الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R BT.601-7

(2011/03)

معلمات التشفير في الاستوديو للتلفزيون الرقمي للنسبتين الباعيتين 4:3 (المعيارية) و16:9 (شاشة عريضة)

السلسلة BT

الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)

تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنوان
BO	البث الساتلي
BR	التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية
BS	الخدمة الإذاعية (الصوتية)
BT	**الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)**
F	الخدمة الثابتة
M	الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة
P	انتشار الموجات الراديوية
RA	علم الفلك الراديوي
RS	أنظمة الاستشعار عن بُعد
S	الخدمة الثابتة الساتلية
SA	التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية
SF	تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة
SM	إدارة الطيف
SNG	التجميع الساتلي للأخبار
TF	إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
V	المفردات والمواضيع ذات الصلة

ملاحظة: *تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.*

النشر الإلكتروني
جنيف، 2022

© ITU 2022
جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذا المنشور بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصية ITU-R BT.601-7*

معلمات التشفير في الاستديو للتلفزيون الرقمي للنسبتين الباعيتين 4:3 (المعيارية) و16:9 (شاشة عريضة)[1]

(المسألة ITU-R 1/6)

(2011-2007-1995-1994-1992-1990-1986-1982)

مجال التطبيق

تغطي هذه التوصية أيضاً خصائص عناصر الصورة (بيكسل) التي تمثل صورة تلفزيونية رقمية لتشابكية 525 أو 625 خطاً.

وتحدد هذه التوصية طرائق للتشفير الرقمي للإشارات الفيديوية. وهي تتضمن معدل اعتيان MHz 13,5 لكلا النسبتين 4:3 و16:9 بأداء مناسب لأنظمة الإرسال الحالية.

مصطلحات أساسية

تلفزيون عادي الوضوح، صورة تلفزيونية رقمية، التشفير الرقمي، فرق اللون

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن المذيعين ومنتجي البرامج التلفزيونية من صالحهم أن يكون للمعايير الرقمية للاستديوهات أكبر عدد من قيم المعلمات الأساسية المشتركة بين الأنظمة ذات 525 خطاً و625 خطاً؛

ب) أن مقاربة تؤدي إلى حلول رقمية متلائمة على الصعيد العالمي ستمكن من تطوير التجهيزات التي تشتمل على عدة عناصر مشتركة وتسمح بتحقيق اقتصاد في التشغيل وتسهل التبادل الدولي للبرامج؛

ج) أن من المرغوب فيه إنشاء أسرة قابلة للتوسيع من معايير التشفير الرقمي المتلائمة وقد تقابل سويات هذه الأسرة عدة سويات للجودة وعدة نسب باعية وتيسر المعالجات الإضافية التي تتطلبها التقنيات الحالية للإنتاج، وتستجيب للحاجيات المستقبلية؛

د) أن نظاماً يعتمد على تشفير المكونات بإمكانه بلوغ هذه الأهداف؛

هـ) أن التطابق الفضائي للعينات الممثلة لإشارات النصوع والاختلاف اللوني (أو عند الاقتضاء إشارات الأحمر والأخضر والأزرق) يسهل معالجة المكونات الرقمية التي تتطلبها التقنيات الحالية للإنتاج،

توصي

بأن تستعمل الاعتبارات التالية كأساس لمعايير التشفير الرقمي من أجل استوديوهات التلفزيون في البلدان المستعملة لأنظمة ذات 525 خطاً، وكذلك في البلدان التي تستعمل أنظمة 625 خطاً.

---

* أدخلت لجنة الدراسات 6 للاتصالات الراديوية في نوفمبر 2014 وفي مارس 2017 تعديلات صياغية على هذه التوصية وفقاً للقرار ITU-R 1.

1 تلفزيون عادي الوضوح.

1 أسرة قابلة للتوسيع من معايير التشفير الرقمي المتلائمة

1.1 يجب أن يسمح التشفير الرقمي بإنشاء أسرة قابلة للتوسيع من معايير التشفير الرقمي المتلائمة وبتطويرها. وينبغي أن يكون من الممكن أن يتم التحويل ببساطة بين أي معيارين من الأسرة.

2.1 يجب أن يستند التشفير الرقمي إلى استخدام إشارة نصوع وإشارتين لفرق اللون (أو عند الاقتضاء إشارات الأحمر والأخضر والأزرق).

3.1 يجب التحكم في الخصائص الطيفية للإشارة لتجنب انطواء الطيف مع الاحتفاظ بخاصية نطاق التمرير. ترد خصائص المرشاح في التذييل 2.

2 مواصفات تنطبق على كل سوية من سويات الأسرة

1.2 يجب أن تكون بنى الاعتيان ثابتة فضائياً. وهذا هو الحال مثلاً بالنسبة للبنى العمودية المحددة في هذه التوصية.

2.2 إذا كانت العينات تمثل إشارة النصوع وإشارتين متآونتين لفرق اللون، يجب على عينات إشارتي فرق اللون أن ينطبق بعضها على بعض فضائياً. وعندما تمثل العينات إشارات الأحمر والأخضر والأزرق يجب أن تنطبق فضائياً.

3.2 يجب أن يكون في الإمكان اعتماد المعيار الرقمي المصاحب لكل سوية للأسرة واستعماله في التشغيل على الصعيد العالمي. وللتمكن من بلوغ هذا الهدف يجب تحديد أعداد من العينات لكل خط متلائمة بين أنظمة 525 و625 خطاً. (يفضل أن يكون نفس العدد من العينات للخط) وذلك بالنسبة لكل معيار من الأسرة.

4.2 في تطبيقات هذه المواصفات، يعبر عن محتوى الكلمات الرقمية بالشكل العشري أو الستة عشري، موسوماً باللاحقتين "d" و"h" على التوالي.

لتفادي الخلط بين التمثيلات ذات 8 بتات والتمثيلات ذات 10 بتات، تعتبر البتات الثماني الأكثر دلالة جزءاً صحيحاً بينما تعتبر البتتان الإضافيتان أجزاء كسرية، إن وجدتا.

على سبيل المثال، يعبر عن مخطط البتات 10010001 بكتابة 145_d أو 91_h، بينما يكتب المخطط 1001000101 بالصيغة $145{,}25_d$ أو $91{,}4_h$.

إذا لم يظهر أي جزء كسري، يفترض أن له القيمة الاثنينية 00.

5.2 تعريف الإشارات الرقمية Y وC_R وC_B انطلاقاً من الإشارات (التماثلية) الابتدائية E'_R وE'_G وE'_B

لتعريف الإشارات Y وC_R وC_B تصف هذه الفقرة قواعد بناء هذه الإشارات انطلاقاً من الإشارات التماثلية الابتدائية E'_R وE'_G وE'_B. ويتبع هذا البناء المراحل الثلاث الموصوفة أدناه في الفقرات 1.5.2 و2.5.2 و3.5.2. وتعطى الطريقة على سبيل المثال، وقد تؤدي عملياً طرق أخرى للبناء انطلاقاً من هذه الإشارات الأولية أو من غيرها من الإشارات التماثلية أو الرقمية إلى نتائج مماثلة. ويعطى مثال في الفقرة 4.5.2.

1.5.2 بناء إشارات النصوع (E'_Y) والاختلاف اللوني ($E'_R - E'_Y$) و($E'_B - E'_Y$)

إن بناء إشارات النصوع وفرق اللون هو الآتي:

$$E'_Y = 0{,}299\ E'_R + 0{,}587\ E'_G + 0{,}114\ E'_B$$

وعليه:

$$(E'_R - E'_Y) = E'_R - 0{,}299\ E'_R - \ 0{,}587\ E'_G - 0{,}114\ E'_B = 0{,}701\ E'_R - 0{,}587\ E'_G - 0{,}114\ E'_B$$

و

$$(E'_B - E'_Y) = E'_B - 0{,}299\ E'_R - 0{,}587\ E'_G - \ 0{,}114\ E'_B = -0{,}299\ E'_R - 0{,}587\ E'_G + 0{,}886\ E'_B$$

وإذا ما اعتبر أن قيم الإشارات مقيسة إلى الوحدة (مثلاً سويات قصوى قيمتها 1,0 V) تكون القيم الحاصلة للبياض والسواد والألوان المشبعة الابتدائية ومتمماتها هي الواردة في الجدول 1.

الجدول 1

قيم الإشارات المقيسة

الشرط	E'_R	E'_G	E'_B	E'_Y	E'_R- E'_Y	E'_B- E'_Y
البياض	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0
السواد	0	0	0	0	0	0
الأحمر	1,0	0	0	0,299	0,701	0,299–
الأخضر	0	1,0	0	0,587	0,587–	0,587–
الأزرق	0	0	1,0	0,114	0,114–	0,886
الأصفر	1,0	1,0	0	0,886	0,114	0,886–
التركوازي (Cyan)	0	1,0	1,0	0,701	0,701–	0,299
النيلي (Magenta)	1,0	0	1,0	0,413	0,587	0,587

2.5.2 بناء إشارتي فرق اللون المعاد تقييسهما (E'_{C_R} و E'_{C_B})

إذا كانت قيم E'_Y واقعة بين 1,0 و0 تكون قيم $(E'_R - E'_Y)$ واقعة بين + 0,701 و–0,701 وقيم $(E'_B - E'_Y)$ بين + 0,886 و–0,886. فلإرجاع أقصى انحراف لإشارتي الاختلاف اللوني إلى الوحدة (أي من + 0,5 إلى – 0,5) يمكن حساب العاملين الآتيين:

$$E'_{C_B} = \frac{E'_R - E'_Y}{1{,}402}$$
$$= \frac{0{,}701 E'_R - 0{,}587 E'_G - 0{,}114 E'_B}{1{,}402}$$

و

$$E'_{C_B} = \frac{E'_B - E'_Y}{1{,}772}$$
$$= \frac{-0{,}299 E'_R - 0{,}587 E'_G + 0{,}886 E'_B}{1{,}772}$$

يخصص الرمزان E'_{C_R} وE'_{C_B} لتعيين إشارتي فرق اللون المعاد تقييسهما أي اللتين يكون اتساعهما الاسميان من الذروة إلى الذروة مطابقين للاتساع الاسمي من الذروة إلى الذروة لإشارة النصوع E'_Y المتخذة كمرجع للاتساع.

3.5.2 التكمية

في حالة تشفير اثنيني ذي 8 بتات أو 10 بتات بتكمية منتظمة تخصص 2^8 أو 2^{10}، أي 256 أو 1 024 سويات تكمية متساوية البعد إحداها عن الأخرى، بحيث تتراوح الأعداد الاثنينية المتيسرة من 0000 0000 إلى 1111 1111 (من 00 إلى FF بالترقيم الست عشري)، من 0000 0000 إلى 11 1111 1111 ($00,0_h$ إلى $FF.C_h$ في ترقيم ست عشري) ويكون التعبير العشري المكافئ هو من $0,00_d$ إلى $255,75_d$ ضمناً.

وفي هذه التوصية، تخصص السويتان $0,00_d$ و$255,75_d$ لمعطيات التزامن بينما تكون السويات من $1,00_d$ إلى $254,75_d$ متيسرة للفيديو.

وعلماً بأن إشارة النصوع لا يجب أن تشغل إلا 220 سوية (8 بتات) أو 877 سوية (10 بتات) لإبقاء هوامش للتشغيل وأنه يجب أن يكون السواد في السوية $16,00_d$، تكون القيمة العشرية لإشارة النصوع Y التكمية مساوية:

$$Y = \text{int}\{(219E'_Y + 16) \times D\}/D$$

حيث تأخذ D إما القيمة 1 أو القيمة 4 المطابقة لتكمية 8 بتات و10 بتات على التوالي. ويعيد المشغل ( )int القيمة 0 إلى الأجزاء الكسرية الكائنة بين 0 و0,4999 ... و+1 إلى الأجزاء الكسرية الكائنة بين 0,5 و0,999 ...، أي أن هناك تقريباً للقيمة الكلية العليا بالنسبة للأجزاء الكسرية العليا أو المساوية لـ 0,5.

كذلك، نظراً لأن إشارتي فرق اللون ينبغي أن تشغلا 225 سوية (8 بتات) أو 897 سوية (10 بتات) وأن السوية صفر ينبغي أن تكون في السوية $128,00_d$، تكون القيم العشرية لإشارتي فرق اللون قبل التكمية C_R وC_B:

$$C_R = \text{int}\{(224E'_{C_R} + 128) \times D\}/D$$

و

$$C_B = \text{int}\{(224E'_{C_B} + 128) \times D\}/D$$

وتسمى المكافئات الرقمية Y وC_R وC_B.

4.5.2 بناء Y وC_R وC_B عن طريق تكمية الإشارات E'_R وE'_G وE'_B

في الحالة التي يتم الحصول فيها مباشرة على المكونات انطلاقاً من إشارات المكونات E'_R وE'_G وE'_B مصححة الغاما مسبقاً، أو الناتجة مباشرة في شكل رقمي، يكون حينئذ كل التكمية والتشفير مكافئين للعبارات التالية:

$$E'_{R_D} \text{ (في شكل رقمي)} = \text{int}\{(219E'_R + 16) \times D\}/D$$

$$E'_{G_D} \text{ (في شكل رقمي)} = \text{int}\{(219E'_G + 16) \times D\}/D$$

$$E'_{B_D} \text{ (في شكل رقمي)} = \text{int}\{(219E'_B + 16) \times D\}/D$$

إذاً:

$$Y = \text{int}\{(0,299E'_{R_D} + 0,587E'_{G_D} + 0,114E'_{B_D}) \times D\}/D$$

$$\approx \text{int}\left\{\left(\frac{k'_{Y1}}{2^m}E'_{R_D}+\frac{k'_{Y2}}{2^m}E'_{G_D}+\frac{k'_{Y3}}{2^m}E'_{B_D}\right)\times D\right\}/D$$

$$C_R=\text{int}\left[\left\{\left(\frac{0{,}701E'_{R_D}-0{,}587E'_{G_D}-0{,}114E'_{B_D}}{1{,}402}\right)\frac{224}{219}+128\right\}\times D\right]/D$$

$$\approx \text{int}\left[\left\{\left(\frac{k'_{CR1}}{2^m}E'_{R_D}+\frac{k'_{CR2}}{2^m}E'_{G_D}+\frac{k'_{CR3}}{2^m}E'_{B_D}\right)+128\right\}\times D\right]/D$$

$$C_B=\text{int}\left[\left\{\left(\frac{-0{,}299E'_{R_D}-0{,}587E'_{G_D}+0{,}886E'_{B_D}}{1{,}772}\right)\frac{224}{219}+128\right\}\times D\right]/D$$

$$\approx \text{int}\left[\left\{\left(\frac{k'_{CB1}}{2^m}E'_{R_D}+\frac{k'_{CB2}}{2^m}E'_{G_D}+\frac{k'_{CB3}}{2^m}E'_{B_D}\right)+128\right\}\times D\right]/D$$

حيث تشير k' وm على التوالي إلى المعاملات الصحيحة والأطوال بالبتات للمعاملات الصحيحة. وينبغي حساب هذه المعاملات لمعادلات النصوع وفرق اللون وفقاً للملحق 2.

الجدول 2

المعاملات الصحيحة لمعادلات النصوع وفرق اللون

فرق اللون C_B			فرق اللون C_R			النصوع Y			مقام (الكسر)	بتات المعلمات
k'_{CB3}	k'_{CB2}	k'_{CB1}	k'_{CR3}	k'_{CR2}	k'_{CR1}	k'_{Y3}	k'_{Y2}	k'_{Y1}	2^m	m
131	87−	44−	21−	110−	131	29	150	77	256	8
262	**174−**	88−	43−	219−	262	58	301	153	512	9
524	347−	177−	85−	439−	524	117	601	306	1 024	10
1 047	694−	353−	170−	877−	1 047	**234**	1 202	612	2 048	11
2 095	1 388−	707−	341−	1 754−	2 095	467	2 404	1 225	4 096	12
4 190	2 776−	1 414−	681−	3 508−	**4 189**	934	4 809	2 449	8 192	13
8 379	5 551−	2 828−	1 36−3	7 016−	8 379	1 868	9 617	4 899	16 384	14
16 758	11 103−	5 655−	2 72−5	14 033−	16 758	**3 735**	19 235	9 798	32 768	15
33 516	22 205−	11 311−	**5 450−**	28 066−	33 516	7 471	38 470	19 595	65 536	16

الملاحظة 1 – القيم المذكورة بخط أسود تدل على أن القيم معدلة من أقرب قيم صحيحة من خلال الاستمثال.

وللحصول على مكونات النظام 4:2:2 Y وC_R وC_B، يجب أن يحقق ترشيح التمرير المنخفض والاعتيان الفرعي على إشارتي النظام 4:4:4 C_R وC_B الموصوفتين أعلاه. ويجب أن يشار إلى أنه قد توجد فروق صغيرة بين المكونتين C_R وC_B الحاصلتين بهذه الطريقة والمكونتين الحاصلتين بترشيح تماثلي قبل الاعتيان.

5.5.2 تحديد الإشارات Y وC_R وC_B

إن التشفير الرقمي في شكل الإشارات Y وC_R وC_B يمكن أن يمثل سلسلة أطول من قيم الإشارات مما يمكن أن تؤمنه المديات المقابلة من الإشارات R وG وB. لذلك فمن الممكن، نتيجة للإنتاج الإلكتروني للصورة أو لمعالجة الإشارة، إنتاج إشارات Y وC_R وC_B تؤدي على الرغم من صحة كل منها على حدة، إلى قيم خارج المدى عندما تحول إلى R وG وB. فلتجنب ذلك، من الأسهل والأكثر فعالية أن يطبق التحديد على Y وC_R وC_B بدلاً من انتظار أن تصبح الإشارات في شكل R وG وB. ويمكن كذلك أن يطبق التحديد بطريقة تحافظ على قيم النصوع والنقبة ولا تضحي إلا بالتشبع، مما يخفض من الانحطاط الذاتي.

6.2 خصائص النقل اللوني والبصري–الإلكتروني[2]

البند	الخصائص			
	المعلمة	625		525	
		x	y	x	y
1.6.2	إحداثيات اللونية و1931 CIE[(1)]				
	الابتدائية الحمراء	0,640	0,330	0,630	0,340
	الخضراء	0,290	0,600	0,310	0,595
	الزرقاء	0,150	0,060	0,155	0,070
2.6.2	اللونية المفترضة لإشارات ابتدائية متساوية – البياض المرجع	D_{65}			
		x		y	
	$E_R = E_G = E_B$	0,3127		0,3290	
3.6.2	خصائص النقل البصري–الإلكتروني قبل التصحيح المسبق غير الخطي	خطية مفترضة			
4.6.2	خصائص النقل البصري–الإلكتروني عند المصدر[2]	$E = (1{,}099\ L^{0{,}45} - 0{,}099)$ من أجل $1{,}00 \geq L \geq 0{,}018$ $E = 4{,}500\ L$ من أجل $0{,}018 > L \geq 0$ حيث: L: نصوع الصورة $0 \leq L \leq 1$ من أجل قياس اللون التقليدي E: مطابقة للإشارة الكهربائية.			

(1) إحداثيات اللونية المحددة هي الإحداثيات المستعملة حالياً من جانب الأنظمة التقليدية 625 خطاً و525 خطاً.

3 أفراد الأسرة

تحدد معايير أفراد الأسرة المذكورين أدناه:

– 4:2:2، لأنظمة النسبة الباعية 4:3 والأنظمة 16:9 بشاشة عريضة عندما يجب المحافظة على عرض نطاق الإشارة التماثلية نفسه والمعدلات الرقمية نفسها لكلا النسبتين الباعيتين.

– 4:4:4[4]، لأنظمة النسبتين الباعيتين 4:3 و16:9 باستبانة أعلى للألوان.

---

2 من المعروف أن هناك ممارسة تستعمل حالياً في بعض الأوقات، يمكن بواسطتها، إعادة مقابلة مخطط بيكسلات التلفزيون عالي الوضوح، عند بث برامج منتجة في صورة تلفزيون عالي الوضوح كبرامج عادية الوضوح، مع مخطط بيكسلات تلفزيون عادي الوضوح دون تغيير القياس اللوني للبرنامج الأصلي.

3 في عرف الإنتاج النمطي، تعدَّل دالة تشفير مصادر الصورة بحيث تكتسب الصورة النهائية المظهر المرغوب على النحو الذي تشاهَد فيه على شاشة مرجعية لها دالة فك تشفير مرجعية ترد في التوصية ITU-R BT.1886 وفي بيئة المشاهدة المرجعية المعرَّفة في التوصية ITU-R BT.2035. وعلى الرغم من أن الغرض من بعض المعلمات الواردة في التوصية ITU-R BT.2035 هو استعمالها في مشاهدة إشارات في التلفزيون عالي الوضوح، ينبغي استعمال مسافات المشاهدة المدرَّجة لإشارات التلفزيون عادي الوضوح.

4 في سوية أفراد الأسرة 4:4:4 يمكن أن تكون إشارات الاعتيان إشارات النصوع وفرق اللون (أو في حال استعمالها إشارات حمراء وخضراء وزرقاء).

الملحق 1

معلمات التشفير لأفراد الأسرة

1 قيم معلمات التشفير للسوية 4:2:2 من الأسرة

تنطبق الموصفات (انظر الجدول 3) على السوية 4:2:2 لأفراد الأسرة الواجب استعمالها للسطح البيني الرقمي المعياري بين أهم التجهيزات الرقمية الرئيسية للاستوديو ومن أجل التبادل الدولي لبرامج التلفزيون الرقمي ذي النسبة الباعية 4:3 أو التلفزيون الرقمي ذي النسبة الباعية 16:9 بشاشة عريضة عندما يكون من الضروري الحفاظ على عرض نطاق الإشارة التماثلية نفسه والمعدلات الرقمية نفسها.

الجدول 3

المعلمات	أنظمة 525 خطاً، 60/1,001 مجالاً/ثانية	أنظمة 625 خطاً، 50 مجالاً/ثانية
1 الإشارات الواجب تشفيرها: Y وC_R وC_B	تحصل هذه الإشارات انطلاقاً من إشارات مصححة الغاما مسبقاً، أي: E'_Y و$E'_Y - E'_R$ و$E'_Y - E'_B$ (انظر الفقرة 5.2)	
2 عدد العينات للخط الكامل: – لإشارات النصوع (Y) –لكل من إشارتي فرق اللون (C_R, C_B)	858 429	864 432
3 بنية الاعتيان	بنية عمودية، تتكرر في كل مجال وكل رتل وكل صورة. عينات الإشارتين C_R وC_B تنطبق مع العينات الفردية (الأولى والثالثة والخامسة، إلخ.) من إشارة Y في كل خط	
4 تردد الاعتيان: –لإشارة النصوع –لكل من إشارتي فرق اللون	MHz 13,5 MHz 6,75 ينبغي أن يتطابق التفاوت المسموح به في ترددات الاعتيان مع التفاوت المسموح به في تردد خط نظام التلفزيون الملون المعني	
5 شكل التشفير	PCM بتكمية منتظمة و8 بتات للعينة (اختيارياً 10)، لكل من إشارات النصوع وفرق اللون	
6 عدد العينات للخط النشيط الرقمي: – لإشارة النصوع – لكل من إشارتي فرق اللون	720 360	
7 الطور النسبي للإشارات التماثلية والرقمية: – من نهاية الخط النشيط الرقمي وحتى الواسم O_H	16 دوراً من أدوار ساعة النصوع	12 دوراً من أدوار النصوع
8 التقابل بين سوية إشارة الصورة وسويات التكمية: – السلم – لإشارة النصوع – لكل من إشارتي فرق اللون	(انظر الفقرة 4.2) (القيم عشرية) من $0{,}00_d$ إلى $255{,}75_d$ 220 (8 بتات) أو 877 (10 بتات) سويات تكمية، سوية السواد تقابل السوية $16{,}00_d$ وسوية ذروة البياض تقابل السوية $235{,}00_d$. وقد تتجاوز سوية الإشارة في بعض الحالات السوية $235{,}00_d$ أو تكون أدنى من السوية $16{,}00_d$. 255 (8 بتات) أو 897 (10 بتات) سويات تكمية في الجزء الأوسط من سلم التكمية وإشارة الصفر تقابل السوية $128{,}00_d$. وقد تتجاوز سوية الإشارة في بعض الحالات السوية $240{,}00_d$ أو تكون أدنى من السوية $16{,}00_d$.	
9 تخصيص كلمات الشفرة	كلمتا الشفرة المقابلتان لسويتي التكمية $0{,}00_d$ و$255{,}75_d$ تُستعملان حصراً للتزامن. والسويات من $1{,}00_d$ إلى $254{,}75_d$ متيسرة للفيديو. وعندما تعالج كلمات من 8 بتات في نظام 10 بتات، ينبغي إضافة بتتين من البتات الأقل دلالة تتشكلان من الصفر.	

2 قيم معلمات التشفير للسوية 4:4:4 من الأسرة

تنطبق المواصفة الواردة في الجدول 4 على السوية 4:4:4 من الأسرة المكيفة مع مصادر الصور التلفزيونية ومع تطبيقات ومعالجات إشارات الفيديو رفيعة الجودة.

الجدول 4

المعلمات	أنظمة 525 خطاً، 60/1,001 مجالاً/ثانية	أنظمة 625 خطاً، 50 مجالاً/ثانية
1 الإشارات الواجب تشفيرها : Y وC_R وC_B أو R وG وB	تحصل هذه الإشارات انطلاقاً من الإشارات مصححة الغاما مسبقاً وهي: E'_Y و$E'_R - E'_Y$ و$E'_B - E'_Y$ أو E'_R وE'_G وE'_B	
2 عدد العينات للخط الكامل من أجل كل إشارة	858	864
3 بنية الاعتيان	بنية عمودية تتكرر في كل خط وكل رتل وكل صورة. وبنى الاعتيان الثالث تتطابق فيما بينها وتتطابق أيضاً مع بنية الاعتيان لإشارة النصوع في السوية 4:2:2	
4 تردد اعتيان كل إشارة	MHz 13,5	
5 شكل التشفير	PCM بتكمية منتظمة على الأقل 8 بتات للعينة (اختيارياً 10)	
6 مدة الخط النشيط الرقمي معبراً عنها في العينات	720	
7 الطور النسبي للإشارات التماثلية والرقمية: – من نهاية الخط النشيط الرقمي إلى O_H	16 فترة ميقاتية	12 فترة ميقاتية
8 التقابل بين سويات إشارة الصورة وسوية التكمية الممثلة لكل عينة: – السلم – للإشارات R وG وB أو لإشارة النصوع[1] – لكل من إشارتي فرق اللون[1]	(انظر الفقرة 4.2) (القيم عشرية) من $0{,}00_d$ إلى $255{,}75_d$ 220 (8 بتات) سوية تكمية، أو 877 (10 بتات) على سوية السواد تقابل السوية $16{,}00_d$ وسوية ذروة البياض تقابل السوية $235{,}00_d$. وقد تتجاوز سوية الإشارة السوية $235{,}00_d$ في بعض الحالات أو تكون أدنى من السوية $16{,}00_d$. 255 (8 بتات) أو 897 (10 بتات) سويات تكمية في الجزء الأوسط من سلم التكمية. إشارة الصفر تقابل السوية $128{,}00_d$. وقد تتجاوز سوية الإشارة السوية $240{,}00_d$ في بعض الحالات أو تكون أدنى من السوية $16{,}00_d$.	
9 تخصيص كلمات الشفرة	كلمتا الشفرة لسويتي التكمية $0{,}00_d$ و$255{,}75_d$ تُستعملان حصراً للتزامن. والسويات من $1{,}00_d$ إلى $254{,}75_d$ متيسرة للفيديو. وعندما تعالج كلمات من 8 بتات في نظام 10 بتات، ينبغي إضافة بتتين من البتات الأقل دلالة تتشكلان من الصفر.	

[1] عند الاقتضاء.

التذييل 1
للملحق 1

تعريف الإشارات المستعملة في معايير التشفير الرقمي

1 العلاقة بين الخط النشيط الرقمي ومرجعي التزامن التماثلي

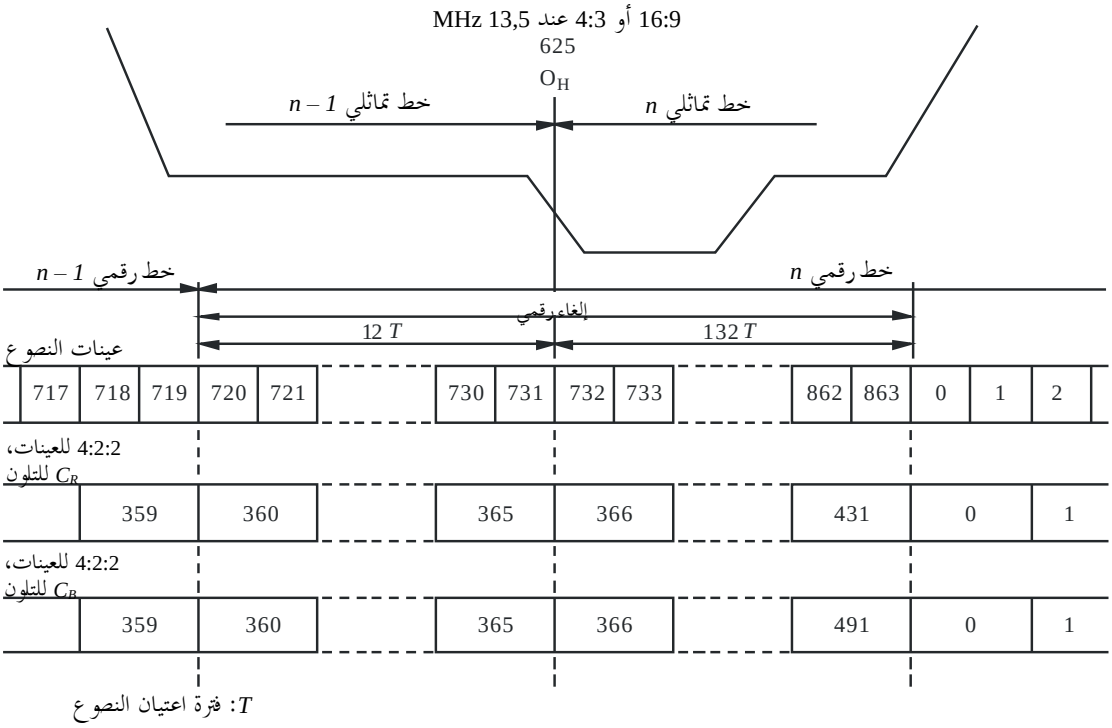
فيما يلي العلاقة بين عينات نصوع الخط النشيط الرقمي ومرجعي التزامن التماثلي:

- الشكل 1 للأنظمة ذات 625 خطاً.
- الشكل 2 للأنظمة ذات 525 خطاً.

في الأشكال، توجد نقطة الاعتيان عند بداية كل زمرة.

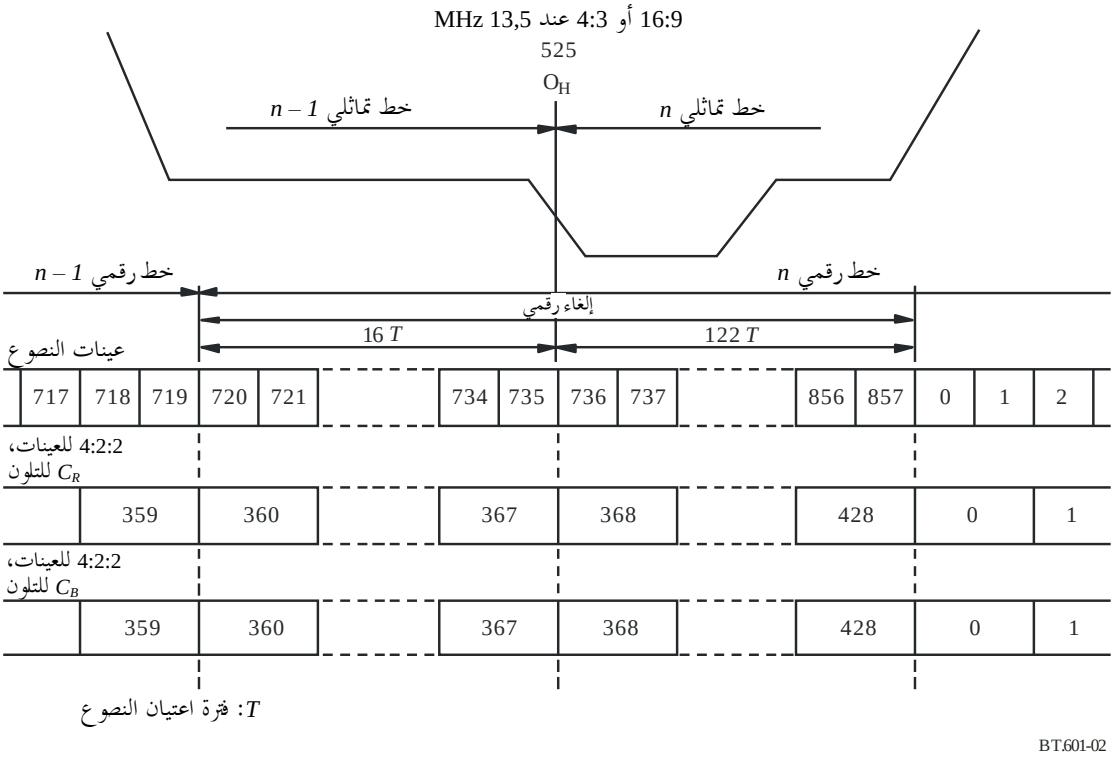
يمكن الحصول على عدد عينات فرق اللون في الأسرة 4.2.2 بقسمة عدد عينات النصوع على اثنين. ولتوزيع الخط النشيط الرقمي توزيعاً متناظراً، باعتبار التفاوتات المسموح بها، تم اختيار التوزيعين (12,132) و(16,122). وهما لا يدخلان في مواصفات الخط الرقمي ويرتبطان فقط بالسطوح البينية التماثلية.

الشكل 1



BT.601-01

الشكل 2



BT.601-02

التذييل 2
للملحق 1

خصائص الترشيح

1 إرشادات بشأن التنفيذ العملي للمراشيح

في الاقتراحات المتعلقة بالمراشيح المستعملة في عمليات التشفير وفك التشفير، افترض أن تصحيح الخاصية ($\sin x/x$) يتحقق في المراشيح اللاحقة التي تلي التحويل من الرقمي إلى التماثلي. والتفاوتات المسموح بها في نطاق تمرير المرشاح، ومصححة ($\sin x/x$) زائداً خاصية ($\sin x/x$) النظرية يجب أن تكون مماثلة لتلك المعطاة من أجل المراشيح في حد ذاتها. ويمكن التوصل إلى ذلك بسهولة أكبر إذا تمت خلال عملية التصميم معالجة المرشاح والمصحح ($\sin x/x$) ومسوي مهلة الانتشار كمجموعة واحدة.

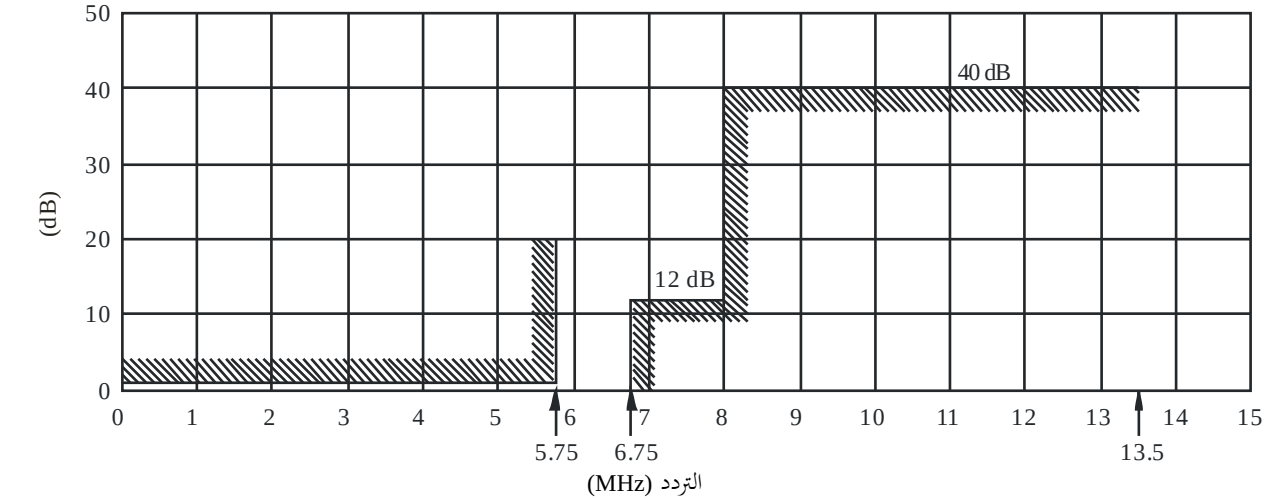
يجب أن يكون مجموع مهل الانتشار الناتجة عن ترشيح وتشفير مكونات النصوع وفرق اللون هو نفسه. وتكون مهلة الانتشار في مرشاح فرق اللون (الشكل 4a) و4b)) ضعفيها في مرشاح النصوع (الشكلان 3a) و3b)). وبما أنه يصعب تسوية هاتين المهلتين باستعمال شبكات مهل تماثلية دون تجاوز التفاوتات المسموح بها في نطاق التمرير، يوصى بتسوية الجزء الأكبر من فوارق المهل (معبر عنها بمضاعفات صحيحة لفترة الاعتيان) في المجال الرقمي. وفيما يخص تصحيح أي متبق، يتعين ملاحظة أن دارة اعتيان واستبقاء مفكك التشفير يؤدي إلى تأخر جزافي يعادل نصف فترة اعتيان.

من المعترف به أن تفاوتات نطاق التمرير لتموج الاتساع وتأخر الزمرة صارمة جداً. والدراسات الحالية تدل على ضرورة احترامها كي يمكن إنجاز عدد مهم من عمليات التشفير وفك التشفير دون التضحية النوعية الفائقة المحتملة لمعيار التشفير 4:2:2. ونظراً لمحدودية أداء أجهزة القياس المستمرة في الوقت الراهن، فإن الصانعين قد يواجهون بعض الصعوبات في التحقق بطريقة اقتصادية من مراعاة كل من مراشيح إنتاج بالجملة للتفاوتات المسموح بها. غير أنه من الممكن تصميم مراشيح بحيث تراعى عملياً الخصائص المحددة، ويجب على الصانعين أن يبذلوا ما في وسعهم، في الإنتاج بالجملة، لرص كل مرشاح لكي يراعي المقاس المقابل.

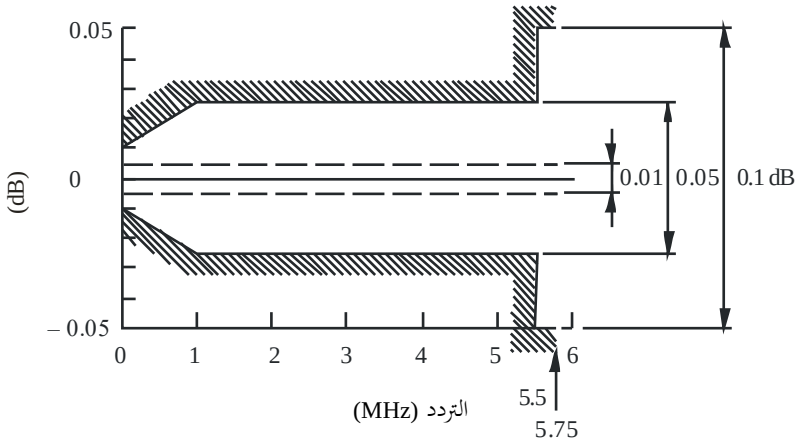
وضعت الخصائص الواردة في التذييل 2 للحفاظ ما أمكن على المحتوى الطيفي للإشارات Y وC_R وC_B طوال سلسلة إشارة المكونات. غير أنه من المدرك أن الخاصية الطيفية لفرق اللون يجب أن تقولب بواسطة مرشاح بقطع متدرج بطيء مدمج في مراقيب الصور أو عند نهاية سلسلة إشارة المكونات.

الشكل 3

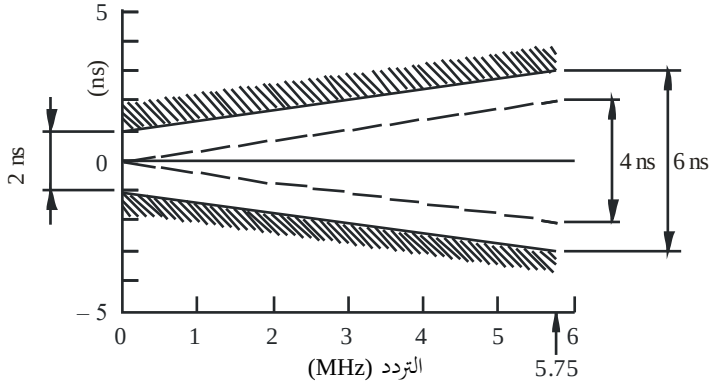
مواصفة مرشاح لإشارة النصوع أو لإشارة RGB أو فرق اللون 4:4:4



أ) نموذج معياري لإدخال خاصية الخسارة/التردد



ب) تسامح التموج للنطاق العابر



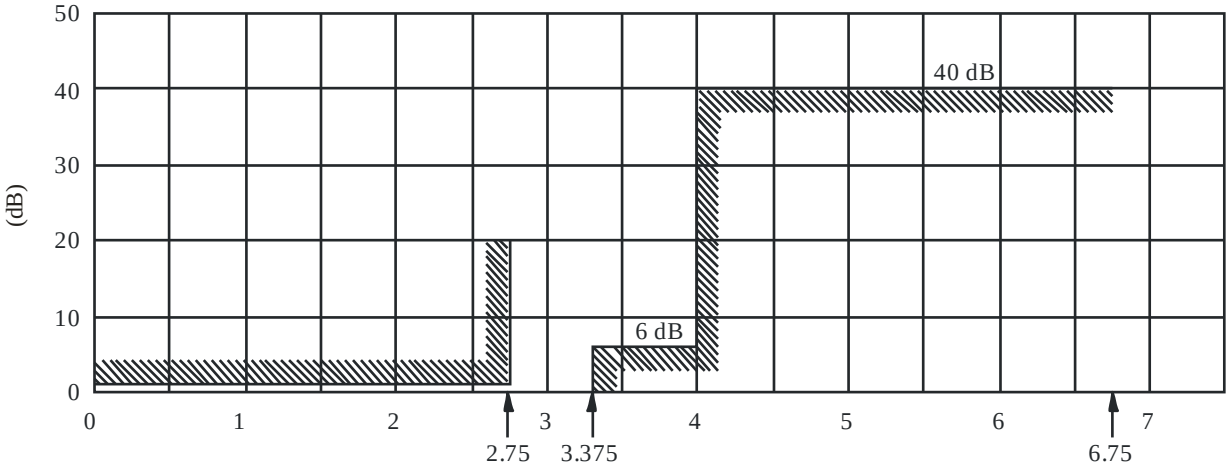
ج) تسامح تأخر الزمرة للنطاق العابر

الملاحظة 1 – إن أدنى قيم مشار إليها في ب) وج) تقابل 1 kHz (وليس 0 MHz).

BT.601-03

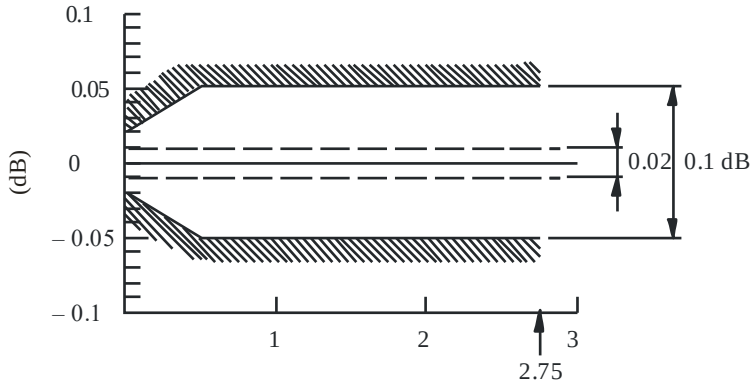
الشكل 4

مواصفة مرشاح لإشارة فرق اللون 4:2:2



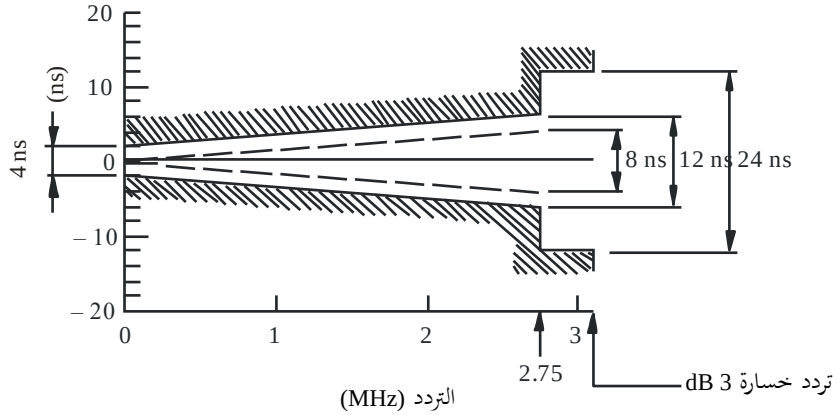
التردد (MHz)

أ) نموذج معياري لإدخال خاصية الخسارة/التردد



التردد (MHz)

ب) تسامح التموج للنطاق العابر



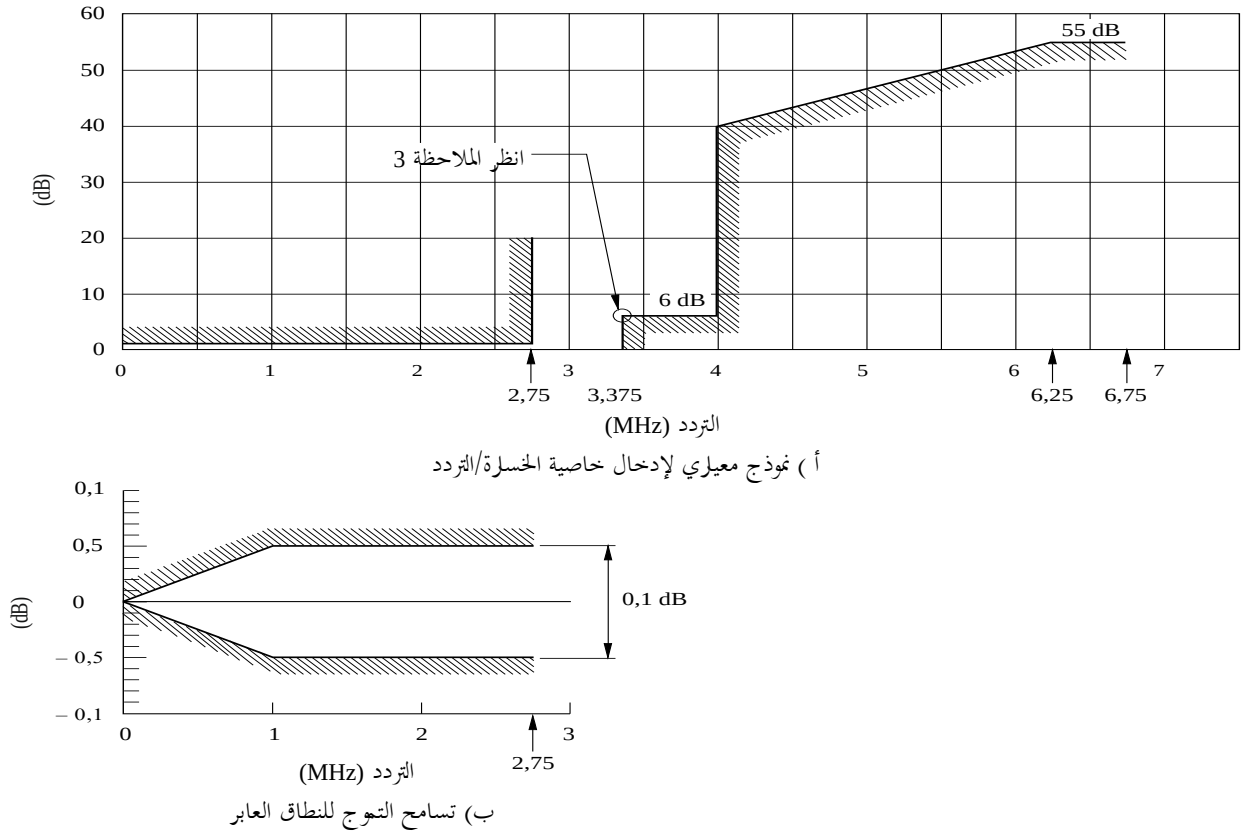
التردد (MHz)

ج) تسامح تأخر الزمرة للنطاق العابر

الملاحظة 1 – إن أدنى قيم مشار إليها في ب) وج) تقابل 1 kHz (وليس 0 MHz).

الشكل 5

مواصفة مرشاح رقمي لتحويل معدل اعتيان إشارات
فرق اللون من 4:4:4 إلى 4:2:2



أ) نموذج معياري لإدخال خاصية الخسارة/التردد

ب) تسامح التموج للنطاق العابر

BT.601-05

الملاحظات المتعلقة بالأشكال 3 و4 و5:

الملاحظة 1 – إن التموج وتأخر الزمرة محددان بالنسبة لقيمتيهما عند 1 kHz. والخطوط المتواصلة تمثل الحدود العملية والخطوط المتقطعة تقابل الحدود المقترحة للمخطط النظري.

الملاحظة 2 – في المرشاح الرقمي، إن الحدود النظرية والعملية واحدة. وتشوه المهلة صفر حسب تصميم المرشاح.

الملاحظة 3 – في المرشاح الرقمي (الشكل 5)، يجب أن تكون خاصية الاتساع/التردد (على السلالم الخطية) متناظرة بالنسبة لنقطة منتصف الاتساع، كما يشير الشكل إلى ذلك.

الملاحظة 4 – في المقترحات المتعلقة بالمراشيح المستعملة في عمليات التشفير وفك التشفير، يفترض أنه في المراشيح اللاحقة المنطبقة على إثر التحويل من رقمي إلى تماثلي، يتوفر تصحيح للخاصية ($\sin x/x$) لدارات الاعتيان والاستبقاء.

الملحق 2

اشتقاق المعاملات الصحيحة لمعادلات النصوع وفرق اللون لنظام السلسلة اللونية التقليدية

يمكن للأنظمة الرقمية إنتاج أخطاء حسابية في إشارات النصوع وفرق اللون ونتيجة للطول المحدود بالبتات لمعاملات المعادلات. كما يمكن للإشارات الرقمية للنصوع وفرق اللون أن تأخذ قيماً تختلف فيما بينها اختلافاً طفيفاً وذلك حسب تتابع معالجة الإشارة، أي التناقض بين الإشارات المقدرة كمياً بعد التحويل اللوني التماثلي والإشارات التي خضعت لتحويل لوني رقمي بعد التقدير الكمي للإشارات RGB. ولتقليل هذه الأخطاء والاختلافات إلى الحد الأدنى، ينبغي استمثال المعاملات الصحيحة للمعادلات الرقمية. وفيما يلي إجراء الاستمثال والمعاملات الصحيحة الناتجة للعديد من الأطوال بالبتات.

1 المعادلات الرقمية

في المعادلات التالية يشير الرمزان m وn إلى الأطوال بالبتات للمعاملات الصحيحة والإشارات الرقمية، على التوالي.

وتكون معادلة النصوع الرقمية لنظام السلسلة اللونية التقليدية كالتالي:

$$D'_Y = \text{INT}\left[\,0{,}299\;D'_R + 0{,}587\;D'_G + 0{,}114\;D'_B\right] \tag{1}$$

$$= \text{INT}\left[\frac{r'_{Y1}}{2^m}D'_R + \frac{r'_{Y2}}{2^m}D'_G + \frac{r'_{Y3}}{2^m}D'_B\right] \tag{2}$$

$$\approx \text{INT}\left[\frac{k'_{Y1}}{2^m}D'_R + \frac{k'_{Y2}}{2^m}D'_G + \frac{k'_{Y3}}{2^m}D'_B\right] \tag{3}$$

حيث يشير r' وk' إلى القيم الحقيقية للمعامل والمعاملات الصحيحة، على التوالي، ويتحصل عليها كالتالي:

$$k'_{Y1} = \text{INT}\left[r'_{Y1}\right] \qquad r'_{Y1} = 0.299 \times 2^m$$

$$k'_{Y2} = \text{INT}\left[r'_{Y2}\right] \qquad r'_{Y2} = 0.587 \times 2^m$$

$$k'_{Y3} = \text{INT}\left[r'_{Y3}\right] \qquad r'_{Y3} = 0.114 \times 2^m$$

وتكون معادلات فرق اللون الرقمية لنظام السلسلة اللونية التقليدية كالتالي:

$$D'_{CB} = \text{INT}\left[\frac{-0{,}299\;D'_R - 0{,}587\;D'_G + 0{,}886\;D'_B}{1{,}772} \times \frac{224}{219} + 2^{n-1}\right] \tag{4}$$

$$= \text{INT}\left[\frac{r'_{CB1}}{2^m}D'_R + \frac{r'_{CB2}}{2^m}D'_G + \frac{r'_{CB3}}{2^m}D'_B + 2^{n-1}\right] \tag{5}$$

$$\approx \text{INT}\left[\frac{k'_{CB1}}{2^m}D'_R + \frac{k'_{CB2}}{2^m}D'_G + \frac{k'_{CB3}}{2^m}D'_B + 2^{n-1}\right] \tag{6}$$

$$D'_{CR} = \mathrm{INT}\left[\frac{0{,}701\ D'_R - 0{,}587\ D'_G - 0{,}114\ D'_B}{1{,}402} \times \frac{224}{219} + 2^{n-1}\right] \tag{7}$$

$$= \mathrm{INT}\left[\frac{r'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1}\right] \tag{8}$$

$$\approx \mathrm{INT}\left[\frac{k'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1}\right] \tag{9}$$

حيث:

$$k'_{CB1} = \mathrm{INT}\left[r'_{CB1}\right] \qquad r'_{CB1} = -\frac{0,299}{1,772} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

$$k'_{CB2} = \mathrm{INT}\left[r'_{CB2}\right] \qquad r'_{CB2} = -\frac{0,587}{1,772} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

$$k'_{CB3} = \mathrm{INT}\left[r'_{CB3}\right] \qquad r'_{CB3} = \frac{0,886}{1,772} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

$$k'_{CR1} = \mathrm{INT}\left[r'_{CR1}\right] \qquad r'_{CR1} = \frac{0,701}{1,402} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

$$k'_{CR2} = \mathrm{INT}\left[r'_{CR2}\right] \qquad r'_{CR2} = -\frac{0,587}{1,402} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

$$k'_{CR3} = \mathrm{INT}\left[r'_{CR3}\right] \qquad r'_{CR3} = -\frac{0,114}{1,402} \times \frac{224}{219} \times 2^m$$

2 إجراء الاستمثال

تبين المعادلة (3) إشارة نصوع خضعت للتحويل اللوني الرقمي وهي تشمل أخطاء حسابية نتيجة للطول المحدود بالثبات للمعاملات الصحيحة. ومع ازدياد طول المعامل بالبتات، فإن قيمة المتغير المستقل (القيمة بين القوسين المربعين) في المعادلة (3) تقترب من نظيرتها في المعادلة (2) مما يؤدي إلى انخفاض الأخطاء والاختلافات بين المعادلتين. وبالتالي، يمكن النظر إلى الفارق في قيم المتغيرات المستقلة للمعادلتين (2) و(3) باعتباره قياساً لاستمثال المعامل الصحيح. ولما كان هذا الفارق يعتمد على إشارات الدخل RGB، فإن استمثال "خطأ المربع الصغري" يعرف بأنه الإجراء الذي تضبط فيه المعاملات الصحيحة بحيث يكون مجموع الفارق التربيعي عبر كل إشارات الدخل عند القيمة الدنيا، أي تقليل القيمة في المعادلة (10) إلى أدنى حد.

$$\varepsilon'_Y = \sum_{\text{for all } RGB} \left\{\left(\frac{k'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{Y3}}{2^m} D'_B\right) - \left(\frac{r'_{Y1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{Y2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{Y3}}{2^m} D'_B\right)\right\}^2 \tag{10}$$

وبالإضافة إلى تقديم الحد الأدنى للأخطاء بجذر متوسط التربيع، يقلل الاستمثال باستعمال خطأ المربع الصغري أوتوماتياً خطأ الذروة إلى أدنى حد وهو الخطأ الذي يحدث عند لون دخل معين (توليفة معينة من إشارات الدخل RGB)، فضلاً عن الاختلاف بين تتابعات معالجة الإشارات المختلفة (التحويل اللوني التماثلي والتحويل اللوني الرقمي).

ويجري إجراء الاستمثال كالتالي:

الخطوة 1: بالنسبة للقيمة الأولية لكل معامل من المعاملات الصحيحة r'_{Yj} (j = 1، 2، 3) يؤخذ أقرب رقم صحيح للقيمة الحقيقية للمعامل r'_{Yj}؛

الخطوة 2: باستخدام المعاملات الصحيحة الأولية، تحسب الأخطاء بجذر متوسط التربيع أو مجموع الفارق التربيعي (تطبيق المعادلة (10) على مدى إشارة الدخل RGB، مثلاً من 16 إلى 235 لنظام 8 بتة ترد في الفقرة 3 طريقة حساب بسيطة دون استعمال الجمع)؛

الخطوة 3: معاينة قيم الأخطاء بجذر متوسط التربيع عند زيادة/تقليل كل معامل صحيح بمقدار (1) واحد صحيح. يجب تقييم عدد 27 (3^3 =) توليفة بالإجمال لأن كل معامل يمكنه أن يأخذ ثلاث قيم، القيمة الأولية، والقيمة بزيادة (1)، والقيمة بتقليل (1)؛

الخطوة 4: تختار توليفة المعاملات التي تعطي القيمة الدنيا للأخطاء بجذر متوسط التربيع. وهذه التوليفة هي التوليفة المثلى الناتجة.

ويُطبق نفس الإجراء على معادلات فرق اللون، باستعمال المعادلتين (11) و(12).

$$\varepsilon'_{CB} = \sum_{\text{for all } RGB} \left\{ \left(\frac{k'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right.$$

$$\left. - \left(\frac{r'_{CB1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CB2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CB3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \tag{11}$$

$$\varepsilon'_{CR} = \sum_{\text{for all } RGB} \left\{ \left(\frac{k'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{k'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{k'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right.$$

$$\left. - \left(\frac{r'_{CR1}}{2^m} D'_R + \frac{r'_{CR2}}{2^m} D'_G + \frac{r'_{CR3}}{2^m} D'_B + 2^{n-1} \right) \right\}^2 \tag{12}$$

3 طريقة الحساب البسيطة لمجموع الفارق التربيعي

بالتعبير عن الفارق بين المعاملات الصحيحة والمعاملات الحقيقة كالتالي: ($\delta ij = k'ij - r'ij$)، والإشارات RGB الرقمية Xj، فإنه يمكن كتابة مجموع الفوارق التربيعية للمعادلات (10) إلى (12) كالتالي:

$$\varepsilon'_i = \frac{1}{2^m} \sum_{X_1=L}^{H} \sum_{X_2=L}^{H} \sum_{X_3=L}^{H} \left(\delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \delta_{i3} X_3 \right)^2 \tag{13}$$

حيث يشير الرمزان L وH إلى الحدين الأدنى والأعلى لمدى إشارة الدخل، على التوالي، التي تخضع معاملاتها الصحيحة للاستمثال.

وحيث إن L وH ثابتتان في النظام الرقمي قيد التقييم، فإن قيم الجمع للإشارات Xj تكون هي الأخرى ثابتة. وبالتالي يمكن التعبير عن المعادلة (13) بدلالة المتغير δ_{ij} فقط.

$$\varepsilon'_i = \frac{1}{2^m} \left\{ N_1 \left(\delta_{i1}^2 + \delta_{i2}^2 + \delta_{i3}^2 \right) + 2N_2 \left(\delta_{i1}\delta_{i2} + \delta_{i2}\delta_{i3} + \delta_{i3}\delta_{i1} \right) \right\} \tag{14}$$

حيث:

$$N_1 = \sum_{X_2=L}^{H} \sum_{X_3=L}^{H} \left(\sum_{X_1=L}^{H} X_1^2 \right) = \sum_{X_1=L}^{H} \sum_{X_3=L}^{H} \left(\sum_{X_2=L}^{H} X_1^2 \right) = \sum_{X_1=L}^{H} \sum_{X_2=L}^{H} \left(\sum_{X_3=L}^{H} X_1^2 \right)$$

$$= (H - L + 1)^2 \{H(H+1)(2H+1)/6 - (L-1)L(2L-1)/6\}$$

$$N_2 = \sum_{X_3=L}^{H} \left(\sum_{X_1=L}^{H} \sum_{X_2=L}^{H} X_1 X_2 \right) = \sum_{X_1=L}^{H} \left(\sum_{X_2=L}^{H} \sum_{X_3=L}^{H} X_2 X_3 \right) = \sum_{X_2=L}^{H} \left(\sum_{X_3=L}^{H} \sum_{X_1=L}^{H} X_3 X_1 \right)$$

$$= (H - L + 1) \{H(H+1)/2 - (L-1)L/2\}^2$$

وهكذا، يمكن ببساطة إجراء الحساب للأخطاء بجذر متوسط التربيع أو المعادلات من (10) إلى (12) باستعمال المعادلة (14).

_____