

Televisió analògica

Javier Gago Barrio

PID_00196631



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
1. Senyal de vídeo en blanc i negre	7
1.1. Nombre de línies per pantalla	7
1.2. Senyal en blanc i negre. Luminància	8
1.3. Sincronismes de línia i de camp	10
1.4. Espectre freqüencial i amplada de banda	11
1.5. Modulació del senyal d'àudio	13
1.6. Transmissió del senyal de televisió en blanc i negre. Canal de televisió	14
2. Senyal de vídeo en color	16
2.1. Compatibilitat entre televisió en blanc i negre i televisió en color	16
2.2. Elecció dels senyals de color a transmetre	17
2.2.1. Ajustos de color. Senyal patró de barres de color	18
2.2.2. Representació vectorial dels senyals de diferència de color	20
2.2.3. Reducció d'errors en transmetre diferència de colors	21
2.2.4. Amplitud, saturació i brillantor del color	22
2.3. Modulació del senyal de color. Senyals $U'(t)$ i $V'(t)$	22
2.3.1. Desmodulació síncrona del senyal de crominància	23
2.4. Senyal de vídeo compost en color	24
2.4.1. Ponderació dels components del vector crominància ...	26
2.5. Espectre freqüencial del senyal de televisió en color	27
3. Sistemes de televisió en color analògics	30
3.1. Sistema NTSC. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color	31
3.1.1. Freqüència subportadora en NTSC	31
3.1.2. Senyals I Q en NTSC	32
3.1.3. Codificador NTSC	33
3.2. Sistema PAL. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color	34
3.2.1. Senyals U V en PAL	35
3.2.2. Freqüència subportadora en PAL	36
3.2.3. Codificador PAL	38
3.3. Sistema SECAM. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color	39
3.3.1. Senyals DR i DB en SECAM	39
3.3.2. Codificador SECAM	39

Bibliografia	41
Annex	42

Introducció

En aquest mòdul es presenten de manera detallada els fonaments del senyal de televisió analògica. En primer lloc, s'expliquen les característiques del senyal en blanc i negre i a continuació es detalla com es va incrustar la informació de color a fi de preservar la compatibilitat amb els sistemes de blanc i negre. Finalment, es detallen les característiques dels tres principals sistemes mundials de televisió analògica: NTSC, PAL i SECAM.

En la figura següent es mostren, en taronja, els blocs de la cadena televisiva que es desenvolupen en aquest mòdul:

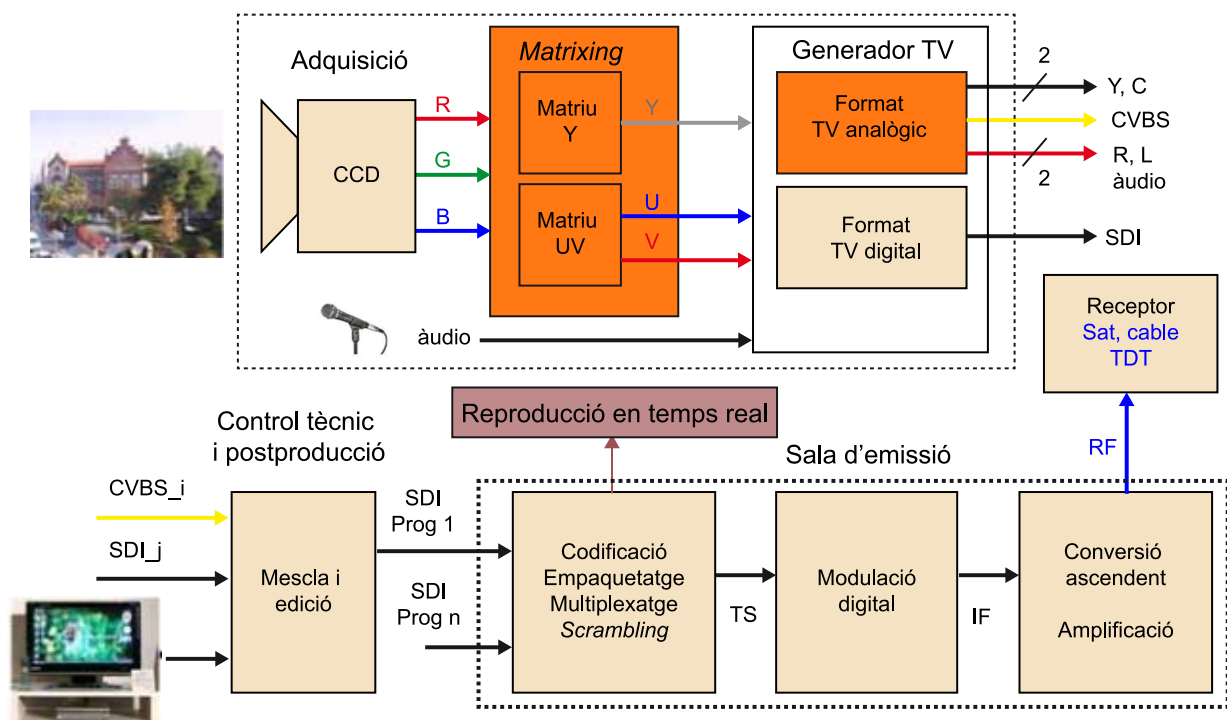


Figura 1. Cadena televisiva. En taronja s'indica el bloc que es desenvolupa en aquest mòdul

El sistema de televisió analògica va ser el primer a implantar-se perquè no necessita la tecnologia digital desenvolupada en les últimes dècades. Permet transmetre, rebre i emmagatzemar programes audiovisuals en forma de senyals analògics amb una qualitat generalment inferior a la de la televisió digital i amb escassos serveis per a l'usuari (serveis que sí permet la televisió digital).

El senyal generat és un senyal compost amb la informació de luminància (luminositat en blanc i negre de les imatges), crominància (color de la imatge) i àudio. Aquest senyal es diu vídeo compost (CVBS) i es forma a partir dels senyals R, G i B. Per qüestions de compatibilitat entre sistemes de televisió en blanc i negre i els de color, i per a estalviar amplada de banda per a enviar la

informació, els senyals RGB es converteixen en uns altres que, com a contrapartida, ofereixen una qualitat inferior als RGB: els senyals YUV, en què la Y és el senyal de luminància (5,5 MHz d'amplada de banda), i els UV, que són els senyals de crominància (2,75 MHz d'amplada de banda) o diferència de color. Concretament, els senyals UV consisteixen en la diferència entre el vermell (R) i el blau (B) respecte a la luminància (Y). Matemàticament parlant, $U = B - Y$ i $V = R - Y$.

L'esquema de la televisió analògica respondria al diagrama de blocs de la figura 2:

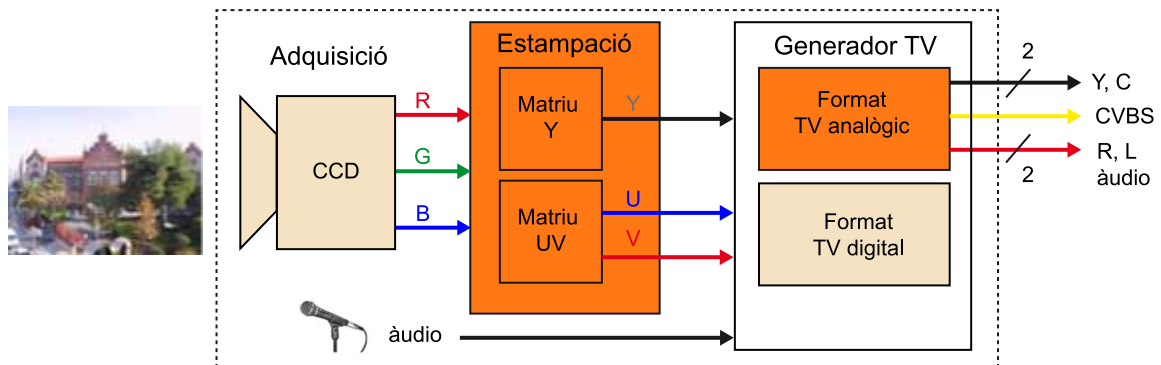


Figura 2. Diagrama de blocs de la televisió analògica

Basant-se en aquest esquema, s'han desenvolupat diferents estàndards que es diferencien entre ells pel nombre d'imatges per segon reproduïdes en la pantalla, pel nombre de línies de cada imatge i per com es modula la informació de luminància, crominància i so per a formar un únic senyal que es transmeti amb la mínima amplada de banda possible. Aquests estàndards són, fonamentalment, l'NTSC americana, el SECAM francès i el PAL europeu.

1. Senyal de vídeo en blanc i negre

Tots els estàndards de televisió en color analògics deriven dels primers estàndards en blanc i negre, per això s'explica en primer lloc el senyal en blanc i negre, que representa la luminància de les imatges. També s'explica en aquest capítol com s'incrusta el senyal d'àudio en el vídeo i com s'introdueix el senyal de televisió complet en un canal assignat per a la transmissió.

1.1. Nombre de línies per pantalla

El nombre de línies per pantalla determina la resolució vertical de la imatge que s'ha de reproduir. És diferent en cada estàndard actual i ha variat al llarg del temps en funció dels avenços tecnològics en la fabricació de les pantalles i càmeres, i en les tècniques de transmissió del senyal de televisió.

Quan s'usava el disc de Nipkow, als inicis de la televisió cap al final dels anys 1920, la resolució va evolucionar des de 30 línies per pantalla amb 12,5 imatges per segon, fins a estabilitzar-se en 180 línies (a Alemanya i a França) i 240 línies (a Anglaterra i als EUA). En aquella època hi havia dos problemes:

Limitació de l'amplada de banda. Com més informació s'envia, més complex és el sistema d'enviament i recepció, la qual cosa limita el nombre d'imatges que es poden transmetre per segon. La freqüència de les imatges s'obtenia mitjançant un divisor de freqüència aplicat al senyal de la xarxa elèctrica, que té un valor de 50 Hz a Europa i 60 Hz als EUA. La limitació d'amplada de banda implicava que la freqüència de les imatges màxima fos la de la xarxa elèctrica dividida per 2. És a dir, 25 imatges per segon a Europa i 30 als EUA.

Efecte *flicker* (o pampallugueig). El nombre d'imatges per segon determinava la freqüència del senyal que s'usava per a sincronitzar les línies de la pantalla. Aquest senyal s'obtenia fent passar el senyal de la xarxa elèctrica per transformadors i multiplicadors de freqüència. Les imperfeccions d'aquests transformadors feien que aquest senyal fos inestable i, com a resultat de la seva variació, s'observava un pampallugueig en la intensitat de llum (*flicker*) que era molest per a l'espectador. Aquest efecte desapareix si la freqüència de les imatges supera un valor crític anomenat *freqüència de fusió*. A partir d'aquesta freqüència l'observador és incapaç de seguir la variació de llum, i la veu com una intensitat contínua. La freqüència de fusió està entre 40 i 45 Hz. Per tant, per a evitar el *flicker*, s'hauria de transmetre imatges a una freqüència per sobre d'aquests valors.

Amb la invenció de l'iconoscopi durant els anys precedents a la Segona Guerra Mundial, es van utilitzar tècniques d'entrellaçament que evitaven l'efecte *flicker*, i que respectaven, al mateix temps, una amplada de banda acceptable.

Aquest mètode, inventat el 1927, consisteix a escanejar una imatge només en les línies imparelles, i la imatge següent, només en les línies parelles. Cadascuna d'aquestes "mitges imatges" es diu *camp*, concretament, tenim el camp parell (imatge que solament conté línies parelles) i el camp imparell (imatge que solament conté línies imparelles). Tenint en compte que la xarxa elèctrica era de 50 Hz a Europa i 60 Hz als EUA, una televisió de **tub de raigs catòdics** (CRT) europea transmetia 50 camps per segon, però l'ull veia realment 25 imatges completes per segon. Per tant, s'estava per sobre de la freqüència de fusió ($50 \text{ Hz} > 40 \text{ Hz} - 45 \text{ Hz}$). En el cas dels EUA, l'espectador veia 60 camps (mitges imatges) per segon, és a dir, 30 imatges completes per segon. A més, gràcies a tècniques com l'entrellaçament, es va poder augmentar la definició a 405 línies (Anglaterra), 441 línies (EUA i Alemanya) o 445 línies (França).

Finalment, amb l'increment de les grandàries dels CRT, que implicaven un augment de la grandària de les imatges, el nombre de línies es va incrementar fins als valors que actualment mostren els estàndards analògics, que es veuran en l'apartat "Sistemes de televisió en color analògics". Els experts en tractament d'imatges de l'època van determinar que el valor òptim del nombre de línies per imatge havia d'estar entre 500 i 700.

1.2. Senyal en blanc i negre. Luminància

En plantejar-se unificar, en la mesura del possible, el senyal utilitzat per a la retransmissió de programes de televisió a diferents llocs del món, es van crear tres sistemes estàndard que tenien en comú dues característiques:

- El senyal de televisió seria únic i combinaria la informació de vídeo, blanqueig i sincronització. Aquest senyal es denomina *senyal de vídeo en banda base* (VBS).
- El senyal s'entrellaçaria amb un escaneig, normalment d'ordre 2 (és a dir, camp parell i imparell, com l'explicat més amunt), ja que presenta el millor compromís entre amplada de banda i efecte *flicker*.

La informació de vídeo en blanc i negre es representa a partir de l'evolució de la luminància de la imatge al llarg de la línia, i línia rere línia al llarg de la imatge. Es genera per amplitud de tensió, és a dir, té un rang dinàmic de 0,7 V, en què el valor 0 V correspon al nivell de negre pur i el valor 0,7 V al de blanc pur. Els valors intermedis corresponen als diferents valors de grisos. Per a indicar on comença cada línia, s'inclou un impuls de sincronisme d'amplitud -0,3 V. D'aquesta manera, el senyal compost VBS té un rang dinàmic d'1 V (0,7 V per a vídeo i 0,3 V per al sincronisme).

En la figura 3 es pot apreciar el recorregut de dues línies consecutives en la pantalla amb els seus retorns de línia, i en la figura 4 s'observa la forma temporal d'una línia del senyal VBS:

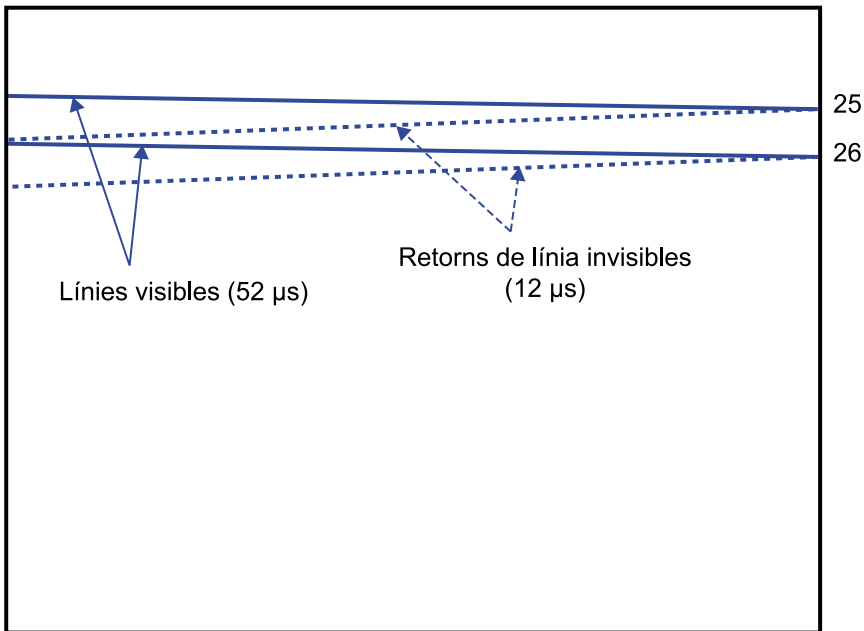


Figura 3. Escombratge de dues línies consecutives en la pantalla amb els retorns de línia

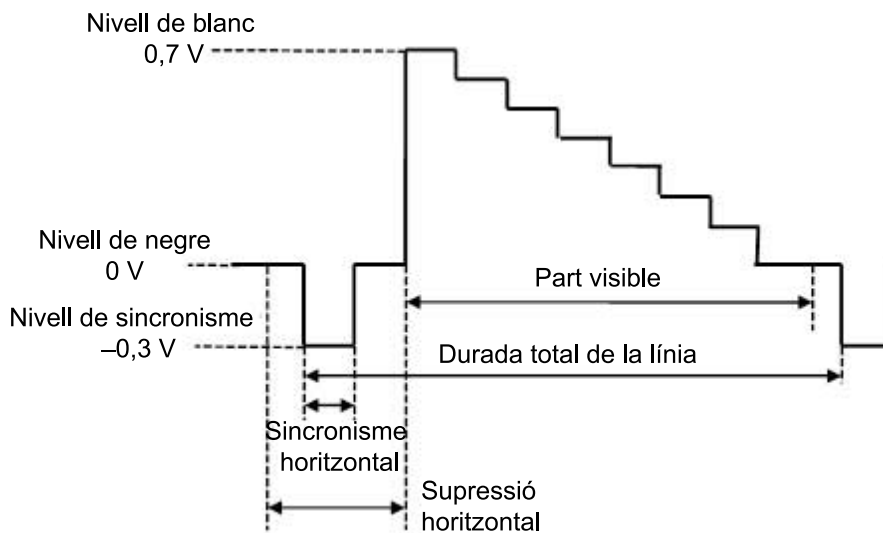


Figura 4. Forma temporal del senyal VBS corresponent a una línia

El senyal VBS necessita sincronismes extres per a controlar el final d'una imatge i el començament de la següent. La manera d'implementar aquests sincronismes, i altres de necessaris per a transmetre imatges en color, varia en els tres estàndards desenvolupats, tal com es veurà en l'apartat "Sistemes de televisió en color analògics".

1.3. Sincronismes de línia i de camp

El senyal de televisió ha d'indicar d'alguna manera al receptor de televisió quan comença una línia i quin número de línia és, i també quan comença un camp nou. Per a això, la càmera o càmeres que adquireixen el senyal de vídeo incorporen al senyal uns impulsos de tensió negativa que es denominen *sincronismes*. Hi ha dos tipus de sincronismes:

- El **sincronisme horitzontal** (o de línia). Aquest sincronisme té una durada de prop de $12 \mu\text{seg}$, que s'incorpora al principi del senyal de línia, just quan ha de començar l'escombratge de línia (figura 4). Durant aquests $12 \mu\text{seg}$, el sistema d'escombratge del monitor té temps de posicionar-se a l'esquerra de la pantalla per a pintar una nova línia. El senyal de sincronisme horitzontal el crea un circuit de la càmera cada vegada que inicia una exploració de línia. El sincronisme es transmet amb el senyal de vídeo i, en reproduir-se en el receptor de televisió, el circuit d'escombratge del monitor inicia el seu recorregut activat pel senyal de sincronisme.
- El **sincronisme vertical** (o de camp). Una vegada reproduïdes totes les línies d'un camp (l'imparell o el parell), el mateix senyal de vídeo indica al receptor que comença un nou camp. Això es fa mitjançant el sincronisme vertical, que consta d'una sèrie d'impulsos repetits que duren el mateix que diverses línies. Lògicament aquestes línies de sincronisme vertical **no** són visibles, i la seva durada (prop d' $1,6 \text{ mseg}$) és la que necessita el circuit d'escombratge per a posicionar-se novament en la part alta de la pantalla i iniciar un nou camp. En la figura 5 es pot apreciar el recorregut de totes les línies de la pantalla en el camp imparell (en blau) i en el camp parell (en vermell), amb els retorns de línia i els retorns de camp, en un sistema de 625 línies entrelaçades.

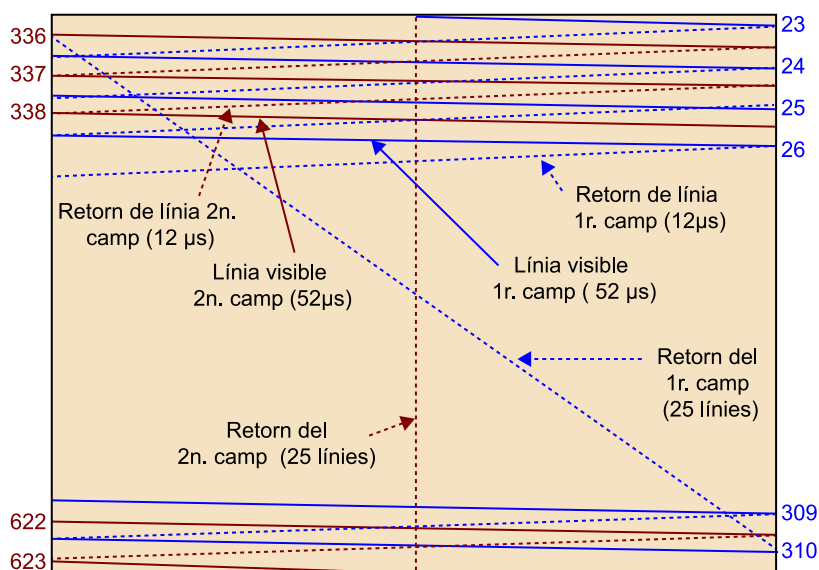


Figura 5. Escombratge de les línies en la pantalla d'un sistema de 625 línies entrelaçades

En la figura 6 es poden observar els senyals de sincronisme de línia i de camp corresponents a aquest sistema de 625 línies entrelaçades.

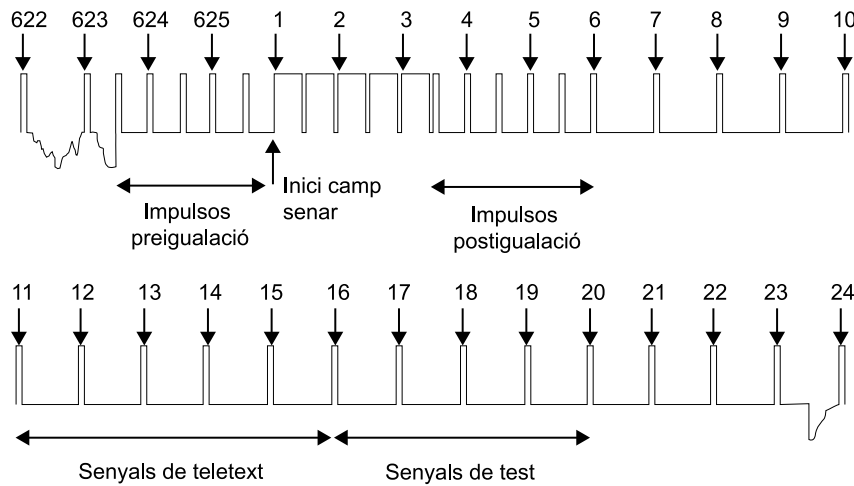


Figura 6. Sincronisme vertical i de camp

En aquestes línies no visibles, a més del sincronisme vertical, se sol enviar informació extra, com per exemple, teletext, codis de l'emissora, senyals de control de qualitat, etc. (en el sistema PAL, la informació de teletext i test s'envia en 17,5 línies per quadre).

Nota

En el sistema PAL, que es desenvolupa més extensament en l'apartat "Sistemes de televisió en color analògics", el sincronisme vertical es correspon amb 25 línies no visibles. És l'anomenat *esborrament vertical*. Això fa que, de les 625 línies que s'envien cada dos camps, solament 575 siguin efectives/visibles $[625 - (25 \times 2)]$.

1.4. Espectre freqüencial i amplada de banda

A partir de la forma temporal del senyal VBS, se'n pot estimar l'espectre freqüencial i l'amplada de banda, dades fonamentals per a dissenyar un bon sistema de retransmissió i per a modificar, més endavant, el senyal VBS, incloent-hi la informació de color de manera que sigui compatible amb la transmissió en blanc i negre.

En un sistema de 625 línies entrelaçades (com el sistema PAL que es veurà en l'apartat "Sistemes de televisió en color analògics"), cada imatge té dos camps (l'imparell i el parell). Cada camp conté 312,5 línies (la meitat del total). Si la xarxa elèctrica funciona a 50 Hz (Europa), llavors es processen 50 camps per segon, en total, es generen 15.625 línies per segon $(312,5 \times 50)$. Per tant, si considerem que la informació de vídeo entre una línia i la següent és pràcticament la mateixa, es pot afirmar que el senyal VBS és, aproximadament, un senyal periòdic de freqüència 15.625 Hz. És a dir, la durada de la línia ha de ser $64 \mu\text{s}$ $(1/15.625)$. Aquesta durada, com s'ha vist, correspon a $12 \mu\text{seg}$ de sincronisme horitzontal (no visible) més $52 \mu\text{seg}$ d'informació útil (luminància Y de la línia).

L'espectre freqüencial del senyal VBS ha de contenir un component fonamental a la freqüència de 15.625 Hz, i harmònics a freqüència múltiple de la fonamental. D'altra banda, es pot considerar que una imatge i la següent també

contenen aproximadament la mateixa informació. Per tant, una línia d'una imatge i la mateixa línia de la imatge següent han de tenir aproximadament la mateixa forma temporal. Dit d'una altra manera, el senyal de línia es repeteix a una freqüència de 50 Hz. O, el que és el mateix, el senyal VBS es modula mitjançant una moduladora de 50 Hz, la qual cosa fa que en l'espectre freqüencial apareguin bandes laterals en cada harmònic, separades 50 Hz.

L'espectre freqüencial d'un senyal VBS d'aquestes característiques es mostra en la figura 7:

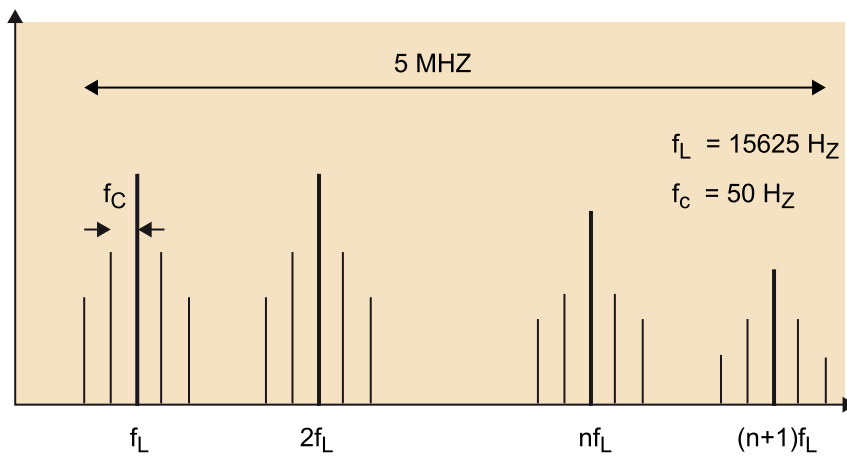


Figura 7. Espectre freqüencial d'un senyal VBS d'un sistema de 625 línies a una velocitat de 50 imatges entrelaçades (o camps) per segon

L'amplada de banda es pot estimar calculant la transformada de Fourier d'un senyal VBS típic. Si es tractés d'una imatge amb un to gris uniforme, el senyal de luminància seria constant, i l'espectre freqüencial solament reflectiria la variació temporal que provoquen els impulsos de sincronisme. No obstant això, per a calcular la màxima freqüència d'un senyal VBS, s'ha de considerar una imatge formada per les barres negres i blanques més fines que pugui distingir l'ull, ja que en aquest cas el senyal VBS reflectirà la variació màxima de luminància.

Imatge de barres verticals

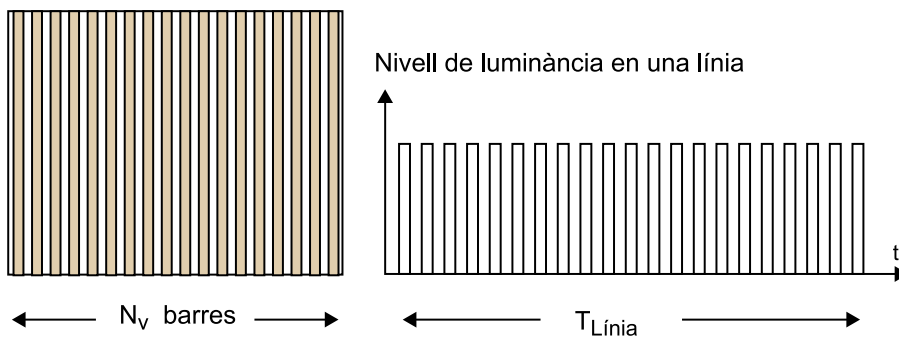


Figura 8. Senyal de vídeo d'una imatge que varia la lluminositat de màxima a mínima en cada píxel consecutiu.

L'amplada d'una de les barres de la figura 8 correspon a l'amplada d'un píxel de la pantalla, o rectangle mínim de representació visual en la pantalla. En un format de pantalla de 4:3, el píxel té una relació de 4 unitats de longitud d'amplada per 3 d'altura, mentre que en un format 16:9, la relació és de 16 unitats de longitud d'amplada per 9 d'altura:

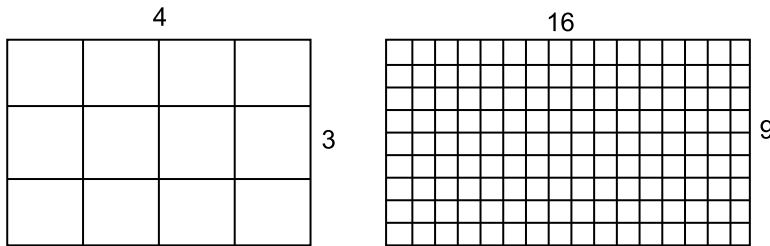


Figura 9. Relació d'aspecte en formats 4:3 i 16:9

En un sistema de 625 línies entrelaçades, una imatge té 312 línies ($625/2=312,5$), que es corresponen amb 312 píxels en vertical. Aplicant una relació d'aspecte de 4:3 a la dimensió del píxel, es pot deduir que una línia té 416 ($312 \times 4/3=416$) píxels. És a dir, en una línia hi pot haver un màxim de 416 píxels amb diferent lluminositat. Així doncs, la freqüència del senyal de barres de la figura 8 valdria:

$$f_{\text{barra}} = 416 \text{ pix} \cdot 15625 \text{ Hz} = 6,5 \text{ MHz} \quad (1)$$

Aquesta freqüència es considera, en la pràctica, com l'amplada de banda d'un sistema de vídeo de 625 línies entrelaçades a una **freqüència de camp de 50 Hz**. En un sistema que tingués menys línies, tindria proporcionalment menys píxels per línies i, per tant, proporcionalment menys amplada de banda. No obstant això, encara que en els estudis de televisió es treballa amb la màxima amplada de banda que ens ofereix el senyal per a no perdre qualitat, quan es transmet, se sol filtrar prèviament a una amplada de 5 MHz. Per això és comú considerar que el senyal de televisió té una **amplada de banda estàndard de 5 MHz**.

1.5. Modulació del senyal d'àudio

A més de la informació de vídeo compost, VBS, el senyal de televisió conté el senyal d'àudio que acompanya el vídeo. Per a situar-lo en el mateix canal que el senyal de vídeo i formar un únic senyal de televisió, es modula analògicament. La portadora d'aquesta modulació està en una freqüència lleugerament superior a l'amplada de banda del senyal de vídeo i sol tenir una potència significativament inferior a la del vídeo per a reduir interferències. L'amplitud de la portadora i l'amplada de banda del senyal d'àudio modulats es limiten per a no interferir amb l'espectre freqüencial del senyal de vídeo, tal com es mostra en la figura 10. La potència de la portadora d'àudio sol ser prop de 10 dB inferior a la portadora de vídeo.

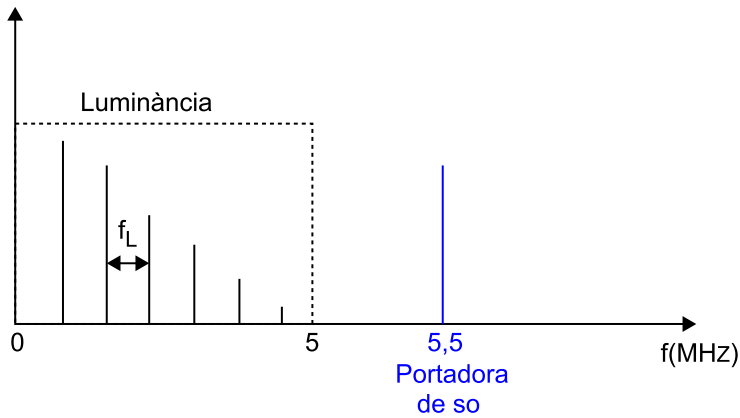


Figura 10. Espectre freqüencial d'un senyal de televisió amb el vídeo i l'àudio

Normalment s'usa modulació FM (freqüència modulada) en lloc d'AM (amplitud modulada) perquè conserva millor la qualitat del so. En contrapartida, la modulació FM ocupa més amplada de banda, per la qual cosa la probabilitat d'interferir en el senyal de vídeo és més gran.

AM i FM

Mentre que la modulació en AM necessita una amplada de banda d'un valor el doble que el de l'amplada de banda del senyal d'àudio (aproximadament 30 kHz), l'amplada de banda que necessita la modulació en FM depèn de l'índex de modulació: si la desviació de freqüència màxima és de 50 kHz (valor usat en els sistemes estàndards), l'amplada de banda és aproximadament de 130 kHz. Per tant, es pot determinar que un valor per a la portadora de so podria ser de 200 kHz o més per sobre de l'última freqüència significativa de l'espectre del senyal de vídeo.

Trobareu més informació sobre la modulació del so en l'annex d'aquest mòdul.

1.6. Transmissió del senyal de televisió en blanc i negre. Canal de televisió

Per a transmetre el senyal de televisió s'ha de modular amb una freqüència portadora corresponent al canal assignat prèviament. L'amplada de banda del canal, i per tant del senyal, ha de ser un compromís entre l'eficiència espectral del mitjà de comunicació i la qualitat amb què es poden reproduir les imatges enviades. Per tant, perquè el nombre de canals que es transmet sigui màxim, l'amplada de banda dels senyals modulats ha de ser la mínima segons el compromís esmentat. Això s'aconsegueix amb una modulació AM, en la qual s'elimina o es redueix al mínim una de les bandes laterals. Aquest tipus de modulacions es denomina *modulació en AM amb banda lateral vestigial* (BLV).

En el cas de la televisió, la banda que s'elimina és la inferior, i es fa mitjançant un filtre posterior a la modulació. L'espectre del senyal modulats en el sistema PAL es pot veure en la figura 11. D'aquesta manera es pot assignar una amplada de banda de canal inferior a 10 MHz, que seria l'amplada de banda d'un senyal de televisió de 5 MHz modulats en AM amb doble banda lateral.

Vegeu també

En l'annex d'aquest mòdul didàctic s'amplia aquesta informació.

Vegeu també

Tornarem sobre l'espectre del senyal modulats en el sistema PAL en l'apartat "Sistema PAL. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color".

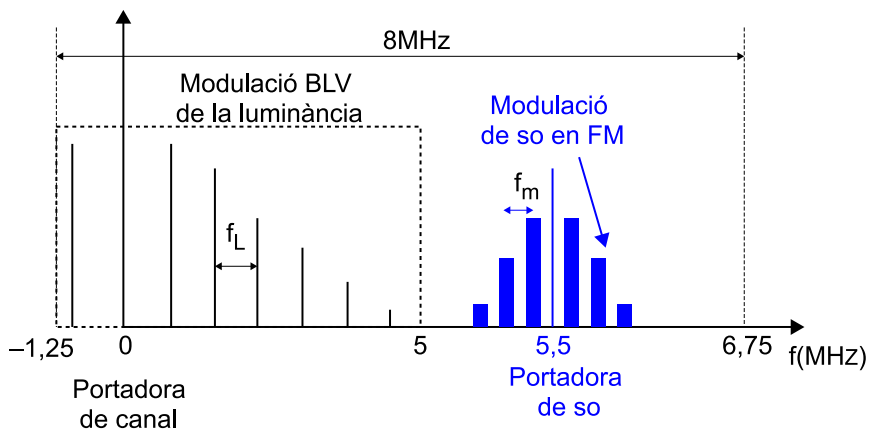


Figura 11. Espectre freqüencial d'un senyal de televisió modulad en AM amb banda lateral inferior vestigial en sistema PAL

L'esquema global de la formació del senyal de televisió en blanc i negre amb àudio es resumeix en el diagrama de la figura 12:

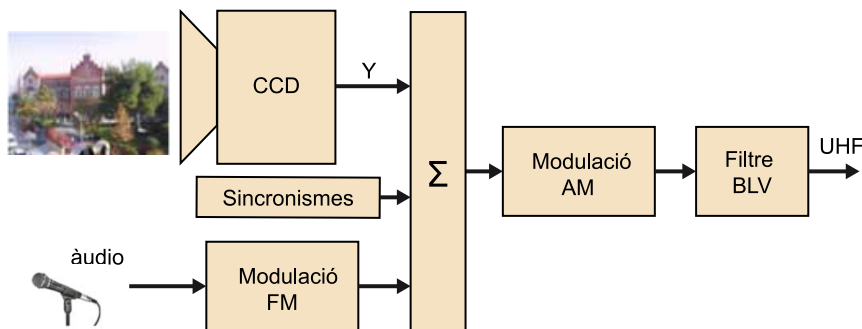


Figura 12. Esquema global de la formació del senyal de televisió en blanc i negre amb àudio

La càmera de vídeo capta la luminància (Y) de la imatge, la corregeix en gamma i hi afegeix els sincronismes de línia i de quadre. El micròfon capta l'àudio i el modula en FM amb una portadora de 5,5 MHz. Se suma la luminància, sincronismes i àudio en FM, i el resultat es modula en AM amb la portadora que s'indiqui al canal d'UHF pel qual es transmetrà el senyal de televisió. Finalment, mitjançant un filtre passabanda, s'adequa l'amplada de banda a 8 MHz, tal com s'indica en la figura 11. Així es conforma la modulació a banda lateral vestigial (BLV), i s'elimina gran part de la banda lateral inferior (solament queda 1,25 MHz, tal com es pot veure en figura 11).

2. Senyal de vídeo en color

Una vegada explicat el mecanisme de formació del senyal de vídeo en blanc i negre, en aquest apartat es descriu la tècnica utilitzada per a afegir la informació de color. Els requisits són els següents:

- El nou senyal en color també s'ha de poder reproduir amb sistemes en blanc i negre.
- En els nous sistemes en color també s'han de poder reproduir les velles emissions en blanc i negre (encara que ja fa dècades que no s'emet en blanc i negre, al principi de l'emissió en color es transmetia simultàniament en tots dos sistemes).
- No hi ha d'haver interferències entre la informació del color i la de la luminància.
- El nou senyal de televisió en color ha d'ocupar la mateixa amplada de banda que reserven els canals en blanc i negre per a la transmissió.

2.1. Compatibilitat entre televisió en blanc i negre i televisió en color

El primer requisit per a introduir informació de color en un sistema de televisió en blanc i negre va ser que tots dos sistemes fossin compatibles. És a dir, que el nou senyal en color pogués ser reproduït pel vell sistema en blanc i negre, i que les emissions en blanc i negre es poguessin veure amb els nous sistemes en color, lògicament, en tots dos casos reproduint solament la informació de luminància.

Per a complir aquest primer requisit es van haver d'escollir els senyals a partir dels quals es forma la informació de color. Òbviament, no es podia enviar amb els senyals RGB, ja que aquests tres senyals no tenen informació directa de la luminància o informació en blanc i negre i escales de grisos. La solució va ser enviar la luminància Y i dos dels tres colors (R o G o B). El tercer color es pot obtenir indirectament a partir dels altres dos, i la informació de Y aplicant la llei de Gasmman, que s'explica en el mòdul "Adquisició del senyal de vídeo":

$$Y = 0,3 \cdot R + 0,59 \cdot G + 0,11 \cdot B \quad (2)$$

El segon requisit és modular la informació dels tres senyals (luminància més dos colors) amb la finalitat d'empaquetar-los en un sol senyal amb una amplada de banda igual que la d'un senyal en blanc i negre, i poder-lo enviar al mateix canal de comunicació. El procés de modulació ha de vetllar perquè no apareguin interferències entre la luminància i la informació del color.

De tot això ens n'ocuparem en els apartats següents.

2.2. Elecció dels senyals de color a transmetre

La càmera de televisió que capta les imatges que es transmetran té tres sensors CCD, un per cada color primari (al començament de la televisió eren tubs de rajos catòdics), que converteixen la llum que capten en un senyal elèctric proporcional a la intensitat de la llum o brillantor. Una altra possibilitat és fer servir un sensor de llum blanca i obtenir el senyal RGB mitjançant lents que filtren els components de llum i deixen passar només el component vermell (R), verd (G) i blau (B).

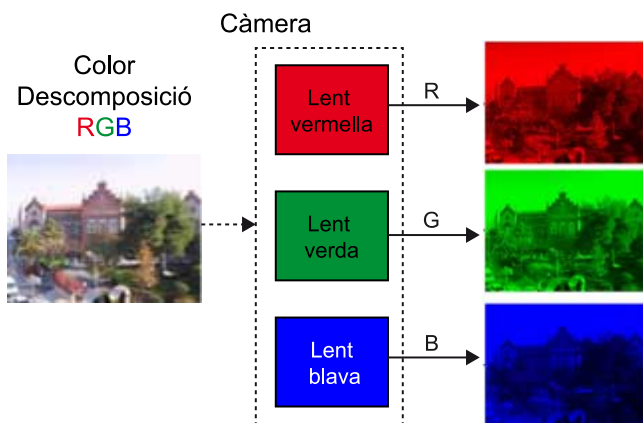


Figura 13. Descomposició d'una imatge captada per una càmera de televisió en els seus tres colors primaris: R, G i B

Com ja hem comentat, els senyals que es transmetran són la luminància (Y) i dos dels colors primaris. La Y s'obté processant els senyals RGB segons la llei de Gasmman. Per a escollir els colors que s'envien, es descarta el que doni valors de tensió més petits per a una imatge típica, ja que aquest senyal tindrà una relació senyal-soroll (SNR) pitjor i serà més sensible a les interferències.

Atès que la llei de Gasmman dona més pes al senyal G (0,59) que als R i B (0,3 i 0,11 respectivament), es pot deduir que els valors de G són més petits que els de R i B, per la qual cosa els senyals que s'envien solen ser Y, R i B.

Hi ha un altre aspecte que s'ha de tenir en compte en la transmissió: l'amplada de banda dels senyals a transmetre. Els senyals R i B tenen una amplada de banda similar al de Y, que, com s'ha vist en analitzar l'espectre del vídeo en blanc i negre, és d'uns 5 MHz. Les altes freqüències de l'espectre corresponen a grans variacions de la brillantor, és a dir, de la intensitat de la llum. Les variacions de brillantor dels senyals R i B estan molt relacionades amb les varia-

cions de luminància (figura 14), per la qual cosa els senyals de **diferència de color** R-Y i B-Y tenen menys variacions d'intensitat a alta freqüència que els dels colors primaris R i B (figura 15). Per tant, hi ha un estalvi en amplada de banda que és molt útil per a la transmissió del senyal compost. En concret, tant R-Y com B-Y tenen una amplada de banda d'aproximadament 2,75 MHz cada una. Així doncs, seran R-Y i B-Y els senyals que s'enviaran juntament amb la luminància Y.

El senyal R-Y es diu V' , i el senyal B-Y, U' .

Vegeu també

En l'apartat "Ponderació dels components del vector crominància", en el qual es descriurà el senyal de vídeo compost, es veurà que els senyals U' i V' es converteixen en senyals U i V quan es multipliquen per un factor constant correctiu. I aquests seran els senyals que finalment s'enviïn, és a dir, els senyals que es coneixen amb el nom de YUV.

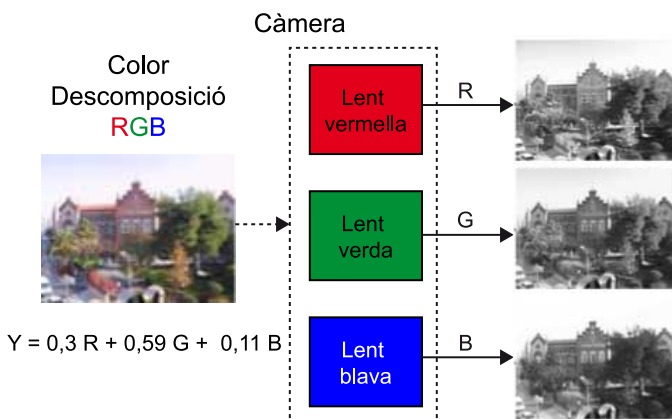


Figura 14. Senyals de brillantor dels tres colors primaris d'una imatge

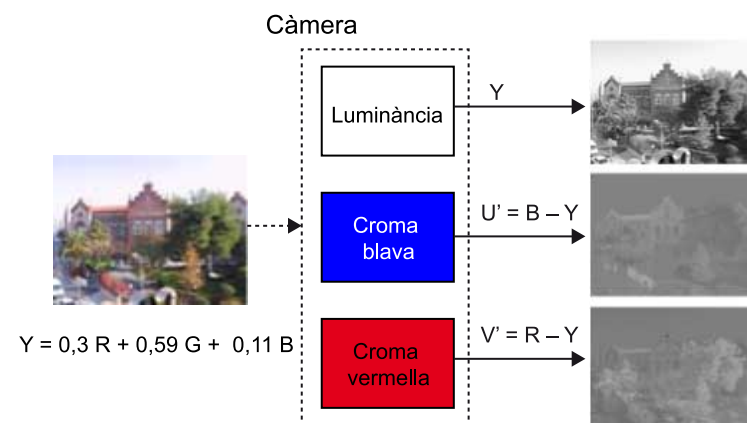


Figura 15. Senyals de brillantor de la luminància i la diferència de colors R-Y i B-Y d'una imatge

2.2.1. Ajustos de color. Senyal patró de barres de color

Per a ajustar els nivells d'amplitud de tensió que ha de donar un sistema de televisió, se sol treballar amb senyals patró, dels quals se saben els nivells de cada color. El més utilitzat és el senyal patró de barres de color:

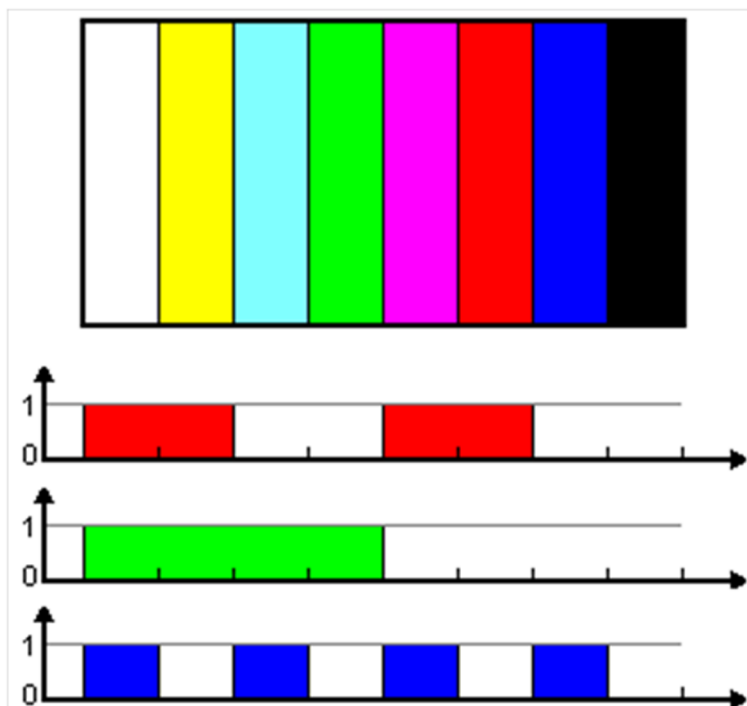


Figura 16. Patró de barres de color i els senyals RGB corresponents

El color blanc pur és la suma dels tres colors primaris, cadascun amb la seva intensitat màxima (1 V). El color negre, o absència de llum, no té component en cap dels tres colors primaris (0 V). La resta de colors, o són colors primaris o són combinacions d'aquests, com es mostra en la taula següent:

	R	G	B	Y	$U'=B-Y$	$V'=R-Y$
Blanc	1	1	1	1,00	0	0
Groc	1	1	0	0,89	-0,89	0,11
Cian	0	1	1	0,70	0,30	-0,70
Verd	0	1	0	0,59	-0,59	-0,59
Magenta	1	0	1	0,41	0,41	0,59
Vermell	1	0	0	0,30	-0,30	0,70
Blau	0	0	1	0,11	0,89	-0,11
Negre	0	0	0	0,00	0	0

Representació vectorial dels senyals de diferència de color

Els senyals de diferència de color també es poden expressar com a combinacions de colors primaris, a partir de les expressions:

$$U' = B - Y = -0,3 \cdot R - 0,59 \cdot G + 0,89 \cdot B \quad (3)$$

$$V' = R - Y = 0,7 \cdot R - 0,59 \cdot G - 0,11 \cdot B \quad (4)$$

2.2.2. Representació vectorial dels senyals de diferència de color

Els senyals de diferència de color es poden representar en uns eixos cartesianes: sobre les abscisses es representa B-Y, i sobre les ordenades, R-Y. En aquest tipus de representació se solen incorporar els factors correctius que s'explicaran en l'apartat "Ponderació dels components del vector crominància". Aquests factors tenen el valor de 0,493 per a U' i 0,877 per a V'; per tant, des d'ara els senyals de diferència de color es defineixen com:

$$U = 0,493 \cdot U' = 0,493 \cdot (B - Y) \quad (5)$$

$$V = 0,877 \cdot V' = 0,877 \cdot (R - Y) \quad (6)$$

En diagrama vectorial (figura 17) el color es representa com un vector variable en el temps C(t), que anomenarem **crominància**, amb el mòdul i l'angle que tenen un significat físic. Això ens permet simplificar la informació dient que tot senyal de televisió o tota imatge fixa té una informació de **luminància** (brillantor) i una altra de **crominància** (color):

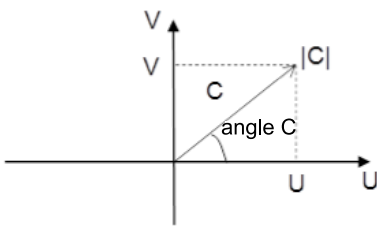


Figura 17. Representació vectorial del color (crominància)

Lectura de la imatge

L'angle del vector crominància (ang C) dóna informació del tint de la imatge; és a dir, de quin color es tracta: blau, verd, groc, etc.

El mòdul del vector crominància (|C|) dóna informació de la saturació de la imatge; és a dir, de la puresa del color: si és un blau pur o té alguna part de blanc, etc.

	R	G	B	Y	U	V	C	ang C
Blanc	1	1	1	1,00	0	0	0	
Groc	1	1	0	0,89	-0,44	+0,10	0,45	167°
Cian	0	1	1	0,70	+0,15	-0,61	0,63	283°
Verd	0	1	0	0,59	-0,29	-0,52	0,59	241°
Magenta	1	0	1	0,41	+0,29	+0,52	0,59	61°
Vermell	1	0	0	0,30	-0,15	+0,61	0,63	103°
Blau	0	0	1	0,11	+0,44	-0,10	0,44	347°
Negre	0	0	0	0,00	0	0	0	

Valors del vector crominància dels colors d'un patró de barres de color

Els colors es poden representar en una carta de colors, que és un diagrama polar en el qual, a partir del vector crominància, es pot esbrinar el tint i la saturació de la imatge. Cada color complementari està diametralment oposat al seu associat. El mòdul dels vectors de colors complementaris és el mateix (la suma dona color blanc, que té una crominància 0):

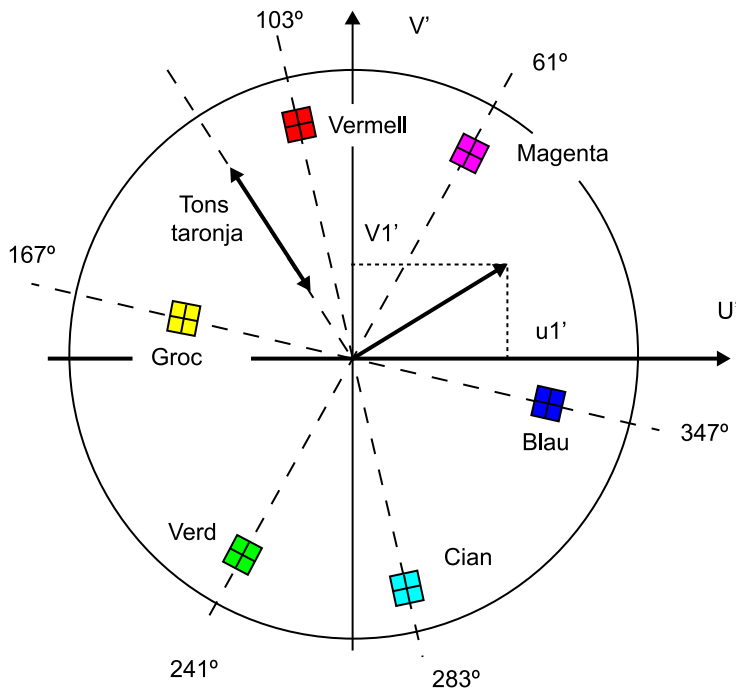


Figura 18. Carta de colors en un diagrama polar de representació de la crominància

Vegeu també

En el mòdul "Mesura del senyal de televisió" es veurà que hi ha un instrument, el vectoscopi, que permet visualitzar la carta de colors.

2.2.3. Reducció d'errors en transmetre diferència de colors

Imaginem que tenim dues opcions per a enviar la informació de color:

- **RGB.** Per tres canals que transmeten directament els senyals R, G i B
- **YUV.** Per tres canals que transmeten el senyal Y i les diferències de color U i V

Si tinguéssim una distorsió en dos dels canals que representés una reducció del 50% de l'amplitud de cadascun, deixant el tercer canal sense distorsió, els efectes sobre la imatge rebuda en cada cas serien els següents:

- **RGB.** Si R i B passen de valer 1 a valer 0,5, mantenint G a 1, la luminància ($Y = 0,3 R + 0,59 G + 0,11 B$) es redueix, el mòdul de la crominància es redueix i la fase es modifica. És a dir, hi ha una disminució de la luminància, de la saturació i, encara pitjor, del tint de la imatge, és a dir, canvia el to del color.
- **YUV.** Si la distorsió no afecta la luminància Y, però sí els canals U i V (U i V passen a valer la meitat), solament es veu afectat el mòdul del vector

crominància $|C|$, és a dir, la saturació. Ni la luminància Y ni la fase del vector crominància $\text{ang}(C)$, és a dir, el tint, modificarien el seu valor.

Amb aquest exemple veiem que enviar les diferències de colors en lloc dels colors primaris, a més d'estalviar en amplada de banda, permet que els errors de la transmissió no es traslladin tan directament a errors d'apreciació en la imatge rebuda.

2.2.4. Amplitud, saturació i brillantor del color

Diferenciem entre l'amplitud i la saturació d'un color:

- Una barra de color està al 100% d'**amplitud** si almenys un dels tres sensors de la càmera dóna la màxima sortida; és a dir, un dels components R, G o B val 1 (100%).
- Una barra de color està al 100% de **saturació** si la barra és un to pur no diluït amb llum blanca. Una barra de color està al 95% de saturació si hi ha un 95% de to pur i un 5% de llum blanca.

Exemple

Un color amb $R = G = 1$ i $B = 0$ és un magenta pur amb 100% d'amplitud i 100% de saturació.

Un color amb $R = G = 1$ i $B = 0,2$ és un magenta amb 100% d'amplitud, perquè les sortides vermella i verda són màximes ($R = G = 1$), i 80% de saturació. Per tant, és un 80% de magenta pur ($R = G = 0,8$ i $B = 0$) més un 20% de llum blanca ($R = G = B = 0,2$).

Un color amb $R = 1$ i $G = B = 0$ és un vermell pur amb 100% d'amplitud, 100% de saturació i molt brillant.

Un color amb $R = 0,5$ i $G = B = 0$ és un vermell pur amb 50% d'amplitud i 100% de saturació i menys brillant.

Un color amb $R = 1$ i $G = B = 0,5$ és un vermell pur amb 100% d'amplitud, 50% de saturació i també molt brillant ($R = 0,5$ $G = 0$ $B = 0$ + $R = 0,5$ $G = 0,5$ $B = 0,5$).

2.3. Modulació del senyal de color. Senyals $U'(t)$ i $V'(t)$

Per a la formació del vector de crominància, el senyal C' es modula amb una portadora que s'escull acuradament per a no interferir amb el senyal de luminància. D'aquesta manera els senyals U' , V' i C' passen a ser unes funcions temporals l'expressió de les quals dependrà del tipus de modulació utilitzat. Si es vol utilitzar una sola portadora per a U' i per a V' en lloc de dues (una per a cada una), hi ha dues possibilitats:

- Mitjançant una modulació en quadratura, desfasant-la 90° entre elles (vegeu el punt 2 de l'annex), com en els sistemes PAL i NTSC.
- Sense transmetre simultàniament els dos senyals com en el sistema SECAM.

Nota

En aquest apartat tornem a partir de zero i no considerem encara els factors de ponderació de U' i V' .

Vegeu també

Aquesta informació s'amplia en l'annex d'aquest mòdul didàctic.

L'esquema de la modulació en quadratura aplicada a PAL i NTSC es mostra en la figura 19.

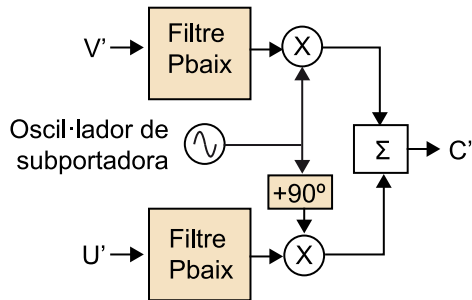


Figura 19. Diagrama de blocs del modulador en quadratura de la crominància

La sortida del modulador en quadratura és un senyal de crominància $C'(t)$, l'expressió del qual és:

$$C'(t) = U'(t) \cdot \text{sense}(\omega_C t) + V'(t) \cdot \cos(\omega_C t) \quad (7)$$

$$C'(t) = \sqrt{(U'(t))^2 + (V'(t))^2} \cdot \cos\left(\omega_C t + \arctan\left(\frac{V'(t)}{U'(t)}\right)\right) \quad (8)$$

$$C'(t) = |C'(t)| \cdot \cos(\omega_C t + \arg(C'(t))) \quad (9)$$

El senyal resultant de crominància $C'(t)$ també es pot veure com un fasor o vector amb les propietats indicades anteriorment, és a dir:

- $|C'(t)|$: el mòdul del vector C' informa sobre la saturació del color.
- $\arg(C'(t))$: la fase del vector C' informa sobre el to o tint del color.

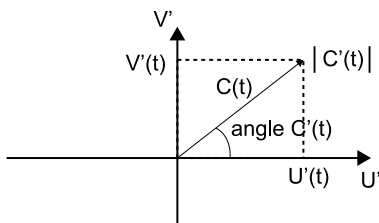


Figura 20. Vector crominància (sense factors de ponderació de U' i V') modulada en quadratura

2.3.1. Desmodulació síncrona del senyal de crominància

El desmodulador síncron del receptor de televisió ha de recuperar els senyals U' i V' a partir del senyal C' , i es fa mitjançant el diagrama de blocs que es presenta a continuació:

Vegeu també

Aquesta informació s'amplia en l'annex d'aquest mòdul didàctic.

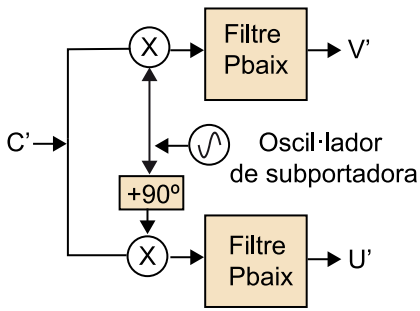


Figura 21. Diagrama de blocs del desmodulador síncron per a la recuperació de la crominància

En alguns sistemes de televisió (com l'NTSC) es permet l'ajust de fase de l'oscil·lador de subportadora local.

2.4. Senyal de vídeo compost en color

El senyal de vídeo compost en color, CVBS, combina els tres senyals de vídeo Y, $U' = B - Y$ i $V' = R - Y$, juntament amb els senyals de sincronisme de línia (horitzontal i vertical) i un nou senyal de sincronisme de color que explicarem en aquest apartat.

En primer lloc, se superposa el senyal de luminància $Y(t)$ amb la de crominància o croma $C'(t)$, mitjançant una suma, tal com es mostra en l'expressió següent:

$$x(t) = Y(t) + C'(t) \quad (10)$$

$$x(t) = Y(t) + U'(t) \cdot \sin(\omega_C t) + V'(t) \cdot \cos(\omega_C t) \quad (11)$$

$$x(t) = Y(t) + |C'(t)| \cdot \cos(\omega_C t + \arg(C'(t))) \quad (12)$$

En la figura 22 es representa gràficament aquesta combinació $x(t)$ durant un fragment d'una línia de televisió:

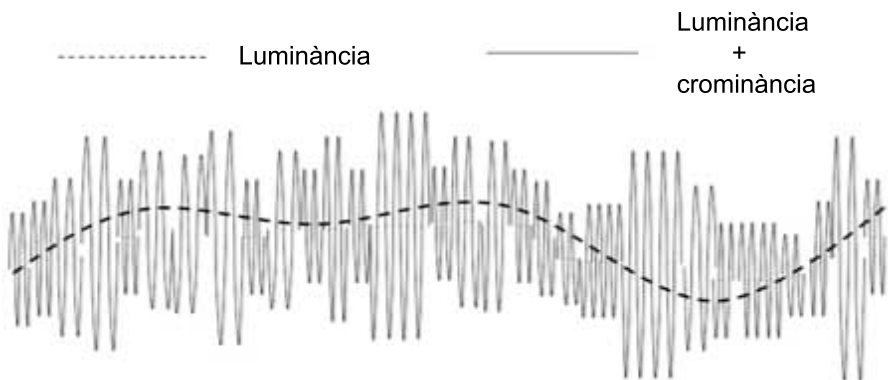


Figura 22. Senyal de luminància sumada a la de crominància en un fragment de línia de televisió

A continuació s'hi suma el senyal de sincronisme horitzontal, que té el mateix format que en el senyal de blanc i negre VBS. I finalment s'hi afegeix un senyal de sincronisme de color que consisteix en un *burst* senoidal (uns quants cicles d'una senoide pura) a la freqüència f_C del senyal de crominància. Aquest *burst* (o salva de color o també conegut com a ràfega), es transmet amb el senyal de vídeo, i permet que el receptor se sincronitzi en fase amb la línia rebuda, i així pugui fer la desmodulació síncrona sense errors de fase.

El senyal de sincronisme horitzontal és el primer impuls de la línia, que indica començament de línia. En realitat indica al receptor que situï l'escombratge al començament de la línia següent, i mentre fa aquesta operació, hi envia el senyal de *burst* més un retard per a donar temps al circuit d'escombratge d'arribar a l'inici de la línia següent. A continuació es comença a enviar el senyal de vídeo $x(t)$. En la figura següent es mostra el tram de línia que transporta tots dos sincronismes:

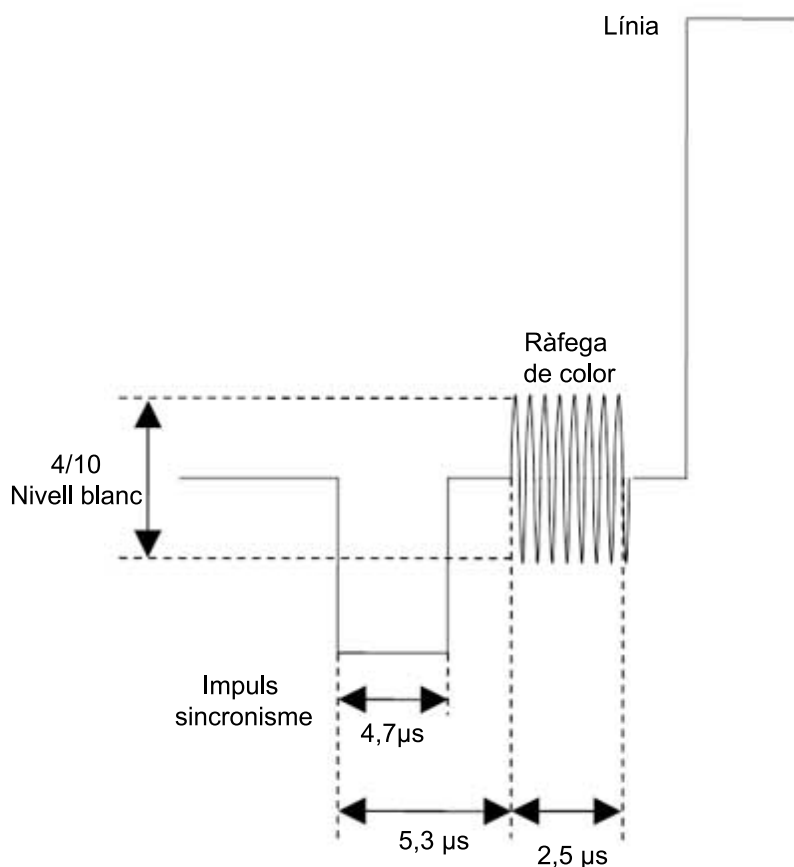


Figura 23. Sincronismes horitzontal i *burst* de color a l'inici d'una línia de televisió

El senyal obtingut afegint els sincronismes al senyal de vídeo $x(t)$, es denomina *senyal en vídeo compost de color* (CVBS). Actualment, com que totes les transmissions són en color, a excepció d'alguns sistemes de circuit tancat de televisió, se sol denominar *senyal en vídeo compost*. En la figura 24 es mostra la forma

del senyal CVBS corresponent a una línia del patró de barres de color descrit en la figura 16. Per a distingir millor el cromà dels diferents colors del patró, s'ha dibuixat la senoide corresponent a cada barra amb el color de la barra:

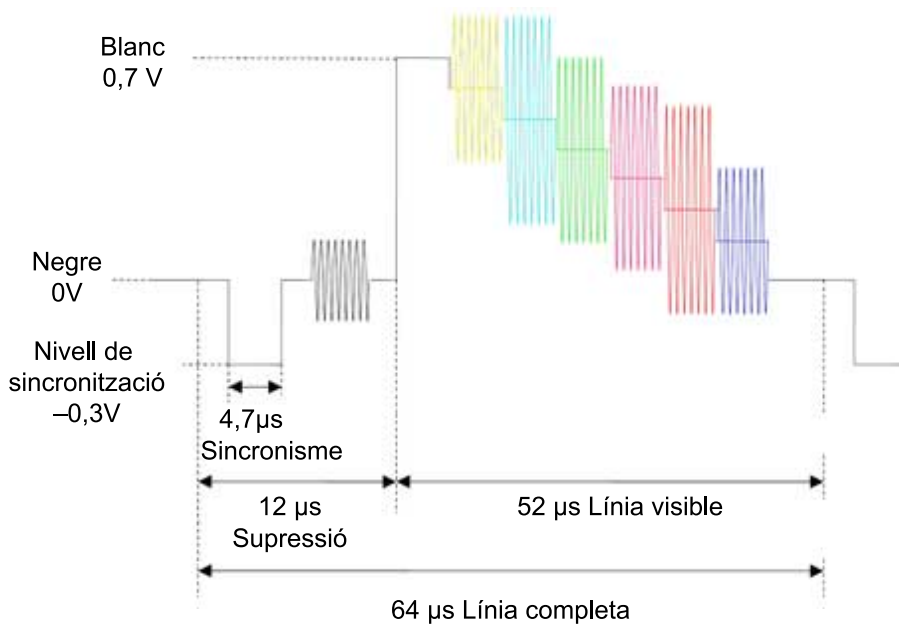


Figura 24. Senyal de vídeo compost CVBS corresponent a una línia del patró de barres de color

2.4.1. Ponderació dels components del vector crominància

Es pot observar que en sumar la crominància a la luminància hi ha instants de temps en què el senyal sobrepassa el valor màxim de 0,7 V (barra groga i cian). Això pot ocasionar problemes de sobremodulació quan es moduli en quadratura per a enviar-lo cap als receptors. Per aquest motiu, com veurem en l'apartat "Sistemes de televisió en color analògics", els senyals U' i V' es multipliquen per uns factors de ponderació (0,493 per a U' i 0,877 per a V'), que tenen com a objectiu que no se sobrepassi en un 33% el valor màxim de 0,7 V en el període d'una línia activa. Per tant, ara el senyal de crominància (o cromà) es defineix com:

$$U(t) = 0,493 \cdot U'(t) = 0,493 \cdot (B(t) - Y(t)) \quad (13)$$

$$V(t) = 0,877 \cdot V'(t) = 0,877 \cdot (R(t) - Y(t)) \quad (14)$$

$$C(t) = U(t) \cdot \cos(\omega_C t) + V(t) \cdot \sin(\omega_C t) \quad (15)$$

A continuació presentem una taula amb els nous valors per la crominància C del patró de barres de color i un gràfic amb el senyal CVBS amb els valors d'aquesta taula:

	R	G	B	Y	U	V	C	angle C
Blanc	1	1	1	1,00	0	0	0	
Groc	1	1	0	0,89	-0,44	+0,10	0,45	167°
Cian	0	1	1	0,70	+0,15	-0,61	0,63	283°
Verd	0	1	0	0,59	-0,29	-0,52	0,59	241°
Magenta	1	0	1	0,41	+0,29	+0,52	0,59	61°
Vermell	1	0	0	0,30	-0,15	+0,61	0,63	103°
Blau	0	0	1	0,11	+0,44	-0,10	0,44	347°
Negre	0	0	0	0,00	0	0	0	

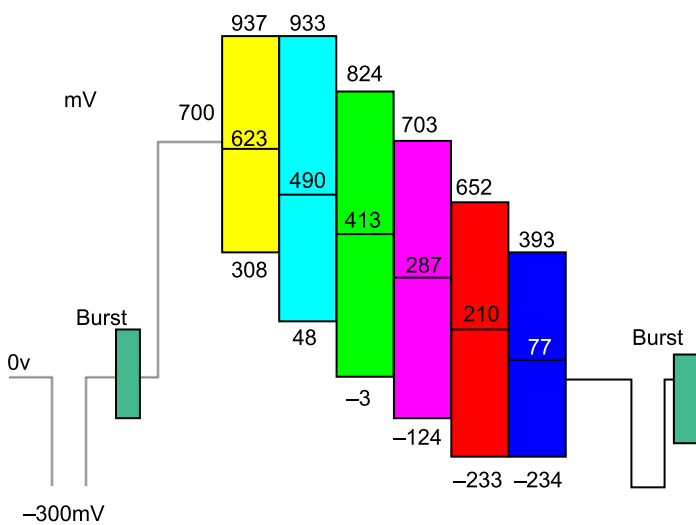


Figura 25. Senyal de vídeo compost CVBS corresponent al patró de barres de color

Es pot observar com el valor màxim de CVBS, que es produeix en transmetre la barra groga, és de 937 mV, que sobrepassa en un 33% el valor de 700 mV.

2.5. Espectre freqüencial del senyal de televisió en color

L'elecció de la freqüència de la subportadora de color és clau per a la compatibilitat entre senyals i receptors monocroms i de color. No n'hi ha prou de modular el senyal de crominància, sinó que cal fer-ho amb una freqüència subportadora de valor adequat i, per a això, s'han de tenir en compte els factors següents:

- Els efectes dels components de la luminància que caiguin en la banda de la crominància, la qual cosa implica que el valor de la subportadora ha de ser tan alt com sigui possible, ja que els components de la luminància disminueixen la seva intensitat en la banda alta de l'espectre.
- L'amplada de banda de la crominància i l'efecte de limitació de banda al canal. Per complir amb la disponibilitat del canal se sol incorporar un filtre limitador de banda per al senyal de crominància que retalla la infor-

mació d'alta freqüència, però evita problemes d'interferències amb canals adjacents.

- Efectes de la subportadora sobre la luminància d'un receptor monocrom, com a conseqüència de la gamma, la qual cosa afecta l'amplitud de la subportadora, ja que, a causa del fenomen no lineal de la gamma dels tubs captadors de senyal i de la seva correcció en el receptor, una suma d'una senoide al senyal de luminància no té valor mitjà de zero. El cicle positiu s'amplifica de manera diferent del negatiu. Per a disminuir aquest efecte, s'ha de prendre una amplitud tan petita com sigui possible.

El fenomen gamma

El fenomen gamma és la relació no lineal entre el valor del senyal de luminància i la lluminositat que emet un tub de rajos catòdics que el reproduceixi. També hi ha relació no lineal entre els valors dels senyals R, G i B, i la lluminositat d'aquests colors en els píxels d'un tub de rajos catòdics. Sobre aquest tema vegeu el mòdul "Adquisició del senyal de vídeo".

- Visibilitat d'interferències produïdes per la subportadora de color en receptors, tant monocroms com de color. Aquest factor afecta l'elecció numèrica del valor de la subportadora, una vegada conegut que ha d'estar situat en la banda alta de l'espectre, sense apurar al límit i que els seus components surtin fora del canal. Per a això hem d'aplicar el principi d'entrellaçament d'espectres. És a dir, hem d'incrustar l'espectre del senyal de crominància en el de la luminància ocupant els buits deixats per aquesta. A més, s'ha de procurar que, en cas que hi hagi alguna interferència, aquesta es pugui eliminar amb l'efecte d'integració de l'ull. Per exemple, fent coincidir les parts brillants de la interferència en una línia amb parts fosques de la línia següent.

La millor manera, encara que no l'única, de complir totes dues característiques és escollir una subportadora de valor la meitat d'un múltiple de la freqüència de línia.

$$f_C = (2n - 1) \cdot \frac{f_L}{2} \quad (16)$$

D'aquesta manera, tal com es pot apreciar en la figura 26, l'espectre de la crominància (en vermell) ocupa els buits que han deixat els components de luminància (en negre), i s'evita la interferència entre luminància i crominància. Cal tenir en compte que l'amplada de banda de la crominància és, com a màxim, de 2,75 MHz, és a dir, molt més petita que la del senyal VBS (luminància més sincronismes de línia i de camp), que és de prop de 5 MHz.

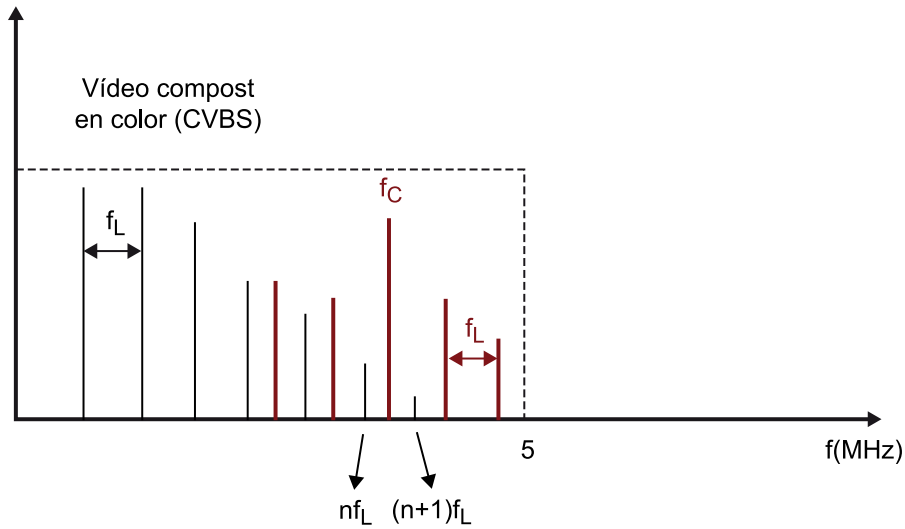


Figura 26. Espectre freqüencial d'un senyal de vídeo en color en banda base CVBS

El senyal de televisió modulad per ubicar-lo en un canal de transmissió tampoc experimenta les conseqüències de possibles interferències entre crominància i so, ja que el filtre de banda vestigial també limita la banda superior. En la figura 27 s'observa l'espectre freqüencial d'un senyal de televisió en color en sistema PAL.

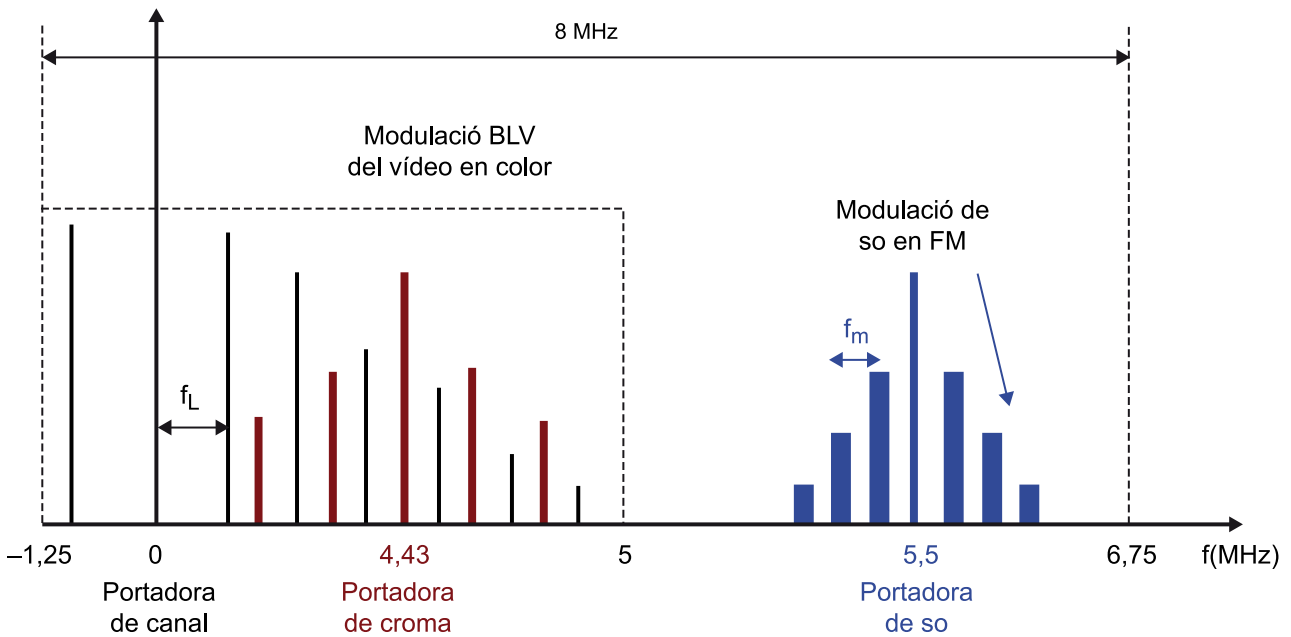


Figura 27. Espectre freqüencial d'un senyal de vídeo en color PAL en un canal de transmissió

3. Sistemes de televisió en color analògics

Els sistemes de televisió en color analògics deriven dels que s'utilitzaven abans per a transmetre en blanc i negre. El 1941 es van adoptar unes característiques comunes per als sistemes monocroms americans que es van actualitzar el 1952 i es van convertir en el que seria l'estàndard NTSC. Els paràmetres del sistema estan adaptats a la freqüència de 60 Hz usada en la xarxa elèctrica americana i són els següents:

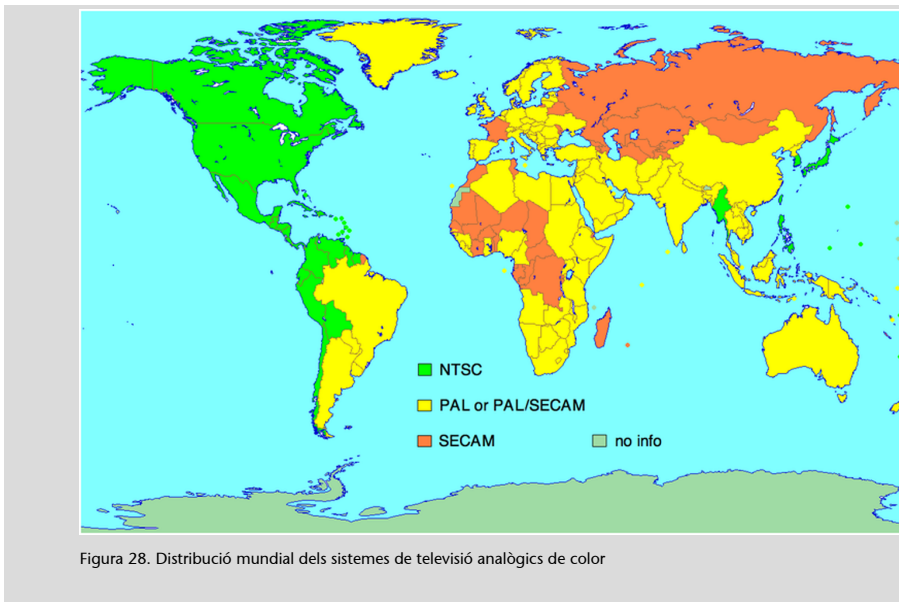
- 525 línies entrelaçades (dos camps de 262,5 línies).
- Freqüència de camp de 60 Hz (canviada a 59,94 Hz en introduir el color).
- Freqüència de línia de 15.750 Hz ($60 \times 262,5$), canviada a 15.734 ($59,94 \times 262,5$) en introduir el color.
- Amplada de banda de vídeo de 4,2 MHz, amb modulació negativa (s'inverteix el signe del senyal de vídeo abans de modular-lo en AM).
- So modulat en FM amb portadora en 4,5 MHz.

Després de la Segona Guerra Mundial, el 1949, molts països europeus van adoptar l'estàndard alemany, també conegut com a CCIR, adaptació del sistema americà a una freqüència de camp de 50 Hz (la freqüència de la xarxa elèctrica europea). Es va intentar mantenir la freqüència de línia el més propera possible a la de l'NTSC per a aprofitar l'experiència americana en el disseny de receptors europeus. Els paràmetres fonamentals d'aquest estàndard són les següents:

- 625 línies entrelaçades (dos camps de 312,5 línies).
- Freqüència de camp de 50 Hz.
- Freqüència de línia de 15.625 Hz ($50 \times 312,5$).
- Amplada de banda de vídeo de 5,0 MHz, amb modulació negativa.
- So modulat en FM amb portadora en 5,5 MHz.

Aquest sistema va ser la base per als diferents sistemes de color estàndard europeus com PAL o SECAM.

Els sistemes mundials de televisió són un d'aquests tres: NTSC, PAL o SECAM. En la figura se'n pot observar la distribució a les diferents regions mundials:



A continuació descriurem amb més detall cadascun d'aquests tres sistemes.

3.1. Sistema NTSC. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color

Per a configurar el sistema NTSC amb els paràmetres esmentats més amunt, cal triar una freqüència subportadora de color i uns senyals per a la modulació en quadratura adequats.

3.1.1. Freqüència subportadora en NTSC

Per a complir amb el principi d'entrellaçament d'espectres i reduir al màxim les interferències entre luminància i crominància, la subportadora de color ha de ser proporcional a un nombre imparell de la freqüència de línia i tenir un valor prou elevat amb la limitació de l'amplada de banda dels senyals de color. Un valor de compromís acceptable és el següent:

$$f_{SC} = 455 \cdot \frac{f_L}{2} = 455 \cdot \frac{15750}{2} = 3.583.125 \text{ Hz} \quad (17)$$

No obstant això, aquesta freqüència té un problema d'implementació. La seva diferència amb la portadora de so (4,5 MHz) provoca un harmònic parell de la freqüència de línia que produeix una interferència visible en la imatge per part d'algun component de l'àudio modulats en FM. Atès que els receptors monocroms usaven un filtre sintonitzat a 4,5 MHz per a recuperar el so, no es podia modificar la portadora de so, sinó que calia canviar la subportadora de color. La solució final va ser canviar lleugerament la freqüència de línia a 15.734,264 Hz. La freqüència de camp va canviar proporcionalment i va passar de 60 Hz a 59,94 Hz. D'aquesta manera, la subportadora de color va passar a tenir el valor següent:

$$f_{SC} = 455 \cdot \frac{f_L}{2} = 455 \cdot \frac{15.734.264}{2} = 3.579.545 \text{ Hz} \quad (18)$$

3.1.2. Senyals I Q en NTSC

Per a determinar els senyals de color que s'utilitzen en la seva modulació en quadratura, va ser fonamental una sèrie d'experiències qualitatives que van determinar que l'ull humà distingeix diferències de color amb molt detall en els colors del diagrama de colors situats en la línia geomètrica que uneix el taronja i el cian. No obstant això, no es perceben amb claredat els detalls dels colors situats en la recta entre el magenta i el verd. En altres paraules, l'ull humà és molt sensible als colors que van del taronja al cian, i molt menys als colors que van del magenta al verd.

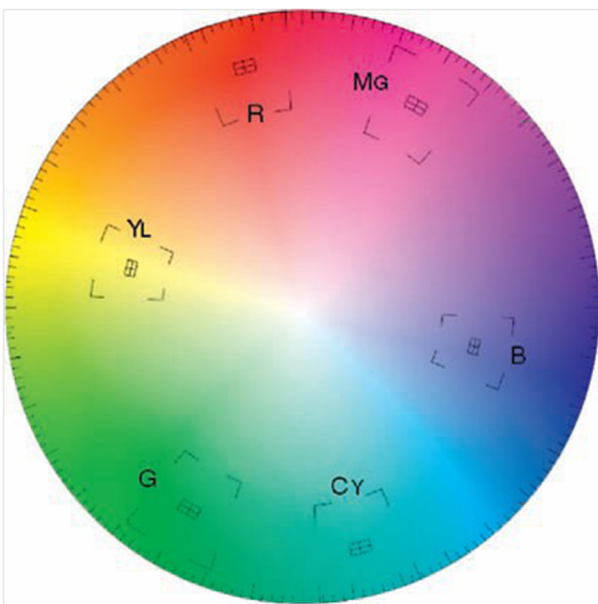


Figura 29. Diagrama de colors

Aquesta informació determina que l'òptim és escollir uns eixos de modulació en quadratura que coincideixin amb aquestes línies, i separar-les un angle de 90° . Aquests senyals es denominen I i Q , i estan separats un angle de 33° dels U i V (figura 30).

$$I = V \cdot \cos 33^\circ - U \cdot \sin 33^\circ \quad (19)$$

$$Q = V \cdot \sin 33^\circ + U \cdot \cos 33^\circ \quad (20)$$

$$C(t) = Q \cdot \sin(\omega \cdot t) + I \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (21)$$

És a dir, els senyals I Q procedeixen dels U i V multiplicant-los pels factors de ponderació per a obtenir U i V , i, posteriorment, aplicant-los un gir de 33° .

El senyal Q, que és a prop de l'eix magenta-verd, del qual l'ull no percep amb exactitud els detalls fins, es pot enviar amb una amplada de banda més petita que la del senyal I. Concretament, només es necessiten 0,5 MHz per al senyal Q, mentre que per al senyal I es necessiten 1,5 MHz. Finalment, es limita la banda lateral superior del senyal I també a 0,5 MHz, usant una modulació BLV amb portadora suprimida per a reduir interferències amb la luminància. D'aquesta manera s'aconsegueix pujar al màxim possible la freqüència de la subportadora de color al valor abans especificat.

Vegeu també

En l'annex d'aquest mòdul didàctic s'amplia aquesta informació.

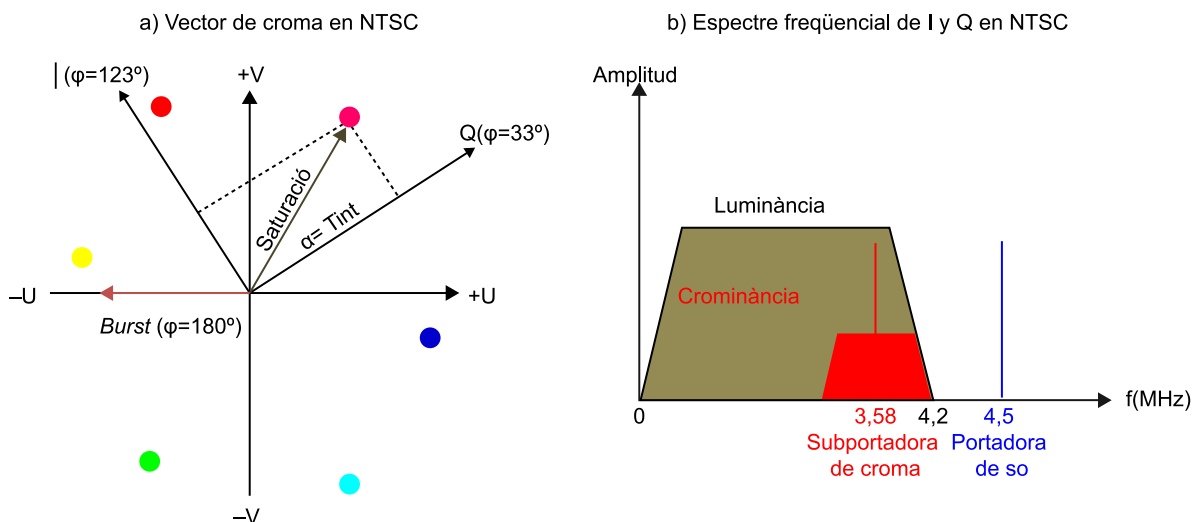


Figura 30. Senyals I, Q per a la modulació del color en sistemes NTSC

El mòdul del vector cromina (Cr), o crominància, representa la saturació del color, i l'angle el tint, és a dir, el tipus de color (blau, verd, etc.).

És habitual que els senyals de televisió tinguin errors d'amplitud i de fase durant la transmissió, a causa, entre altres factors, de l'atenuació i de les reflexions multicamí. El sistema NTSC reflecteix en la pantalla els errors d'amplitud com a errors de saturació i els errors de fase com a errors de tint. Els errors de saturació no són molt visibles, al contrari que els de tint. Per tal de corregir manualment els errors de tint, els receptors NTSC tenen un comandament per a l'ajust del tint de color en contrast amb el d'un patró de barres de color estàndard. Així, l'usuari pot corregir els errors estàtics de fase, però no els errors dinàmics. El sistema PAL preveu una tècnica per a eliminar o reduir automàticament els errors de fase.

3.1.3. Codificador NTSC

L'esquema del codificador NTSC seria el que es mostra en la figura 31. En aquest esquema es resumeix tot el procés del senyal de vídeo, des de la seva captació amb càmera de vídeo, fins a l'elaboració del senyal de vídeo compost:

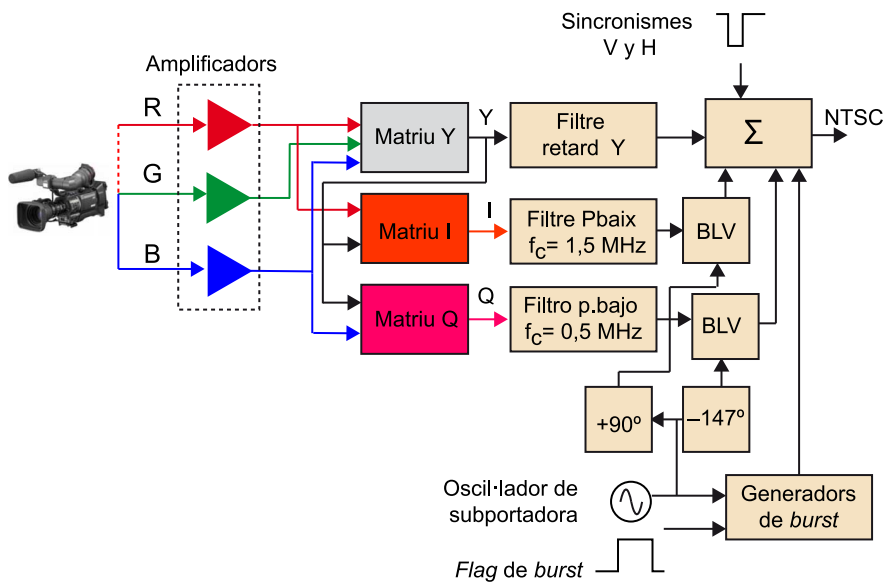


Figura 31. Esquema d'un codificador per a un sistema NTSC

La matriu Y obté el senyal luminància a partir dels senyals originals de càmera, R, G i B. La matriu I i Q aplica la rotació de 33° als senyals U i V, que, com s'ha explicat en l'apartat "Ponderació dels components del vector crominància", són els senyals de diferència de color B-Y i R-Y multiplicats per un factor de ponderació, per a evitar una sobremodulació. El senyal *burst* de sincronisme de color és de 8 a 10 cicles de subportadora desfasada 180° de l'eix B-Y; és a dir, 147° respecte a Q (això és $180^\circ - 33^\circ = 147^\circ$). La modulació de I i de Q és amb BLV amb modulació negativa, supressió de portadora i limitant la banda superior a 0,5 MHz.

El filtre de retard en el camí del senyal de luminància Y introdueix un retard en el senyal Y igual que el que experimenten els components de crominància en els filtres passa baix i de banda lateral vestigial (BLV).

3.2. Sistema PAL. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color

La denominació *PAL* correspon a la sigla de *phase alternating line*. Això és així perquè el procediment per a eliminar l'error de fase en la transmissió (present en NTSC) consisteix a invertir un dels components del vector crominància línia a línia. Un error de fase β en una línia es converteix en un error de fase $-\beta$ en la línia següent, ja que, estadísticament, dues línies consecutives tenen un valor similar en mòdul i en fase. Si el receptor es construeix de manera que per a representar una línia s'hi suma l'anterior, s'obté una crominància correcta en mòdul i en fase, i l'error de fase s'elimina, ja que la suma dona zero. A continuació es descriuen amb més detall les característiques principals del sistema PAL.

3.2.1. Senyals U V en PAL

Els senyals del vector crominància en el sistema PAL són els senyals U i V, que, tal com s'ha indicat en l'apartat "Ponderació dels components del vector crominància", valen:

$$U = 0,493 \cdot (B - Y) \quad (22)$$

$$V = \pm 0,877 \cdot (R - Y) \quad (23)$$

El senyal V canvia de signe a cada línia per a eliminar l'error de fase. El procés per a la cancel·lació dels errors de fase és el següent: l'habitual és que, si es produeix un error de fase en una línia, es produeixi el mateix error en la línia següent. Per tant, dues línies que s'emeten amb un vector de cromina similar, E_n i E_{n+1} , en la figura 32 es reben amb un error de fase β i els vectors de cromina rebuts de totes dues línies, R_n i R_{n+1} , es visualitzen amb un tint diferent.

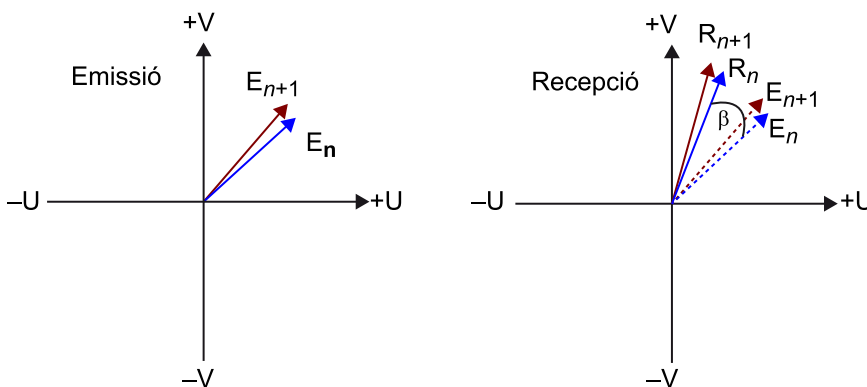


Figura 32. Vectors de crominància de les línies n i $n+1$ rebuts en NTSC amb un error β en totes dues línies

En el sistema PAL, la línia $n+1$ té el component V canviat de signe, tal com es pot apreciar en el vector d'emissió E_{n+1} de la figura 33. Els vectors de cromina rebuts, R_n i R_{n+1} , tenen el mateix error de fase β . Però el processador PAL inverteix el component V del vector R_{n+1} , i s'obté el vector R'_{n+1} , que automàticament canvia el signe de l'error de fase β . D'aquesta manera, en sumar-se R_n i R'_{n+1} , s'obté un vector cromina $T_{n,n+1}$ resultant de totes dues línies que anul·la l'error de fase, encara que apareix un error de saturació perquè ara la saturació no és la suma algebraica de la saturació de E_n i E_{n+1} , sinó la resultant de la suma vectorial de R_n i R'_{n+1} . Tal com s'aprecia en la figura 33, l'error de saturació és més greu com més greu és l'error de fase, però per a errors de fase petits, l'error de saturació és menyspreable. Com que l'ull humà és molt més sensible a errors de tint que a errors de saturació, el sistema PAL és molt eficient contra errors en la fase.

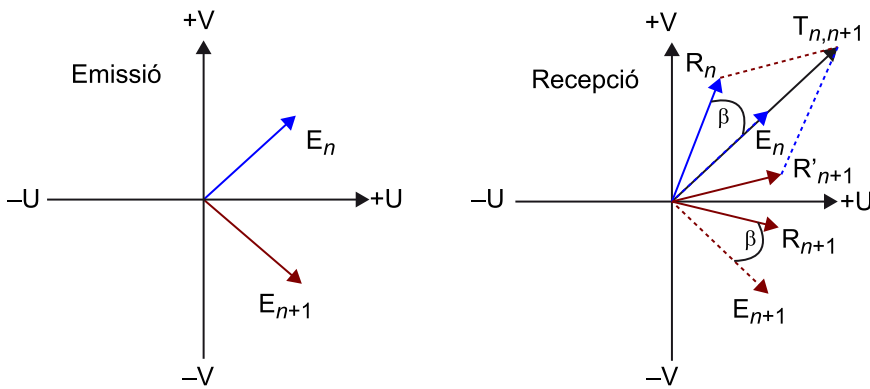


Figura 33. Vectors de crominància de les línies n i $n+1$ rebuts amb un error β en totes dues línies i compensat amb el sistema PAL

Com a resultat d'aquest canvi de fase en la V a línies alternades, el senyal de *burst* també aplica un retard de $\pm 45^\circ$ depenent de la línia, sobre un desfasament fix de 180° . Per tant, el retard real és de $\pm 135^\circ$.

Els senyals U i V es modulen en doble banda lateral amb portadora suprimida i una amplada de banda d'1 MHz cada una. Per tant, s'ha d'introduir una línia de retard per al senyal Y igual com fa el sistema NTSC.

3.2.2. Freqüència subportadora en PAL

Els criteris que s'han de seguir per a triar el valor de la freqüència subportadora de color són els mateixos que en el sistema NTSC. És a dir:

- Valor tan alt com sigui possible respectant que l'amplada de banda dels senyals de vídeo modulats han de caure dins del canal de televisió.
- Compliment del principi d'entrellaçament d'espectres per a evitar patrons interferents.

No obstant això, en PAL ens trobem un problema afegit: l'alternança de fase cada dues línies del senyal V . Això fa que si apliquem que la freqüència subportadora valgui exactament un valor imparell de la meitat de freqüència de línia, el senyal V crea un patró d'interferències que fa coincidir les parts brillants de les interferències en totes les línies:

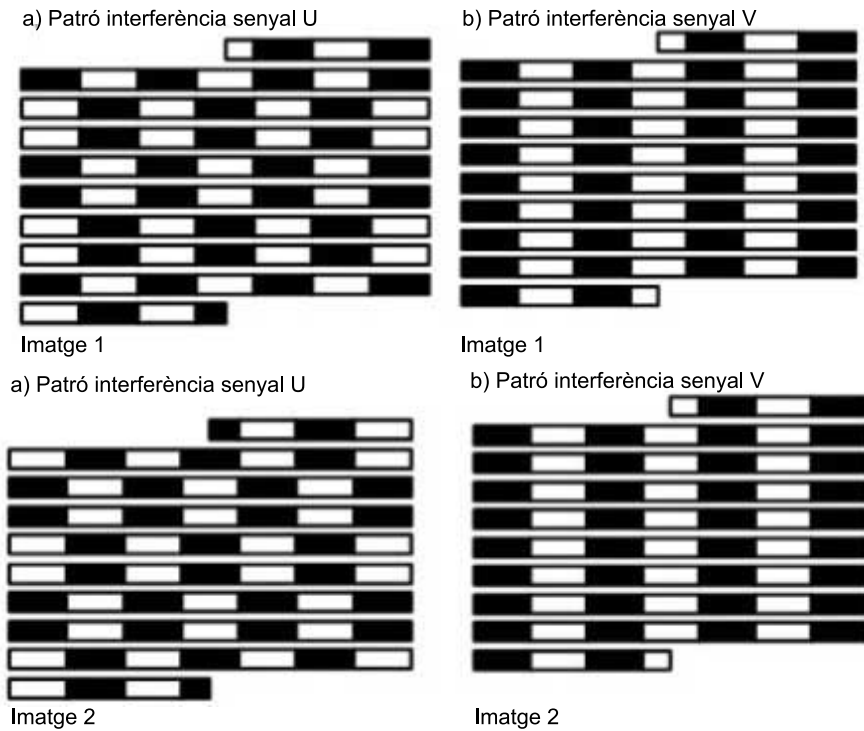


Figura 34. Patró d'interferència de senyals U i V en sistemes PAL si s'aplica freqüència portadora igual a nombre imparell de semifreqüència de línia

Això se soluciona si, en lloc de desviar la meitat de la freqüència de línia, en desviem solament una quarta part. És a dir, la freqüència portadora té una expressió com la següent:

$$f_{SC} = (2n - 1) \cdot \frac{f_L}{4} \quad (24)$$

Fins i tot si s'hi afegeix un òfset extra de valor, la freqüència de *frame* (o quadre o imatge completa), f_V (25 Hz), aconseguim una disseminació més gran del patró d'interferències:

$$f_{SC} = (2n - 1) \cdot \frac{f_L}{4} + f_V \quad (25)$$

En la figura 35 s'observa com canvia el patró interferent en aplicar els criteris de les equacions (24) i (25). Aquest canvi afavoreix que el fenomen d'integració de l'ull ajudi a eliminar millor les interferències.

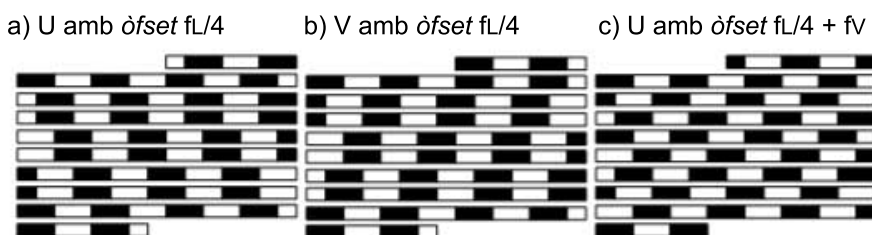


Figura 35. Patró d'interferència dels senyals U i V en sistemes PAL si s'aplica desviació de quart de freqüència de línia

Finalment, el valor de compromís escollit en l'estàndard PAL va ser de $n = 568$, per la qual cosa prenent $f_H = 15.625 \text{ Hz}$ i $f_V = 25$, la freqüència subportadora de color val:

$$f_{SC} = (2 \cdot 568 - 1) \cdot \frac{15.625}{4} + 25 = 4.433.618,75 \text{ Hz} \approx 4,43 \text{ MHz} \quad (26)$$

L'espectre freqüencial del senyal de TV PAL és el que es mostra a continuació:

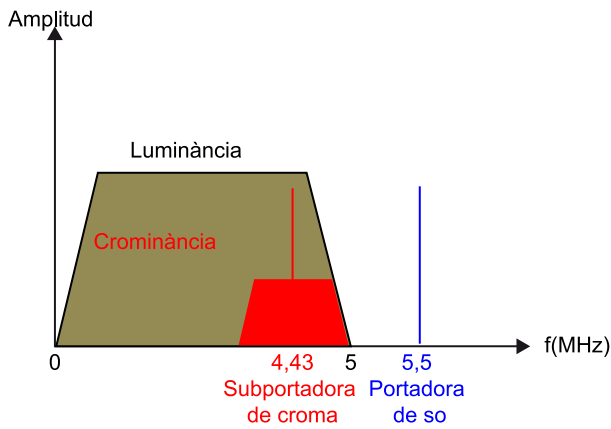


Figura 36. Espectre freqüencial del senyal de TV d'un sistema PAL

3.2.3. Codificador PAL

En la figura 37 es pot observar l'esquema del codificador PAL:

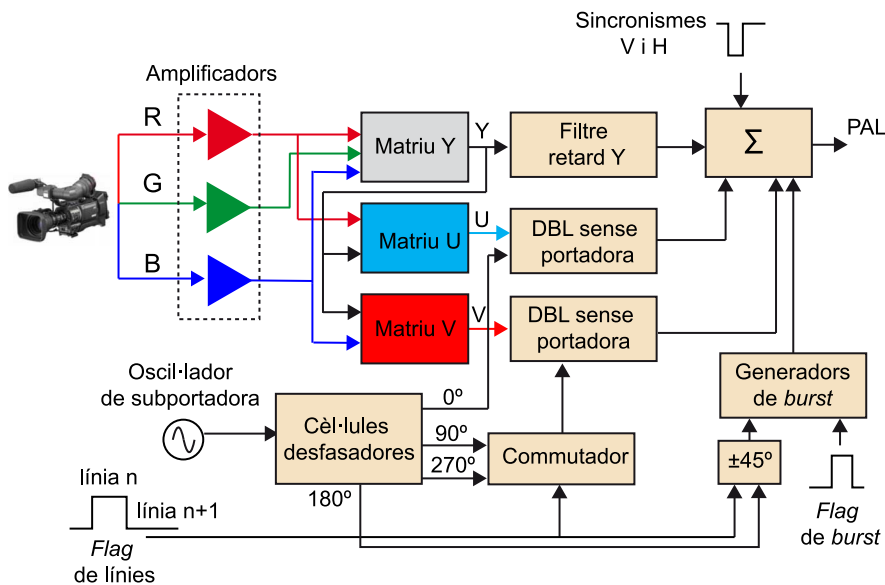


Figura 37. Esquema d'un codificador per a un sistema PAL

A diferència de l'NTSC, la matriu U i V no aplica la rotació de 33° . Es necessiten circuits de desfasaments de 90° i 270° , més un commutador de 180° per a cada línia per a formar el senyal V. També altres desfasadors de $\pm 45^\circ$ per al senyal de *burst*. Les entrades de sincronisme vertical (V), horitzontal (H) i de *burst* se sumen al senyal per a obtenir el senyal compost PAL.

3.3. Sistema SECAM. Característiques i elecció de la freqüència subportadora de color

El SECAM és un sistema seqüencial amb memòria. És a dir, els dos senyals de crominància s'envien seqüencialment i alternant-se. Per tant, la resolució vertical de la crominància és molt més baixa que la de la luminància, ja que s'envia la meitat d'informació de color per línia.

Exemple

En una línia s'envia un component U, i en la següent, el component V, i així successivament.

3.3.1. Senyals DR i DB en SECAM

En SECAM, es modula en FM el senyal de crominància que correspongui a la línia enviada. Els dos components de crominància són senyals de diferència de color amb un coeficient ponderador, tal com es mostra a continuació:

$$D_R = -1,9 \cdot (R - Y) \quad D_B = 1,5 \cdot (B - Y) \quad (27)$$

L'amplada de banda de cada senyal és d'1,5 MHz. En aquest sistema no cal retallar la banda, ja que no es modulen en quadratura totes dues alhora.

Les freqüències de subportadora de cada senyal sobre les quals es du a terme la modulació en freqüència són:

$$f_{spR} = 282 \cdot f_H = 4,40625 \text{ MHz} \quad f_{spB} = 272 \cdot f_H = 4,25 \text{ MHz} \quad (28)$$

3.3.2. Codificador SECAM

En la figura 38 es pot observar l'esquema del codificador SECAM:

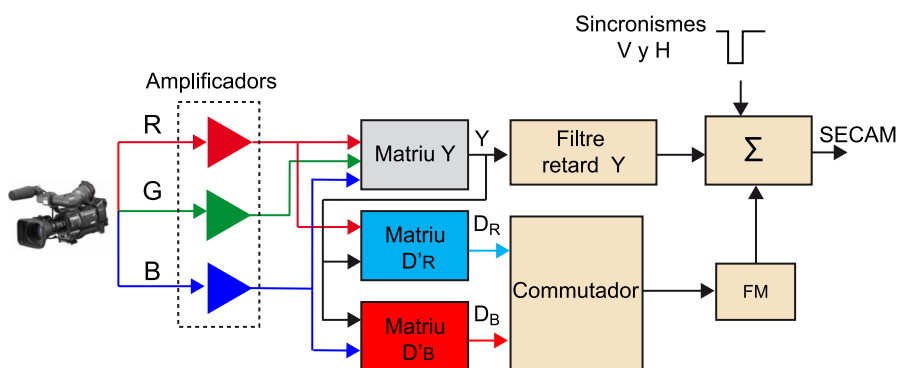


Figura 38. Esquema d'un codificador per a un sistema SECAM

Bibliografia

Benoit, Hervé (1997). *Digital Television MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB system* (cap. 1, pàg. 3-15). Focal Press.

Bethencourt Machado, T. (1990). *Sistemas de Televisión clásicos y avanzados*. Departamento de Publicaciones Centro de Formación RTVE.

Annex

1. Modulació AM (DBL i BLV) i FM

La modulació és un procés matemàtic aplicat a un senyal que es vol transmetre per un canal de comunicació. El senyal pot ser analògic (modulació analògica) o digital (modulació digital).

La modulació analògica té com a objectiu fonamental desplaçar l'espectre freqüencial del senyal, que està centrat en l'origen de freqüències (0 Hz), a una zona d'alta freqüència al voltant de la freqüència central del canal. D'aquesta manera es poden enviar simultàniament diversos senyals pel mateix mitjà de comunicació, cadascuna en un canal diferent, de manera que no s'interfereixen els seus espectres freqüencials (figura 39). El canal té una amplada de banda BW i una freqüència central que es diu *freqüència portadora*.

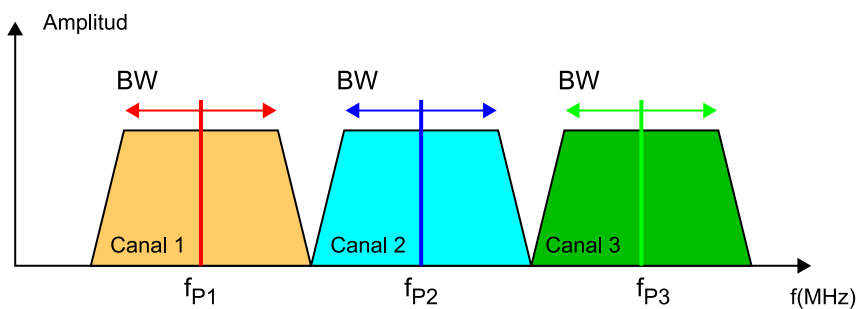


Figura 39. Espectre freqüencial de senyals modulats analògicament en canals adjacents

La modulació analògica pot ser d'amplitud (AM) o de freqüència (FM). Totes dues consisteixen a fer variar l'amplitud o la freqüència d'una senoide amb una funció proporcional al senyal que s'ha d'enviar. Aquesta funció es diu *moduladora*, i el senyal format d'aquesta manera es diu *senyal modulat*:

$$V_O(t) = A(t) \cdot \sin(B(t) \cdot t + C(t)) \quad (29)$$

La freqüència fonamental de la senoide es diu *freqüència portadora* i coincideix amb la freqüència central del canal al qual es vol traslladar el senyal.

En la figura 40 s'observa l'efecte temporal de la modulació d'amplitud i de freqüència d'un senyal típic:

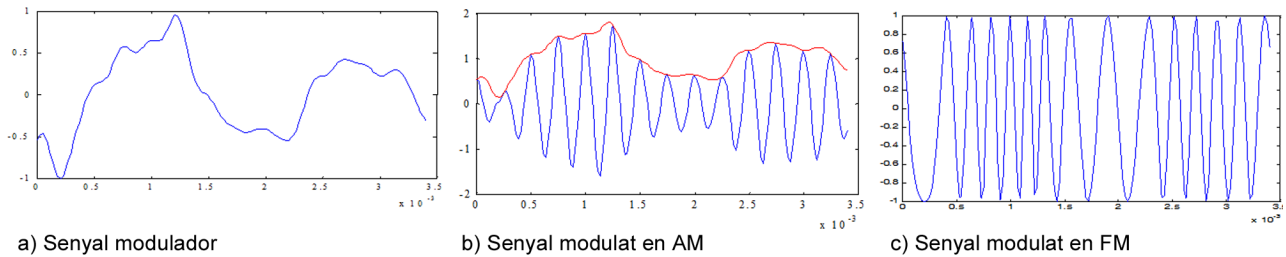


Figura 40. Senyals modulats d'amplitud (AM) i de freqüència (FM) en el domini temporal

La modulació AM més simple es fa multiplicant el senyal modulador per la portadora; és a dir, una senoide pura la freqüència de la qual té el valor de la freqüència portadora. El procés de desmodulació més utilitzat i de més qualitat consisteix en un esquema invers al de modulació. En la figura 41 es poden observar tots dos processos:

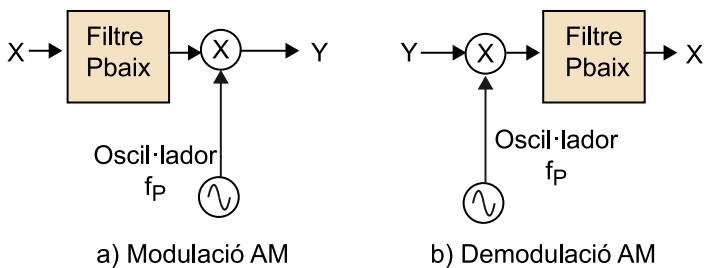


Figura 41. Processos de modulació i desmodulació d'AM

Matemàticament es demostra que l'espectre freqüencial d'un senyal modulat en AM és el del senyal original traslladat a l'esquerra i a la dreta de la freqüència portadora. No obstant això, a partir de petites variacions en l'operació matemàtica, s'obtenen diferents tipus de modulació en AM. Els més coneguts són els següents:

- **DBL** (doble banda lateral). Modulació amb una banda lateral superior (BLS) i una altra d'inferior (BLI) simètriques.
- **BLV** (banda lateral vestigial). Modulació DBL en què una de les bandes es filtra gairebé íntegrament i s'anomena *banda vestigial*.
- **BLU** (banda lateral única). Modulació DBL en què s'elimina una de les bandes. N'hi sol haver dues versions, una amb portadora i una altra amb portadora suprimida.

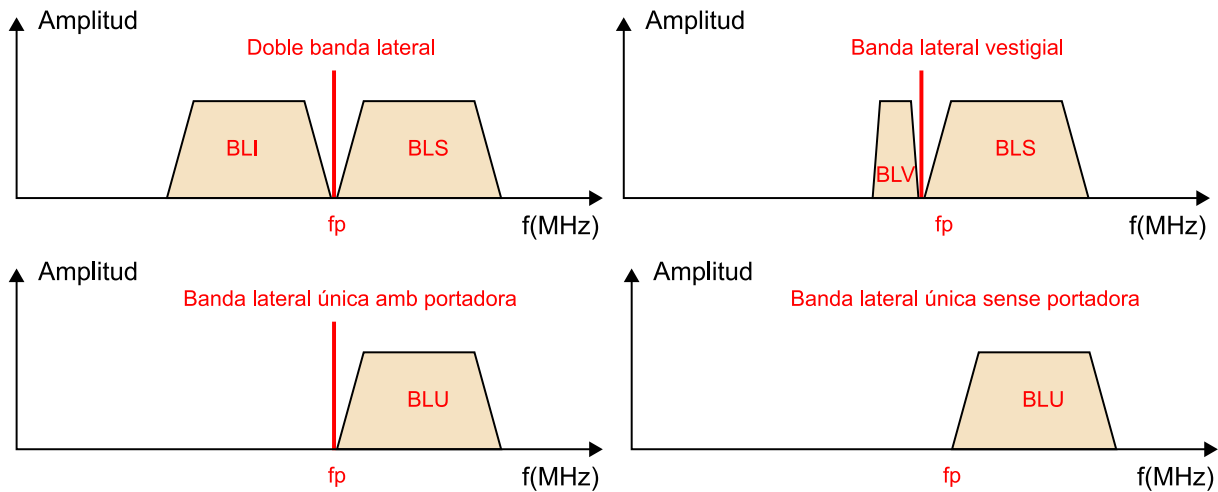


Figura 42. Espectre freqüencial de senyals modulats en AM: DBL, BLV i BLU amb portadora i sense

En la modulació en FM apareixen múltiples subbandes laterals, separades per una freqüència de valor, el valor màxim de la freqüència de modulació, f_m , és a dir, la freqüència màxima de l'espectre freqüencial del senyal modulador:

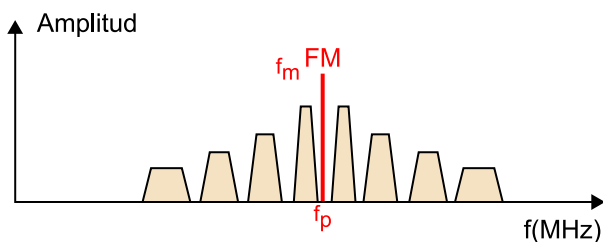


Figura 43. Espectre freqüencial d'un senyal modulat en FM

2. Modulació en quadratura

La modulació de quadratura s'aplica quan es volen modular dos senyals diferents amb una mateixa portadora. D'aquesta manera s'utilitza la meitat de l'amplada de banda del canal que si s'utilitzessin dues portadores separades. Per a això s'aplica un desfasament fix de 90° a totes dues portadores, que es té en compte, també, en la desmodulació. Perquè el procés tingui èxit és molt important recuperar en el receptor la portadora en fase amb la del transmissor. L'esquema es pot veure en la figura 44.

A partir de la modulació en quadratura, s'han desenvolupat altres modulacions similars per a 4, 8, 16, 32, etc. senyals diferents amb la mateixa portadora i desfasament fix proporcional. Són les modulacions QAM, que es comentaran en el mòdul "Modulacions digitals per a senyals de televisió", ja que se solen aplicar a senyals digitals.

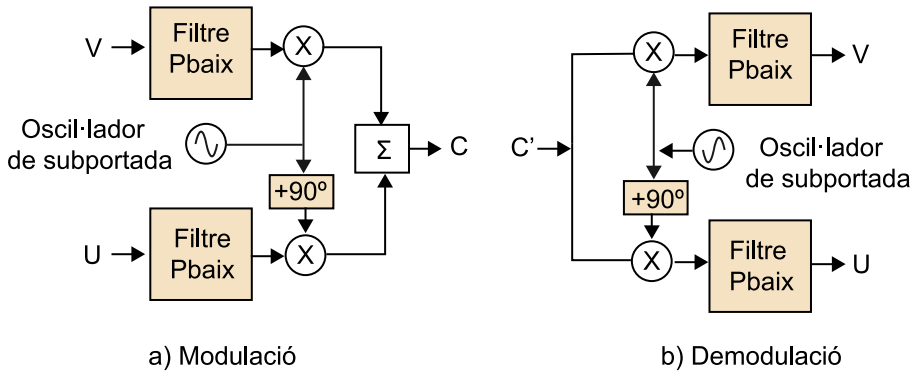


Figura 44. Esquema d'una modulació i una desmodulació en quadratura

3. L'estructura de 8 camps PAL (*color framing*)

L'estructura de 8 camps PAL (seqüència PAL) es refereix a la fase de la subportadora. Aquest tema era molt important quan es treballava en les edicions lineals en cinta (magnetoscopi lector i magnetoscopi gravador). Per a un empalmament correcte de les imatges s'ha de tenir en compte la fase de la subportadora de color entre el pla anterior a l'empalmament i el posterior. Les fases de les subportadores entre un pla i el següent han de coincidir.

Per a estudiar la seqüència de 8 camps (4 imatges completes o *frames*) o seqüència PAL, ens hem de basar exclusivament en la fase de la subportadora de color.

La fase de la subportadora canvia de línia en línia i no es repeteix fins a 2.500 línies després (= 4 quadres = 8 camps).

Cicles subportadora per línia = 283,7516 cicles.

$283,7516 \text{ cicles/línia} \times 312,5 \text{ línies /camp} = 88.672,375 \text{ cicles/camp}$.

$88.672,375 \text{ cicles/camp} \times 2 \text{ camps} = 177.344,75 \text{ cicles/quadre}$.

$88.672,375 \text{ cicles/camp} \times 8 \text{ camps} = 709.379 \text{ cicles per tornar a } 0^\circ \text{ la fase de subportadora}$.

Si analitzem com es tria la freqüència de subportadora, recordarem que es multiplicava la freqüència de línies per $284 - 1/4$, això vol dir que, cada 4 línies, l'ona senoidal comença en cicle complet.

Com podem veure en la figura 45, en la primera línia la fase de la subportadora és 0° , en la línia següent, després de 283 cicles complets acabaria en $0,75$ cicles, que corresponen a 270° . En la següent hi hauria 283 cicles més $0,5$ cicles, que són 180° . En la següent, quarta línia, hi hauria 283 cicles més $0,25$ cicles, que són 90° , i en la cinquena tornaria a ser 0° .

Si es repeteix la fase cada quatre línies i ara fem que es reparteixi un cicle entre 625 línies, es repetirà la fase cada 2.500 línies (625×4), per tant la fase 0° , que és la que té la línia 1 del camp 1, tornarà a ser 0° en la línia 2.501, que és la línia 1 del camp 9. En realitat el camp 9 torna a ser camp 1, ja que són idèntics en tot.

En conseqüència, els camps 5 a 8 seran idèntics als camps 1 a 4, excepte en la fase de la subportadora, que estarà invertida 180° .

A partir dels 8 camps tot es repetirà sense cap diferència. Aquesta és la seqüència PAL de 8 camps.

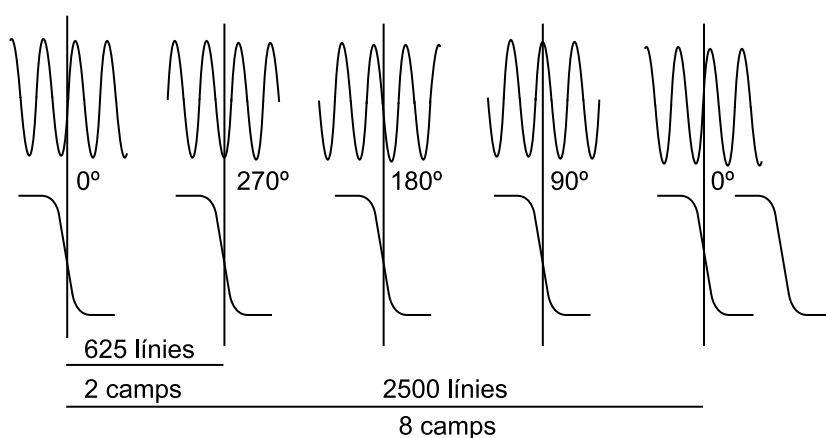


Figura 45. Esquema de la seqüència PAL de 8 camps

Valors de la fase de la subportadora i nombre de cicles en les diferents línies d'una estructura de 8 camps PAL

	Figura 1 Quadre 1 Camp 1 Imparell	Figura 1 Quadre 1 Camp 2 Parell	Figura 2 Quadre 2 Camp 3 Imparell	Figura 2 Quadre 2 Camp 4 Parell	
Núm. de línia	1	312,5 + 1	625 + 1	937,5 + 1	
Fase de subportadora	0°	225°	270°	225°	
Nre. de cicles	283,75	$283,75 \times 313,5$	$283,75 \times 626$	$283,75 \times 938,5$	
	Figura 3 Quadre 3 Camp 5 Imparell	Figura 3 Quadre 3 Camp 6 Parell	Figura 4 Quadre 4 Camp 7 Imparell	Figura 4 Quadre 4 Camp 8 Parell	Figura 5 Quadre 5 Camp 9 Imparell
Núm. de línia	1.250 + 1	1.562,5 + 1	1.875 + 1	2.187,5 + 1	2.500 + 1
Fase de subportadora	180°	135°	90°	45°	0°
Nre. de cicles	$283,75 \times 1.251$	$283,75 \times 1.653,5$	$283,75 \times 1.8756$	$283,75 \times 2.188,5$	$283,75 \times 2.501$