترجاعها، معتمدين على تمثيل الإشارة في المجالين الزمني والترددي، باستخدام تحويلات فوريه المباشرة والعكسية، وذلك دون أن نقدم لك عزيزي الدارس شرحاً لتحويلات فوريه هذه، انطلاقاً من كونها أسساً رياضية نظرية جرى تعريفك بها في مساق سابق. ومن الضروري العودة إليها لتذكر أهم خواصها وتطبيقاتها، بما يجعل الطريق أمامك مفتوحاً لفهم ما سيأتي من فقرات هذه الوحدة.

وسنقوم في هذه الوحدة بشرح عملية تحويل الإشارات من تناظرية إلى رقمية Analog to Digital Conversion ومن رقمية إلى تناظريةDigital to Analog Conversion .

ويفهم في بعض الأحيان من تحويل الإشارات الرقمية إلى تناظرية إجراء بعض أنواع المعالجة كالتعديل الرقمي لتحويلها إلى شكل تناظري مناسب لقنوات الاتصال التناظرية، بحيث يتم تحميل إشارة المعطيات الرقمية على إشارة تناظرية بما يمكنها من المرور عبر الدارات التناظرية بكفاءة عالية. وعلى الرغم من صحة هذا المفهوم إلا أننا لن نتطرق إليه في هذه الوحدة على أن نعود إليه في الوحدات التالية عند الحديث عن التعديل الرقمي للحامل الجيبي وعمل وخواص المودیمات.

وسنتناول في هذه الوحدة عملية التحويل من إشارة تناظرية إلى إشارة رقمية كما في الشكل(1–آ) وكذلك استعادة الإشارة التناظرية من الإشارة الرقمية والتي يمكن أن نعبر عنها في الشكل (1–ب).



الشكل(1): تحويل الإشارة

1–2 أهداف الفصل:

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

1. توضح دور نظرية أخذ العينات في تحويل الإشارات من تناظرية إلى رقمية وبالعكس
2. شرح معدل نايكويست وأهميته في تراسل المعطيات
3. تميز بين أخذ العينات العملي والمثالي
4. تشرح أهمية ودور تحويل الإشارات في تراسل المعطيات
5. تبين الأسس النظرية لتحويل الإشارات
6. تبين علاقة طرق التحويل وإجراءاته بخصائص أنظمة وأجهزة تراسل المعطيات
7. تحدد الخطوات والطرق المتبعة في تحويل الإشارات
8. تبين خصائص بعض الدارات والأجهزة المستخدمة في تحويل الإشارات

2- أهمية ودور تحويل الإشارات في تراسل المعطيات

تتم عملية تراسل المعطيات بأنواعها وعلى اختلاف محتوياتها إما على شكل إشارات تناظرية، أو على شكل إشارات رقمية. وكما بينا سابقاً فإن الإشارة التناظرية هي التمثيل الكهربائي للمعلومات والمعطيات، والذي يكون على شكل إشارات كهربائية مستمرة في القيمة. وقد أوردنا عليها أمثلة كإشارة الصوت والصورة . أما الإشارة الرقمية فهي التمثيل الكهربائي للإشارة التي تمثل تتالي سلسلة من الأصفار والواحدات بشكل يعبر عن محتوى معين من المعطيات أو المعلومات. وقد أوردنا عليها أمثلة كإشارات الحاسوب التي هي بطبيعتها رقمية.

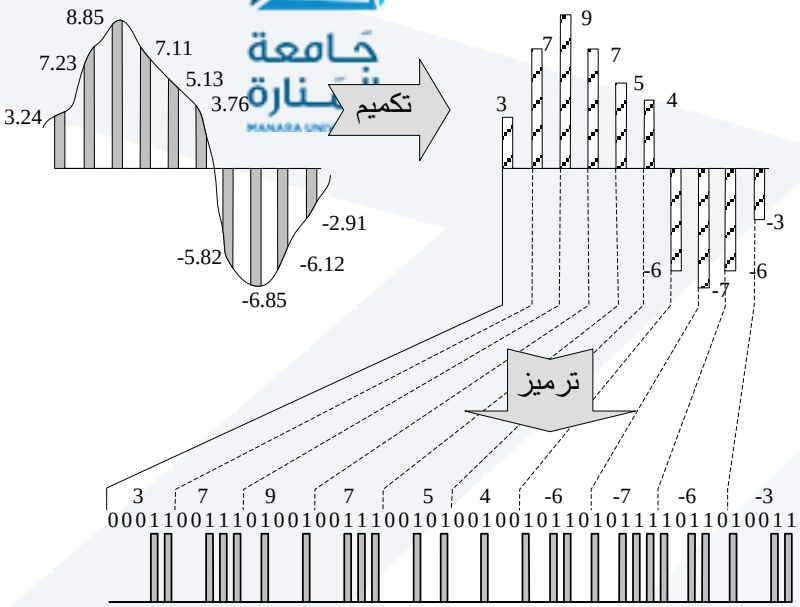
ومن البديهي القول أنه يتم تراسل المعلومات والمعطيات الرقمية في قنوات ذات طبيعة رقمية، أي مخصصة بطبيعتها ومواصفاتها لنقل الإشارات الرقمية. بينما يتم نقل الإشارات التناظرية في قنوات تناظرية مخصصة بطبيعتها ومواصفاتها لنقل مثل هذه الإشارات بكفاءة عالية. ويتم هذا النوع من التراسل في كلا النوعين دون تحويلات إضافية للإشارات تغير من كونها رقمية أو تناظرية.

والآن ماذا لو كان المطلوب استخدام قنوات رقمية لنقل إشارات تناظرية أو العكس؟ طبيعي أن تكون الإجابة أنه يجب تحويل هذه الإشارات إلى الشكل المناسب، أي تحويل الإشارات الرقمية إلى إشارات تناظرية لنقلها عبر القنوات التناظرية، وتحويل الإشارات التناظرية إلى إشارات رقمية لإرسالها عبر قنوات رقمية.

ليست عملية التراسل هي السبب الوحيد الذي يدفعنا إلى تحويل الإشارات من تناظرية إلى رقمية ومن رقمية إلى تناظرية، فالعالم بطبيعته التناظرية من حولنا وتطور التقنيات الرقمية وسهولة استخدامها واتساع انتشارها وكفاءتها العالية، يجعل من الطبيعي تحويل الإشارات التناظرية التي تمثل القيم الفيزيائية المعبرة عن الحوادث والعمليات الفيزيائية كالصوت وانعكاسات الألوان والحرارة والرطوبة وغير ذلك والتي تتولد بشكل طبيعي من العالم الذي نعيشه، إلى إشارات رقمية يسهل التعامل معها ومعالجتها وإرسالها عبر القنوات الرقمية.

كما تحتاج هذه الإشارات بعد استقبالها في معظم الأحيان إلى إعادتها إلى شكل يشبه الشكل الذي كانت عليه قبل عملية التحويل كي يتم عرضها والإحساس بها والتعامل معها عبر حواسنا التي تتحسس للإشارات الطبيعية.

وهناك الكثير من التطبيقات التقنية التي تحتاج إلى تحويل الإشارة في اتجاه واحد أو في اتجاهين، فالتسجيل الرقمي للصوت والصورة يجعل من الممكن استخدام تقنيات أكثر كفاءة لتسجيل الصوت والصورة، وهذا يتطلب تحويلاً لإشارات الصوت والصورة إلى إشارات رقمية ليتم تسجيلها بالشكل الرقمي. أما حين استعادة هذه الإشارات لسماعها أو لرؤيتها فإن ذلك يتطلب تحويلاً معاكساً يؤدي إلى استعادة الإشارات التي تمت رقمنتها إلى شكلها التناظري. وهناك أمثلة أخرى كثيرة مثل الإرسال الرقمي للصوت والصورة سواء في قنوات تراسل المعطيات (عبر الانترنت مثلاً) أو في الاتصالات الفضائية والاتصالات عبر المقاسم الهاتفية وغير ذلك... إن تخزين صورة ما على وسائط تخزين الحاسب يتطلب تحويل هذه الصورة إلى الشكل الرقمي، وتخزينها رقمياً كملف يحتوي أصفاراً و واحدات تعبر عن الألوان وشدتها وكثافتها ومستوى الإضاءة وغير ذلك. ويتيح ذلك إجراء المعالجة الرقمية للملف المخزن بهدف تعديله أو تحديثه باستخدام برامج ذات إمكانات مناسبة.



الشكل(2) تحويل عينات الإشارة التناظرية إلى رموز ثنائية(بيتات)

ويمكننا بشكل عام توضيح جوهر عملية التحويل التناظري الرقمي كما يلي:

يتم بعد أخذ العينات من الإشارة التناظرية تحويل كل عينة إلى مجموعة من الرموز الثنائية التي تمثلها، بحيث تشغل هذه الرموز نفس الفترة الزمنية التي كانت مخصصة للعينة الواحدة، كما في الشكل(2). ويمكن بعد ذلك تحويل هذه الرموز الثنائية إلى أي من اشكال ترميز الخط باستخدام طرق التشوير التي جرى الحديث عنها سابقاً وذلك حسب التطبيق المستخدم والقناة المستخدمة لتراسل هذه الرموز. إن الرموز التي حصلنا عليها هي الإشارة الرقمية التي تمثل الإشارة التناظرية التي قطعناها سابقاً، ويمكن التعامل معها بالطرق التي تسمح بها التقنيات الرقمية من معالجة وإرسال وترشيح رقمي وتخزين رقمي ويمكن في أثناء كل هذه العمليات استخدام الحاسب من أجل ذلك باعتبار أن الحاسب يتعامل مع معطيات رقمية فقط.

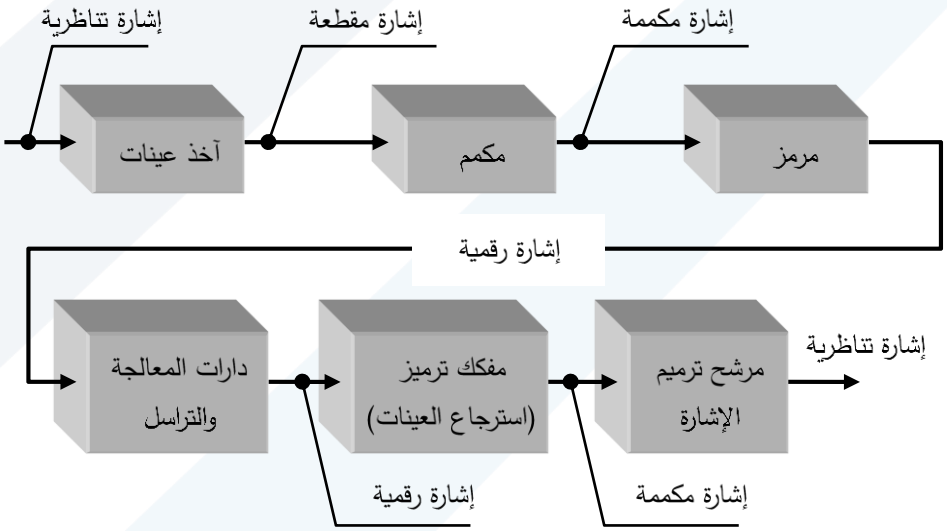
هناك الكثير من الحسنات تدفعنا إلى تحويل إشارات المعلومات من شكلها التناظري إلى الشكل الرقمي نذكر منها:

- إمكانية إعادة توليد وتشـــكيل الرموز الرقمية كلما تخامدت أثناء الإرســـال وذلك من خلال اســـتخدام مكررات Repeaters تقوم باستقبال الإشارات وتضخيمها وتخليصها من الضجيج المتراكم عليها وباختصار إعادتها إلى الشكل الأساسي الذي كانت عليه قبل إرسالها في القناة مباشرة ومن ثم إرسالها ثانية إلى مسافة أبعد.
- إمكانية اســتخدام الدارات الرقمية من أجل إجراء جميع عمليات المعالجة الرقمية للإشــارة Digital Signal Processing من تعديل وتشوير وكشف وترشيح رقمي Digital Filtering.
- امكانية استخدام حزم برمجية معينة أثناء القيام بالتعامل مع هذه الإشارات الرقمية في أي مرحلة من مراحل المعالجة أو الإرسال بدلاً من استخدام دارات فيزيائية وهذا يقلل كثيراً من كلفة التجهيزات المخصصة لذلك.
- إنقاص الضجيج الذي يعيق الاستقبال الصحيح للإشارات باختيار طرق الترميز المناسبة تتصف الإشارات الرقمية بأداء أفضل من الإشارات التناظرية في الأوساط المضجة Noisy Media
- إمكانية ضغط المعطيات Data Compression الرقمية وبالتالي الاستفادة القصوى من عرض الحزمة المتوفر للإرسال.
- إمكانية تشفير المعطيات الرقمية data encryption بما يجعل كشف محتواها الحقيقي صعباً دون امتلاك مفتاح التشفير وهذا ما يجعل الإشارات الرقمية تتصف بسرية Security أكبر من مثيلاتها التناظرية أثناء إرسالها.
- إمكانية تطوير وترقية Upgradeability الأنظمة الرقمية بسـهولة، وبالتالي تحديث هذه الأجهزة والأنظمة بكلف أقل بما لا يقاس مقارنة مع الأنظمة التناظرية.

- سهولة التحكم والمراقبة للأنظمة الرقمية وسهولة إدارة مكوناتها باستخدام حزم برمجية معينة.

وبسبب هذه الميزات فإن عملية تحويل الإشارات التناظرية إلى إشارات رقمية اكتسبت أهمية كبيرة في شبكات تراسل المعطيات ولكن هذه الأهمية لا تلغي في أي حال من الأحوال أهمية الإشارات التناظرية طالما أن العالم الحقيقي المحيط بنا والذي ينتج قيماً وكميات فيزيائية تمتاز باستمراريتها بالزمن وبالتالي فإن أفضل تعبير كهربائي عنها هو الإشارات التناظرية التي تناظر هذه القيم والكميات في تغيراتها عبر الزمن. ونضطر في كثير من الأحيان بعد تحويل الإشارات التناظرية إلى إشارات رقمية أن نعود بعد معالجتها وإرسالها في الأنظمة والقنوات الرقمية واستقبالها أن نعيدها مرة أخرى إلى طبيعتها التناظرية. سيما وأن الكثير من التجهيزات الموجودة حالياً في التطبيقات التقنية مازالت بطبيعتها تناظرية. كما أننا نحتاج عند تركيب الإشارات التناظرية كما في الأصوات والصور المولدة بشكل آلي إلى تحويل سلسلة من المعطيات الرقمية إلى قيم تناظرية.

يمكن تمثيل المراحل التي تتم من خلالها عملية تحويل الإشارة التناظرية إلى إشارة رقمية ومن ثم استعادتها كإشارة تناظرية مرة أخرى بالمخطط الصندوقي المبين في الشكل(3).



الشكل(3): المراحل الأساسية لعملية إرسال إشارة تناظرية بشكل رقمي واسترجاعها

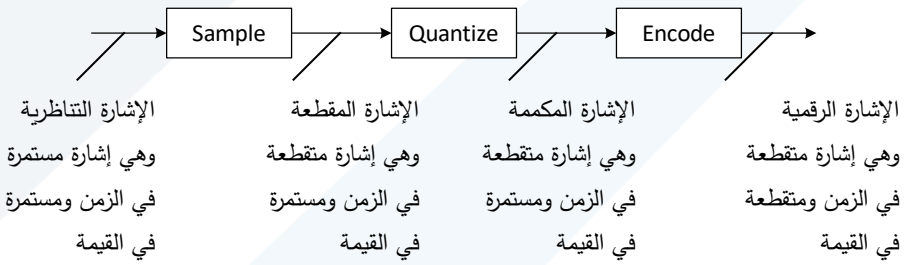
أسئلة التقويم الذاتي(1)

1. ماهي مراحل تحويل الإشارة التناظرية إلى رقمية ومن ثم استعادتها؟
2. ما أهمية تحويل الإشارات الرقمية إلى تناظرية؟
3. ماهي ميزات الإرسال الرقمي؟
4. 3- تكميم عينات الإشارة

2- الدور المميز لنظرية أخذ العينات وأهميته

يمكننا القول بأن الدور المميز لنظرية أخذ العيّنات في تقنية إرسال المعلومات يكمن بإتاحتها إمكانية استبدال الإشارة التمثيلية ذات الطيف المحدود، بسلسلة عيّنات مأخوذة منها دون أي فقد في المعلومات المتضمنة في الإشارة. ويتم أخذ هذه العيّنات دورياً وبتردد محدد ، بحيث نستطيع استعادة الإشارة من عيناتها.

إن عملية أخذ العينات هي الأساس ونقطة الانطلاق لتحويل الإشارات التمثيلية إلى إشارات رقمية، ومن هنا اكتسبت أهميتها الكبيرة في نظرية وتقنية إرسال المعطيات في قنوات الاتصال. وسنرى لاحقاً أنه لتحويل إشارة تناظرية ما إلى إشارة رقمية فإن أو ما نقوم به هو تقطيع هذه الإشارة أي استبدالها بعيناتها، ثم تحديد قيم هذه العينات بمستويات ذات قيم محددة (أي ذات مستويات كمية محددة) وهذا ما يسمى التكميم Quantizing بحيث يسهل قراءة هذه العينات كقيم يتم تحويلها إلى أرقام ثنائية تعبر عن هذه العينات وتمثل الإشارة الرقمية الممثلة للإشارة التناظرية. ويمثل الشكل(4) مخططاً بسيطاً لمراحل تحويل الإشارة التناظرية إلى إشارة رقمية.



الشكل(4): مخططً تمثيلي لمراحل تحويل الإشارة التناظرية إلى إشارة رقمية.

ونظراً لأهمية هذه العملية فإننا سنقوم في الفقرات التالية بتوضيح معناها، وكيفية القيام بها، وكيفية وشروط تمثيل الإشارة بعيناتها، واستعادة هذه الإشارة إلى طبيعتها التناظرية الأصلية.

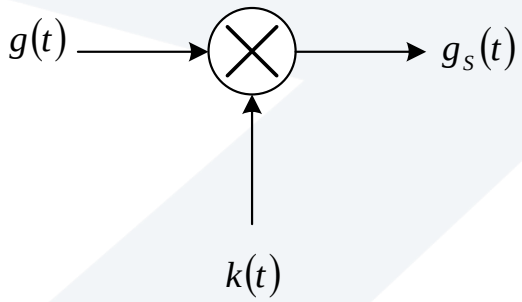
3- مفهوم أخذ العينات واسترجاعها

تخيل اننا أمررنا الإشارة التناظرية المراد تقطيعها عبر مفتاح يقوم بالفتح والإغلاق بشكل منتظم، وبمعدل محدد، فإن الإشارة التي نحصل عليها ماهي إلا الإشارة المقطعة، بشكل نظامي، أي عينات إشارة التناظرية. وهنا يمكنا التمييز بين الحالة المثالية التي يكون فيها زمن الإغلاق متناهياً في الصغر إلى قيمة الصفر، أي الحالة التي تتم قيادة هذا المفتاح بإشارة عرضها متناهٍ إلى الصفر، وهذه هي الحالة المثالية. وبين الحالة التي يكون فيها هذا الزمن محسوساً، وهي الحالة العملية.

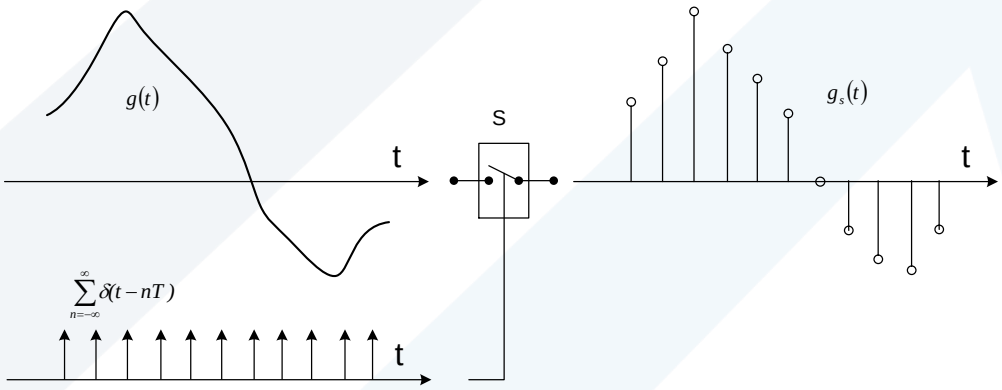
تسمى الإشارة التي تقود المفتاح بإشارة التقطيع Sampling signal، وتتخذ أشكالاً عديدة حسب التطبيق المستخدم، ويختلف تمثيلها في الحالة المثالية (النظرية) عن الحالة العملية، و لابد كي نفهم الأسس الرياضية لعملية التقطيع من التعرف على الإشارات المثالية والتي نسميها نبضات ديراك، التي هي عبارة عن مفهوم رياضي لإشارة مثالية غير موجودة عملياً بشكلها الحقيقي. وعلى الإشارات العملية المستخدمة لأخذ العينات من إشارة تناظرية. نعبر رياضياً عن عملية التقطيع بشكل عام بضرب الإشارة المراد تقطيعها $k(t)$ بإشارة التقطيع $g(t)$، لنحصل على الإشارة $g_S(t)$

$$g_s(t) = k(t).g(t)$$

وذلك كما في الشكل(5).



الشكل (5): التمثيل الرياضي لعملية أخذ العينات

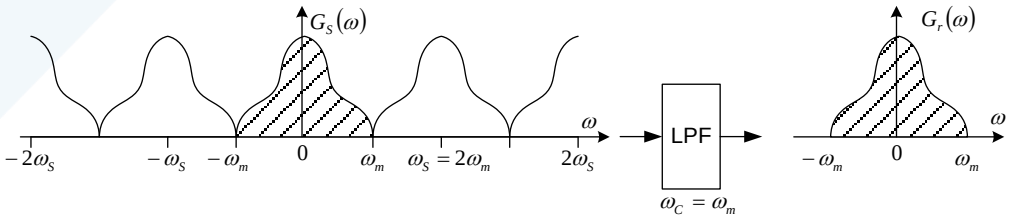


الشكل (6): تقطيع الإشارة التناظرية باستخدام نبضات تقطيع مثالية

3. 2 استرجاع الإشارة من عيناتها المثالية

بالعودة إلى طيف الإشارة المقطعة فإننا نلاحظ كما ذكرنا أنه نسخ متكررة من طيف الإشارة التناظرية الأصلية قبل التقطيع. وبالتالي فإننا نستطيع استخلاص هذا الطيف، أي استعادة الإشارة التناظرية نفسها إذا تمكنا من فصل هذا الطيف على حدة.

وحقيقة الأمر أننا نستطيع ذلك بإمرار الإشارة المقطعة عبر مرشح تمرير تردد منخفض Low Path Filter (LPF) يمرر فقط ذلك الجزء من طيف الإشارة المقطعة المشابه للإشارة الأصلية $G_r(\omega) \equiv G(\omega)$ ويمنع مرور جميع مركبات الطيف الأخرى. وهذا يقتضي أن يكون تردد قطع هذا المرشح f_C مساوٍ لأعلى تردد موجود في طيف الإشارة الأصلية $f_C = f_{\max}$ ونسمي هذا المرشح بمرشح الترميم reconstructing Filter.



الشكل (7): استعادة طيف الإشارة الأصلية من طيف الإشارة المقطعة

تدريب(1):

ما هو تردد نايكويست المناسب لتقطيع كل من الإشارات التالية:

آ- $g(t)=3\cos(5000\pi t+\pi/4)+3\sin(2000\pi t-\pi/8)$

ب- $g(t)=4\cos(5000\pi t+\pi/4).\sin(2000\pi t-\pi/8)$

لاحظ أننا نختار دائماً تردد التقطيع أعلى من ضعف أعلى تردد في طيف الإشارة وبفارق لا بأس به نسميه حيز الأمان والسبب في وجوده هو ضرورات تقنية ، حيث أنّ المرشح اللازم لاستعادة الإشارة من عيّناتها في حال كون تردد التقطيع مساوٍ لضعف أعلى تردد في طيف الإشارة هو مرشح ذو خواص مثالية (لها شكل نبضة مستطيلة) وهذا مستحيل في الحياة العملية .

إن اختيار تردد التقطيع أعلى من ضعف أعلى تردد في طيف الإشارة يسمح كما ذكرنا باستخدام مرشحات عملية أثناء عملية الاستعادة وكلما كبر حيّز الأمان الترددي كلما تساهلنا في الشروط الواجب توفرها في منحني الاستجابة الترددي للمرشح المستخدم. لذلك نختار في الحياة العملية حلاً وسطاً يحقق لنا بأن واحد معاً توفيراً في الحزمة الترددية المستخدمة وسهولة في تصميم مرشح الاستعادة (أو ما يسمى مرشح الترميم).

تدريب (3):

لدينا الإشارة:

$$g(t)=3\cos(400\pi t+\pi/4).\cos(300\pi t-\pi/2)$$

آ- ما هو الشرط الذي يجب أن يحققه تردد قطع مرشح الترميم كي يكون بإمكاننا استخدامه لاستعادة الإشارة g(t) من عيناتها المأخوذة بمعدل أكبر بمرة وربع من معدل نايكويست.

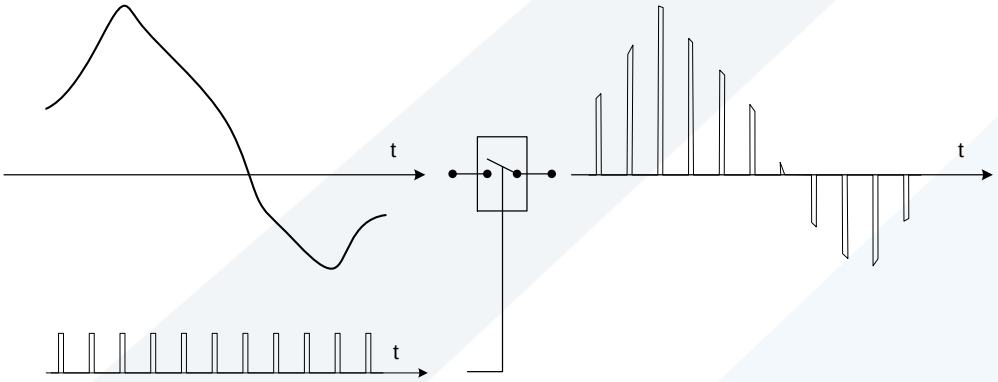
ب- ما هو تردد المركبات الطيفية التي تشكل الإشارة المستعادة إذا تم التقطيع بمعدل مساوٍ لـ 90% من معدل نايكويست.

إنّ كل ما قيل سابقاً ينطبق على حالة التقطيع المثالية، فإيجاد سلسلة نبضات ديراك من الناحية العملية هو أمر مستحيل، لذلك نلجأ في الحالة العملية إلى استخدام سلسلة دورية من النبضات الضيقة جداً كما في الشكل (8). وكلما كان عرض النبضة ضيقاً كلما اقتربنا من الناحية المثالية وكلما كان ذلك أفضل. وقد قدمت تقانة العناصر الإلكترونية دارات يمكنها توليد هذه النبضات، وكذلك دارات يمكنها الاستجابة لترددات التقطيع بسرعة عالية وأداء متميز. وتسمى عملية أخذ العينات من الإشارة التناظرية باستخدام الدارات الإلكترونية المناسبة بأخذ العمليات العملي. وسنرى الآن أنه يمكن استعادة الإشارة من عيّناتها العملية ذات العرض المحسوس إذا كان معدّل أخذ العيّنات العملية مساوٍ على الأقل لمعدّل نايكوست.

إنّ عملية أخذ العيّنات العملية ممثلة في الشكل (9) وهي عبارة تمرير الإشارة كما ذكرنا عبر مفتاح إلكتروني يفتح ويغلق بانتظام بتردد مساوٍ لتردد التقطيع الذي يتم اختياره بما يناسب كل إشارة. وهذه العملية يمكن تمثيلها رياضياً بضرب الإشارة g(t) بسلسلة نبضات التقطيع k(t)

إنّ الطيف الأساسي للإشارة موجود على جانبي التردد ω=0 ويمكن استرجاع الإشارة الأصلية بتمرير الإشارة المقطعة، كما في الحالة المثالية، من خلال مرشح تردد منخفض.

وهنا أيضا وكما في الحالة المثالية نستطيع استرجاع الإشارة الأصلية من عيناتها المأخوذة منها بتردد مساوٍ أو أكبر من تردد نايكويست، وذلك بإمرار الإشارة المقطعة عبر مرشح تمرير تردد منخفض Low Path Filter (LPF) يقوم بتمرير ذلك الجزء من طيف الإشارة المقطعة المشابه للإشارة الأصلية $G_r(\omega) \equiv G(\omega)$ ويمنع مرور جميع مركبات الطيف الأخرى. وهنا يشترط أيضاً أن يكون تردد قطع هذا المرشح f_C مساوٍ لأعلى تردد موجود في طيف الإشارة الأصلية $f_C = f_{\max}$ ويسمى أيضاً بمرشح الترميم reconstructing Filter.



الشكل (9): التقطيع باستخدام نبضات تقطيع عملية

تدريب (4):

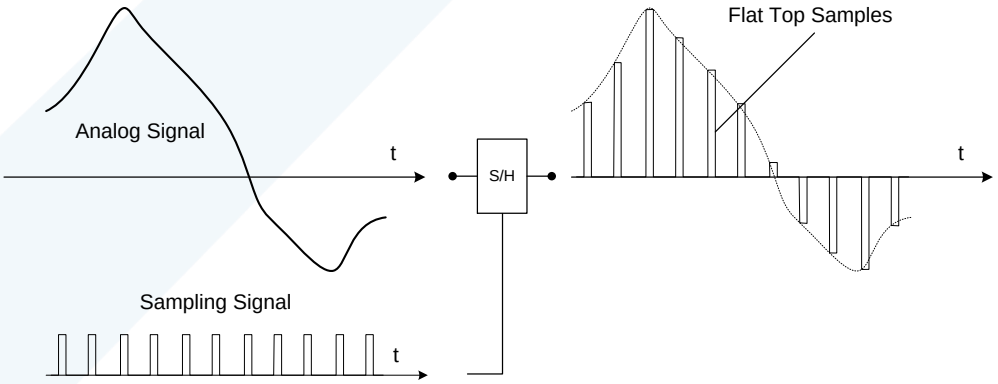
تم تقطيع الإشارة:

$$g(t) = 3\cos(400\pi t + \pi/4) + 2\cos(300\pi t - \pi/2)$$

بتردد مساوٍ لمرة ونصف تردد نايكويست، وذلك باستخدام إشارة تقطيع عملية بحيث يكون عرض العينة 2.5msec.

ارسم طيف الإشارة المقطعة $G(\omega)$

ماهو تردد قطع مرشح الترميم الذي يمكن استخدامه لاستعادة الإشارة الأصلية؟



الشكل (10):أخذ العينات بقمم مستوية

تختلف النظم العملية لأخذ العينات عن الحالة المثالية بما يلي:

- إن إشارة التقطيع هي إشارة فيزيائية حقيقية ذات زمن محسوس ومطال محدود بدلاً من الزمن الصفري والمطال اللانهائي في الحالة المثالية

- الإشارة التناظرية في الحالة العملية هي إشارة ذات عرض حزمة محدود وذلك نتيجة إمرارها عبر مرشح لتحديد التردد الأعلى في طيفها لمنع تراكب النسخ المتكررة من الطيف.
- المرشحات المستخدمة في الحالة العملية هي مرشحات ذات حواف قطع ليست حادة كما في الحالة المثالية.

وتشكل النقطة الثانية من هذه الاختلافات أهمية بالغة وذلك بسبب ما قد ينتج عنها من خطأ نسميه خطأ التراكب كما سنقوم بشرحه في الفقرة التالية.

أسئلة التقويم الذاتي (2)

1. ماهي إشارة التقطيع؟
2. بماذا تختلف إشارة التقطيع في الحالة المثالية عن الحالة العملية؟
3. كيف يمكنك تمثيل عملية تقطيع الإشارة التناظرية رياضياً؟
4. ما العلاقة بين طيف الإشارة المقطعة تقطيعاً مثالياً وبين طيف الإشارة التناظرية الأصلية؟
5. ما هو مرشح الترميم؟
6. عرف ما يلي: معدل التقطيع، معدل نايكويست، زمن التقطيع.
7. ما العلاقة بين معدل التقطيع وإمكانية استعادة الإشارة من عيناتها؟
8. لماذا نختار تردد التقطيع أكبر من تردد نايكويست؟
9. بماذا تختلف عملية أخذ العينات العملية عن عملية أخذ العينات المثالية؟
10. كيف يمكنك التعبير عن نظرية أخذ العينات؟

تدريب (5):

لدينا الإشارة:

$$g(t)=4\cos(500\pi t+\pi/4)+\sin(200\pi t-\pi/8)$$
$$+0.1\sin(800\pi t-\pi/2)+0.02\sin(1000\pi t)$$

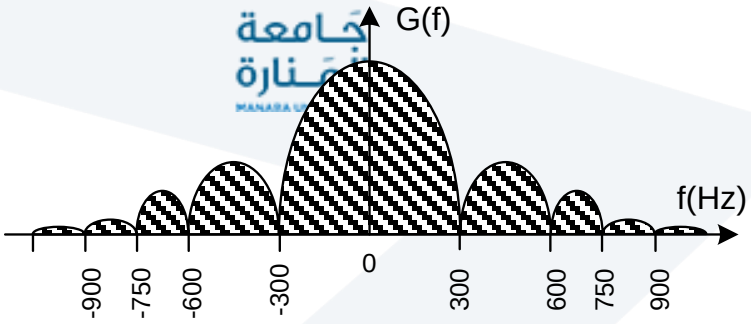
تم تحديد طيف هذه الإشارة بما يضمن حذف مركبات الطيف قليلة الأهمية والتي يشكل مطالها أقل من 5% من مطال الطيف الأعظمي. ثم جرى تقطيعها بمعدل مناسب واستعادتها.

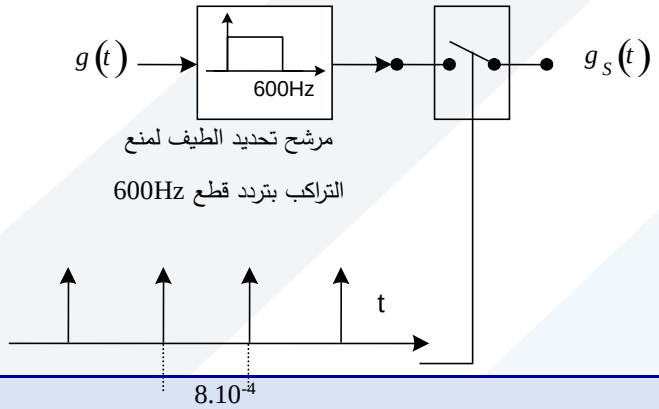
ماهي الإشارة التي تمت استعادتها؟

تدريب(6):

تم تطبيق الإشارة g(t) التي لها الطيف $G(\omega)$ على مدخل الدارة التي يبين الشكل مخططها الصندوقي، فنتجت الإشارة المقطعة $g_S(t)$.

1. ارسم طيف الإشارة المقطعة $G_S(\omega)$
2. ارسم طيف الإشارة التي يمكن استعادتها باستخدام:
   a. مرشح ترميم بتردد قطع 625Hz.
   b. مرشح ترميم بتردد قطع 900Hz.





3-1 مفهوم التكميم وأهميته

إن عملية التكميم هي من حيث الجوهر تقريب لقيم العينات التي تم الحصول عليها بنتيجة تقطيع الإشارة التناظرية إلى أقرب مستوى من مستويات محددة مسبقاً، وكل مستوى يمثل قيمة معينة لمطال العينات. فالعينات الناتجة هي بشكل طبيعي مأخوذة في فترات زمنية محددة وبمعدل مناسب و مطالاتها (قيمها) هي قيم حقيقية للإشارة التناظرية في لحظات أخذ العينات. يمكن لهذه العينات أن تأخذ أي قيمة حقيقية تقع بين أعلى قيمة للإشارة التي تمثلها وأدنى قيمة لهذه الإشارة. فيمكن أن تكون قيمة عينة ما مثلاً 0.2568V بينما تكون قيمة عينة أخرى -2.35723V وثالثة 1.25879V وهكذا. أي أن هناك عدداً لانهائياً من القيم المحتملة لعينات الإشارة. ومن البديهي أنه إذا أردنا تحويل قيم العينات الحقيقية كما هي إلى رموز ثنائية فإنه يلزمنا عدداً لانهائياً من الرموز وهذا غير ممكن التحقيق من الناحية العمليةً.

ولتوضيح ذلك تصور أنه لدينا إشارة تناظرية ما وبعد أن تم تقطيعها وجدنا أن قيم عيناتها يمكن أن تتغير لتأخذ إحدى قيمتين فقط، فإنه يلزمنا لترميز هذه العينات بيت واحد، فإما أن تأخذ قيمة العينة القيمة العليا ونستعيض عنها ببيت واحد يمثل الواحد المنطقي، أو تأخذ القيمة الدنيا ونستعيض عنها ببيت واحد يمثل الصفر المنطقي.

الآن لو كانت قيم عينات الإشارة تأخذ إحدى أربع قيم فإننا نحتاج لترميز كل عينه إلى رمزين ثنائيين ويمكن لكل عينة أن تستبدل بإحدى أربع مجموعات (00,01,10,11)، وبمتابعة نفس المحاكمة فإن إشارة تتغير قيمها بين ثمانية قيم محددة تحتاج إلى ثلاثة رموز ثنائية لتمثيل كل عينة من عيناتها، وفي حالة 16 قيمة سنحتاج إلى أربعة رموز ثنائية. وبمتابعة المحاكمة نستنتج أننا نحتاج إلى n رمز ثنائي لتمثيل عينات إشارة يمكن أن تأخذ m قيمة بحيث:

$$m = 2^n \quad ; \quad n = \log_2 m$$

يمكن للقارئ أن يتخيل عدد الرموز التي يتطلبها تمثيل عينات إشارة حقيقة الذي نعود فنقول إنه لانهائي. وهذا مستحيل من الناحية الفيزيائية. ومن هنا أتت ضرورة تحديد قيم عينات الإشارة بقيم معينة وهذه القيم محدودة العدد، بحيث يتم تقريب قيم هذه العينات إلى أقرب قيمة من هذه القيم وهذا ما يسمى تكميم قيم العينات أي تقريبها إلى أقرب مستوى كمي محدد مسبقا كما في الشكل(4-ج).

تتيح لنا عملية التكميم إمكانية تمثيل عينات الإشارة بشكل واقعي بعدد محدد من الرموز الثنائية، ولكنها في الوقت ذاته تتسبب في الحصول على عينات مكممة للإشارة تختلف عن العينات الحقيقية بقيم معينة تتناسب مع عملية التقريب التي حصلت. وينشأ عن ذلك عند محاولة استرجاع الإشارة من عيناتها الحصول على إشارة تمثل العينات المكممة وليس العينات الحقيقية، وهذا ما ينشأ عنه خطأ يسمى خطأ التكميم Quantizing Error كما في الشكل (4-د). وخطأ التكميم هذا ثمن لابد من دفعه للتمتع بميزات التعامل مع الإشارة التناظريه بشكلها الرقمي. وسنسميه لاحقاً بضجيج التكميم Quantizing Noise. وسنعود إليه لاحقاً بالتفصيل.

4-3 علاقة عرض حزمة الإرسال بعدد مستويات التكميم

رأينا أنه عند تحويل العينات المكممة إلى رموز ثنائية، فإننا نلجأ إلى استبدال كل عينة بعدد n من الرموز الثنائية. ونعلم أنه يمكننا تشكيل 2^n مجموعة مختلفة من الرموز في هذه الحالة، أي نستطيع تمثيل m قيمة مختلفة من قيم هذه العينات، وهذه القيم تمثل عدد مستويات التكميم حيث:

$$n = \log_2 m \quad \text{أو} \quad m = 2^n$$

فيلزمنا مثلاً $n = \log_2 256 = 8$ خانة ثنائية أو رمزاً ثنائياً (صفر أو واحد) لتشكيل 256 مجموعة مختلفة من الرموز التي ستمثل قيم العينات المكممة بـ 256 مستوى تكميم .

إذا كان أعلى تردد في الإشارة قيد الترميز m(t) هو f_{max} فإن تردد نايكويست هو $2\ f_{max}$ ومعدل نايكويست $2\ f_{max}$ Samp / sec وكل عينة تحتاج لـ n رمز ثنائي لتمثيلها وبالتالي فإن معدل الإرسال هو $2.\ f_{max}.n$ bps وعرض الحزمة المطلوب لإرسال الإشارة المرمزة في أدنى حالاته هو $f_{max}.n$ Hz (يعتمد عرض الحزمة على طريقة التشوير Signaling).

ومن المفيد هنا أن نذكر أن عرض الحزمة اللازم لإرسال $n = \log_2 m$ رمز ثنائي في الثانية يختلف حسب نوع وشكل الإشارات الكهربائية التي تستخدم لتمثيل هذا الرمز، وهذا ماسنعود إليه في الوحدة الرابعة حين شرح أنواع الإشارات المستخدمة التشوير Signaling والترميز الخطي Line Coding. ولكننا نستطيع الآن القول بأن عرض الحزمة هذا بشكل عام يحقق العلاقة:

$$BW \geq \frac{1}{2}.\frac{\log_2 m}{T} = \frac{R}{2}$$

حيث: T هي زمن الرمز الواحد و R معدل الإرسال.

ومن الواضح أنه كلما زدنا عدد مستويات التكميم m كلما ازداد عدد الرموز n التي نحتاجها لتمثيل كل عينة وبالتالي يزداد معدل الإرسال R وعرض الحزمة اللازم لإرسال الإشارة BW. إن زيادة عدد المستويات يؤدي إلى زيادة الدقة في تمثل الإشارة التناظرية رقمياً، ولكنه من ناحية أخرى يؤدي إلى ازدياد معدل الإرسال المطلوب وعرض الحزمة اللازم. وهنا علينا أن نبحث دائماً عن حل وسط يعطينا دقة مقبولة حسب التطبيق المستخدم وفي نفس الوقت نحرص على عدم زيادة عرض الحزمة اللازم أكثر من الحد المطلوب. ولتوضيح ذلك يمكننا إيراد المثال التالي:

بفرض أننا نريد تحويل إشارة هاتفية إلى إشارة رقمية، نقوم بإمرار هذه الإشارة عبر مرشح تمرير تردد منخفض تردد قطعه 4 KH3 ونقطعها وفقاً لمعدل نايكويست $f_s = 2.4 = 8kHz$ ، والآن إذا استخدمنا مكمم يعمل وفق 256 مستوى تكميم، فإن عدد الرموز المطلوبة

لتمثيل كل عينة هو n=8 bits، وبالتالي يكون معدل إرسال البيت $R = 8.8 = 64kbps$ ، وعرض الحزمة الأصغري المطلوب للإرسال هو $B_T = R/2 = 32kHz$.

بفرض أننا زدنا عدد الرموز الثنائية التي تمثل كل عينة إلى 9 bits أي قمنا باستخدام مكمم يعمل وفق 512 مستوى تكميم فإن معدل إرسال البيت يصبح $R = 8.9 = 72kbps$ وعرض الحزمة الأصغري المطلوب للإرسال هو $B_T = R/2 = 36kHz$.

أسئلة التقويم الذاتي(2)

1. هل يمكن تحويل عينات الإشارة التناظرية إلى رموز ثنائية دون تكميمها؟
2. ماهي خطوة التكميم؟
3. ما العلاقة بين خطوة التكميم وعدد الرموز الثنائية المستخدمة لترميز كل عينة؟
4. ما علاقة اختيار خطوة التكميم بجودة تحويل الإشارة من تناظرية إلى رقمية؟
5. ما العلاقة بين خطوة التكميم وعرض حزمة الإرسال؟
6. هل هناك حد ما لزيادة عدد مستويات التكميم؟
7. ماهي القيمة العظمى لخطأ التكميم؟

5- تحويل العينات المكممة إلى إشارات رقمية (الترميز)

يتم بعد التكميم تطبيق الإشارة المقطعة على دخل المرمز Encoder الذي يقوم بتحويل كل عينة من العينات المكممة إلى مجموعة مكونة من n رمز ثنائي. وتعبر هذه المجموعات من الرموز الثنائية عن قيم العينات المكممة بشكل مباشر كما تم ذكره سابقاً. وتسمى طريقة التحويل هذه عادة بالتعديل النبضي المرمز Pulse Code Modulation(PCM).

يعرف معدل الإرسال بالنسبة للأنظمة PCM بأنه عدد الرموز الثنائية التي يتم إرسالها في واحدة الزمن. كما تعرف فعالية عرض الحزمة الترددية Band Width Efficiency(BWE) بأنها عدد الرموز الثنائية المرسلة في واحدة الزمن لكل عرض حزمة مساوٍ لواحدة التردد، أي bps/Hz .

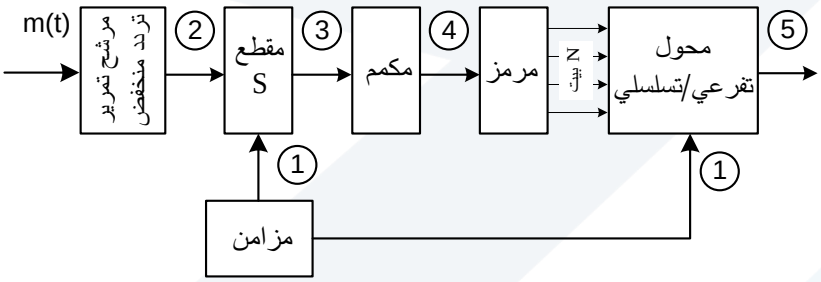
كما يعرف مردود الإرسال Transmission efficiency(T_r eff) بأنه نسبة الرموز الثنائية الفعالة أي التي تحوي معلومات إلى نسبة الرموز الثنائية الكلي وهو عدد الرموز الفعالة مضافاً إليها الرموز الأخرى المضافة لأغراض التحكم وكشف الأخطاء وغير ذلك

تختلف الطريقة التي يتم بواسطتها ترميز العينات وعدد الرموز التي تستخدم في ترميز كل عينة حسب طبيعة الإشارة من حيث مطال العينة وقطبيتها، فيستخدم الترميز الطبيعي الثنائي لترميز العينات أحادية القطبية أي التي يتم الحصول عليها نتيجة لتقطيع إشارة تناظرية ذات قيم لحظية موجبة فقط أو سالبة فقط أي أن قيم العينات كلها تكون في جهة واحدة من المحور الأفقي (عادة الجهة العليا). بينما يتم استخدام الترميز الثنائي المتناظر لترميز عينات الإشارات التناظرية ثنائية القطبية أي التي لها قيم لحظية موجبة وسالبة.

الترميز الثنائي الطبيعي:

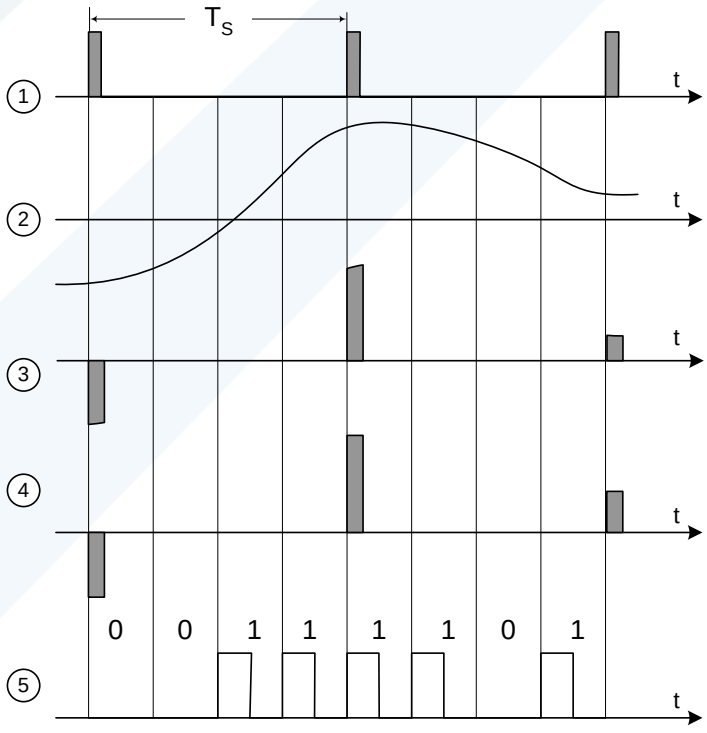
يتم في هذا النوع من الترميز استبدال قيمة كل عينة بعدد معين n من الرموز الثنائية (1,0) تشكل التعبير الثنائي المباشر عن قيمة العينة ويكون عدد هذه الرموز مختلفاً من تطبيق إلى آخر حسب المجال الديناميكي للإشارة وحسب الدقة المطلوبة في الإرسال والمتعلقة بنسبة الإشارة إلى الضجيج، والتي ترتبط بدورها بشكل مباشر بعدد الرموز التي تمثل كل عينة. ففي ترميز العينات المكممة للإشارات الهاتفية يستخدم مجموعات مكونة من 8 رموز ثنائية أي أنه يتم استبدال كل عينة بثمانية أرقام ثنائية تعبر مباشرة عن مطال هذه العينة. ويتم ذلك وفقاً لجدول هو في الغالب يمثل القيم الثنائية الممثلة للقيم العشرية لأرقام مستويات الكم المعتمدة في عملية التكميم.

ولتوضيح ذلك يمكننا أن نأخذ كمثال ترميز عينات إشارة تم تكميم عيناتها باستخدام 16 مستوى تكميم أي أن عدد الرموز في كل مجموعة أربعة رموز. يمثل المستوى الأول أي أدنى مستوى القيمة الصفرية والمستوى الثاني القيمة 1 والمستوى الثالث القيمة 2 وهكذا ويتم استبدال قيمة العينة بالرمز المقابل لمستوى الكم المناسب لها.



الشكل(11) مخططاً صندوقياً لعملية تحويل الإشارة التناظرية إلى إشارة رقمية

يتم في الحالة العامة تحويل الإشارة التناظرية إلى رقمية وذلك باتباع الخطوات التي يعبر عنها المخطط الصندوقي المبين في الشكل(11)، حيث يقوم المزامن بضبط عملية التقطيع والتحويل من أجل كل عينة من عينات الإشارة، كما يقوم المحول التفرعي التسلسلي بتحويل N رمز ثنائي تفرعي (يتم تمثيل كل عينة بثمانية رموز) إلى N رمز ثنائي تسلسلي تناسب المخارج التسلسلية للحاسوب ومداخل الموديمات وخطوط النقل التسلسلية. أما بقية الأجزاء فقد أصبح القارئ ملماً بوظيفة كل جزء منها. كما يبين الشكل(12) شكل الإشارات التناظرية والرقمية على خرج كل مرحلة من مراحل الترميز للإشارة، وكذلك نبضات المزامنة وذلك من أجل الإشارة m(t).



الشكل(12): شكل الإشارات التناظرية والرقمية على خرج كل مرحلة من مراحل ترميز الإشارة

يتم عملياً ترميز الإشارات باستخدام دارات متكاملة مصنعة خصيصاً لهذه الغاية هي المحولات التناظرية/الرقمية والتي سنقوم بدراستها في الفقرات التالية.

تدريب(6):

المطلوب تصميم نظام PCM من أجل إشارة تناظرية لاوجود لأي مركبة من طيفها بعد 16kHz.

1. حدد عدد الرموز المستخدمة لتمثيل كل عينة إذا كان المطلوب أن لا تقل نسبة الإشارة إلى الضجيج عن 40dB لو تم استخدام الضغط والتوسيع مع قيمة $\mu = 100$ ؟
2. ما هو أصغر عرض حزمة يمكن أن تشغله هذه الإشارة؟
3. ماهي فعالية عرض الحزمة؟
4. إذا كنا نستخدم 5% من الرموز إضافة إلى الرموز الثنائية الممثلة للإشارة من أجل أغراض التحكم وكشف الخطأ فما هو مردود الإرسال؟

6- استعادة الإشارات (التحويل من إشارات رقمية إلى تناظرية)

إن أول خطوة في تحويل الإشارة الرقمية إلى إشارة تناظرية تكمن نظرياً في استعادة قيم العينات، وذلك بتحويل مجموعات الرموز الممثلة لكل عينة إلى قيمة محددة تمثل مستوىً ما، أي استبدال مجموعات الرموز بقيم معينة ضمن نفس الحيز الزمني لكل مجموعة. وهذه العملية ماهي إلا استعادة العينات المكممة في الحالة المثالية للتراسل.

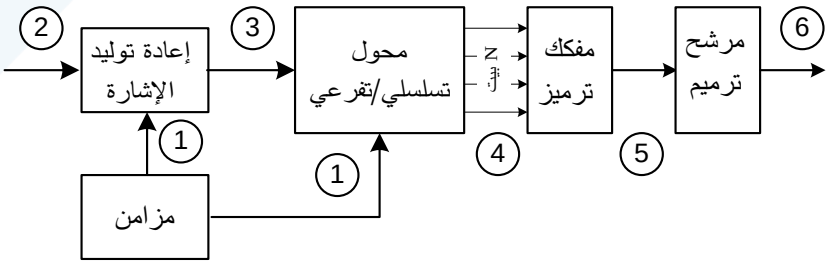
وتتم هذه العملية بطريقة معاكسة لما تمت عليه في عملية الترميز حيث يستبدل كل n رمز بقيمة ما، حيث يتم تحويل هذه القيمة إلى إشارة كهربائية تمثل قيم العينات المكممة.

أما الخطوة التالية فهي استرجاع الإشارة التناظرية من عيناتها المكممة والتي تتم باستخدام مرشحات الترميم كما ذكرنا في الوحدة السابقة. وهنا نذكر ثانية بأنه حتى ولو تمت عملية الاستعادة باستخدام تجهيزات مثالية فإن الإشارة المستعادة لا يمكن أن تكون مطابقة للإشارة الأصلية وذلك بسبب عملية التكميم التي أدت إلى نشوء خطأ التكميم. ويضاف إلى خطأ التكميم في الحالة العامة الضجيج والأخطاء الناتجة عن استخدام تهيزات غير مثالية والأخطاء الناجمة عن تحديد طيف الإشارة قبل تقطيعها وغير ذلك.

يبين الشكل(13) مخططاً صندوقياً لدارة تقوم باستعادة الإشارة التناظرية من الإشارة الرقمية الممثلة لها وذلك بعد استقبالها من مخرج قناة تراسل المعطيات مباشرة.

إن مهمة إعادة التوليد تكمن في كشف الإشارة الرقمية وإعادتها إلى شكلها قبل الإرسال، حيث تكون قد تعرضت للتخامد والضجيج والتشوه وغيرها من المعيقات. أما المحول التسلسلي التفرعي فمهمته تحويل كل N رمز ثنائي تسلسلي (يمثل القيمة الرقمية لكل عينة بـ N) إلى نفس العدد من الرموزليتم قرائتها دفعة واحدة على خرج المحول من قبل مفكك التشفير.

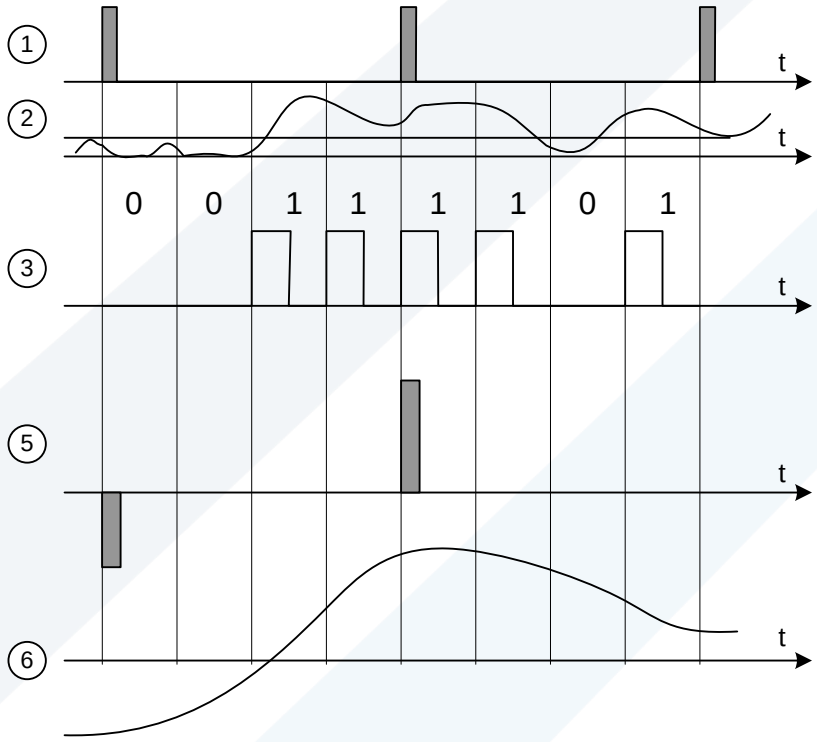
أما دارة المزامن فتقوم بضبط عمليات التحويل والقراءة لتتم عند ورود كل N رمز ثنائي أي عند ورود كامل القيمة الرقمية للعينة.



الشكل(13) مخططاً صندوقياً لدارة تقوم باستعادة الإشارة التناظرية من الإشارة الرقمية

ويبين الشكل(14) شكل الإشارات الرقمية والتناظرية على خرج كل مرحلة من مراحل استعادة الإشارة وكذلك نبضات المزامنة وذلك من أجل السلسلة الرقمية 00111010 التي تمثل عينتين N4 مرمزتين باستخدام الترميز الثنائي التناظري.

يتم عملياً استرجاع الإشارات باستخدام دارات متكاملة مصنعة خصيصاً لهذه الغاية هي المحولات الرقمية التناظرية والتي سنقوم بدراستها مع المحولات التناظرية الرقمية في الفقرة التالية.



الشكل(14): شكل الإشارات الرقمية والتناظرية على خرج كل مرحلة من مراحل استعادة الإشارة

أسئلة التقويم الذاتي(5)

1. كيف تتم عملية استرجاع الإشارة التناظرية من رموزها الرقمية؟
2. هل يمكننا استرجاع الإشارة التناظرية الأصلية كما إذا تم استخدام تجهيزات مثالية ولماذا؟