



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ενότητα 1

Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής
2026 – 2027

Δρ. Παντελής Μπαλαούρας
Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

01 Εισαγωγή

Πηγές

[1] Παπαδάκης, Α. 2015. Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος. *Ψηφιακή τηλεόραση*. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 2. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/5007>

[2] Walter Fischer, “Digital Video and Audio Broadcasting Technology”, A Practical Engineering Guide Fourth Edition, 2020. Διαθέσιμο στο <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-32185-7>

Μετάδοση τηλεοπτικού περιεχομένου



Σύσταση DVB-S2/T2

- European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
- Digital Video Broadcasting Project (DVB)
- Σύσταση DVB-T2:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/102831/01.02.01_60/ts_102831v010201p.pdf
- Σύσταση DVC-S2:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102400_102499/102441/01.01.01_60/ts_102441v010101p.pdf

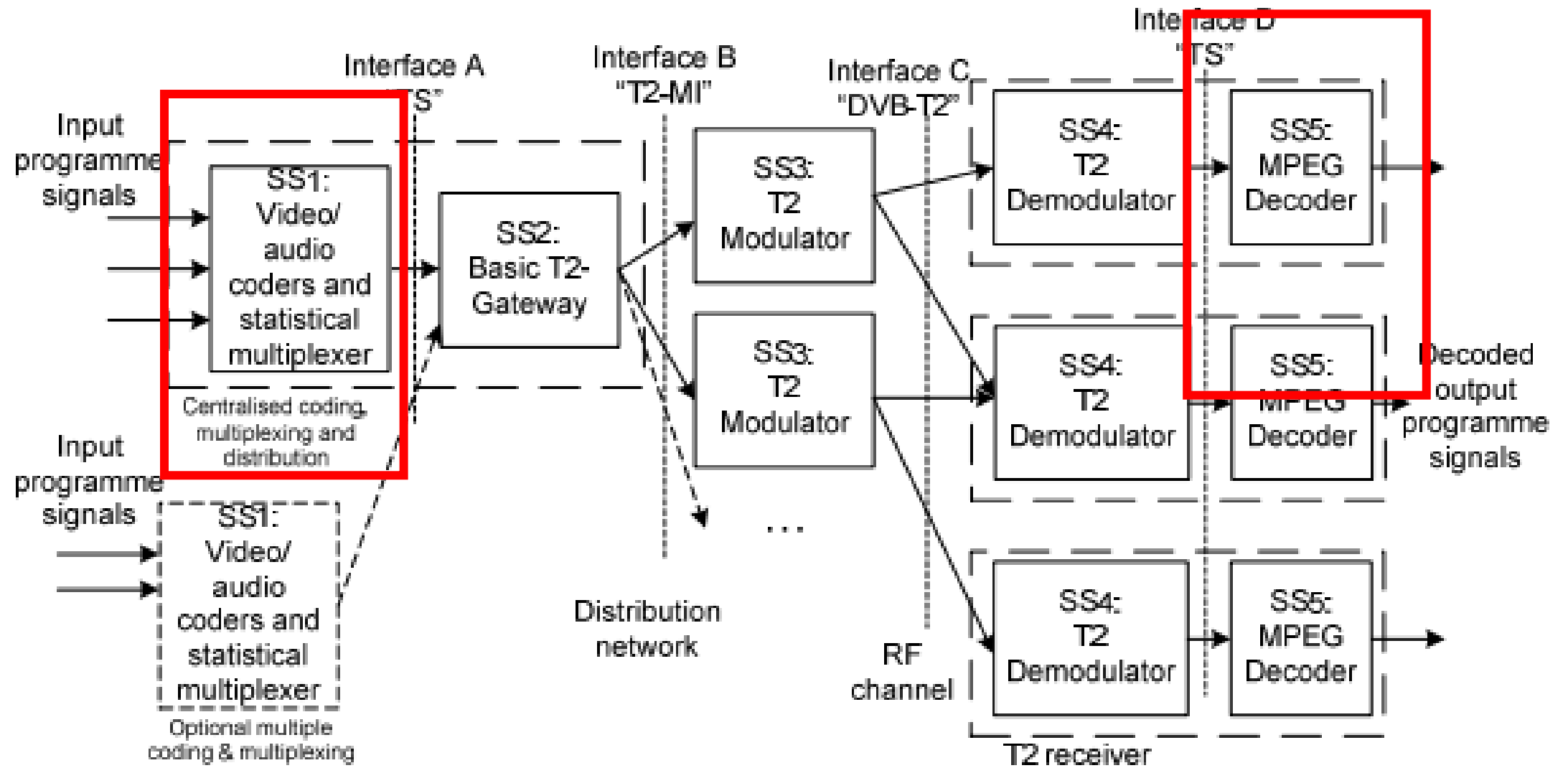


Figure 1: Block diagram of DVB-T2 chain



Μαθησιακοί στόχοι ενότητας

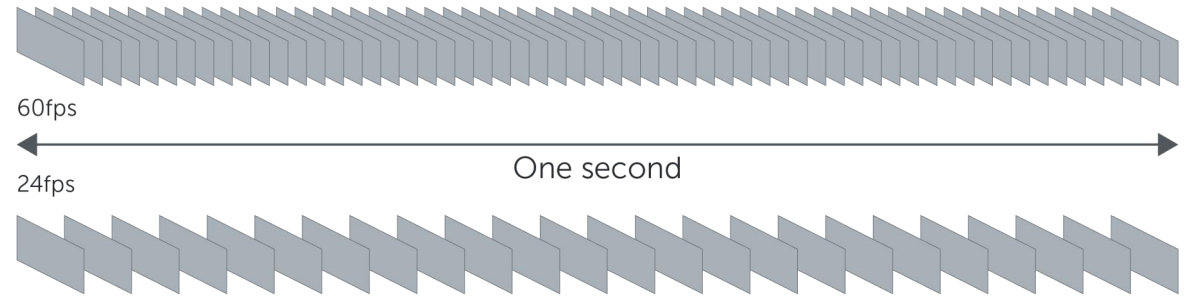
Να κατανοηθούν:

- ✓ Τι είναι το βίντεο
- ✓ Οι **τρόποι αναπαράστασης της πληροφορίας** που αφορά τα χρώματα σε μια εικόνα και κατ' επέκταση στο βίντεο.
- ✓ Η **μετατροπή μεταξύ ισοδύναμων τρόπων αναπαράστασης** εικόνων και βίντεο
- ✓ Η διαχείριση της **υποδειγματοληψίας χρώματος** και τη συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά του τηλεοπτικού σήματος.
- ✓ Οι **απαιτήσεις σε εύρος ζώνης** και τον τρόπο που αυτές σχετίζονται με τις επιλογές παραμέτρων που αφορούν το βίντεο.

02 Βασικές πληροφορίες

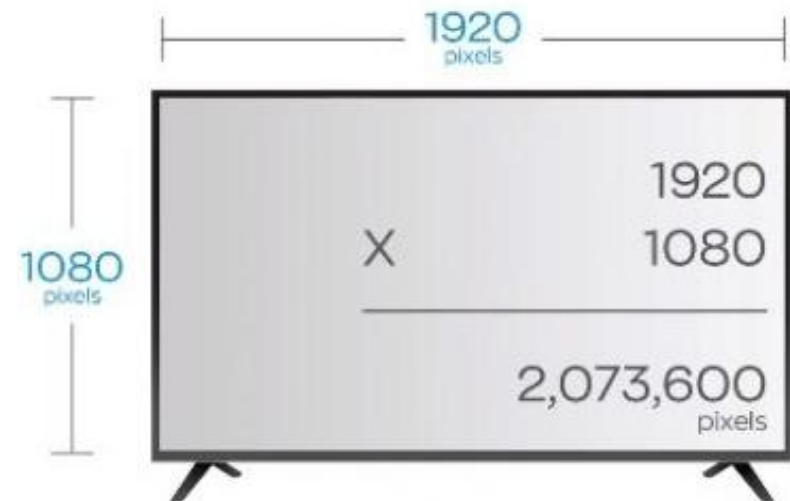
Τι είναι το βίντεο

- **Βίντεο** = αλληλουχία εικόνων ή αλλιώς πλαίσια
- **Εικόνα ή πλαίσιο (frame)**
 - **εικονοστοιχεία** (*picture elements*- pixels)
 - πλήθος pixels = ανάλυση (resolution)
 - Η **ανάλυση** = πλήθους των γραμμών X των στηλών της εικόνας, π.χ. $1920 \times 1080 = 2.073.600 \text{ pixels}$

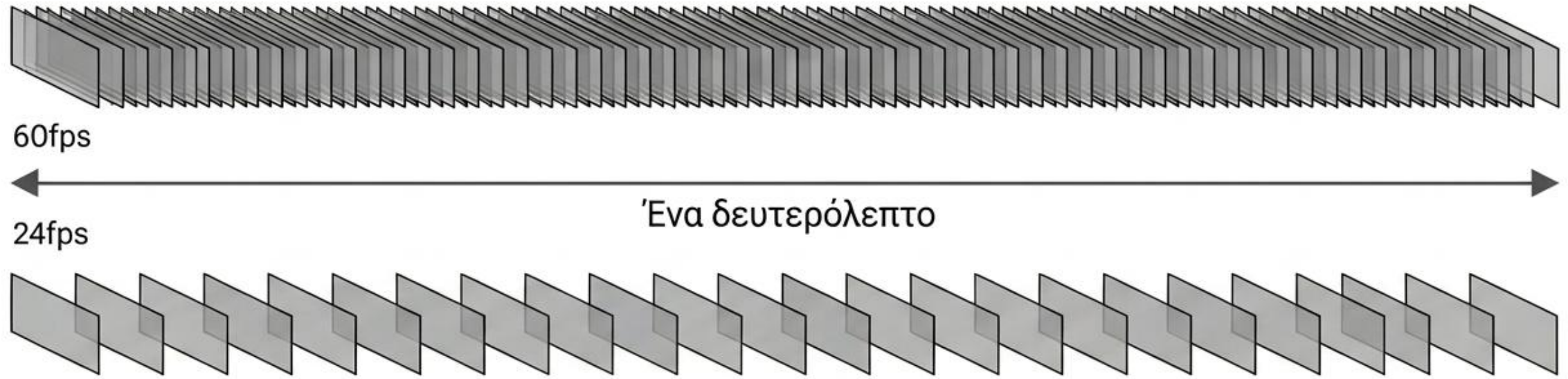


<https://images.app.goo.gl/uFUFYUQ4GsuRVn4u5>

1080P HD



Το βίντεο ως χωροχρονική μήτρα



Βίντεο: Αλληλουχία διακριτών εικόνων (πλαισίων).

Η Βασική Εξίσωση:
Βίντεο = Εικόνες (Χώρος) × Χρόνος.

Κάθε εικόνα συντίθεται από **εικονοστοιχεία (pixels)**. Το πλήθος αυτών ορίζει την **ανάλυση (resolution)** του πλαισίου.

Η χωρική διάσταση – Ανάλυση εικόνας

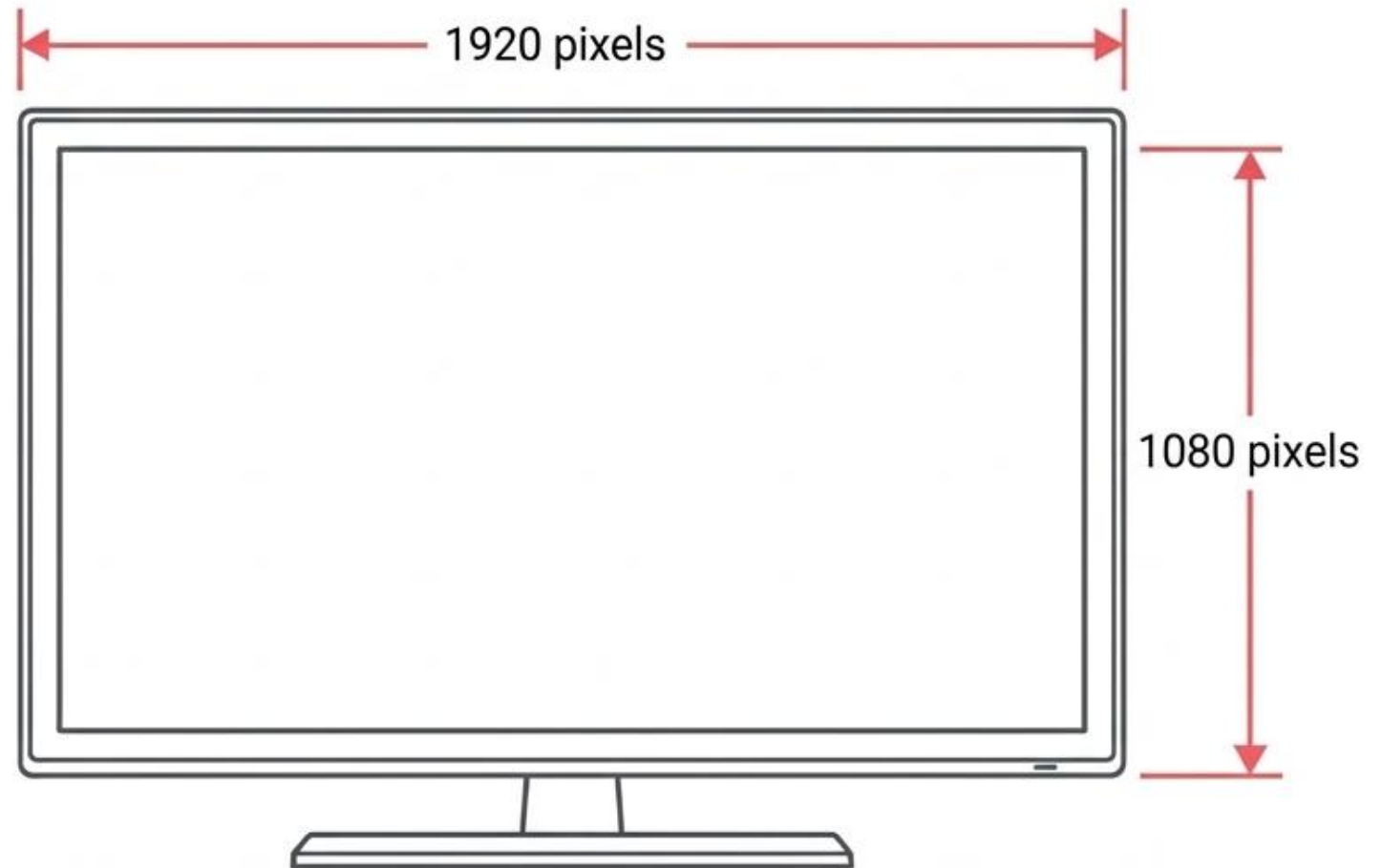
Η ανάλυση ορίζεται από το γινόμενο: Πλήθος Γραμμών × Πλήθος Στηλών

Παράδειγμα Αναφοράς (HDTV):

Πλάτος: 1920 pixels

Ύψος: 1080 pixels

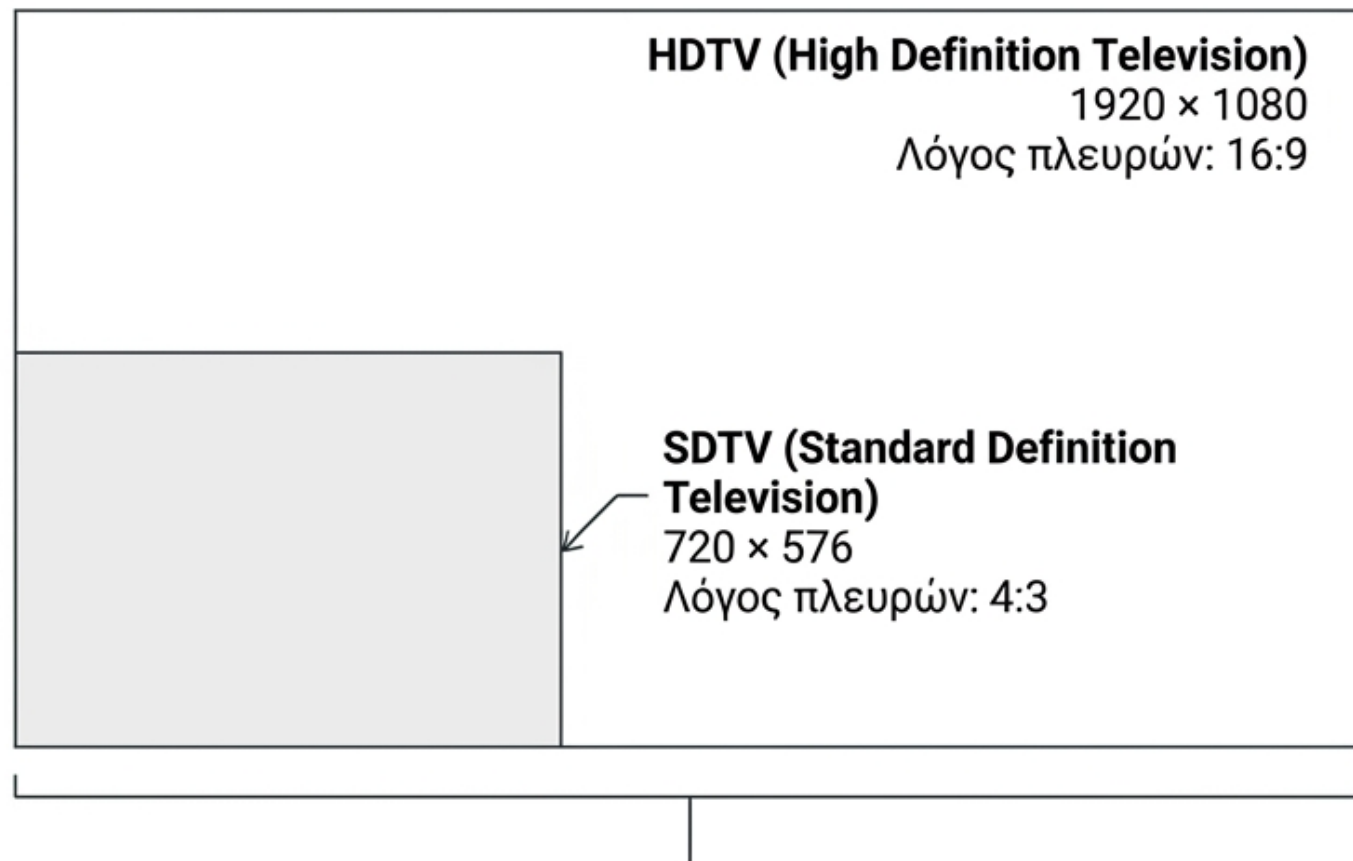
**$1920 \times 1080 =$
 $2.073.600$ pixels
ανά πλαίσιο.**



Τυπικές αναλύσεις εικόνων

- VHS 320 x 240 (4:3)
- **SDTV 720 x 576 (4:3)**
- VGA 640 x 480 (4:3)
- SVGA 800 x 600 (4:3)
- XGA 1024 x 768 (4:3)
- SXGA 1280 x 1024 (5:4)
- UXGA 1600 x 1200 (4:3)
- **HDTV 1920 x 1080 (16:9)**
- QXGA 2048 x 1536 (4:3)
- 2K 2048 x 1536 (4:3)
- UHDTV-1 3840 x 2160 (16:9)
- 4K 4096: 3073 (4:3)
- UHDTV-2 7680 x 4320 (16:9)

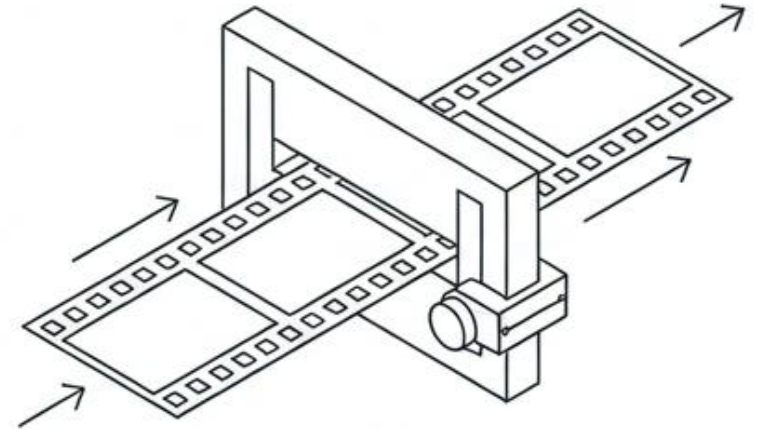
Σύγκριση Τυπικών Αναλύσεων & Λόγος Πλευρών (Aspect Ratio)



Η μετάβαση από SDTV σε HDTV υπερτριπλασίασε τον όγκο των χωρικών δεδομένων ανά πλαίσιο.

Η χρονική διάσταση – ταχύτητα πλαισίων

Η ταχύτητα μετράται σε πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (frames per second, fps).



Ροή Δεδομένων (Pixels/sec):

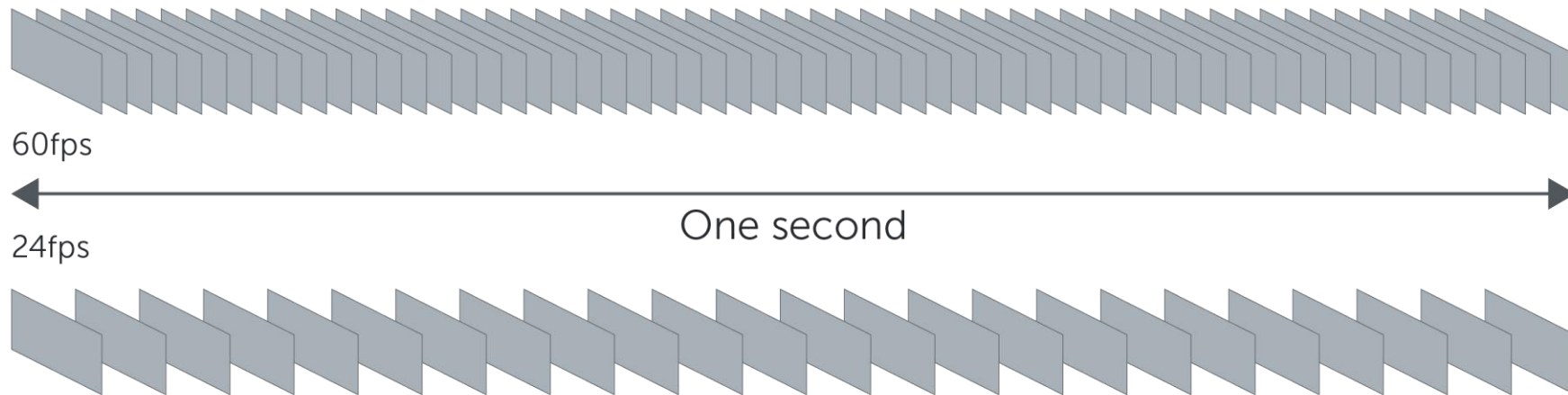
Βήμα 1: Χωρικό Φορτίο = 2.073.600 pixels / frame

Βήμα 2: Χρονικός Πολλαπλασιαστής = 25 fps

Συνολική Ροή: $2.073.600 \times 25 = 51.840.000$ pixels / sec.

Ταχύτητα βίντεο

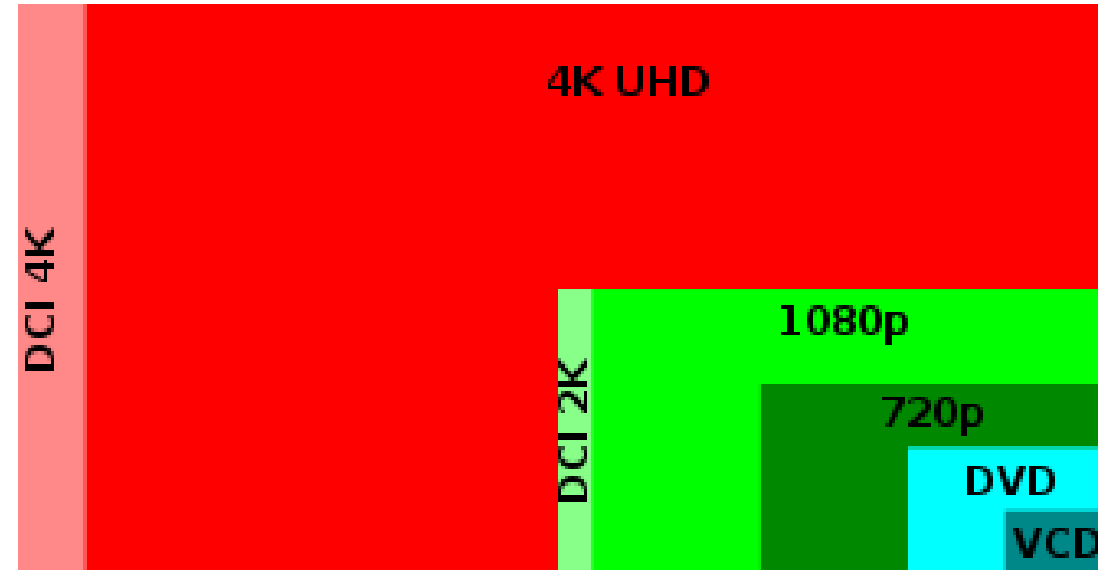
- Η **ταχύτητα**: μέτρηση σε πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (frames per second, fps), π.χ. 25 ή 16 fps
 - $1920 \times 1080 = 2.073.600 \text{ pixels / frame}$
 - $2.073.600 \text{ pixels} \times 25 \text{ fps} = 51.840.000 \text{ pixels / sec}$



Ρυθμός δεδομένων βίντεο

Ρυθμός δεδομένων

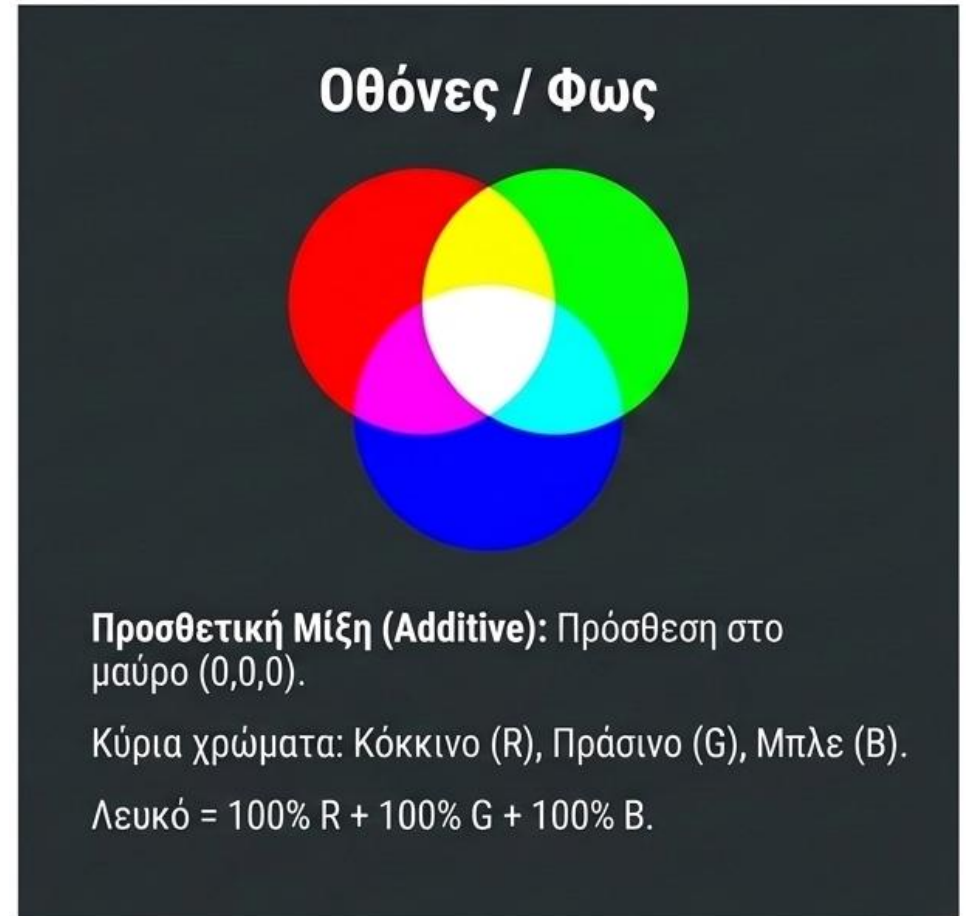
- Πλήθος pixel (ανάλυση)
- Όγκος δεδομένων ανά pixel
 - Πως αναπαριστάται το χρώμα σε κάθε pixel
 - Ο βαθμός πιστότητας ως προς το αρχικό χρώμα



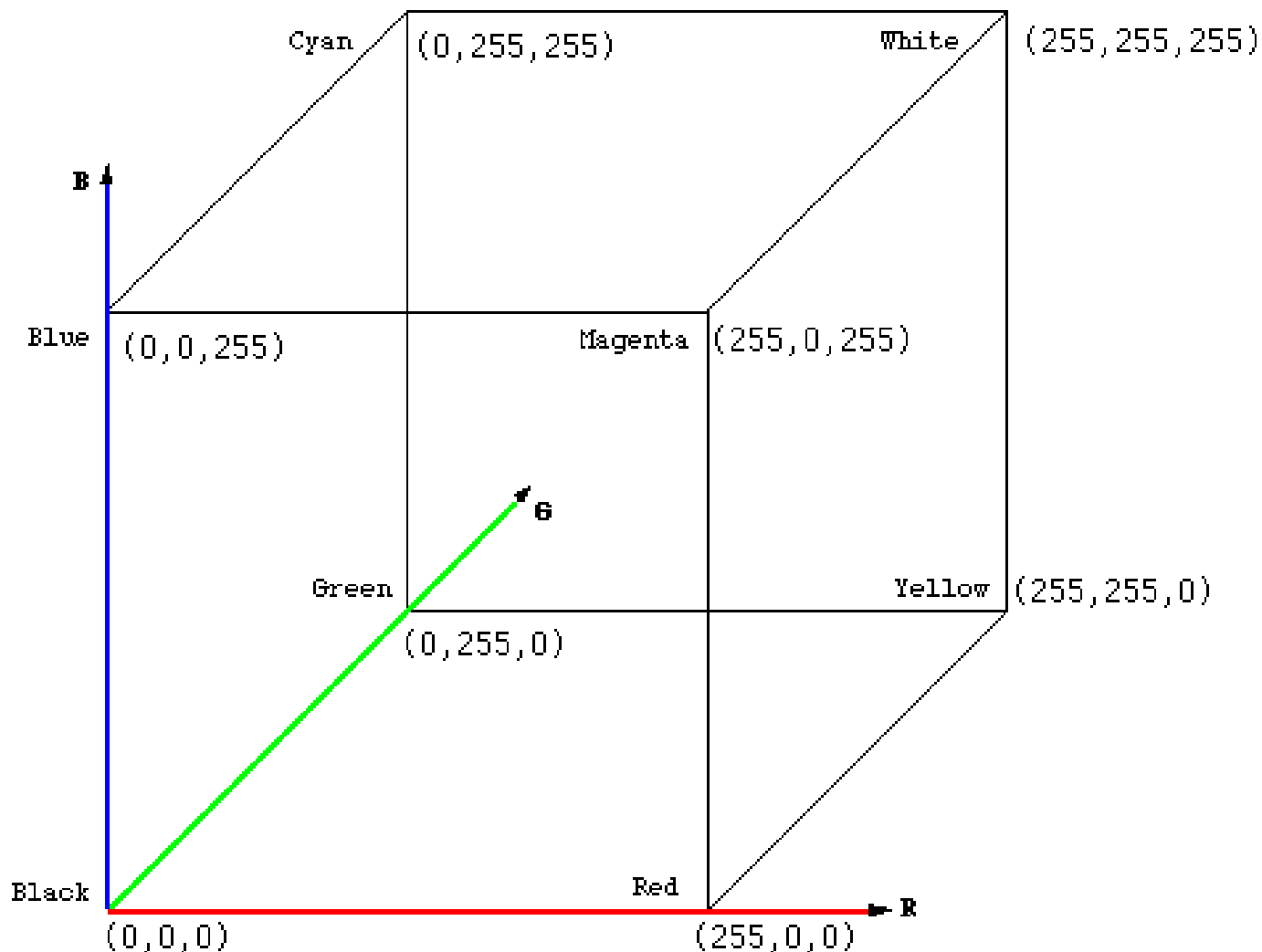
03 Τριχρωματική Όραση: Αναπαράσταση RGB

Μίξη τριών φασματικών χρωμάτων

Η δυνατότητα παραγωγής
οποιοδήποτε χρώματος με **μίξη**
τριών φασματικών χρωμάτων, τα
οποία ονομάζουμε **κύρια χρώματα**
και τα οποία είναι το **κόκκινο (R)**, το
πράσινο (G) και το **μπλε (B)**.



Ο χώρος αναπαράστασης RGB – Ο χρωματικός κύβος



Αφετηρία $(0,0,0)$:

Απόλυτο Μαύρο (Απουσία φωτός).

Άξονες (X, Y, Z) :

Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε.

Κορυφή Κύβου (Maximum):

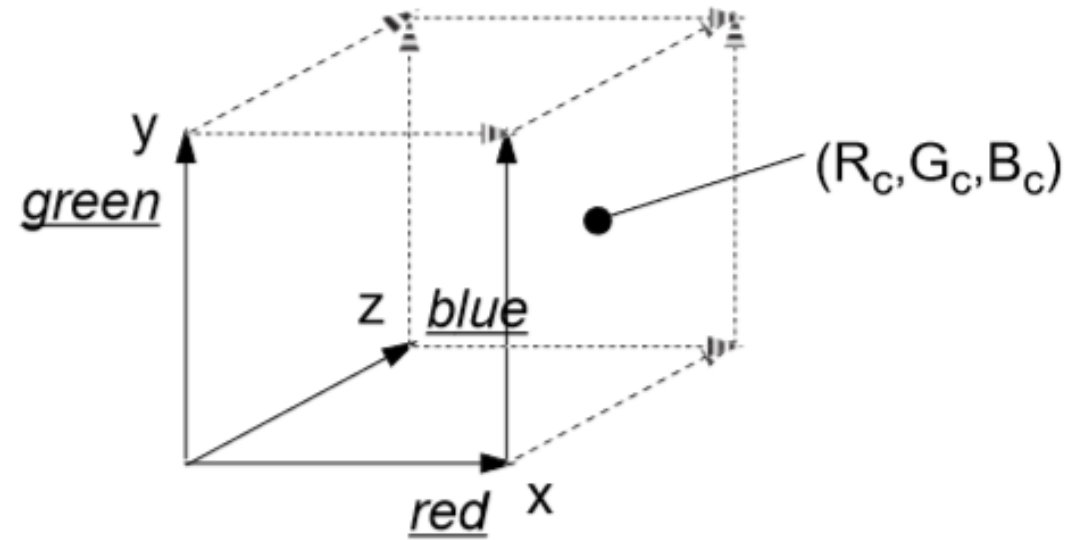
Απόλυτο Λευκό (Πλήρης συμμετοχή).

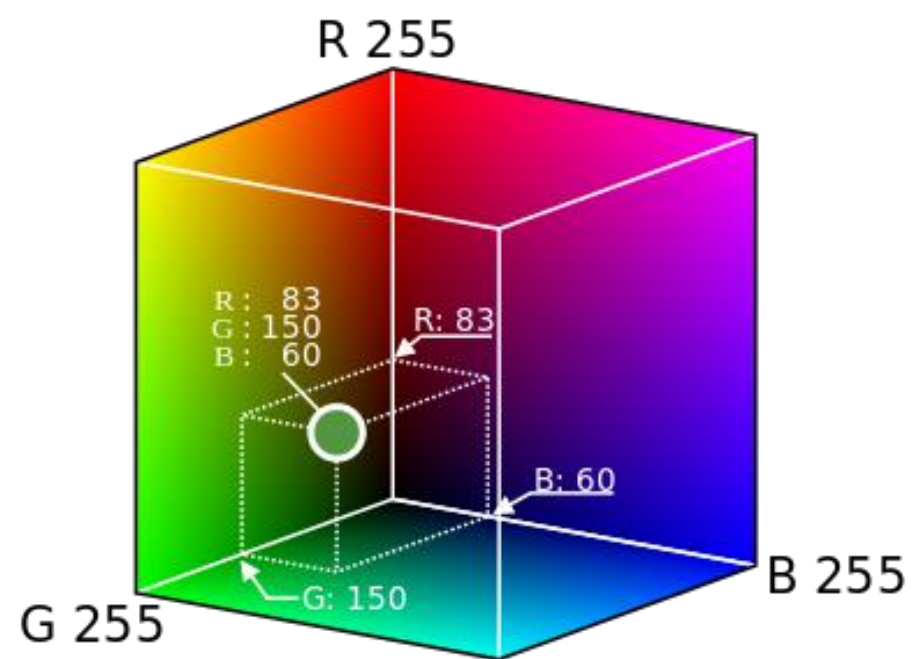
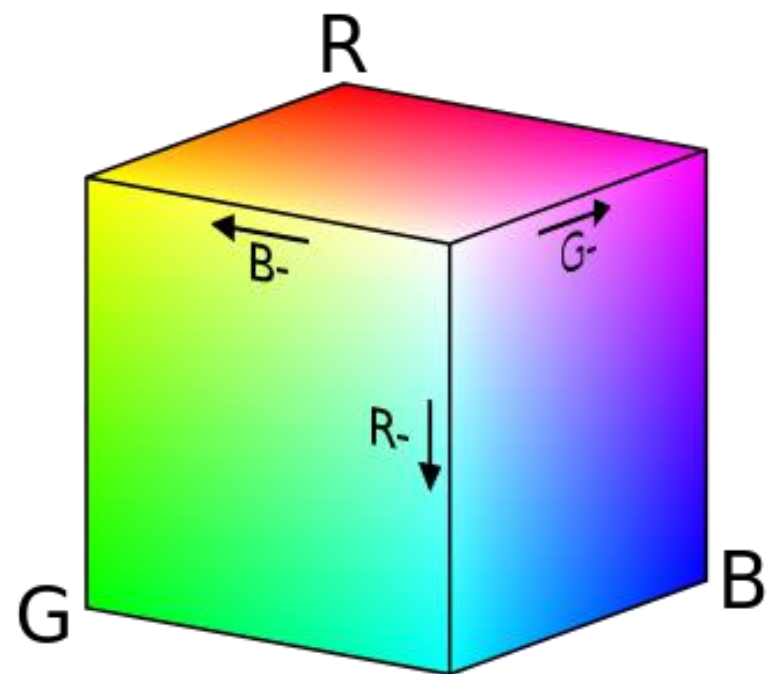
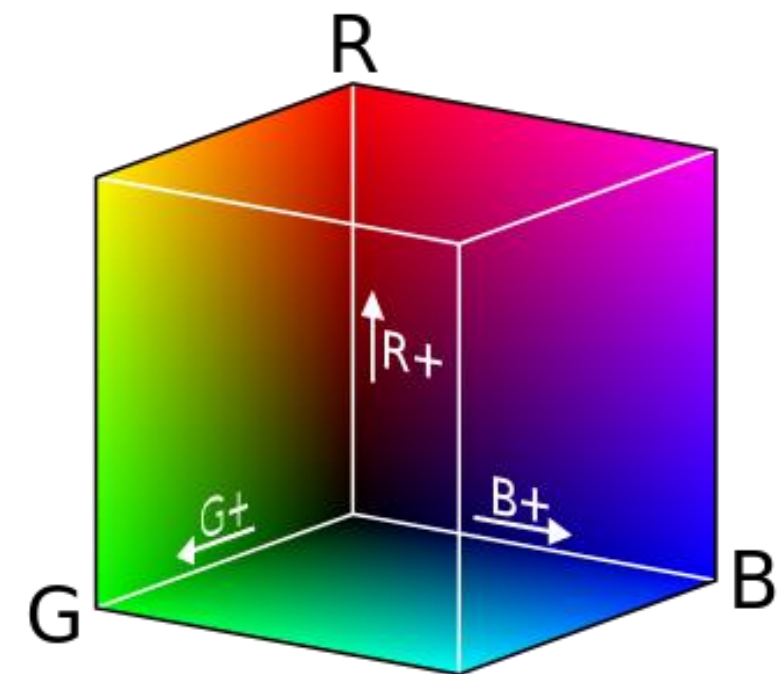
Μηχανική:

Κάθε χρώμα ορίζεται ως ένα μοναδικό σημείο συντεταγμένων (R_c, G_c, B_c) μέσα στον τρισδιάστατο χώρο.

Αναπαράσταση ενός χρώματος

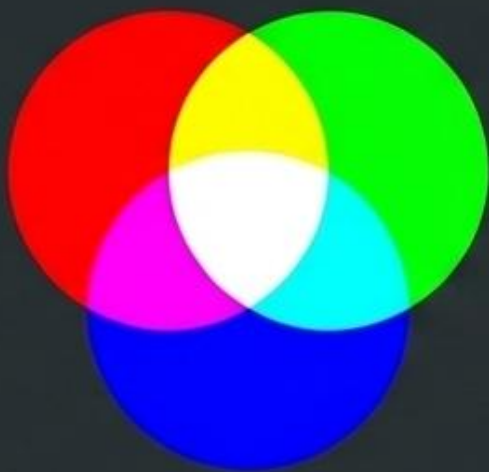
- Ο χώρος αναπαράστασης RGB χρησιμοποιεί το ποσοστό συμμετοχής των **τριών** αυτών βασικών χρωμάτων για την περιγραφή οποιουδήποτε συνδυασμού.
- **Λευκό:** $100\% R, 100\% B, 100\% G$





Προσθετική έναντι Αφαιρετικής μίξης

Οθόνες / Φως

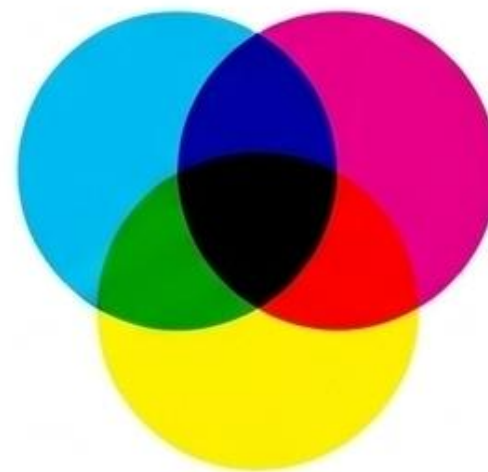


Προσθετική Μίξη (Additive): Πρόσθεση στο μαύρο (0,0,0).

Κύρια χρώματα: Κόκκινο (R), Πράσινο (G), Μπλε (B).

Λευκό = 100% R + 100% G + 100% B.

Εκτύπωση / Χρώματα



Αφαιρετική Μίξη (Subtractive): Αφαίρεση από το λευκό (255,255,255).

Κύρια χρώματα: Κυανό (C), Ματζέντα (M), Κίτρινο (Y), Μαύρο (K).

04 Υπολογισμός ρυθμού δεδομένων βίντεο

ή αλλιώς Εύρος Ζώνης

Πλήθος bits / βασικό χρώμα

- Τα διαθέσιμα **επίπεδα κβαντισμού** επηρεάζουν την ποιότητα της απεικόνισης.
 - Πλήθος των bits για αναπαράσταση
- 8 bits (τυπική επιλογή),
 - $2^8 = 256$ τιμές κβάντισης
 - το εύρος των επιπέδων κβαντισμού είναι από το 0 έως το 255 (100%)
- 10 bits
 - $2^{10} = 1024$ τιμές κβάντισης
 - το εύρος κυμαίνεται από το 0 έως το 1.023 (100%)

Κβαντισμός και βάθος χρώματος

Τα διαθέσιμα επίπεδα κβαντισμού καθορίζουν τον βαθμό πιστότητας ως προς το αρχικό χρώμα.

Χαρακτηριστικό	8-bit (Τυπική Επιλογή)	10-bit (Υψηλή Πιστότητα)
Μαθηματικό Μοντέλο	2^8	2^{10}
Τιμές Κβάντισης ανά Κανάλι	256	1024
Εύρος Τιμών (0-100%)	0 έως 255	0 έως 1023

Στοιχεία ενός πλαισίου

- Ανάλυση: 1920 x 1080 (1080i)
- Πλήθος pixels: 2.073.600
- **Δείγμα ανά χρώμα: 1** (4:4:4)
- Τρία χρώματα
- Πλήθος δειγμάτων RGB: **6.220.800** ($2.073.600 \times 3$)
- Πλήθος bits / εικόνα (frame)
 - 8 bit/δείγμα: **49.766.400** bits / frame
 - 10 bit/δείγμα: **62.208.000** bits / frame

Υπολογισμός Ρυθμού Δεδομένων βίντεο

Ρυθμός Δεδομένων Βίντεο εξαρτάται άμεσα από τρεις μεταβλητές:

Ανάλυση:

Πλήθος pixel ανά
εικόνα (π.χ. 1920×1080).

Βάθος Χρώματος:

Αριθμός bits ανά
βασικό χρώμα
(RGB/YCbCr).

Χρονική Συχνότητα:

Ρυθμός λήψης
πλαισίων (fps).

Ρυθμός Δεδομένων

Ρυθμός δεδομένων (RBG)

- **25** πλαίσια/δευτερόλεπτο, ρυθμός:
 - 1.244.160.000 bits/sec (8 bits)
 - 1.555.200.000 bits/sec (10 bits)
- **30** πλαίσια/δευτερόλεπτο, ρυθμός:
 - 1.492.992.000 bits/sec (8 bits)
 - 1.866.240.000 bits/sec (10 bits)

Υπολογισμός δεδομένων ενός πλαισίου FullHD

Χωρικό Φορτίο: **$1920 \times 1080 = 2.073.600$ pixels.**



Χρωματικά Δείγματα (4:4:4):

- 1 δείγμα ανά χρώμα $\times$ 3 κανάλια (RGB).
- Σύνολο δειγμάτων RGB: $2.073.600 \times 3 = 6.220.800$ δείγματα.



Τελικό Φορτίο ανά Πλαίσιο (Bits / Frame):

- Αν χρησιμοποιήσουμε 8-bit: $6.220.800 \times 8 = 49.766.400$ bits / frame
- Αν χρησιμοποιήσουμε 10-bit: $6.220.800 \times 10 = 62.208.000$ bits / frame

Ρυθμός δεδομένων βίντεο ανά second

- Ο ρυθμός δεδομένων του βίντεο εξαρτάται από:
 - την ανάλυση κάθε εικόνας π.χ. 1920 επί 1080
 - τον αριθμό των bits / χρώμα (RGB) ή (YCbCr)
 - τη συχνότητα με την οποία λαμβάνονται οι εικόνες
- Παγκοσμίως έχουν επικρατήσει δύο συστήματα:
 - 625 γραμμές ανά εικόνα, 25 Hz (Ευρώπη)
 - 525 γραμμές ανά εικόνα, 30 Hz (Αμερική)

Παγκόσμια πρότυπα

Ευρωπαϊκό Σύστημα:



PAL 625 γραμμές ανά εικόνα
25 Hz
(25 πλαίσια / δευτερόλεπτο)

Αμερικανικό Σύστημα:



525 γραμμές ανά εικόνα
30 Hz
(30 πλαίσια / δευτερόλεπτο) **NTSC**

Τελικός Ρυθμός Δεδομένων (Πρότυπο 25 fps)

Φορτίο Πλαισίου × 25 πλαίσια/sec = Ρυθμός Δεδομένων

Για 8-bit Βάθος Χρώματος:

$$49.766.400 \times 25 = (\sim 1.24 \text{ Gbps})$$
$$1.244.160.000 \text{ bits/sec}$$

Για 10-bit Βάθος Χρώματος:

$$62.208.000 \times 25 = (\sim 1.55 \text{ Gbps})$$
$$1.555.200.000 \text{ bits/sec}$$

Τελικός Ρυθμός Δεδομένων (Πρότυπο 30 fps)

Φορτίο Πλαισίου × 30 πλαίσια/sec = Ρυθμός Δεδομένων

Για 8-bit Βάθος Χρώματος:

$$49.766.400 \times 30 = 1.492.992.000 \text{ bits/sec} \quad (\sim 1.49 \text{ Gbps})$$

Για 10-bit Βάθος Χρώματος:

$$62.208.000 \times 30 = 1.866.240.000 \text{ bits/sec} \quad (\sim 1.86 \text{ Gbps})$$

Σύνοψη Αρχιτεκτονικής Ψηφιακού Βίντεο

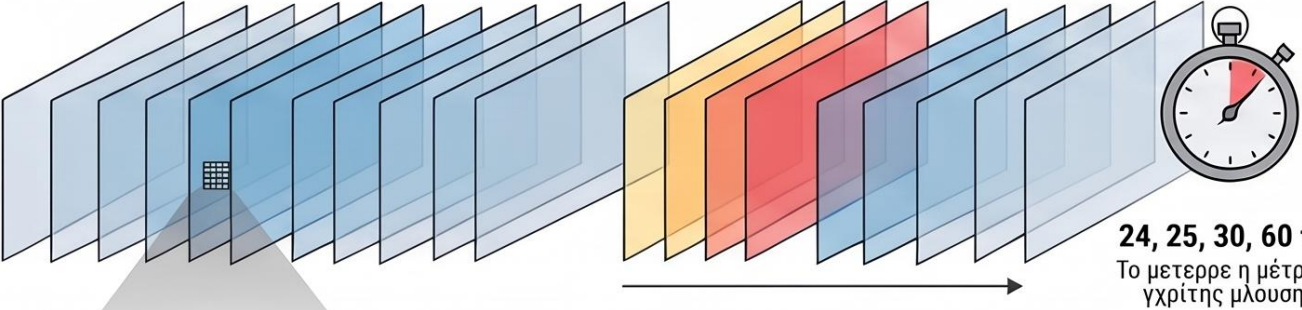
Χώρος (Ανάλυση): 1920 × 1080 (HD). Καθορίζει το πλήθος των διαθέσιμων εικονοστοιχείων.	Χρώμα (Κβαντισμός): Μοντέλο RGB. 8-bit (256 τιμές) ή 10-bit (1024 τιμές). Καθορίζει το βάρος κάθε δείγματος.	Χρόνος (Συχνότητα): 25 Hz (Ευρώπη) ή 30 Hz (Αμερική). Καθορίζει τον ρυθμό πολλαπλασιασμού.
---	---	---

Συνολικός Ρυθμός Δεδομένων = Χώρος × (Χρώμα × 3 Κανάλια) × Χρόνος
(~1.24 έως 1.86 Gigabits/sec για ασυμπίεστο σήμα)

Βασικές Αρχές Ψηφιακού Βίντεο: Από το Pixel στο Σήμα

Τι είναι το Βίντεο;

Μια αλληλουχία από στατικές εικόνες που ονομάζονται πλαίσια (frames).



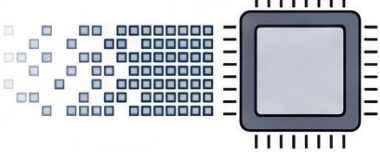
Πλαίσια ανά Δευτερόλεπτο (fps)

Η ταχύτητα μέτρησης της κίνησης. Τυπικά παραδείγματα περιλαμβάνουν 24, 25, 30 ή 60 fps.

24, 25, 30, 60 fps
Το μετρεται η μέτρηση γρήγορης κίνησης

Συχνότητα Σήματος ανά Δευτερόλεπτο

Για Full HD στα 25 fps, επεξεργάζονται 51.840.000 pixels το δευτερόλεπτο.



Full HD at 25 fps
ανά δευτερόλεπτο
51.840.000 pixels
περ σεγγωγητα

Ο Ρυθμός Δεδομένων (Data Rate)

Από την ανάλυση, τον αριθμό των bits ανά χρώμα και τη συχνότητα λήψης των εικόνων (Hz).



Resolution



Bit Depth



Frame Rate (Hz)

Παγκόσμια Συστήματα Μετάδοσης

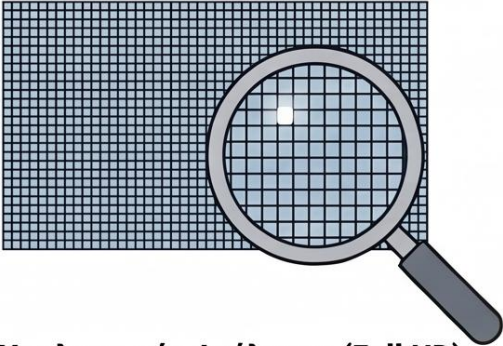


Ευρώπη
625 γραμμές/εικόνα
στα 25 Hz

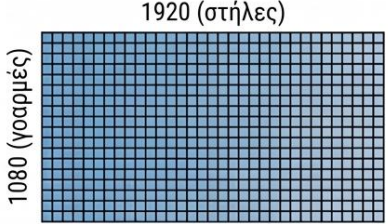


Αμερική
525 γραμμές/εικόνα
στα 30 Hz

Εικονοστοιχείο (Pixel)

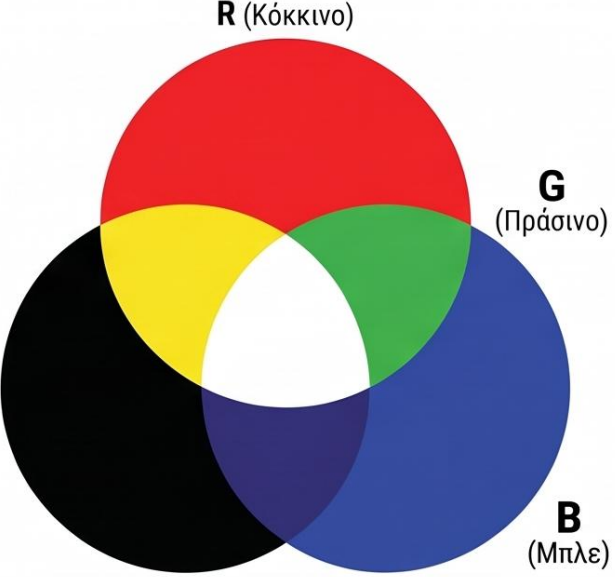


Υπολογισμός Ανάλυσης (Full HD)



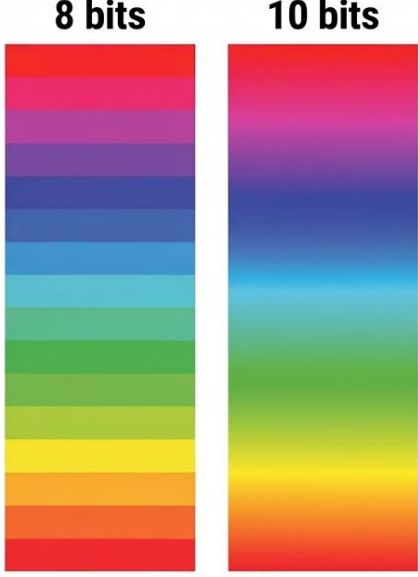
2.073.600 pixels

Προσθετική Μίξη RGB



Οποιοδήποτε χρώμα παράγεται με τη μίξη Κόκκινου (R), Πράσινου (G) και Μπλε (B), με αφετηρία το μαύρο.

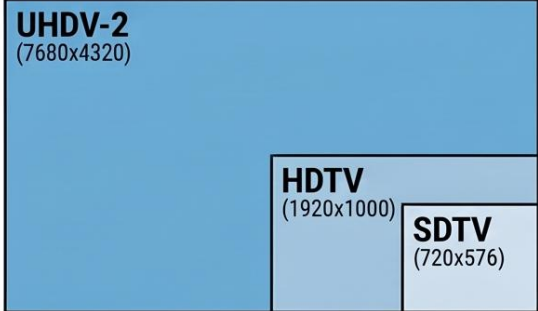
Βάθος Bit & Επίπεδα Κβαντισμού



8 bits
256 τιμές
ανά χρώμα

10 bits
1024 τιμές
Βελτίωση πιστότητας

Τυπικές Αναλύσεις Εικόνας



Ρυθμός Δεδομένων: Full HD in RGB 4:4:4:

Ρυθμός Καρέ (fps)	Βάθος Bit	Ρυθμός Δεδομένων (bits/sec)
25	8 bits	1.244.160.000
25	10 bits	1.555.200.000
30	8 bits	1.492.992.000
30	10 bits	1.866.240.000

05 Αναπαράσταση σήματος βίντεο



Αναπαράσταση Σήματος Βίντεο

Αρχιτεκτονική μετασχηματισμού από τον χώρο RGB στον YCbCr

Δύο ισοδύναμοι τρόποι αναπαράστασης (χώροι) για δύο διαφορετικές ανάγκες

Χώρος RGB (Red, Green, Blue)

Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αλληλεπίδραση με τον φυσικό κόσμο:

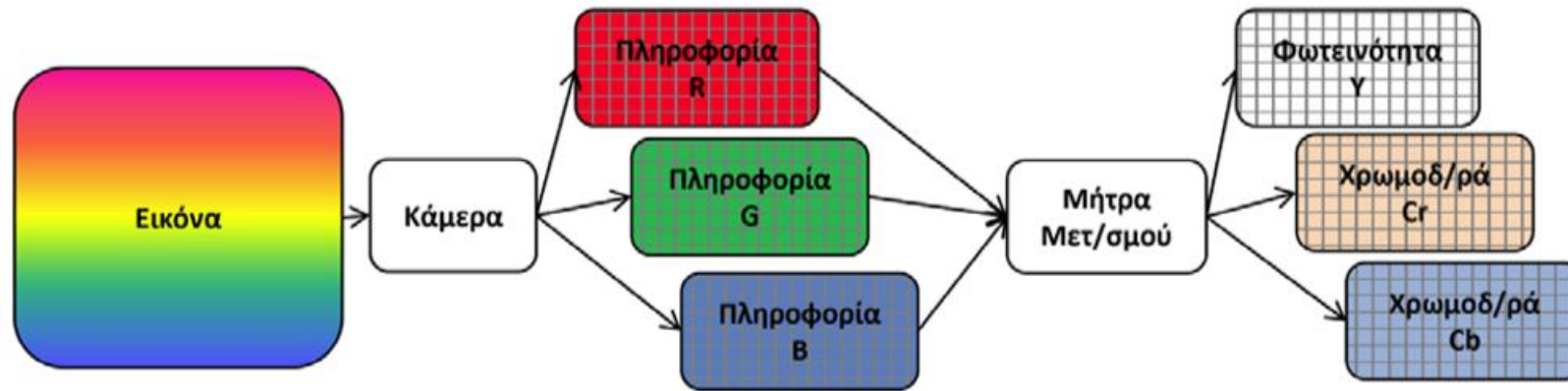
- Στη λήψη του σήματος (Εικονολήπτης/Κάμερα).
- Στην αναπαραγωγή του σήματος (Δέκτης/Οθόνη).

Χώρος YCbCr

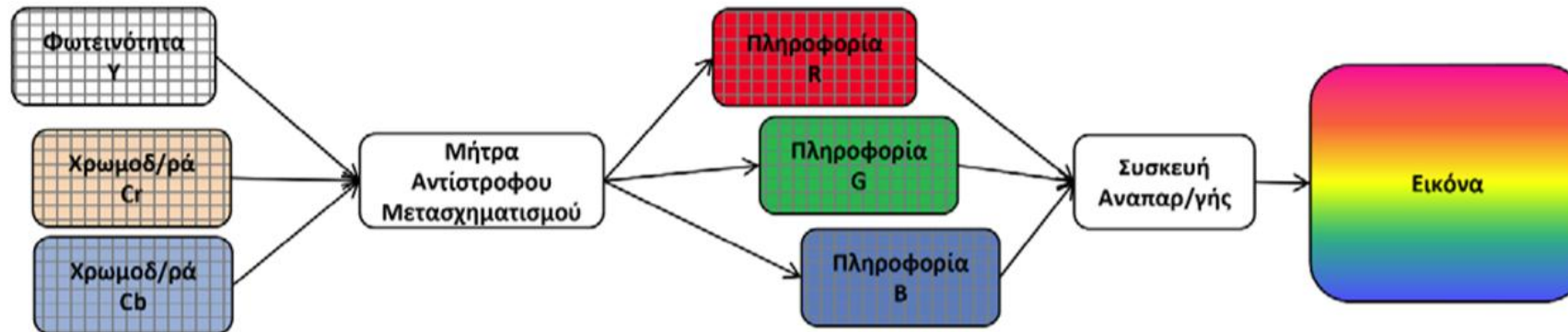
Ένας μαθηματικά ισοδύναμος τρόπος αναπαράστασης, βελτιστοποιημένος για τη μετάδοση του σήματος, διαχωρίζοντας την πληροφορία σε:

- Φωτεινότητα (Y)
- Χρωμοδιαφορές (Cb, Cr, Cg)

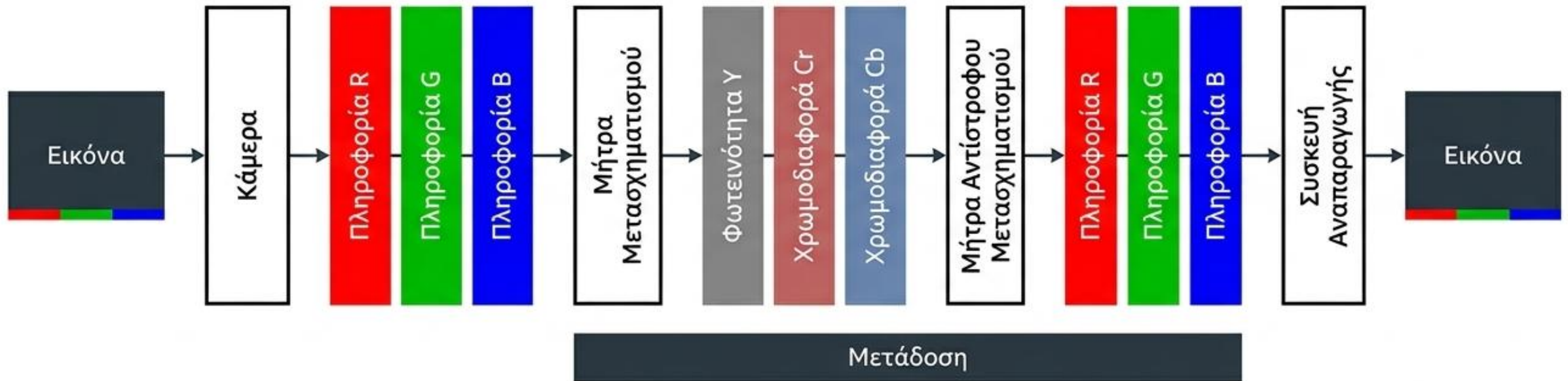
Αναπαράσταση στη κάμερα/συσκευή & κατά τη μετάδοση



Μετάδοση



Η αρχιτεκτονική της μετάδοσης: από άκρο σε άκρο



Μαθηματικός μετασχηματισμός: εξαγωγή Φωτεινότητας (Luma)

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$$



Η φωτεινότητα (Luma) καθορίζει το εύρος από το απόλυτο λευκό έως το απόλυτο μαύρο. Η ασύμμετρη στάθμιση των χρωμάτων (59% Πράσινο) αντικατοπτρίζει την ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού.

Εξαγωγή χρωμοδιαφορών (Chroma)

Η χρωματική πληροφορία απομονώνεται αφαιρώντας τη φωτινότητα (Y) από τα βασικά χρώματα:

$$Cr = R - Y = R - (0,30R + 0,59G + 0,11B) = 0,70R - 0,59G - 0,11B$$

$$Cb = B - Y = B - (0,30R + 0,59G + 0,11B) = -0,30R - 0,59G + 0,89B$$

$$Cg = G - Y = G - (0,30R + 0,59G + 0,11B) = -0,30R + 0,41G - 0,11B$$

Οπτικοποίηση: διαχωρισμός Luma & Chroma



Πρωτότυπο RGB



Y (Φωτεινότητα)



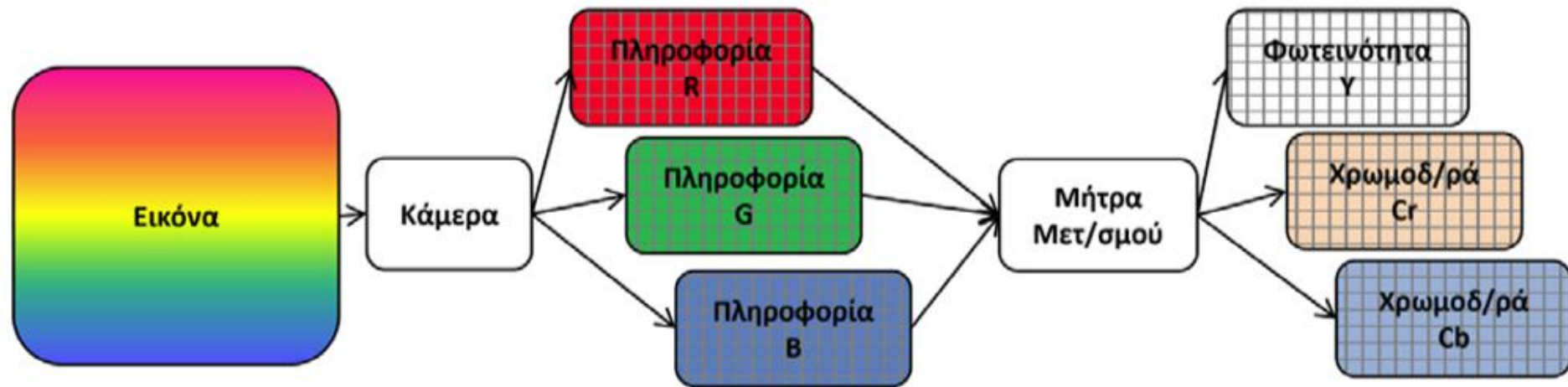
Cb (Χρωμοδιαφορά Μπλε)



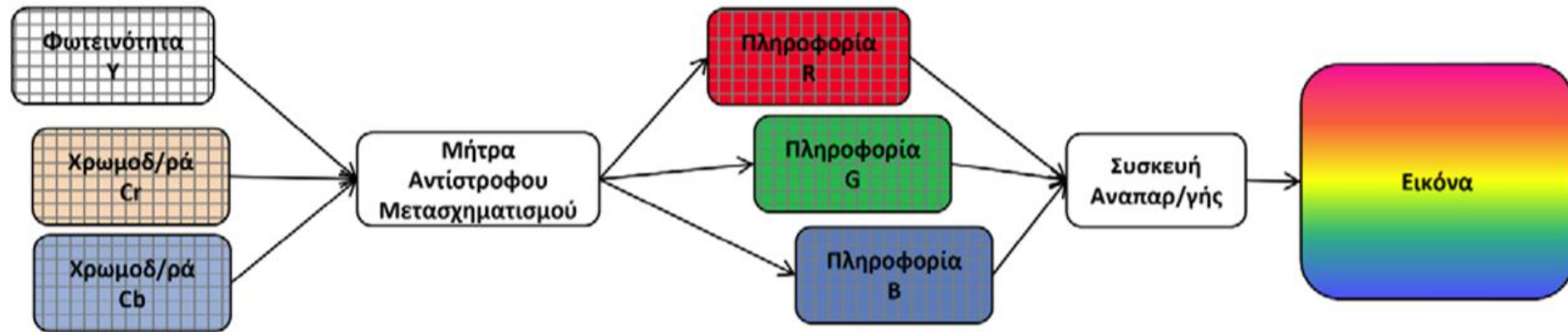
Cr (Χρωμοδιαφορά Κόκκινου)

Η μεγαλύτερη πυκνότητα πληροφορίας και λεπτομέρειας (ακμές, σχήματα) παραμένει στο κανάλι Y, επιτρέποντας στη συνέχεια την υψηλή συμπίεση των καναλιών Cb και Cr κατά τη μετάδοση.

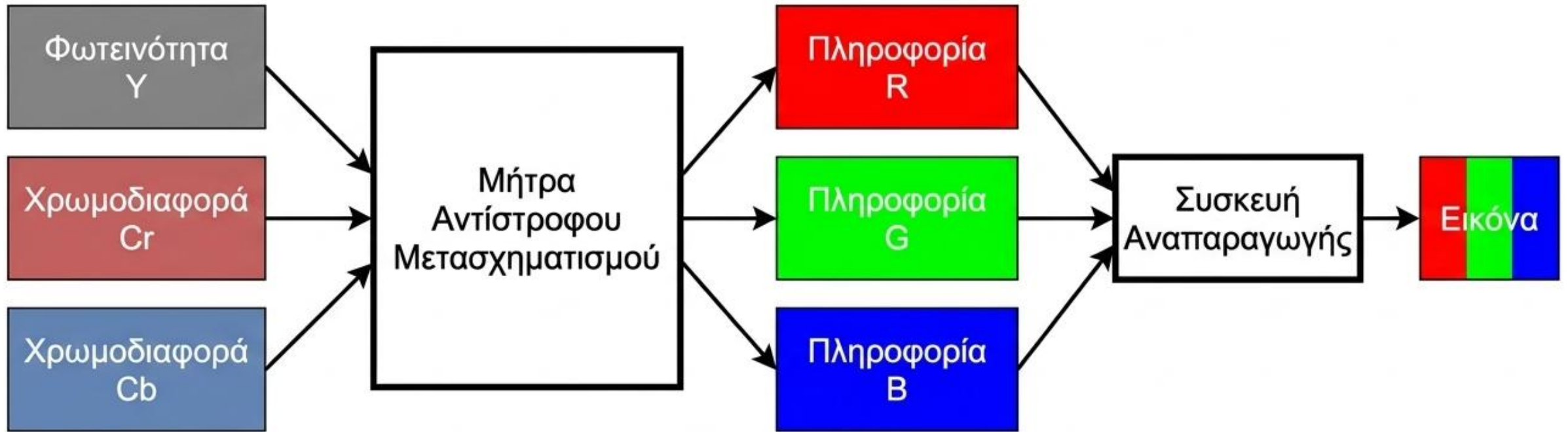
Μετατροπή χρωματικής πληροφορίας από τον χώρο RGB στον χώρο YC_bC_r



Επαναφορά πληροφορίας από τον χώρο YC_bC_r στον χώρο RGB



Επαναφορά στο χώρο RGB

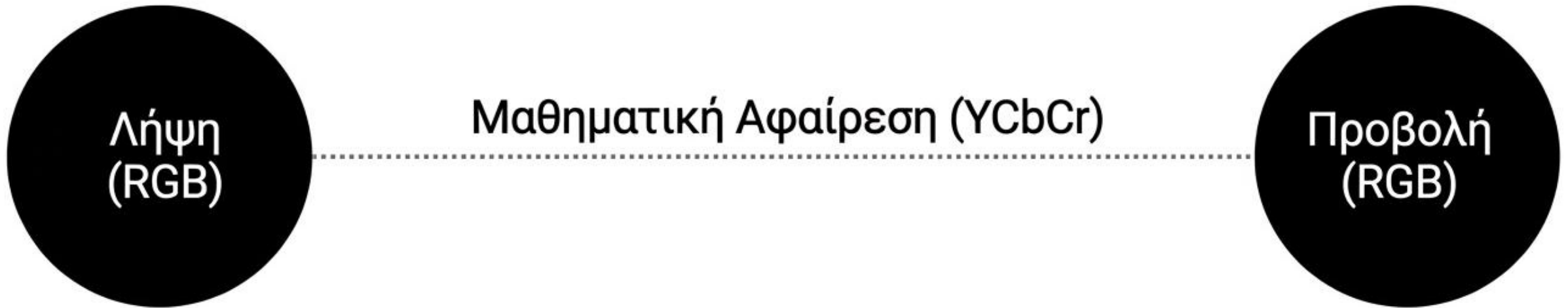


Για την τελική προβολή στην οθόνη του δέκτη, το σήμα μεταδίδεται μέσω της μήτρας αντίστροφου μετασχηματισμού. Η μαθηματική ισοδυναμία εξασφαλίζει την ακριβή ανακατασκευή της αρχικής πληροφορίας των καναλιών R, G και B από τις συνιστώσες Y, Cb, Cr.

Σύγκριση RGB vs YCbCr

Παράμετρος	Χώρος RGB	Χώρος YCbCr
Κύρια Εφαρμογή	Λήψη (Αισθητήρες) & Προβολή (Οθόνες)	Κωδικοποίηση & Μετάδοση Σήματος
Δομή Πληροφορίας	3 ισότιμα χρωματικά κανάλια	1 κανάλι φωτεινότητας, 2 (ή 3) κανάλια χρωματικών διαφορών
Συσχέτιση Δεδομένων	Υψηλή συσχέτιση (μη αποδοτικό για μετάδοση)	Αποσυσχετισμένη πληροφορία (ιδανικό για συμπίεση)

Συνολική εικόνα



Η παραγωγή τηλεοπτικού σήματος στηρίζεται σε μια κομψή αρχιτεκτονική διχοτόμηση. Το υλικό (hardware) απαιτεί την κατανόηση του φωτός (RGB). Η αποτελεσματική μετάδοση όμως, απαιτεί τη μαθηματική αποδόμηση αυτού του φωτός σε φωτεινότητα και χρώμα (YCbCr). Η μετάβαση μεταξύ των δύο εξασφαλίζεται μέσω ενός απόλυτα αντιστρέψιμου γραμμικού μετασχηματισμού.

Αναπαράσταση και Μετάδοση Σήματος Βίντεο: Από το RGB στο YCbCr

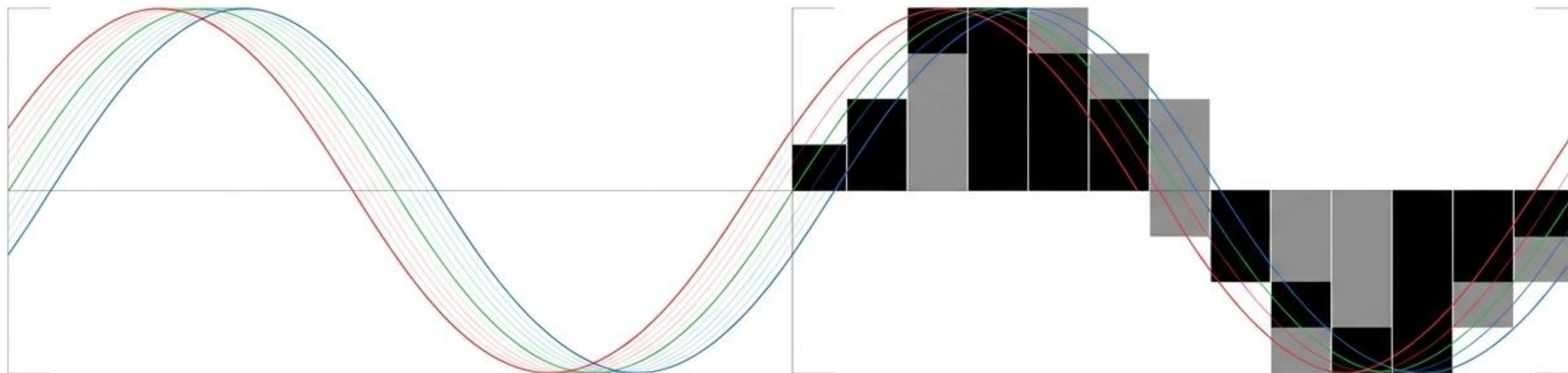
Πώς το σήμα βίντεο μετατρέπεται από την αρχική λήψη (RGB) σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση (Φωτεινότητα & Χρωμοδιαφορές) και πάλι πίσω για την προβολή.



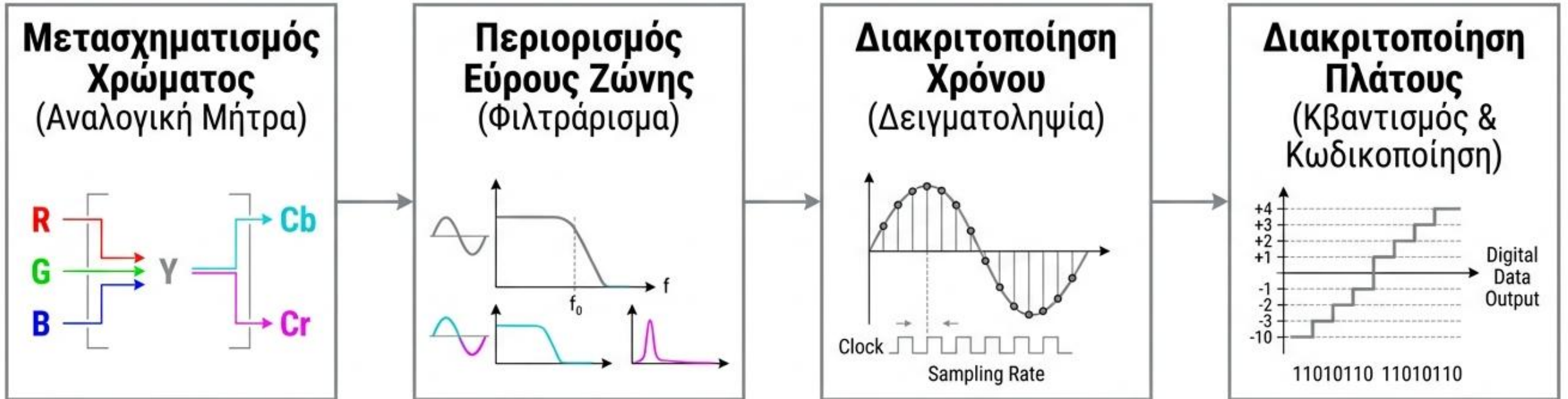
06 Δημιουργία Ψηφιακού Σήματος Βίντεο

Δημιουργία Ψηφιακού Σήματος Βίντεο

Από τη Λήψη RGB στον Ψηφιακό Ρυθμό Μετάδοσης (SD)



Τα βήματα της Ψηφιοποίησης



Δημιουργία Ψηφιακού Σήματος. Βήματα 1 - 4

- **Βήμα 1:** λήψη των τιμών της έντασης των βασικών χρωματικών συνιστωσών κόκκινου, πράσινου και μπλε (Red, Green, Blue).
- **Βήμα 2:** τα 3 σήματα υφίστανται διόρθωση γάμμα (CCIR Rec.709).
- **Βήμα 3:** επεξεργασία των 3 σημάτων ώστε να δώσουν το σήμα φωτεινότητας **Y** και τα σήματα χρωμικότητας, δηλαδή τις χρωμοδιαφορές **C_b** και **C_r**.

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (\text{φωτεινότητα, εύρος: λευκό μαύρο})$$

$$C_r = R - Y = R - (0,30R + 0,59G + 0,11B) = 0,70R - 0,59G - 0,11B$$

$$C_b = B - Y = B - (0,30R + 0,59G + 0,11B) = -0,30R - 0,59G + 0,89B$$

- Οι τιμές της μεταβλητής Y έχουν εύρος τιμών από 0 έως 1 ($R=G=B=0$, $R=G=B=1$)
- Η χρωμοδιαφορά **R-Y** από -0,70 έως +0,70 ($R=0, G=B=1$, $R=1, G=B=0$) και της **B-Y** από -0,89 έως +0,89 ($R=G=1, B=0$, $R=G=0, B=1$)
- **Βήμα 4:** Για να αντιστοιχιστούν τα εύρη των τιμών στην μονάδα, γίνεται κλιμάκωση των τιμών ώστε οι χρωμοδιαφορές κυμαίνονται στο διάστημα -0,5 έως και 0,5.

$$C_b = 0,56 * (B - Y) \qquad 0,56 * (-0,70, +0,70) = (-0,50, +0,50)$$

$$C_r = 0,71 * (R - Y) \qquad 0,71 * (-0,89, +0,89) = (-0,50, +0,50)$$

Βήμα 1 – 3: Από το RGB στη Φωτεινότητα και χρωμικότητα

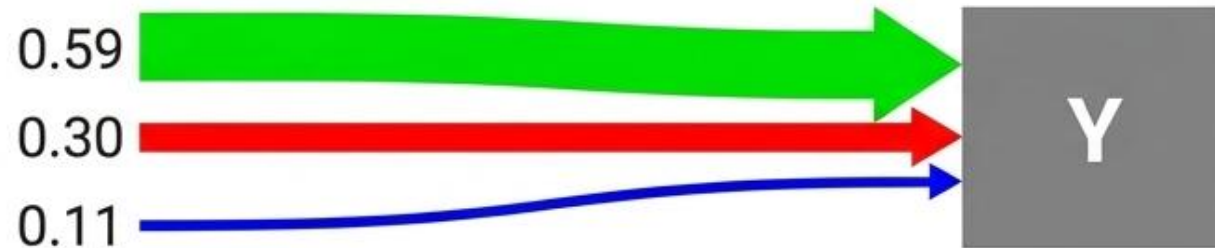
Λήψη & Διόρθωση Γάμμα: Τα βασικά σήματα R, G, B λαμβάνονται και υφίστανται διόρθωση γάμμα (CCIR Rec.709).

Διαχωρισμός Πληροφορίας: Παράγεται το σήμα φωτεινότητας (Y) και δύο σήματα χρωμικότητας (Cb, Cr) για την εκμετάλλευση της ανθρώπινης όρασης και τη βελτιστοποίηση της μετέπειτα συμπίεσης.



Εξισώσεις μετασχηματισμού

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$$



(Υποσημείωση: Φωτεινότητα. Εύρος τιμών από 0 έως 1. Λευκό=1, Μαύρο=0)

$$Cr = R - Y = 0,70R - 0,59G - 0,11B$$

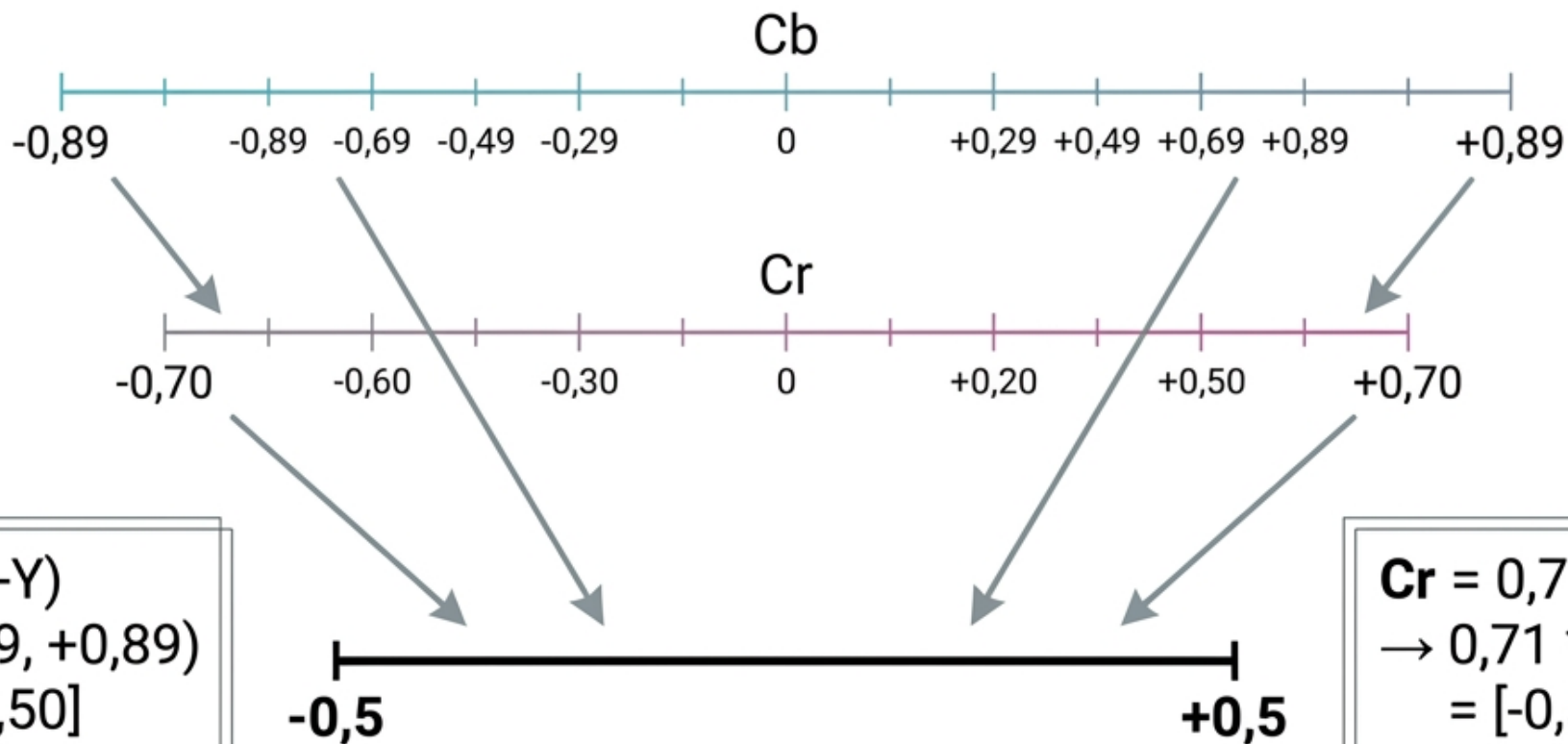
(Υποσημείωση: Εύρος από -0,70 έως +0,70)

$$Cb = B - Y = -0,30R - 0,59G + 0,89B$$

(Υποσημείωση: Εύρος από -0,89 έως +0,89)

Βήμα 4: Κλιμάκωση τιμών (scaling)

Κανονικοποίηση των χρωμοδιαφορών ώστε να κυμαίνονται αυστηρά στο διάστημα $[-0,5, 0,5]$ για την ομαλή μετέπειτα ψηφιοποίηση.



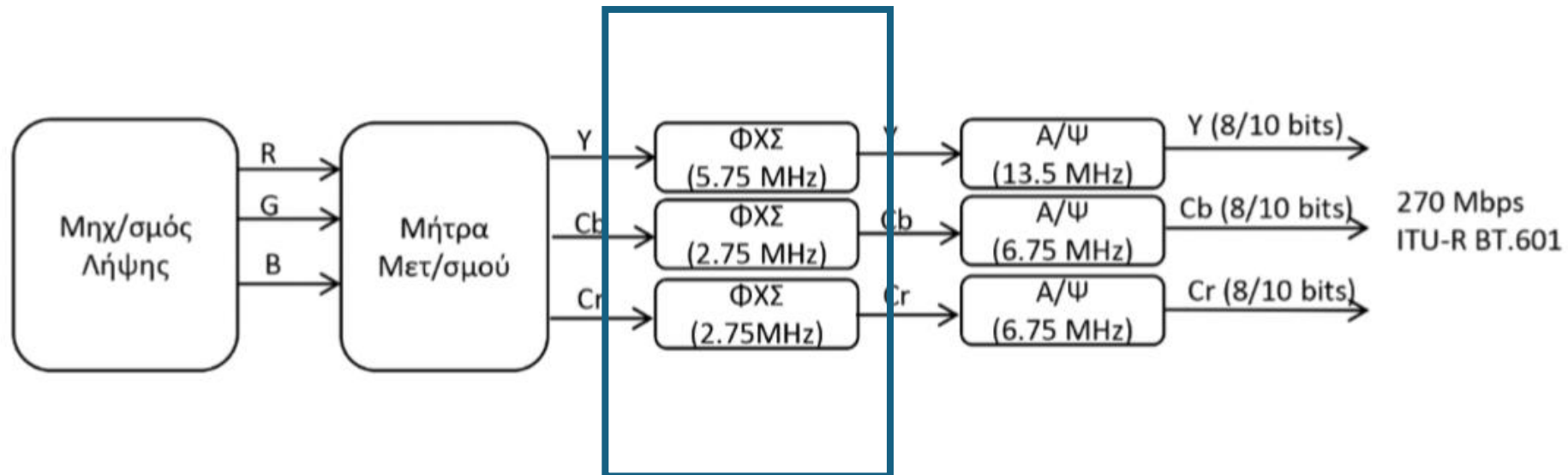
$$\begin{aligned} \mathbf{Cb} &= 0,56 * (B-Y) \\ &\rightarrow 0,56 * (-0,89, +0,89) \\ &= [-0,50, +0,50] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Cr} &= 0,71 * (R-Y) \\ &\rightarrow 0,71 * (-0,70, +0,70) \\ &= [-0,50, +0,50] \end{aligned}$$

Φιλτράρισμα (Βήμα 5)

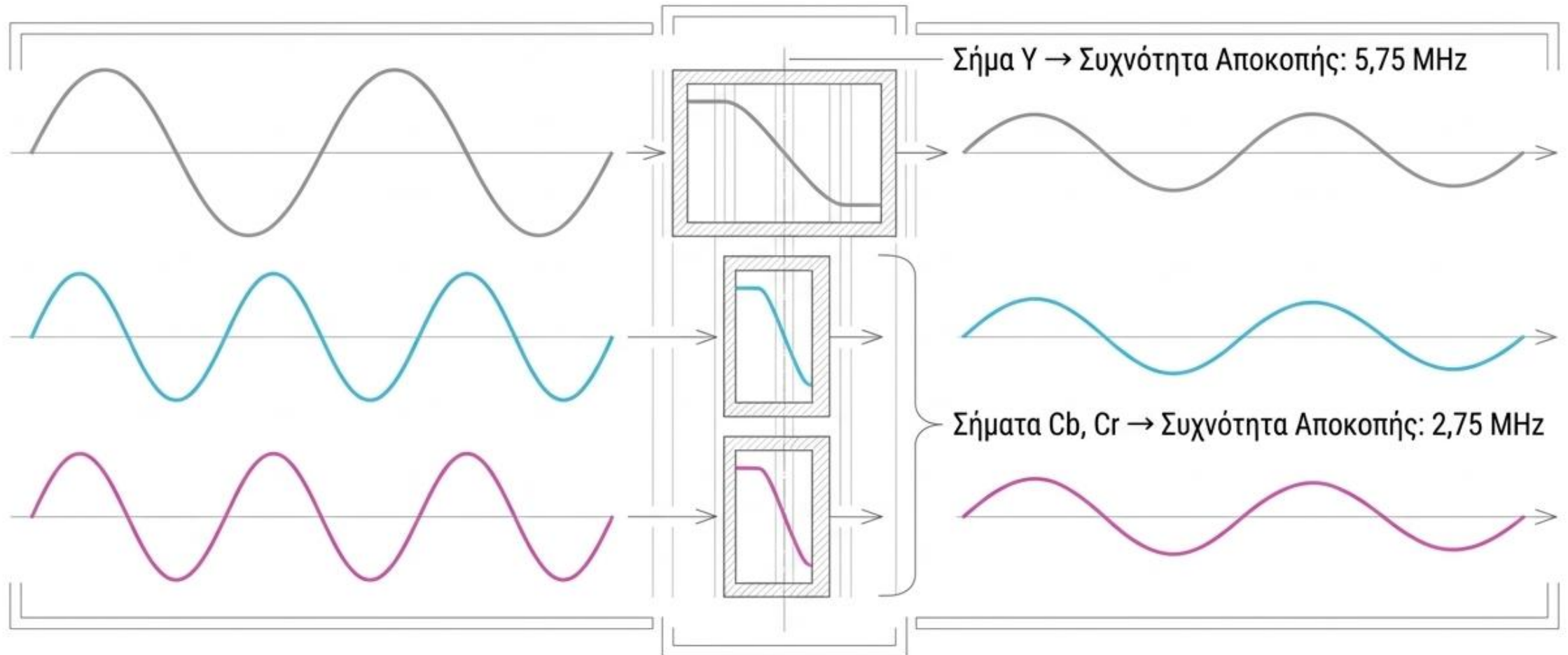
Βήμα 5: Φιλτράρισμα: Το σήμα (αναλογικό) στη συνέχεια φιλτράρεται με χρήση **φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Low pass filter)**

- το σήμα της φωτεινότητας υφίσταται φιλτράρισμα στα **5,75 MHz**
- τα σήματα των χρωμοδιαφορών στα **2,75 MHz** (συχνότητα αποκοπής)



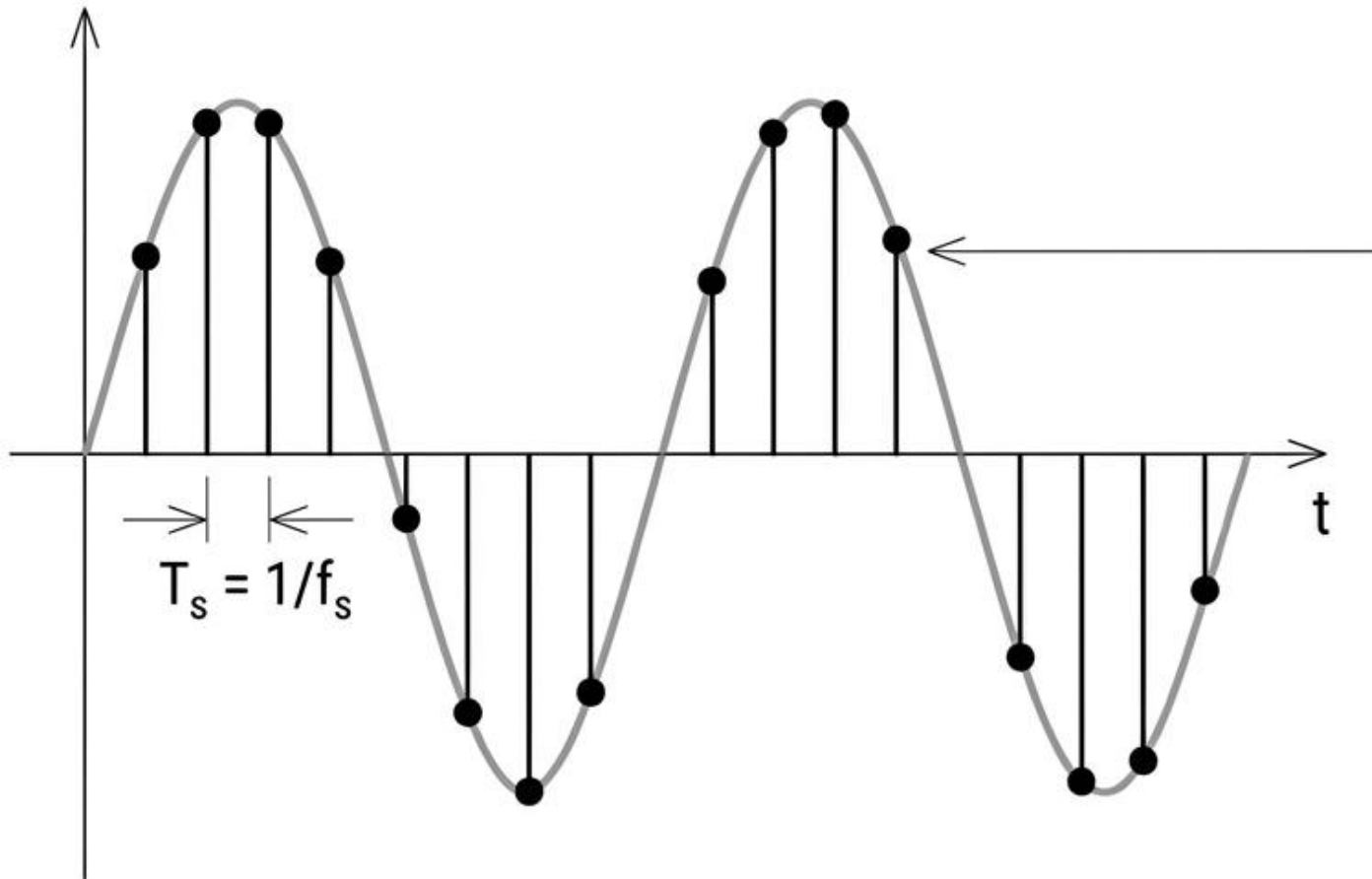
Βήμα 5: Φιλτράρισμα συχνοτήτων

Προετοιμασία για ψηφιοποίηση (αποφυγή φαινομένου aliasing) και σκόπιμη μείωση της περιττής πληροφορίας χρώματος.



Βήμα 6: Δειγματοληψία – διακριτές τιμές

Τα αναλογικά σήματα Υ, Cb, Cr μετατρέπονται σε σήματα διακριτού χρόνου.

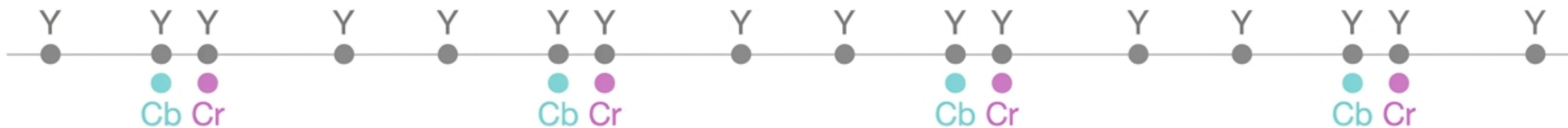


Θεώρημα Shannon-Nyquist

Η συχνότητα δειγματοληψίας (f_s) πρέπει να υπερβαίνει το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας αποκοπής του φίλτρου ($2 * f_{\max}$).

Συχνότητες Δειγματοληψίας – Αναλογία 4:2:2

Σήμα	Φίλτρο (MHz)	Δειγματοληψία (MHz)	Αναλογία
Y	5,75	13,5	4
Cr	2,75	6,75	2
Cb	2,75	6,75	2



Cb Y Cr Y ... (Παρατήρηση: Η συχνότητα δειγματοληψίας της φωτεινότητας είναι διπλάσια. Πλήθος Y = Πλήθος Cb + Cr)

Δειγματοληψία (Βήμα 6)

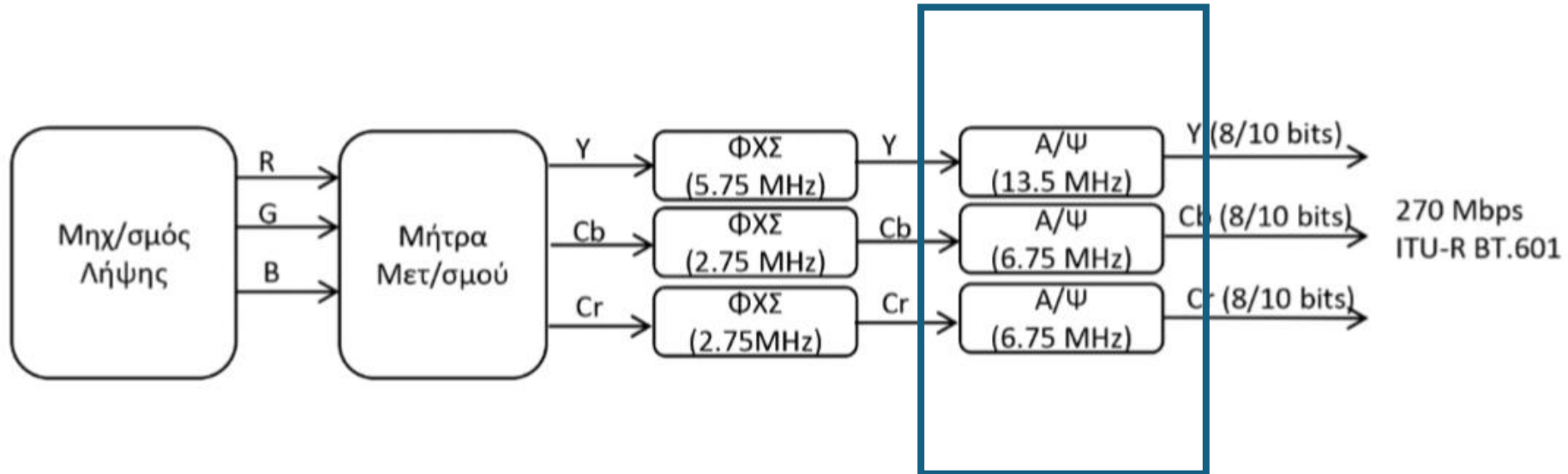
Βήμα 6: Δειγματοληψία: Τα σήματα Y, Cb, Cr μετατρέπονται στη συνέχεια σε **σήματα διακριτού χρόνου**, με χρήση δειγματοληψίας.

- Οι **συχνότητες δειγματοληψίας για τα σήματα πρέπει να υπερβαίνουν το διπλάσιο της μέγιστης συνιστώσας συχνότητας** (σύμφωνα και με το φιλτράρισμα που έχουν υποστεί) ώστε να ικανοποιούν το θεώρημα του Shannon.
- Παρατηρούμε ότι η **συχνότητα δειγματοληψίας της φωτεινότητας είναι η διπλάσια από αυτή των χρωμοδιαφορών**, με αποτέλεσμα το πλήθος των δειγμάτων που αφορούν τη φωτεινότητα να ισούται με το πλήθος των δειγμάτων που αφορούν τις χρωμοδιαφορές.

Σήμα	Συχνότητα Φιλταρίσματος (MHz)	Συχνότητα Δειγματοληψίας (MHz)	Αναλογία	
Y	5,75	13,5	2	4
C _r	2,75	6,75	1	2
C _b	2,75	6,75	1	2

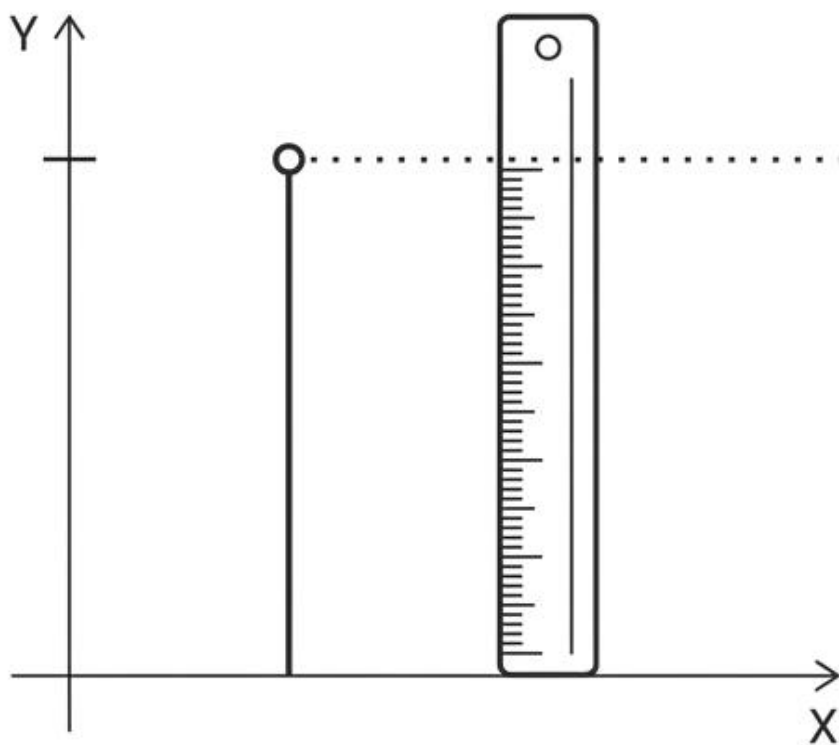
C_BY C_RY C_BY ...

Συχνότητα δειγματοληψίας



Βήμα 7: Διακριτό Πλάτος (Κβαντισμός)

Αντιστοίχιση κάθε δείγματος σε μια πεπερασμένη ακολουθία bits (0 και 1).

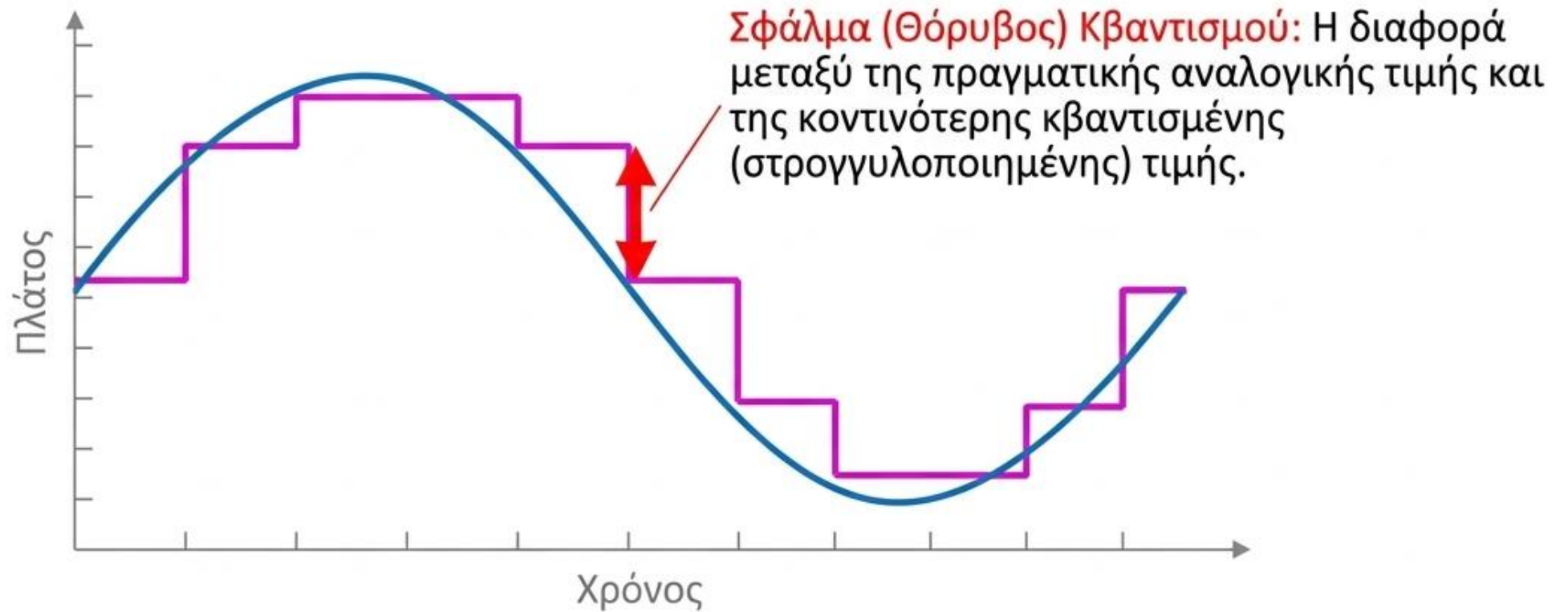


- Κατ' ελάχιστον 8 bits για το Y, και 4 bits για Cb/Cr.
- Ομοιόμορφος κβαντισμός χρησιμοποιώντας **8 ή 10 bits** για όλες τις συνιστώσες.

Κβαντισμός (Βήμα 7)

- Αντιστοίχιση κάθε δείγματος σε ακολουθία bits
- Ο κβαντισμός των σημάτων της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών πραγματοποιείται **με χρήση κατ' ελάχιστον**
 - **οκτώ bits** για τη φωτεινότητα Y
 - **τεσσάρων bits** για τις χρωμοδιαφορές
 - οι συνήθεις τιμές είναι τα 8 ή τα 10 bits και για τα τρία μεγέθη
- **Ομοιόμορφος κβαντισμός** με χρήση 8 και 10 bits
 - έχουμε 2^8 και 2^{10} επίπεδα κβαντισμού
 - το πλήθος των τιμών κβάντισης είναι αντίστοιχα 256 και 1.024

Σφάλμα κβαντισμού & δείκτης SQNR



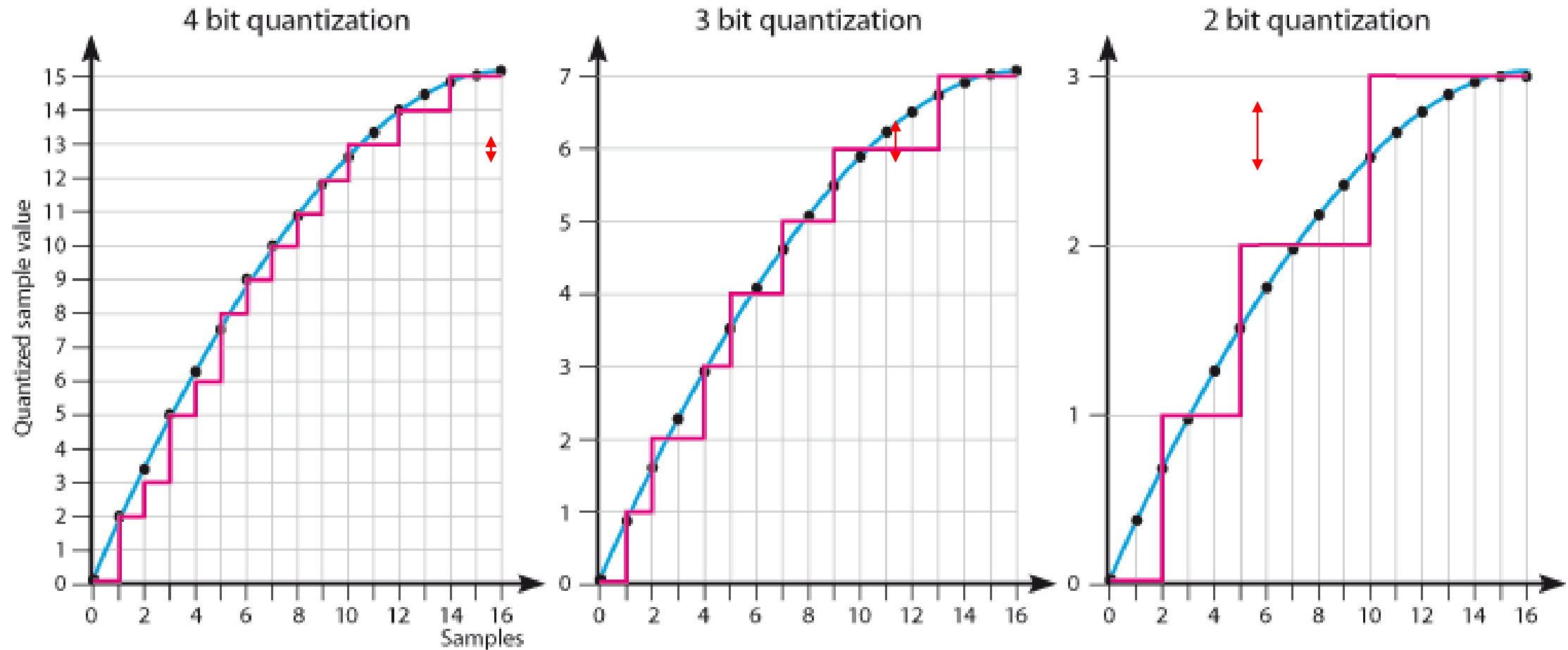
Λόγος Σήματος προς Θόρυβο Κβαντισμού
(Signal to Quantization Noise Ratio - SQNR).

Το SQNR εξαρτάται άμεσα από το πλήθος των διαθέσιμων επιπέδων.
Περισσότερα επίπεδα = Μικρότερο σφάλμα.

Σφάλμα κβαντισμού

- Το πλήθος των bits που επιλέγουμε για τον κβαντισμό σχετίζεται με
 - **την ποιότητα του κβαντισμού** και συγκεκριμένα
 - **τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο κβαντισμού** (Signal to Quantization Noise Ratio, SQNR).
- Στην ουσία αφορά **τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του αναλογικού σήματος και της κοντινότερης κβαντισμένης τιμής.**
- Η στρογγυλοποίηση αυτή αφορά το **σφάλμα κβαντισμού** (ή, αλλιώς, τον θόρυβο κβαντισμού).
- Το SQNR σχετίζεται με τη στρογγυλοποίηση που πραγματοποιείται και εξαρτάται από το πλήθος των διαθέσιμων επιπέδων.

Σφάλμα κβαντισμού



Σύγκριση βάθους κβαντισμού

Αρχιτεκτονική 8-bit

8 bits / δείγμα

$2^8 = 256$ επίπεδα

Αρχιτεκτονική 10-bit

10 bits / δείγμα

$2^{10} = 1.024$ επίπεδα

Το Πλεονέκτημα των 10-bit: Η προσθήκη μόλις 2 bits ανά δείγμα τετραπλασιάζει την ακρίβεια τιμών, βελτιώνοντας δραματικά το SQNR του τελικού σήματος.

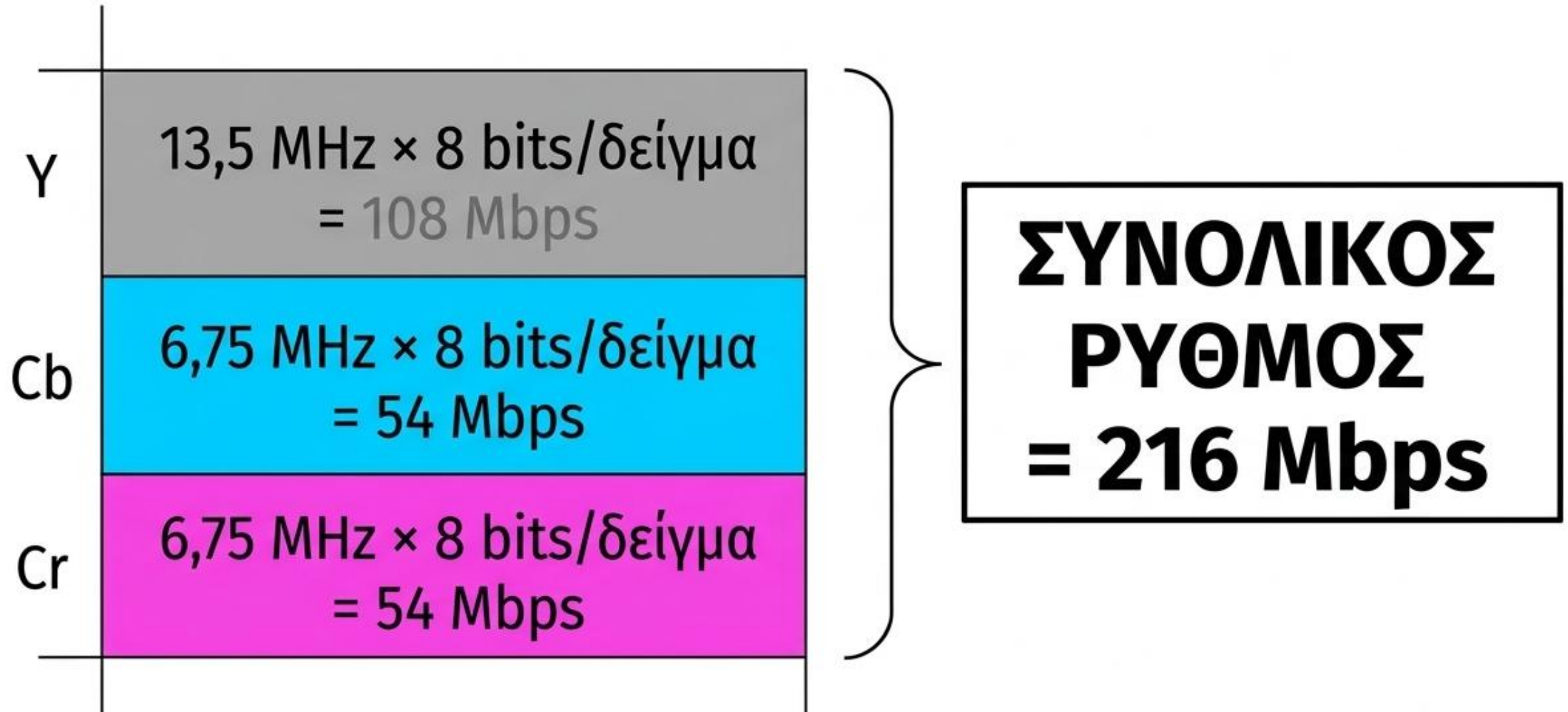
Ρυθμός μετάδοσης SD

Τυπική ευκρίνεια (Standard Definition – SD)

Ο ρυθμός μετάδοσης για δειγματοληψία με ρυθμούς 13,5 MHz (Υ) και 6,75MHz (χρωμοδιαφορές) αντίστοιχα και κβαντισμό

1. με χρήση 8 bits και για τις τρεις προκύπτουσες συνιστώσες και
2. 10 bits για τις τρεις συνιστώσες προκύπτει από τις επόμενες σχέσεις.

Ρυθμός δεδομένων SD 8 bit



Ρυθμός δεδομένων SD 10 bit

$$13,5 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits/δείγμα} = 135 \text{ Mbps}$$

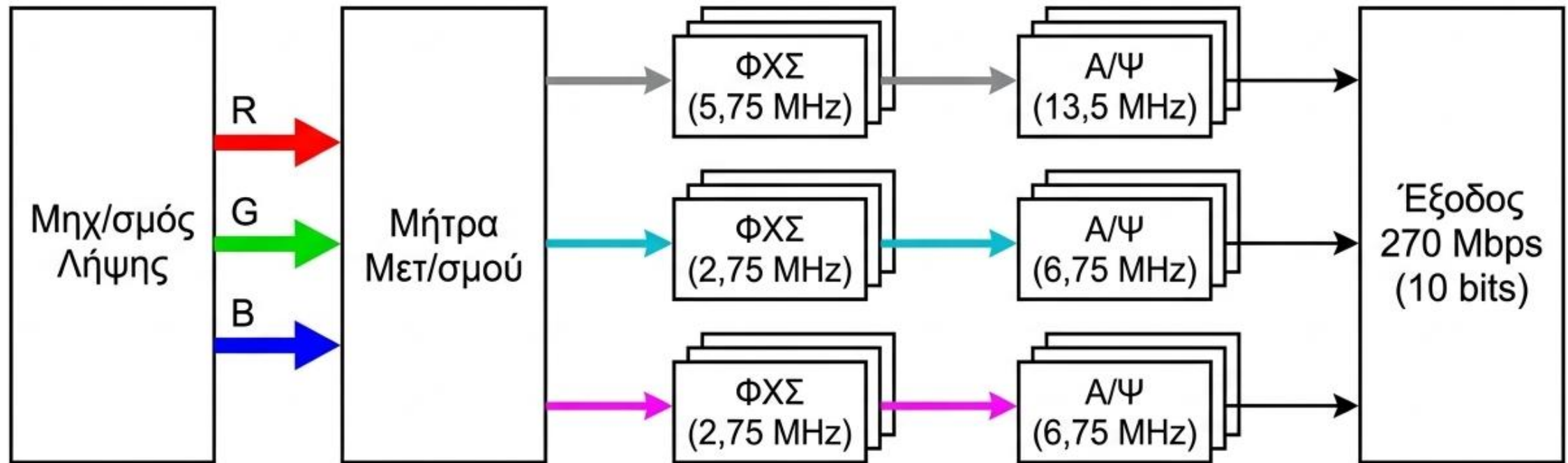
$$6,75 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits/δείγμα} = 67,5 \text{ Mbps}$$

$$6,75 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits/δείγμα} = 67,5 \text{ Mbps}$$

**ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΡΥΘΜΟΣ
= 270 Mbps**

Πολυπλεξία (16 δείγματα): Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y... (Πλήθος: 8 Y, 4 Cb, 4 Cr | Αναλογία: Cb, Cr = 1/2 Y)

Συνολική Αρχιτεκτονική Συστήματος (ITU-R BT.601)



Η πλήρης διαδρομή του τηλεοπτικού σήματος: Από την αναλογική πηγή (φας/RGB), μέσα από την αναλογική προετοιμασία, στη δημιουργία του τυποποιημένου ψηφιακού ρεύματος.

Βασικές Αρχές Ψηφιοποίησης (Σύνοψη)

1

Διαχωρισμός YCbCr

Επιτρέπει την υποδειγματοληψία της πληροφορίας χρώματος (χρωμοδιαφορές), εκμεταλλευόμενο τις φυσικές αδυναμίες της ανθρώπινης όρασης χωρίς ορατή απώλεια ποιότητας.

2

Εφαρμογή Θεωρήματος Shannon

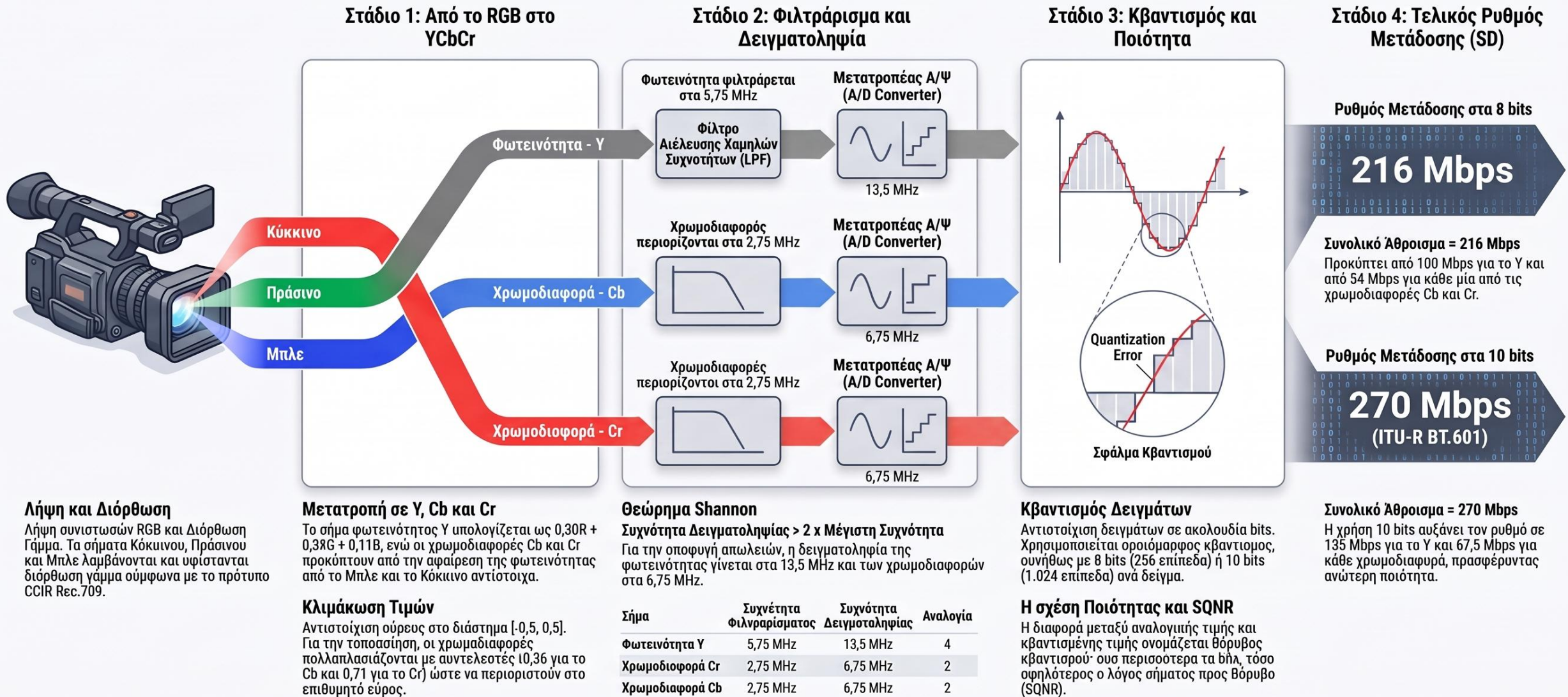
Τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων (5,75 & 2,75 MHz) υπαγορεύουν άμεσα τις ελάχιστες απαιτούμενες συχνότητες δειγματοληψίας (13,5 & 6,75 MHz) για την αποφυγή aliasing.

3

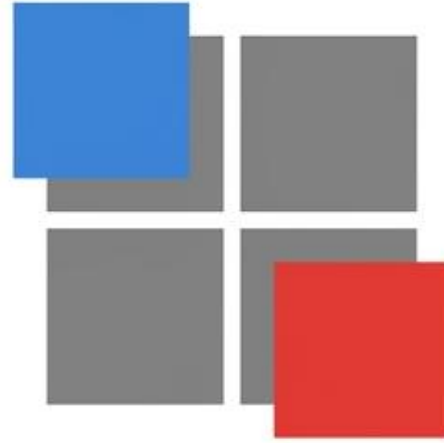
Διαχείριση Εύρους Ζώνης (Bandwidth)

Ο κβαντισμός στα 10-bit παρέχει το βέλτιστο SQNR (1.024 επίπεδα), παράγοντας τον βιομηχανικό ρυθμό μετάδοσης των 270 Mbps (Standard Definition).

Η Διαδρομή της Ψηφιοποίησης: Από το Φως στο Ψηφιακό Σήμα Βίντεο



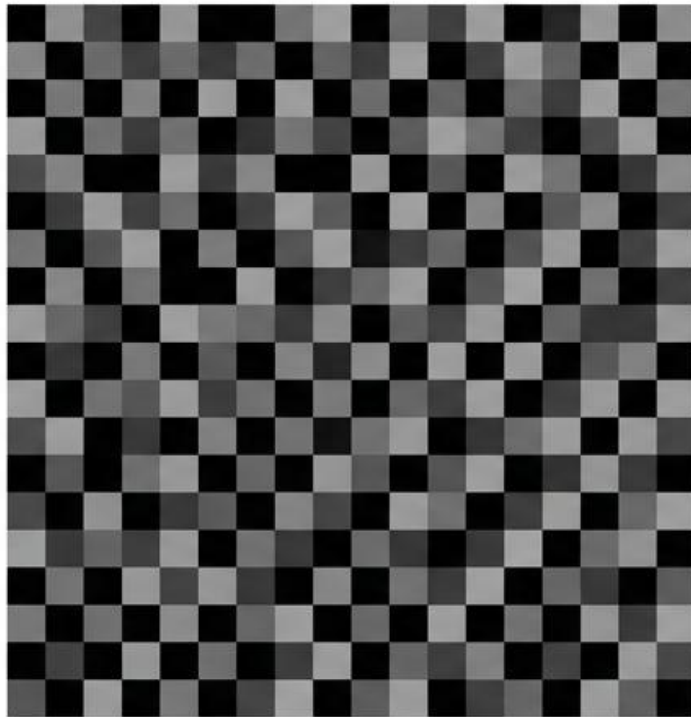
07 Υποδειγματοληψία Χρώματος



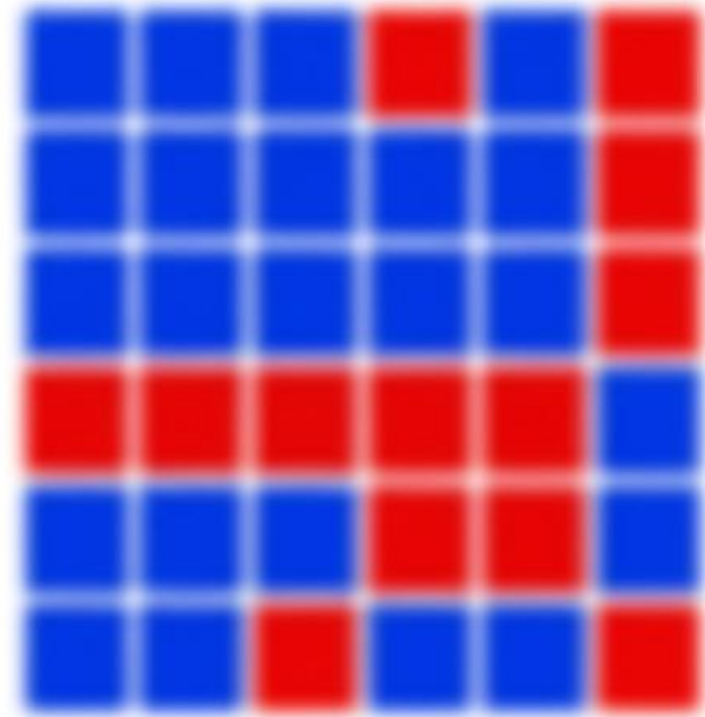
Υποδειγματοληψία Χρώματος (Chroma Subsampling)

Το βιολογικό θεμέλιο: αξιοποιώντας την ατέλεια της όρασης

Λόγω της αυξημένης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στη φωτεινότητα σε σχέση με τα χρώματα, λαμβάνουμε λιγότερα δείγματα χρωματικής πληροφορίας χωρίς αντιληπτή απώλεια ποιότητας.



■ Φωτεινότητα (Y) - Υψηλή Ευαισθησία
-> Μέγιστη Δειγματοληψία



■ ■ Χρωμοδιαφορές (Cb, Cr) - Χαμηλή
Ευαισθησία -> Υποδειγματοληψία

Υποδειγματοληψία Χρώματος

- Η εναλλαγή δειγμάτων φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών στο σήμα βίντεο είναι:

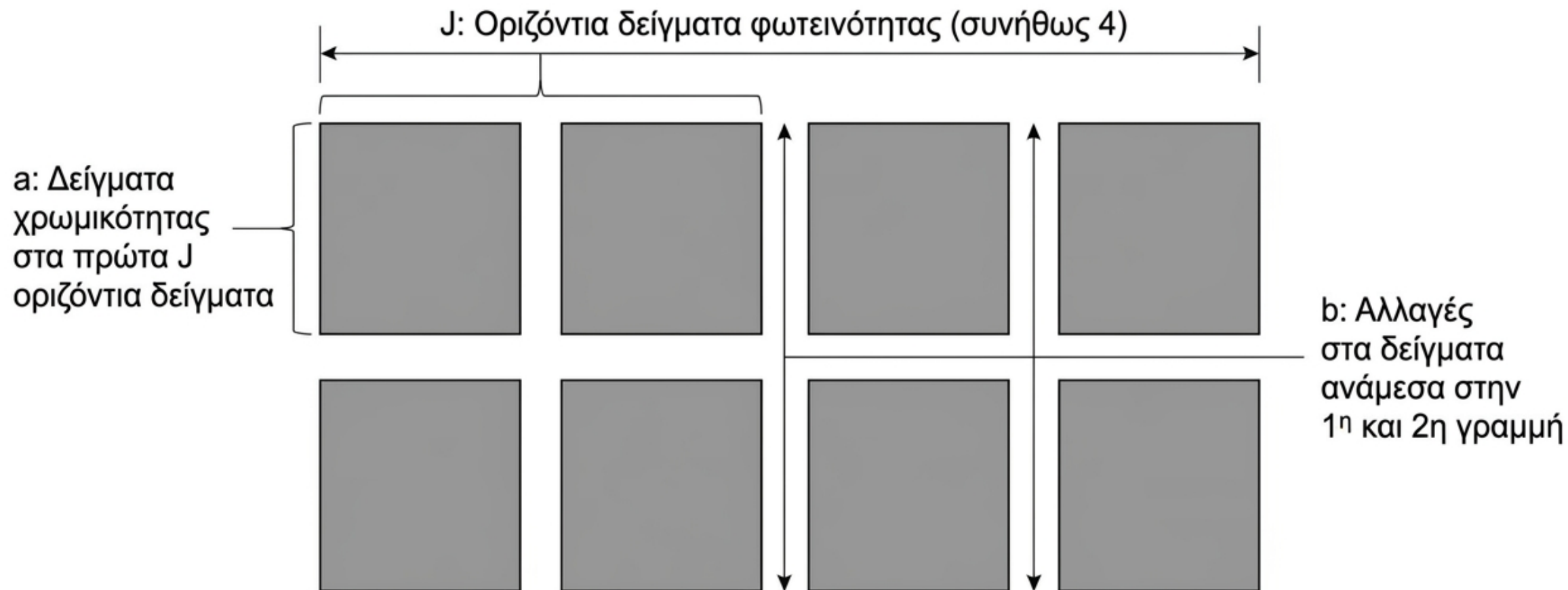
Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y, Cr, Y, ...

- Η αλληλουχία αυτή ονομάζεται **4:2:2** και στην ουσία πρόκειται για μια τεχνική που παραπέμπει στην **υποδειγματοληψία του χρώματος**, η οποία εκμεταλλεύεται κάποια από τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου συστήματος όρασης.
- Λόγω της και δεδομένης της ανάγκης για συμπίεση του σήματος **αυξημένης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στη φωτεινότητα, σε σχέση με την ευαισθησία του στα χρώματα** μπορούμε να λαμβάνουμε λιγότερα δείγματα χρωματικής πληροφορίας σε σχέση με τα δείγματα τα οποία αφορούν τη φωτεινότητα.

υποδειγματοληψία χρώματος

- Το 4: 2 : 2 δεν είναι ο μόνος συνδυασμός, είναι δυνατό να υπάρξουν πολλές περιπτώσεις και συνδυασμοί.
- Χρειάζεται ένας τρόπος περιγραφής αυτής της υποδειγματοληψίας.

Το σύστημα αναφοράς J:a:b



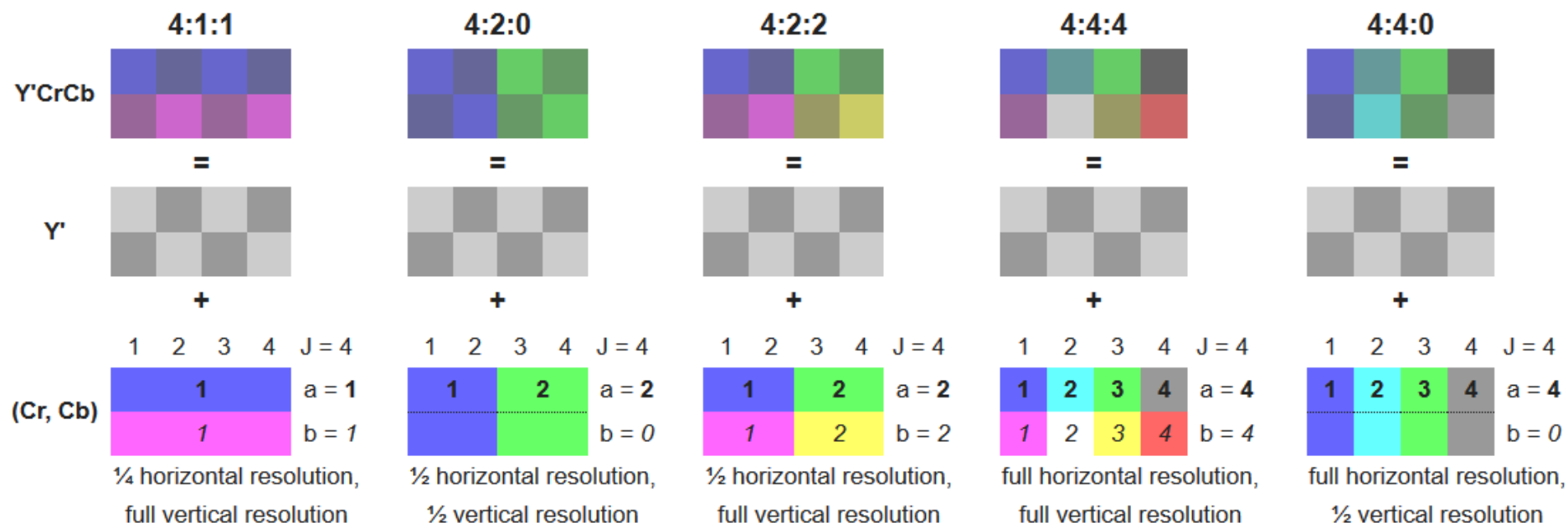
Περιγραφή Υποδειγματοληψίας Χρώματος

J: a: b

J: μας δίνει το πόσα **δείγματα (φωτεινότητας)** παίρνουμε οριζόντια σαν αναφορά, συνήθως 4.

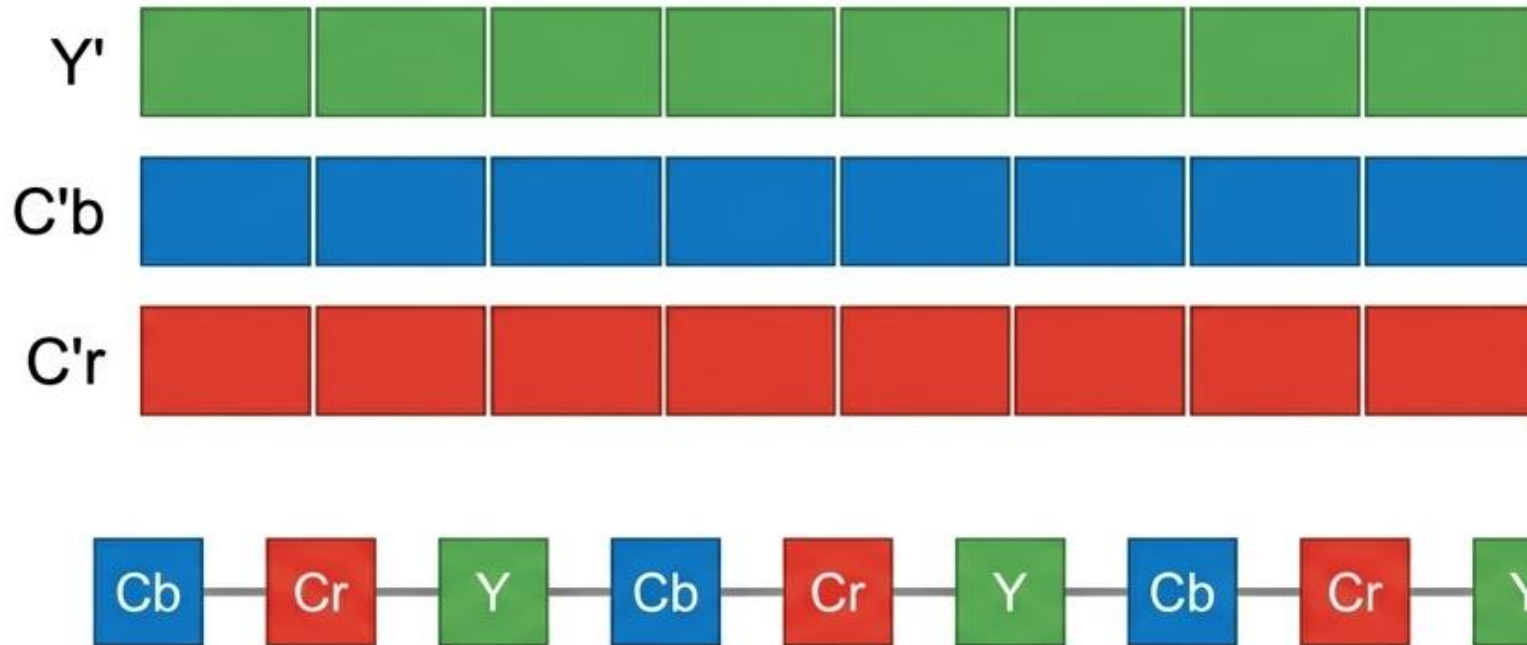
a: μας δείχνει πόσα **δείγματα χρωμικότητας** έχουμε στα πρώτα **J (οριζόντια) δείγματα**

b: μας δείχνει πόσες **αλλαγές** στα δείγματα έχουμε ανάμεσα στην 1^η και 2^η γραμμή



4:4:4 – το Μη συμπιεσμένο πρότυπο

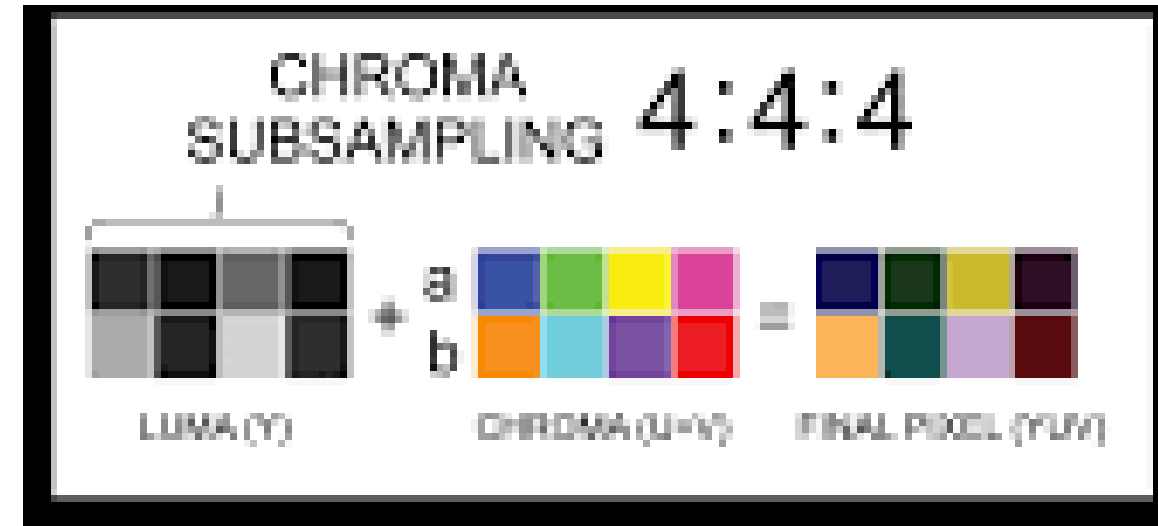
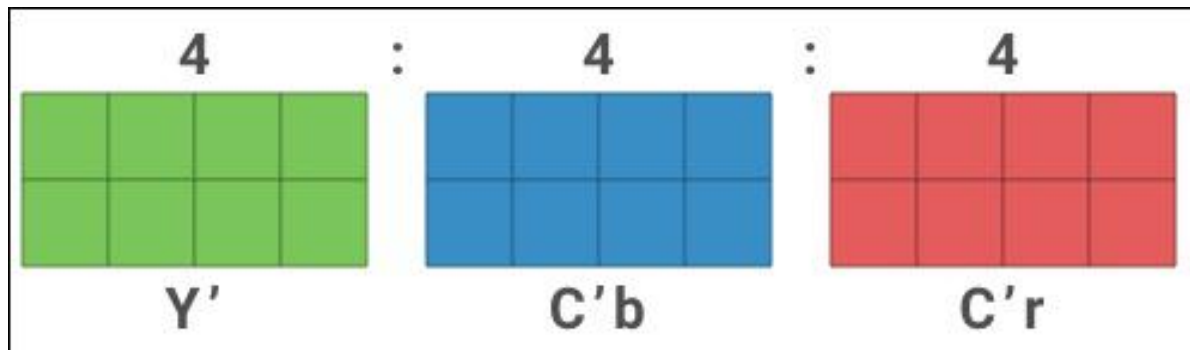
Αναλογία Cb, Cr προς Y: 1 προς 1



Πλήρης ανάλυση χρώματος. Καμία εξοικονόμηση εύρους ζώνης.
ζώνης.

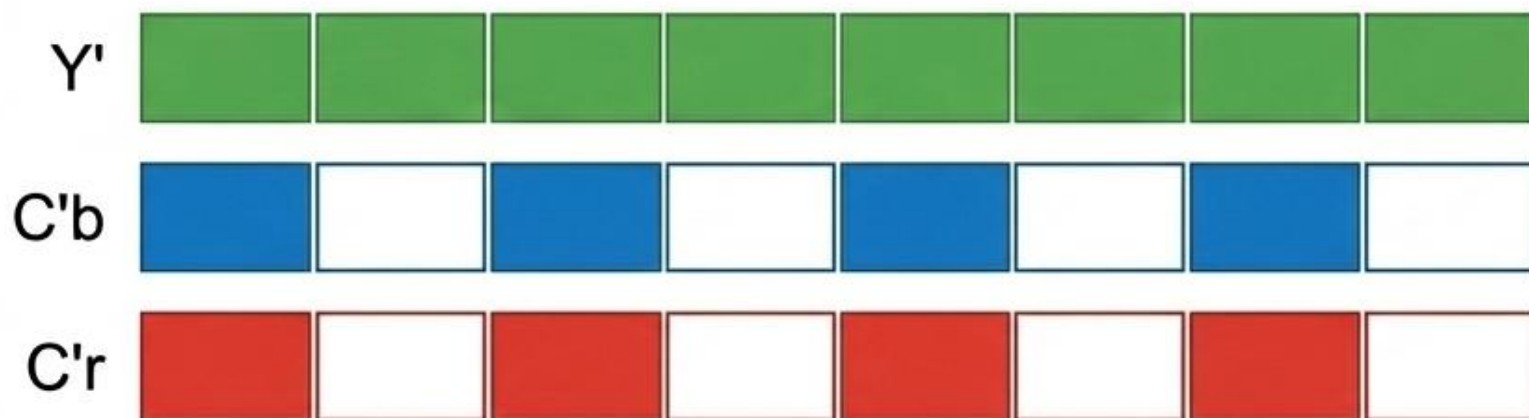
4:4:4 Αναλογία Cb, Cr προς Y

- Cb, Cr, Y, Cb, Cr, Y, Cb, Cr, Y, Cb, Cr, Y,
- Αναλογία Cb, Cr προς Y : 1 προς 1



4:2:2 – Μείωση χρώματος κατά 50%

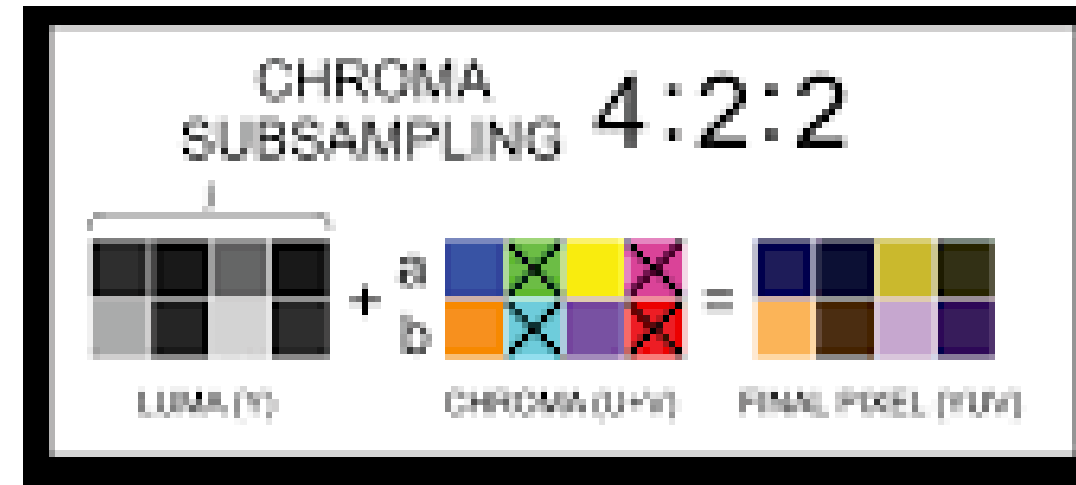
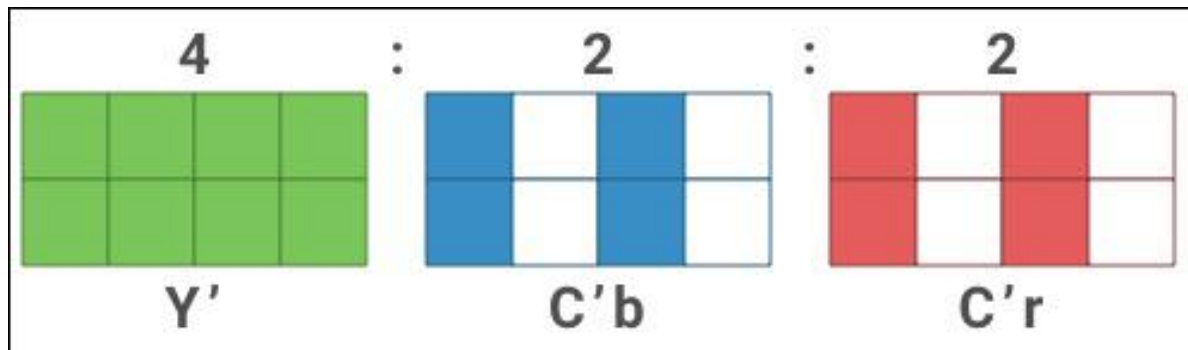
Αναλογία Cb, Cr προς Y: 4 προς 8 (0,5 έκαστο)



Εναλλαγή δειγμάτων φωτεινότητας και χρωμοδιαφορών.
Διατήρηση πλήρους κατακόρυφης ανάλυσης.

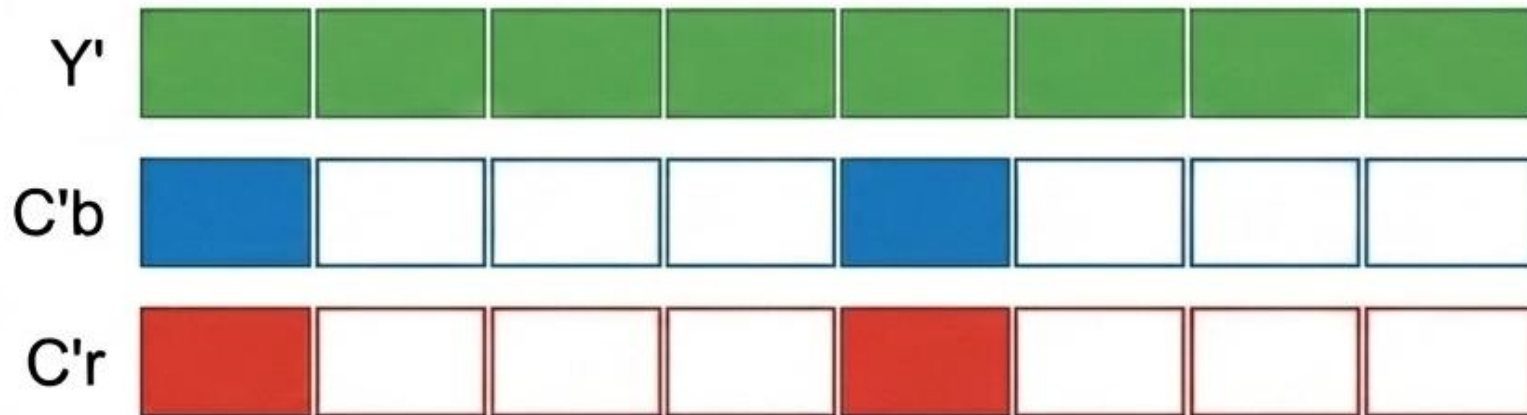
4:2:2 Αναλογία Cb, Cr προς Y

- **Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y, Cr, Y, Cb, Y, Cr, Y ...**
- Αναλογία Cb, Cr προς Y: 4 προς 8 = 0,5 έκαστο



4:2:0 – Οικονομία δεδομένων

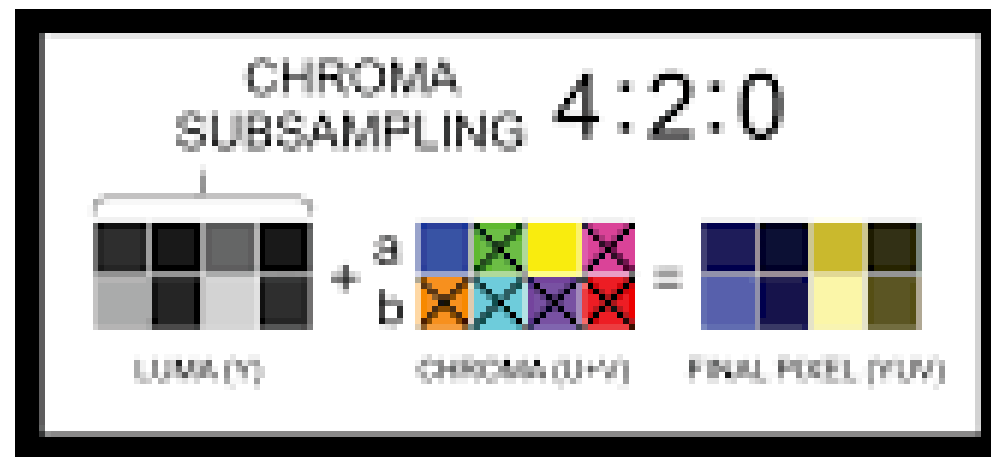
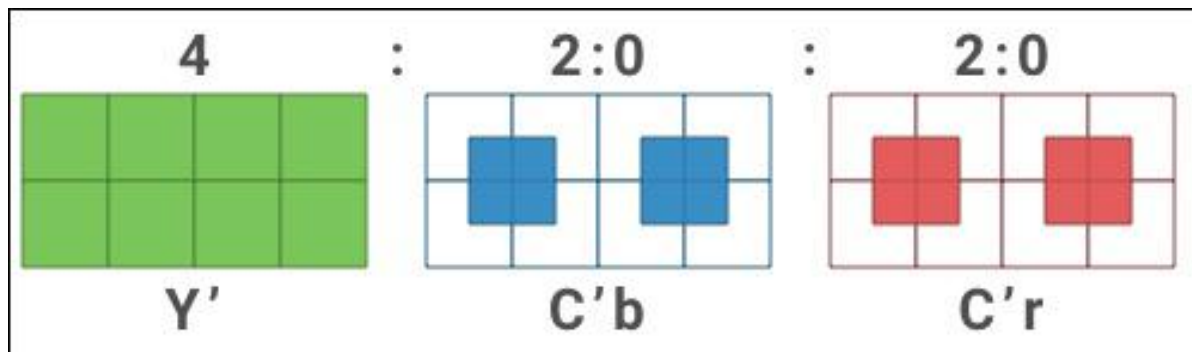
Αναλογία Cb, Cr προς Y: 1 προς 8 έκαστο (Συνολικά στο πλέγμα)



Υποδιπλασιασμός της οριζόντιας και κατακόρυφης χρωματικής ανάλυσης.

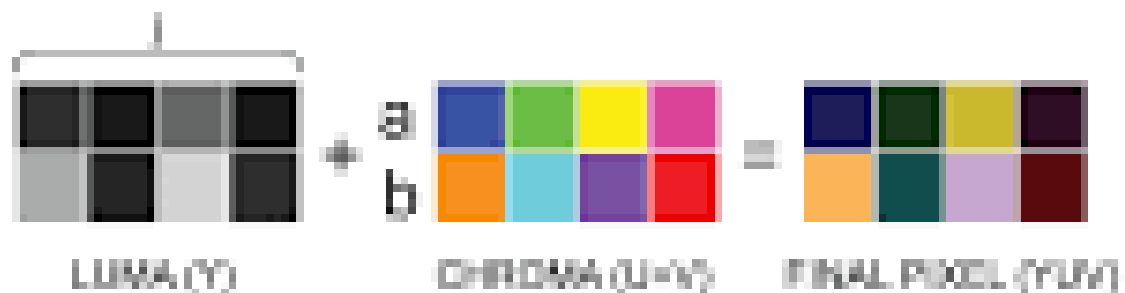
4:2:0 Αναλογία Cb, Cr προς Y

- Cb, Y, Y, Y, Y, Cr, Y, Y, Y, Y,...
- Αναλογία Cb, Cr προς Y: 1 προς 8 έκαστο



Σύγκριση προτύπων (οπτικά)

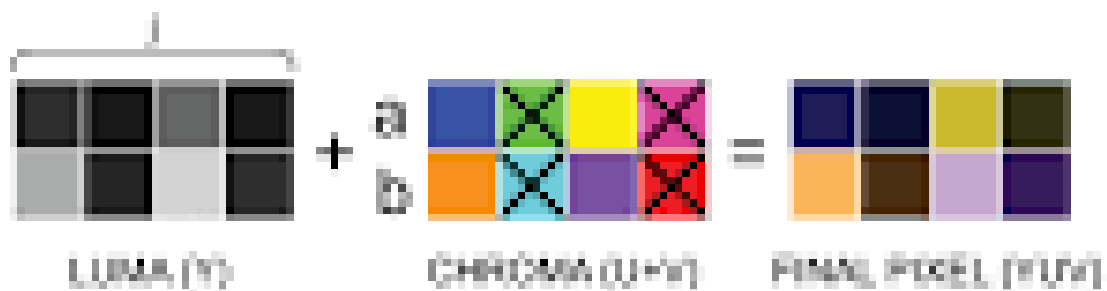
CHROMA SUBSAMPLING 4:4:4



CHROMA SUBSAMPLING 4:1:1



CHROMA SUBSAMPLING 4:2:2



CHROMA SUBSAMPLING 4:2:0



Ρυθμός μετάδοσης 4:2:0

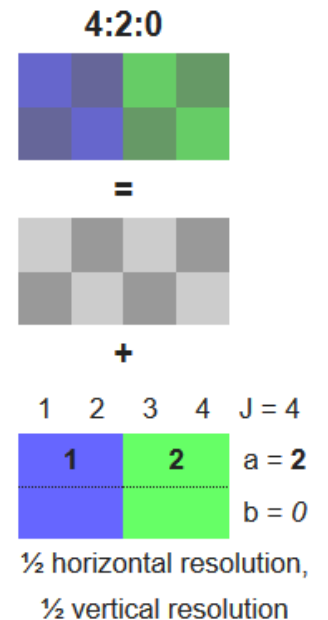
- Η υποδειγματοληψία του χρώματος χαμηλώνει τις απαιτήσεις αναφορικά με τον ρυθμό μετάδοσης.
- Έστω υποδειγματοληψία χρώματος της μορφής **4:2:0** και κβάντιση με 8 bits για τις τρεις συνιστώσες (φωτεινότητα και χρωμοδιαφορές).
 - Ακολουθία: **Cb, Y, Y, Y, Y, Cr, Y, Y, Y, Y,...**
 - Αναλογία Cb, Cr προς Y: 1 προς 4 έκαστο

Y: $13,5 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 108 \text{ Mbps}$

Cb: $(1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps}$

Cr: $(1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps}$

ΑΘΡΟΙΣΜΑ: **135 Mbps**



Η Μαθηματική Απόδειξη (Ρυθμός Μετάδοσης 4:2:0)

Υπόθεση: Κβάντιση 8 bits για φωτεινότητα και χρωμοδιαφορές.

$$Y: 13,5 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 108 \text{ Mbps}$$

$$Cb: (1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps}$$

$$Cr: (1/4) * 6,75 \text{ MHz} * 8 \text{ bits / sample} = 13,5 \text{ Mbps}$$

ΑΘΡΟΙΣΜΑ: 135 Mbps

Δραστική μείωση απαιτήσεων εύρους ζώνης μέσω της στρατηγικής αφαίρεσης χρώματος.

Υποδειγματοληψία Χρώματος: Η Τέχνη της Ψηφιακής Συμπίεσης

Η Φιλοσοφία της Υποδειγματοληψίας



Ανθρώπινη Οπτική Ευαισθησία:

Ο οφθαλμός αντιλαμβάνεται λεπτομέρειες στη φωτεινότητα ευκολότερα από ό,τι στις χρωματικές διαφορές.



Ανάγκη για Συμπίεση Σήματος:

Λαμβάνουμε λιγότερα δείγματα χρώματος για να μειώσουμε τις απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης.



Συνιστώσες Σήματος (Y, Cb, Cr):

Το σήμα αποτελείται από τη φωτεινότητα (Y) και τις χρωμοδιαφορές (Cb, Cr).

Το Πρότυπο Περιγραφής J:a:b



b - Αλλαγές στη 2η Γραμμή: Οι αλλαγές στα δείγματα χρώματος ανάμεσα στην πρώτη και τη δεύτερη γραμμή.



Σύγκριση Τύπων & Απόδοση

4:4:4

4:4:4: Η αναλογία είναι 1:1.

1:1
Αναλογία
1 προς 1

4:2:2

4:2:2: Έχουμε 50% λιγότερο χρώμα.

50%
Λιγότερο Χρώμα
4 προς 8 (0,5 έκαστο)

4:2:0

135
Mbps
1 προς 8 έκαστο

Ρυθμός Μετάδοσης στο 4:2:0: Με κβάντιση 8-bit, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ανέρχεται στα 135 Mbps.

08 Πρότυπο ITU-R BT.601 για βίντεο Τυπικής Ευκρίνειας (SD) & Μέθοδοι Σάρωσης

Πρότυπο ITU-R BT.601 (4:2:2) & Μέθοδοι Σάρωσης

Τεχνικές Προδιαγραφές Κωδικοποίησης και Απεικόνισης
Τηλεοπτικού Σήματος Τυπικής Ευκρίνειας

Πρότυπο ITU-R BT.601 για βίντεο SD

ITU-R

International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector.

BT Series

Broadcasting service (television).

Πεδίο Εφαρμογής

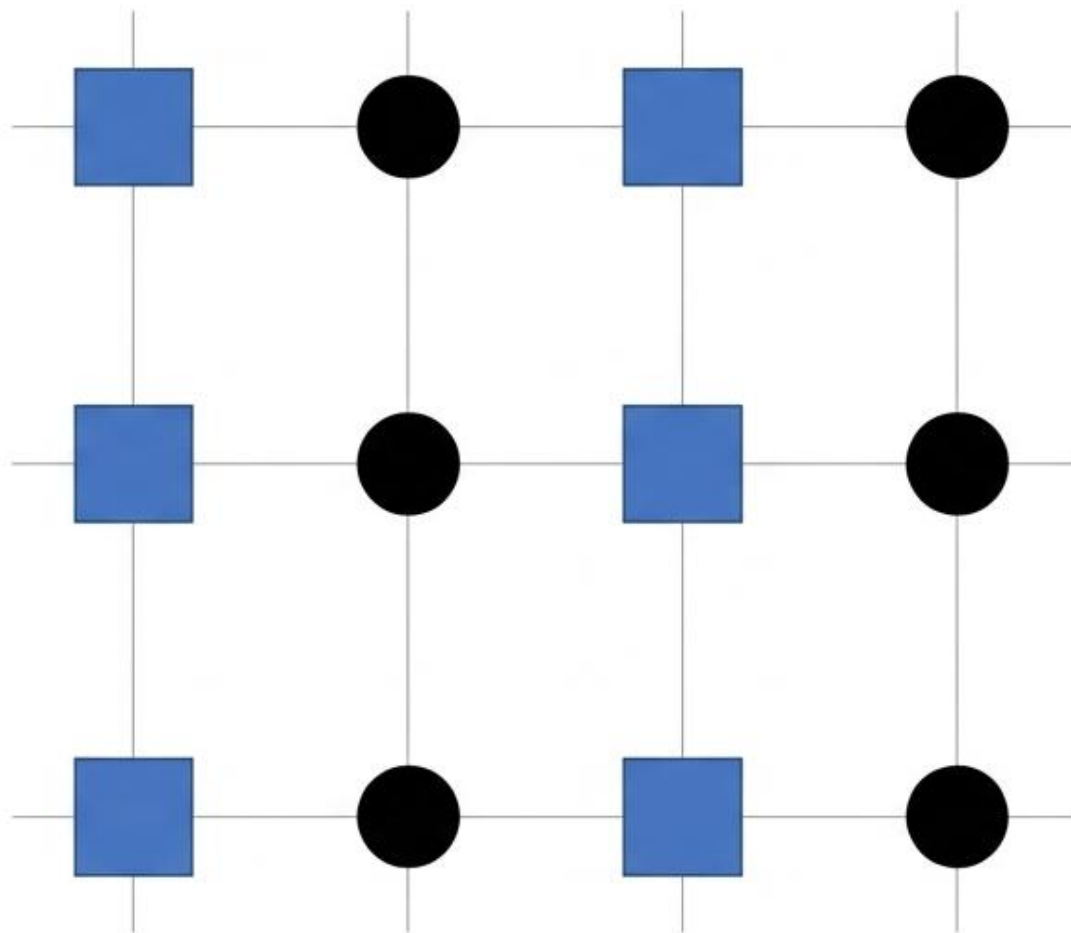
Παράμετροι κωδικοποίησης studio ψηφιακής τηλεόρασης για αναλογίες 4:3 και ευρείας οθόνης (wide-screen) 16:9.

720 στοιχεία / γραμμή (Τυπική Ευκρίνεια)
480 ή 576 ενεργές γραμμές

Χαρακτηριστικά δειγματοληψίας και κβαντισμού τηλεοπτικού σήματος κατά το πρότυπο ITU-BT R.601 (4:2:2)

Παράμετρος	Σύστημα 625 γραμμών 25 πλαίσια / δευτερόλεπτο (50 πεδία / δευτερόλεπτο)	Σύστημα 525 γραμμών 30 πλαίσια / δευτερόλεπτο (60 πεδία / δευτερόλεπτο)
Δείγματα φωτεινότητας ανά γραμμή	864	858
Δείγματα χρωμοδιαφορών ανά γραμμή	432	429
Δομή	Ορθογωνική δομή γραμμής, πεδίου και πλαισίου. Τα δείγματα των χρωμοδιαφορών παρατίθενται μαζί με τα δείγματα φωτεινότητας περιττού αριθμού (1ο, 3ο κ.λπ.).	
Ρυθμός δειγματοληψίας φωτεινότητας	13,5 MHz	
Ρυθμός δειγματοληψίας χρωμοδιαφορών	6,75 MHz	
Κωδικοποίηση	Ομοιόμορφη κωδικοποίηση τύπου PCM με χρήση 8 ή 10 bits (με προτιμητέα την τιμή των 10 bits) για το σήμα της φωτεινότητας και των χρωμοδιαφορών.	
Πλήθος δειγμάτων φωτεινότητας ανά ενεργή ψηφιακή γραμμή	720	
Πλήθος δειγμάτων χρωμοδιαφορών ανά ενεργή ψηφιακή γραμμή	360	
Αντιστοίχιση επιπέδου τιμών σήματος φωτεινότητας και επιπέδων κβαντισμού	220 επίπεδα κβαντισμού, με εκκίνηση το 16 και το λευκό να αντιστοιχεί στο 235.	
Αντιστοίχιση επιπέδου τιμών σημάτων χρωμοδιαφορών και επιπέδων κβαντισμού	225 επίπεδα κβαντισμού, περί την κεντρική τιμή, με το μηδενικό σήμα να αντιστοιχεί στην τιμή 128.	

Αρχιτεκτονική Δειγματοληψίας (Δομή 4:2:2)



Ορθογωνική Δομή: Γραμμής, πεδίου και πλαισίου. Τα δείγματα χρωμοδιαφορών παρατίθενται μαζί με τα δείγματα φωτεινότητας περιττού αριθμού.

Ρυθμοί Δειγματοληψίας: Φωτεινότητα (13,5 MHz) | Χρωμοδιαφορές (6,75 MHz).

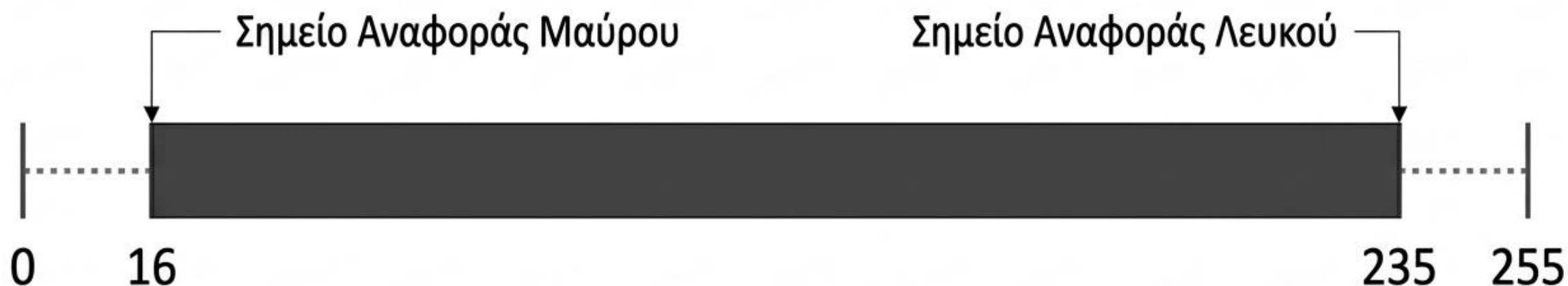
Κωδικοποίηση: Ομοιόμορφη κωδικοποίηση τύπου PCM 8 ή 10 bits.

Σημείωση Μηχανικού: Η τιμή των 10 bits είναι προτιμητέα έναντι των 8 bits για μέγιστη ακρίβεια.

Τεχνική Σύγκριση: Συστήματα 625 vs 525 Γραμμών

	Σύστημα 625 γραμμών	Σύστημα 525 γραμμών
Χρονισμός	25 πλαίσια (50 πεδία) / δευτ.	30 πλαίσια (60 πεδία) / δευτ.
Φωτεινότητα (Συνολικά)	864 δείγματα / γραμμή	858 δείγματα / γραμμή
Χρωμοδιαφορές (Συνολικά)	432 δείγματα / γραμμή	429 δείγματα / γραμμή

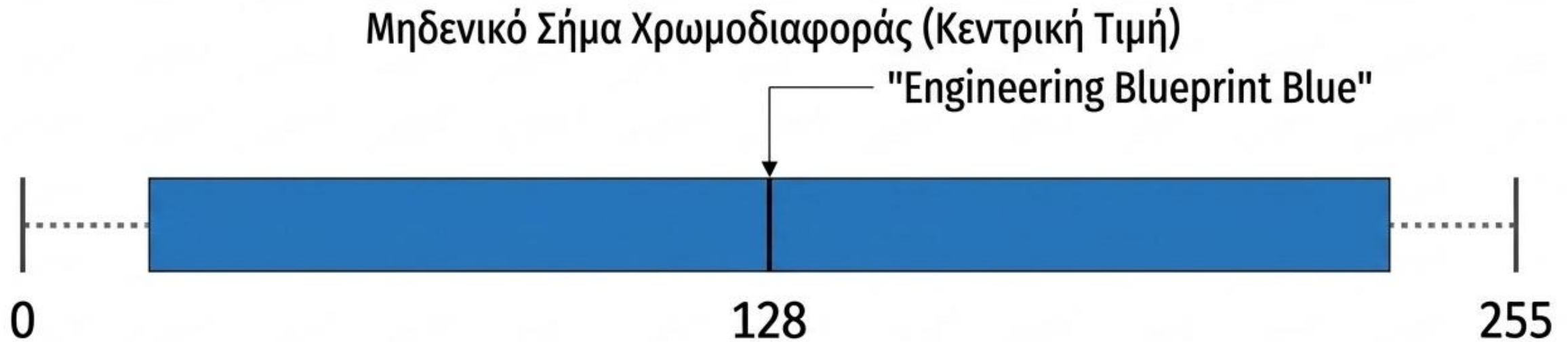
Κβαντισμός: Σήμα Φωτεινότητας (Luma)



Αντιστοίχιση σε 220 επίπεδα κβαντισμού.

Αντιστοίχιση σε 220 επίπεδα κβαντισμού. Η κατανομή αφήνει περιθώρια ασφαλείας (headroom/footroom) στα άκρα του φάσματος (κάτω από 16, πάνω από 235) για την αποφυγή παραμόρφωσης του σήματος.

Κβαντισμός: Σήματα Χρωμοδιαφορών (Chroma)



Αντιστοίχιση σε 225 επίπεδα κβαντισμού, συμμετρικά κατανομημένα.
Η τιμή 128 ορίζεται ως το σημείο του 'μηδενικού σήματος',
επιτρέποντας θετικές και αρνητικές αποκλίσεις χρώματος γύρω από
αυτό το κέντρο.

Μέθοδοι Σάρωσης

Μέθοδοι Σάρωσης (Scanning Methods): Εισαγωγή

Οι οθόνες απεικόνισης 'ζωγραφίζουν' την εικόνα χρησιμοποιώντας δέσμες ηλεκτρονίων (στην περίπτωση των CRT). Υπάρχουν δύο θεμελιώδη παραδείγματα (paradigms) για αυτή τη διαδικασία:

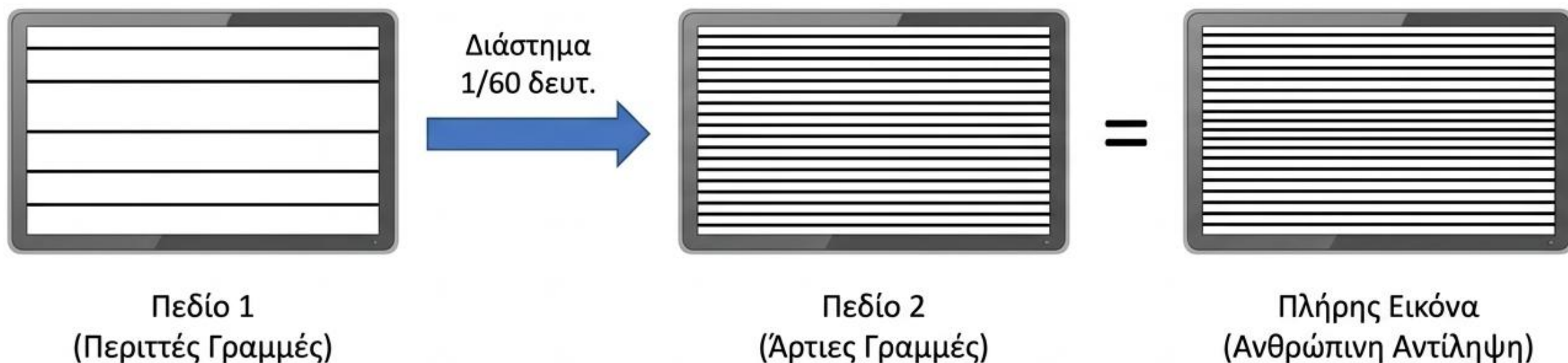


Διαπλεγμένη Σάρωση
(Interlaced Scan)



Προοδευτική Σάρωση
(Progressive Scan)

Η Μηχανική της Διαπλεγμένης Σάρωσης



Χρησιμοποιείται στα παραδοσιακά τηλεοπτικά συστήματα (π.χ. NTSC). Η εικόνα χωρίζεται στο μισό και εκπέμπεται διαδοχικά. Η μέθοδος βασίζεται στην αδράνεια της ανθρώπινης όρασης, η οποία δεν μπορεί να ανιχνεύσει αυτή την εναλλαγή, 'ενώνοντας' τα δύο πεδία σε μία εικόνα.

Η Μηχανική της Προοδευτικής Σάρωσης



Η εικόνα απεικονίζεται ολόκληρη και ταυτόχρονα. Όλες οι γραμμές του πλαισίου (frame) σαρώνονται διαδοχικά.

Εξαλείφει δραστικά το 'flickering' (τρεμόπαιγμα) που παρατηρείται στην διαπλεγμένη σάρωση, προσφέροντας πιο σταθερή και ξεκούραστη εικόνα.

Σύνθεση: Η Σύγχρονη Προσέγγιση (HDTV)



Όλες οι σύγχρονες τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας (HDTV) χρησιμοποιούν αποκλειστικά προοδευτική σάρωση (όλη η εικόνα ταυτόχρονα).

Ακόμα και αν το εισερχόμενο σήμα έχει δημιουργηθεί με legacy διαπλεγμένη σάρωση (π.χ. βάσει πρώιμων υλοποιήσεων του BT.601), το υλικό (hardware) της HDTV αναλαμβάνει τη μαθηματική μετατροπή του σε σήμα προοδευτικής σάρωσης πριν την τελική απεικόνιση.

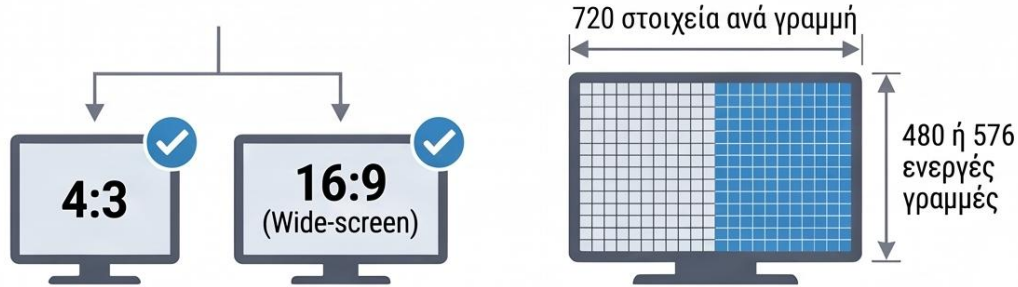
Πρότυπο ITU-R BT.601 & Μέθοδοι Σάρωσης Τηλεοπτικού Σήματος



Το Πρότυπο ITU-R BT.601 (4:2:2)

Διεθνές Πρότυπο Κωδικοποίησης Studio

Τυπική Ευκρίνεια (Standard Definition)

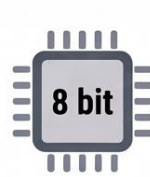


Ρυθμοί Δειγματοληψίας

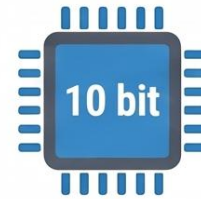


13,5 MHz (Φωτεινότητα Y)
6,75 MHz (Χρωμοδιαφορές)

Κωδικοποίηση PCM 8 ή 10 bits



Ομοιόμορφη
κωδικοποίηση



Προτιμητέα για
υψηλότερη ποιότητα

Σύγκριση Συστημάτων 625 & 525 Γραμμών

Παράμετρος	Σύστημα 625 γραμμών (25 fps)	Σύστημα 525 γραμμών (30 fps)
Δείγματα φωτεινότητας / γραμμή	864	858
Δείγματα χρωμοδιαφορών / γραμμή	432	429
Ενεργά δείγματα φωτεινότητας / γραμμή	720	720
Ενεργά δείγματα χρωμοδιαφορών / γραμμή	360	360
Κβαντισμός Φωτεινότητας	220 επίπεδα (16 έως 235)	220 επίπεδα (16 έως 235)
Κβαντισμός Χρωμοδιαφορών	225 επίπεδα (κέντρο στο 128)	225 επίπεδα (κέντρο στο 128)

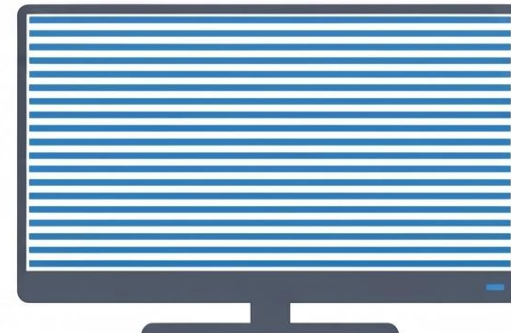
Μέθοδοι Σάρωσης (Scanning Methods)

Διαπλεγμένη Σάρωση (Interlaced Scan)



Προοδευτική Σάρωση (Progressive Scan)

Ολόκληρη η εικόνα απεικονίζεται ταυτόχρονα



Μειώνει αισθητά το flickering (τρεμόπαιγμα)

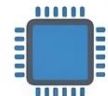


Η Λειτουργία στις Σύγχρονες HDTV

Όλες οι HDTV χρησιμοποιούν προοδευτική σάρωση. Αυτόματη μετατροπή από διαπλεγμένο σε προοδευτικό.



Διαπλεγμένη



Εσωτερικός επεξεργαστής



Προοδευτική

09 Δημιουργία και Δομή Σήματος Υψηλής Ευκρίνειας (HD)

Δημιουργία και Δομή Σήματος Υψηλής Ευκρίνειας

Αποκωδικοποιώντας τα πρότυπα, την επεξεργασία και το φυσικό
επίπεδο των συστημάτων HD.



Τα Θεμελιώδη Πρότυπα

Βάσει προδιαγραφών:
ITU-R BT.709 & ITU-R BT.1120



Αναλογία Οθόνης:
16:9



Ρυθμός Πλαισίων:
Τυποποιημένες συχνότητες
(π.χ., 50 Hz / 60 Hz)



Ενεργές Γραμμές:
1.080
(από σύνολο 1.125 γραμμών)

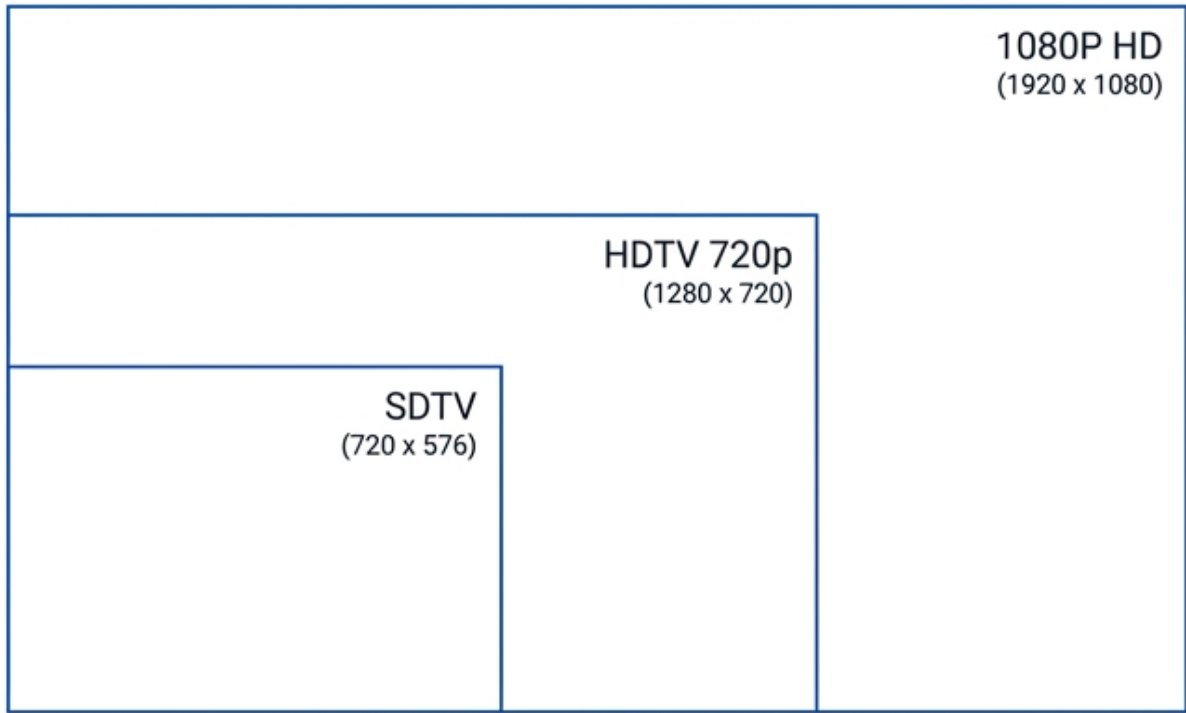


Ανάλυση Γραμμής:
1.920
pixels ανά ενεργή γραμμή



Χρώμα & Κβαντισμός:
Καθορισμένη υποδειγματοληψία
και επίπεδα κβαντισμού.

Ο οπτικός καμβάς: άλμα στην Ανάλυση



2.073.600 pixels

(Το συνολικό μέγεθος του καμβά για την πλήρη υψηλή ευκρίνεια)

Πίνακας Συστημάτων κατά EDU (TECH 3299)

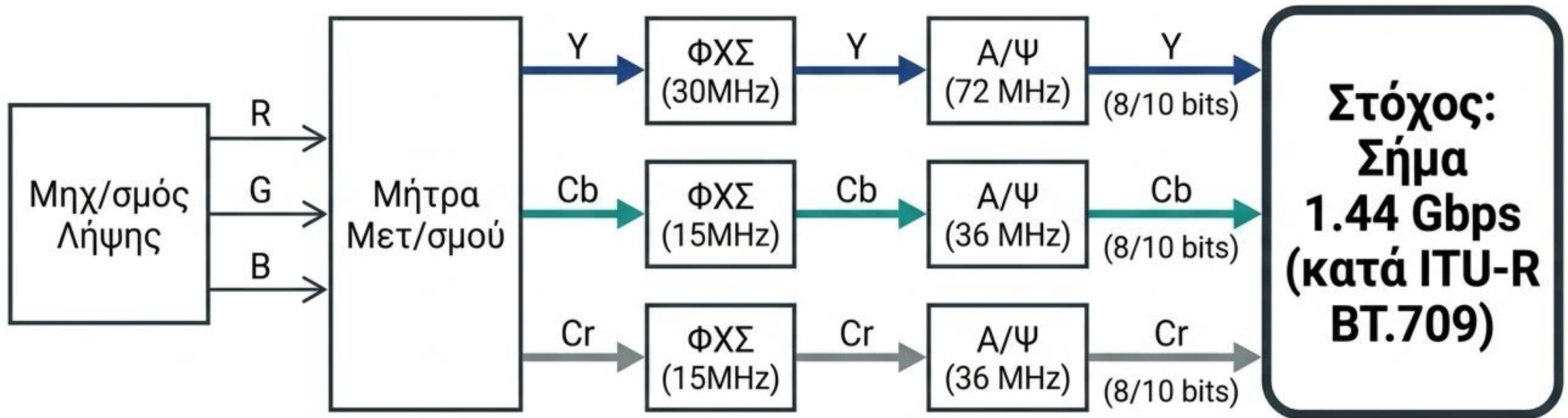
Σύστημα	Συντόμευση	Δείγματα Φωτεινότητας	Γραμμές/Πλαίσιο	Ενεργές Γραμμές	Συχνότητα
1	720p/50	1.280	750	720	50 Hz
2	1.080i/25	1.920	1.125	1.080	25 Hz (50 πεδία)
3	1.080p/25	1.920	1.125	1.080	25 Hz
4	1.080p/50	1.920	1.125	1.080	50 Hz

Υποδειγματοληψία: 4:2:2

Φωτεινότητα (Y): 74,25 MHz ή 72 MHz (BT.709). Φίλτρο: 30 MHz.

Χρώμα (Cb/Cr): $0,5 * Y$ (37,125 MHz ή 36 MHz). Φίλτρο: 15 MHz.

Δημιουργία Σήματος Υψηλής Ευκρίνειας (HD)



Υπολογισμός Εύρους Ζώνης (Σύστημα 72 Mhz)

Υ:	72 MHz × 10 bits =	720 Mbit/s
Cb: 0,5 ×	72 MHz × 10 bits =	360 Mbit/s
Cr: 0,5 ×	72 MHz × 10 bits =	360 Mbit/s
		1,44 Gbit/s

Υπολογισμός Εύρους Ζώνης (Σύστημα 74,25 Mhz)

$$Y: 74,25 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits} = 742,5 \text{ Mbit/s}$$

$$Cb: 0,5 \times 74,25 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits} = 371,25 \text{ Mbit/s}$$

(Συντελεστής 0,5 λόγω 4:2:2)

$$Cr: 0,5 \times 74,25 \text{ MHz} \times 10 \text{ bits} = 371,25 \text{ Mbit/s}$$

$$1.485 \text{ Gbit/s}$$

Εύρος Ζώνης στα συστήματα 50/60 Hz

Διαπλεγμένη
Σάρωση
(Interlaced)
~1.4 Gbps

x2

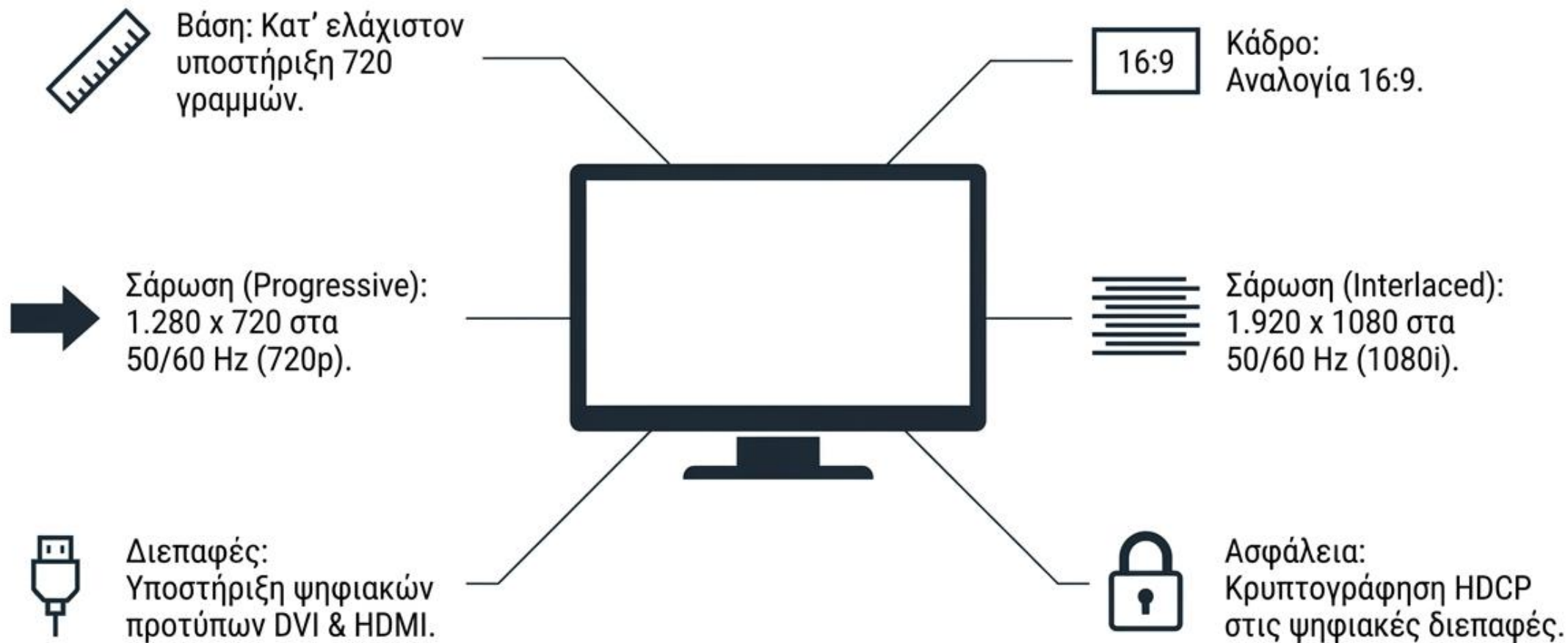
(Διπλασιασμός ρυθμού
δειγματοληψίας σε
148,5 MHz ή 144 MHz)

Το ασυμπίεστο
βίντεο
εκτοξεύεται στα:

2,97 Gbps
(από σύστημα 148,5 MHz)

2,88 Gbps
(από σύστημα 144 MHz)

Ανατομία Ασυμπίεστου Σήματος HD



Διεπαφές Υλικού για τοπική ενσύρματη μετάδοση σήματος HD



HD-SDI (BNC connectors).

Το επαγγελματικό πρωτόκολλο μετάδοσης (High Definition Serial Digital Interface).



DVI (Digital Visual Interface).

Διασύνδεση υπολογιστών (αντικαταστάτης του VGA). Υποστηρίζει ρυθμούς έως **1.65 Gbps**.

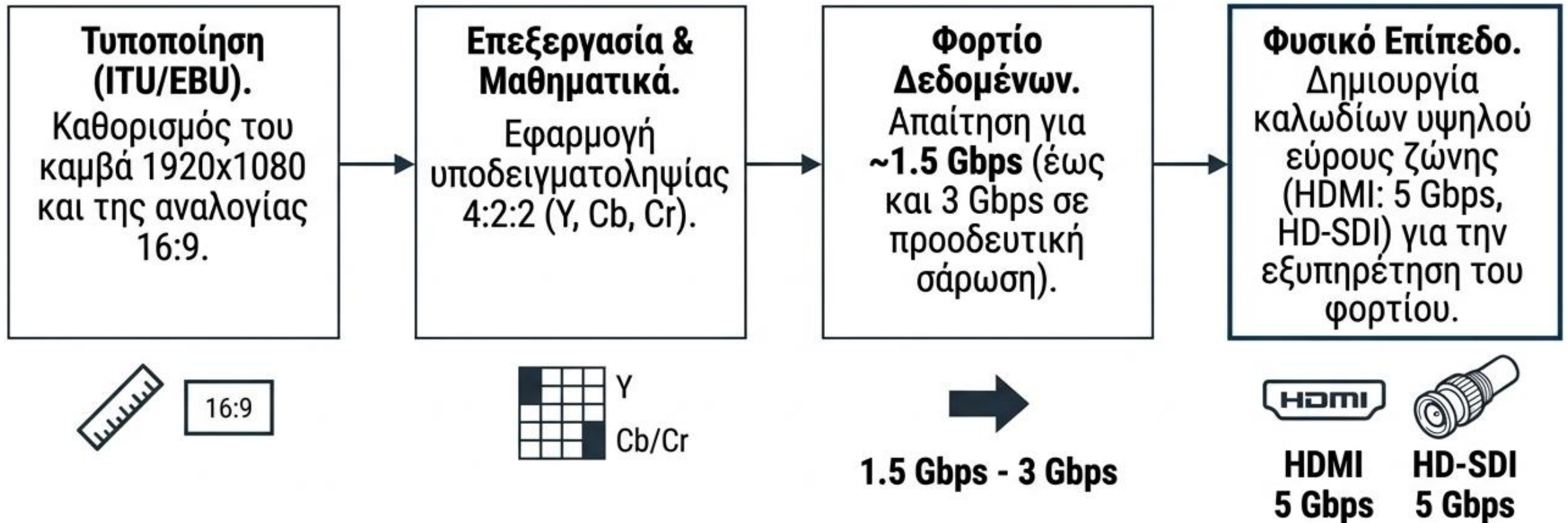


HDMI (High Definition Multimedia Interface).

Το καταναλωτικό πρότυπο. Υποστηρίζει τεράστιους ρυθμούς έως **5 Gbps** και μεταφέρει ταυτόχρονα εικόνα και ήχο.

HDCP (High Bandwidth Digital Content Protection): Το πρωτόκολλο ασφαλείας που εφαρμόζεται σε DVI και HDMI για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης εγγραφής ψηφιακού υλικού.

Σύνοψη: Από τα Πρότυπα στο Υλικό



Τεχνολογία Βίντεο Υψηλής Ευκρίνειας (HD): Από τα Πρότυπα στη Μετάδοση

Πρότυπα και Ανάλυση Εικόνας

Πρότυπα ITU-R BT.709 & BT.1120

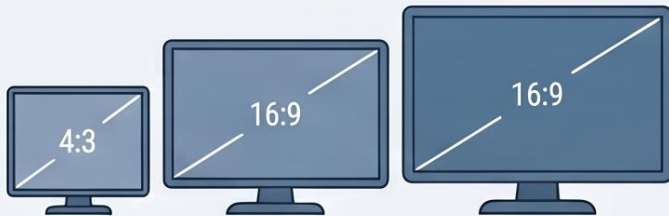
Τα κύρια πρωτόκολλα που ορίζουν την αναλογία οθόνης 16:9, τον ρυθμό πλαισίων και την υποδειγματοληψία χρώματος για το HD σήμα.



Ανάλυση 1080p HD

1.920 pixels ανά γραμμή x 1.080 ενεργές γραμμές = 2.073.600 pixels ανά πλαίσιο.

SDTV vs HDTV



SDTV
720x576 pixels

HDTV (720p)
1.280x720 pixels

HDTV (1080p)
1.920x1080 pixels

Συστήματα EBU – TECH 3299

Υποδειγματοληψία 4:2:2

Το πρότυπο για την παραγωγή τηλεοπτικού σήματος HD, που εξισορροπεί την ποιότητα χρώματος και τον όγκο δεδομένων.

Βασικά Συστήματα Παραγωγής HD (EBU)

Σύστημα	Συντάμευση	Ενεργά Pixels/Γραμμή	Ενεργές Γραμμές	Συχνότητα Πλοισίων (Hz)
Σύστημα 1	720p/50	1.280	720	50
Σύστημα 2	1.080i/25	1.920	1.080	25 (50 πεδία)
Σύστημα 3	1.080p/25	1.920	1.080	25
Σύστημα 3	1.080p/25	1.920	1.080	25
Σύστημα 4	1.080p/50	1.920	1.080	50

Διαδικασία Δημιουργίας Σήματος HD



Μετατροπή RGB σε YCbCr

Το σήμα από τον μηχανισμό λήψης (R, G, B) περνά από μήτρα μετασχηματισμού για να διαχωριστεί σε φωτεινότητα (Y) και χρωμοδιαφορές (Cb, Cr).

Συχνότητες Δειγματοληψίας

Y: 74,25 MHz ή 72 MHz
Cb, Cr: 37,125 MHz ή 36 MHz

Κβαντισμός 8/10 bits

Ψηφιακό σήμα: 8 ή 10 bits ανά δείγμα ->
Ρυθμοί Δεδομένων: 1,44 έως 1,485 Gbps

Ρυθμοί Δεδομένων & Μετάδοση

Προοδευτική Σάρωση (50/60 Hz)

Διπλασιάζει τον ρυθμό δεδομένων του ασυμπίεστου βίντεο έως και τα 2,97 Gbps.

Πρωτόκολλο HD-SDI

Βασική διεπαφή για τη σειριακή ψηφιακή μετάδοση σήματος HD στην επαγγελματική παραγωγή.

Ψηφιακές Διεπαφές DVI & HDMI

HDMI: ρυθμοί έως 5 Gbps (εικόνα/ήχος).
DVI: ρυθμοί έως 1,65 Gbps.
HDCP: Προστατεύει το περιεχόμενο από μη επιτρεπόμενη εγγραφή.

Τύποι Συνδέσμων



HD-SDI



HDMI



DVI

Τέλος Ενότητας

Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 2.0.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Παντελής Μπαλαούρας,
«Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής, Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος.». Έκδοση: 2.0. Αθήνα,
2026. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.uoa.gr/courses/D476/> .

Σημείωμα Αδειοδότησης



Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/2)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων και ουσιαστικά αποτελεί μετεγγραφή των ακόλουθων έργων σε διαφάνειες:

[1] Παπαδάκης, Α. 2015. Παραγωγή Τηλεοπτικού Σήματος. *Ψηφιακή τηλεόραση*. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 2. Διαθέσιμο στο:

<http://hdl.handle.net/11419/5007>



- Η παρούσα παρουσίαση έχει οπτικοποιηθεί με χρήση του εργαλείου TN (AI) NotebookLM της Google.
- Για την δημιουργία του έχουν χρησιμοποιηθεί οι διαφάνειες του μαθήματος, οι οποίες και εμπεριέχονται.
- Συγγραφέας: Δρ. Παντελής Μπαλαούρας, Ε.Δ.Ι.Π., Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Ε.Κ.Π.Α.